

PHYSICS FOUNDATIONS SOCIETY

LUONNONFILOSOFIAN SEURA



# TIETEEN LYHYT HISTORIA

– vai pitkä tie luonnonfilosofian ja empirismin kohtaamiseen

Kolmas, täydennetty painos

TUOMO SUNTOLA



PHYSICS FOUNDATIONS SOCIETY  
LUONNONFILOSOFIAN SEURA

# TIETEEN LYHYT HISTORIA

– vai pitkä tie luonnonfilosofian ja empirismin kohtaamiseen

Kolmas, täydennetty painos

TUOMO SUNTOLA

PHYSICS FOUNDATIONS SOCIETY  
LUONNONFILOSOFIAN SEURA

[www.physicsfoundations.org](http://www.physicsfoundations.org) / [www.lfs.fi](http://www.lfs.fi)

E-BOOK (PDF)

Tämä e-kirja on lisensoitu käyttäjälle

[Creative Commons, Nimeä - Epäkaupallinen - Ei muutoksia 3.0 Ei sovitettu](#)  
käyttöluvalla.



Kansikuva: Thales (noin 625–546 eKr., *Wikimedia Commons*)

Sisäsivujen henkilökuvat: *Wikimedia Commons*

Copyright © 2018 *Tuomo Suntola*.

ISBN 978-952-68101-4-0 (sid.)

ISBN 978-952-68101-5-7 (PDF)

*Suurille ajatteliijoille ... kautta aikojen.*



## Sisällys

<b>ESIPUHE</b>	<b>11</b>
<b>JOHDANTO</b>	<b>13</b>
<b>1. ANTIIKIN LUONNONFILOSOFIASTA EMPIIRISEEN TIETEeseen</b>	<b>17</b>
Antiikin perintö	17
<i>Universumin rakenne</i>	19
<i>Aineen rakenne</i>	24
<i>Kohti uutta aikaa</i>	27
Kopernikuksen tähtitaivaasta Newtonin mekaniikkaan	29
<i>Newton ja Principia</i>	43
<i>Valon nopeus</i>	48
Newtonin avaruudesta Einsteinin avaruuteen	50
<i>Analyttinen mekaniikka</i>	51
<i>Termodynamiikka ja tilastollinen mekaniikka</i>	55
<i>Sähkömagnetismi ja valo-oppi</i>	57
Maxwellin yhtälöistä suhteellisuusteoriaan	65
Säteilykvantista kvanttimekaniikkaan	78
Suppeasta yleiseen suhteellisuusteoriaan ja kosmologiaan	86
<b>2. PERUSKÄSITTEIDEN MUOTOUTUMINEN</b>	<b>97</b>
<i>Postulaatit ja käsitteet</i>	109
<i>Avoimia kysymyksiä</i>	111
<b>3. DYNAAMINEN UNIVERSUMI</b>	<b>113</b>
Energian yhtenäinen ilmaiseminen	113
<i>Kvantin käsite</i>	125
Havainnot ja todellisuuskuva	129
<i>Energian rakentuminen Dynaamisessa Universumissa</i>	129
<i>Laajenevat ja ei-laajenevat objektit ja järjestelmät</i>	130
<i>Vuorokauden ja vuoden pituuden kehittyminen</i>	131
<i>Kaukoavaruuden havaitseminen</i>	133
<i>Massakeskuksen ympäristö</i>	138
<i>Taivaanmekaniikka, ellipsiradan pääakselin kiertyminen</i>	141
<i>Atomikellojen käyntitaajuus maapallolla ja läbiavaruudessa</i>	144
<b>4. LUONNONTIETEEN MALLIEN ARVIOINNISTA</b>	<b>147</b>
<i>Teoriarakenteet</i>	148
<i>Ekonomian periaatteen soveltaminen</i>	151

<b>LIITE I. HENKILÖGALLERIA</b>	<b>153</b>
Thales (noin 625–546 eKr.)	153
Anaksimandros (noin 610–546 eKr.)	153
Anaksimenes (noin 585–528 eKr.)	154
Pythagoras (noin 570–490 eKr.)	154
Herakleitos (noin 535–475 eKr.)	155
Parmenides (noin 510 eKr.)	156
Anaksagoras (noin 500–428 eKr.)	156
Empedokles (noin 492–432 eKr.)	157
Filolaus (noin 470–385 eKr.)	157
Leukippos (400-luku eKr.)	158
Demokritos (noin 460–370 eKr.)	158
Platon (424–348 eKr.)	159
Eudoksos (noin 408–355 eKr.)	160
Herakleides (noin 387–312 eKr.)	160
Aristoteles (384–322 eKr.)	161
Eukleides (noin 350–280 eKr.)	162
Epikuros (341–270 eKr.)	162
Aristarkhos (310–230 eKr.)	163
Arkhimedes (noin 287–212 eKr.)	164
Eratosthenes (276–194 eKr.)	164
Apollonius (noin 262–190 eKr.)	165
Hipparkhos (noin 190–120 eKr.)	165
Seleukos (noin 190–150 eKr.)	165
Klaudios Ptolemaios (noin 85–165 jKr.)	166
Johannes Philoponus (490–570)	166
Jean Buridan (noin 1300–1360)	167
Ibn al-Shatir (1304–1375)	168
Nikolaus Kopernikus (1473–1543)	169
Sir Thomas Digges (1546–1595)	172
Tyko Brahe (1546–1601)	172
Giordano Bruno (1548–1600)	173
Francis Bacon (1561–1626)	174
Galileo Galilei (1564–1642)	174
Johannes Kepler (1571–1630)	176
Thomas Hobbes (1588–1679)	177
René Descartes (1596–1650)	178
Pierre de Fermat (1601–1665)	179
Ismael Boulliau (1605–1694)	179
John Wallis (1616–1703)	180



---

Blaise Pascal (1623–1662)	180
Giovanni Cassini (1625–1712)	181
Robert Boyle (1627–1691)	182
Christiaan Huygens (1629–1695)	183
Christopher Wren (1632–1723)	184
Robert Hooke (1635–1703)	185
Isaac Newton (1643–1727)	186
Ole Römer (1644–1710)	188
Gottfried Leibniz (1646–1716)	188
Edmond Halley (1656–1742)	191
James Bradley (1693–1762)	192
Pierre Louis Maupertuis (1698–1759)	192
Daniel Bernoulli (1700–1782)	193
Benjamin Franklin (1706–1790)	193
Leonhard Euler (1707–1783)	194
Jean le Rond d'Alembert (1717–1783)	195
Immanuel Kant (1724–1804)	195
Henry Cavendish (1731–1810)	196
Joseph Priestley (1733–1804)	197
Joseph Louis Lagrange (1736–1813)	197
Charles-Augustin de Coulomb (1736–1806)	198
William Herschel (1738–1822)	199
Antoine Lavoisier (1743–1794)	199
Alessandro Volta (1745–1827)	200
Jean Delambre (1749–1822)	200
Pierre-Simon Laplace (1749–182)	201
Adrien-Marie Legendre (1752–1833)	202
John Dalton (1766–1844)	203
Joseph Fourier (1768–1830)	203
Thomas Young (1773–1829)	204
André-Marie Ampère (1775–1836)	205
Amedeo Avogadro (1776–1856)	206
Hans Christian Ørsted (1777–1851)	206
Carl Friedrich Gauss (1777–1855)	207
Siméon Denis Poisson (1781–1840)	208
François Arago (1786–1853)	208
Augustin-Jean Fresnel (1788–1827)	209
Georg Simon Ohm (1789–1854)	210
Michael Faraday (1791–1867)	211
Gustave Coriolis (1792–1843)	213

---

Sadi Carnot (1796–1832)	213
Benoît Paul Émile Clapeyron (1799–1864)	214
Christian Doppler (1803–1853)	214
Wilhelm Eduard Weber (1804–1891)	215
William Hamilton (1805–1865)	216
Julius von Mayer (1814–1878)	217
James Joule (1818–1889)	218
Léon Foucault (1819–1868)	219
Hippolyte Fizeau (1819–1896)	219
George Stokes (1819–1903)	220
Hermann von Helmholtz (1821–1894)	221
Rudolf Clausius (1822–1888)	222
William Thomson (1824–1907)	223
George Stoney (1826–1911)	224
James Clerk Maxwell (1831–1879)	225
Ernst Mach (1838–1916)	226
Josiah Willard Gibbs (1839–1903)	227
Ludwig Boltzmann (1844–1906)	227
Woldemar Voigt (1850–1919)	228
Oliver Heaviside (1850–1925)	229
George FitzGerald (1851–1901)	229
John Henry Poynting (1852–1914)	230
Albert Abraham Michelson (1852–1931)	230
Hendrik Lorentz (1853–1928)	231
Henri Poincaré (1854–1912)	233
Johannes Robert Rydberg (1854–1919),	234
Joseph John Thomson (1856–1940)	234
Heinrich Rudolf Hertz (1857–1894)	235
Joseph Larmor (1857–1942)	236
Max Karl Ernst Ludwig Planck (1858–1947)	237
Philipp Lenard (1862–1947)	238
Wilhelm Wien (1864–1928)	238
Hermann Minkowski (1864–1909)	239
Robert Millikan (1868–1953)	239
Arnold Sommerfeld (1868–1951)	240
Ernest Rutherford (1871–1937)	241
Walter Kaufmann (1871–1947)	241
Willem de Sitter (1872–1934)	242
Karl Schwarzschild (1873–1916)	243
Albert Einstein (1879–1955)	244

---

Richard Tolman (1881–1948)	246
Max Born (1882–1970)	247
Niels Henrik David Bohr (1885–1962)	248
Erwin Schrödinger (1887–1961)	248
Alexander Friedmann (1888–1925)	249
Edwin Powell Hubble (1889–1953)	249
Louis de Broglie (1892–1987)	250
Arthur Compton (1892–1962)	251
Georges Lemaitre (1894–1966)	251
Werner Heisenberg (1901–1976)	252
Paul Dirac (1902–1984)	253
Howard Robertson (1903–1961)	253
George Gamov (1904–1968)	254
Arthur Geoffrey Walker (1909–2001)	254
David Bohm (1917–1992)	255
Richard Feynman (1918–1988)	255



## Esipuhe

Tässä kirjassa arvioidaan luonnontieteiden kehitystä ja tieteiden tuottamaa todellisuuskuvaa antiikin luonnonfilosofiasta nykypäivän tieteeseen – matkalla filosofialähtöisistä hahmotelmista empiirisen tutkimuksen ja matemaattisen kuvauksen tuottamaan nykyiseen tieteelliseen käsitykseen fysikaalisesta todellisuudesta – sekä mahdollisuudesta tieteellisen maailmankuvan uudelleenarviointiin perustuen siihen tietoon, kokemukseen ja näkemykseen mitä tähänastinen kehitys on tuottanut.

Tarkastelun taustana on kirjoittajan pitkäaikainen työ Dynaamisen Universumin teorian kehittämissä. Työssä on korostunut kokonaisvaltainen luonnonfilosofinen lähtökohta, jossa painottuvat yksinkertaiset lähtöoletukset ja postulaatit, havaintojen kokonaisvaltainen tarkastelu, selkeä logiikka ja matemaattinen kuvaus sekä ennusteiden tarkka vastaavuus havaintoihin.

Tieteen historia osoittaa, että valtaosa tieteen edistyksestä on tapahtunut pienin askelin. Suurten edistysaskeleiden tekijät ovat yleensä kyenneet yhdistämään eri osa-alueilla tehtyjä havaintoja ja päätelmiä. Newtonin mekaniikassa, joka antoi suunnan fysiikan antiikin jälkeiselle kehitykselle, täydentyivät ja yhdistyivät Kopernikuksen aurinkokuntamalli, Tyko Brahen havaintoihin perustuneet Keplerin yhtälöt, Galileo Galilein koetulokset sekä René Descartes'in ja Christiaan Huygensin hahmottama liikemäärän käsite sekä Pierre de Fermat'n ja John Wallisin esityöt differentiaali- ja integraalilaskennan kehittämiseksi. Isaac Newtonin Principia käynnisti matematiikan ilmiömäisen kehityksen 1700-luvulla, ehkä jossain määrin fysiikan kustannuksella; esimerkiksi Lagrangen analyyttinen mekaniikka ja Laplacen potentiaalikäsite olivat ensisijaisesti matemaattisia rakennelmia, vaikka ne samalla antoivat työkaluja myöhemmin keskeiseksi fysiikan laiksi tunnistetun energian säilymisen hahmottumiseen. Energian käsite työnä, integroituna voimana ja fysiikan osa-alueita yhdistävänä suurena täsmentyi vasta koneopin, termodynamiikan, ja sähkömagnetismin myötä.

Maxwellin yhtälöissä yhdistyi syvällinen näkemys mekaniikan peruslaeista ja viidenkymmenen vuoden aikana tehdyistä sähkö- ja magneetti-ilmiöihin liittyvistä kokeista ja päätelmistä.

Einsteinin suppea suhteellisuusteoria ei olisi syntynyt ilman useiden tutkijoiden koikeita, havaintoja, päätelmiä ja matemaattisia tarkasteluja 1800-luvun lopulla. Kvanttimekaniikan hahmottuminen 1900-luvun ensimmäisinä vuosikymmeninä oli Planckin yhtälöstä ja Einsteinin valosähköisen ilmiön tulkinnasta ja Bohrin atomimallista alkunsa saanut prosessi. Kvanttimekaniikka ja sen johdannaisten muoto löytyi vasta monen kokeellisen ja teoreettisen tarkastelun jälkeen.

Yleinen suhteellisuusteoria samasti gravitaatiokiihtyvyyden ja suppean suhteellisuusteorian mukaisen inertiaalkiihtyvyyden, mikä johti gravitaation kuvaamisen aika-avaruuden geometrian termein. Yleiseen suhteellisuusteoriaan nojautuvassa kosmologiassa tarvittiin puolestaan aineksia sekä yleisestä että suppeasta suhteellisuusteoriasta ja kvanttimekaniikasta.

Tässä kirjassa esitetty tieteen historian kuvaus rajoittuu fysiikkaan, tähtitieteeseen ja kosmologiaan. Se painottuu asioihin, jotka olen nähnyt keskeisiksi nykyisen tieteellisen maailmankuvan rakentumiselle ja sen uudelleenarvioimiselle. Syntyhistoriastaan johtuen eri osa-alueita kuvaavat teoriat ovat rakentuneet postulaateille, jotka ovat osittain yhteen sopimattomia. Postulaattien moninaisuus ja yhteensopimattomuus rajoittavat mahdollisuuksia nykyisten teoriarakenteiden yhdistämiseen. Esitetty uudelleenarviointi perustuu universumin tarkasteluun kokonaisvaltaisena energiasysteeminä, jolloin paikalliset ilmiöt kytkeytyvät kokonaisuuteen ja sitä kautta toisiinsa samojen kaikelle yhteisten säilymlakien ja postulaattien puitteissa.

Tällä kirjalla haluan ilmaista kunnioitukseni tieteen edistämisen ja toimivan todellisuuskuvan kehittämisen hyväksi toimineille tutkijoille ja ajattelijoille kaikkina aikoina, sekä kirjassa mainituille että sille suurelle joukolle, joiden panos on vain epäsuorasti tullut huomioduksi. Uusissa löydöksissä yhdistyy tekijän hahmotus kaikkeen siihen mennessä kerättyyn tietoon ja näkemyksiin. Historia osoittaa myös, että innostavat opettajat ovat olleet ratkaisevassa asemassa monen merkittävän tietentekijän saavutuksille.

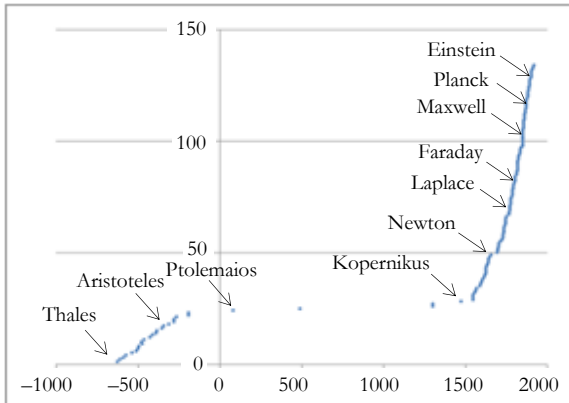
Esitän kiitokseni ja arvostukseni tiedon vapaalle saatavuudelle, jonka Internet ja siinä toimivat yleishyödylliset yhteisöt ja vapaaehtoisorganisaatiot ovat tehneet mahdolliseksi. Erityisen tärkeänä olen kokenut tieteen alkuperäisteosten ja -artikkelien saatavuuden. Olenkin lisännyt kirjan tekstiin ja kirjallisuusviitteisiin linkkejä, joista lukija löytää sekä täydentävää tietoa että tekstin taustalla olevia alkuperäiskirjoituksia. Kirjallisuusviitteet on esitetty alaviitteinä tekstisivuilla ja Liitteen 1 Henkilögalleriassa listana kunkin henkilökuvauksen yhteydessä. Kirjan kuvitus perustuu omien piirrosteni lisäksi lähinnä *Wikimedia Commons* sivustolta vapaasti saatavissa olevaan kuvamateriaaliin.

Tässä 3. painoksessa luvut 2-4 on uusittu helppolukuisempaan muotoon. Myös kirjan lukuisat [www-linkit](#) on päivitetty, mistä kiitos tyttärentyttärelleni Senjalle. Lukuun 1, *Antiikin luonnonfilosofiasta empiriseen tieteeseen* ja Liitteen 1 *Henkilögalleriaan* ei ole tehty muutoksia.

Esitän parhaat kiitokseni arvokkaista kommentteista kollegoilleni Physics Foundations Societyssä; Tarja Kallio-Tammiselle, Ari Lehdolle, Heikki Sipilälle ja Avril Styrmanille sekä moniin syvällisiin keskusteluihin osallistuneille Luonnonfilosofian seuran jäsenille. Lämpimät kiitokseni vaimolleni Soilikille ja tyttärelleni Siljalle ja hänen perheelleen tuesta ja kannustuksesta.

## Johdanto

Tämän tutkielman tavoitteena on ollut jäljittää kehityspolkuja luonnontieteiden nykyisiin teorioihin ja niihin perustuvaan todellisuuskuvaan sekä tarkastella luonnonfilosofisen ja empiirisen lähestymistavan toteutuneita ja toteutumattomia vuorovaikutuksia. Polun alkupisteeksi on valittu antiikin Thales (noin 625–546 eKr.), jota pidetään tunnetun länsimaisen tiedeperinteen luoja. Thaleen ajasta nykypäivään vaikuttaneesta suuresta tutkijoiden joukosta valikoitui tähän tarkasteluun vajaan sadanviidenkymmenen tutkijan joukko – heistä reilut kaksikymmentä sijoittui antiikkiin ajalle ennen ajanlaskumme alkua, seuraavat kaksikymmentä heistä reilun 1500 vuoden päähän Kopernikuksen–Newtonin tieteellisen vallankumouksen jaksoon ja loput vajaat sata tasaisesti 1700-luvulta nykysteorioiden syntyyn 1900-luvun alkupuoliselle.



Luonnontieteen kehitykseen merkittävästi vaikuttaneiden tutkijoiden kumuloituvaa joukkoa 600-luvulta eKr. 1900-luvulle jKr., tutkijoiden syntymävuoden mukaan kuvattuna (Liite I, Henkilögalleria).

Antiikin aktiivisia vuosisatoja seurasi yli 1500 vuoden ajanjakso, jolloin tieteen kehittyminen oli lähes pysähdyksissä. Nykypäivän matemaattiseen fysiikkaan ja empiiriseen luonnontieteeseen johtanut kehitys käynnistyi Newtonin *Principia* teoksesta 1600-luvun lopulla ja sen taustana olleesta Kopernikuksen ja Keplerin vallankumouksesta.

Antiikin luonnontiede painottui perusprinsiippien pohdiskeluun, empiiristä tutkimusta edusti lähinnä tähtitiede, joka tuotti taivaankappaleiden liikkeitä kuvaavia malleja. Tähtitaivas ja taivaankappaleiden liikkeet jäivät jokseenkin irrallisiksi ”maanpäällisen” fysiikan ilmiöiden kuvaamisesta, mitä edusti lähinnä Aristoteleen liikeoppi. Aineoppi rajoittui aineiden laadulliseen kuvaukseen, ajatukset aineen olemuksesta ja kautuivat jatkuvaluonteiseen kaiken substanssiin ja toisaalta enemmän tai vähemmän toisistaan riippumattomiin jakamattomiin atomeihin.

Luonnonfilosofisella tasolla antiikin anti oli merkittävä; jatkuvuus, kaiken yhteys, kausaalisuus, luonnon tasapaino, harmoniset suhteet ja matemaattinen kauneus ymmärrettiin luonnon perusprinsiipeiksi. Tieteen tavoitteeksi ymmärrettiin luonnon ymmärrettäväksi tekeminen ja laadulliseksi kriteeriksi mallit, jotka voitiin johtaa primäärisistä luonnonlaeista mahdollisimman vähin lisäpostulaatein. Luonnonfilosofin lähestyminen ja periaatteiden tunnistaminen ei kuitenkaan riittänyt tieteen tavoitteiden saavuttamiseen; antiikin luonnonfilosofia jäi odottamaan empiirisen tieteen nousua yli 1500 vuoden ajaksi.

Newtonin *Principia* laukaisi matemaattisen fysiikan kehityksen; yksi ratkaisevista askeleista oli taivaanmekaniikan yhdistäminen liikelakeihin. Liikelait edellyttivät hitausvoiman ja massan käsitteiden määrittelyä; yhdistäminen taivaanmekaniikkaan perustui ekvivalenssiperiaatteeseen, jolla Newton kytki hitausvoiman gravitaatiota kuvaavaan keskiahkuisvoimaan. Matematiikan ilmiömäinen kehitys 1700-luvulla täydensi Newtonin mekaniikan menestyksen, ja maailma näyttikin lähes valmiilta 1800-luvun alkupuolella.

Liikelakien soveltaminen edellyttää lepotilan käsitettä. Vaikka Newtonin taivaanmekaniikka edellytti tarkastelukoordinaatiston kiinnittämistä ympäröiviin kiintotähtiin, näyttivät liikelait toimivan sekä maan pintaan nähden levossa oleville että sen suhteen tasaisessa liikkeessä oleville havaitsijoille. Näin lepotilasta oli muodostunut jakamaton oikeus, minkä jo Galileo Galilei oli tulkinnut luonnonlain kaltaiseksi suhteellisuuspäätökseksi.

Uuden lisäyksen jo tunnettuun ilmiömaailmaan toivat kuitenkin sähkömagnetismiin liittyvät havainnot, joiden matemaattinen mallinnus edellytti uusia käsitteitä ja mekaniikan lakien uudenlaista tarkastelua. Avuksi tuli energiakäsite, joka alkujaan oli implisiittisesti sisältynyt Newtonin aikalaisen, Gottfried Leibnizin käyttämään elävän voiman *vis viva* käsitteeseen. Kootessaan sähkömagnetismista tehdyt havainnot yhtenäiseksi matemaattiseksi malliksi, muodosti James Maxwell mekaanisen analogian liikkeen ja potentiaalienergian vuorovaikutuksesta, mikä mahdollisti harmonisen oskillaattorin ja sähkömagneettisena aaltona etenevän energian kuvaamisen. Mekaniikassa energia tunnustettiin integroiduksi voimaksi ja ensisijaiseksi säilyjäksi suljetuissa systeemeissä. Energiakäsite synnytti samalla sillan mekaanisten, sähkömagneettisten ja lämpötekniisten suureiden ja systeemien välille.

Sähkömagneettinen säteily ja erityisesti säteilyn etenemisnopeus toi uusia ongelmia. Kinemaattisin perustein johdettujen lineaaristen koordinaatistomuunnosten avulla kytketyt paikallisilmiot eivät vastanneet havaintoja. Suhteellisuuspäätöksen laajenus sähkömagneettisiin ilmiöihin edellytti koordinaatistosuureiden uudelleenmäärittelyä; ajasta ja etäisyydestä tehtiin muuttujia, joiden paikalliset arvot määräytyivät havaittavan objektin nopeudesta, ja myöhemmin myös gravitaatiotilasta havaitsijaan nähden. Paikalliselle havaitsijalle kaikki säilyi näin ennallaan ja suhteellisuuspäätöksen, jonka mukaan luonnonlait näyttävät kaikille paikallisille havaitsijoille samanlaisina, oli pelastettu.

Toisentyypinen ongelma klassiseen todellisuuskuvaan muodostui atomaaristen ilmiöiden käyttäytymisestä. Klassisen mekaniikan edellyttämä jatkuvuus keskeisten fysiikan suureiden kuten paikan, nopeuden ja energian suhteen näytti olevan uhattuna. Lisäksi käsitteet hämärtyivät; hiukkasilla näytti olevan aalto-ominaisuuksia ja säteilyllä hiukkasominaisuuksia. Atomaaristen ilmiöiden kuvaaminen eriytyi omiin postulaatteihinsa perustuvaan kvanttimekaniikkaan, joka selitti suurella tarkkuudella havaitut ilmiöt, mutta hämmensi entisestään jo suhteellisuusteorian hämärtämää todellisuuskuvaa.

Empiirisen tieteen tuottamien teoriarakenteiden ja tulosten palauttamista kaikelle yhteisten luonnonlakien ja käsitteiden määrittelemään viitekehukseen tarkastellaan energiaperiaatteeseen perustuvasta Dynaamisen Universumin mallista lähtien. Suhteellisuuspäätöksen takaa voidaan tunnistaa avaruuden kokonaisenergian äärellisyys.



Kokonaisvaltaisessa tarkastelussa energia, jonka objektit käyttävät liikkeeseen tai paikalliseen gravitaatioon avaruudessa, pienentää energiaa, joka objektilla on käytettävissä sisäisissä prosesseissa. Liikkeessä tai massakeskuksen läheisyydessä oleva atomikello käy hitaammin, koska se käyttää osan energiastaan liikkeeseen tai paikalliseen gravitaatioon avaruudessa, ei siksi että liiketila havaittavana nähdessä aiheuttaisi ajan hidastumista. Avaruuden rakenne on kuvattavissa kokonaisuuteen kytkeytyvien sisäkkäisten energiakemysten järjestelmänä, jossa toteutuvat sekä globaalit että paikallisen lepotilan tunnusmerkit. Energiatarkastelussa massa kuvautuu aaltoluonteiseksi energian ilmentämisen substanssiksi ja massaobjektit seisovan aallon rakenteiksi.

Tieteen historialliseen kehitykseen kytkettynä energiatarkeastelussa toteutuu pitkälti antiikin luonnonfilosofien periaatteet ja prosessi, jossa intuitiivinen hahmotus, empiiriset faktat ja matemaattinen tarkkuus saadaan kohtaamaan. Tavoitteena on saada filosofian, logiikan ja havaintojen ympyrä sulkeutumaan kaikelle yhteisiin luonnonlakeihin perustuen.



# 1. Antiikin luonnonfilosofiasta empiiriseen tieteeseen

## Antiikin perintö

Antiikin luonnonfilosofia painottui perusprinsiippien pohdiskeluun. Keskeisiä kysymyksiä olivat mm. maailman synty, sen rakennusaineet ja kaiken takana oleva järjestys. Maailman syntyyn liittyi vahva uskonnollinen kytkeä, luonnon rakenteissa ja ilmiöissä nähtiin säännönmukaisuutta ja harmoniaa, joka yhdisti luonnonlait toisaalta kaikkeuden järjestykseen, ja toisaalta matematiikkaan, geometriaan ja musiikkiin, joiden kautta ihminen voi tunnistaa ja ymmärtää kaikkeuden järjestystä. Antiikin maailma oli maakeskinen ja sitä ympäröivät auringon, kuun ja planeettojen kiertoradat sekä pyörivä kiintotähtien kehä.

Antiikin perintö luonnontieteille välittyi suurelta osin Aristoteleen *Metafysiikasta*<sup>1,2</sup> ja *Fysiikasta*<sup>3</sup> joissa kulminoituu edeltävän kahden vuosisadan ajattelu. Aristoteles aloittaa kirjansa *Metafysiikka* toteamuksella: ”*Ihmisellä on luonnostaan halu tietää.*” Aristoteles katsoo, että tietämisen tavoitteena on viisauden saavuttaminen, joka edellyttää syiden tuntemista. ”*Tämän keskustelumme tavoitteena on, että jokainen ymmärtää viisauden merkitsevän ymmärrystä ensisijaisista syistä ja periaatteista.*”

Aristoteleen keskeinen viesti luonnonfilosofiasta sisältyy ajatukseen primäärisistä luonnonlaeista ja ensisijaisesta syystä: ”*Tärkeimpiä ovat tieteet, jotka voidaan johtaa primäärisistä luonnonlaeista mahdollisimman vähin lisäpostulaatein.*” Aristoteleen ajattelussa ilmiön syy kytkeytyy kausaalisuuteen; aktualisuus on seurausta potentiaalisuuden toteutumisesta.

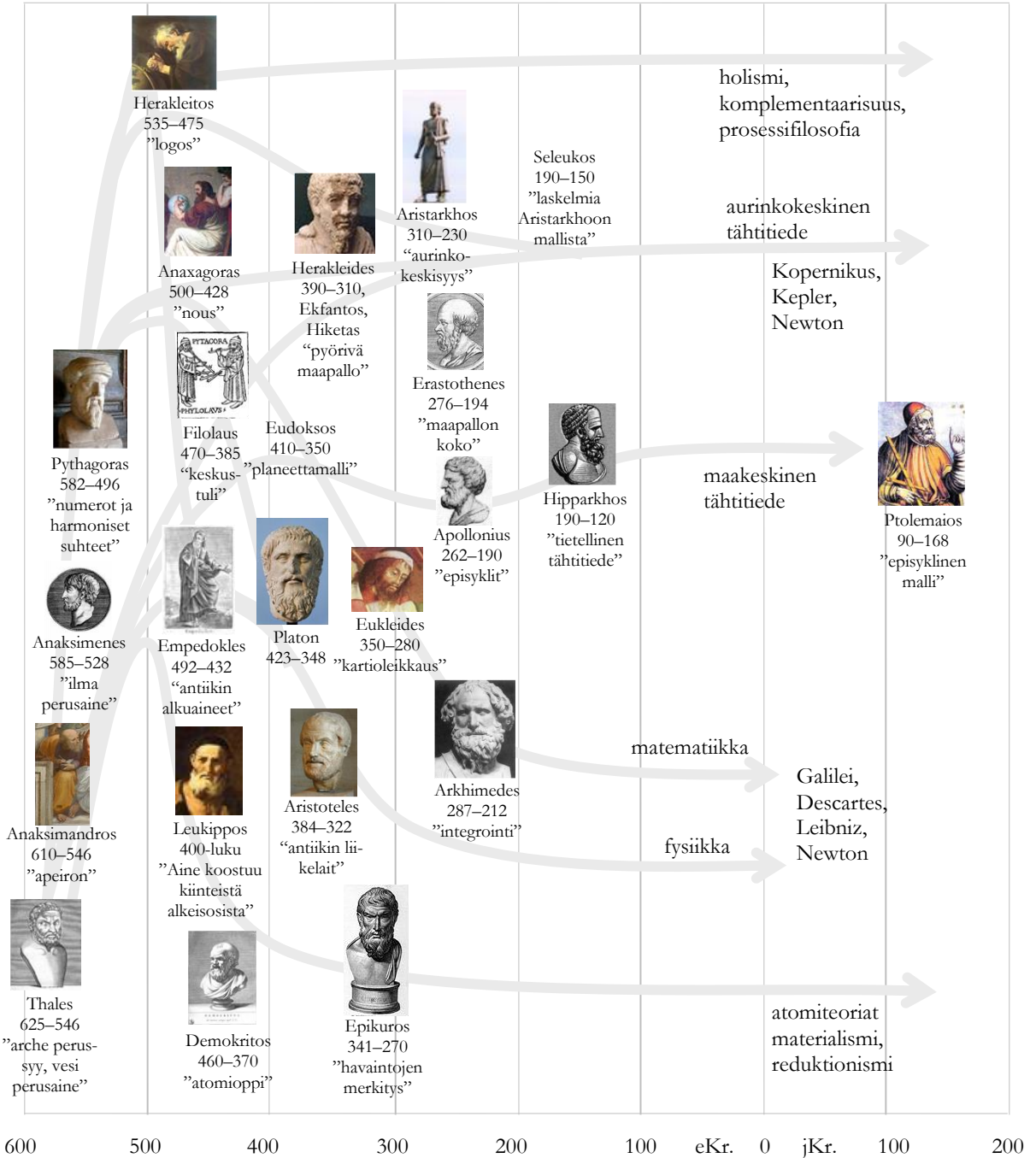
Kuvassa 1-1 on hahmoteltu ajatussuuntien kehitystä kahdeksan vuosisadan aikana vuodesta 600 eKr. vuoteen 200 jKr. Kuvaan piirretyt nuolet hahmottavat summittaisesti tähtitieteen, liikeopin ja aineopin erkaantumista ja kehittymistä omiksi tieteenaloikseen.

Länsimaisen luonnontieteen juuret johdetaan yleensä kreikkalaiseen Thalesiin, joka oli sekä valtiomies että filosofi, insinööri, matemaatikko, astronomi ja kosmologi. Thales pyrki irrottamaan luonnontieteet mytologiasta ja etsimään luonnonilmiöille ymmärrettäviä selityksiä. Kaiken taustalla oleva perussyy, mytologiasta periytynyt jumalallista alkuperää oleva *arche*, kuvasi perussubstanssia, josta kaikki aineet ja niiden erilaiset ilmenemiset ovat peräisin, ja jotka määrittivät olosuhteen ja muodot kaikelle ilmenevälle. Thales näki vedessä *archen* olemusta ja opetti, että kaikki aineet ovat johdannaisia vedestä. Universumi oli maakeskinen; tähdet, planeetat, aurinko ja kuu kiersivät vedessä kelluvaa litteää maata.

<sup>1</sup> *Metaphysics of Aristotle* by T. Taylor (1801), [openlibrary.org](https://openlibrary.org)

<sup>2</sup> *Metaphysics by Aristotle*, Translated by W. D. Ross, The Internet Classics Archive

<sup>3</sup> *Physics by Aristotle*, Translated by W. D. Ross, The Internet Classics Archive



Kuva 1-1. Antiikin luonnontieteen kehittäjiä ja kehityssuuntia.

## Universumin rakenne

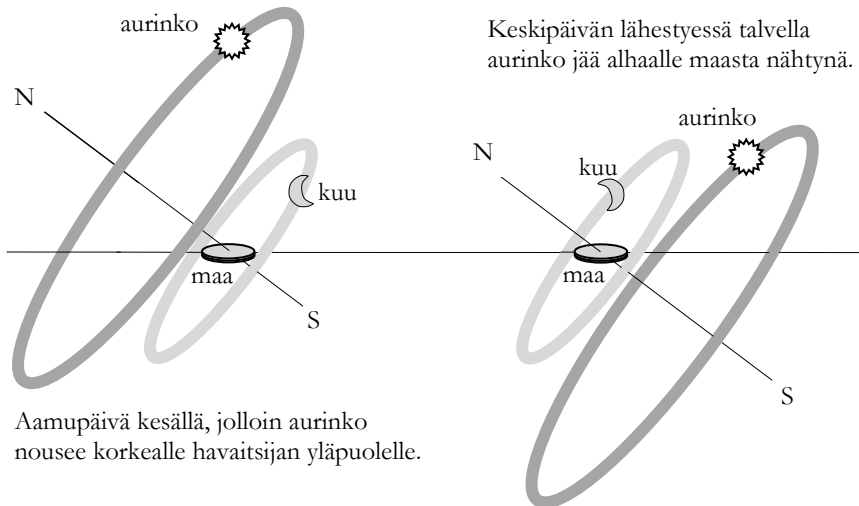
### *Maakeskeisen mallin kehitys*

Antiikin ajan ”virallinen” kuva universumista säilyi maakeskeisenä Thalesista Ptolemaioon. Ensimmäisen tunnetun tähtitaivaan mallin esitti Thaleen oppilas Anaksimandros. Hän hylkäsi Thaleen ajatuksen maasta vedessä kelluvana laattana ja antoi maalaatan kellua vapaasti avaruudessa, mikä mahdollisti taivaankappaleille täydet 360° kiertoradat. Maata kiertävä pallomainen tähtien kuori oli avaruudessa lähimpänä maata. Kuoren takana olivat kuun ja auringon kehät, jotka liikkuivat syklisesti pohjois-eteläsuunnassa antaen vuoden rytmin ja vuodenaikojen vaihtelun, kuva 1-2.

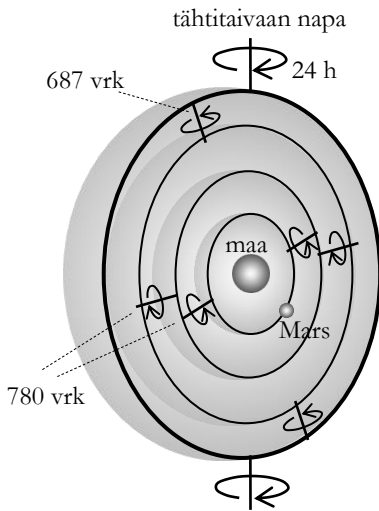
Anaksimandroon malli asetti kiintotähdet ja planeetat samaan kuoreen. Planeetat olivat tähtitaivaan vaeltajia (*planetes*, ”vaeltaja”), joiden liike poikkesi kiintotähtien tasaisesta liikkeestä taivaankannen yli. Aamulla ja illalla auringon läheisyydessä näkyvä Venus ymmärrettiin pitkään kahdeksi eri tähdeksi, aamutähdeksi ja iltatähdeksi. Vasta Pythagoraan kuvattua maan laatan asemasta palloksi, oivallettiin, että kyseessä on yksi ja sama tähti.

Anaksimandroon malli oli tähtien ja planeettojen suhteen pallosymmetrinen, mutta auringon ja kuun suhteen sylinterisymmetrinen. Malli ei antanut selitystä planeettojen vaellukselle. Maakiekon säteeseen nähden tähtien kehän säde oli noin 9-kertainen, kuun radan säde noin 18-kertainen ja auringon radan säde noin 27-kertainen.

Vasta noin 200 vuotta myöhemmin Platonin oppilas Eudoksos kehitti planeettojen liikettä tarkemmin kuvaavan sisäkkäisten kuorten mallin, jossa planeettojen ratoja voitiin kuvata useamman erisuuntaiset akselit omaavien, eri nopeuksilla pyörivien



Kuva 1-2. Anaksimandroon universumi muodostui litteästä maasta ja sitä ympäröivästä tähtitaivaasta. Tähtitaivaan kehä, jota ei ole piirretty kuvaan oli auringon ja kuun kehien sisäpuolella. Auringon kehän vuotuinen siirtymä pohjois-eteläakselin suunnassa synnytti vuodenajat.



Kuva 1-3. Eudoksoon planeettamalli muodostui sisäkkäisistä pallomaisista kuorista, joiden keskipisteessä on maa. Ulomman kuoren pyöriminen antoi tähtitaivaan päivittäisen kiertoliikkeen. Kuvassa Mars-planeetan liikkeen kuvaamiseen tarvitut kuoret.

pallomaisten kuorten avulla, kuva 1-3. Kiintotähtien kuori oli Eudoksoon mallissa erotettu omakseen. Pallosymmetria viestitti pythagoralaista täydellisen muodon filosofiaa. Eudoksoon omia kirjoituksia ei ole säilynyt, mutta hänen malliaan on kuvattu mm. Aristoteleen *Metafysiikassa*<sup>4</sup> (luku XII, 8). Eudoksoon mallissa oli alunperin 27 planeettakuorta ja yksi kiintotähtien kuori. Mallia täydensi vielä 300-luvulla eKr. elänyt Kallippos, joka lisäsi planeettojen kuorten määrän 34:ään. Eudoksoon ja Kallippoon malli kuvasi planeettojen liikkeitä jonkinlaisella tarkkuudella, mutta kuorten maakeskeisestä pallosymmetriasta johtuen se ei selittänyt planeettojen etäisyysmuutoksista johtuvia kirkkauksien muutoksia.

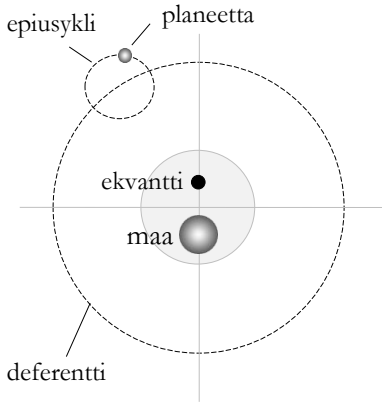
200-luvulla eKr. elänyt matemaatikko ja tähtitieteilijä Apollonius kehitti episyklin kuvaamaan eksentristä planeettarataa. Aurinkokuntamallina episykleihin perustuvat planeettaradat tulivat vasta Ptolemaioon työn myötä 100-luvulla jKr.

Episyklimalin perustana on maakeskinen järjestelmä, jossa sekä aurinko että planeetat kiertävät maata. Planeettaratojen perusympyrän keskipiste ei ole tarkasti maa vaan piste jonkin verran sivussa. Maahan nähden symmetrisesti ko. keskipisteen toisella puolella oli *ekvantti*-piste, jonka suhteen planeettojen episyklin keskipiste liikkui vakio kulmanopeudella perusympyrää myöten. Episykleillä voitiin kuvata ulkoplaneettojen näennäinen suunnanmuutos, joka johtuu maan omasta rataliikkeestä, kuva 1-4.

Ptolemaioksen esittämässä muodossa teoria tuli tunnetuksi hänen noin 150 jKr. laa- timastaan teoksesta *Mathematike Syntesis*, joka on laaja yhteenveto tuolloin tunnetusta tähtitieteestä ja joka myöhemmin tuli tunnetuksi arabialaisperäisellä nimellä *Almagest*<sup>5</sup>. Kolmetoistaosainen *Almagest* oli tähtitieteen perusteos ja luotetuin tietolähde 1500-luvun lopulle, jolloin Tyko Brahe tarkkojen mittaustensa perusteella löysi mm. systemaattisia virheitä *Almagestin* tähtiluettelosta.

<sup>4</sup> Aristoteles, *Metafysiikassa*

<sup>5</sup> Richard Fitzpatrick, *A Modern Almagest*, <http://farside.ph.utexas.edu/Books/Syntaxis/Almagest.pdf>



Kuva 1-4. Episyklisysteemin rakenne. Planeetan radan määrää kiertoliike episyklillä, joka puolestaan kiertää deferenttiä myöten tasaisella kulmanopeudella ekvanttiin nähden. Deferentin keskipiste ei ole maa, vaan maan ja ekvantin puolivälissä oleva piste.

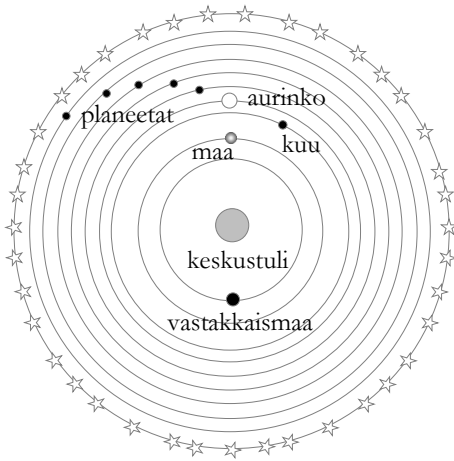
### *Ajatuksia maakeskeisyydestä luopumiseen*

Antiikin matematiikan ja geometrian isä, Pythagoras, lienee pitkälti omaksunut Anaksimandron maailmankuvan. Pythagoraan merkitys kosmologisen maailmankuvan kehittymiseen on kuitenkin epäselvä. Hänen vakaumuksensa oli, että luonnossa kaiken takana on matematiikka ja harmoniset suhteet. Matemaattisilla suhteilla oli yhteys musiikkiin. Niinpä taivaankappaleet liikkeillään synnyttivät ”sfäärien sinfonian”. Käytännön tähtitieteen tasolla Pythagoraan tiedetään oletettaneen, että maapallo on pyöreä. Hän huomasi myös mm., että kuun rata muodostaa pienen kulman päiväntasaajan tason kanssa. Hän lienee myös ensimmäisiä, joka ymmärsi, että iltatähti Venus on sama kuin aamutähti Venus.

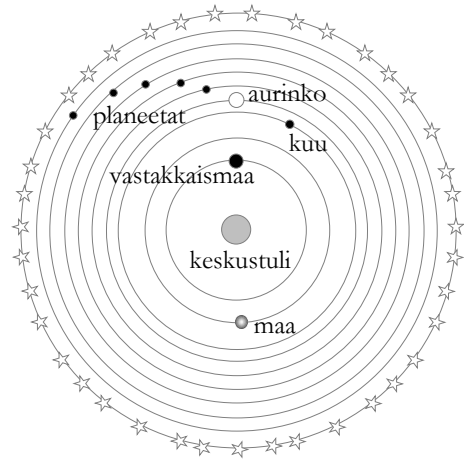
Pythagoralaiseen koulukuntaan kuulunut 400-luvulla eKr. Crotonissa, Etelä-Italiassa elänyt filosofi ja monitieteilijä Filolaus lienee ensimmäinen, joka haastoi maakeskeisyyden vaihtoehtoisella mallilla. Filolauun mallissa universumin keskuksen muodosti keskustuli, josta kaikki valo oli peräisin; aurinko oli lasikiekko, joka heijasti keskustulen valon.

Taivaankappaleet, maa mukaan luettuna, sijoituivat kymmeneen kehään keskustulen ympärille<sup>6</sup>. Ulommaisessa olivat kiintotähdet, sen sisäpuolella viisi planeettaa, aurinko kuu ja maa sekä sisimmässä kehässä maata keskustulelta varjostava nimeämätön taivaankappale. Kiintotähdet muodostivat kiinteän taustan, jonka suhteen muut taivaankappaleet liikkui ympyrärataa. Kuu kiertää ratansa ympäri kuukaudessa, aurinko vuodessa, kukin planeetta vuotuisen kiertoaikansa mukaisesti ja sisimpänä maa kerran vuorokaudessa. Maa kiersi radallaan siten, että tunnettu maailma pysyi koko ajan pois päin keskustulesta. Malli välitti perushavainnot yksinkertaisilla ympyräliikkeillä, mutta se ei selittänyt esim. planeettojen kirkkauden (etäisyyden) muutoksia, pysähdyksiä ja suunnanmuutoksia, joita Filolauun aikaan ei vielä tunnettu, kuva 1-5.

<sup>6</sup> [Stanford Encyclopedia of Philosophy, Philolaus](#)



Maa ja aurinko keskipäivällä



Maa ja aurinko keskiyöllä

Kuva 1-5. Filolauun malli, jossa maa, aurinko, kuu ja planeetat kiertävät kukin radallaan keskustulta. Sisimmällä radalla keskustuleen nähden vastakkaisella puolella kiertävä nimetön taivaankappale, vastakkaismaa (Counter Earth), ”tasapainottaa” systeemin. Maan asuttu puoli osoittaa koko ajan pois päin keskustulesta. Maa kiertää rataansa kerran vuorokaudessa, kuu kerran kuukaudessa ja aurinko kerran vuodessa. Planeetat kiertävät radoillaan vuotuisen kiertoaikansa mukaisesti.

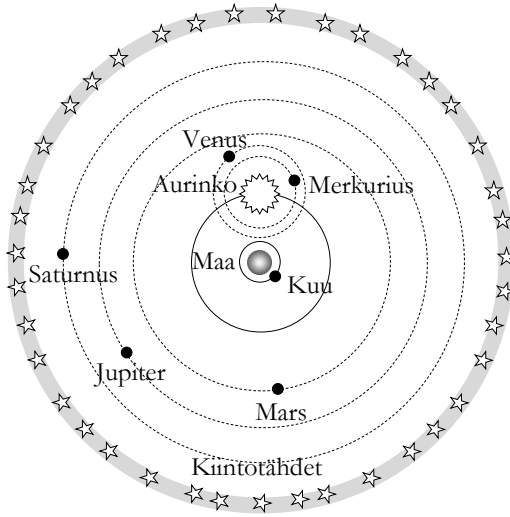
Filolaus määritteli kuukauden pituudeksi  $29\frac{1}{2}$  päivää (tarkka arvo 29,53) ja aurinkovuoden pituudeksi  $365\frac{1}{2}$  päivää (tarkka arvo 365,2564).

Myös atomismin kehittäjänä paremmin tunnettu Demokritos kyseenalaisti maan aseman muuttumattomana ja ainutlaatuisena keskuksena. Hän näki maan ja taivaankappaleet seurauksena atomien törmäilyjen muodostamasta kokonaisuudesta, jolla on alku ja loppu. Maailma voisi tuhoutua törmätessään toiseen maailmaan. Demokritos oivalsi, että Linnunrata koostuu kaukaisista tähdistä, ja ajatteli, että elämää voi esiintyä maan lisäksi myös muilla taivaankappaleilla.

300-luvulla eKr. elänyt pythagoralaista filosofiaa edustava Platonin Akatemian jäsen Herakleides kyseenalaisti maan aseman staattisena keskuksena päätellessään, että taivaankappaleiden päivittäinen liike johtuu maan pyörimisestä oman akselinsa ympäri. Hän oivalsi myös, että ainakin Merkurius ja Venus kiertävät aurinkoa eikä maata. Ulommat planeetat, Mars, Jupiter ja Saturnus kiersivät Herakleideen mallissa todennäköisesti maata, kuva 1-6.

Arkhimedeen (287–212 eKr.) muistiinpanojen mukaan, hänen opettajansa, Aristarkhos, oli oivaltanut planeettakunnan aurinkokeskisyyden ja lisännyt maan yhtenä planeettana aurinkoa kiertävien viiden tunnetun planeetan ryhmään. Aristarkhos oli selittänyt päivän ja yön vaihtelut Pythagoralaisten Hiketaan (noin 400–335 eKr.), Ekfantoon ja Platonin Akatemian Herakleideen tapaan maan pyörimisellä.





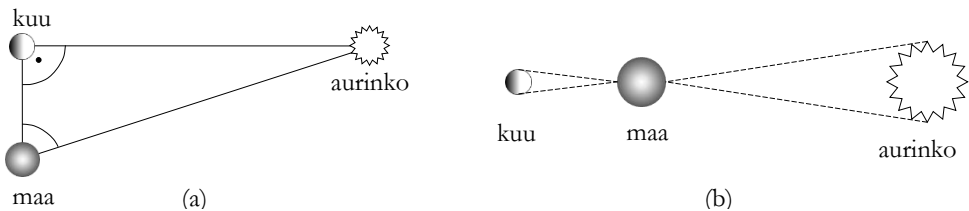
Kuva 1-6. Herakleideen arvellaan esittäneen mallin, jonka mukaan ainakin Merkurius ja Venus kiersivät maata kiertävää aurinkoa. Ulkoplaneettojen Mars, Jupiter ja Saturnus hän todennäköisesti oletti kiertäneen maata.

Tähtitaivaan näennäisen vuorokautisen liikkeen hän selitti maan pyörimisellä oman akselinsa ympäri, joten kiintotähtien kehä pysyi liikkumattomana.

Aristarkhoon mallissa maa pyörii oman, ekliptikatasoon nähden kallistuneen akselinsa ympäri ja kuu kiertää maata. Aristarkhos sijoitti kaikki hänen aikanaan tunnetut planeetat oikeille paikoilleen aurinkoa kiertävillä radoillaan: Merkurius, Venus, Maa, Mars, Jupiter ja Saturnus.

Aristarkhoon ajatukset aurinkokeskisyydestä eivät saaneet kannatusta aikalaisiltaan. Myöskään noin sata vuotta Aristarkhoon jälkeen elänyt, systemaattisen tähtitieteen isänä pidetty Hipparkhos ei omaksunut aurinkokeskeistä mallia, vaikka hänen arvelaan sitä tutkineen. Hipparkhoon aikalainen Seleukos (noin 190–150 eKr.) sen sijaan kannatti aurinkokeskeistä mallia. Hän oli tiettävästi ensimmäinen, joka ehdotti, että avaruus on ääretön.

Aristarkhoon kirja aurinkokeskeisestä järjestelmästä ei ole säilynyt jälkipolville, se on tunnettu lähinnä Arkhimedeeseen, sekä mallia vastustavien kirjoitusten ansiosta. Aristarkhoolta on kuitenkin säilynyt kirja, joka kuvaa mittauksia, joilla hän selvitti aurion ja kuun kokoa ja etäisyyksiä. Mittaukset eivät liittyneet aurinkokeskeiseen malliin. Aristarkhoon säilyneiden kirjoitusten mukaan hän päätteli kuun ja auringon etäisyyksien suhteen puolenkuun aikaan tekemistään kulmamittauksista. Saamastaan tuloksesta hän päätteli myös kuun ja auringon kokojen suhteen, kuva 1-7.



Kuva 1-7. (a) Aristarkhos arvioi auringon ja kuun etäisyyksien suhteeksi 19:1 mittaamalla kuun ja auringon välisen kulman puolen kuun aikaan, jolloin aurinko ja maa ovat kuusta katsoen noin  $90^\circ$  kulmassa (oikea arvo etäisyyksien suhteelle on noin 400:1). (b) Koska auringon ja kuun kulmakoko maasta katsottuna on suunnilleen sama, päätteli Aristarkhos, että aurinko on noin 19 kertaa kuuta suurempi.

## Aineen rakenne

Anaksimandros ei hyväksynyt opettajansa Thaleen ajatusta vedestä kaiken alkuaineena. Anaksimandroon mukaan aineiden perussubstanssi oli loputon ja rajaton *apeiron*. Rajattomalla ei myöskään ole alkua eikä loppua. Apeiron oli rakenteeton ja käsitteenä abstrakti, eikä Anaksimandros samastanut sitä mihinkään yksittäiseen aineeseen. Apeiron synnytti ominaisuuksien vastakohtapareja kuten kylmä-kuuma ja kuiva-märkä, mihin sisältynee ajatus havaittavuuden syntyisestä erojen havaitsemisen kautta. Erojen vastakohtien pohdiskeluun viittaa myös hänen ajatuksensa äärellisen ja äärettömän dualistisesta suhteesta.

Anaksimandroon oppilas Anaksimenes palasi vanhemman oppi-isänsä Thaleen ajatuksen tunnetusta alkuaineesta, joksi hän Thaleen veden sijaan nimesi ilman. Anaksimenes katsoi myös maan olevan tiivistynyttä ilmaa. Universumin maakeskisyyttä täydensi Anaksimeneen ajatus, että tähdet olivat peräisin maasta haihtuneesta ilmasta, joka oli leimahtanut tulipalloiksi tähtien kehän nopean liikkeen vuoksi. Anaksimenes pyrki selittämään monia luonnonilmiöitä: Maanjäristykset olivat seurausta liiallisesta kuivumisesta, salamat voimakkaiden ilmavirtausten hajottamien pilvien repeilystä johtuva leimahduksia ja sateenkaari auringonsäteiden osumisesta tiivistyneeseen ilmaan.

Miletoon lähellä Efesoksessa vaikuttanut Herakleitos näki kaiken ilmenevän takana yhteisen luonnonlain *Logoksen*. Hän kritisoikin joonialaisia edeltäjiään Thalesta, Anaksimandrosta ja Anaksimeneestä heidän kuvaamiensa ilmiöiden irrallisuudesta ja staattisuudesta. Herakleitos näki luonnonilmiöissä jatkuvan muutoksen prosessin, ja ilmenemisessä vastakohtien harmonian.

Historiallisessa kehityksessä Herakleitoon merkitys voitaneenkin nähdä paitsi processifilosofian isänä, myös jatkuvuuden ja holistisen maailmankuvan periaatteiden rakentajana.

Varhaisia aineellisen maailman kuvauksia edusti myös Anaksagoras, jonka mukaan näkyvä maailma ja kaikki sen sisältämät materiarakenteet sekä myös elollisten olentojen rakenneosat olivat muodostuneet äärettömästä ainemassasta persoonattoman jumaluuden luomana. Jumaluutta hän kuvasi nimellä *nous* (järki), joka oli irrallinen aineesta. Anaksagoraan maailmassa oli vaikutteita sekä Anaksimandroon *apeironista* että Herakleitoksen *Logoksesta*. Anaksagoraan ainemassan alkeisosissa oli rakenteet ja ominaisuudet kaikkiin ilmeneviin aineisiin ja elollisiin muotoihin.

### *Atomismi*

Atomismin juuret voidaan nähdä Anaksagoraan ainemassan alkeisosissa. Atomistinen ajattelu käänsi asian toisin päin: ainemassa on seuraus atomien kasaantumisesta kiinteäksi aineeksi. Leukippoon, Demokritoon ja Epikuroon atomit olivat kiinteitä ympäristöstään riippumattomia hiukkasia, jotka olivat lähinnä mekaanisessa vuorovaikutuksessa toisiinsa. Atomihypoteesin voidaan katsoa käynnistäneen esikraatiikoille ominaisen holistisen ajattelutavan vähittäisen siirtymisen havaittaviin ilmiöihin painottuvan empiirisen tieteen suuntaan. Samalla käynnistyi uskonnon erkautuminen luonnontieteistä, mikä suuntasi luonnonfilosofiaa materialismin suuntaan ja loi

varhaista pohjaa reduktionistiselle maailmankatsomukselle. Platon ja Aristoteles viroksuivat atomioppia ja sen mukanaan tuomaa materialistista painotusta, jossa alkusyiden sijaan pääpaino oli havaittavien ilmiöiden kuvaamisessa. Itse atomien havaitseminen sai tosin odottaa yli 2000 vuotta, oppinakin atomiteoria sai konkreettisen muodon vasta 1900-luvun alussa.

### *Aristoteleen metafysiikka*

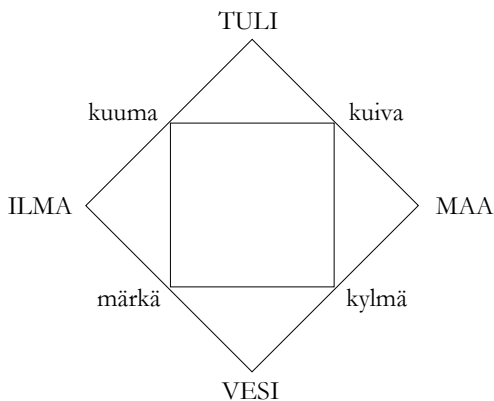
Antiikin fysiikan periaatteet ovat täydellisimmin koottuna Aristoteleen *Metafysiikassa*<sup>7</sup>. Käytännön fysiikkaa, kuten liikelakeja hän käsittelee kahdeksanosaisessa *Fysiikassa*<sup>8</sup>. Aristoteleen asemalle antiikin tieteen tulkkina on toisaalta ollut oleellista, että hänen laaja kirjallinen tuotantonsa on säilynyt jälkipolville.

*Metafysiikassaan* Aristoteles kommentoi laajalti edeltäjiensä ajatuksia. Aristoteles toteaa, että varhaiset filosofit keskittyivät ensisijaisesti aineen olemukseen ja aineen alkuperään. He päättelivät, että aineen perusmuoto on ikuista, sitä ei ole koskaan luotu eikä se koskaan häviä.

*”Thaleelle aineen perusmuoto oli vesi, ajatus, jota ehkä on pidettävä muinaisena tai primitiivisenä, vaikka Thales oli siitä vakuuttunut. Anaksimenes ja Diogenes pitivät ilmaa ja vettä ensisijaisina, kun taas Herakleitos sanoi, että tuli on ensisijainen. Empedokles sanoi, että kaikki neljä alkuainetta ovat ensisijaisia ja pysyviä, joskin keskenään muuntuvia. Anaksagoras puolestaan näki aineen muodostuvan äärettömästä määrästä alkeisosa.”*

Aristoteleelle täydellisyyttä kuvasi rajallisuus, symmetria ja harmonia. Rajaton *apeiron* oli näin ollen epätäydellistä.

Aristoteles päätteli, että yhteisenä tekijänä hänen edeltäjiensä ajatuksissa on ensisijainen syy materian olemassaololle; materian perussubstanssia voidaan pitää muuttumattomana. Aristoteles kommentoi Leukippoon ja Demokritoon atomioppia toteamalla, että heille materian syitä ovat ”täysi” ja ”tyhjä”, tai ilmenemä ja ei-ilmenemä – Demokritoon alkuaineet ja kaikki havaittava muodostuu eroista muodossa, sisäisestä



Kuva 1-8. Aristoteleen fysiikan alkuaineet ja niiden perusominaisuudet. Järjestelmän kehittäjänä pidetään yleensä noin sata vuotta ennen Aristoteleeta elänyttä Empedoklea. Mallin aiheet periytyvät kuitenkin huomattavasti vanhemmalta ajalta.

<sup>7</sup> Aristotle Metaphysics, Book I, Part 3, <http://classics.mit.edu/Aristotle/metaphysics.1.i.html>

<sup>8</sup> Aristotle, *Physics*, Translated by R.P Hardie and R.K Gaye, Book III, part 5.6, <http://classics.mit.edu//Aristotle/physics.html>

järjestyksestä ja sijainnista. Aristoteles omaksui Empedokleen neljän alkuaineen järjestelmän, ja luonnehti kutakin alkuainetta alun perin Anaksimeneen esittämien ominaisuusparien avulla, kuva 1-8.

Aristoteles toteaa, että pythagoralaiset olivat ensimmäisiä, jotka ottivat matematiikan osaksi luonnonfilosofiaa esittäessään, että matematiikan periaatteissa kuvastuvat yleisesti luonnonlakien periaatteet. Aristoteleen kommenteista voidaan päätellä, että hän katsoi pythagoralaisen numeroilla selittämisen menneen liian pitkälle. Aristoteles käsittelee laajasti äärettömyyden ongelmaa. Hän liitti äärettömyyden jatkuvuuteen ja jakamattomuuteen; ”Pythagoralaisen tapa puhua äärettömyydestä on absurdi. Samalla kun he pitävät ääretöntä substanssina, he jakavat sen osiin”<sup>9</sup>. Aristoteleelle aine oli jatkuvaluon- teista mutta ei jakamatonta. Pythagoralaisen ajatukset vastakkaisuuksista ja komple- mentaarisuudesta Aristoteles näyttää kuitenkin hyväksyvän yhdeksi luonnon perus- periaatteista.

Aristoteles löysi monia ristiriitaisuuksia edeltäjiensä opeissa, mutta tunnustaa samalla, että heillä on paljon annettavaa. Hän arvosti Platonin työtä; Platonin oppi- isästä Sokrateesta hän toteaa, että tämä ”... työllisti itsensä etsimällä kaiken selitystä eti- kasta laiminlyöden luonnon ilmiöt kokonaisuutena...”<sup>10</sup>.

Antiikin perintö fysiikkaan sisältyy mekaniikan osalta Aristoteleen liikeoppiin, jonka luonnonfilosofiseen taustaan kuului ajatus potentiaalisesta olevasta, ensimmäisestä liikuttajasta, liikkeen alkuperänä ja ylläpitäjänä. Aristoteles oletti, että kappaleen nopeus on verrannollinen liikettä ylläpitävään voimaan ja kääntäen verrannollinen väli- aineen vastukseen. Aristoteleen ajatus putoamisliikkeen nopeudesta näyttää perustu- neen tilanteeseen, jossa putoamisnopeus on väliaineen vastuksen rajoittama – hän näki sen *luonnollisena nopeutena*, johon putoava kappale pyrki hakeutuessaan kohti *luon- nollista paikkaansa*.

Aristoteleelle putoamisliike edusti *luonnollista liikettä*, liike vaakatasossa puolestaan *pa- kotettua liikettä*. Aristoteles kielsi tyhjiön mahdollisuuden – tyhjiössä ei olisi liikkeen nopeutta rajoittavaa ominaisuutta, jolloin nopeus luonnollisessa liikkeessä olisi ääre- tön. Pakotettu liike edellytti liikuttajan läsnäoloa liikkeen ylläpitämiseen. Aristoteles oletti liikuttajan liikuttettavan kappaleen ulkopuoliseksi tekijäksi. Näin ollen pakotettu liike ei voisi tapahtua tyhjiössä. Taivaankappaleiden liike tapahtui kuitenkin Aristo- teleen mukaan *etterissä* ilman liikuttajaa. Vaikka Aristoteles piti tärkeimpänä ensisi- jaisten syiden ymmärrystä ja postulaattien vähälukuisuutta, eivät hänen maanpäälli- seen liikkeeseen muotoilemansa liikelait päteneet taivaankappaleiden liikkeisiin, eikä maanpäällisten alkuaineiden järjestelmä kaikkeuden rakenneosiksi. Yleisesti eri aineet ja kappaleet koostuivat erilaisista suhteista neljää alkuainetta, jotka tulee ymmärtää lähinnä symbolisesti.

Aristoteles käsittelee fysiikkaa kahdeksanosaisessa kirjassaan *Fysiikka*<sup>11</sup>. Keskeiset liikkeeseen ja aineeseen liittyvät määritteet kuvataan seuraavasti:

<sup>9</sup> Aristotle, *Physics*, Translated by R.P Hardie and R.K Gaye, Book III, part 5.6, <http://classics.mit.edu//Aristotle/phys- ics.html>

<sup>10</sup> Aristotle *Metaphysics*, Book I, Part 6, <http://classics.mit.edu/Aristotle/metaphysics.1.i.html>

<sup>11</sup> Aristotle, *Physics*, Translated by R.P Hardie and R.K Gaye, <http://classics.mit.edu//Aristotle/physics.html>

*Maanpäällinen liike* voi suuntautua joko ylös tai alaspäin kohti ko. kappaleiden luonnollista paikkaa. Sivuttainen liike syntyy tömäyksistä ja liukumista sekä mahdollisista muutoksista kappaleen koostumuksessa.

*Luonnollinen liike* on vakionopeudella joko ylös tai alas suuntautuva maanpäällinen liike kohti kappaleen luonnollista paikkaa tai tilaa. Luonnollinen liike ei tarvitse liikuttajaa. Myöskään taivaankappaleiden liike ympyräradoilla ei tarvitse liikuttajaa. Taivaankappaleet liikkuvat vakionopeudella eetterissä.

*Nopeus, paino ja vastus:* Kappaleen ideaalinen nopeus on suoraan verrannollinen kappaleen painoon. Liikettä vastustava väliaine rajoittaa nopeutta kääntäen verrannollisena väliaineen viskositeettiin.

*Tyhjiö ei ole mahdollinen*, mutta, periaatteessa, tyhjiössä luonnollisen liikkeen nopeus olisi ääretön.

*Jatkuvuus:* Aristoteles vastustaa Demokritoon jakamattomia atomeja.

*Aurinko, kuu, planeetat ja tähdet* ovat kiinni samankeskisissä kristallipalloissa, jotka pyörivät vakio nopeudella. Koska taivaankappaleet eivät putoa maahan, ne eivät muodostu maan alkuaineista vaan kevyestä, ikuisesta, muuttumattomasta *eetteristä*.

*Maanpäällisiä alkuaineita* kuvataan niihin liittyvien ominaisuuksien avulla, kuva 1-8. *Veden* ominaisuuksia ovat *märkä* ja  *kylmä*, *ilman* ominaisuuksia *kuuma* ja *märkä*, jne.

*Taivaankappaleiden liike:* Taivaankappaleita kannattavat kristallipallot pyörivät muuttumattomalla nopeudella.

Ilmeisistä puutteistaan huolimatta Aristoteleen liikeoppi pysyi voimassa lähes kaksi vuosituhatta, kunnes Newtonin mekaniikkaan johtanut kehitys käynnistyi 1500–1600 luvuilla.

Tähtitieteessä Aristoteles omaksui alun perin Anaksimandron esittämän mallin. Anaksimandron malli tuli myöhemmin korvatuksi episykleihin perustuvalla mallilla, joka usean kehitysvaiheen jälkeen 100-luvulla jKr. Ptolemaioon malliin, joka yhdessä laajan havaintoaineiston kanssa muodostui antiikin perinnöksi astronomiassa.

## **Kohti uutta aikaa**

Tieteellinen aktiviteetti oli antiikin kulta-ajan jälkeen lähes pysähdyksissä uuden ajan alkuun, 1500-luvulle. Euroopan ulkopuolisesta aktiviteetista tähtitieteen alalla tunnetaan ainakin intialainen tähtitieteilijän Aryabhatan (476–550 jKr.) esittämä planeettamalli, jossa maa pyöri akselinsa ympäri, ja jossa planeettojen kiertoaajat oli laskettu suhteessa aurinkoon. Kiertoaikojen laskeminen auringon suhteen viittaa siihen, että Aryabhata on pohtinut myös aurinkokeskeisen planeettamallin mahdollisuutta.

Islamilaisessa fysiikassa ja tähtitieteessä tiedetään andalusialaisen Ibn Bajjahn (1095–1138) kehitelleen ajatuksia aurinkokeskeisestä planeettakunnasta ja esittäneen liikelakeja, jossa liike jatkui ilman Aristoteleen edellyttämää liikuttajaa. Bajjah tunnisti myös sittemmin Newtonin kolmantena liikelakina tunnetun voiman ja vastavoiman periaatteen. Ibn Bajjah tunnetaan myös nimellä Avempace.

Ensimmäinen tunnettu Aristoteleen liikeoppia kritisoinut filosofi lienee ollut Aleksandriassa vaikuttanut teologi ja monitieteilijä Johannes Philoponus (490–570). Philoponus selitti Aristoteleen ulkoisen *liikuttajan* liikkeen aiheuttajan kappaleelle antamana ominaisuutena *impetuksena*, joka edusti liikettä ylläpitävää ”*liikevoimaa*” (*incorporeal motive énergie*). Philoponus oli näin korvannut Aristoteleen ulkoisen liikuttajan ”sisäisellä liikuttajalla”, joka syntyi liikkeen aikaansaamiseen käytetystä voimasta.

Impetus-käsitteen edelleen kehittäminen jäi odottamaan lähes tuhat vuotta, kunnes 1300-luvulla elänyt ranskalainen pappi ja filosofi Jean Buridan kuvasi impetuksen verrannolliseksi ainemäärään ja nopeuteen, mikä merkitsee liikemäärän käsitettä, *liikemäärä* = *massa* × *nopeus*. Buridan oivalsi myös, että liikkeen synnyttävä, joka pudotusliikkeen tapauksessa on gravitaatio, antaa kappaleelle impetuksen, jonka kappale luovuttaa takaisin liikkessaan ylöspäin gravitaatiota vastaan. Impetuksen käsite soveltui sekä Aristoteleen luonnollisen että pakotetun liikkeen kuvaamiseen. Vaikka impetuksen käsite kumosi Aristoteleen liikeopin periaatteet, voidaan sen kuitenkin katsoa noudattavan Aristoteleen mahdollisuuden ja realisoituman kausaliteettia.

Buridanin impetus säilyi lähinnä filosofisena näkemyksenä, eikä se suoranaisesti edesauttanut mekaniikan ja liikelakien kehitystä.

## Kopernikuksen tähtitaivaasta Newtonin mekaniikkaan

### *Kopernikus*

Kopernikus kokosi aurinkokeskeisen järjestelmänsä perusteet vuoden 1514 aikoihin kirjoittamaansa 40-sivuiseen yleiskuvaukseen *Commentariolus*<sup>12</sup>, jota hän jakoi Krakovassa vuosina 1515–1530 työskennelleille kollegoilleen kommentoitavaksi.

Kopernikuksen *Commentariolus* –teoksen yleiskuvauksessa esitetyt aurinkokeskeisen järjestelmän postulaatit olivat:

- 1) Taivaankappaleiden radoilla ei ole vain yhtä keskusta.
- 2) Maapallon keskus ei ole universumin keskus, vaan ainoastaan maan painovoimakeskus ja kuun radan keskus.
- 3) Maa ja planeetat kiertävät aurinkoa, aurinko on keskipisteenä myös kiintotähtien kehälle.
- 4) Maan etäisyys aurinkoon on häviävän pieni verrattuna etäisyyteen kiintotähtiin.
- 5) Kiintotähtien näennäinen liike ei johdu kiintotähtien itsensä liikkeestä vaan maan liikkeistä. Maa siihen kuuluvine kappaleineen tekee päivittäisen pyörähdysten napojensa ympäri kiintotähtien pysyessä paikoillaan.
- 6) Se mikä näkyy auringon liikkeenä, ei johdu auringon liikkeestä vaan maan pyörimisestä ja rataliikkeestä auringon ympäri muiden planeettojen tavoin. Maalla on näin ollen useampia liikkeitä.
- 7) Planeettojen näennäinen vastakkaisuuntainen liike ei johdu planeettojen liikkeestä vaan maan liikkeestä. Yksistään maan liike riittää selittämään useita näennäisiä ristiriitaisuuksia taivaankappaleiden liikkeissä.

Aurinkoa ympäröivät kiintotähtien kehä ja planeettojen radat:

- 1) kiintotähdet
- 2) Saturnus, kiertoaika 30 vuotta
- 3) Jupiter, kiertoaika 12 vuotta
- 4) Mars, kiertoaika 2 vuotta
- 5) Maa, kiertoaika 1 vuosi
- 6) Venus, kiertoaika 9 kuukautta
- 7) Merkurius, kiertoaika 80 päivää

Kopernikus toteaa, että maapallolla on kolme liikettä:

- 1) Maapallo kiertää ympyrärataa auringon ympäri. Aurinko ei kuitenkaan ole tarkalleen maapallon radan keskipisteessä, vaan sivussa siitä noin 1/25 maapallon radan säteestä, millä Kopernikus kuvasi maapallon radan eksentrisyyttä. Kuu seuraa maapallon kiertorataa maapalloa kiertäen.
- 2) Maapallo pyörii oman akselinsa ympäri kerran vuorokaudessa lännestä itään. Maan meret ja ilmakehä seuraavat maan pyörimistä.

<sup>12</sup> Copernicus, *Commentariolus*, <http://dbanach.com/copernicus-commentariolous.htm>

- 3) Maan akselin deklinaatiokulman liike. Kopernikus selittää sekä deklinaatiokulmasta johtuvan vuodenaikojen vaihtelun että itse deklinaatiokulman muutoksen.

Hän toteaa, että kuten yleisesti otaksutaan, systeemiin liittyy useita liikkeitä, joiden lakeja ei vielä riittävästi tunneta ”*mutta maan liike selittää kaikki nämä liikkeet vähemmän yllättävällä tavalla*”. Kopernikus oli jo tuolloin ratkaissut mallinsa pohjalta planeettojen liikkeissä havaittavan näennäisen suunnanmuutoksen, sillä hän totesi *Commentarioluksessa*: ”Tässä, yksinkertaisuuden vuoksi, olen katsonut parhaaksi ohittaa matemaattiset tarkastelut, jotka olen tarkoittanut laajempaan työhöni”.

Laajemmalla työllään hän tarkoitti kuolinvuotenaan 1543 valmistunutta pääteostaan *De revolutionibus orbium coelestium*<sup>13</sup> (Taivaallisten kehien kierroksista).

Kopernikus aloittaa kirjansa *De Revolutionibus* kappaleella 1, jonka otsikko on ”Universumi on pallomainen” (The Universe is Spherical): ”*Ensiksi meidän on huomattava, että universumi on pallomainen. Syy tähän on joko, että pallo on täydellisin muoto ilman liitoskohtia oleva kokonaisuus, jota ei voi suurentaa tai pienentää; tai, että se on tilavuudeltaan suurin muoto, paras pitämään sisällään mitä tahansa kappaleita; tai, että universumin kaikilla osilla, kuten auringolla, kuulla, planeetoilla ja tähdillä on tämä muoto; tai, että kokonaisuudet hakeutuvat tähän muotoon, kuten havaitaan vesipisaroista ja muista nesteistä*”.

Toisessa kappaleessa Kopernikus perustelee maan pallomuotoa vertaamalla mm. pohjoisen ja eteläisen pallonpuoliskon tähtitaivaita ja laivan katoamista horisontin taakse. Kopernikus viittaa myös Amerikan löytymiseen (Kolumbus 1492). Kopernikus päätteli, että Amerikka on joko manner tai saari, joka sijaitsee maapallolla Intiaan nähden vastakkaisella puolella.

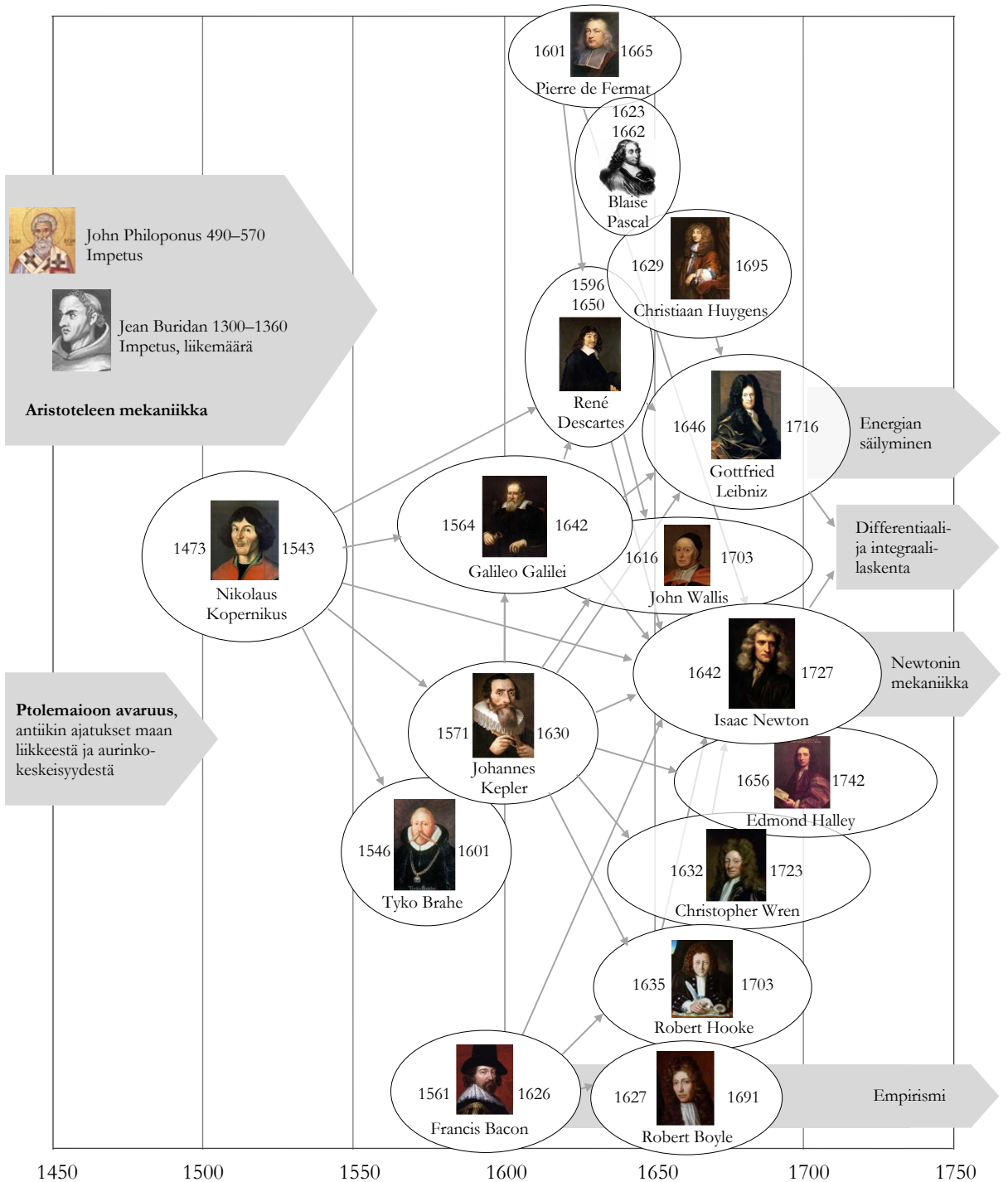
Kopernikuksen työlle ei *De Revolutionibus* kirjan ilmestyttyä löytynyt jatkajaa. Vasta Keplerin, Galilein ja Newtonin työt osoittivat Kopernikuksen työn merkityksen tieteellisen vallankumouksen käynnistäjänä. Kopernikuksen teoria ei merkinnyt vallankumousta ainoastaan tähtitieteessä – se merkitsi myös perusteiden häviämistä Aristoteleen fysiikalta. Luonnollinen liike ylös tai alas Aristoteleen oletaman absoluuttisen maan pinnan suhteen ei enää sopinut perusilmiöksi aurinkoa ja akseliaan kiertävän maan pinnalla. Kuvassa 1-9 on hahmoteltu Kopernikuksen käynnistämää tieteen vallankumousta.

Yksittäisiä aloitteita lukuun ottamatta Kopernikuksen työ jäi yli sadaksi vuodeksi odottamaan tieteellistä vahvistusta. Englantilainen matemaatikko ja astronomi Sir Thomas Digges (1546–1594) käänsi Kopernikuksen *De Revolutionibus* teoksen keskeiset kappaleet englanniksi ja lisäsi omana näkemyksensä, että kiintotähdet ovat tasaisesti jakautuneet Kopernikuksen kiintotähtien kehän takana olevaan äärettömään avaruuteen. Hän lienee myös ensimmäinen, joka oivalsi ”pimeän taivaan paradoksin”<sup>14</sup>, jonka ääretön määrä tähtiä synnyttää.

<sup>13</sup> Copernicus, *De revolutionibus orbium coelestium*, <http://www.webexhibits.org/calendars/year-text-Copernicus.html>, <http://www.math.dartmouth.edu/~matc/Readers/renaissance.astro/1.1.Revol.html>

<sup>14</sup> Olbers' paradox, [http://en.wikipedia.org/wiki/Olbers%27\\_paradox](http://en.wikipedia.org/wiki/Olbers%27_paradox)





Kuva 1-9. Keskeisiä vaikuttajia matemaattisen fysiikan kehittymiseen uuden ajan alussa. Liikelakien, taivaanmekaniikan sekä massan, liikemäärän ja voiman käsitteiden hahmottumisessa yhdistyi empiirinen tutkimus ja matemaattinen kuvaus filosofiseen näkemykseen fysikaalisen todellisuuden luonteesta.

Diggesin aikalainen, italialainen filosofi, matemaatikko ja astronomi Giordano Bruno (1548–1600) meni vielä pidemmälle esittäessään, että Kopernikuksen aurinkokunta on vain vähäpätöinen tähtiryhmä lukemattomien muiden tähtien ja tähtiryhmien joukossa. Brunon ajatukset olivat liian radikaaleja 1500-luvulla, mutta 1700- ja 1800-lukujen aikana auringon asema yhtenä lukuisista tähdistä omaksuttiin ilmeisenä tosiasiana. Linnunradan asema yhtenä galaksina, galaksien moninaisuus ja avaruuden mittasuhteet avautuivat kuitenkin konkreettisesti vasta 1900-luvun alkupuolella tehokkaampien havaintovälineiden myötä.

### *Tyko Brahe*

Ensi askeleena Kopernikuksen aurinkokuntamallin tieteelliseen jatkokehitykseen voitaneen pitää tanskalaisen astronomin Tyko Brahen mittauksia ja ”hybridimallia”, jossa maakeskeisyys säilytettiin, mutta planeetat sijoitettiin kiertämään aurinkoa, kuva 1-10. Tyko Brahen mallissa maa oli kiinteä, joten vuorokautiseen kiertoon tarvittiin koko tähtitaivassysteemin pyöriminen. Tyko Brahen mallissa on huomattavaa yhtäläisyyttä Herakleideen malliin 300-luvulta eKr.

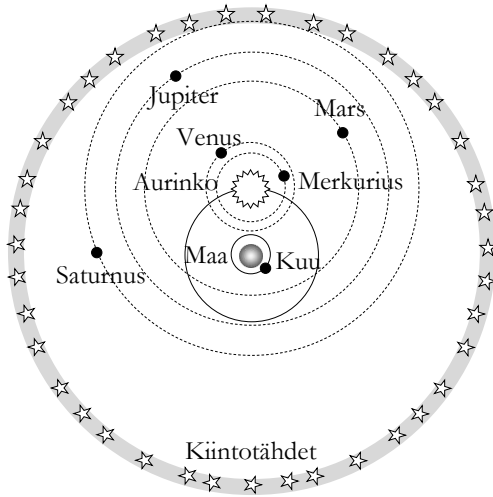
Nuorena Tyko Brahe oli innostunut Kopernikuksen mallista. Ilmeinen syy siihen, että hän myöhemmin hylkäsi Kopernikuksen mallin ja asetti maan tähtitaivaan keskipisteeksi, oli kiintotähtien puuttuva parallaksi, kuva 1-11(a). Parallaksin löysi Friedrich Bessel vasta 1838. Käytännön etäisyydenmäärittämenetelmäksi parallaksimitaus tuli vasta 1980-luvulla, kun CCD-valodetektoreilla varustetuilla mittaussysteemeillä päästiin millikaarisekunnin kulmamittaustarkkuuteen.

Maan rataliikkeestä johtuvan kiintotähtien aberraation löysi James Bradley vuonna 1729. Aberraatio viestitti havaitsijan liikkeestä, mikä osaltaan vahvisti Kopernikuksen aurinkokeskeisen mallin paremmuuden maakeskeiseen malliin nähden, kuva 1-11(b).

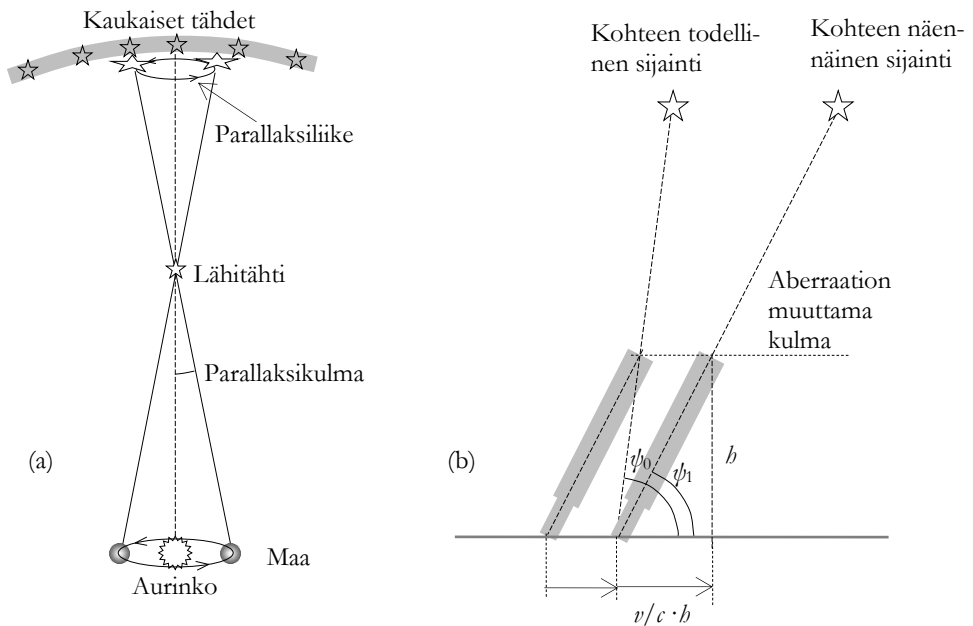
Kiintotähdistöä oli antiikin ajoista pidetty ikuisena ja muuttumattomana. Tyko Brahe oli ensimmäinen, joka tunnisti muutoksen kiintotähdistössä havainnoidessaan vuonna 1572 ilmestynyttä supernovaa. Puuttuvasta parallaksista hän pystyi päättämään, että kohde oli kiintotähtien etäisyydellä, joten havainto kumosi antiikin ajoista vallalla olleen käsityksen kiintotähtitaivaan muuttumattomuudesta.

Tyko Brahen mallista tehtiin joitakin modifikaatioita hänen kuolemansa jälkeen. Näistä tärkein lienee Tyko Brahen assistentin Logomontanuksen malli, jossa hän korvasi Brahen pyörivän tähtitaivaan pyörivällä maapallolla.

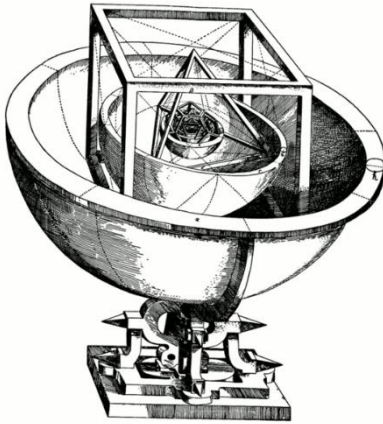
Tyko Brahen tärkein anti tähtitieteen kehitykselle olivat hänen tarkat havaintonsa, joiden perusteella Johannes Kepler pystyi päättämään, että planeettojen radat auringon ympäri ovat ellipsejä. Tyko Brahe dokumentoi elämäntyönsä tähtiluetteloon *Astronomiae Instauratae Progymnasmata*, jonka hänen seuraajansa Johannes Kepler viimeisteli Tyko Brahen kuoleman jälkeen.



Kuva 1-10. Tyko Brahen mallissa maa on kiinteä ja kuu, aurinko sekä kiintotähtien kehä kiertävät maata antaen sekä vuoro-kausi- että vuosirytmien. Planeetat kiertävät aurinkoa.



Kuva 1-11. (a) Jos maan oletetaan kiertävän aurinkoa, pitäisi lähellä olevien tähtien näennäisen sijainnin kaukana oleviin tähtiin nähden muuttua vuoden aikana parallaksin vuoksi. Tyko Brahen aikaisilla havaintovälineillä parallaksin havaitseminen ei ollut mahdollista. (b) Kohteen kulmamittauksessa mitaajan nopeus synnyttää aberraation seurauksena havaintokulmaan näennäisen poikkeaman kohteen todelliseen sijaintikulmaan. Havaintoon käytetyn kaukoputken edetessä nopeudella  $v$  vertailutasossa kohti, on kaukoputkea kallistettava kulmaan  $\psi_1$ , jotta kaukoputken yläpäähän osuva valo saavuttaa havaitsijan putken alapäässä. Aberraation selitti englantilainen astronomi James Bradley 1700-luvulla.



Kuva 1-12. Keplerin *Mysterium Cosmographicum* teoksessa esittämä planeettamalli, jonka hän kehitti aurinkokeskeiseen Kopernikuksen mallin innoittamana. Kuva, *Wikimedia Commons*.

### *Johannes Kepler*

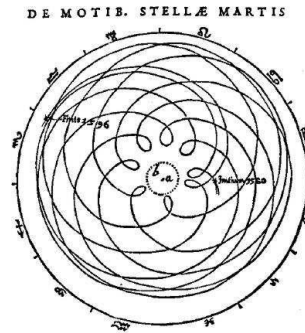
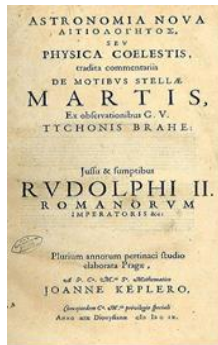
Kepler oli vuonna 1596 julkaissut kirjan *Mysterium Cosmographicum*<sup>15</sup> (*Kosmoksen ihme*), jossa hän etsi planeettaratojen keskinäistä matemaattista säännönmukaisuutta sisäkkäisten monitahokkaiden mallilla, kuva 1-12. Kepler halusi mallillaan osoittaa Kopernikuksen aurinkokeskeisen mallin oikeutuksen ja oikeellisuuden siihen sisältyvän matemaattisen kauneuden avulla. Tyko Brahe arvosti Keplerin *Mysterium Cosmographicum* teosta ja oli huomannut Keplerin matemaattiset kyvyt. Tyko Brahe kutsui Keplerin assistenttikseen Prahaan vuonna 1600. Yhteistyö käynnistyi kangerrellen. Hän olisi mieluummin suunnannut tutkimuksen oman hybridimallinsa kuin Kopernikuksen mallin todistamiseen.

Yhteistyö jäi lyhyeksi Tyko Brahen kuoltua yllättäen lokakuussa 1601. Tyko Brahen kuoltua Kepler nimitettiin hänen seuraajakseen Keisarilliseksi Matemaatikoksi.

Kepler ei ollut kyennyt sovittamaan Tyko Brahen Mars-planeetan radassa havaitsemaa 8 kaariminuutin poikkeamaa ympyrärataan. Tarkasteltuaan suurta määrää Marsin havaintotuloksia hän lopulta oivalsi, että rata on ellipsi siten, että aurinko sijaitsee ellipsin toisessa polttopisteessä. Hän havaitsi, että planeetan nopeus on suurimmillaan, kun se on lähellä aurinkoa ja pienimmillään kun se on kauimpana auringosta. Tarkempi tarkastelu osoitti, että planeetan nopeus vaihteli suoraan verrannollisesti sen etäisyyteen auringosta, jolloin planeetasta aurinkoon piirretty suora peitti yhtä suurina aikaväleinä yhtä suuret pinta-alat. Sama näytti toistuvan myös muiden planeettojen kohdalla, mistä muodotui Keplerin ensimmäinen ja toinen laki:

1. Planeettaradat ovat ellipsejä, joiden toisessa polttopisteessä on aurinko.
2. Pinta-ala, jonka planeettaradan säde pyyhkäisee aikayksikössä, on sama radan kaikissa kohdissa.

<sup>15</sup> J. Kepler, *Mysterium Cosmographicum*, [http://en.wikipedia.org/wiki/Mysterium\\_Cosmographicum](http://en.wikipedia.org/wiki/Mysterium_Cosmographicum)



Kuva 1-13. Keplerin *Astronomia novan* (1609) kansilehti ja kirjassa esitetty kuvaus Marsin monimutkaisesta radasta maakeskeisessä koordinaatistossa. Kepler etsi matemaattista kauneutta ja tarkkuutta päätyen monien yritysten jälkeen ellipsirataan, jonka toinen polttopiste on aurinko. Tyko Brahen tarkat havainnot Marsin radasta olivat oleelliset ellipsiradan löytymiselle. Kuva, *Wikimedia Commons*.

Tuloksen hän julkaisi vuonna 1609 ilmestyneessä *Astronomia Nova*<sup>16</sup> (*Uusi Astronomia*) teoksessaan, kuva 1-13.

Kepler oli löytänyt etsimänsä matemaattisen harmonian planeettaradoista. Harmonia täydentyi vielä Keplerin kolmannella lailla, jonka hän viime hetkellä lisäsi vuonna 1619 ilmestyneeseen teokseensa *Harmonices mundi libri*<sup>17</sup> (*Maailmojen Harmoniat*):

3. Planeettojen kiertoaajan neliö on verrannollinen puoliakselin pituuden kuutioon.

Kepler katsoi löydöstensä vahvistaneen Pythagoraan näkemyksen, jonka mukaan matematiikka ja harmoniset suhteet ovat avain näkyvän maailman ymmärtämiseen. Teoksessaan *Harmonices mundi libri* hän seurasi Pythagoraan *sfäärien sinfonian* ajatusta ja hahmotteli yhteyksiä planeettaratojen ja sävelkorkeuksien välillä.

Kepler näki auringossa valon lähteen ja katsoi, että planeettojen liike on peräisin auringon antamasta voimasta. Hän oli myös päätellyt, että auringon valo himmenee kääntäen verrannollisesti etäisyyden neliöön. Kepler ei kuitenkaan tunnistanut gravitaation olemusta, vaikka hän arveli, että vuorovesien vaihtelu johtuu kuusta.

### *Galileo Galilei*

Vuonna 1604 Kepler oli kirjoittanut astronomiaan liittyvistä optisista ilmiöistä teoksen *Astronomia pars Optica* (*Astronomian Optinen Osa*). Vuonna 1610 hän kuuli Galileo Galilein vuotta aikaisemmin hollantilaisen esikuvan mukaisesti konstruoimasta kaukoputkesta, ja hänen havaitsemistaan Jupiterin kuista. Kepler kirjoitti välittömästi innostuneen kirjeen Galileille; vuotta myöhemmin saatuaan käyttöönsä sopivan kaukoputken hän havaitsi Jupiterin kuita ja kirjoitti niistä julkaisun *Narratio de*

<sup>16</sup> *Astronomia Nova*, [http://en.wikipedia.org/wiki/Astronomia\\_nova](http://en.wikipedia.org/wiki/Astronomia_nova)

<sup>17</sup> *Harmonices Mundi*, [http://en.wikipedia.org/wiki/Harmonice\\_Mundi](http://en.wikipedia.org/wiki/Harmonice_Mundi), <https://archive.org/stream/ioanniskeplerih00kepl>

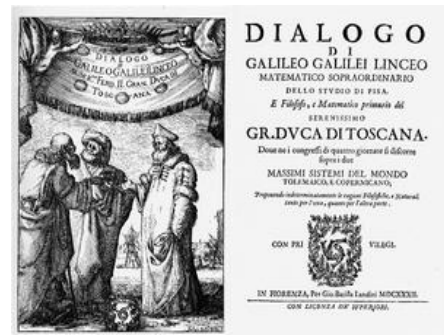
*Observatis Quatuor Jovis Satellitibus (Havaintoja Jupiterin Neljästä Satelliitista)*. Julkaisulla oli tärkeä merkitys Galileille, jonka havaintoja Jupiterin kuusta oli epäilty. Vuonna 1611 Kepler kirjoitti kaukoputken teoriasta julkaisun *Dioptrice*, jossa hän tarkastelee kuperan ja koveran linssin yhteisvaikutusta sekä optisen ”valekuvan” ja ”todellisen” kuvan muodostumista.

Galilein kaukoputkihavainnot Venuksen etäisyyden muutoksiin viittaavasta koon muutoksesta tukivat Kopernikuksen mallia, jonka mukaan Venus kiertää aurinkoa, jolloin etäisyys maahan muuttuu syklisesti. 1610-luvulla kaukoputken käyttöönotto aktivoi auringon, kuun ja planeettojen havainnointia useissa Euroopan observatorioissa. Samalla aktivoitui keskustelu Kopernikuksen systeemistä ja Galilein aikaisemmin suotuisa keskustelu kirkon edustajien kanssa alkoi kääntyä hyökkäykseksi vääräoppisuutta vastaan.

Maapallon liikkeen osalta Galileita vastassa olivat Psalmin 93:1 ja 96:10 sanat ”Hän on pukeutunut itsensä korkeudella. Herra on pukeutunut, vyöttäytynyt voimaan.” ja ”Sanokaa pakanain seassa: Herra on kuningas. Niin pysyy maanpiiri lujana se ei horju.” sekä Ensimmäisen aikakirjan luku 16:30 ”Vaviskaa hänen kasvojensa edessä kaikkei maa. Maan piiri pysyy lujana, se ei horju.” Edelleen, Psalmista 104:5 löytyi sanat ”Sinä asetit maan perustuksilensa, niin että se pysyy iankaikkisesti.”. Vanhan Testamentin Saarnaajassa 1:5 todettiin auringon liike: ”Ja aurinko nousee ja aurinko laskee ja kiirubtaa sille sijallensa, josta se jälleen nousee”.

Kiihka kärkeytyi Galilein vuonna 1632 valmistuneeseen kirjalliseen vastineeseen häntä vastaan esitettyihin vääräoppisuussyitteisiin. Vastine oli satiirisesti muotoiltu vuoropuhelu *Dialogo dei due massimi sistemi del mondo*<sup>18</sup> (*Kahden maailmanjärjestyksen vuoropuhelu*), jossa filosofi *Salviati* puolustaa Kopernikaanista järjestelmää ilmeisen yksinkertaisen *Simplikos* nimisen filosofin kannattamaa Ptolemaiolaista järjestelmää ja Aristoteleen fysiikkaa vastaan. Terveen järjen edustajana alun perin puolueeton maallikko *Sagredo* omaksuu keskustelun kuluessa *Salviatin* Kopernikaanisen järjestelmän. Inkvizitio käsitteli kirjaa seuraavana vuonna. Kirja julistettiin pannaan, ja Galilei tuomittiin ”kerettiläisyydestä epäillyksi”. Galilei joutui viettämään loppuelämänsä kotiinsa suljettuna – *Dialogo* vapautettiin pannasta vasta vuonna 1822.

Galilein oikeudenkäynneillä oli ilmeinen vaikutus tieteen erottumiseen uskonnosta. Galilein välitön vaikutus luonnontieteiden kehitykseen muodostui ehkä kuitenkin Kopernikuksen puolustusta enemmän hänen kokeistaan, jotka johtivat Aristoteleen luonnollisen ja pakotetun liikkeen korvaamiseen matemaattisen fysiikan keinoin kuvattavasta liikkeestä ja ja sen vuorovaikutuksesta gravitaation kanssa. Galilein päätelmät perustuivat pudotus- ja heilurikokeisiin 1600-luvun alussa. Ballistisen käyrän hän tunnisti paraabeliksi vuonna 1607.



Kansilehti, Galilein Dialogo.  
Kuva, [Wikimedia Commons](#).

<sup>18</sup> *Dialogo*, [English translation](#)

Galilei päätteli tasaisen liikkeen tilan vastaavan lepotilaa. Tasaisesti liikkuvassa laivassa tehdyt kokeet käyttäytyivät täsmälleen samalla tavalla kuin satamaan ankkuroidussa laivassa – liikkuvassa laivassa ylöspäin heitetty pallo tulee suoraan alas laivan liikkeestä riippumatta. Havainto oli tärkeä myös siksi, että voitaisiin perustella pyöri-vällä ja aurinkoa kiertävällä maapallolla tehdyt kokeet maapallon liiketiloista riippu-mattomiksi – vaikka maapallon pyörimistä ja rataliikettä voidaan pitää suoraviivaisina vain paikallisessa tarkastelussa.

Galilei määritteli suhteellisuusperiaatteen, joka periytyi sekä Newtonin mekaniikkaan että Einsteinin suppeaan suhteellisuusteoriaan: ”*Luonnonlait ovat samat kaikissa tasai-sessa suoraviivaisessa liikkeessä olevissa systeemeissä.*”

Galileo Galilein työssä yhdistyi empiirinen tutkimus ja matemaattinen kuvaus. Aris-toteleen liikeopista poiketen Galilei päätteli, John Philoponusin ja Jean Buridanin ajatuksia seuraten, että liiketilan ylläpitämiseen ei tarvittu ulkoista voimaa – vain lii-ke-tilan muutos edellytti ulkoisen voiman vaikutuksen.

Galilein kokeellinen tutkimus keskittyi ennen kaikkea kiihtyvään liikkeeseen, josta hän teki tarkkoja havaintoja. Kiihtyvän liikkeen tutkiminen johti voiman käsitteen hahmottamiseen, vaikka ensisijaisesti Galilei keskittyi havaintojen matemaattiseen kuvaamiseen.

Galilei omaksui Demokritoon ja Epikuroon atomiopin. Hän oletti, että fysikaaliset kappaleet ovat atomien muodostamia kokonaisuuksia, ja kaikki ilmiöt noudattavat atomien ja niiden liikkeiden matemaattisesti kuvattavissa olevia lainalaisuuksia.

Galilei oli tieteellisen työnsä ohella tehnyt lukuisia käytännön keksintöjä pumpuista, kulmamittareista kaukoputken parannuksiin. Vielä kuolinvuotenaan hän keksi aja-tuksen heilurin soveltamisesta kelloon.

### *Empirismin herääminen, Francis Bacon*

Rinnan Keplerin ja Galilein empiirislähtöisen työn kanssa englantilainen Francis Bacon heräsi puolustamaan empirismin merkitystä tieteen menetelmänä. Vuonna 1620 julkaisemassaan kirjassa *Novum Organum Scientiarum – True directions Concerning the Interpretation of Nature*<sup>19</sup> (*Uusi Tieteen Menetelmä – Todelliset suunnat luonnon tulkitsemiseen*) hän perusteli, että ajan tiedettä ohjasi aristoteelinen deduktiivinen, olettamuksista johdettu päättely induktiivisen, havaittuihin faktoihin perustuvan päättelyn sijaan.

Kirjansa esipuheen hän aloittaa toteamuksella:

”Ne, jotka katsovat asiakseen määritellä luonnonlait ikään kuin ne olisi löydetty ja ymmärretty, riippumatta siitä ovatko ne esitetyt yksinkertaisella vakaumuksella tai tieteellisellä auktoriteetilla, ovat tuottaneet suurta vahinkoa filosofialle ja tieteille”.

Idealähtöisiin hypoteeseihin perustuvaan tieteeseen viitaten hän huomauttaa, että jotkut ovat valinneet vastakkaisen tien oivaltaessaan, että kertakaikkisesti mitään ei voi tietää. Bacon kiteyttää ajatuksensa *Novum Organumin* kahdessa osassa esitettyyn yhteensä 180:een aforismiin.

<sup>19</sup> Bacon, *The New Organon*, <http://www.earlymoderntexts.com/authors/bacon>

### René Descartes

Pyrkimys kohti matemaattista fysiikkaa heräsi 1600-luvulla myös Ranskassa. Vaikka René Descartes etsi havaittaville ilmiöille syitä ja luonnonlakeja, hän pyrki viemään päättelynsä empiiriselle tasolle. Descartes esitti, että jos kaikille ilmiöille on osoitettavissa kausaalinen syy, josta ne ovat johdettavissa, on päätelmien mahdotonta olla vääriä. Hän vertasi tiedettä puuhun, jonka juuret ovat metafysiikassa, runko fysiikassa ja oksat tieteen eri aloilla.

Descartes kiteyttää luonnonfilosofiaan ja fysiikkaan liittyvän ajattelunsa vuonna 1644 ilmestyneeseen kirjaansa *Principia Philosophiae*<sup>20</sup> (*Filosofian periaatteet*). Kirjassa on neljä osaa, Osa 1: Inhimillisen ymmärryksen periaatteet, Osa 2: Materiaalisten ilmenemisten periaatteet, Osa 3: Näkyvä universumi ja Osa 4: Maa.

Descartes aloittaa *Filosofian periaatteet* luvun 2 pohtimalla perusteita, jotka johtavat tietoon tai käsitykseen materiaalisesta olemassaolosta. Hänen päätelmänsä on, että kolmessa ulottuvuudessa on olemassa jotakin, jolla on fyysiset mitat ja sille kuuluvat ominaisuudet. Tätä ”jotakin” kutsumme kappaleeksi tai aineeksi. Kappaleen Descartes identifioi ensisijaisesti sen mittoihin, pituuteen, leveyteen ja korkeuteen. Hän pitää kooltaan äärellisiä atomeja mahdottomina, ajatuksissamme voimme aina jakaa ne pienempiin ja pienempiin osiin. Vastaavasti Universumin mitat hän päätteli äärettömiksi. Edelleen hän päätteli, että maa ja taivaat koostuvat yhdestä ja samasta aineesta, ja että ei voi olla useampia universumeita.

Seuraavaksi osassa 2 käsitellään liikettä. Descartes katsoo, että kaikki muutokset aineessa ja sen muodoissa riippuvat liikkeestä. *Tavallinen käsitys liikkeestä on yksinkertaisesti tapahtuma, jossa kappale siirtyy paikasta toiseen. Tarkkaan ottaen kappale liikkuu, jos sen paikka muuttuu suhteessa sellaisiin kappaleisiin, joiden katsotaan olevan levossa.*

Kohdassa 2/26 Descartes toteaa, että liikkeen ylläpitäminen ei vaadi enempää toimenpidettä (action) kuin lepotilan ylläpitäminen. *Liike ja lepotila ovat pelkästään liikkeen eri ilmenemismuotoja.*

Seuraavaksi Descartes pohtii suhteellista liikettä: Kun kaksi kappaletta erkaneet toisistaan, niin miten voimme erottaa kumpi jää paikoilleen ja kumpi liikkuu? Esimerkiksi hän ottaa kävelyn pyörivän maapallon pinnalla; jos väitämme, että kävelyni itään edustaa lepotilaa, silloin väitämme koko maapallon liikkuvan länteen. Entä kun joku toinen kävelee länteen? Hän jatkaa tästä aineiden sisäiseen liikkeeseen, esim. virtaavassa nesteessä.

Kohdassa 2/36 Descartes toteaa, että Jumala on ensisijainen syy liikkeeseen; ”ja hän ylläpitää aina saman määrän liikettä universumissa”.

Descartes pelkistää liiketarkastelun esittämiinsä luonnonlakeihin:

1. Jokainen kappale, johon ei ulkoisesti vaikuteta, jatkaa samassa tilassa; jokainen liikkeessä oleva kappale jatkaa liikettään, kunnes joku sen pysäyttää.
2. Jokainen liikkuva kappale, johon ei ulkoisesti vaikuteta, liikkuu suoraviivaisesti; joten kappale, joka liikkuu ympyrän kehää, pyrkii aina pois päin ympyrän keskipisteestä.

<sup>20</sup> Descartes, *Principles of Philosophy*, <http://www.earlymoderntexts.com/authors/descartes>



3. (a) Jos kappale törmää toiseen kappaleeseen, joka on vahvempi kuin törmäävä kappale, se ei menetä mitään liikkeestään. (b) Jos törmäävä kappale törmää itseään heikompaan kappaleeseen, se menettää liikkeestään saman määrän kuin se luovuttaa toiselle kappaleelle.

Descartes perustelee lakia 3(a) toteamalla, että törmäyksessä tapahtuva liikesuunnan muutos ei muuta liikkeen määrää. Lain 3(b) perusteluksi hän esittää Jumalan tavan toimia siten, että liikkeen kokonaismäärä säilyy.

Liikkeen määrällä Descartes tarkoittaa kappaleen nopeuden ja tilavuuden tuloa. Esittämiensä luonnonlakien jälkeen hän esittää useita laskusääntöjä niiden soveltamiseksi ja selvittelee erityyppisten kappaleiden ja aineiden ominaisuuksia. Christiaan Huygens (1629–1695) tarkensi Descartes’in liikemäärän käsitettä, ja johti keskeiskiihtyvyyden lausekkeen vuonna 1659.

Filosofian periaatteiden osan 3 *Näkyvä universumi* Descartes aloittaa toteamalla Jumalan luomistyön laajuuden, ja oman rajallisuutemme sen ymmärtämiseen; *riittää että ymmärrämme luomistyön tapahtuneen ihmisen hyväksi – joskin on ymmärrettävä, että maailma sisältää paljon sellaista mikä ei suoranaisesti kosketa ihmistä.*

Perusteita tai tietolähdettä ilmaisematta Descartes toteaa, että kuun etäisyys maasta on noin 30 kertaa maan halkaisija, ja auringon etäisyys noin kuusi tai seitsemäsataa kertaa maan halkaisija. *Etäisyydet huomioiden voimme päätellä, että kuu on paljon pienempi kuin maa ja aurinko paljon maata suurempi. Merkuriuksen etäisyys auringosta on yli kaksisataa kertaa maan halkaisija, Venus yli neljäsataa, Jupiter yli kolmetubatta ja Saturnus viisi tai kuusituhatta. On mahdotonta arvioida kiintotähtien etäisyyttä. Taivaalta katsottuna maa näkyy Jupiteria tai Saturnusta pienempänä planeettana. Aurinko ja kiintotähdet loistavat omaa valoaan. Kuun ja planeettojen valo heijastuu auringosta.*

Descartes toteaa edelleen, että aurinkoa voidaan pitää yhtenä kiintotähtenä, ja maata yhtenä planeettana. Hän toteaa, että planeettojen liikkeet voidaan selittää eri hypoteeseilla. Hän toteaa Ptolemaioon hypoteesin havaintoja vastaamattomaksi ja Tyko Brahen hypoteesin Kopernikuksen hypoteesia mutkikkaammaksi. Käyttämiinsä liikkeen ja lepotilan määritelmiin viitaten Descartes haluaa säilyttää maan ja planeettojen paikallisen lepotilan ajattelemalla, että kukin on levossa omissa ”lähitaivaassaan”, joka puolestaan seuraa Kopernikuksen kiertojärjestelmää.

Filosofian periaatteiden osassa 3 on yhteensä 157 numeroitua väittämää. Vaikka Descartes korostaa kausaalisen syyn tuntemisen tärkeyttä, ovat hänen jatkopäätelmänsä universumin rakenteista varsin irrallisia – monet niistä ovat enemmänkin kysymyksiä kuin vastauksia.

Filosofian periaatteiden osa 4 *Maa* käsittelee maapallolla havaittavia ilmiöitä. Tarkastelu jää lähinnä luetteloinnin ja pohdiskelun tasolle. Ajan henkeä kuvastaa osan 4 loppulause, jossa Descartes sanoo jättävänsä kaikki näkemyksensä katolisen kirkon auktoriteetin arvioitavaksi, ”... enkä halua teidän uskovan mitään mitä olen kirjoittanut elleite ole vakuuttunut siitä ilmeisen ja kiistattoman päätelyn kautta”.

### Robert Boyle

Voimistuvaa empirismin henkeä ja Baconin ajatuksia seuraten englantilainen monitieteilijä Robert Boyle (1627-1691) rajasi fysiikan pohdiskelun *materiaan ja liikkeeseen*.

Kirjansa *The Grounds for and Excellence of the Corpuscular or Mechanical Philosophy*<sup>21</sup> (*Kappaleiden ja mekaniikan filosofian perusteet*) johdannossa hän toteaa mekaanisen filosofiansa koskevan vain ainetta ja materiaalisia kappaleita ja niiden liikettä ohjaaviin luonnonlakeihin. Boyle kuvaa mekaniikan filosofiansa perusteita viidellä toteamuksella, joiden keskeiset sanomat ovat:

- 1) On tosiasia, että mekaaniset periaatteet ovat ymmärrettäviä ja *selkeitä*.
- 2) Ei voi olla *vähempiä* periaatteita kuin kaksi suurta mekaanisen filosofian periaatetta, aine ja liike.
- 3) Emme voi kuvitella ainetta ja liikettä perustavampaa laatua olevia periaatteita. Joko ne molemmat ovat Jumalan luomia, tai jos aine on ikuista, jolloin sitä ei ole luotu, liikkeen on aikaansaanut yliluonnollinen voima, tai liike on jotakin, jonka liikkuva aine on luonnollisella tavalla saanut.
- 4) Ei voi olla ainetta ja liikettä yksinkertaisempia fysikaalisia periaatteita, sillä ei ole totuudellista tai edes kohtuullista tapaa osoittaa, että ne olisivat seurauksia kahdesta tai useammasta yksinkertaisemmasta asiasta.
- 5) Aineen periaatteet ovat äärimmäisen täydelliset. Jos yksi osa ainetta,  $x$ , törmää voimakkaasti toiseen osaan,  $y$ , niin välttämättömänä seurauksena on joko antaa  $y$ :lle kokonaisena liike tai rikkoa tai jakaa  $y$  osiin, jotka saavat määrätty liikkeitä, muodot, koot, asennot, järjestyksen ja rakenteen.

Aineen ja liikkeen korostuminen liittyi Boylen vahvaan näkemykseen atomiteoriasta. Hän katsoi, että aine koostuu atomeista ja atomiryhmistä, ja kemialliset ilmiöt atomien keskinäisistä liikkeistä ja törmäyksistä. Boylen perintö jäi vahvasti vaikuttamaan kemistien keskuudessa, aineen atomirakenne oli kemisteille ilmeinen koko Boylen jälkeisen historian, kun se fyysikkojen piirissä omaksuttiin vasta 1800-luvun lopulla.

### Gottfried Leibniz

Leibnizin monipuolisessa tieteellisessä työssä yhdistyi syvälinen luonnonfilosofinen perusta matemaattiseen ajatteluun ja fysikaalisten ilmiöiden kokonaisvaltaiseen hahmotukseen. Leibniz tunnisti kappaleiden painoon verrannollisen ”*luonnollisen inertiaan*”, ilmaisu, jota Kepler oli käyttänyt kuvaamaan liikkeen vastustamista. Kappaleiden ominaisuuksiin hän liitti myös *kiinteyden*, joka vastustaa kokoon puristumista (elastisuutta) sekä *lujuuden*, joka pitää kappaleen koossa. Elastisuuden käsitettä Leibniz tarvitsi liikkeen välittymisessä kappaleesta toiseen kimmoisessa törmäyksessä.

Descartes’in liikelakeja vastaan suunnatussa kirjoituksessa *A Brief Demonstration of a Notable Error of Descartes and Others Concerning a Natural Law, According to which God is Said Always to Conserve the Same Quantity of Motion; a Law which They also Misuse in Mechanics* (Lyhyt osoitus huomattavasta virheestä, jonka

<sup>21</sup> Boyle, *The Grounds for and Excellence of the Corpuscular or Mechanical Philosophy*, <http://www.earlymoderntexts.com/assets/pdfs/boyle1674a.pdf>

Descartes ja muut ovat tehneet kuvatessaan luonnonlakia, jonka mukaan Jumalan sanotaan aina säilyttävän saman liikemäärän; Laki, jota he myös käyttivät väärin mekaniikassa<sup>22,23</sup>. Leibniz ilmaisi liikettä kuvaavia luonnonlakeja seuraavasti:

Voima (*vis viva*, nykykäsittein *liike-energia*), jonka kappale saa pudotessaan määrätystä korkeudesta on yhtä suuri kuin voima, joka kykenee nostamaan sen kyseiselle korkeudelle.

- 1) Voima, jonka yhden naulan (*pound*) painoinen kappale saa pudotessaan neljän metrin korkeudesta on yhtä suuri kuin voima, jonka neljän naulan painoinen kappale saa pudotessaan yhden metrin korkeudesta.
- 2) Galilein laki: Matka, jonka putoava kappale etenee, on verrannollinen putoamisajan neliöön.
- 3) Maailman koko voima säilyy sekä paikallisesti että globaalisti, siten että aina on yhtä paljon voimaa syystä ja toteutumassa.

Leibnizin ”voima” merkitsi nykykäsittein energiaa, joka tunnistettiin integroiduksi voimaksi vasta 1800-luvulla. Kohdan 3) määritelmä tarkoittaa nykykäsittein globaalia tasapainoa luovutetun potentiaalienergian ja saadun liike-energian välillä. Kirjoituksessaan *Essays in Dynamics, Part 2: The Laws of Nature*<sup>24</sup>, (*Kirjoitelmia Dynamiikasta, Osa 2/20: Luonnonlait*) Leibniz tiivistää liikelait seuraavasti:

- kaikki muutokset ovat asteittaisia
- jokaisella voimavaikutuksella (action) on vastavaikutus (reaction)
- mitään voimaa ei synnytetä vähentämättä aiempaa voimaa; kappale, joka työntää toista kappaletta hidastuu
- seurauksessa (effect) ei ole enempää eikä vähempää voimaa (energiaa) kuin sen syystä (cause)

Leibnizille syy on potentiaalienergia, josta hän on myös käyttänyt ilmaisua *vis mortua* (*kuollut voima*) ja toteutuma on liikkeen energia, josta hän käytti ilmaisua *vis viva* (*elävä voima*),  $mv^2$ . Kappaleiden kimmoisissa törmäyksissä säilyy elävä voima, tarkkaan ottaen se muuttuu välillä elastisuuden kautta kuolleeksi jousivoimaksi, joka puolestaan vapautuessaan palauttaa samansuuruisen elävän voiman. Ei-kimmoisten törmäysten tapauksessa Leibniz selitti energian säilymisen sillä, että ei-kimmoisissa törmäyksissä muodonmuutosvoima jakautuu lukuisiin osiin, jolloin osa nettoliikkeestä häviää.

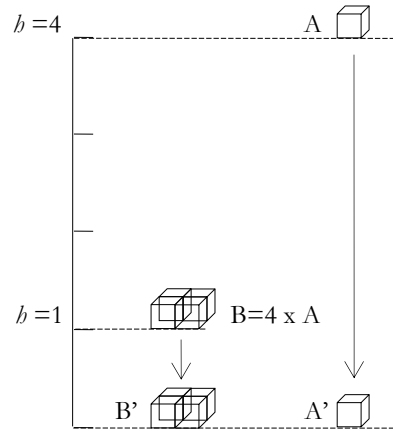
Leibniz perusteli väitteitään 1) ja 2) heilurin ominaisuuksilla ja yksinkertaisilla kokeilla. Heiluri osoittaa, että pudotuksessa saavutettu liikevoima (nykytermein liike-energia) kykenee nostamaan kappaleen samalle korkeudelle, josta se on lähtenyt liikkeelle. Hän toteaa, että Descartes’in liikemäärä ei täytä tätä vaatimusta, mikä voidaan osoittaa esim. yksinkertaisella kokeella: Yhden naulan painoisen kappaleen A nostaminen neljän kyynärän korkeuteen vaatii saman voiman kuin neljän naulan painoisen kappaleen B nostaminen yhden kyynärän korkeuteen, kuva 1-14. Voidaan siis olettaa, että korkeudelta  $h=4$  putoava kappale A saavuttaa yhtä suuren liikevoiman kuin korkeudelta  $h=1$  putoava kappale B, jonka paino on  $4xA$ :n paino.

<sup>22</sup> Leibniz, *Filosofisia tutkimuksia*, suomeksi toimittaneet T. Aho ja M. Roinila, Gaudeamus (2011)

<sup>23</sup> [Stanford Encyclopedia of Philosophy, Leibniz's Philosophy of Physics](https://plato.stanford.edu/archives/win2013/entries/leibniz-philosophy-of-physics/)

<sup>24</sup> Leibniz, *Essay in Dynamics, Part 2, The Laws of Nature*, <http://www.earlymoderntexts.com/assets/pdfs/leibniz1695b.pdf>

Galileo Galilei on osoittanut, että kappaleen painosta riippumatta korkeudelta  $4h$  tapahtuvassa pudotuksessa saavutettu nopeus on kaksinkertainen verrattuna korkeudelta  $h=1$  tapahtuvaan pudotukseen. Pudotuksessa saavutettava liikemäärä on Descartes'in mukaan kappaleen koko  $x$  nopeus, joten kappaleella A se on siis  $2xA$  ja kappaleella B  $1xB=4xA$ . Pudotuksessa kappaleen A saama liikemäärä on siis vain puolet kappaleen B saamasta liikemäärästä, vaikka edellä päätelimme, että kappaleiden A ja B pudotuksissa saamiin liikevoimien tulisi olla yhtä suuret. Pudotuksessa saavutettu liikevoima  $mv^2$  sen sijaan on kummallekin kappaleelle yhtä suuri, eli  $4xA$ .



Kuva 1-14. Leibnizin koe elävän voiman (*vis viva*) määrittämiseksi.

Leibniz päätteli, että liikevoima on arvioitava siitä, millaisen vaikutuksen se tuottaa; vaikutusta kuvaa korkeus, jolle liike kykenee nostamaan kappaleen. Leibniz arveli, että sekaannus liikemäärän käsitteen käytössä on ollut synnä Huygensin esittämää heilurin teoriaa kohtaan esitetyle kritiikille. Vuonna 1686 julkaisemassaan *Metafysiikan Perusteissa* (*Discourse on Metaphysics*<sup>25</sup>), hän toteaa, että vastoin kartesiolaisia ja monia muita, Jumala säilyttää aina saman voiman (*vis viva*,  $mv^2$ ), mutta ei liikemäärää ( $mv$ ).

Kuten Leibnizin pudotuskokeen kuvailusta ilmenee, hänen liikevoimansa tarkoittaa liikkeen aikaansaamisessa saatua energiaa, joka pudotuksessa on yhtä suuri kuin luovutettu gravitaatioenergia. Heilurissa ja pudotuskokeissa on kysymys kineettisen energian ja potentiaalienergian konversiosta, jota ei voida päätellä suoraan liikemäärästä. Kuten myöhemmin ymmärrettiin, törmäyskokeissa pätee sekä liikemäärän säilyminen että kineettisen energian säilyminen. Näennäinen ristiriita johtuu siitä, että energiaa käsitellään skalaarisuureena ja liikemäärää vektorisuureena.

Leibniz piti Newtonin gravitaatiolakia järjenvastaisena, sillä se merkitsi kaukovaikutusta toisistaan erillisten atomien välillä tyhjän avaruuden yli, kuten hän asian esittää Samuel Clarkelle lähettämässään kolmannessa kirjeessä. Omassa fysiikassaan Leibniz kuvasi aineen rakenneosat irrallisten atomien sijaan monadeilla, joita hän kuvasi peilikuviksi ympärillä olevasta materiaalisesta maailmasta, ja jotka säilyttävät yhteytensä kaikkeen muuhun aineeseen. Leibnizin kielteinen suhtautuminen ja vasta-argumenttien etsintä Newtonin gravitaatiolakiin saattoi osittain johtua jo tuolloin käynnissä olleesta riidasta integraalilaskennan alkuperästä Newtonin kollegoiden syytettyä Leibnizia Newtonin plagioinnista.

<sup>25</sup> Leibniz, *Discourse on Metaphysics*, <http://www.earlymoderntexts.com/assets/pdfs/leibniz1686d.pdf>

*Vis viva, vis mortua – impetus, conatus*

Mitä ilmeisimmin Leibniz etsi fysikaalista ilmaisu Aristoteleen ”entelecheia”:lle, mahdollisuuden (potentiaalisuuden) aktualisoitumiselle. Leibniz tunnisti gravitaation ja esim. jännitetyn jousen tai elastisen kappaleen puristustilan ”kuolleeksi voimaksi”, potentiaalienergiaksi (*vis mortua*), jota luovutettaessa syntyy liike ja liike-energia, ”elävä voima” (*vis viva*). Vastaavasti liikkeen energia voitiin purkaa takaisin potentiaalienergiaksi esimerkiksi heilurissa tai värähtelevässä jousessa. Leibniz vertasi Galilein pudotus- ja heilurikokeissa saamia tuloksia Descartes’in liikemäärään, ja päätteli, että määrätyn potentiaalienergian saamiseen tarvitaan tietty nopeuden ja liikemäärän tulo – ei siis pelkkä liikemäärä  $m \cdot v$  vaan liikkeen energiaa kuvaava suure  $v \cdot mv = m \cdot v^2$ .

Leibnizin elävä voima (*vis viva*) vastaa reilua vuosisataa myöhemmin tunnistettua kiineettisen energian käsitettä. Integraalilaskennan periaatteita kehitellessään Leibniz yhdisti Newtonin liikeyhtälön voima -käsitteen ”liikkeen alkuperän alkioon” (*conatus*). Liikevoima (*impetus*) saatiin integroimalla liikkeen aikaansaamiseen käytettävissä oleva *conatus*.

Newton onnistui määrittelemään voiman täsmällisesti sekä gravitaatio- että liikeyhtälöidensä avulla. Energian käsite integroituna voimana ymmärrettiin kuitenkin vasta toistasataa vuotta myöhemmin. Energian säilymisen periaate välittyi Newtonin jälkeisessä analyyttisen mekaniikan ja termodynamiikan kehityksessä. Perustavaa laatua olevaksi luonnonlaiksi energian säilymisen määritteli kuitenkin vasta Herman Ludwig von Helmholtz 1800-luvun puolivälissä.

**Newton ja Principia**

Newtonin ehdoton suursaavutus oli selkeisiin postulaatteihin perustuva liikeoppi, joka mahdollisti gravitaation ja liikkeen yhdistämisen yksinkertaisessa matemaattisessa muodossa. Newton saattoi osoittaa Keplerin heurististen planeettaratojen fyysikaalisen perustan ja teorian tarkan vastaavuuden havaintoihin. Newton kokosi teorian ja laskelmansa suurteoksensa *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica (Luonnonfilosofian matemaattiset periaatteet)*, jonka ensimmäinen painos ilmestyi vuonna 1687.

Principian synty voidaan liittää vuonna 1660 perustetun Royal Societyn aktivoimaan tieteelliseen toimintaan Englannissa. Royal Societyn jäsen Robert Hooke oli vuonna 1666, parikymmentä vuotta ennen Principian ilmestymistä, pitänyt Royal Societyssä esitelmän otsikolla *Maaailman systeemi*, jossa hän oli todennut mm. seuraavia luonnon lainalaisuuksia<sup>26</sup>:

- 1) Taivaankappaleella ei ole niiden keskipisteisiin kohdistuvaa gravitaatiovoimaa ainoastaan niihin itseensä kuuluvien osien suhteen, vaan taivaankappaleet vetävät vaikutuspiirissään puoleensa myös toinen toisiaan.
- 2) Että kaikki liikkeessä olevat kappaleet jatkavat liikettään suoraviivaisesti, ellei niihin vaikuta jatkuva ulkoinen voima, joka saa liikeradan kääntymään ympyräksi, ellipsiksi tai joksikin muuksi käyräksi.

<sup>26</sup> Citation of Hooke's 1666 Royal society lecture "On gravity", [http://en.wikipedia.org/wiki/Robert\\_Hooke](http://en.wikipedia.org/wiki/Robert_Hooke)

- 3) Tämä voima on paljon suurempi kappaleiden ollessa lähellä toisiaan. Määrä, jolla voima heikkenee etäisyyden kasvaessa, en ole keksinyt.

Vuonna 1679 hän kirjoitti Newtonille kysyäkseen tämän mielipidettä planeettaaliikkeen jakamisesta tangentialiseen ja keskihakuiseen komponenttiin, ilmaisten oletuksenaan, että ”... että keskihakuiskomponentti on kaksinkertaisesti kääntäen verrannollinen etäisyyteen keskipisteestä”. Hooke ei pystynyt todentamaan näkemystään matemaattisesti, ja asia jäi joksikin aikaa hautumaan.

Robert Hooken ajatusten inspiroimana, vuonna 1684 suuresti arvostettu arkkitehti ja matemaatikko, Christopher Wren haastoi Robert Hooken ja astronomi, matemaatikko Edmond Halleyn johtamaan matemaattisen teorian, joka yhdistäisi Keplerin lain spesifiseen voimalakiin. Halley antoi tehtävän Newtonin ratkaistavaksi. Newton kirjoitti 9-sivuisen vastauksen *De motu corporum in gyrum*<sup>27</sup> (*Kiertoradalla olevien kappaleiden liikkeistä*), jonka Newton, Halleyin innoittamana ja kustantamana, laajensi *Principiaksi* vuonna 1687.

Seuraavat kommentit ja lainaukset ovat *Principian* vuonna 1725 ilmestyneen kolmannen painoksen englanninkielisestä käännöksestä<sup>28</sup>.

*Principia* alkaa liikelakien edellyttämällä määritelmillä.

- 1) Ainemäärä muodostuu kappaleen tilavuudesta ja tiheydestä
- 2) Liikemäärä on liikkeen mitta, joka saadaan kappaleen nopeudesta ja ainemäärästä
- 3) Aineen luontainen voima on voima, joka pyrkii säilyttämään kappaleen lepotilan tai suoraviivaisen liikkeen.
- 4) Aiheutettu voima on kappaleeseen kohdistettu ulkoinen vaikutus, jolla kappaleen lepotilaa tai suoraviivaista liiketilaa pyritään muuttamaan.
- 5) Keskihakuisvoima on voima, jolla kappaletta kaikilta osin pyritään vetämään kohti yhtä pistettä, ikään kuin keskipistettä.

Kohdissa 6–8 Newton tarkentaa keskihakuisvoiman ominaisuuksia.

Newton esittää liikelait aksiomeina:

- 1) Kappale säilyttää lepotilansa tai suoraviivaisen liiketilansa kunnes tilan muuttamiseksi kohdistetaan voima.
- 2) Liiketilan muutos (kiihtyvyys) on verrannollinen kappaleeseen vaikuttavaan voimaan, ja se ilmenee suoraviivaisesti voiman suunnassa.
- 3) Jokaiseen voimavaikutukseen liittyy aina yhtä suuri vastakkaissuuntainen voima; toisin sanoen, kahden kappaleen vaikutus toisiinsa on aina yhtä suuri ja suunnaltaan vastakkainen.

Newton päättää liikelaista 3) mm. liikemäärän säilymisen törmäyksissä, ja tasaisessa liikkeessä olevan massasysteemin painopisteen säilymisen.

Kirjat 1 ja 2 *Kappaleiden liike*, käsittelevät laajasti liikelakeja erilaisiin tilanteisiin sovellettuna. Newton käsitteli keskeisliikkeitä ja kiertoratojen ominaisuuksia laajalti jo

<sup>27</sup> Introduction of *DeMotu* [http://en.wikipedia.org/wiki/De\\_motus\\_corporum\\_in\\_gyrum](http://en.wikipedia.org/wiki/De_motus_corporum_in_gyrum)

<sup>28</sup> *Principia*, A New Translation by I. Bernard Cohen and Anne Whitman, University of California Press, London/Los Angeles (1999)

Kirjoissa 1 ja 2 ennen gravitaatiovoiman määrittelyä – itse asiassa Newton halusi välttää abstraktin gravitaatiovoiman postulointia, ja etsi keskihakuisvoiman, joka tarvittiin toteuttamaan Keplerin elliptinen kiertorata. Vertaamalla, keskeisliikkeen kehänopeutta, sädettä ja kiertoaikaa, hän pääättelee mm., että Keplerin kolmannen lain mukainen suhde säteen ja kiertoaajan suhteen toteutuu keskihakuisvoimalla, joka on kääntäen verrannollinen kiertosäteen neliöön – tulos, jonka hän luvussa 3 laajentaa ellipsiratoihin siten, että ympyräradan sädettä vastaa pääakselin puolikas.

Newton löysi gravitaatiovoiman etäisyysriippuvuuden Keplerin lakien toteuttavasta keskihakuisvoimasta. Gravitaatiovoiman neliöllistä etäisyysriippuvuutta oli ehdottanut useampi astronomi. Eräs heistä oli ranskalainen amatööriastronomi Ismael Bulliau (1605–1694), joka oli vuonna 1645 ilmestyneessä kirjassaan *Astronomica Philolaica* puoltanut voimakkaasti Keplerin elliptisiä planeettaratoja, mutta vastustanut Keplerin väitettä, että planeettoihin auringosta kohdistuva gravitaatiovoima olisi kääntäen verrannollinen planeetan etäisyyteen auringosta. Hän päätteli, että samoin kuin valon voimakkuus laskee kääntäen suhteessa lähteen etäisyyden neliöön, tulee myös gravitaatiovoiman, mikäli sellainen on, heikentyä planeetan ja auringon välisen etäisyyden neliöön kääntäen verrannollisena. Newton referoi Principiassa Bulliaun mittauksia, mutta ei hänen päätelmäänsä gravitaatiovoiman neliöllisestä etäisyysriippuvuudesta.

Newton liitti gravitaatiovoiman tarkastelun Principiaan Kirjassa 3 *Maailman systeemi* saatuaan näkemyksilleen vahvan tuen Edmond Halleyltä, joka myös tuki kirjan painatusta taloudellisesti.

Gravitaatiovoiman käsite yhdisti planeettojen kiertoratoja hallitsevan, säteen neliöön kääntäen verrannollisen keskihakuisvoiman kiertokappaleen ja keskuskappaleen aineen määrään (massaan), mikä antoi planeettojen keskihakuisvoimalle ontologisen perustan. Kirjassa 3 hän toteaaakin, että se mitä hän on aikaisemmin nimittänyt planeettajärjestelmissä keskihakuisvoimaksi, korvautuu vastedes kappaleiden ainemääriin (massaan) sidotulla gravitaatiovoimalla. Newton aloittaa Kirjan 3 luonnonfilosofian tutkimuksen ”säännöllä”:

- 1) Luonnonilmiöiden syiksi tulee hyväksyä vain ne, jotka ovat tarpeen ja riittävät.
- 2) Syiden, jotka on määritelty samankaltaisille luonnonilmiöille, tulee mikäli mahdollista, olla samat.
- 3) Kappaleiden universaaleja ominaisuuksia ovat ominaisuudet, joita ei voida hankkia tai poistaa (esim. ulottuvuus, kovuus, liikkuvuus, inertia, alttius gravitaatiolle).
- 4) Kokeellisessa filosofiassa, ilmiöistä päättelämällä kerättyjä väitteitä voidaan mahdollisista vastakkaisista hypoteeseista huolimatta pitää joko tarkkoina tai jokseenkin tosina kunnes jotkin muut ilmiöt tekevät kyseiset väitteet joko tarkemmiksi tai poikkeuksiksi.

Sääntöä 4 tulisi noudattaa siten, että päättelämällä saatuja perusteltuja tuloksia ei tule kumota hypoteeseilla.

Newton jatkaa maailman systeemin kuvaamista kappaleella *Ilmiöt*, jossa hän esittää Keplerin lakien mukaisia havaintotuloksia planeettojen liikkeistä.

Kappaleessa, *Propositions (Väitteitä)*, hän havaintotuloksiin viitaten aloittaa Jupiterin kuilla todeten, että voimat, jotka vetävät Jupiterin kuita pois suoraviivaisesta liikkeestä niiden radalla, kohdistuvat kohti Jupiterin keskusta ja ovat verrannolliset etäisyyden neliöön ko. kuista Jupiterin keskukseen. Vastaava tapahtuu Saturnuksen kuille.

Kaikkien planeettojen osalta Newton toteaa havaintoihin perustuen, että voimat, jotka vetävät planeettoja pois suoraviivaisesta liikkeestä niiden radalla, kohdistuvat kohti aurinkoa ja ovat verrannolliset etäisyyden neliöön ko. planeetoista aurinkoon.

Kuun osalta Newton toteaa saman maan suhteen. Lisäksi hän toteaa, että kuu gravitoi maan suuntaan vastakkaisen gravitaatiovoiman pitäessä kuun kiertoradallaan vetäessään kuun pois suoraviivaisesta liikkeestä. Vastaava tapahtuu Jupiterin ja Saturnuksen kuille. Yhteenvetona Newton toteaa, että kuiden gravitaatio vastaavaa planeettaa kohti on universaali ilmiö, samoin kuin planeettojen gravitaatio kohti aurinkoa. Gravitaatio on kääntäen verrannollinen etäisyyden neliöön voiman aiheuttavasta taivaankappaleesta. Gravitaatio ilmenee myös planeettojen välillä. Siten Jupiterin ja Saturnuksen ollessa lähimmillään toisiaan, niiden keskinäinen gravitaatio häiritsee niiden ratoja auringon ympäri. Jokainen taivaankappale gravitoi kutakin planeettaa kohti voimalla, joka on verrannollinen kyseisen taivaankappaleen aineen määrään.

Newton päättelee edelleen, että kappaleen paino ei riipu sen muodosta tai rakenteesta. Maan lähellä olevat kappaleet havaitaan painaviksi, ja yhtä etäällä maasta olevien kappaleiden paino kuvaa niiden sisältämää aineen määrää. Gravitaatio ilmenee kaikissa kappaleissa ja on verrannollinen kappaleen sisältämään aineen määrään. Newton liittää gravitaatioon ainemäärän käsitteen ja inertiaominaisuuteen massan käsitteen – *yhtä suurten kappaleiden tibeys on sama, jos niiden inertiavoima (massa) on yhtä suuri*. Näin ainemäärä viittaa gravitaatiomassaan ja inertiavoima liikemassaan. Newtonin taivaanmekaniikan ratkaisut perustuvat ekvivalenssiperiaatteeseen, jonka mukaan gravitaatiomassa on sama kuin liikemassa.

Kun kaksi taivaankappaletta, joiden ainemäärät ovat tasaisesti jakautuneet niiden keskipisteiden ympärille, gravitoivat keskenään, niin kummankin taivaankappaleen paino toiseen nähden on kääntäen verrannollinen niiden keskipisteiden välisen etäisyyden neliöön. Planeetan pinnasta sisäänpäin mennessä gravitaatio pienenee jokseenkin suhteessa etäisyyteen planeetan keskipisteestä. Planeettojen liikkeet voivat jatkua hyvin pitkän ajan.

Newton esittää hypoteesina, että maailman systeemin keskipiste on levossa. Tästä seuraa, että aurinkokunnan gravitaatiokeskipiste on levossa. Jos tämä keskipiste kuitenkin on suoraviivaisessa liikkeessä, on myös universumin keskipiste liikkeessä esitetyn hypoteesin vastaisesti. Aurinko on jatkuvassa liikkeessä, mutta se ei koskaan siirry kauas aurinkokunnan gravitaatiokeskipisteestä. Planeetat liikkuvat ellipsiradoilla, joiden toisessa polttopisteessä on aurinko; ratasäteiden piirtämät alat ovat suoraan verrannolliset planeettojen kiertoaikoihin.

Newton jatkaa, esittäen Kirjassa 3 yhteensä 98 väitettä, joissa hän käy läpi suuren määrän tunnetuista tähtitieteen havainnoista tehtäviä päätelmiä. Hän päättelee mm., että kiintotähdet ovat hyvin kaukana koska niissä ei havaita parallaksia. Hän päättelee myös pyörivien taivaankappaleiden litistymisen navoiltaan, arvioi kuun ja auringon



vaikutukset meren pintaan ja vuorovesiin ja analysoi komeettojen ratojen määrittämisen.

Principian yhteenvedossa<sup>29</sup> Newton katsoo, että auringon, planeettojen ja komeettojen mitä elegantin systeemi ei ole voinut syntyä ilman älykkään ja mahtavan olennon suunnittelua ja hallintaa.

*”Ja jos kiintotähdet ovat samanlaisten systeemien keskuksia, ne ovat saman ”yhden” suunnitellut ja hallitsemat, erityisesti kun kiintotähtien valo on luonteeltaan samanlaista kuin auringon valo, ja kaikki systeemit lähettävät valoa kaikkiin muihin systeemeihin. Ja jotta kiintotähdet eivät putoaisi toistensa päälle gravitaation voimasta, hän on sijoittanut ne suunnattomiin etäisyyksiin toisistaan. Olemme yksimielisiä siitä, että Jumala on välttämättä olemassa, ja samalla välttämättömyydellä hän on aina ja kaikkialla”.* (General Scholium, p. 940)

Loppupäätelmissään Newton jatkaa: *”Olen selittänyt taivaiden ja meren ilmiöt gravitaatiovoiman avulla, mutta en ole esittänyt gravitaation syytä. Todellakin, tämä voima kumpuaa jostakin, joka tunkeutuu vaimentumattomana jopa auringon ja planeettojen keskuksiin. Se ei kohdistu verrannollisena kappaleiden pinta-alaan, vaan kappaleiden sisältämän aineen määrään; sen vaikutus ulottuu kaikkialle mittaamattomiin etäisyyksiin vaimentuen aina subteessa etäisyyksien neliöön”.*

Newton ei itse ollut tyytyväinen olettamaansa voiman kaukovaikutukseen (*action at distance*). Principian edellisen (toisen) painoksen yhteenvedossa (*General Scholium*) hän oli perustellut gravitaatiolakiaan seuraavasti:

*”En ole kyennyt löytämään näiden gravitaatiolakien syytä enkä halua muotoilla hypoteeseja. Mitä tahansa, mitä ei voida päätellä ilmiöistä, tulee nimittää hypoteesiksi; ja hypoteeseilla, olivatpa ne sitten metafysisiä tai fyysisiä, tai perustuivatpa ne okkultisiin tai mekaanisiin ominaisuuksiin, ei ole sijaa kokeellisessa fysiikassa... Meille riittää, että gravitaatio on olemassa ja se toimii esittämämme lakien mukaisesti, ja selittää laajasti taivaankappaleiden ja merien liikkeet.”*

Newtonin Principia nosti luonnontieteet kertaharppauksella täysin uudelle tasolle. Principiassa toteutuivat tieteellisen työskentelyn keskeiset periaatteet: eteneminen selkeistä määritelmistä ja hypoteeseista havaintoja yksityiskohtaisesti analysoiden päätelmiin. Principiasta välittyi Newtonin ajattelun luonnonfilosofinen syvyys ja hänen aito pyrkimyksensä havaintojen takana olevien yksinkertaisten luonnonlakien tunnistamiseen. Samalla Principia osoitti matematiikan voiman luonnonilmiöiden tarkastelussa. Newtonin liike- ja gravitaatiolait mahdollistivat havaintojen analyysin tasolla, jota ei aikaisemmin ollut lähimainkaan kyetty saavuttamaan.

Newtonin työ ei olisi ollut mahdollinen ilman vuosisatojen aikana tapahtunutta luonnonlakien pohdintaa, käsitteiden kehittelyä, kokeita ja tarkkaa, systemaattista havainnointia. Newtonin työ merkisi läpimurtoa matemaattiselle fysiikalle ja empiiriselle tutkimukselle osoittaessaan havaintojen tarkan analyysin merkityksen hypoteesien testaamisessa.

Newton onnistui yhdistämään monen edeltäjänsä ja aikalaisensa työn sekä käsitteiden eksaktin määrittelyn matemaattisen ilmaisun kautta. Newtonin liike- ja gravitaatiolait tekivät voimasta fysiikan keskeisen käsitteen ja perussuuren. Vasta lähes

<sup>29</sup> *Principia*, A New Translation by I. Bernard Cohen and Anne Whitman, University of California Press, London/Los Angeles (1999)

kaksisataa vuotta myöhemmin hahmotettiin energian käsite, joka tunnistettiin kaikissa suljetuissa systeemeissä keskeiseksi säilyjäksi. Klassisen mekaniikan liike-energia (kineettinen energia) saadaan Newtonin 2. laista johdettuna suurena voiman matkaintegraalina. Newtonin voimakeskeiset liike- ja gravitaatiolait sisälsivät implisiittisesti oletuksen paikallisesta lepotilasta ja äärettömästä avaruudesta – sekä rajattomasti kasvavasta nopeudesta vakiovoiman vaikuttaessa kappaleeseen.

Koordinaatistoa, jossa Newtonin mekaniikkaa sovelletaan, nimitetään yleisesti inertiaalikoordinaatistoksi (*inertial frame of reference*). Tasaisella nopeudella toisiinsa nähden liikkuvat inertiaalikoordinaatistot ovat samanarvoisia, minkä tahansa koordinaatiston voidaan katsoa olevan lepotilassa. Liikelakien suhteen Newtonin maailmassa ei ole globaalia lepotilaa, vaikka Newton ajatteli auringon, tai aurinkokunnan painopisteen universumin keskustaksi ja avaruuden lepotilaksi. Newtonin inertiaalikoordinaatistojen välillä pätee Galilei-muunnos, jonka mukaan toisiinsa nähden liikkuvissa inertiaalikoordinaatistoissa havaittaviin nopeuksiin summautuu lineaarisesti koordinaatistojen suhteellinen nopeus.

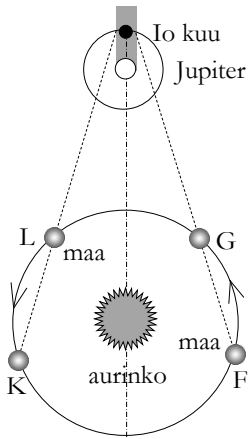
Inertiaalikoordinaatiston käsite sisältää implisiittisesti oletuksen suhteellisuusperiaatteesta, jonka mukaan liikelait ja yleisesti kaikki luonnonlait näkyvät samanlaisina kaikissa inertiaalikoordinaatistoissa, koordinaatistojen keskinäisistä liiketiloista riippumatta. Inertiaalikoordinaatiston käsite määrittäytyy kinemaattisin perustein, ongelmat inertiaalikoordinaatistojen käsittelyssä ilmenevätkin lähinnä dynamiikkaa edellyttävissä tarkasteluissa. Newtonin mekaniikassa liikemäärä on suoraan verrannollinen nopeuteen, joten liikemäärän muutos inertiaalikoordinaatistosta toiseen siirryttäessä ei synnytä ongelmaa. Sen sijaan kineettinen energia, joka on verrannollinen nopeuden neliöön, ei muunnu Galilein muunnoksella kineettiseksi energiaksi toisessa inertiaalikoordinaatistossa.

Kinemaattisin perustein määritelty lepokoordinaatisto ja Galilei-muunnos johtivat ongelmiin sähkömagneettisen säteilyn havaitsemisessa säteilylähteeseen nähden liikkuvassa koordinaatistossa. Ongelmaa lähdettiin ratkaisemaan 1800-luvun lopulla kinemaattiset perusteet säilyttäen, korvaamalla lineaarinen Galilei-muunnos epälineaarilla muunnoksilla. Yhteensopivuus Maxwellin yhtälöiden kanssa ja paras havaintoja vastaavuus havaintojen kanssa saatiin Lorentz-muunnoksella, jolle suhteellisuusperiaatteeseen ja vakioksi määritellyyn valon nopeuteen perustuva Einsteinin suppea suhteellisuusteoria antoi luonnonlain aseman.

## Valon nopeus

1600-luvun aktiivista luonnontieteiden kehitystä täydensivät tanskalaisen astronomin, Ole Römerin (1644–1710) päätelmät valon äärellisestä nopeudesta ja italialais-ranskalaisen astronomin Giovanni Cassinin havainnot Saturnuksen kuista ja renkaista sekä planeettojen pyörähdysajoista. Römer oli seurannut Jupiterin Io kuuta useamman kuukauden ajan ja havainnut, että kuun siirtyminen Jupiterin taakse viivästy systemaattisesti vuodenaikana, jona etäisyys Jupiterista maahan kasvoi, kuva 1-15. Römer ei itse laskenut valon nopeutta saamistaan mittaustuloksista, mutta Christiaan Huygens usean muun ohella johti tuloksista arvion valon nopeudelle. Huygensin arvio oli, että valo etenee noin 16,67 maan halkaisijaa sekunnissa, mikä vastaa

nopeutena noin 210 000 km/s. Römerin tuloksen valon äärellisestä nopeudesta suhtauduttiin pitkään suurella varauksella. Englantilainen astronomi James Bradley vahvisti Römerin tuloksen valon äärellisestä nopeudesta noin vuonna 1730.



Kuva 1-15 Valon nopeuden määrittäminen Jupiterin Io kuun kiertoaikasta. Kuva on rekonstruoitu Römerin vuoden 1676 artikkelissa esitetystä kuvasta, jossa hän esittää valon nopeuden mittaamisen. Hän vertasi Jupiterin Io kuun kiertoaikaa maan edetessä kohti Jupiteria pisteestä F pisteeseen G, ja maan loitotessa Jupiterista pisteestä L pisteeseen K.

## Newtonin avaruudesta Einsteinin avaruuteen

Planeettajärjestelmän mekaniikkaan keskittyessään Isaac Newton ei juurikaan ottanut kantaa planeettajärjestelmän takana olevaan avaruuteen. Riitti, että aurinkokunta voitaisiin tarkastella itsenäisenä systeeminä, joka on levossa tai lineaarisessa liikkeessä avaruudessa.

1700-luvun puolivälissä huomattiin, että vanhimpien ja uusimpien planeettojen liikkeitä koskevien havaintojen vertaaminen viestittää kuun ja Jupiterin ratanopeuksien kasvusta, ja vastaavasti Saturnuksen nopeuden pienenemisestä, mikä merkitsisi kuun romahtamista maahan, Jupiterin romahtamista aurinkoon ja Saturnuksen pakoa aurinkokunnasta. Ranskan tiedeakatemia aloitteesta vuonna 1748 Euler ja Lagrange yrittivät ratkaista ongelmaa ilman tulosta. Vuonna 1776 Laplace kokeili ratkaisuja, joissa oletettiin mm., että gravitaatio ei ole välitön vaan vaikuttaa viiveellä. Viivästynyt gravitaatio ei antanut vastausta. Lopulta Laplace löysi havainnoille selityksen systeemiin kuuluvista luonnollisista jaksollisista häiriöistä, jotka integroituivat pienistä kolmannen kertaluokan termeistä, jotka Euler ja Lagrange olivat jättäneet huomiotta.

Laplace osoitti myös, että kuun radassa havaitut muutokset liittyivät muiden planeettojen aiheuttamiin muutoksiin maan radan elliptisyydessä. Saturnuksen ja Jupiterin havaitut muutokset selittyivät planeettojen liikkeiden vuorovaikutuksilla; Laplace tunnisti erityisen yli 900 vuoden vuorovaikutusjakson, joka selitti 1700-luvun havainnot suurella tarkkuudella.

Laplacen perusteellinen viisiosainen taivaanmekaniikan teos *Mécanique Céleste*<sup>30</sup>, johon hän on huolellisesti koonnut myös edeltäjiensä työn, ilmestyi vuosina 1799–1825.

Tärkeä matemaattinen valinta, jonka Laplace teki taivaanmekaniikan analyyseissään, oli nykykäsittein ilmaistuna gravitaatiopotentiaalilin kuvaaminen summautuvana skalaarikenttänä. Potentiaalikentän matemaattinen käsittely synnytti myös Laplacen mukaan nimetyn Laplacen yhtälön ja sen yksinkertaiseen esittämiseen käytetyn Laplace-operaattorin  $\nabla^2 = \Delta$  (*nabla*<sup>2</sup> tai *delta*, *Laplacian*).

Jean le Rond d'Alembert täydensi ranskalaisten matemaatikkojen panosta taivaanmekaniikan kehittämisessä esittämällä ensimmäisen käyttökelpoisen matemaattisen mallin kevät- ja syyspäiväntasausten siirtymien laskemiseen. d'Alembertin samoin kuin Eulerin ratkaisussa ei huomioitu merivirtojen ja ilmavirtausten vaikutusta. Laplace osoittikin, että nämä tekijät voidaan aidosti jättää huomiotta.

Kaiken kaikkiaan Laplacen matemaattiset analyytit osoittivat maapallon ja aurinkokunnan hämmästyttävän stabiilisuuden. Maapallon osalta hän monen muun tekijän ohella osoitti, että jos merivesien ominaispaino korvattaisiin elohopean ominaispainolla, meret läikkyisivät jopa lumipeitteisten vuorien korkeudella.

Edmond Halley oli 1600-luvulla oivaltanut, että auringon tarkan etäisyyden määrittäminen voitaisiin suorittaa hyödyntämällä tilannetta, jolloin Venus ohittaa auringon maan ja auringon välistä. Mittaus edellyttää samanaikaista havainnointia maapallolla pisteistä, jotka ovat mahdollisimman kaukana toisistaan. Tällainen mittaus

<sup>30</sup> Pierre-Simon Laplace, *Mécanique Céleste*, <http://www.archive.org/stream/mcaniquecles01laprich>

suoritettiin vuosina 1761 ja 1769. Mittauksiin osallistui mm. kapteeni Cook Otaheitessä Tahitilla, unkarilainen astronomi Maximilian Hell Vardöhuusissa, Norjan Lapissa Barentsinmeren rannalla, sekä astronomeja Saint Domingossa Väli-Amerikassa, Pensylvaniassa Amerikassa, Californiassa, Pondicherryssä Intiassa, Hyvän toivon niemellä Afrikan eteläkärjessä, St. Helenan saarella Eteläisellä Atlantilla, Hudson Baylla Kanadassa. Laplacen ilmiömaista matemaattista kykyä kuvasi, että hän määrittä auringon etäisyyden samalla tarkkuudella matemaattisin keinoin kuun liikkeistä pelkästään yhdestä observatoriosta suoritetuilla tarkoilla havainnoilla.

Aurinkokunnan rakenteen avautuminen ja sen tarkka matemaattinen kuvaus muutti ratkaisevasti kokonaiskuvaa avaruudesta. Samalla se merkitsi avaruuden tutkimiselle uudenlaista asennetta, jota kuvasi kriittinen suhtautuminen antiikista periytyneisiin ja uskontojen ylläpitämiin käsityksiin. Kiintotähtien kehä ei enää välttämättä ollut muuttumaton. Vuonna 1755 ilmestyneessä teoksessaan *Allgemeine Naturgeschichte und Theorie des Himmels*<sup>31</sup> (*Yleinen Luonnonhistoria ja Teoria Taivaista*) Immanuel Kant esitti filosofisin perustein kaasusumujen (*nebulae*) hypoteesin, jonka mukaan aurinko, planeetat ja jopa galaksit ovat tiivistyneet kaasusumuista. Laplace esitti oman kaasusumujen hypoteesinsa vuonna 1796 ilmestyneessä kirjassaan *Exposition du système du monde*<sup>32</sup> (*Maailman Systeemi*). Hypoteesissaan hän tarkastelee aurinkokunnan syntyä kokoonpuristuvasta hitaasti pyörivästä jäähtyvistä kaasukiekosta.

Newtonin ja Leibnizin kehittämä differentiaali- ja integraalilaskenta sekä Newtonin liikeoppi käynnistivät kehityksen, joka vei matematiikan ja matemaattisen fysiikan uudelle tasolle. 1700-lukua voidaan pitää matematiikan vuosisatana. Seuraavaa suurta kehitysporrasta luonnontieteissä edelsi matematiikan huiman kehityksen lisäksi 1800-luvulla tapahtunut monipuolinen, sekä empiirinen että teoreettinen työ fysiikan eri osa-alueilla.

## Analyttinen mekaniikka

Kuten kuvan 1-16 kaavio osoittaa, vuorovaikutus matematiikan ja fysiikan välillä oli monipuolista. Newtonin mekaniikan jatkokehityksen päälinjat johtivat analyttiseen mekaniikkaan, tilastolliseen mekaniikkaan ja termodynamiikkaan. Yhteiseksi tekijäksi näissä kehityksissä muodostui energian käsitteen muotoutuminen ja energian säilymisen tunnistaminen keskeiseksi fysiikan peruslaiksi. Energiäkäsité kytki mekaniikan ja termodynamiikan sähkömagnetismiin ja sähkömagneettiseen säteilyyn, mikä 1800-luvun lopulla johti Newtonin mekaniikan kattavuuden uudelleenarviointiin.

Vaikka energian käsite ja sen merkitys tehtynä työnä ja integroituna voimana oli pitkään hahmottamatta, sisälsi esim. Daniel Bernoullin hydrodynamiikka ja Joseph Lagrangen analyttinen mekaniikka energian säilymisen keskeisenä sisään rakentuneena periaatteena.

<sup>31</sup> Immanuel Kant, *Allgemeine Naturgeschichte und Theorie des Himmels*, [www.archive.org](http://www.archive.org)

<sup>32</sup> Pierre-Simon Laplace, *Exposition du système du monde*, [www.archive.org](http://www.archive.org)

### Lagrangen formalismi

Lagrange oli Eulerin tapaan ennen kaikkea matemaatikko. Variaatiolaskennalla johdettu Euler-Lagrangen yhtälö kuvaa pienimmän vaikutuksen tietä fysikaaliselle tapahtumalle. Yhtälö määrittelee liikemäärän muutoksen aikadifferenssissä yhtä suureksi kuin vastaava potentiaalienergian muutos aikadifferenssin määräämällä kulkumatkalla.

Lagrangen likeyhtälössä liikemäärä ilmaistaan kineettisen energian osittaisderivaatana nopeuden suhteen, mikä pätee Newtonin mekaniikan liikemäärälle mutta ei suppean suhteellisuusteorian liikemäärälle

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_j} - \frac{\partial L}{\partial q_j} = 0 \quad (1.1)$$

Yhtälön fysikaalinen sisältö voidaan tulkita energian säilymiseksi; muutospolun kullakin aikavälillä  $dt$  nopeuden muutosta  $\partial \dot{q}$  vastaava liike-energian lisäys on yhtä suuri kuin vastaavalla matkalla luovutettu potentiaalienergia.

Lagrangian,  $L = T - U$ , joka nykykäsittein ilmaistuna on kineettisen energian ja potentiaalienergian erotus, tuli käyttöön algebrallisena tekijä. Sen fysikaalinen merkitys tunnistettiin vasta energiäkäsitteen tarkennuttua.

### Fermat'n, Maupertuisin ja Hamiltonin formalismit

1700-luvun alkupuoliskolla elänyt ranskalainen matemaatikko ja monitieteilijä Pierre Louis Maupertuis tunnisti luonnon periaatteeksi ”helpoimman tien”, jota hän kuvasi *pienimmän vaikutuksen* tieksi. Noin sata vuotta Maupertuisia ennen elänyt monitieteilijä Pierre de Fermat oli ratkaissut optiikan ominaisuuksia olettamalla valon valitsevan nopeimman tai optisesti lyhimmän tien lähteestä kohteeseen.

Maupertuis, samoin kuin Euler hänestä riippumatta määritteli *paikallisen vaikutuksen* liikemäärän ja matkadifferenssin tulolla,  $mv \cdot ds$ . Kokonaisvaikutukseksi saadaan tällöin paikasta  $s_0$  paikkaan  $s_1$  integroitu liikemäärä

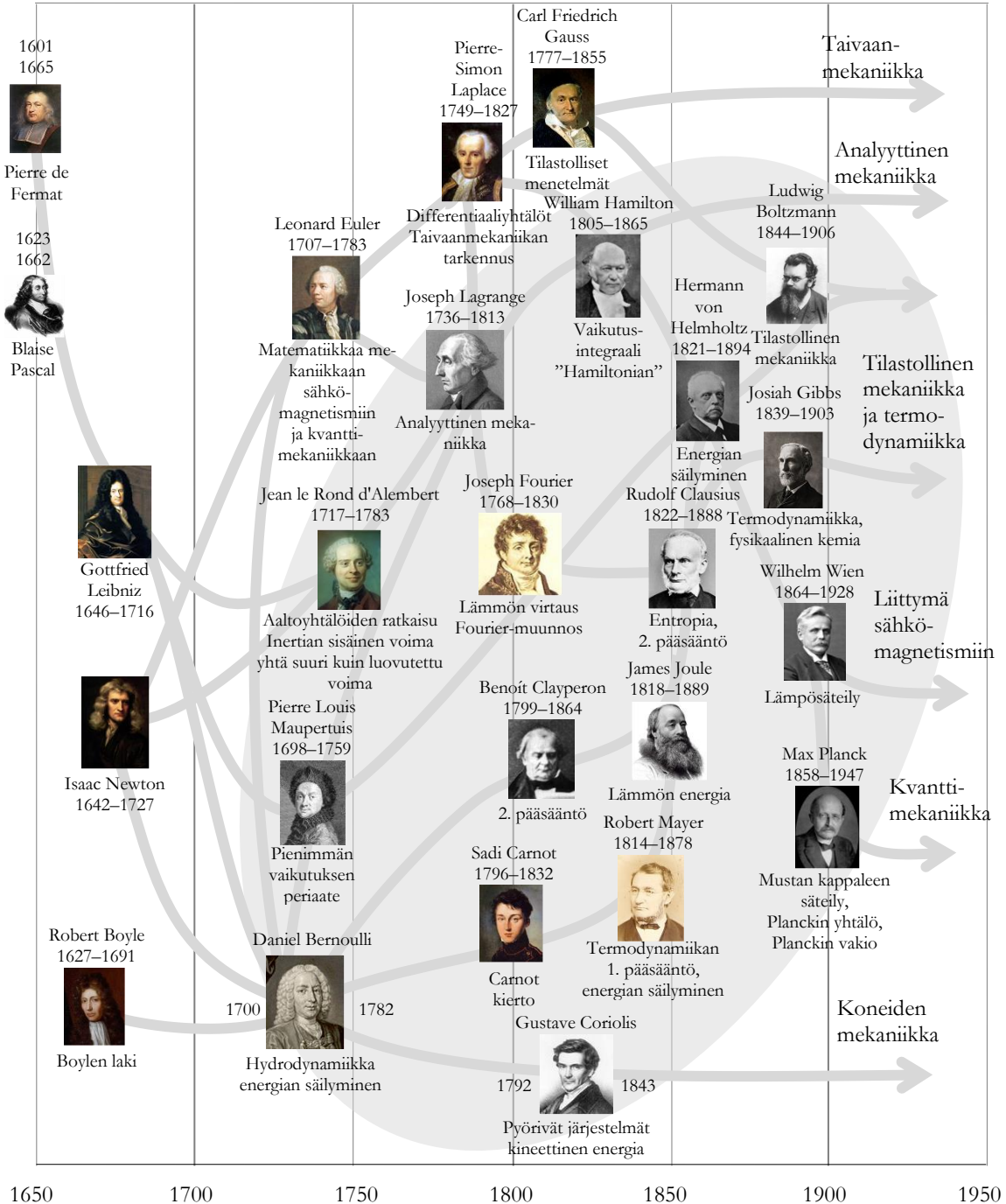
$$S_{\text{Maupertuis}} \equiv \int_{s_0}^{s_1} mv \, ds \equiv \int_{q_0}^{q_1} p \, dq \quad (1.2)$$

missä  $q$  on yleistetty paikkakoordinaatti.

Kun Maupertuisin matkadifferenssi  $ds$  ilmaistaan nopeuden ja aikadifferenssin tulona,  $ds = v \cdot dt$ , saadaan *hetkellinen vaikutus*,  $dS = mv^2 \cdot dt = 2 \cdot (\text{klassinen kineettinen energia}) \cdot dt$ , josta johdettuna kokonaisvaikutus hetkestä  $t_0$  hetkeen  $t_1$  saa klassisessa mekaniikassa muodon

$$S_{\text{Maupertuis}} = \int_{t_0}^{t_1} mv^2 \, dt = \int_{t_0}^{t_1} 2 \cdot T \, dt \quad (1.3)$$

Kun integrandissa oleva toinen  $T$  korvataan kokonaisenergian ja potentiaalienergian erotuksella  $T = E - U$ , saadaan



Kuva 1-16. Newtonin jälkeen tapahtunut mekaniikan kehitys ja kehityspolkujen jakautuminen mekaniikan eri osaluoksiin. Kehityksessä yhdistyi 1700-luvun matematiikan voimakas kehitys ja toisaalta 1800-luvulle painottunut vahvasti empiirinen tutkimus. 1800-luvun empirismiä täydensi sähkömagnetismi, joka ennen kaikkea energiäkäsitteen kautta kytkeytyi mekaniikan tuloksiin. Harmaa taustaellipsi kuvassa kuvaa aluetta, jossa painottuu energiäkäsitteen selkiytyminen ja energian säilyminen perustavaa laatua olevana luonnonlakina.

$$S_{Maupertuis} = \int_{t_0}^{t_1} (T + E - U) dt = E(t_1 - t_0) + \int_{t_0}^{t_1} (T - U) dt = E(t_1 - t_0) + \int_{t_0}^{t_1} L dt \quad (1.4)$$

joka palautuu ääritilojen kokonaisenergian ja -ajan tuloon ja Lagrangen funktion aikaintegraalin summaan, missä jälkimmäinen termi on *Hamiltonin vaikutusintegraali*.

Hamiltonin vaikutusintegraali minimoituu, kun Lagrangen liikeyhtälö

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_j} - \frac{\partial L}{\partial q_j} = 0 \quad (1.5)$$

toteutuu. Lagrangen yhtälössä toteutuu Newtonin yhtälö. Osittaisderivaatta  $\partial L / \partial \dot{q}_j = \partial T / \partial \dot{q}_j$  merkitsee objektin liikemäärää. Liikemäärän aikaderivaatta merkitsee Newtonin mekaniikassa massan ja kiihtyvyyden tuloa. Osittaisderivaatta  $\partial L / \partial q_j = -\partial U / \partial q_j$  tarkoittaa negatiivista potentiaalienergian gradienttia eli objektiin vaikuttavaa voimaa.

Hamiltonin funktio,  $H$ , joka klassisessa mekaniikassa tarkoittaa kokonaisenergiaa  $H = \sum p v_i - L = 2T - L = T + U$ , toteuttaa differentiaaliyhtälöt

$$\frac{\partial H}{\partial q_k} = -\dot{p}_k \quad \text{ja} \quad \frac{\partial H}{\partial p_k} = \dot{q}_k \quad (1.6)$$

Hamiltonin yhtälöt (1.6) eivät ole sidottuja klassiseen mekaniikkaan; ne pätevät myös suppean suhteellisuusteorian viitekehyksessä, jossa Hamiltonin funktio ilmaistaan kiineettisen energian ja potentiaalienergian summamuodossa

$$H = mc^2 \left( \frac{1}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} - 1 \right) + U = E_{kin} + U \quad (1.7)$$

Hamiltonin mekaniikka on Lagrangen mekaniikan tavoin differentiaaliyhtälöillä ilmaistu klassisen mekaniikan formalismi. Lagrangen toisen kertaluokan differentiaaliyhtälön sijaan Hamiltonin mekaniikka esitetään kahden ensimmäisen kertaluokan osittaisdifferentiaaliyhtälön avulla. Lagrangen formalismissa käytetään yleistettyjä paikka- ja nopeusfunktioita, Hamiltonin formalismissa on lisäksi yleistetty liikemääräfunktio (*conjugate momentum*). Päinvastoin kuin Lagrangen liikeyhtälö, Hamiltonin liikeyhtälöt toimivat myös suppean suhteellisuusteorian viitekehyksessä.

**Pienimmän vaikutuksen periaate:** *Integroituna suureena "vaikutusta" ei tule ymmärtää liikettä paikallisesti tai betkeellisesti ohjaavaksi suureeksi, vaan liikeyhtälöiden mukaisessa kokonaiskulkutiessä totentuvaksi suureeksi. Vapaassa liikkeen ja potentiaalin vuorovaikutuksessa näyttää totentuvan betkellinen "ilmenemishakuisuus", jossa objekti ottaa potentiaalikestä mahdollisimman paljon liikettä ja luovuttaa liikettä mahdollisimman vähän takaisin potentiaalikehtälle.*

**Systemi pyrkii kohti tilaa, jossa liikkeen energia maksimoituu** tai Aristoteleen käsittein, luonnossa potentiaalisuus pyrkii aktualisoitumaan.



## Termodynamiikka ja tilastollinen mekaniikka

Termodynamiikan kehittymisen voidaan katsoa käynnistyneen tarpeesta höyrykoneen hyötösuhteen parantamiseen 1800-luvun alussa. Eräs termodynamiikan tärkeä anti on ollut sen merkitys energiäkäsitteen hahmottamisessa eri energiamuotoja yhdistävänä fysikaalisena suureena ja ensisijaisena säilyjänä fysikaalisissa ja kemiallisissa prosesseissa. Ranskalainen Sadi Carnot julkaisi vuonna 1824 ideaalisen *Carnot'n kierro*n (*Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance, The Motive Power of Heat* <sup>33</sup>), jossa lämpö, tai oikeammin lämpösisältöjen lämpötilaero saatiin tuottamaan mekaanista työtä ja vastaavasti mekaaninen työ lämpötilaeron. Vaikka Carnot'n teoria implisiittisesti sisälsi energian säilymisen suljetussa systeemissä, se ei kuitenkaan vielä hahmottanut termodynamiikan keskeisiä käsitteitä ja niihin liittyviä yleisiä lainalaisuuksia.

Teoreettista taustaa termodynamiikan kehitykselle ennen Carnot'n aikaa löytyi Robert Boylen vuonna 1662 julkaisemasta Boylen laista, joka määritteli kaasun paineen ja tilavuuden yhteyden, ja Bernoullin *Hydrodynamiikasta* vuodelta 1738, jossa hän hahmotti energian säilymisen periaatetta ja kehitti kineettisen kaasuteorian perusteita Boylen laista lähtien. Boylen lakia täydensivät 1800-luvun alussa *Gay-Lussacin lait*, jotka määrittelivät kaasun lämpötilan suhteen tilavuuteen ja paineeseen. Tunnettujen kaasulakien yhdistämisen ideaalikaasujen tilanyhtälöksi jalosti ranskalainen kemisti Benoît Clapeyron vuonna 1834. Vuonna 1843 Clapeyron, Carnot'n teoriaa pitkään kehiteltyään, päätyi *Carnot'n periaatteeseen*, joka vastaa termodynamiikan toista pääsääntöä.

Paria vuotta aikaisemmin saksalainen lääkäri ja fyysikko Julius von Mayer oli ilmaissut termodynamiikan ensimmäisen pääsäännön: *Energiaa ei voi luoda eikä hävittää*. Vuonna 1845 hän julkaisussaan *Die organische Bewegung im Zusammenhang mit dem Stoffwechsel (Orgaaninen Liike Aineenvaihdunnassa)* esitti kokeellisesti määräämänsä lämmön mekaanisen ekvivalentin 4,17 J/cal, joka poikkeaa vain noin 0,4 % ekvivalentin nykyarvosta 4,184 J/cal.

James Joule, jolle kunnia lämmön mekaanisesta ekvivalentista yleensä annetaan, käytti sekä veden mekaanista sekoitusta putoavan painon synnyttämällä pyörityksellä että sähkövastuksen tuottamaa lämpöä ekvivalentin määrittämiseen. Hänen näillä menetelmillä saamansa numeerinen arvo lämpöekvivalentille oli 4,14 J/cal. Tehdesään vastaavan määrityksen kaasun paineistamiseen käytetystä työstä, hän päätyi arvoon 4,43 J/cal. Mekaaniseen energiaan viitattaessa Joule käyttää Leibnizin *vis viva* ( $mv^2$ ) käsitettä, johon Gustave Coriolis oli vuonna 1829 ilmestyneessä oppikirjassaan *Calcul de l'Effet des Machines (Koneiden Tebon Laskeminen)* lisännyt kertoimen  $\frac{1}{2}$ . Käsitteen kineettinen energia otti käyttöön vuonna 1850 William Thomson, joka paremmin tunnetaan nimellä Lord Kelvin.

Vuonna 1847 saksalainen lääkäri ja fyysikko Hermann von Helmholtz ilmaisee yksiselitteisesti energian säilymisen, mistä muodostui termodynamiikan ensimmäinen pääsääntö. Julkaisussaan *Über die Erhaltung der Kraft (Voiman Säilymisestä, On the Conservation of Force* <sup>34</sup> – nykykäsittein ”Energian Säilymisestä”) Helmholtz tarkastelee laajasti

<sup>33</sup> Sadi Carnot, *The Motive Power of Heat*, <http://archive.org/stream/reflectionsonmot00carnot>

<sup>34</sup> Hermann von Helmholtz, *On the Conservation of Force*, <http://www.bartleby.com/30/125.html>

energian säilymisen matemaattisia perusteita. Energian säilymistä hän perustelee sekä filosofisilla että fysikaalisilla argumenteilla viitaten mm. Sadi Carnot'n, Benoît Clapeyronin, Julius von Mayerin ja James Joulen töihin. Hän päätteli, että kaikkialla missä energia näyttää vähenevän, kuten törmäyksissä, laajenevassa kaasussa ja lihaksen supistumisessa, se muuttuu lämpöenergiaksi. Vuoden 1847 työssään Helmholtz vahvistaa myös Gustave Coriolisin keskeisvoimista johtaman suureen  $\frac{1}{2}mv^2$  kineettiseksi energiaksi.

Lämpöopin peruskäsitteiden määrittelijänä ja termodynamiikan teorian kokoajana voidaan pitää saksalaista matemaatikkoa ja fyysikkoa Rudolf Clausiusta. Vuonna 1850 julkaistussa artikkelissaan *Über die bewegende Kraft der Wärme*<sup>35</sup> (*Lämmön liikettä synnyttävästä voimasta*<sup>36</sup>) hän muotoilee termodynamiikan toisen pääsäännön ja samalla kumoaa modernin kemian isänä tunnetun Antoine Lavoisierin *kalorikkiteorian*. Kalorikkiteoriassa lämpö oli määritelty kevyeksi alkuaineeksi ”kaloriksi”, jota kuuma kappale sisälsi enemmän kuin kylmä. Jäähdyessään kalorikki virtasi kuumasta kappaleesta ympäristöön. Osana Lavoisierin olettamaa aineen säilymlakia kalorikkiteoria oli sisältänyt myös olettamuksen kalorikin kokonaismäärän säilymisestä universumissa.

Kunniä lämmön hahmotuksesta kineettisen energian, Leibnizin *vis viva*, ilmeneväksi kuulunee amerikkalaissyntyiselle englantilaiselle tykkitehtaan johtajalle, Benjamin Thompsonille, joka vuonna 1797 osoitti, että lämpöä voi synnyttää hankaamalla esim. metallipaloja toisiinsa. Nimitystä energia Leibnizin *vis viva* lienee ensimmäisenä käyttänyt Thomas Young 1800-luvun alussa. Energiäkäsité hahmottui varsinaisesti vasta kun se voitiin osoittaa suureksi, joka kuvasi keskeistä ominaisuutta sekä mekaanisessa liikkeessä, sähkömagnetismissä ja lämpösäilytyksessä että potentiaalissa näiden synnyttämiseen gravitaatio- tai sähkökentässä.

Ideaalikaasujen lait, lämmön hahmotus kineettisen energian ilmenemismuodoksi ja termodynamiikan yleisten periaatteiden muotoutuminen synnyttivät perustan tilastollisen mekaniikan kehittämiseksi. Perustyön tilastollisen mekaniikan, tai tilastollisen termodynamiikan kehittämiseen teki itävaltalainen fyysikko Ludwig Boltzmann 1870-luvulla. Ludwig Boltzmannin lähestymistapa sisälsi samalla vahvan kannanoton vielä hahmottomattoman atomiteorian puolesta. Käsitteen *tilastollinen termodynamiikka* otti käyttöön Willard Josiah Gibbs vuonna 1902.

Tilastollisessa termodynamiikassa systeemin energia kuvataan yksittäisten partikkelien sisältämän energian summana. Ekvipartitioperiaatteen mukaan systeemin energia jakautuu tasan siinä olevien partikkelien ja niiden vapausasteiden kesken. Käytännössä partikkelien energia noudattaa systeemin luonteen määräämää jakautumaa, joka määräytyy systeemin käytettävissä olevista energiatiloista ja partikkelien vapausasteista. Esimerkiksi ideaalikaasun atomeilla on kolme vapausastetta, nopeuskomponentit  $x$ -,  $y$ - ja  $z$ -suuntaan, ja niiden liike-energian jakautuma noudattaa alun perin James Clerk Maxwellin ja myöhemmin Ludwig Boltzmannin täydentämää *Maxwell-Boltzmann jakautumaa*, joka ilmaisee partikkelien liike-energian todennäköisyysjakautuman määrättyssä lämpötilassa.

<sup>35</sup> Rudolf Clusius, *Über die bewegende Kraft der Wärme*, <http://archive.org/stream/diemechanischew04claugoog>

<sup>36</sup> Phil. Mag. and Journal of Science, Vol.II, Jul-Dec, 1851 <http://archive.org/stream/londonedinburghd02lond>

## Sähkömagnetismi ja valo-oppi

### *Staattisesta sähköstä sähkömagnetismiin*

Staattinen sähkö tunnettiin ilmiönä jo antiikin aikoihin, mutta ensimmäiset kvantitatiiviset mittaukset staattisen sähkön ominaisuuksista tehtiin vasta 1700-luvun lopulla, jolloin englantilaiset Joseph Priestley ja Henry Cavendish toisistaan riippumatta totesivat sähkövarausten välisen voiman olevan kääntäen verrannollinen varausten etäisyyden neliöön. Vuonna 1785 ranskalainen Charles Coulomb määritteli sähkövarausten välisen voiman suoraan verrannolliseksi varausten tuloon ja kääntäen verrannolliseksi varausten etäisyyden neliöön. Henry Cavendishin muistiinpanot vuodelta 1771 löysi Royal Societyn arkistosta James Clerk Maxwell vasta vuonna 1878, jolloin selvisi, että Cavendish oli *Coulombin voiman* lisäksi määritellyt resistanssin, sähköpotentiaalın, dielektrisyydvakion ja kapasitanssin käsitteet.

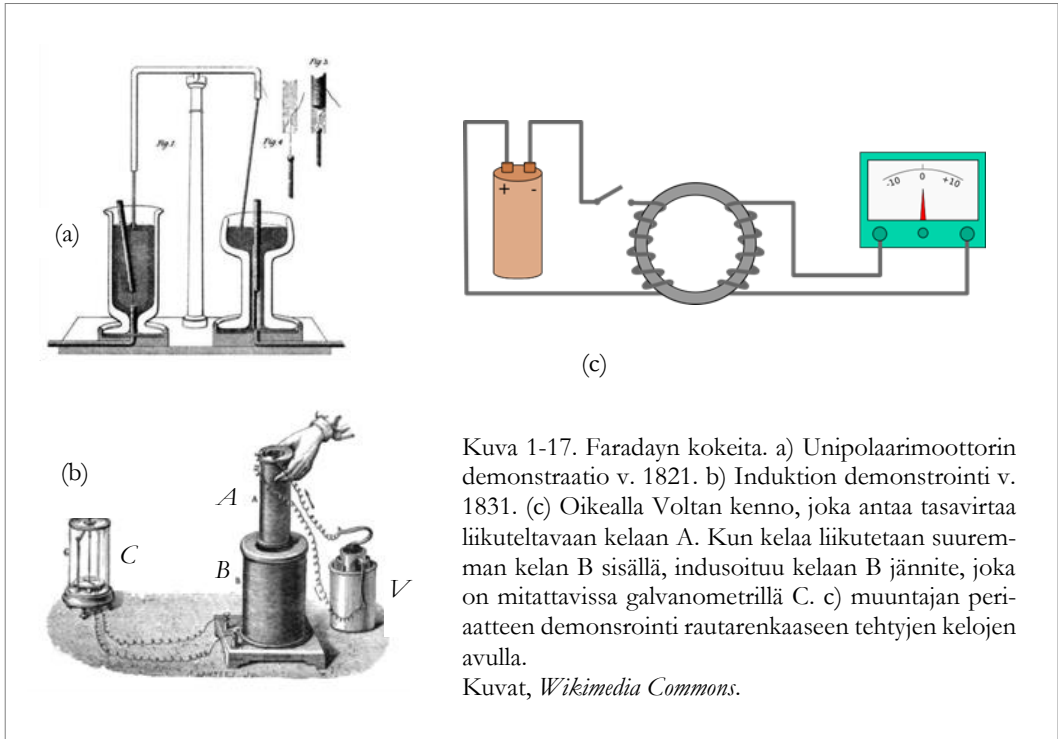
Italialaisen fyysikon, Alessandro Voltan vuonna 1800 keksimä sähköpari mahdollisti systemaattisen sähkövirtojen tutkimisen. Sähkösuureiden ja sähkön olemuksen selvittäminen oli monihaaraisen kokeellisen työn tulos. Sähkövirran ja magnetismin yhteys löytyi tanskalaisen kemistin ja fyysikon Hans Christian Ørstedin vuonna 1820 tekemistä havainnoista sähkövirran vaikutuksesta kompassineulan suuntaan. Ranskalainen fyysikko ja matemaatikko André-Marie Ampère jatkoi Ørstedin tutkimuksia ja havaitsi, että rinnakkaiset sähköjohdot joko vetävät toisiaan puoleensa tai hylkivät toisiaan riippuen siitä, kulkeeko virta niissä samaan suuntaan tai vastakkaisiin suuntiin. Ohmin lain, joka määrittelee johteen sähkövastuksen, resistanssin, jännitteen sähkövirran suhteena, keksi uudelleen Cavendishin tuloksista tietämättä saksalainen fyysikko ja matemaatikko Georg Ohm. Ohm julkaisi tutkimuksessa vuonna 1827.

Lähes itseoppinut englantilainen monitieteilijä ja kokeilija Michael Faraday oli ehkä tuotteliain ja menestyksekkäin sähköilmiöiden kartoittaja. Faradayn vuonna 1831 löytämä sähkömagneettinen induktio mahdollisti sähkögeneraattoreiden, muuntajien ja sähkömoottoreiden kehittämisen, kuva 1-17. Sähkömagneettisen voiman matemaattisen kuvaamisen esitti saksalainen fyysikko Wilhelm Weber vuonna 1846. Weberin sähkömagneettinen voima muodostui varausten välille syntyvän staattisen ja dynaamisen voiman yhteisvaikutuksesta.

Sähkömagneettinen induktio ja sen mukana sähkömoottorit kytkivät sähkösuureet mekaaniseen työhön ja siten energian käsitteeseen. Sähkövirran johteessa tai sähkövastuksessa tuottama lämpö kytki sähkösuureet lämpösuureisiin.

### *Valosta sähkömagneettiseen säteilyyn*

Valon tieteellisen tutkimuksen voitaneen katsoa alkaneen 1600-luvun lopulla Christian Huygensin aaltoteoriasta, jolla hän selitti interferenssi-ilmiötä ja valon taipumista väliaineen rajapinnassa. Englantilainen Robert Hooke oli tullut samantapaisiin päätelmiin omilla valon taittumiseen liittyvissä kokeissaan.



Kuva 1-17. Faradayn kokeita. a) Unipolaarimoottorin demonstraatio v. 1821. b) Induktion demonstrointi v. 1831. (c) Oikealla Voltan kenno, joka antaa tasavirtaa liikuteltavaan kelaan A. Kun kelaä liikutetaan suuremman kelan B sisällä, indusoituu kelaan B jännite, joka on mitattavissa galvanometrillä C. c) muuntajan periaatteen demonstrointi rautarenkaaseen tehtyjen kelojen avulla.

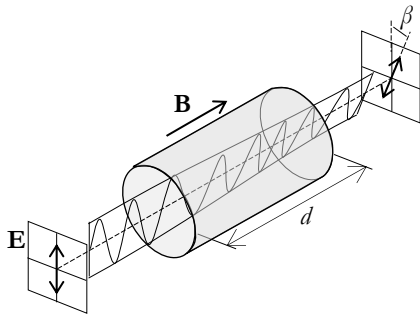
Kuvat, *Wikimedia Commons*.

Huygensin ja Hookeen työt jäivät pitkäksi aikaa Newtonin esittämän hiukkasmallin varjoon. Hiukkasmallia kannattivat ja kehittivät edelleen 1700-luvun lopulla mm. ranskalaiset huippumatemaatikot Pierre-Simon Laplace ja Siméon-Denis Poisson. Aaltoteorian herätti henkiin englantilainen matemaatikko *Thomas Young* vuonna 1803 Royal Societyssa pitämässään puheessa, joka julkaistiin seuraavana vuonna *Philosophical Transactions of the Royal Society* julkaisusarjassa nimellä "*Experimental Demonstration of the General Law of the Interference of Light*"<sup>37</sup>.

Youngin työtä täydensi 1810-luvun lopulla hänestä riippumatta ranskalainen *Augustin-Jean Fresnel*, joka selvitti mm., että valoalto on kuvattava poikittaisena aaltoliikkeenä. Rankan tiedeakatemiassa käytiin Fresnelin teoriasta kiivasta väittelyä hiukkas- ja aaltoteorioiden kannattajien kesken. Väittely päättyi aaltoteorian voittoon. Fresnel sai vahvan tukijan aaltoteoriansa edelleen kehittelyyn akatemian sihteeristä François Aragosta ja paremmin sähkömagnetismiin liittyvistä tutkimuksistaan tunnetusta André-Marie Ampèrestä.

Vuonna 1845 Michael Faraday osoitti magneettikentän vaikutuksen valon polarisointitasoon, kuva 1-18. 1850-luvulla Wilhelm Weber päätteli, että sähkömagneettisen voiman lausekkeessa sähkö- ja magneettivakion tulon käänteisarvolla on nopeuden neliön dimensio ja sen numeroarvo on yhtä suuri kuin valon nopeuden neliö,  $1/\varepsilon_0\mu_0 = c^2$ .

<sup>37</sup> [Philosophical Transactions of the Royal Society of London](#) 94



Kuva 1-18. Faradayn kiertymä kuvaa magneettikentän vaikutusta valon polarisaatioon. Polarisaatiotaso kiertyy valon kulkusuunnassa vaikuttavan magneettikentän vaikutuksesta. Ilmiöllä on teknistä käyttöä optoelektroniiikan komponenteissa.

Ilmiön perusteella voidaan myös arvioida mm. maan magneettikentän ja ionosfäärin vaikutuksia avaruudesta mitatussa sähkömagneettisessa säteilyssä.

Kuva, *Wikimedia Commons*.

### *Maxwellin yhtälöt*

James Clerk Maxwell yhdisti 1800-luvun alkupuolella kerääntyneen tietämyksen sähkömagnetismista *Maxwellin yhtälöinä* tunnettuun yhtälöryhmään, jota voidaan pitää koko nykyisen sähkötekniikan perustana.

Ensimmäisessä julkaisussaan *On Physical Lines of Force* vuodelta 1861 (esitetty Cambridge Philosophical Societyssä nimellä *On Faraday's Lines of Force*<sup>38</sup> vuonna 1855/1856) Maxwell tarkastelee Faradayn tuloksia sähkömagneettisesta induktiosta ja päätelee, että ne ovat sopusoinnussa mm. Poissonin yhtälöiden kanssa. Hän pyrki löytämään mekaanisen analogian, joka helpottaisi aiempien koetulosten ymmärtämistä. Maxwell vertasi sähkömagnetismin käyttäytymistä kokoonpuristumattomaan inertiaavapaaseen nesteeseen, jonka liikettä hidastaa sen nopeuteen verrannollinen voima. Edelleen hän päätteli, että Ampèren löytämät lait ovat identtiset Faradayn lakien kanssa. Magneettikentän lähteeksi hän esittää mikroskooppisia virtapyörteitä.

Maxwellin yhtälöt hän esitti vuoden 1864 julkaisussa *A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field*<sup>39</sup> (*Dynaaminen teoria sähkömagneettisesta kentästä*). Julkaisun johdannon hän aloittaa toteamuksella:

(1) Ilmeisin mekaaninen ilmiö sähköön ja magnetismiin liittyvissä kokeissa on keskinäinen vuorovaikutus, jolla määrättyssä tilassa olevat objektit saavat toinen toisensa liikkeeseen, vaikka ne ovat kohtalaisella etäisyydellä toisistaan. Siksi ensimmäinen askel näiden ilmiöiden saamiseksi tieteelliseen muotoon on selvittää objektien välillä vaikuttavan voiman suuruus ja suunta, ja kun on huomattu, että tämä voima on määrättyllä tavalla verrannollinen niiden suhteelliseen sijaintiin ja sähköisiin tai magneettisiin tiloihin, näyttää ensi näkemältä luonnolliselta selittää nämä tosiasiat olettamalla, että jokaisessa objektissa on jotakin joko levossa tai liikkeessä, joka aikaansaa niiden sähköisen tai magneettisen tilan, ja jolla on kaukovaikutus matemaattisten lakien mukaisesti.

<sup>38</sup> J. Maxwell, *On Faraday's Lines of Force*, *The Scientific Papers of James Clerk Maxwell*, p. 155-229

<sup>39</sup> J. Maxwell, *A Dynamical Theory ...*, [http://en.wikisource.org/wiki/A\\_Dynamical\\_Theory\\_of\\_the\\_Electromagnetic\\_Field](http://en.wikisource.org/wiki/A_Dynamical_Theory_of_the_Electromagnetic_Field)

Tämän mukaisesti on muodostettu matemaattiset teoriat staattisesta sähköstä, magnetismista, mekaanisesta vaikutuksesta sähkövirtaa kuljettavien johteiden välillä sekä sähkövirtojen induktiosta. Näissä teorioissa objektien välillä vaikuttavat voimat on käsitelty vain huomioiden niiden tila ja suhteellinen sijainti ottamatta kantaa väliaineeseen niiden välillä.

Teorioissa oletetaan enemmän tai vähemmän yksiselitteisesti, että on olemassa substansseja, joista partikkelit saavat ominaisuuden vaikuttaa toisiinsa etäisyydeltä joko puoleensavetävästi tai hylkivästi. Täydellisimmän tämän kaltaisen teorian on esittänyt M.W. Weber, joka on sisällyttänyt teoriaan sekä sähköstaattisen että sähkömagneettisen ilmiön.

Näin tehdessään, hän on huomannut tarpeelliseksi olettaa, että voima kahden partikkelin välillä riippuu sekä niiden suhteellisesta nopeudesta että etäisyydestä.

Tämä teoria, jonka ovat kehittäneet M.W. Weber ja C. Neumann, on äärimmäisen nerokas kattaen laajalti staattisen sähkön, sähkömagneettisen vetovoiman, sähkövirran induktion ja diamagneettiset ilmiöt. Sille antaa lisää arvovaltaa se, että sen takana on henkilö, joka on aikaansaanut tärkeää edistystä sähkötieteen käytännölliseen puoleen, sekä luomalla kattavan mittayksiköiden systeemin että mittaamalla sähkösuureet tarkkuudella, jota ei aikaisemmin ole saavutettu.

(2) Kuitenkin mekaaniset ongelmat, jotka sisältyvät partikkelien väliseen etävaikutukseen voimilla, jotka riippuvat niiden nopeuksista, ovat sen laatuaisia, että ne estävät minua pitämästä tätä teoriaa lopullisena, jollaisena sitä on ehkä pidetty ja se lienee kuitenkin hyödyllinen johtaessaan ilmiöiden koordinointiin.

Olen sen vuoksi nähnyt parhaaksi etsiä etävaikutuksen selitystä toisesta suunnasta, olettamalla että ne syntyvät vaikutuksista, jotka etenevät ympäröivässä väliaineessa ja magnetoituneissa kappaleissa, ja pyrin selittämään vuorovaikutuksen etäisten objektien välillä olettamatta voimia, joilla on välitön vaikutus suurilla etäisyyksillä.

(3) Teoriaa, jonka esitän, voitaisiin kutsua Sähkömagneettisen kentän teoriaksi, koska se liittyy tilaan sähköisten tai magneettisten objektien läheisyydessä. Sitä voitaneen kutsua Dynaamiseksi teoriaksi, koska siinä oletetaan, että kyseisessä tilassa on väliainetta, joka liikkeellään synnyttää havaitut sähkömagneettiset ilmiöt.

(4) Sähkömagneettinen kenttä on se osa ympäröivää tilaa, joka sisältää ja ympäröi objekteja, jotka ovat sähköisesti tai magneettisesti varautuneet. ...

Maxwell jatkaa toteamalla, että väliaineen täyttämä tila voi sisältää materiaa tai olla tyhjiö ja nimeää sähkömagnetismin liittyvän väliaineen *eetteriksi*. Valon ja lämmön siirtyminen eetterissä osoittaa, että eetteri voi tunkeutua läpinäkyvien materiaalien lävitse. Hän päättlee, että lämmön tai valon edetessä eetterissä niiden energia on puoleksi eetterin liikkeessä ja puoleksi sen elastisessa jännityksessä.

(6) ...”Eetteri pystyy näin ollen vastaanottamaan ja varastoimaan kahdenlaista energiaa: potentiaalienergiaa ja liike-energiaa”...

Eetterin (*luminiferous medium, ethereal medium*) ominaisuuksia kuvatessaan Maxwell toteaa mm. Faradayn löytämän polarisaatiotason kääntymisen magneettikentässä ja ranskalaisen fyysikon Émile Verdet'n havaitsemat paramagneettisten ja diamagneettisten aineiden vaikutukset valon polarisaatioon. Maxwell määrittelee

sähkömotorisen voiman käsitteen, joka synnyttää johteessa sähkövirran ja dielektrisessä materiaalissa (eristeessä) polarisaation, joka suuntaa materiaalin molekyylit samaan suuntaan, vastaavasti kuin magneetti suuntaa magnetisoituvan materiaalin molekyylit.

Maxwellin yhtälöiden keskeinen viesti sisältyy sähkömagneettisen kentän olemassaoloon, minkä perustelemiseksi Maxwell oletti väliaineen ”eetterin”, joka varastoi kentän energian joko eetterin liike-energiana tai kokoonpuristumiseen varastoituneena energiana. ”*Pubuessani sähkömagneettisen kentän energiasta haluan tulla ymmärrettyksi kirjaimellisesti. Kaikki energia on mekaanista energiaa, riippumatta siitä ilmeneekö se liikkeeseen tai elastisuutena.*”<sup>40</sup>

Oleellisena erona Weberin sähkömagneettiseen teoriaan nähden oli toisistaan erillään olevien sähkömagneettisten systeemien vuorovaikutus väliaineessa, eetterissä, olevan sähkömagneettisen kentän kautta, eikä kaukovaikutuksena suoraan varausten tai sähkövirtojen välillä kuten Weberin teoriassa.

Yhdistämällä sähkö- ja magneetikenttien vuorovaikutukset Maxwell johti aaltoyhtälön, joka kuvaa määrättyllä nopeudella etenevää sähkömagneettista aaltoa. Nopeus määrätty, kuten Maxwell asian ilmaisi, ”*aaltoa kuljettavan väliaineen*” sähköisestä elastisuudesta, jonka Weber ja Kohlrausch ovat kokeellisesti määranneet sähköstaattisen ja sähkömagneettisen voiman substeesta<sup>41</sup>.”

Maxwellin sähkömagneettinen kenttä on eetteriin sidottu potentiaalitenttä. Se vastaa Laplacen gravitaatiopotentiaalain muodostamaa skalaarista gravitaatiokenttää. Sähköstaattinen voima ilmenee siten potentiaalitentän gradienttina. Magneetikomponentin osalta se on pyörivä kenttä, jossa magneettiset voimat virittyvät. ”*Jos kentän magneettinen tila riippuu väliaineen liikkeestä, liikkeen pienentämiseen tai suurentamiseen tarvitaan tietty voima. Pyörivästä kentästä muodostuu eräänlainen vauhtipyörä sähkövirralle.*”

Maxwell kokosi sähkömagnetismin teoriansa viimeisteltyinä vuonna 1873 ilmestyneeseen kirjaan ”*A Treatise on Electricity and Magnetism*”<sup>42</sup>. Maxwellin yhtälöt muodostuivat kahdestakymmenestä yhtälöstä, jotka määrittelevät varausten ja niiden liikkeen synnyttämät sähkömagneettiset kentät ja vastaavasti kenttien vuorovaikutukset varauksiin ja niiden liikkeisiin. Maxwell lienee ensimmäinen, joka otti systemaattisesti käyttöön dimensioanalyysin suureiden fyysikaalisen luonteen tarkastelussa, vaikka dimensioanalyysin merkityksen oli tuonut esille jo Joseph Fourier vuonna 1822 ilmentyneessä kirjassaan *Théorie analytique de la chaleur* (Lämmön analyttinen teoria).

Kirjan *A treatise on electricity and magnetism* yhteenvedossa Maxwell pohtii energian kuljetusta ja perustelee väliaineen tarpeellisuutta:

”*Itse asiassa, milloin tabansa energiaa siirretään kappaleesta toiseen äärellisessä ajassa, tarvitaan väliaine tai substanssi, jossa energia viipyy, kun se on jättänyt lähtevän kappaleen ja ennen kuin se on saapunut vastaanottavaan kappaleeseen, sillä energia, kuten Torricelli totesi, ’on luonteeltaan niin hienovarainen aine, ettei sitä voida säilyttää missään astiassa paitsi materian sisimmässä substanssissa’. Tämän johdosta kaikki nämä teoriat johtavat hypoteesiin väliaineesta, jossa*

<sup>40</sup> J.C. Maxwell, *A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field, Part III (74)*, Wikisource.org

<sup>41</sup> J.C. Maxwell, *A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field, Part I (19)*, Wikisource.org

<sup>42</sup> J C Maxwell, *A treatise on electricity and magnetism* (1873), [http://en.wikisource.org/wiki/A\\_Treatise\\_on\\_Electricity\\_and\\_Magnetism](http://en.wikisource.org/wiki/A_Treatise_on_Electricity_and_Magnetism)

*eteneminen tapahtuu. Käsitökseni mukaan väliainehypoteesin tulisi saada vahva sija tutkimuksissamme, ja meidän tulisi ponnistella muodostaaksemme ajatusmallin kaikista sen ilmenemisen yksityiskohtaisista ominaisuuksista, mikä onkin ollut jatkuva tavoitteeni tämän työni aikana”.*

Nykyisen muodon Maxwellin yhtälöistä kehitti englantilainen sähköinsinööri, matemaatikko ja fyysikko Oliver Heaviside vuonna 1884. Se perustuu neljään osittaisdifferentiaaliyhtälöön, joissa perussuureina ovat sähkö- ja magneettikentät vektorimuotoisina voimakenttinä. Muuttaessaan Maxwellin potentiaalitentät niiden paikallisista gradienteista muodostuviksi vektorikentiksi Heavisiden formalismi yksinkertaisti yhtälöitä. Filosofisesti, se palautti newtonilaisen ajatuksen voimasta energiaa primääri-empänä fysiikan suureena.

Maxwellin yhtälöissä sähkösuureet kytkeytyivät toisiinsa tavalla, joka mahdollisti päätelmät sähkömagneettisen aallon synnyttämisestä ja vastaanottamisesta. Maxwellin yhtälöt kattavat laajalti radiotekniikan tarpeet, mm. antenniteoria perustuu suoraan Maxwellin yhtälöihin.

Kuvassa 1-19 on hahmoteltu kehityspolkuja varhaisista valon aaltoteorioista ja sähköön ja magnetismiin liittyvistä havainnoista Maxwellin yhtälöihin ja edelleen sähkömagneettisen säteilyn demonstrointiin.

### *Energia ja säilymislait*

Energian käsite osoittautui vaikeasti hahmotettavaksi. Mekaniikka oli Newtonin ajasta asti perustettu voima -käsitteeseen. Vasta termodynamiikka ja sen puitteissa syntynyt mekaanisen työn käsite avasivat energian käsitteen integroituna voimana ja ensisijaisena säilyjänä.

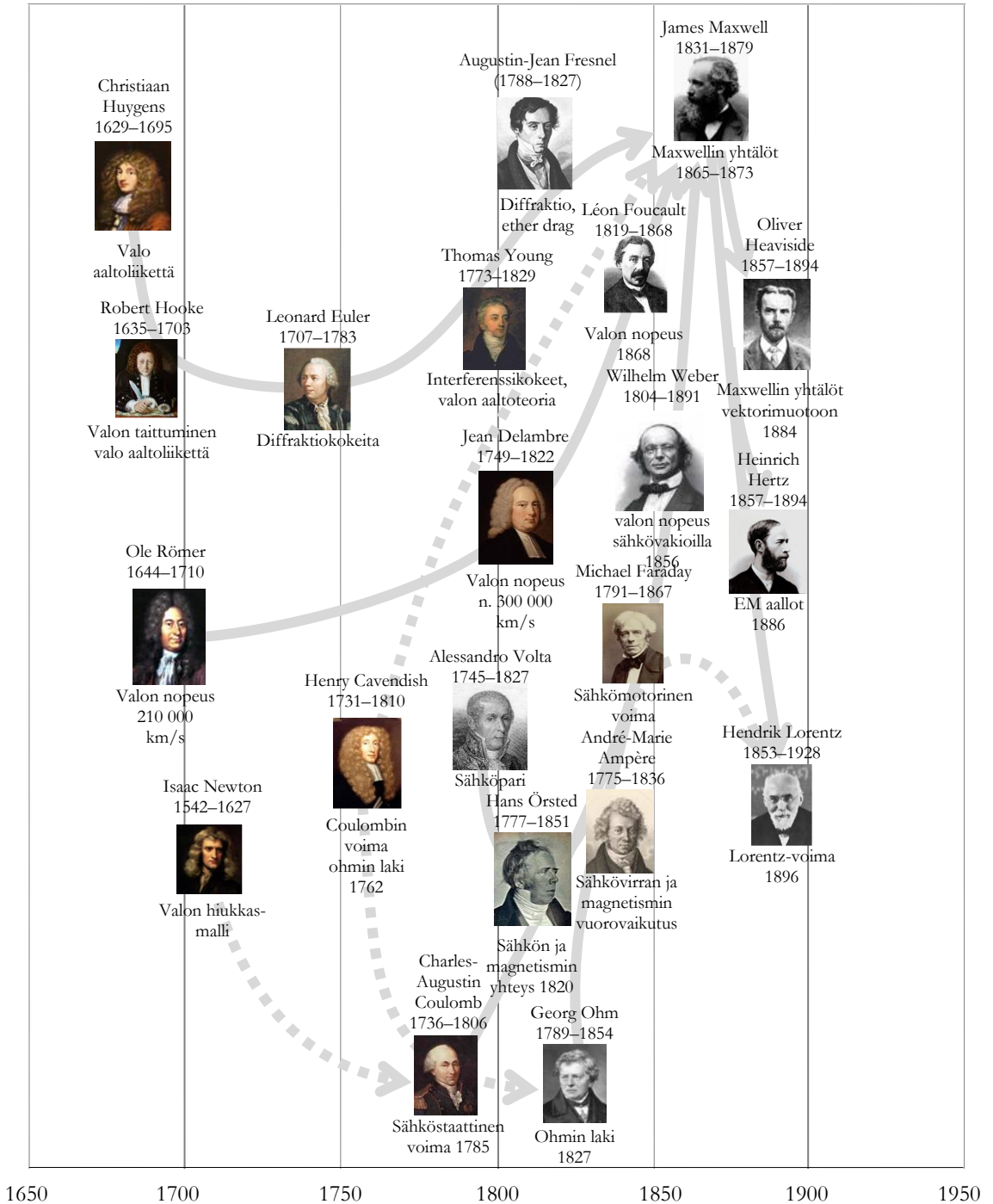
Termodynamiikan, sähkömagnetismin ja fysikaalisen kemian rinnakkaisella kehityksellä oli tärkeä merkitys energiakäsitteen tarkentumisessa ja energian tunnistamisessa fysiikan eri alueita yhdistäväksi suureeksi, sekä fysiikkaa ja kemiaa yhdistäväksi suureeksi. 1800-luvun lopulla, yleinen ilmapiiri oli kypsynyt perusteiden syvällisempään tarkasteluun, kuten aineen ja energian roolin arviointiin universumin ensisijaisena substanssina – termodynamiikassa energian säilyminen tunnistettiin perustavaa laatua olevaksi luonnonlaiksi. Massan säilymisen kemiallisissa reaktioissa oli oivaltanut ranskalainen kemisti Antoine Lavoisier jo sata vuotta aikaisemmin.

1800-luvun lopulla myös aineen olemus oli kiivaan keskustelun alaisena. Ajan filosofit, ja fyysikoista mm. Ernst Mach vastusti atomismia, vaikka Ludvig Boltzmann oli onnistunut yhdistämään atomistisen lähestymistavan kokonaisvaltaisempaan tilastolliseen tarkasteluun, jota matemaattisesti voitiin kuvata differentiaaliyhtälöillä pitkälti kuten jatkuvaksi oletettua ainetta.

Kirjassaan *Tiede ja hypoteesi*, Luku VIII<sup>43</sup> (1902) Henri Poincaré kuvaa 1800-luvun lopun energiaperiaatetta:

<sup>43</sup> Henri Poincaré, *Tiede ja Hypoteesi*, <http://archive.org/stream/sciencehypothesi00poin>





Kuva 1-19. Valon, valon nopeuden, sähkömagnetismin ja sähkömagneettisen säteilyn teorioiden kehityspolkuja.

*”Klassisen mekaniikan tuomat ongelmat ovat saaneet jotkut pitämään parempana uudenlaista systeemiä, jota he kutsuvat Energiaperiaatteenksi (Energetics). Energiaperiaate tuli esille energian säilymisen periaatteen myötä. Helmholtz antoi sille yksiselitteisen muodon. Aloitamme määrittelemällä kaksi suuretta, jotka näyttävät perustavaa laatua olevaa roolia tässä teoriassa. Ne ovat **kineettinen energia**, tai vis viva, ja **potentiaalienergia**. Ne hallitsevat jokaista muutosta, jonka luonnon objektit läpikäyvät. Ensinnä, kineettisen energian ja potentiaalienergian summa on vakio. Tämä on energian säilymisen periaate. Toiseksi, jos objektien systeemi on tilassa A ajankohdalla  $t_0$  ja tilassa B hetkellä  $t_1$ , siirtyy se aina tilasta toiseen sellaista polkua myöten, jossa keskimääräinen arvo kahden energian erotuksesta aikavälillä  $t_0$ :sta  $t_1$ :teen on pienin mahdollinen. Tämä on Hamiltonin periaate, ja se on yksi muoto pienimmän vaikutuksen periaatetta.”*

## Maxwellin yhtälöistä suhteellisuusteoriaan

### *Sähkömagneettinen säteily*

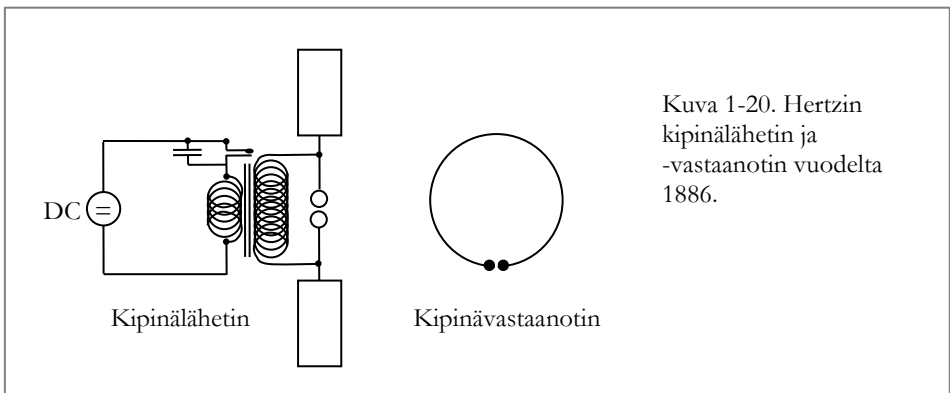
Maxwellin yhtälöiden ennustamien sähkömagneettisten aaltojen tutkimuksen voidaan katsoa käynnistyneen saksalaisen fyysikon, Heinrich Hertzin kokeilla vuonna 1886. Hertz synnytti sähkömagneettisia aaltoja lähettimellä, joka muodostui induktiokelasta ja sen rinnalle kytketystä palleoelektrodien muodostamasta kipinäraosta. Kipinäelektrodien kapasitanssi muodosti induktiokelan kanssa resonanssipiirin, kipinäelektrodien johdot lähetysantennin. Vastaanottimen hän konstruoi vastaavanlaisiin kipinäelektrodeihin päätetystä lankakehästä. Kipinäpurkaus lähettimessä sai aikaan kipinäpurkauksen vastaanotimessa, joka oli muutaman metrin etäisyydellä lähettimestä, kuva 1-20.

Hertzille kokeen onnistuminen merkitsi lähinnä todistusta Maxwellin teorialle, hän ei koetta tehdessään vielä nähnyt radioaaltojen tulevaa merkitystä <sup>44</sup>.

Paitsi sähkömagneettisten aaltojen synnyttäminen ja vastaanottaminen, Maxwellin voimakkaasti esintuoma väliaine, *eetteri*, herätti aktiivisen pohdinnan tuon väliaineen fysikaalisista ominaisuuksista. Samoin kuin Newtonin likeyhtälöt, Maxwellin sähkömagnetismin teoria olettaa implisiittisesti lepotilan, johon nähden sekä sähkövaraus-ten liike että sähkömagneettisen säteilyn etenemisnopeus, valon nopeus, suhteutuu.

### *Mustan kappaleen säteily*

Mustan kappaleen säteilyn teoria osoittautui sekä vaativaksi että antoisaksi haasteeksi, jossa termodynamiikka, ja sähkömagneettista säteilyä kuvaavat Maxwellin yhtälöt, oli sovittettava yhteen. Käsitteen musta kappale esitti saksalainen fyysikko Gustav Kirchhoff vuonna 1862. Ideaalista mustaa kappaletta hän kuvasi suljetulla laatikolla, jossa oli pieni reikä tarkkailua varten. Ensi askeleena mustan kappaleen säteilyn teoriaa voitaneen pitää Josef Stefanin vuonna 1879 havainnoista määräämää mustan kappaleen säteilytehon lakia, jonka mukaan mustan kappaleen lähettämän säteilyn kokonaisteho on verrannollinen kappaleen lämpötilan neljänteen potenssiin  $P = \sigma T^4$ .



Kuva 1-20. Hertzin  
kipinälähetin ja  
-vastaanotin vuodelta  
1886.

<sup>44</sup> Heinrich Hertz, Untersuchungen über die Ausbreitung der Electricischen Kraft”, [Open library, Electric Waves, 1893](#)

Vuonna 1884 englantilainen fyysikko John Henry Poynting osoitti Maxwellin yhtälöistä lähtien, että sähkömagneettisen säteilyn energia on ilmaistavissa liikemäärän ja valon nopeuden tulona. Maxwellin yhtälöistä oli myös johdettavissa mustan kappaleen sisällä vaikuttavan säteilyn energiatiheys ja säteilypain. Tulosta ja klassista termodynamiikkaa hyödyntäen Ludwig Boltzmann osoitti Stefanin säteilytehon teoreettisen perustan.

Boltzmannin termodynaamista käsittelyä seuraten Wilhelm Wien esitti vuonna 1893 *siirtymälain*, jonka mukaan mustan kappaleen säteilyn maksimin taajuus on suoraan verrannollinen kappaleen lämpötilaan,  $f_{max} \sim T$ .

Wilhelm Wien esitti vuonna 1894 mustan kappaleen säteilyn spektrille yhtälön, joka vastasi hyvällä tarkkuudella havaintoja spektrin säteilymaksimia suuremmilla taajuuksilla

$$\rho(f) = a f^3 e^{-\beta f/T} \quad (1.8)$$

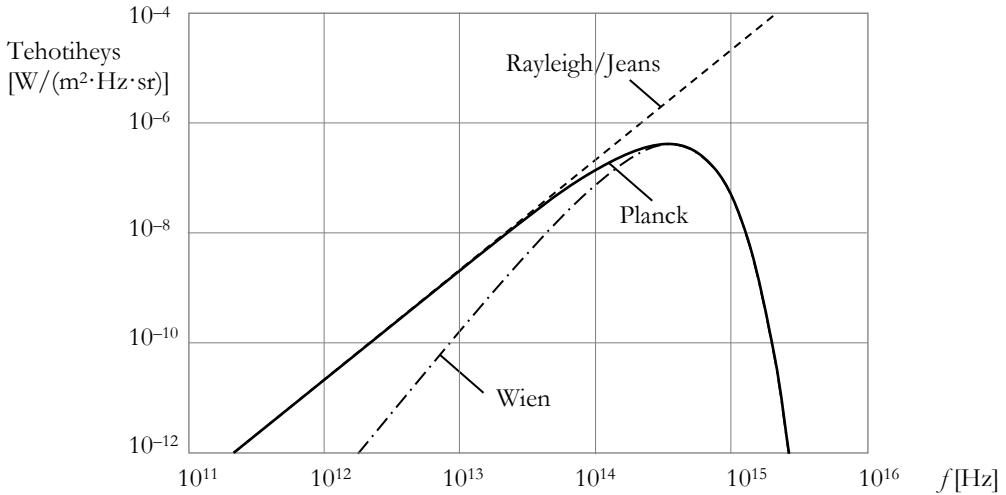
Osoittautui kuitenkin, että spektrin matalilla taajuuksilla säteilyn tehotiheys ei ollutkaan verrannollinen taajuuden kolmanteen potenssiin vaan säteilyn toiseen potenssiin. Spektrin matalien taajuuksien käyttäytymisen selitti ensimmäisenä englantilainen Lord Rayleigh soveltaen mustan kappaleen sisällä vaikuttavaan säteilyyn samaa seisoviin aaltoihin perustuvaa päättelyä, jota hän oli aikaisemmin soveltanut ääniaalloille. Koska seisovien aaltojen määrä kasvaa kohti äärettömä taajuuden kasvaessa, johti Rayleigh'n ratkaisu äärettömäksi kasvavaan energiaan, ominaisuus, joka myöhemmin sai nimen ultraviolettikatastrofi.

Mustan kappaleen spektrin ratkaisun löysi Max Planck vuonna 1900. Hän kuvasi mustan kappaleen seinämässä olevia emitterejä/absorbaattoreita monokromaattisina oskillaattoreina. Ero pitkäaaltoisen ja lyhytaaltoisen spektrin osan välillä selittyi, kun hän oletti yksittäisen oskillaattorin lähettävän energia-annoksen, jonka suuruus on suoraan verrannollinen oskillaattorin taajuuteen. Matemaattisesti ilmaistuna tämä oli kuuluisa Planckin yhtälö

$$E = h \cdot f \quad (1.9)$$

missä verrannollisuuskerroin  $h$  on Planckin vakio. Planck ei yrityksistään huolimatta löytänyt olettamukselleen perusteita suuresti kunnioittamistaan Maxwellin yhtälöistä, joten hän joutui esittämään yhtälönsä *ad hoc* yhtälönä, joka mahdollisesti seurasi vielä tuntemattomasta luonnonlaista (ks. *Luku 2, yhtälö 2.5*). Planckin johtama mustan kappaleen säteilyspektri yhtyi matalilla taajuuksilla Rayleigh'n johtamaan spektriin ja korkeilla taajuuksilla Wienin spektriin, ja vastasi suurella tarkkuudella mustasta kappaleesta eri lämpötiloissa mitattuja spektrejä, kuva 1-21.

Planckin johtaman säteilylain tarkka vastaavuus havaintoihin teki hänen olettamastaan taajuuteen verrannollisesta energiapaketista yleisesti hyväksytyin luonnonlain, jolle lähdettiin etsimään fysikaalista perustetta. Planck itse oli varsin pidättyväinen *ad hoc* yhtälönsä suhteen. Vasta vuosia myöhemmin, yhtälön saatua laajaa yleistä tunnistusta, hän uskoi tehneensä fysiikan jatkokehityksen kannalta merkittävän löydöksen.

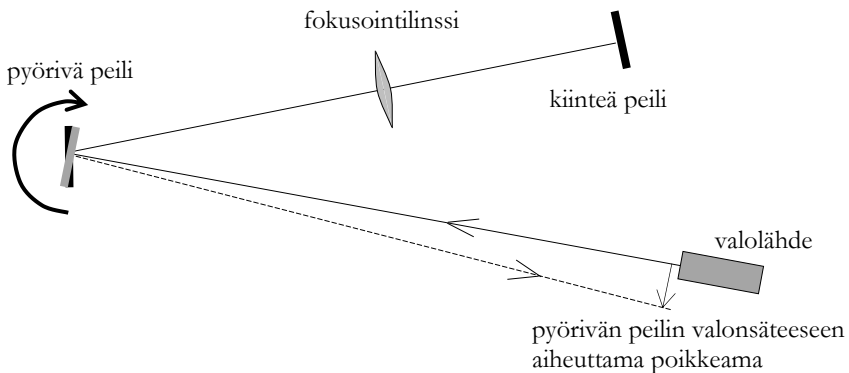


Kuva 1-21. Wienin, Rayleighin ja Planckin ennusteet mustan kappaleen säteilyn spektrille 5778 K:n lämpötilassa. Havainnot osuvat Planckin ennusteeseen suurella tarkkuudella.

### *Valon nopeus*

Valon äärellinen nopeus tunnettiin jo Newtonin aikaan. Ensimmäisen mittauksen valon nopeudesta oli tehnyt Ole Römer 1676 Jupiterin Io kuun jakson muutoksista. Römerin mittauksista saatu valon nopeus oli noin 210 000 km/s. Vuonna 1809 ranskalainen matemaatikko ja astronomi Jean Delambre mittasi valon nopeudeksi Römerin menetelmää käyttäen jo varsin lähellä nykyistä valon nopeutta olevan arvon, noin 296 000 km/s. Ensimmäisen maanpäällisen mittauksen valon nopeudesta tekivät ranskalaiset fyysikot Léon Foucault ja Hippolyte Fizeau vuonna 1850. Mittauksessaan he käyttivät laitteistoa, joka koostui valolähteestä, kiinteästä ja pyörivästä peilistä sekä varjostimesta, jolta peilin pyörähdyksestä johtuva siirtymä kiinteästä peilistä heijastuneen valon kulmassa voitiin lukea, kuva 1-22. Tulokseksi he saivat 298 000 km/s. Amerikkalainen fyysikko Albert Michelson tarkensi tuloksen samaa menetelmää käyttäen arvoon  $299864 \pm 51$  km/s. Valon nopeuden nykyarvo, 299 792,458 km/s, on tarkka, määriteltä arvo, josta määräytyvät metrin ja sekunnin mittastandardit.

1800-luvun lopun ja erityisesti Hertzin kokeiden jälkeisen ajan yleisin käsitys oli, että valoa kuljettava väliaine, eetteri, muodostaa globaalin vertailutilan valon nopeudelle, jolloin eetteriin nähden liikkeessä olevissa havaintokehyksissä havaintokehyksen nopeuden tulisi summautua havaittavaan valon nopeuteen. Tällöin esimerkiksi maapallon ratanopeuden, noin 30 km/s ja maan pyörimisliikkeen nopeuden, 0 – 460 m/s leveyspiiristä riippuen, oletettiin summautuvan maan pinnalla havaittavaan valon nopeuteen. Aurinkokunnan nopeutta Linnunradassa, saati sitten Linnunradan nopeutta paikallisessa galaksiryhmässä tai suhteessa avaruuden taustasäteilyyn ei 1800-luvulla tunnettu.



Kuva 1-22. Léon Foucault'n ja Hippolyte Fizeaun laitteisto valon nopeuden mittaamiseen 1850. Albert Michelson käytti samaan periaatteeseen perustuvaa laitteistoa vuonna 1883, jolloin hän sai valon nopeudeksi  $299,864 \pm 51$  km/s.

Tunnetuimman koesarjan maailmanetterin löytämiseksi teki Albert Michelson, joka vuonna 1887 yhdessä maanmiehensä Edward Morleyn kanssa osoitti, että valon nopeus on riippumaton suunnasta, joka sillä on maan ratanopeuteen nähden. Kokeessaan Michelson ja Morley käyttivät interferometriä, jossa valonsäde jaettiin puoliläpäisevällä peilillä toisiinsa nähden kohtisuoraan eteneviksi säteiksi, jotka peileillä palautettiin yhteiseen ilmaimeen. Vaihe-eron jaettujen säteiden välillä olisi tällöin pitänyt ilmaista mahdollisen eron ko. säteiden suunnissa valon nopeuteen summautuvan interferometrin nopeuden<sup>45</sup>, kuva 1-23.

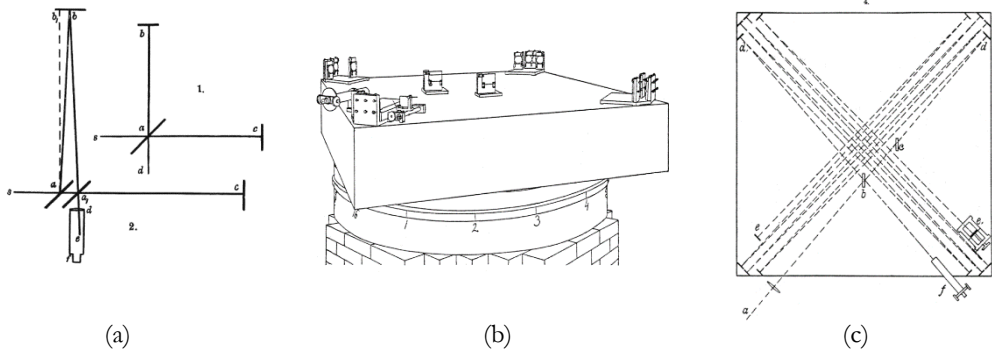
Michelsonin ja Morleyn interferometri oli periaatteessa riittävän tarkka ilmaistakseen maan ratanopeudesta johtuvan vaihe-eron, kun interferometriä kierrettiin maan ratanopeuteen nähden. Toistetuista kokeista huolimatta mitään vaihe-eron muutosta ei havaittu, minkä katsottiin merkitsevän, että joko koko eetteriteoria on hylättävä tai on löydettävä peruste havaintoympäristöön kytkeytyville paikallisille eettereille. Tulos oli yllättävä myös suhteessa ranskalaisen fyysikon, Hippolyte Fizeaun, vuonna 1851 tekemiin ”frame dragging” kokeisiin, jossa virtaavan veden havaittiin vaikuttavan siinä etenevän valon nopeuteen<sup>46</sup>.

Michelson uskoi ensi vaiheessa kokeensa nollatuloksen merkitsevän maan liikkeen kytkeytynyttä ”paikalliseetteriä”, jollaista George Stokes oli vuonna 1845 ehdottanut – vaikka mm. Hendrik Lorentz oli vuonna 1883 osoittanut, että Stokesin selitys aberratiosta paikalliseetterissä oli ristiriitainen.

Maxwellin teoria on johdettu suhteessa levossa olevaan väliaineeseen, eetteriin. Periaatteessa Maxwellin yhtälöiden kuvaamaan säteilylähteeseen voidaan soveltaa itävaltalaisen matemaatikon ja fyysikon, Christian Dopplerin, vuonna 1846 johtamaa

<sup>45</sup> A.A. Michelson, E.W. Morley, *On the Relative Motion of the Earth and the Luminiferous Ether*, American Journal of Science, 1887, **34** (203): 333–345, <https://history.aip.org/history/exhibits/gap/Michelson/Michelson.html#michelson1>

<sup>46</sup> Hippolyte Fizeau, Hypotheses on luminous ether and on an experiment that appears to demonstrate that the motion of bodies changes the velocity with which light propagates in their interior (1859), [wikisource.org](https://www.wikisource.org/wiki/Hippolyte_Fizeau/Hypotheses_on_luminous_ether_and_on_an_experiment_that_appears_to_demonstrate_that_the_motion_of_bodies_changes_the_velocity_with_which_light_propagates_in_their_interior)



Kuva 1-23. Michelsonin ja Morleyn käyttämä interferometri eetteriteorian testaamiseen. (a) Laitteen periaatekaavio: lähteestä  $s$  saatu valonsäde jaetaan puoliläpäisevällä peilillä  $a$  peileille  $b$  ja  $c$ , joista toisiaan vastaan kohtisuorat säteet palaavat peilille  $a$  ja siitä teleskooppiin  $f$ . Interferometrillä oletetaan perusolosuhteissa haarassa  $a-c-a$  valo kulkee edestakaisin interferometrillä nopeuden suuntaan. Interferometriä pyöritettäessä tilanne eetterin suhteen muuttuu, jolloin vaihe-eron valonsäteiden välillä tulisi muuttua, mikäli interferometrillä nopeus eetterissä summautuisi valon nopeuteen. (b) Interferometri oli konstruoitu noin 30 cm paksulle 1,5 m<sup>2</sup> suuruiselle kivialustalle, jota voitiin pyörittää alustallaan. (c) Instrumentin herkkyyden lisäämiseksi valon kulkutietä interferometrillä pidennettiin heijastamalla valoa edestakaisin kummassakin haarassa.

*Doppler-ilmiötä.* Jo parikymmentä vuotta ennen Maxwellin yhtälöitä julkaisemassaan artikkelissaan *Über das farbige Licht der Doppelsterne und einiger anderer Gestirne des Himmels – Versuch einer das Bradley'sche Aberrations – Theorem als integrierenden Theil in sich schließenden allgemeineren (Binäritähtien ja eräiden muiden taivaan tähtien valosta – Yritys yleiseen teoriaan, joka sisältää Bradley'n teoreeman integroituna osana* <sup>47</sup>) Christian Doppler oli johtanut liikkeen vaikutuksen taajuuteen ja aallonpituuteen, huomioiden sekä lähteen että vastaanottimen liikkeen suhteessa väliaineeseen, jossa valon etenemisen oletettiin tapahtuvan.

Doppler-ilmiön analyysistä lähtien, saksalainen fyysikko Woldemar Voigt esitti vuonna 1887 koordinaatistomuunnoksen, joka säilytti paikallisen valon nopeuden eetteriin nähden liikkuvassa koordinaatistossa <sup>48</sup>. Voigtin muunnos säilytti perinteisen Galilein muunnoksen liikkeen suuntaisen paikkakoordinaatin suhteen, korjasi liikettä vastaan kohtisuoria koordinaatteja tekijällä  $\sqrt{1 - (v/c)^2}$  ja hidasti liikkuvassa koordinaatistossa etenevää aikaa tekijällä  $[1 - (v/c)^2]$ . Voigtin muunnos palautuu myöhemmin suppeassa suhteellisuusteoriassa käyttöön otettuun Lorentz-muunnokseen, kun sekä paikka- että aikakoordinaatteihin liittyvät muunnoskaavat jaetaan tekijällä  $\sqrt{1 - (v/c)^2}$ . Voigtin muunnos perustui Doppler-ilmiön analyysiin elastisessa väliaineessa; paikallisen valon nopeuden säilyminen toisiinsa nähden liikkuviin

<sup>47</sup> [http://en.wikipedia.org/wiki/%C3%9Cber\\_das\\_farbige\\_Licht\\_der\\_Doppelsterne\\_und\\_einiger\\_anderer\\_Gestirne\\_des\\_Himmels](http://en.wikipedia.org/wiki/%C3%9Cber_das_farbige_Licht_der_Doppelsterne_und_einiger_anderer_Gestirne_des_Himmels)

<sup>48</sup> W. Voigt, *On the Principle of Doppler*, <http://en.wikisource.org/?curid=674876>

havaintokehyksiin kiinnitetyissä koordinaatioissa oli seuraus hänen olettamistaan väliaineen ominaisuuksista. Periaatteessa Voigtin muunnos riitti selittämään Michelson-Morleyn kokeen, vaikka hän ei julkaisussaan siihen viitannut.

Ensimmäisenä mahdollisen selityksen Michelson-Morleyn kokeen nollatulokselle esitti irlantilainen fyysikko ja matemaatikko George FitzGerald vuonna 1889. Hän huomasi, että vaihe-ero M-M interferometrin valonsäteiden välillä häviää, jos olettamme nopeuden lyhentävän valonsäteen interferometrin nopeuden suunnassa kulkemaa matkaa, mikä tarkoittaisi materian kutistumista liikkeen suunnassa tekijällä  $[1 - \frac{1}{2}v/c]$ .

Jotta liikkuvassa havaintokehyksessä havaittava valon nopeus säilyisi vakiona kaikissa suunnissa, joudutaan pituuskontraktion ohella olettamaan nopeuteen sidottu aikadilaatio. Tällaisia muunnoksia kehittivät 1890-luvulla hollantilainen fyysikko Hendrik Lorentz ja irlantilainen Joseph Larmor. Joseph Larmor pohti Michelson-Morleyn koetta suhteessa Fizeaun kokeisiin, Doppler-ilmiöön ja aberraatioon. Hän päätteli, että maapallon mukana liikkuva eetteri on ristiriidassa tähtien aberraation kanssa. Jotta Michelson-Morleyn kokeen tulos voitaisiin selittää kiinnittämättä eetteriä maapallon liikkeeseen, Larmor kehitti koordinaatistomuunnoksen, jonka avulla eetterissä liikkuva havaitsija näkee valon etenemisen ikään kuin havaitsijan liikkeeseen kytkettynä. Larmorin koordinaatistomuunnos julkaistiin vuonna 1897 *Philosophical Transactions of the Royal Society* julkaisusarjassa ja kolme vuotta myöhemmin hänen kirjassaan *Aether and Matter*<sup>49</sup> [s.38].

Larmor käsittelee kirjassaan laajasti aberraatiohavaintoja sekä Fizeaun ja Michelsonin kokeita, Doppler-ilmiötä ja Maxwellin yhtälöitä [s.46] ja päätyy dynaamiseen teoriaan sähkömagneettisen säteilyn havaitsemisesta eetteriin nähden liikkuvassa havaintokehyksessä. Larmorin fysikaalisen selityksen mukaan [s.64] eetterin suhteen liikkuvassa materiassa tapahtuu todellinen kutistuminen. Larmor perustelee analyysinsä hypoteesilla, jonka mukaan elektroni on eetterin singulariteetti, ja että atomit ovat tällaisten singulariteettien kasautumia. Larmorin tulos osoittautui identtiseksi Lorentzin kehittämän muunnoksen kanssa sekä pituuskontraktion että aikadilaation suhteen.

### Lorentz-muunnos

Vuonna 1892 ilmestyneessä kirjoituksessaan *De relatieve beweging van de aarde en den aether*<sup>50</sup> (*Maan suhteellinen liike ja Eetteri*) Lorentz pohtii Fresnelin ja Stokesin päätelmiä tähtien aberraatiosta ja maapallon liikkeestä eetteriin nähden; Fresnel oletti, että eetteri tunkeutuu kaiken aineen sisään, eikä aineen liike vaikuta eetteriin, kun taas Stokes oletti, että maapallo vetää eetteriä mukanaan. Lorentz oli valmis hylkäämään Stokesin mallin ja hyväksymään Fresnelin mallin johdettuaan ”veto -kertoimen” (*dragging coefficient*), jolla aine vetää eetteriä mukanaan, kuten oli tilanne Fizeaun liikuvan veden kokeissa. Teoria ei kuitenkaan riittänyt Michelson-Morley kokeen selittämiseen. ”Pitkän aikaa mietittyäni tätä koetta tuloksettomasti olen löytänyt yhden ratkaisun, jolla Michelson-Morley kokeen selitys saadaan sopimaan Fresnelin teoriaan. Se sisältää oletuksen, että suora, joka yhdistää kaksi pistettä kiinteässä kappaleessa ei säilytä pituuttaan, kun

<sup>49</sup> J. Larmor, *Aether and Matter*, <http://www.archive.org/stream/aethermatterdeve00larmuoft>

<sup>50</sup> Amsterdam, Zittingsverlag Akad. v. Wet., 1, p. 74, [wikisource.org](http://wikisource.org)



*se on maan liikkeen suunnassa, vaan lyhenee, ja palautuu lepomittansa sen ollessa kohtisuorassa liikettä vastaan. Sellainen muutos interferometrin haaroissa Michelsonin kokeessa ei todellakaan ole mahdoton” [s.76].*

Lorentz päätyi siis samaan tulokseen kuin George Fitzgerald. Hän perustelee päätelmänsä aineen molekylaarisilla voimilla, ”mikä tahansa mikä niihin vaikuttaa, voi muuntaa kappaleen muotoa ja kokoa. Koska emme tunne molekulaarisia voimia, hypoteesia on mahdoton todistaa.”

Vuonna 1895 julkaistussa artikkelissaan Versuch einer Theorie der electrischen und optischen Erscheinungen in bewegten Körpern <sup>51</sup>, (Yritys Teoriaksi Sähköisistä ja Optisia Ilmiöistä liikkuvissa kappaleissa), Lorentz esittää ”paikallisen ajan” käsitteen, joka yhdessä pituuskontraktion kanssa säilyttää valon nopeuden eetteriin nähden liikkuvassa havaintokehyksessä. Paikallisen ajan käsitettä käytettäessä värähtelevä systeemi säilyttää taajuutensa suhteessa ko. tilan paikalliseen aikaan. Hän tarkastelee laajalti ja yksityiskohtaisesti pituuskontraktion ja aikadilaation vaikutuksia sähkömagneettisiin ja valon havaitsemisen ilmiöihin liittyvissä systeemeissä, ja esittää mm. johtonsa Fresnelin kokeellista kaavaa vastaavalle eetterin ”veto -kertoimelle” (dragging coefficient).

Julkaisussaan Simplified Theory of Electrical and Optical Phenomena in Moving Systems <sup>52</sup> (Yksinkertaistettu teoria Sähköisistä ja Optisista Ilmiöistä Liikkuvissa Systeemeissä) Lorentz kokoaa aikaisemmat tarkastelunsa ja ilmaisee selkeät lausekkeet pituuskontraktiolle ja aikadilaatiolle, ja vahvistaa paikallisen ajan ja universaalien ajan käsitteet. Lopullisessa muodossaan hän julkaisi muunnoksensa vuonna 1904 Electromagnetic phenomena in a system moving with any velocity smaller than that of light <sup>53</sup> (Sähkömagneettiset ilmiöt systeemeissä, jotka liikkuvat valon nopeutta alhaisemmalla nopeudella). Hän kohdisti pituuskontraktion ensisijaisesti elektroneihin, joiden hän liikkeen vaikutuksesta oletti litistyvän ellipsoideiksi, joiden lyhyt akseli on liikkeen suunnassa. Hän päätteli edelleen, että elektronien sähkömagneettinen massa liikkeen suunnassa poikkeaa sen massasta kohtisuoraan liikettä vastaan. Lorentz yleistää elektronista, elektronin massasta ja kutistumisesta liikkeen suunnassa tekemänsä päätelmät kaikkeen massaan ja makroskooppisiin kappaleisiin [§12]. Päätelmiensä tueksi hän viittaa saksalaisen fyysikon, Walter Kaufmannin mittauksiin vuonna 1902, ja toteaa, että hänen johtamansa liikkeen suuntainen massa täsmää kohtalaisesti Kaufmannin kokeiden kanssa. Walter Kaufmann oli katodisädeputkella tekemissään kokeissa tunnistanut elektronin sähkömagneettisen massan nopeusriippuvuuden elektronin varauksen ja massan suhdetta analysoimalla, olettamalla sähkövarauksen säilyvän vakiona.

Rinnan Lorentzin työn kanssa Henri Poincaré pohti Maxwellin yhtälöiden Fizeaun kokeiden, aberration ja Michelson–Morley kokeen tulosten yhteensovittamista. Vuoden 1905 julkaisussaan *Sur la dynamique de l'électron* <sup>54</sup> (*Elektronien Dynamiikasta*), Poincaré käsittelee mm. absoluuttista liikettä, pituuskontraktiota ja gravitaatiovuoro-vaikutuksen nopeutta:

<sup>51</sup> E. J. Brill, Brill Academic Publishers, Leiden, [wikisource.org](https://www.wikisource.org)

<sup>52</sup> Proceedings of the Royal Netherlands Academy of Arts and Sciences, 1899 1: 427–442, [wikisource.org](https://www.wikisource.org)

<sup>53</sup> Proceedings of the Royal Netherlands Academy of Arts and Sciences, 1904, 6: 809–831, [wikisource.org](https://www.wikisource.org)

<sup>54</sup> Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, t. 140, p. 1504–1508, [wikisource.org](https://www.wikisource.org)

*”Ensimmäkeltä näyttää, että tähtien valon aberraatio ja vastaavat optiset ilmiöt tarjoavat keinon määrittää maan absoluuttinen liike kiintotähtiin, tai oikeammin, eetteriin nähden. Näin ei kuitenkaan ole: kokeet, joissa huomioimme vain ensimmäisen kertaluokan aberraation, olivat aluksi epäonnistuneita ja syy löytyi helposti; mutta Michelson, joka keksi kokeen, jossa voidaan mitata aberraation neliöön verrannolliset termit, osoittautui myös epäonnistuneeksi. Näyttää siltä, että absoluuttisen liikkeen havaitsemisen mahdottomuus on yleinen luonnonlaki.”*

*”Lorenzin esittämä selitys oli hypoteesi kaikkien kappaleiden kiihtymisestä maan liikkeeseen suunnassa; tämä kiihtyminen selittäisi Michelson-Morleyn kokeen ja kaikki tähän mennessä suoritettut kokeet, mutta jättää tilaa muille kokeille, ehkä herkemmille ja helpommin kuviteltaville kuin suoritettaville, jotka saattaisivat demonstroida maan absoluuttisen liikkeen. Mutta jos mahdollisuus sellaisten kokeiden löytymiseen on hyvin epätodennäköinen, voidaan ennustaa, että jos nämä kokeet voitaisiin suorittaa, tulos olisi negatiivinen.”*

*”Lorentz näki tarpeelliseksi täydentää hypoteesiaan oletuksella, että Lorentz-muunnos vaikuttaa kaikkiin voimiin, niiden alkuperästä riippumatta, samalla tavalla kuin se vaikuttaa sähkömagneettisiin voimiin.”*

*”Oli tärkeää tutkia tätä hypoteesia tarkemmin ja tutkia erityisesti mitä muutoksia se edellyttää meitä tekemään gravitaatiolakiin. Olin ensin taipuvainen olettamaan, ettei gravitaation eteneminen ole välitön, vaan tapahtuu valon nopeudella. Tämä näyttää olevan vastoin Laplacen tulosta, jonka mukaan vaikutus on, ellei välitön, ainakin paljon nopeampi kuin valon nopeus. Mutta todellisuudessa Laplacen asettama kysymys poikkeaa huomattavasti uudesta tilanteestamme. Äärellisen nopeuden oletus oli ainoa muutos, jonka Laplace teki Newtonin lakiin. Nyt, päinvastoin tämän muutoksen ohella oletetaan monia muita muutoksia; on mahdollista, ja todella tapahtuu, että muutokset osittain kumoavat toisiaan.”*

Viimeksi mainitussa kommentissaan Poincaré hyväksyy gravitaation äärellisen nopeuden edellyttäen, että sen tuoma muutos Newtonin gravitaatioon tulee kumotuksi Lorentz-muunnoksen tuomilla lisätekijöillä. Poincaré toteaa lisäksi mm., että Lorentzin päätelmät pituuskontraktiosta pätevät, mikäli inertia on sähkömagneettinen ilmiö, kuten Kaufmannin kokeista voidaan päätellä. Henri Poincaré näki, että Lorentz-muunnos säilyttää suureen  $ds^2 = x^2 + y^2 + z^2 - (ict)^2$ , mikä voidaan tulkita rotaatioksi neliulotteisessa avaruudessa, jossa neljäs ulottuvuus kuvataan imaginaarisena suuntana  $ict$ <sup>55</sup>.

### *Suhteellisuusteoria*

Galileo Galilei oli jo aikoinaan huomannut, että hänen tunnistamansa mekaniikan lait ovat riippumattomia havaitsijan tasaisesta liikkeestä ympäristöön nähden; tasaisesti liikkuvassa laivassa tehdyt pudotuskokeet antoivat täsmälleen samat tulokset kuin ne antoivat laivan ollessa kiinnitettynä laituriiin. Michelson-Morley kokeen perusteella näytti siis siltä, että myös valon, ja yleisesti sähkömagneettisen säteilyn, suhteen toteutuisi sama riippumattomuus havaintokehyksen liikkeestä ympäristöönsä nähden. Newtonin teorian tavoin myös Maxwellin teoria on periaatteessa havaitsijakeskeinen; suhteellisuusteoriassaan Einstein perustelikin suhteellisuusteoriaa sillä, että sähkömagneettisten ilmiöiden voidaan olettaa käyttäytyvän liiketilan

<sup>55</sup> E.T. Whittaker, *A History of the Theories of Aether and Electricity*, Dublin University Press Series (1910), [open library](#)

suhteen samoin kuin mekaniikan ilmiöiden; koordinaatioissa, joissa pätevät mekaniikan lait, tulee myös vastaavien sähkömagnetismin ja optiikan lakien päteä. Lorentzin ja Poincarén tarkastelujen perusteella oli tullut ilmeiseksi, että sähkömagneettisten ilmiöiden ja valon paikallinen havaitseminen ei selity lineaarisessa newtonilaisessa avaruudessa. Suurimman kysymyksen herätti valon nopeus, joka ei summautunut havaitsijan nopeuteen, vaan näyttäytyi vakiona kaikille tasaisessa liikkeessä oleville havainnoitsijoille.

Henri Poincaré oli pohtinut sekä suhteellisuusperiaatetta että ajan suhteellisuutta vuoden 1898 julkaisussaan *La mesure du temps*<sup>56</sup> (*Ajan mitta*). Kaiken kaikkiaan Lorentzin ja Poincarén työ sähkömagneettisten ilmiöiden havaitsemisen teoreettiseen kuvaamiseen muodosti laaja-alaisen pohjan Einsteinin vuonna 1905 esittämälle synteesille. Artikkelissaan *Zur Elektrodynamik bewegter Körper*<sup>57</sup> (*Liikkuvien kappaleiden sähködynamiikka*), Einstein johtaa Lorentzin muunnosyhtälöt puhtaasti kinemaattisin perustein, postuloituaan suhteellisuusperiaatteen, samanaikaisuuden suhteellisuuden ja valon nopeuden vakioisuuden – millä hän vältti tarpeen ottaa kantaa esim. pituuskontraktion fysikaaliseen mekanismiin ja mahdolliseen eetteriin tai sen ominaisuuksiin.

### *Suppea suhteellisuusteoria*

Einstein päätyi suhteellisuusteoriaan suhteellisuusperiaatteen ja ajan uudenlaisen määrittelyn kautta. Hän oletti, että sähkömagnetismin ilmiöihin ja valon havaitsemiseen, vastaavasti kuin mekaniikan lakeihin, pätevät muuttumattomat lainalaisuudet havaitsijan liike-tilasta riippumatta. Suhteellisuusperiaatteen perusteella Einstein hylkää absoluuttisen lepotilan ja eetterin, jolloin kuka tahansa tasaisessa liikkeessä oleva havaitsija voi pitää tilaansa lepotilana myös sähkömagneettisten ilmiöiden ja valon etenemisen suhteen. Kinemaattinen lähestymistapa merkitsi sitä, että havaitsijaan nähden liikkuvan systeemin ”todellisuus” välittyy erilaisena kuin se välittyy paikalliselle havaitsijalle itse liikkuvassa systeemissä.

Vuoden 1905 artikkelissaan *Zur Elektrodynamik bewegter Körper*<sup>1</sup> Einstein aloittaa teoriasensa kehittelyn ajan määrittelyllä ja postuloimalla valon nopeuden luonnonvakioksi. Suhteellisuusperiaatteen mukaisesti suppean suhteellisuusteorian maailma on symmetrinen; kahdesta toisiinsa nähden liikkuvasta systeemistä tehtyjen vastavuoroisten havaintojen tulee olla samanlaiset, mikä tarkoittaa mm. sitä, että kumpikin osapuoli näkee toisen osapuolen ajan hidastuneena omaan aikaansa (kellonsa käyntinopeuteen) verrattuna.

Einsteinin päättely perustui valon edestakaisten kulkuajkojen synkronointiin havaitsijan havaintokehyksessä ja sen suhteen liikkuvassa havaintokehyksessä. Havaitsijan lepokehyksessä aika, jossa valonsäde kulkee pisteiden  $A$  ja  $B$  välisen edestakaisen etäisyyden  $AB+BA=2\cdot R$ , on kaksi kertaa  $R$  jaettuna valon nopeudella  $c$

$$T_{AB} + T_{BA} = 2 \cdot \frac{R}{c} = 2T \quad (1.10)$$

<sup>56</sup> H. Poincaré, “*La mesure du temps*”, *Revue de métaphysique et de morale* 6: 1-13, [wikisource.org](https://www.wikisource.org/wiki/Revue_de_métaphysique_et_de_morale/6/1-13)

<sup>57</sup> A. Einstein, *Zur Elektrodynamik bewegter Körper*, *Annalen der Physik* 322 (10): 891–921, [wikisource.org](https://www.wikisource.org/wiki/Annalen_der_Physik/322/10/891-921)

Havaintokehyksessä, jossa janan  $AB$  sisältävä systeemi on liikkeessä nopeudella  $v$  janan  $AB$  suunnassa lepokehyksessä olevaan havaitsijaan nähden, Einstein ilmaisee vastaavan edestakaisen kulkuajan lepotilan suhteen lausekkeella

$$a \cdot T = \frac{1}{2}(t_{AB} + t_{BA}) = \frac{1}{2} \left( \frac{b \cdot R}{c-v} + \frac{b \cdot R}{c+v} \right) = \frac{c b R}{c^2 - v^2} = \frac{b R}{c} \frac{1}{1 - (v/c)^2} \quad (1.11)$$

missä kerroin  $a$  modifioi lepotilassa mitattua yksisuuntaista kulkuuikaa  $T$ , tai puolikasta liikkuvasta havaintokehyksestä mitattua edestakaista kulkuuikaa, ja kerroin  $b$  etäisyyttä  $R$  siten, että edestakainen kulkuuika ja etäisyys liikkuvassa kehyksessä toteuttavat saman valon nopeuden  $c$  kuin lepokehyksessä mitattu nopeus  $c$

$$c = \frac{R_{(lepotila)}}{T_{(lepotila)}} = \frac{b R_{(liiketila)}}{a T_{(liiketila)}} \frac{1}{1 - (v/c)^2} = \frac{R'_{(liiketila)}}{T'_{(liiketila)}} \quad (1.12)$$

Yhtälön (1.11) perusteella yhtälö (1.12) toteutuu, kun  $b/a = 1 - (v/c)^2$ .

Jos korjaus tehdään vain aikaan,  $b = 1$  ja  $a = 1/[1 - (v/c)^2]$ , ja

$$T' = a T = \frac{T}{1 - (v/c)^2} \quad (1.13)$$

päädytään Voigtin muunnokseen, jossa  $R' = R$  ja myös liikettä vastaan kohtisuoran janan pituus  $R'_\perp = R$ . Einstein olettaa liikettä vastaan kohtisuoran pituuden säilyvän, mutta liikkeen suuntaisen pituuden muuttuvan, jolloin päädytään Lorentzin muunnokseen, jossa korjaus  $b/a = 1 - (v/c)^2$  jakautuu tasan ajan ja liikkeen suuntaisen etäisyyden kesken. Tällöin aikadilaatio on

$$T' = a T = \frac{T}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} \quad (1.14)$$

Kuten yhtälöstä (1.10) ilmenee, aika  $2T$  tarkoittaa valon edestakaista kulkuuikaa janan  $R$  päätepisteiden välillä. Lepotilan tarkastelussa aika  $T$  on sama kumpaankin suuntaan. Liiketilassa aika  $T'$  on edestakaisen kulkuajan keskiarvo, mutta ajat eri suuntiin poikkeavat toisistaan. Yksisuuntaiset kulkuajat nähdään sijoittamalla yhtälön (1.15)  $R'$  yhtälössä (1.11) esiintyviin vastakkaisuuntaisiin kulkuuikoihin

$$t_{AB} = \frac{b \cdot R}{c+v} = R \frac{\sqrt{1 - (v/c)^2}}{c+v}, \quad t_{BA} = R \frac{\sqrt{1 - (v/c)^2}}{c-v}$$

Suhteellisuusteoria, jonka mukaan havainnot ovat liikeilasta riippumattomat, toteutuu siis Einsteinin esittämälle edestakaiselle kulkuajalle, mutta ei erikseen liikkeen suuntaiselle ja vastakkaisuuntaiselle kulkuajalle!

Einstein yleisti valon kaksisuuntaisen kulkuajan täsmäämisestä saadun aikadilaation. Nykyaikaisilla atomikelloilla voidaan helposti verrata toisiinsa nähden liikkuvien kellojen käyntinopeuksia. Kellojen käyntinopeudet eivät riipu kellojen suhteellisesta nopeudesta, vaan kellojen liike- ja gravitaatiotilasta kelloille yhteisessä energiakehyksessä (ks. luku 4. Mallit ja havainnot).

ja pituuskontraktio liikkeen suunnassa

$$R' = bR = R\sqrt{1 - (v/c)^2} \quad (1.15)$$

Einstein johti muunnokseen perustuvan nopeuksien yhteenlaskukaavan [*Zur Elektrodynamik bewegter Körper*, §5], joka samansuuntaisten nopeuksien tapauksessa sai muodon

$$V = \frac{v + w}{1 + vw/c^2} \quad (1.16)$$

jota soveltaen objektien suhteellinen nopeus ei koskaan ylitä valon nopeutta. Myöhemmin Einstein toteaa saaneensa merkittävää vahvistusta suppeaan suhteellisuusteoriaan omaksumiinsa muunnoskaavoihin juuri nopeuksien yhteenlaskukaavasta, joka tuottaa saman ennusteen liikkuvan väliaineen vaikutukseen valon nopeuteen kuin Fizeaun vuonna 1851 kokeellisesti vahvistama, Fresnelin kaava vuodelta 1819.

Suppean suhteellisuusteorian nopeuksien yhteenlaskukaavan ja Fresnelin kaavan yhtäläisyyden huomasi saksalainen fyysikko ja Einsteinin tärkeä tukija, Max von Laue<sup>58</sup> vuonna 1907. Kuten jo Lorentz ja Poincaré olivat todenneet, Lorentz-muunnos säilyttää yhtälön

$$(dx)^2 + (dy)^2 + (dz)^2 - (cdt)^2 = (ds)^2 \quad (1.17)$$

sekä Maxwellin yhtälöt liikkuvassa koordinaatistossa. Einstein osoittaa sekä Maxwellin yhtälöiden säilymisen, tarkastelee valon aberratiota että johtaa Doppler-ilmion lausekkeen ja valon säteilypaineen liikkuvaan objektiin.

E erityisen tärkeäksi vuoden 1905 julkaisussa muodostui Einsteinin alun perin elektronille esittämä kineettisen energian lauseke, jonka hän johtaa soveltamalla Newtonin toista lakia pituuskontraktiolla ja aikadilaatiolla korjattuun kiihtyvyyteen (tai Lorentzin johtamaan liikkeen suuntaiseen massaun, (*longitudinal mass*) ja integroimalla voiman ( $F = ma$ ) välillä  $x = 0 \dots x$ , nopeuden kasvaessa nolasta nopeuteen  $v$

$$E_{kin} = \int_0^x \frac{m dv/dt}{[1 - (v/c)^2]^{3/2}} dx = \int_0^v \frac{mv dv}{[1 - (v/c)^2]^{3/2}} = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} - mc^2 = E_{tot} - E_{rest} \quad (1.17)$$

Tuloksesta on tulkittavissa, että massaobjektilla on liikkeen energia  $E = mc^2$  sen ollessa lepotilassa tai että massa itsessään sisältää energian  $mc^2$ . Liiketilan energia kasvaa kohti ääretöntä nopeuden  $v$  kasvaessa kohti valon nopeutta  $c$ .

Ajatus massan sisältämästä energiasta ei sinänsä ollut uusi, sen olemassaolon olivat ”sähkömagneettiselle massalle” päätelleet englantilaisen fyysikot Joseph John Thomson<sup>59</sup> vuonna 1881 ja Oliver Heaviside<sup>60</sup> (1889). Vuoden 1900 julkaisussaan *La théorie de Lorentz et le principe de réaction*<sup>61</sup> (*Lorentzin teoria ja Reaktion Periaate*) Henri Poincaré

<sup>58</sup> M. Laue, *Annalen der Physik* 23: 989–990 (1907), [wikisource.org](https://www.wikisource.org)

<sup>59</sup> J.J Thomson, *Philosophical Magazine*, 5 **11** (68): 229–249 (1881), [wikisource.org](https://www.wikisource.org)

<sup>60</sup> O. Heaviside, *Philosophical Magazine*, 5 **27** (167): 324–339 (1889), [wikisource.org](https://www.wikisource.org)

<sup>61</sup> H. Poincaré, <http://www.physicsinsights.org/poincare-1900.pdf>

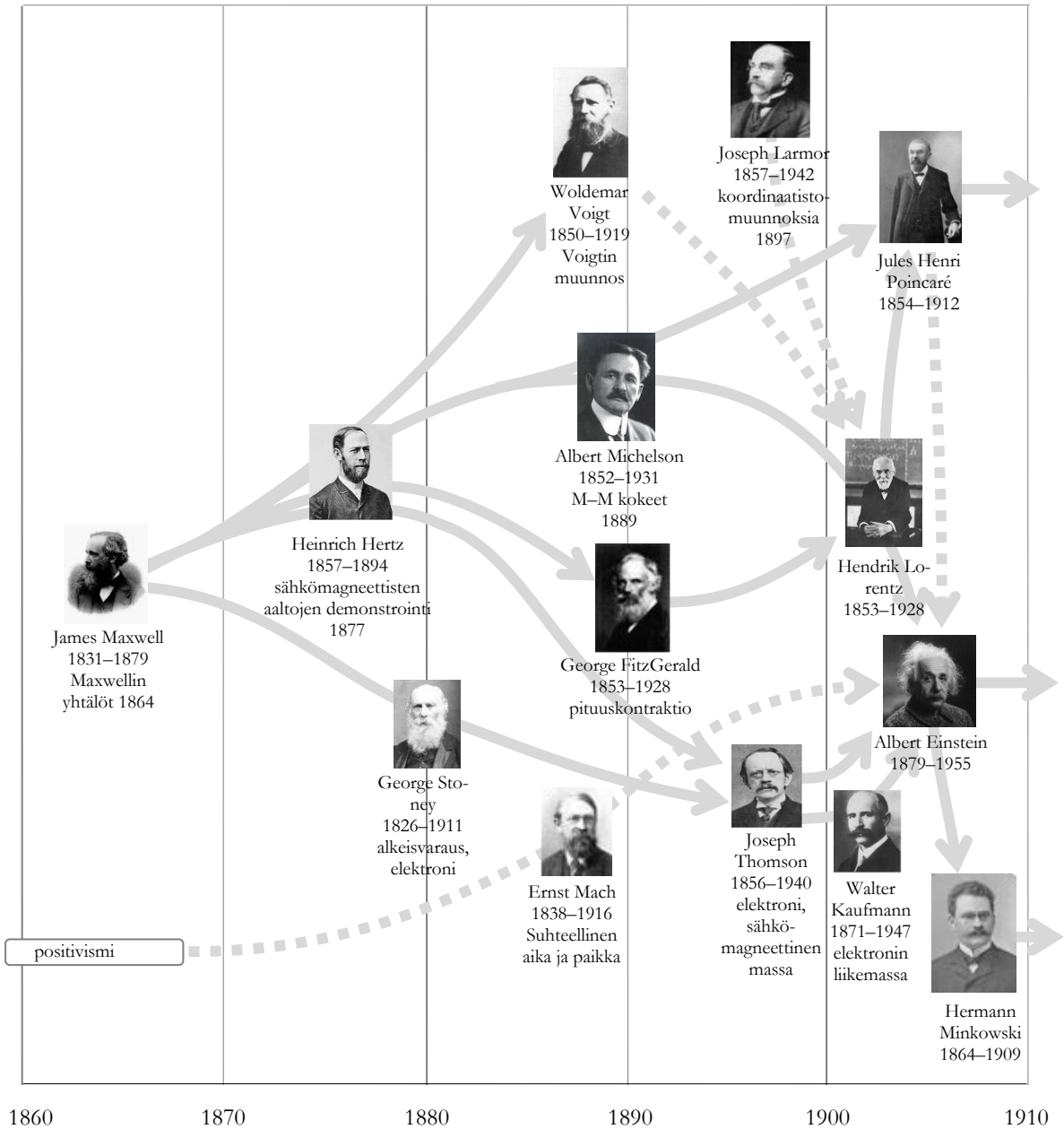
oli Poyntingin työhön viitaten todennut, että sähkömagneettinen energia käyttäytyy kuin kuvitteellinen neste, jonka massatiheys on  $m = E/c^2$  ja liikemäärä  $mc = E/c$ .

Einsteinin vuoden 1905 julkaisu sai ristiriitaisen vastaanoton. Lorentz ja Poincaré olivat etsineet havaintojen selittämisen vaatiman pituuskontraktion ja aikadilaation perusteita eetterin sähkömagneettisista ominaisuuksista ja eetterissä liikkuvien elektronien muodonmuutoksesta. Einstein puolestaan määritteli suhteellisuusteorian luonnonlaiksi ja valon nopeuden vakioksi, mikä eliminoi tarpeen sekä eetterin olemassaololle että nopeuksien universaalille vertailutilalle. Matemaattisesti ratkaisu kunnioitti Maxwellin yhtälöitä, vaikka Maxwellin yhtälöt oli johdettu eetteriteoriaan nojautuen.

Suhteellisuusteorian viestittämä todellisuuskuva selkiintyi merkittävästi Hermann Minkowskin vuonna 1907 esittämästä aika-avaruus tulkinnasta<sup>62</sup>, jossa suure  $ct$  kytkeytyi avaruuteen ortogonaalisena neljäntenä ulottuvuutena, mikä samalla synnytti *aika-avaruuden* käsitteen. Itse asiassa Minkowskin aika-avaruus kuvasi Lorentz-muunnoksen ominaisuutta, jonka sekä Lorentz että Poincaré olivat esittäneet yhtälöllä (1.17). Kuvassa 1-24 on hahmoteltu suppean suhteellisuusteorian muotoutumiseen johtaneita tutkimuksia.

---

<sup>62</sup> H. Minkowski, [wikisource.org](https://en.wikisource.org/wiki/Hermann_Minkowski)



Kuva 1-24. Suppean suhteellisuusteorian taustatutkimus ja rinnakkainen tutkimus. Suppean suhteellisuusteorian keskeisimmät taustatutkimukset liittyivät koordinaatistomuunnoksiin, joilla pyrittiin selittämään sähkömagneettisten aaltojen emissio, eteneminen ja vastaanotto toisiinsa nähden liikkuvissa havaintokehyksissä. Erittäin tärkeitä olivat myös sähkömagneettisen massaan ja elektronin liikemassaan liittyvät tutkimukset, sekä Ernst Machin kautta välittynyt positivismin asenne, joka nosti havainnon kuvaamisen luonnonlain arvoon.

## Säteilykvantista kvanttimekaniikkaan

### *Planckin yhtälö*

Max Planckin johtama mustan kappaleen säteilyn kuvaus tuotti yllättävänä pidetyn tuloksen, jonka mukaan sähkömagneettisen säteilyn emissiota on ainakin mustan kappaleen tapauksessa käsiteltävä monokromaattisten oskillaattoreiden lähettäminä ”energiapaketteina”, joiden energiasisältö oli oskillaattorin taajuuteen verrannollinen

$$E = h \cdot f \quad (1.19)$$

missä verrannollisuuskertoimen  $h$  on Planckin vakio. Planckille yhtälö oli *ad hoc* löydös, jonka hän katsoi olevan ristiriidassa Maxwellin yhtälöiden kanssa. Hendrik Lorentz totesi vuonna 1906 Coulumbian yliopistossa New Yorkissa pitämässään luennoissa Max Planckin teorian ylivoimaisuuden mustan kappaleen säteilyn ymmärtämisessä. Teorian perusteista hän toteaa:

*”Emme kuitenkaan voi sanoa, että ilmiön mekanismi olisi tullut selitetyksi, ja on myönnettävä, että on vaikeaa nähdä syy tähän energian jakautumiseen äärellisiksi annoksiksi, jotka eivät ole keskenään yhtä suuria vaan muuttuvat resonaattorista toiseen.”*<sup>63</sup>

Lisäkommenttina luennoistaan kirjoittamassaan, vuonna 1916 ilmestyneessä kirjassaan *The theory of electrons and its applications to the phenomena of light and radiant heat* (Elektronien teoria ja sen soveltaminen valoon ja lämpösäteilyyn liittyviin ilmiöihin) hän on lisännyt edellä olevaan sitaattiin alaviuhteen:

*”Siitä kun edellä oleva oli kirjoitettu, Planckin teoriaa ”kvanteista” on kehitetty merkittävästi. Nykyisin, (1915), sillä on merkittävä asema teoreettisen fysiikan useilla alueilla.”*<sup>65</sup>

Tarkastelu, jonka Max Planck suoritti Maxwellin yhtälöiden suhteen, ei sisältänyt ”antennianalyysia”, jossa dipolin emittoiman säteilyjakson energia olisi ilmaistu dipolissa oskilloivien elektronien  $N$ , emitterin geometrisen tekijän  $A$ , sekä dipolin pituuden  $z$  ja emittoitun aallonpituuden  $\lambda$  funktiona. Kun tällainen tarkastelu suoritetaan<sup>64</sup>, havaitaan, että minkä tahansa dipolin yhteen jaksoon emittoiva energia on muotoa

$$E = N^2 \cdot A \cdot \left(\frac{z}{\lambda}\right)^2 \cdot 2\pi^3 e^2 \mu_0 c \cdot f \quad ; \quad E_0 = h \cdot f \quad (1.20)$$

Planckin yhtälöön  $E_0 = h \cdot f$ , ja Planckin vakion  $h$  arvoon päädytään dipolissa, jonka pituus on emittoitu aallonpituus ja geometriatekijä  $A = 1,1049$ . Tällöin yhden elektronin yhdessä värähdysjaksossa yhteen säteilyjaksoon emittoima energia on tarkalleen Planckin yhtälön mukainen  $E_0 = hf$ .

Yhtälö (1.20) viestittää myös, että Planckin vakio sisältää ”piilotekijänä” valon nopeuden. Kun tämä erotetaan, saa ”energiakvanti” muodon

$$E_0 = h_0 \cdot c \cdot f = \frac{h_0}{\lambda} c^2 = m_\lambda c^2 \quad (1.21)$$

missä suureella  $h_0/\lambda = m_\lambda$  on massan dimensio [kg] ja merkitys yhden elektronin yhteen säteilyjaksoon emittoimana massaekvivalenttina (ks. Luku 2, *Planckin yhtälön yhteys Maxwellin yhtälöihin*).

<sup>63</sup> H. Lorentz, *Theory of electrons*, [A course in Columbia University, N.Y. \(1906\) p.80](#)

<sup>64</sup> T. Suntola, *Photon - the minimum dose of electromagnetic radiation*, [Proceedings of SPIE Vol. 5866 \(2005\), p. 18](#)



*Valosähköinen ilmiö*

Heinrich Hertz oli vuonna 1887 havainnut, että ultraviolettivalo auttoi kipinöiden muodostumista elektrodien välille hänen sähkömagneettisten aaltojen demonstrointiin konstruoimissaan laitteissa. Vuonna 1889 J.J. Thomson tutki ultraviolettivalon vaikutusta katodisädeputkea edeltäneessä *Crookesin putkessa*. Tutkimuksissaan, jotka johtivat elektronin tunnistamiseen, Thomson havaitsi, että vastaavasti kuin Hertzin kokeissa, sähkövirta saatiin voimistumaan kohdistamalla ultraviolettivaloa elektroneja emittoivaan katodiin. Suorittaessaan kokeita elektroniputkilla 1900-luvun ensimmäisinä vuosina, saksalainen fyysikko Philipp Lenard havaitsi, että katodista emittoitujen elektronien pysäytysjännite oli riippuvainen emission synnyttämiseen käytetyn valon aallonpituudesta. Osoittautui, että valon intensiteetillä vaikutettiin emittoituvien elektronien määrään, ja valon aallonpituudella niiden emissiossa saamaan kineettiseen energiaan. Tulosta pidettiin yllättävänä eikä sille nähty yhteyttä Maxwellin teoriaan.

Albert Einstein omaksui Planckin yhtälön fysiikan perusyhtälöksi selittäessään fluoresenssia ja Philip Lenardin havaintoja elektronien emissioista vuonna 1905 julkaisussa artikkelissa *On a Heuristic Viewpoint Concerning the Production and Transformation of Light*<sup>65</sup>. Artikkelissaan Einstein toteaa, että *havainnot, jotka liittyvät mustan kappaleen säteilyyn, fluoresenssiin, katodisäteen tuottamiseen ultraviolettivalolla sekä muihin vastaaviin valoa tuottaviin tai muuntaviin ilmiöihin, ovat paremmin ymmärrettävissä, jos oletamme, että valon energia ei ole tasaisesti jakautunut avaruuteen, vaan että se muodostuu äärellisestä määrästä lokalisoituneita energiakvantteja. Sen sijaan, että emitteri lähettäisi tasaisesti avaruuteen jakautuneen aallon, se lähettäisi satunnaisiin suuntiin jakautuneita energiakvantteja, joka etenisivät muotonsa säilyttäen, ja jotka emittoituisivat ja absorboituisivat vain kokonaisina.*

Einstein esitti, että valon energiakvantit tunkeutuvat katodiin, jolloin niiden energia ainakin osittain välittyy emittoitujen elektronien kineettiseen energiaan. Jos oletetaan, että säteilykvantin energia siirtyy kokonaan elektronin kineettiseen energiaan, siitä kuluu osa elektronin törmäykseen sen edessä katodin pintaan. Lisäksi on oletettava, että elektronin irrottamiseen katodin pinnasta tarvitaan katodimateriaalille ominainen työ. Loput kineettisestä energiasta on mittavissa emittoituneista elektroneista. Ennuste vastasi ainakin suuruusluokaltaan Lenardin tuloksia. Myöhemmät kokeet osoittivat sen kuvaavan tarkoin valosähköisen emission ominaisuuksia – lisäksi sen avulla voitiin valosähköisistä mittauksista määrätä Planckin vakion arvo ja käytetylle katodimateriaalille ominainen irrotustyö.

Vaikka valosähköistä ilmiötä kuvaava yhtälö sai yleisen hyväksynnän, Einsteinin postulaattiin valokvantista suhtauduttiin epäillen, sillä sähkömagneettisten aaltojen teoriaa ja valon aaltoluonnetta pidettiin todistettuna. Einsteinin kvanttitulkinna katsottiin saaneen tukea Arthur Comptonin vuonna 1922 suorittamista röntgensäteiden sirontakokeista, joissa röntgensäteiden havaittiin luovuttaneen vapaille elektroneille energiaa suhteessa sirontakulmaan. Energiakvantin ja fotonin tarkempi kuvaus jäi odottamaan atomimallin ja sen mukanaan tuoman kvanttimekaniikan kehittymistä, jolloin sähkömagneettisen aallon partikkeliluonne kohtasi partikkelien ja atomirakenteiden aaltoluonteen.

<sup>65</sup> A. Einstein, Ann. Phys. 17, 132 (1905) <https://en.wikisource.org/?curid=59468>

### *Atomin kuvaaminen*

Ajatus aineen rakentumisesta jakamattomista rakenneosista periytyi antiikin ajatteloilta. Galileo Galilei omaksui Demokritoon ja Epikuroon atomiopin ja oletti, että sekä atomit että niistä muodostuneet kappaleet noudattavat samoja mekaniikan lakeja. Ensimmäiset kvantitatiiviset viitteet atomeista ja molekyyleistä saatiin 1700-luvun lopulla ranskalaisen kemistin Antoine Lavoisierin havainnoista, joiden perusteella hän muotoili massan säilymisen ja painosuhteiden lait<sup>66, 67</sup>. Jälkimmäisen perusteella kemiallinen yhdiste sisältää alkuaineitaan aina samassa suhteessa. Vuonna 1800 englantilainen kemisti ja fyysikko John Dalton esitti atomiteorian, joka perustui viiteen postulaattiin:

- 1) Alkuaineet muodostuvat äärimmäisen pienistä partikkeleista, joita kutsumme atomeiksi.
- 2) Määrätyn alkuaineen atomit ovat keskenään identtisiä koon, massan ja muiden ominaisuuksien suhteen.
- 3) Atomeita ei voi jakaa, luoda tai hävittää.
- 4) Yhdisteitä muodostaessaan eri alkuaineiden atomit yhtyvät yksinkertaisissa kokonaislukujen suhteissa.
- 5) Atomit yhdistyvät, eroavat ja uudelleenjärjestyvät kemiallisissa reaktioissa.

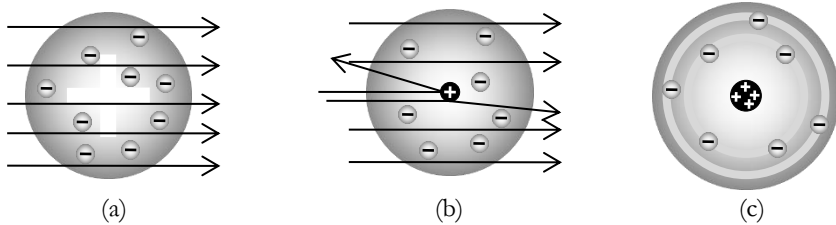
Dalton ei kyennyt alkuaineiden suhteista päättämään alkuaineiden kaksiatomisia molekyyliä. Yksi- ja kaksiatomisten alkuainemolekyylien olemassaolon päätteli vuonna 1811 italialainen fyysikko ja matemaatikko Amedeo Avogadro, joka parhaiten tunnetaan hänen mukaansa nimetystä *Avogadron vakioista*, joka määrittelee moolissa olevien molekyylien lukumäärän.

Ensimmäisen arvion Avogadron vakion lukuarvolle arvioi itävaltalainen fyysikko ja kemisti Johann Loschmidt vuonna 1865. Avogadron vakion tarkan arvon määrittäminen tuli mahdolliseksi vasta kun amerikkalainen kokeellinen fyysikko Robert Millikan oli vuonna 1910 onnistunut mittaamaan elektronin varauksen. Michael Faraday oli elektrolyysitutkimuksissaan määritellyt sähkövarauksen, joka tarvittiin moolin ainemäärän siirtoon. Jakamalla moolin siirtoon tarvittava varaus elektronin varauksella saatiin Avogadron vakio. Sen, että mooliin suhteutuva varaus viestittää atomiin sidotusta alkeisvarauksesta, oli oivaltanut irlantilainen fyysikko George Stoney 1870-luvulla.

Kemistien keskuudessa atomioppi oli vakiintunut Daltonin teorian pohjalta. Valtaosa fyysikoista vielä 1870-luvulla kuitenkin uskoi jatkuvaluonteiseen aineeseen, vaikka Ludvig Boltzmann tuolloin jo kehitti atomeihin perustuvaa tilastollista termodynamiikkaa. Sähkömagnetismin syvällisempi ymmärrys 1800-luvun lopulla avasi uusia mahdollisuuksia atomin ja sen sisäisen rakenteen hahmottamiselle. Maxwellin yhtälöiden tuoma ajatus eetteristä synnytti ajatuksia atomin kuvaamiseen eetterin avulla; Joseph Larmor oletti elektronin eetterin singulariteetiksi ja atomin elektronien kasautumaksi.

<sup>66</sup> *Traité élémentaire de chimie (Elementary Treatise on Chemistry)* (1789)

<sup>67</sup> M. Lavoisier, *Essays, Physical and Chemical*, [English translation by Thomas Henry \(1776\)](#)



Kuva 1-25. (a,b) Geiger-Marsden koe, jonka perusteella Rutherford päätteli atomin massan keskittyneen pieneen ytimeen. Ohutta kultafoliota pommitettiin  $\alpha$ -partikkeleilla (heliumatomin ytimillä). Takaisinsironnan selittämiseksi Rutherford oletti, että pommittavien hiukkasien pitää osua raskaisiin positiivisesti varautuneisiin partikkeleihin kultakalvossa. Havainnot selittyivät, kun kulta-atomien massan ja positiivisen varauksen oletettiin keskittyvän pieneen ytimeen. c) Rutherfordin atomimalli, jossa aurinkokunnan tapaan kevyet elektronit ympäröivät raskasta ydintä. Rutherford ei kuitenkaan määritellyt elektronien sijaintia tai ratoja, vaikkakin viittaa Nagaogan teoriaan Saturnuksen renkaita muistuttavista elektroniradoista.

1890-luvulla tekemiensä kokeiden perusteella J.J. Thomson päätteli, että elektroni on atomin rakenneosa, ja että sen koko on vain pieni osa molekyylin tai atomin koosta. Elektronin massan Thomson arvioi olevan noin  $1/1800$  vetyatomin massasta. Thomson ajatteli, että elektronit olivat jakautuneet positiivisesti varautuneen atomiaineen sisään. Positiivisesti varatun atomin osan, protonin, löysi Wilhelm Wien ionisoidun kaasun tutkimuksissaan vuonna 1898. Vasta Ernest Rutherfordin vuonna 1911 tekemä ”kultafoliokoe” osoitti, että atomin massa on keskittynyt pieneen positiivisesti varattuun ytimeen. Havainnon pohjalta Ernest Rutherford kehitti atomimallin, jossa positiivista ydintä kiertää negatiivisesti varautuneiden elektronien pilvi Saturnuksen renkaiden tapaan, kuva 1-25.

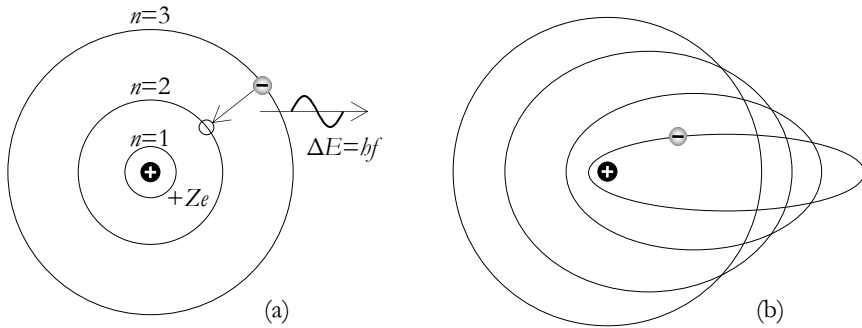
### *Bohrin atomimalli*

Ratkaisevan askeleen atomin kuvauksessa otti tanskalainen fyysikko Niels Bohr, joka atomimallissaan yhdisti Rutherfordin planeettamallin ja Planckin yhtälön klassisen mekaniikan lakeihin. Hänen vuonna 1913 esittämänsä vetyatomin malli perustui olettamukseen, että klassisilla planeettaradoilla ydintä kiertävien elektronien sallitut impulssimomentit ilmaistaan Planckin vakion ja sen monikertojen avulla. Bohr sallitut impulssimomentit tuottivat kullekin sallitulle radalle diskreetin energian<sup>68</sup>, ja ratojen väliset siirtymät niiden energiaerotuksena emission, joka Planckin yhtälöllä tulkituttuna antoi Rydbergin vuonna 1888 esittämän kaavan mukaisen emissiospektrin, kuva 1-26.

Spektrihavaintojen ohella tärkeä kokeellinen havainto atomimallin tueksi oli Robert Millikanin kokeellisesti määräämä elektronin varaus vuonna 1911. Saksalainen fyysikko Arnold Sommerfeld<sup>69</sup> yleistä Bohrin atomimallia taivaanmekaniikan antaman esimerkin mukaisesti lisäämällä elliptisiä elektroniratoja. Sommerfeldin malli tuotti

<sup>68</sup> Niels Bohr, *On the quantum theory of line-spectra* (1918), [openlibrary.org](https://openlibrary.org)

<sup>69</sup> Arnold Sommerfeld, *Atombau und Spektrallinien* (1921), [openlibrary.org](https://openlibrary.org)



Kuva 1-26. (a) Bohrin vetyatomimalli merkitsi läpimurtoa atomin kuvaamisessa. Kvanttiehdon soveltaminen klassiseen elektronin rataan antoi sallituille elektroniradoille energiat, joiden erotukset selittivät Rydbergin vuonna 1888 esittämän kokeellisen kaavan mukaisen emissiospektrin. (b) Sommerfeld täydensi Bohrin mallia sallimalla ellipsiratoja taivaanmekaniikan tapaan<sup>2</sup>. Sommerfeldin malli ennusti oikeita hienorakennetiloja, joskin palloharmonisiin ratkaisuihin perustuvat kvanttimekaniikan mallit syrjäyttivät Sommerfeldin mallin

hienorakennetilojen energiat, jotka täsmäsivät myöhemmin palloharmonisten värähtelymoodien tuottamien tilojen kanssa. Matemaattisesti tulos on mielenkiintoinen, sillä ellipsirataan liittyvät harmoniset aallot ovat kuvattavissa ympyräradan ja ympyräradan kiertoaikaan synkronoidun säteen suuntaisen harmonisen värähtelyn summana, mikä vastaa palloharmonisten ratkaisujen rakennetta.

Vaikka Bohrin ajatus Planckin yhtälön soveltamisesta perustui ensisijaisesti klassisen elektronin impulssimomenttiin, mahdollisti Bohrin ratkaisu elektronin liikemäärän kuvaamisen valon nopeudella kiertoradalla etenevänä aaltona, jonka aaltoluku oli radan pituuden monikerta, ja liikemäärä yhtä suuri kuin Bohrin laskeman klassisen elektronin liikemäärä. Impulssimomentin kvanttuminen voitiin siis tulkita myös ”elektroniaallon” resonanssiehdoksi sallituilla kiertoradoilla.

### *de Broglie- ja Compton aallonpituudet*

Resonanssitulkinta osoittautui tärkeäksi kehityksessä kohti kvanttimekaniikkaa. Ranskalainen fyysikko Louis de Broglie esitti väitöskirjassaan vuonna 1924 yleistyksen massaobjektin aaltokuvaukselle, jossa objektin liikemäärä tulkittiin Planckin yhtälöstä saatavaksi säteilyn tai massa-aallon liikemääräksi

$$\mathbf{p}_\lambda = \frac{h}{\lambda_{dB}} \hat{\mathbf{r}} = \frac{mv}{\sqrt{1-(v/c)^2}} \hat{\mathbf{r}} \quad ; \quad \lambda_{dB} = \frac{h}{p} \quad (1.22)$$

Aaltotulkinnan mukaan massa-aallon liikemäärä on Planckin vakio jaettuna *de Broglie aallonpituudella*, mikä merkitsee, että massa-aallon ajatellaan etenevän valon nopeudella kuten sähkömagneettinen säteily. de Broglie katsoi, että massapartikkeli on lokalisoitu objekti, joka ylläpitää sisäistä värähtelyä kuten elektronin massa-aallon suljetulla radallaan atomissa voidaan tulkita tekevän. Hän ei mieltänyt yleistystä, jonka mukaan massa-aalto etenisi vapaan partikkelin nopeudesta riippumatta, kuten

yleistetty aaltomekaaninen tulkinta edellytti. de Broglien tulkintaa kehitti edelleen amerikkalainen fyysikko David Bohm.

Jo vuotta ennen de Broglien aaltohypoteesia, vuonna 1923, Arthur Compton oli havainnut, että elektroneista siroavien röntgensäteiden aallonpituus kasvaa siroamiskulman kasvaessa. Compton selitti ilmiön säteilyn elektronille luovuttamalla liikemäärällä – törmäyksen ei-elastista luonnetta hän perusteli Albert Einsteinin vuonna 1905 valosähköisen ilmiön selittämiseksi postuloimalla säteilyn hiukkasluonteella, ts. Compton oletti säteilyn muodostuvan fotoneista, joiden massan hän ratkaisi yhdistämällä Einsteinin lepoenergian lausekkeen ja Planckin yhtälön,

$$m = \frac{E}{c^2} = \frac{hf}{c^2} = \frac{h/c}{\lambda_C} \quad (1.23)$$

Objektin lepomassan ilmaisu massa-aaltona tuotti Compton-aallonpituuden käsitteen

$$\lambda_C = \frac{h/c}{m} \quad (1.24)$$

Compton-sironnan tulkintaa pidettiin todisteena Einsteinin tulkinnalle fotoneista lokalisoituneina, partikkelin kaltaisina objekteina. Fotonin luovuttama diskreetti liikemäärä tulkittiin fotonin ominaisuudeksi, ei törmäystapahtumaan tai vastaanottavaan elektroniin liittyväksi ominaisuudeksi.

Planckin yhtälön ”antennitulkinta”  $E_0 = h_0 c \cdot f = \frac{h_0}{\lambda} c^2 = m_\lambda c^2$  johtaa suoraan Comptonin esittämään massan ja aallonpituuden väliseen yhteyteen. Tämä merkitsee, että ”kvantittuminen” on antennin, eli emitterin ja absorbaattorin ominaisuus. Antenniteoriasta tunnettua antennin sieppauspinta-alaa soveltaen, selittyy Comptonin sirontakoe samoin kuin valosähköinen ilmiö ilman Einsteinin oletamaa lokalisoitunutta säteilykvanttia.

### *Aaltofunktio*

Planckin yhtälö, valosähköisen ilmiön selityksessä (Einstein) oletettu säteilyn hiukkasluonne, partikkelin liikemäärän ja lepoenergian aaltoekvivalentit (de Broglie, Compton) sekä seisovaan aaltoon perustuva Bohrin vetyatomimallin tulkinta antoivat virikkeen partikkelien ja atomirakenteiden yleiselle aaltokuvaukselle. Partikkelin aaltokuvaus merkitsi hypoteesia aalto – partikkeli dualismista: havaintojen selittämiseksi oli oletettava, että massaobjektilla on sekä partikkeli- että aalto-ominaisuuksia – vastaavasti kuin säteilyn hiukkasluonne Compton-sironnan tulkinnassa merkitsi dualistista luonnetta aaltoliikkeenä pidetylle sähkömagneettiselle säteilylle.

Aaltofunktiokuvaus lähtee klassisen massapisteen kuvaamisesta. Partikkelin piste-mäisyyden hävittää Werner Heisenbergin vuonna 1927 esittämä epämääräisyysperiaate, jonka mukaan partikkelin määrättyjä ominaisuuksia voidaan havaita vain rajallisella tarkkuudella. Tällaisia ominaisuuspareja ovat partikkelin sijainti ja liikemäärää, ja vastaavasti energia ja aikadifferenssi. Implisiittisesti Heisenbergin epämääräisyys-

periaate määrittelee Planckin vakion *vaikutuskvantiksi*, joka kuvataan liikemäärän muutoksen ja etäisyysdifferenssin tai energiadifferenssin ja aikadifferenssin tulona.

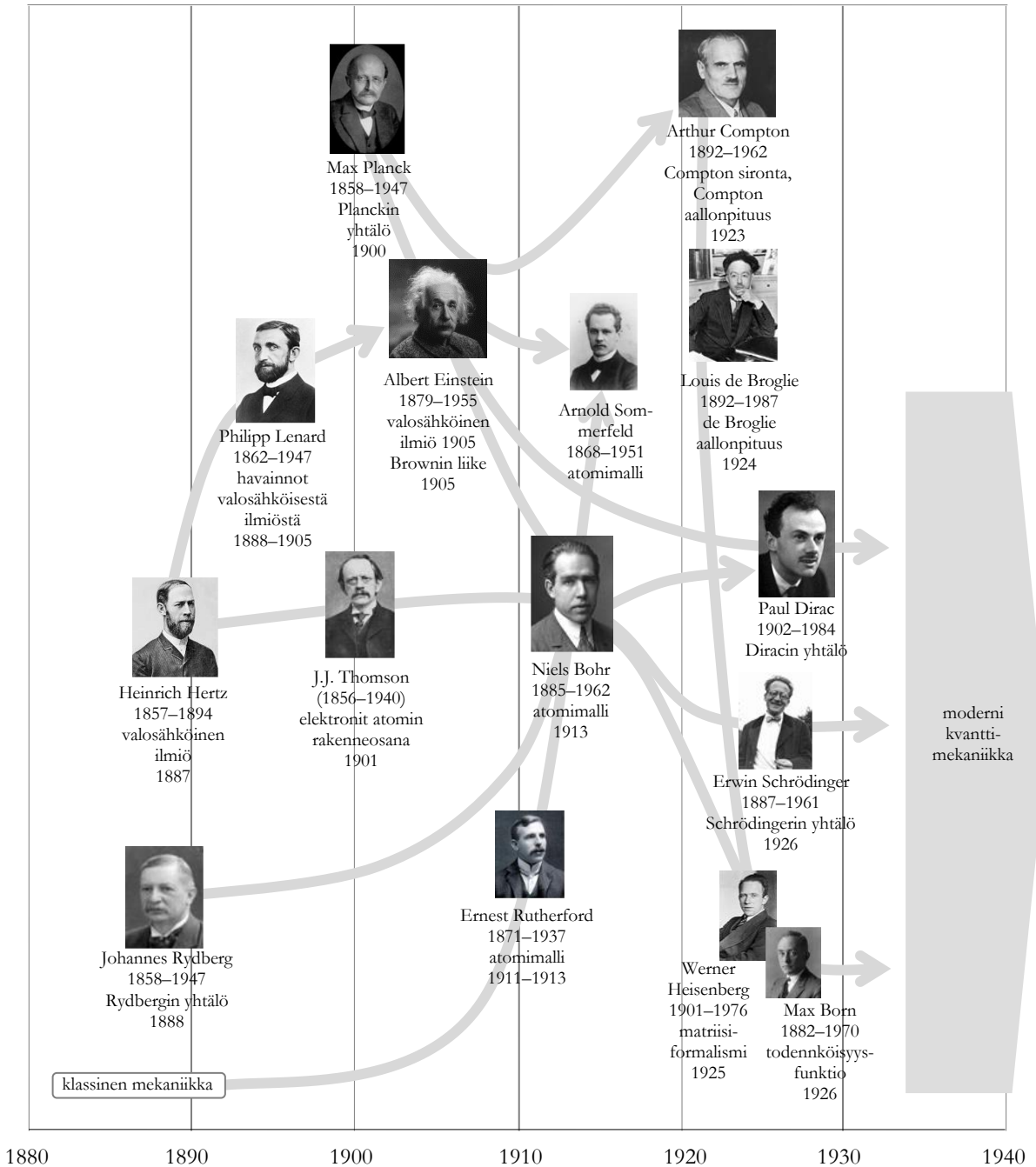
Kvanttimekaniikan tilafunktio on luonteeltaan ei-lokaali, se voi ilmetä missä tahansa avaruudessa, milloin tahansa. Lokalisaatio kuvautuu siten, että tilafunktio häviää (lähestyy nollaa) kaikkialla, paitsi määrätyllä hetkellä määrättyssä avaruuden kohdassa, jossa se kuvautuu aaltopakettina. Todennäköisyys partikkelin löytymisestä ajanhetkellä  $t$  kohdassa  $x, y, z$  ilmaistaan tilafunktion  $\psi(x, y, z, t)$  neliöllä.

Tilafunktion yleisimmin käytetty muoto saadaan itävaltalaisen fyysikon Erwin Schrödingerin vuonna 1925 muotoilemasta *Schrödingerin yhtälöstä*, joka määrittelee kuvattavaan systeemiin liittyvän tilafunktion aaltoyhtälöllä, jonka toteutuminen sisältää implisiittisesti ehdon Newtonin liikeyhtälön toteutumisesta, ja stationarisessa systeemissä ehdon tilafunktiota kuvaavan aallon resonanssista reunaehtoien määrittelemässä tilassa.

Schrödingerin yhtälöön perustuva kvanttimekaniikka osoittautui voimalliseksi menetelmäksi mm. atomien, molekyylien ja kiinteän olomuodon rakenteiden ominaisuuksien kuvaamiseen. Kuvassa 1-27 on hahmoteltu kvanttimekaniikkaan johtanutta kehitystä.

Newtonin liikeyhtälöön sitoutuessaan Schrödingerin yhtälö ei toteuta suhteellisuusteorialla korjattuja liikeyhtälöitä. Suppean suhteellisuusteorian huomioivat aaltoyhtälöt johtivat ruotsalainen fyysikko Oskar Klein ja saksalainen fyysikko Walter Gordon vuonna 1927 ja englantilainen fyysikko Paul Dirac vuonna 1928. Klein-Gordonin ja Diracin yhtälöissä derivaatat paikan ja ajan suhteen ovat keskenään symmetriset kuten esim. Maxwellin yhtälöistä johdetuissa sähkömagneettista säteilyä kuvaavissa aaltoyhtälöissä. Niissä toteutuu suppean suhteellisuusteorian mukainen liikemäärä ja lepoenergian ja kineettisen energian summan muodostama kokonaisenergia.

Sähköisesti varattujen hiukkasten välisiä vuorovaikutuksia kuvaamaan on kehitetty kvanttisähködynamikka (QED, Quantum electrodynamics). Kvanttisähködynamikassa sähkömagneettista säteilyä kuvataan partikkeliluonteisina fotoneina, jotka toimivat välittäjinä varattujen partikkelien vuorovaikutuksissa. Vuorovaikutuksia kuvataan Richard Feynmanin kehittämällä *Feynmanin diagrammeilla*. Kvanttisähködynamikan periaatteista johdettu mittakentäteoria (gauge theory) on tuottanut hiukkasfyysiikan standardimallin, jolla voidaan laajasti kuvata alkeishiukkasten vuorovaikutuksia.



Kuva 1-27. Planckin yhtälöstä, valosähköisestä ilmiöstä ja atomimallista kvanttimekaniikkaan. Albert Einstein onnistui valosähköisen ilmiön selityksessään yhdistämään Planckin yhtälön mahdollisen tulkinnan Philipp Lenardin koetuloksiin. Compton-sironta tulkittiin Einsteinin ratkaisun todisteeksi, mikä yhdessä Bohrin atomimallin kanssa käynnisti varsinaisen kvanttimekaniikan kehityksen.

## Suppeasta yleiseen suhteellisuusteoriaan ja kosmologiaan

Einstein perusti suhteellisuusteorian yleistämisen ekvivalenssiperiaatteeseen, joka klassisessa mekaniikassa yhdisti gravitaatiokiihtyvyyden ja inertiaalikiihtyvyyden tai gravitaatiovoiman ja hitausvoiman.

Gravitaation ja liikkeen yhdistäminen edellytti suppean suhteellisuusteorian laajentamista kiihtyvässä liikkeessä oleviin objekteihin. Yleisen suhteellisuusteorian perusteet hahmottuivat Einsteinille jo pari vuotta suppean suhteellisuusteorian julkaisun jälkeen hänen pohtiessaan vapaan pudotuksen synnyttämää kiihtyvyyttä ja nopeutta suppean suhteellisuusteorian kuvaaman epälineaarisuuden valossa.

Ekvivalenssiperiaatteen mukaan vakiogravitaatiotilassa tapahtuvassa kiihdytyksessä havaittava liikemassan kasvu tapahtuu myös vapaassa pudotuksessa gravitaatiokentässä syntyvässä kiihtyvyydessä. Kattavan matematiikan muotoilu vei kuitenkin lähes kymmenen vuotta ja yleinen suhteellisuusteoria julkaistiin vuonna 1916.

Yleinen suhteellisuusteoria ei anna vastausta gravitaation alkuperään, mitä ei myöskään tehnyt Newtonin teoria, jossa gravitaatio kuvautuu massan kaukovaikutuksena. Yleisessä suhteellisuusteoriassa gravitaation vaikutus kuvautuu aika-avaruuden geometrian kautta. Aika-avaruuden geometria puolestaan määräytyy massajakautumaan avaruudessa, mikä kytkee yleisen suhteellisuusteorian gravitaation newtonilaiseen gravitaatioon.

Paikallisteorialuonteesta johtuen yleinen suhteellisuusteoria ei anna vastausta gravitaatioenergian kokonaisuudesta eikä sen säilymisestä avaruudessa. Paikallista liikemäärän ja energian säilymistä yleisen suhteellisuusteorian avaruudessa kuvaa voima-energia-momentti pseudotensorin säilyminen. Yksinkertaistettuna se tarkoittaa liikemäärän ja energian säilymistä, kun huomioidaan muutos, joka objektin liikemäärään ja kokonaisenergian aiheutuu voimakentästä, jossa objekti liikkuu. Avaruuden geometria on johdettu avaruuden massatiheydestä. Yksittäisen massakeskuksen ympäristössä yleisen suhteellisuusteorian todellisuus merkitsee aika-avaruuden painautumaa, mikä hidastaa aikaa ja pidentää etäisyyksiä massakeskusta lähestyttäessä suhteessa aikaan ja etäisyyksiin avaruudessa kaukana massakeskuksesta.

Yleinen suhteellisuusteoria ja erityisesti Albert Einstein henkilöä sai runsaasti huomiota ja julkista arvostusta, kun vuoden 1919 auringonpimennyksestä saadut mitaustulokset puolsivat suhteellisuusteorian ennustamaa valon taipumaa auringon gravitaatiokentässä. Toinen merkittävä saavutus menestyksen takana oli tarkennus Merkuriuksen radan perihelisiirtymään. Kuten ranskalainen astronomi Urbain Le Verrier oli jo vuonna 1859 Newtonin gravitaatioon ja Keplerin taivaanmekaniikkaan perustuen osoittanut, Merkuriuksen radan pääakseli kiertyy muiden planeettojen gravitaation vaikutuksesta noin 5557 kaarisekuntia sadassa vuodessa. Mitattu kiertymä oli kuitenkin noin 5600 kaarisekuntia, joten puuttuvat 43 kaarisekuntia olivat olleet vailla selitystä. Yleisen suhteellisuusteorian ennustama, avaruuden kaareutumisesta johdettu kiertymä on jokseenkin tarkalleen 43 sekuntia, joten lisätynä muiden planeettojen aiheuttamaan kiertymään se selitti havaitun 5600 kaarisekunnin kiertymän.



Einstein julkaisi yleisen suhteellisuusteoriaansa vuonna 1916 *Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie*<sup>70</sup>. Vuonna 1917 julkaisemassaan artikkelissa *Kosmologische Betrachtungen zur allgemeinen Relativitätstheorie*<sup>71</sup>, hän pohtii yleisen suhteellisuusteorian mukaista kosmologiaa ja esittää pallosymmetrisesti, neljännen ulottuvuuden kautta suljettua avaruutta. Einstein etsi staattista ratkaisua, minkä vuoksi hän joutui lisäämään kenttäyhtälöihin kosmologiavakion, joka estää suljetun avaruuden luhistumisen gravitaation vaikutuksesta.

Heti suhteellisuusteorian julkistuksen jälkeen hollantilainen astronomi ja matemaatikko Willem de Sitter analysoi laajalti teoriaa ja siitä tehtäviä astronomisia ja kosmologisia päätelmiä *On Einstein's Theory of Gravitation, and its Astronomical Consequences*<sup>72,73</sup> (*Einsteinin Gravitaatioteoriasta ja sen Astronomisista Seurauksista*) ja johtaa mm. ennusteen valon taipumiselle massakeskuksen läheisyydessä. de Sitter kommentoi myös Einsteinin vuonna 1917 esittämää pallosymmetrisesti suljettua avaruutta ja lisää omana ehdotuksenaan elliptisesti suljetun avaruuden mahdollisuuden<sup>74</sup>. de Sitterin arvio suljetun avaruuden säteestä oli 1.5 – 800 miljoonaa valovuotta, missä hänen arvioimansa yläraja on noin 1/200 nykyisestä Hubblen säteen arvioidusta arvosta. de Sitterin avaruudessa oli näkyvän massan ohella havaitsematonta ”maailman massaa” varmistamassa avaruuden massan homogeenisuuden kosmologisilla etäisyyksillä. de Sitter kehitti myös ”tyhjän avaruuden” mallin, jossa tarvittiin kosmologiavakio mutta ei maailmanmassaa. de Sitterin avaruudessa massaobjektit loittonivat toisistaan. Loittonemista hän perusteli jo tuolloin tunnetulla heliumtähtien systemaattisella punasiirtymällä, mikä etääntymisenä vastasi suunnilleen nopeutta 4,5 km/s. Hän viittaa myös William Campbellin löytämään systemaattiseen punasiirtymään K-tähdissä. Einstein piti tyhjän avaruuden mallia epätodellisena ja arvostamansa Machin periaatteen vastaisena.

Jo ennen Einsteinin *Annalen der Physik*-julkaisua saksalainen fyysikko Karl Schwarzschild oli löytänyt kenttäyhtälöihin tarkan ratkaisun yksittäisen massakeskuksen ympäristössä. Schwarzschild oli lähettänyt ratkaisunsa Einsteinille vuoden 1915 lopussa. Ratkaisu sisälsi ennusteen mustasta aukosta, jollainen voi syntyä suuren paikallisen massakeskittymän yhteyteen. *Schwarzschildin säde* määrittelee mustan aukon kriittisen säteen, kuva 1-28.

Ensimmäisen yleisen, sekä stationaarisen että ei-stationaarisen vaihtoehdon sisältävän ratkaisun suhteellisuusteorian kenttäyhtälöille esitti venäläinen fyysikko ja matemaatikko Alexander Friedmann, *Über die Krümmung des Raumes*<sup>75</sup> (*Avaruuden Kaareutumisesta*). Artikkelissaan hän toteaa, että stationaarinen ratkaisu on mahdollinen vain kahdessa tapauksessa, jotka Einstein ja de Sitter ovat jo analysoineet. Muuttuvan universumin vaihtoehtoja on useita; ”... sellaisia, joissa avaruuden kaarevuussäde kasvaa jatkuvasti, ja sellaisia, joissa kaarevuussäde muuttuu jaksollisesti... ”<sup>76</sup>.

<sup>70</sup> A. Einstein, *Annalen der Physik* 354 (7), 769-822 (1916) [wikisource.org](https://en.wikisource.org/wiki/Annalen_der_Physik_354_(7)_769-822_(1916))

<sup>71</sup> A. Einstein, <http://echo.mpiwg-berlin.mpg.de/ECHOdocuView?url=/permanent/echo/einstein/sitzungsberichte/S250UZ0K/index.meta&pn=2> (1917)

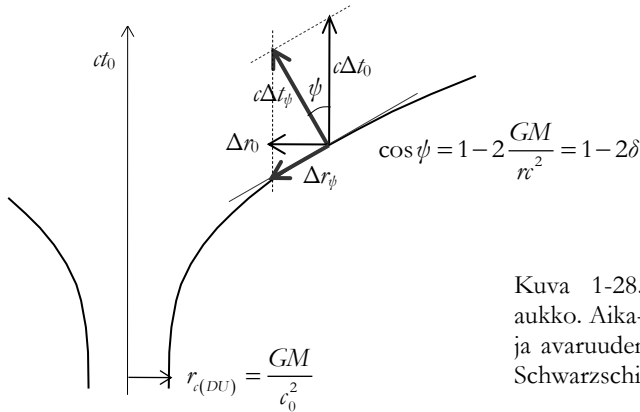
<sup>72</sup> W. de Sitter, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 76, 699–728 (1916)

<sup>73</sup> W. de Sitter, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 77, 155–184 (1916)

<sup>74</sup> W. de Sitter, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 78, 3–28 (1917)

<sup>75</sup> Alexander Friedmann, <http://publikationen.uni-frankfurt.de/frontdoor/index/index/docId/16735>, [English translation](http://www.history.mcs.st-and.ac.uk/Biographies/Friedmann.html)

<sup>76</sup> <http://www-history.mcs.st-and.ac.uk/Biographies/Friedmann.html>



Kuva 1-28. Schwarzschildin musta aukko. Aika-avaruuden taipuma ja ajan ja avaruuden suuntaiset viivelementit Schwarzschildin avaruudessa.

Einsteinin ensireaktio Friedmannin ratkaisuun oli torjuva. Hän lähetti vastineen, joka julkaistiin kolmen kuukauden kuluttua Friedmannin artikkelin sisältäneestä *Zeitschrift für Physik* numerosta. Vastineessaan Einstein toteaa, että "... Tulokset, jotka liittyvät ei-stationaariseen avaruuteen Friedmannin työssä, ovat mielestäni epäuskottavia. Itse asiassa osoittautuu, että ratkaisu ei totenta kenttäyhtälöitä..."

Tämän jälkeen Friedmann lähetti yksityiskohtaisen ratkaisunsa Einsteinille arvioitavaksi pyytäen samalla, että jos hän toteaa laskut oikeiksi, hän informoisi asiasta *Zeitschrift für Physik* lehden toimittajia. Huomattavien viiveiden jälkeen Einstein lähetti korjauksen *Zeitschrift für Physik* lehteen: "... kritiikkini Friedmannin työhön perustui virheeseen laskelmissani. Katson, että Mr. Friedmannin tulokset ovat oikein ja toivat lisävalaistusta."

Laajenevan avaruuden vaihtoehto sai lisätukea Louvainin yliopiston fysiikan professorina toimineen belgialaisen papin ja astronomin, Georges Lemaîtren vuonna 1927 julkaistussa artikkelissa *Un Univers homogène de masse constante et de rayon croissant rendant compte de la vitesse radiale des nébuleuses extra-galactiques*<sup>77</sup> (*Vakiomassan omaava homogeeninen Universumi, jossa galaksientakaisilla kaasusumuilla on radiaalinen nopeus*) ja *The expanding Universe*<sup>78</sup> vuodelta 1931.

Lemaître puolusti teoriaansa ja pohti avaruuden laajenemisen käynnistymistä "alkuatomista" artikkelissaan *The Beginning of the World from the Point of View of Quantum Theory*<sup>79</sup> (Maailman alku kvanttiteorian kannalta), *Nature*ssa vuonna 1931: "Jos maailma on alkanut yksittäisestä kvantista, ajalla ja etäisyyksillä ei alussa ole ollut merkitystä; niillä on alkanut olla merkitystä vasta kun alkuperäinen kvantti on jakautunut riittävän moneksi kvantiksi. Jos tämä oletamus on oikein, maailman alku tapahtui hieman ennen ajan ja avaruuden syntyä."

Einstein, kuten myös useimmat ajan kosmologit olivat ilmeisen haluttomia hyväksymään ajatusta laajenevasta avaruudesta. Vaikeimmaksi hyväksyä näytti muodostuvan Lemaîtren analyysin tulos, jonka mukaan avaruuden olemassaololle on ollut alkujankoha. Asenteiden muuttumista joudutti Edvin Hubblen vuonna 1929

<sup>77</sup> Georges Lemaître, *Annals of the Scientific Society of Brussels*, 47, 49–59 (1927)

<sup>78</sup> Georges Lemaître, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 91,490–501 (1931)

<sup>79</sup> Georges Lemaître, *Nature*, Volume 127, Issue 3210, pp. 706 (1931)

julkaisemat lisätodisteet laajenevan avaruuden puolesta. Einstein suhteellisuusteoriaa vahvasti tukenut englantilainen astrofyysikko Arthur Eddington kuvasi Lemaîtren laajenevan avaruuden mallia vuonna 1930 *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*ssa julkaistussa artikkelissa *On the instability of Einstein's spherical world*<sup>80</sup> (*Einsteinin pallomaisen avaruuden epästabiilisuudesta*) ”Lemaîtren loistavaksi ratkaisuksi”.

Artikkelissaan *On the magnitudes, diameters and distances of the extragalactic nebulae, and their apparent radial velocities*<sup>81</sup> (Ekstragalaktisten kaasusumujen magnitudista, halkaisijoista ja etäisyyksistä ja näennäisistä radiaalisista nopeuksista), de Sitter tarkasteli lähinnä Hubblen havaintojen pohjalta kohteiden magnitudista ja kulmakoosta arvioitujen etäisyyksien ja punasiirtymästä arvioitujen etäännyttämisnopeuksien suhteita. Laajenemisnopeudesta hän arvioi avaruuden kaarevuussäteen (Hubblen säteen) arvoksi noin 200 miljoonaa valovuotta. Artikkelin lopussa hän toteaa saaneensa Lemaîtren vuoden 1927 artikkelin käsiinsä vain muutamaa viikkoa ennen nykyisen artikkelinsa valmistumista. Ylimalkaisen laskelman pohjalta hän toteaa Lemaîtren teorian johtavan samaa suuruusluokkaa oleviin kaarevuussäteen arvoihin käytetystä havaintomateriaalista arvioiden. Samalla hän päätelee, että Einsteinin staattinen malli ei vastaa hänen käsittelemäänsä havaintoja.

Artikkelissaan *On the Energy and Entropy of Einstein's Closed Universe (1928)*<sup>82</sup>, Richard Tolman tarkastelee yleisen suhteellisuusteorian mukaista avaruutta termodynamiikan käsittein. Päättelmä on, että entropia homogeenisen aineen täyttämässä avaruudessa kasvaa ajan mukana. Artikkelissaan *On the Astronomical Implications of the de Sitter Line Element for the Universe (1929)*<sup>83</sup> hän tarkastelee de Sitterin ”tyhjän avaruuden” viivalementtiä ja päätelee, ettei se tarjoa selitystä nykyisen käsityksen mukaisille jakautumille, etäisyyksille ja Doppler-siirtymille, joita kaukaisista kohteista on havaittu.

Artikkelissaan *The expanding universe. Discussion of Lemaître's solution of the equations of the inertial field (1930)*<sup>84</sup> de Sitter analysoi Lemaîtren laajenevaa avaruutta. Artikkelissaan *Do the galaxies expand with the universe (1931)*<sup>85</sup> de Sitter päätelee, että galaksit eivät laajene avaruuden laajetessa – päättelmä, josta syntyi konsensus 1930-luvulla muotoutuneessa FLRW (Friedmann–Lemaître–Robertson–Walker) kosmologiassa.

Artikkelissaan *”The size of the Universe (1932)*<sup>86</sup>” de Sitter tekee yhteenvedon senhetkisestä kosmologiakäsityksestä. Hän toteaa, että hänen ja Einsteinin mallit staattisesta, määrätyn massatiheyden omaavasta avaruudesta ja hänen oma laajeneva, tyhjän avaruuden mallinsa edustavat ääritapauksia, joiden väliltä kuvauksen avaruudesta voidaan olettaa löytyvän. Ratkaisun hän oletti löytyvän Lemaîtren teoriasta, joka mahdollistaa sekä äärellisen massatiheyden että laajenemisen.

Einstein joutui muiden kosmologioiden tavoin hyväksymään ajatuksen laajenevasta universumista. Vuonna 1932 hän julkaisi yhdessä de Sitterin kanssa *Einstein–de Sitter*

<sup>80</sup> A.S. Eddington, *MNRAS*, **90**, 668–678 (1930)

<sup>81</sup> W. de Sitter, *B.A.N.*, **5**, No.185, 157–171 (1930)

<sup>82</sup> R. Tolman, *Proc. N.A.S.*, **14**, 348–353 (1928)

<sup>83</sup> R. Tolman, *The Astrophysical Journal*, **69**, 245–274 (1929)

<sup>84</sup> W. de Sitter, *B.A.N.*, **5**, No.193, 211–218 (1930)

<sup>85</sup> W. de Sitter, *B.A.N.*, **6**, 223, p. 146 (1931)

<sup>86</sup> W. de Sitter, *PASP*, **44**, No.258, 89–104 (1932)

metriikan *On the Relation Between the Expansion and the Mean Density of the Universe*<sup>87</sup> (*Universumin Keskimääräisen Tiheyden ja Laajenemisen välisestä Suhteesta*). Einstein–de Sitter-malli palautuu Friedmannin ratkaisuun kriittisen massatiheyden tapauksessa avaruudessa, jossa kosmologiavakio on nolla. Einstein–de Sitter-avaruuden laajeneminen jatkuu äärettömyyteen hidastuvalla nopeudella laajenemisen tehdessä työtä gravitaatiota vastaan.

Artikkelissaan *On distance, magnitude, and related quantities in expanding universe* (1934)<sup>88</sup> (Etäisyydestä, magnitudista ja niihin liittyvistä suureista laajenevassa universumissa), de Sitter johtaa mm. lausekkeen ”astronomiselle” tai ”optiselle” etäisyydelle, joka toteutuu kohteen kulkemiseen havainnoinnissa. Magnitudin määrittämiseksi hän päättelee etäntymisnopeuden aiheuttaman Doppler-siirtymän ja Planckin yhtälön vaikutuksen kohteesta havaittavan valon tehotiheyteen. Tulkintanaan hän esittää, että säteilyn tehotiheys pienenee sekä säteilykvanttien saapumistiheyden että yksittäisen kvantin energian laimenemisen vuoksi. Samaan tulokseen päätyivät myös Tolman artikkelissaan *On the Estimation of Distances in a Curved Universe with a Non-Static Line Element* (1930)<sup>89</sup> (Etäisyyksien arvioinnista kaareutuneessa, ei-staattisen viivaelementin omaavassa avaruudessa), Hubble ja Humason artikkelissaan *The Velocity-Distance Relation among Extra-Galactic Nebulae* (1931)<sup>90</sup> (Galaksintakaisten Kaasusumujen Nopeuden ja Etäisyyden Suhteesta), ja H. P. Robertson artikkelissaan *The apparent luminosity of a receding nebula* (1938)<sup>91</sup>.

### *FLRW kosmologia*

1930-luvun fyysikot, matemaatikot ja astronomit olivat poikkeuksellisen haasteellisen tehtävän edessä joutuessaan yhdistämään suppean ja yleisen suhteellisuusteorian, Friedmannin ja Lemaîtren ratkaisut, Hubblen havainnot sekä Planckin yhtälön ja kehittymässä olevan kvanttimekaniikan välittämän matemaattisen ja fysikaalisen kuvan toimivaksi kosmologiamalliksi. Nykyinen kosmologiamalli, FLRW-malli, on nimetty Friedmannin, Lemaîtren lisäksi siihen 1930-luvulla huomattavan lisätyön tehneiden matemaatikkojen, Howard Robertsonin ja Arthur Walkerin mukaan.

Friedmannin ja Lemaîtren ratkaisut yleisestä suhteellisuusteoriasta mahdollistivat moninaisia vaihtoehtoja avaruuden geometrialle ja sen kehittymiselle; geometriakäsitettä toisaalta hämärsi suhteellisuusteorian tuoma ajan kytkeytyminen etäisyyksiin neljäntenä ulottuvuutena. Jotta rakennevaihtoehdoista löydettäisiin parhaiten todellisuutta vastaava vaihtoehto, oli kyettävä johtamaan yhteys avaruuden rakennetta kuvaavien suureiden ja havaintojen välittymisen välille. Kosmologisten havaintojen kuvaamiselle keskeistä oli etäisyyksien, havaintokulmien, kohteiden liikkeen ja niiden lähettämän valon välittymisen mallintaminen. Sekä havaintojen että teorian pohjalta oli tullut yhä ilmeisemmäksi, että avaruus laajenee ja että arviota avaruuden mittasuhteista jouduttiin tarkistamaan.

<sup>87</sup> A. Einstein, W. de Sitter, [PNAS 18, 213–214 \(1932\)](#)

<sup>88</sup> W. de Sitter, [B.A.N. 7, 205, No. 261 \(1934\)](#)

<sup>89</sup> R. Tolman, [PNAS 16, 511, 1930](#)

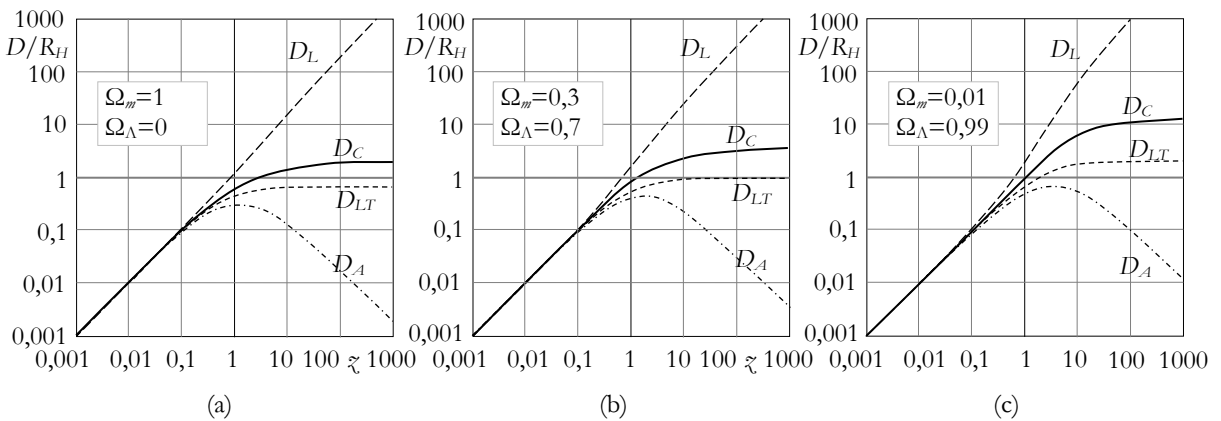
<sup>90</sup> E. Hubble, M. Humason, [Astrophys.J., 74, 43 \(1931\)](#)

<sup>91</sup> H.P. Robertson, [Zs.f.Ap., 15, 69 \(1938\)](#)

Laajenevassa avaruudessa etäisyyksien määrittely on haastava. FLRW-kosmologiassa kohteen etäisyydelle on useita määrittäjä, jotka kaikki riippuvat avaruudelle oletetusta massatiheydestä sekä mahdollisesta ”pimeästä energiasta”. *Mukana liikkuva etäisyys* tarkoittaa etäisyyttä, jossa kohde fyysisesti on havaintohetkellä. *Valon kulku-aika-etäisyys* tarkoittaa matkaa, jonka valo on kulkenut kohteesta havaintopaikalle. Valon kulku-aika-etäisyys on pienempi kuin *mukana liikkuva etäisyys*, sillä valon lähtiessä kohteesta etäisyys kohteeseen on ollut pienempi. Optisissa havainnoissa tärkeä *kulmakokoetäisyys* saadaan jakamalla *mukana liikkuva etäisyys* laajenemistekijällä  $(1+z)$ . Tämä tarkoittaa, että *kulmakokoetäisyys* pienenee suurilla punasiirtymän arvoilla. *Kirkkaus-etäisyydellä* tarkoitetaan etäisyyttä, jonka neliöön kääntäen verrannollisena kohteesta lähtevä valo himmenee. *Kirkkaus-etäisyys* on johdettu *mukana liikkuvasta etäisyydestä* olettaen, että punasiirtymästä johtuva säteilytehon pieneneminen on verrannollinen laajenemistekijän  $(1+z)$  toiseen potenssiin, kuva 1-29.

Avaruuden laajeneminen välittyy avaruudessa etenevän valon aallonpituuden kasvuun. FLRW-mallissa paikalliset gravitaatiojärjestelmät kuten galaksit, kvasaarit tai kaasusummut eivät laajene avaruuden laajetessa. Siten esim. galaksit ja planeettajärjestelmät säilyttävät kokonsa, mutta niiden väliset etäisyydet kasvavat avaruuden laajetessa.

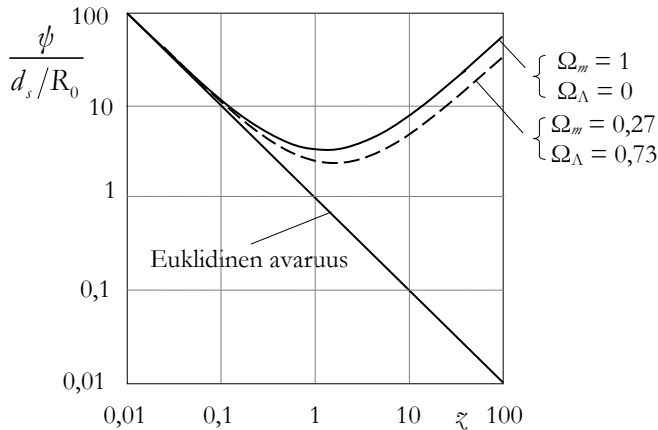
Vuonna 1930 Tolman johti lausekkeen kirkkaus-etäisyydelle ja kohteen pintakirkkaukselle punasiirtymän funktiona *On the Estimation of Distances in a Curved Universe with a*



Kuva 1-29. Keskeiset etäisyydämäärittäjät FLRW-avaruudessa kolmella eri massatiheyden ja pimeän energian tiheyden arvoilla. Kussakin tapauksessa on oletettu ”flat space” tilanne, jossa  $\Omega_m + \Omega_\Lambda = 1$ . *Mukana liikkuva etäisyys*  $D_C$ , mikä tarkoittaa kohteen fyysistä etäisyyttä havaintohetkellä, saadaan Friedmannin ratkaisusta yleisen suhteellisuusteorian kenttäyhtälöihin. *Valon kulku-aika-etäisyys*  $D_{LT}$  lähestyy periaatteessa avaruuden Hubblen säteen  $R_H$  arvoa suurilla punasiirtymän arvoilla, mikä suunnilleen toteutuu kuvan (b) tapauksessa, jossa massatiheydellä ja pimeällä energialla on niille nykyisin oletetut arvot  $\Omega_m = 0,3$  ja  $\Omega_\Lambda = 0,7$ . *Kulmakokoetäisyys*  $D_A$  saadaan jakamalla *mukana liikkuva etäisyys*  $D_C$  laajenemistekijällä  $(1+z)$ , mikä tarkoittaa, että  $D_A$  kuvaa kohteen fyysistä etäisyyttä valon lähtiessä kohti havaintopaikalle. *Kirkkaus-etäisyys*  $D_L$  saadaan kertomalla *mukana liikkuva etäisyys*  $D_C$  laajenemistekijällä  $(1+z)$ , mikä sisältää aallonpituuden kasvun aiheuttaman tehoitiheyden pienenemisen. Säteilyn tehoitiheyden on kääntäen verrannollinen kirkkaus-etäisyyden toiseen potenssiin.

*Non-Static Line Element*<sup>92</sup> (*Etäisyyksien arvioinnista kaarentuneessa, ei-staattisen viivaelementin omaavassa avaruudessa*). Tulos tunnetaan Tolmanin testinä laajenevalle avaruudelle; sen mukaan laajenevalle avaruudelle on tunnusomaista, että kohteen pintakirkkaus pienenee verrannollisena punasiirtymään tekijällä  $(1+z)^4$ . Tulos sisältää olettamuksen, että kohteen pinta-ala on riippumaton avaruuden laajenemisesta. Punasiirtymän vaikutuksen valon tehotiheyteen on oletettu johtuvan sekä hidastuneesta valokvanttien saapumisesta että Planckin yhtälön mukaisesta kvantin energian laimenemisestä; näin ollen pintakirkkauden laimenemistekijästä  $(1+z)^4$  osatekijä  $(1+z)^2$  selittyy punasiirtymän vaikutuksesta laajenevassa avaruudessa etenevän sähkömagneettisen säteilyn laimenemisestä ja toinen osatekijä  $(1+z)^2$  kohteen kulmakoon näennäisenä kasvusta, ts. kulmakokoetäisyyden pienenemisestä punasiirtymän kasvaessa. Optisesti FLRW-avaruus poikkeaa merkittävästi euklidisesta avaruudesta, jossa määrätyn suuruisten kohteiden kulmakoko (angular area) pienenee suhteessa etäisyyden neliöön, mikä punasiirtymällä ilmaistuna merkitsee vakio-pinta-alan omaavan kohteen kulmakoon pienenemistä tekijällä  $(1+z)^2$ .

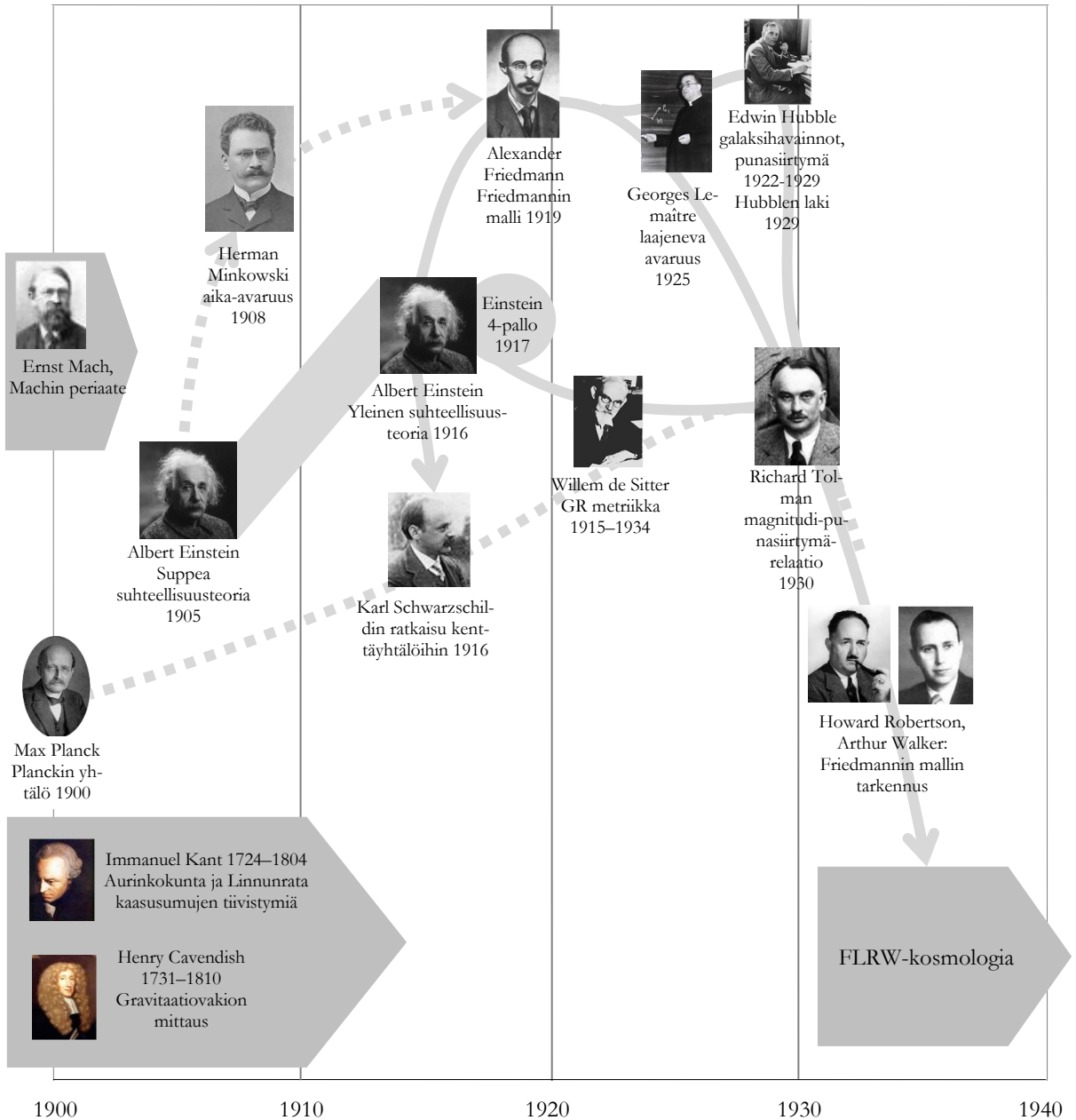
Ennuste havaittavan kulmakoon kasvusta etäisyyden kasvaessa palautuu kulmakokoetäisyyden johtamisessa sovellettuun, suppeasta suhteellisuusteoriasta periytyvään vastavuoroisuuteen riippumatta siitä valitaanko tarkastelukoordinaatiston origoksi kohde tai havaitsija. Kulmakokoetäisyyteen sovellettuna oletamus sisältyy englantilaisen fyysikon I.M.H. Etheringtonin vuonna 1933 julkaisemaan vastavuoroisuusteoreemaan (*reciprocity theorem*<sup>93</sup>), jonka katsotaan pätevän FLRW-avaruuteen tiheysparametreista riippumatta. Ei-laajenevien kohteiden (kuten galaksien, FLRW-avaruudessa) kulmakoko, joka on johdettu kulmakokoetäisyydestä, riippuu sekä laajenemisnopeutta kuvaavasta Hubble'n vakioista että tiheysparametrista  $\Omega$ , kuva 1-30.



Kuva 1-30. Kokonsa säilyttävästä kohteesta havaittavat halkaisijat FLRW-avaruudessa. Käyrät kuvaavat ennusteen kohteiden kulmakoolle kahdella tiheysparametrien yhdistelmällä, joista jälkimmäinen sisältää nykykäsitksen mukaisen pimeän energian osuuden.

<sup>92</sup> R. Tolman, [PNAS 16, 511-520, 1930](#)

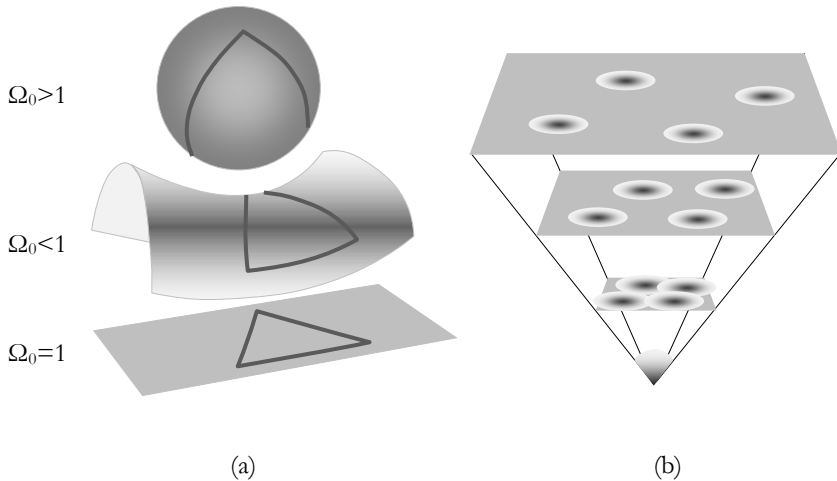
<sup>93</sup> Etherington, I.M.H.: *On the definition of distance in general relativity*. *Phil. Mag. ser. 7* **15**, 761–773 (1933), [Phil. Mag. ser. 7 15, 761–773 \(1933\)](#)



Kuva 1-31. Yleisestä suhteellisuusteoriasta FLRW kosmologiaan. Yleisen suhteellisuusteorian mukaiseksi kosmologitulkinnaksi on vakiintunut Friedmannin, Lemaîtren, Robertsonin ja Walkerin mukaan nimetty FLRW kosmologia. Yleisen suhteellisuusteorian ohella Planckin yhtälön tulkinnalla on tärkeä merkitys kosmologiahavaintojen ennusteisiin, sillä sen vaikutus joudutaan huomioimaan punasiirtymän aiheuttamassa säteilyn tehotiheyden pienemisessä.

Nykyisen tukintojen mukaan tiheysparametrin arvo on tasan yksi ( $\Omega = \Omega_m + \Omega_\Lambda = 1$ ) siten, että siinä on näkyvän ja pimeän massan osuus noin  $\Omega_m = 0,27$  ja tuntemattoman pimeän energian osuus noin  $\Omega_\Lambda = 0,73$ . Oletus pimeästä energiasta perustuu ensisijaisesti supernovaräjähdyksistä mitattuihin magnitudin ja punasiirtymän suhteisiin. Ennuste vastaa parhaiten havaintoja, kun tiheysparametreille annetaan arvot  $\Omega_m = 0,27$  ja  $\Omega_\Lambda = 0,73$ . Nykyarvio Hubble'n vakiosta on noin  $70 \text{ [km/s/Mpc]}$ , mikä FLRW-avaruudessa vastaa 13,7 miljardin vuoden ikää laajenevalle avaruudelle. Vielä 1950-luvun puolivälissä arvio laajenevan avaruuden iästä oli luokkaa 5 miljardia vuotta <sup>94</sup>.

FLRW-kosmologiaan johtanutta kehitystä on hahmoteltu kuvassa 1-31. Teoriaan vahvasti kuuluneen alkuräjähdyksen katsottiin saaneen huomattavaa tukea, kun amerikkalaiset Arno Penzias ja Robert Wilson löysivät tutkakokeiden yhteydessä vuonna 1964 kaikkialta avaruudesta havaittavan mikroaaltosäteilyn. Säteilyn taajuusspektri ja energiatiheys vastasivat suurella tarkkuudella  $2,725 \text{ °K}$  lämpötilassa olevan mustan kappaleen sisällä esiintyvää säteilyä. Säteily tunnistettiin venäläisen George Gamovin 1940-luvulla ennustamaksi alkuräjähdyksen ”jälkisäteilyksi”, joka on matkannut avaruudessa syntyhetkestään, noin 380 000 vuotta alkuräjähdyksen jälkeen ja samalla punasiirtynyt siten, että sen aallonpituus on kasvanut noin 1100-kertaiseksi.



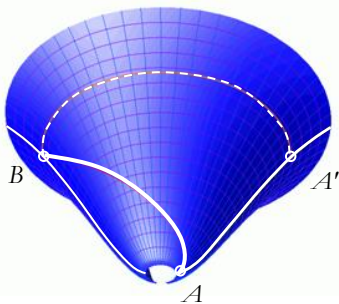
Kuva 1-32. (a) FLRW-kosmologian mukaan avaruuden geometria määräytyy tiheysparametrin  $\Omega$ , jonka arvo periaatteessa voi olla joko tasan 1 tai ykköstä suurempi tai pienempi.  $\Omega = 1$  merkitsee ”litteää” avaruutta (flat space),  $\Omega > 1$  sulkeutuvaa avaruutta, jota kuvaa positiivinen kaarevuus ja  $\Omega < 1$  avointa avaruutta, jota kuvaa negatiivinen kaarevuus. (b) Galaksien oletetaan säilyttävän kokonsa avaruuden laajetessa. Kuvat, *Wikimedia Commons*.

<sup>94</sup> H.P. Robertson, *On the Foundations of Relativistic Cosmology*, [PASP 67, 82, \(1955\)](#)



Koska Planckin yhtälö on FLRW kosmologiassa tulkittu säteilyn itseisominaisuudeksi, päätellään avaruuden laajenemisesta johtuvan säteilyn energiatihedden pienenemisen olevan verrannollista punasiirtymätekijän  $(1+z)$  neljanteen potenssiin, jolloin säteilyn ”jäähdyminen” noudattaisi jäähtyvän mustan kappaleen tehoitehdyn pienenemistä. Energiatarkastelussa tämä tarkoittaa, että avaruuden taustasäteilyn kokonaisenergia avaruudessa on pienentynyt noin  $1/1100$  osaan energiasta säteilyn syntyhetkellä. Taustasäteilyn nykyinen energiatiheys on  $4,2 \cdot 10^{-14}$  [J/m<sup>3</sup>], mikä on vajaat  $10^{-4}$  avaruuden keskimääräisestä energiatihedestä, joten säteilyn osuus sen oletetulla syntyhetkellä on ollut noin  $1100 \cdot 10^{-4} \approx 10\%$  avaruuden energiatihedestä. Tämän mukaan taustasäteilyn punasiirtymä on hävittänyt noin  $10\%$  avaruuden kokonaisenergiasta.

FLRW-mallin kuvaama avaruus on vaikeasti havainnollistettavissa. Matemaattisesti se kuvataan ajan edetessä kehittyvänä kolmiulotteisena rakenteena, joka voi olla joko sulkeutuva, ”litteä” (flat) tai avoin, avaruuden massatiheydestä riippuen. ”Litteys” merkitsee tasapainoa avaruuden laajenemisliikkeen avaruudessa olevan massan gravitaation välillä, kuvat 1-32 ja 1-33.



Kuva 1-33. FLRW-mallin mukaista aika-avaruutta voidaan havainnollistaa kartiomaisella ”kellopinnalla”, jossa kartion korkeussuunta edustaa aikaa, kartion avoin kärki inflaatiiovaiheen jälkeistä laajenemista, ja kellopinta kaksiulotteiseksi kutistettua avaruutta. Kellopinnan leviäminen kuvaa nykyisen käsityksen mukaista avaruuden laajenemisen kiihtymistä. Pisteestä **A** heti inflaatiiovaiheen jälkeen lähtevä valo saavuttaa laajenemisen nykyvaiheessa olevan havaitsijan pisteessä **B**, samalla kun valolähde on edennyt pisteeseen **A'**. Valon kulkema matka on lyhyempi kuin lähteen tämänhetkinen etäisyys havaitsijasta.

Kuva, *Wikimedia Commons*.



## 2. Peruskäsitteiden muotoutuminen

### *Olemassaolon ilmeneminen ja fyysikaalinen todellisuus*

Luvussa 1. esitetty tieteen historian tarkastelu rajoittui ”fysikaaliseen todellisuuteen”, mikä jättää tarkastelun ulkopuolelle ”elollisen luonnon” sekä elämän kehityksen ja tietoisuuden kuvaamisen – ottamatta kantaa siihen kuinka todellinen ja perusteltu tällainen jako on. Perinteisessä luonnonfilosofiassa kaiken ilmenemän perussyyt, sekä ”elottoman” että elävän luonnon osalta, palautuivat uskonnollisluonteiseen käsitykseen olemassaolon ja ilmenemisen tarkoituksista ja perussyistä. Käsitys materiaalisesta olemassaolosta ja sitä hallitsevista luonnonlaeista välittyi avaruuden ja tähti-taivaan, aineen ja liikkeen kuvaamisessa.

Olemassaolon ilmeneminen on antiikista lähtien nähty joko ikuisena ilman alkua, loppua ja rajoja, tai tyhjiydestä luotuna äärellisenä kokonaisuutena, joka syntyy, kehittyä ja häviää löydettävissä ja kuvattavissa olevien lainalaisuuksien mukaan. Jo varhaiset filosofit, Thales, Anaksimandros ja Anaksimenes pyrkivät selittämään luonnonilmiöt havaittujen säännönmukaisuuksien pohjalta, ilman että selitys perustuisi yliluonnollisiin voimiin tai jumalalliseen ohjaukseen. Anaksimandros opetti, että havaittava universumi on muodostunut vastakohtien erkautumisesta ikuisessa perussubstanssissa, *apeironissa* – kosmista järjestystä hallitsee tasapaino ja harmonia; osat muuttuvat mutta kokonaisuus säilyy. Herakleitos opetti, että kaikella on yhteinen perusta (*logos*), ja että ilmenemisessä toteutuu jatkuva muutos ja vastakohtien harmonia. Muutoksissa hän näki samalla säilymlakien perustan: ”*Sadetta saadaan sama määrä kuin vettä haihtuu*”.

Anaksagoras jakoi Herakleitoon kokonaisvaltaisen näkemyksen todellisuudesta: ”*kaikki on osaa samasta kokonaisuudesta*” tai ”*kaikessa on osa kaikkea muuta*”. Vaikka atomistien ajattelu irrotti paikallisen kokonaisuudesta, palautti Leibnizin monadi 2000 vuotta myöhemmin Anaksagoraan ajatusta mukailevan näkemyksen aineen alkeisosasta; ”*monadi aineen paikallistumana on peilikuva kaikkeudesta*”<sup>95</sup>. Matemaattisesti, ajatus paikallisesta kaikkeuden peilikuvana välittyi esim. Fourier-muunnoksessa; paikallisen deltafunktion Fourier-muunnos on kaikkialla yhtäläisesti esiintyvä funktio – vastaavasti kuin nollan käänteisarvo on ääretön.

Antiikin luonnonkuvauksen keskeisiä kohteita olivat aine, liike ja avaruus. Niihin liittyvän metafysiikan perusteita etsittiin luonnon säännönmukaisuuksista, matemaattisesta kauneudesta, vastakohtien harmoniasta ja perussyiden ymmärryksestä. Aineen ja liikkeen kuvaus jäi antiikin ajoista lähes kahdentuhannen vuoden ajaksi varsin abstraktille ja idealistiselle tasolle. Avaruuden osalta antiikin perintö edusti määrättyllä tavalla toista äärlaitaa; ptolemaiolainen tähtitaivas, ja erityisesti planeettakunta, oli lähinnä suora kuvaus havainnoista ilman kokonaisvaltaista näkemystä avaruuden rakenteista ja havaittujen liikkeiden ja muutosten mekanismeista.

<sup>95</sup> G. Leibniz, Monadology, <http://www.earlymoderntexts.com/assets/pdfs/leibniz1714b.pdf>

Parhaiten antiikin perinnöstä ovat arvonsa säilyttäneet määrätyt tieteen periaatteet; Aristoteleen mukaan *tarkimpia ovat tieteet, jotka voidaan johtaa primäärisistä luonnonlaeista mahdollisimman välin lisäpostulaatein* – ajatus, joka toistuu läpi koko tieteen historian, ja tunnetaan ehkä paremmin Occamin partaveitsenä kuin Aristoteleen tieteen tasokkuuden kriteerinä.

Kopernikuksen vallankumouksesta käynnistynyt matemaattisen fysiikan ja empiirisen tieteen voittokulku muistuttaa kokonaisvaltaisen hahmotuksen, tarkkojen havaintojen ja eksaktin matemaattisen kuvauksen vuorovaikutuksen tärkeydestä. Kuten Kopernikus *De Revolutionibus* kirjansa esipuheessa toteaa, hän perustelee hahmotamaansa aurinkokunnan pallosymmetriaa luonnon perusprinsiipeillä, symmetrialla ja yksinkertaisuudella. Ajatustensa tueksi hän tutki vanhojen havaintojen sopivuutta aurinkokeskeiseen malliin, sekä mallista seuraavia selityksiä planeettojen liikkeille ja mm. vuorokauden- ja vuodenaikojen vaihtelulle. Keplerin tavoitteena oli etsiä tarkat matemaattiset ilmaisut planeettojen radoille Kopernikuksen hahmottamassa aurinkokeskeisessä systeemissä.

Kepler etsi matemaattista kauneutta, mitä hän piti luonnon perusprinsiippinä. Keplerin löytämässä ellipsiradassa toteutuivat sekä Tyko Brahen tarkat havainnot, että hänen edellyttämänsä matemaattisen kauneuden vaatimus. Perustetta ellipsiradoille Kepler ei löytänyt; sen sijaan hän löysi Keplerin lakeina tunnetut yhteydet kiertoajan neliön ja ellipsin pääakselin pituuden kuution välillä ja planeetan määrättyssä ajassa planeettatasoon piirtämien sektoreiden pinta-alojen välillä.

Newtonin haasteena oli Keplerin ellipsiratojen selitys keskeisten dynamiikan käsitteiden, voiman, kiihtyvyyden ja inertian avulla. Erityisen haastava tehtävä oli siksi, että se edellytti dynamiikan käsitteiden ja mekaniikan peruslakien hahmottamisen ja määrittämisen. Gravitaatiovoiman määrittämiseksi Newton etsi lausekkeen keskihakuisvoimalle, joka planeetan hitausvoimaan yhdistettynä johti Keplerin ellipsirataan.

Newtonin liikelakia voitiin nyt testata sekä maanpäällisissä kokeissa että taivaanmekaniikassa. Kopernikuksen, Keplerin ja Newtonin töiden muodostamassa prosessissa korostuu idealistisen ja empiirisen etenemisen vuorovaikutus. Tähtitaivaan tapauksessa suora eteneminen havainnoista mallinnukseen johti ptolemaiolaiseen malliin. Kopernikuksen systeemihahmotus ja Keplerin havaintopohjainen matemaattinen intuitio loi perustan Newtonin mekaniikan lakeihin pohjautuvalle mallille. Samalla voimasta muodostui matemaattisen fysiikan ensisijainen käsite, asema, jonka se on säilyttänyt tähän päivään saakka – etsitäänhän yhtenäisteoriaa voimien, tai voimia kuvaavien vuorovaikutusten, sähkömagneettisen, heikon, vahvan ja gravitaatiovuorovaikutuksen yhdistävästä teoriasta.

### *Aine ja liike*

Antiikista periytynyt jako aineen, liikkeen ja avaruuden tarkasteluun on nähtävissä vielä tämän päivän fysiikassa. Aineen kuvaus lähtee alkeishiukkasista, joiden rakennetta ja ominaisuuksia kuvataan hiukkasfysiikassa, jonka perusta on kvanttimekaniikassa ja suppeassa suhteellisuusteoriassa. Aineen alkeisosien vuorovaikutuksia, vahvoja, sähkömagneettisia ja heikkoja vuorovaikutuksia (voimia) kuvataan ensisijaisesti

kvanttikentäteorialla. Atomien ja molekyylien vuorovaikutusten käsittelyn perustana on kemia, jonka juuret ovat kokeellisissa löydöksissä; teoreettinen perusta kemiassa rakentui ensin massan säilymiseen, 1800-luvun lopulta lähtien termodynamiikkaan. Modernissa kvanttikemiassa tarkastellaan atomien välisiä sidoksia ja atomaarisia rakenteita kvanttimekaniikan keinoin.

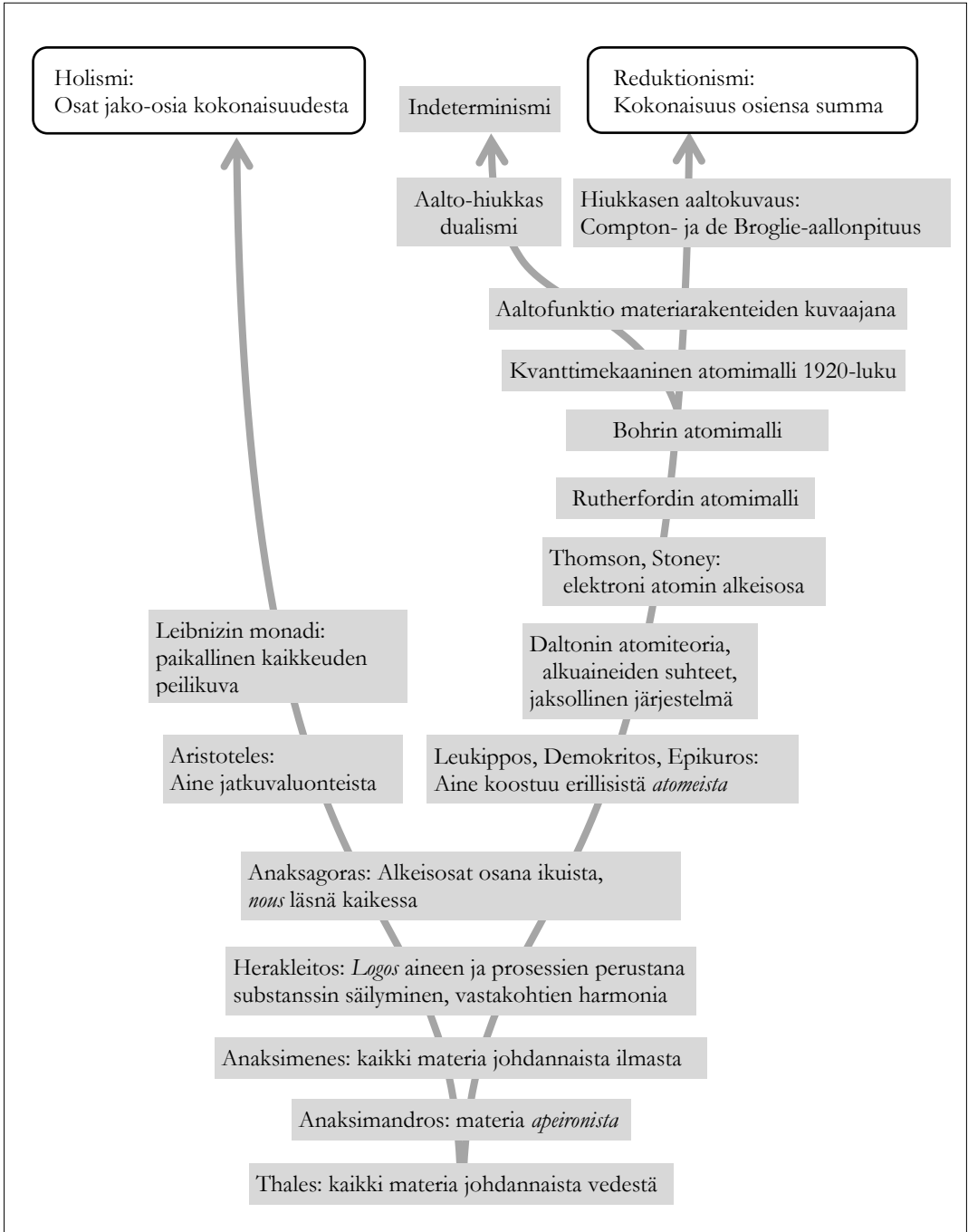
Kuvaan 2-1 on koottu eräitä keskeisiä vaiheita aineen kuvaamisessa. Abstraktista apeironista on monien vaiheiden jälkeen päädytty abstraktiin aaltofunktioon, jonka amplitudin neliö kuvaa materiahiukkasen hetkellisen sijainnin todennäköisyyttä. Aaltofunktio on dimensioton funktio, jonka integraali yli tarkasteltavan systeemin on yksi, mikä tarkoittaa sitä, että hiukkanen on ”jossakin” todennäköisyydellä yksi. Aaltofunktio ja todennäköisyyskäsite haastoivat samalla fysikaalisten ilmiöiden tarkasteluun indeterminismin, jonka mukaan ainakin jotkin tapahtumat ovat ennalta käsin määrätymättömiä tai ainakin tunnettujen fysiikan lakien tavoittamattomissa. Ilmeisesti alkuräjähdyksen kuvaamisella kvanttihiippäykseksi on haluttu antaa tapahtumalle kvanttimekaniikan satunnaisuuteen liitettävä piirre. Yksittäisten tapahtumien satunnaisuus on tukenut vallalla olevaa reduktionistista maailmankuvaa, jossa kokonaisuus on rakentunut osin satunnaisena osiensa summana.

Hiukkasen aaltoluonne teki abstraktista aineen ja massan olemuksesta entistä abstraktimman. Osa ominaisuuksista oli selitettävissä hiukkasluonteen pohjalta, osa aaltoluonteen pohjalta. Toisaalta valon määrättyjen ominaisuuksien, kuten valosähköisen ilmiön selityksissä oli päädytty Albert Einsteinin vuonna 1905 ehdottamaan valon kuvaamiseen hiukkasluonteisilla fotoneilla, mikä merkitsi Planckin yhtälön kuvaaman energia-annoksen tulkintaa lokalisoituneeksi säteilypurskeeksi tai valohiukaseksi.

Ajatus valosta hiukkasvirtana oli elänyt vahvana 1700-luvulla Newtonin esittämän värihiukkasteorian pohjalta<sup>96</sup>, vaikka Christiaan Huygens oli jo aiemmin onnistunut selittämään valon taittumista ja interferenssi-ilmiötä aaltokuvauksen pohjalta. Thomas Youngin ja Augustin-Jean Fresnelin kokeet vakuuttivat 1800-luvun tutkijat valon aaltoluonteesta, mille lopullisen sinetin antoi Maxwellin yhtälöiden kuvaama liikuvan sähkövarauksen synnyttämä sähkömagneettinen aalto ja valon identifiointi sähkömagneettiseksi säteilyksi.

Vaikka kvanttimekaniikan voidaan katsoa ensisijaisesti tukeneen reduktionistista maailmankatsomusta, voidaan vapaasta partikkelista käytetyn aaltopakettikuvauksen katsoa väljästi tulkiten sisältävän ajatuksen paikallisen ja muun avaruuden erottamattomuudesta; paikallinen aaltopaketti muodostuu kaikkia taajuuksia omaavien, kaikkialle ulottuvien aaltojen konstruktivisesta superpositiosta samalla kun superpositio paketin ulkopuolella nolaa summa-aallon ja siten partikkelin esiintymistodennäköisyyden. Potentiaali ilmentymiseen on siis periaatteessa kaikkialla, mikä ei tue irrallista muusta avaruudesta erillistä ilmenemistä.

<sup>96</sup> I. Newton, *Optics* (1704), [Rare Book Room](#), [The Newton Project](#)



Kuva 2-1. Vedestä ja abstraktista *apeironista* on monien vaiheiden jälkeen päädytty abstraktiin aaltofunktioon ja reduktionistiseen todellisuuskuvaan.

Kvanttimekaniikan aaltopaketti tai sen muodostavat aallot eivät sinänsä kuvaa partikkelia eikä sen energiaa tai liikemäärää, vaan paikkaa, jossa partikkeli voidaan havaita. Kokeellisella tasolla materiahiukkasen aaltoluonnetta kuvaavat lähinnä Compton- ja de Broglie aallonpituudet, jotka kytkevät hiukkasen lepoenergian ja liikemäärän sähkömagneettisiin aaltoihin tai fotoneihin, joiden energia ja liikemäärä Planckin yhtälön mukaan vastaa ko. hiukkasen lepoenergiaa (Compton) ja liikemäärää (de Broglie).

### *Massa ja säteily*

Valon säteily- ja hiukkasominaisuuksien vastaavasti kuin massapartikkelin hiukkas- ja säteilyominaisuuksien yhteen sovittamiselle ei ole löytynyt yhtenäistä kuvaustapaa kvanttimekaniikan formalismissa, kuva 2-2. Suhteellisuusteorian viitekehyyksessä fotonin ja massahiukkanen erottuvat lepomassan, lepoenergian, liikemäärän ja kineettisen energian osalta. Fotonin lepomassa on nolla ja liike-energia

$$E = hf = \frac{h}{\lambda} c = \frac{h\mathbf{k}}{c} c^2 \quad (2.1)$$

Fotonin liikemäärä on

$$\mathbf{p} = \frac{E}{c} \hat{\mathbf{r}} = \frac{h}{\lambda} \hat{\mathbf{r}} = \hbar \mathbf{k} = \frac{\hbar}{c} \mathbf{k} \cdot c \quad (2.2)$$

missä  $\hat{\mathbf{r}}$  on yksikkövektori ja  $\mathbf{k}$  aaltolukuvektori. On huomattava, että suurella  $h\mathbf{k}/c$  on massan dimensio [kg], joten fotonin energia voidaan ilmaista ”massaekvivalentin”  $m_\lambda = h\mathbf{k}/c$  ja valon nopeuden avulla massaobjektin lepoenergia tavoin

$$E = m_\lambda c^2 \quad (2.3)$$

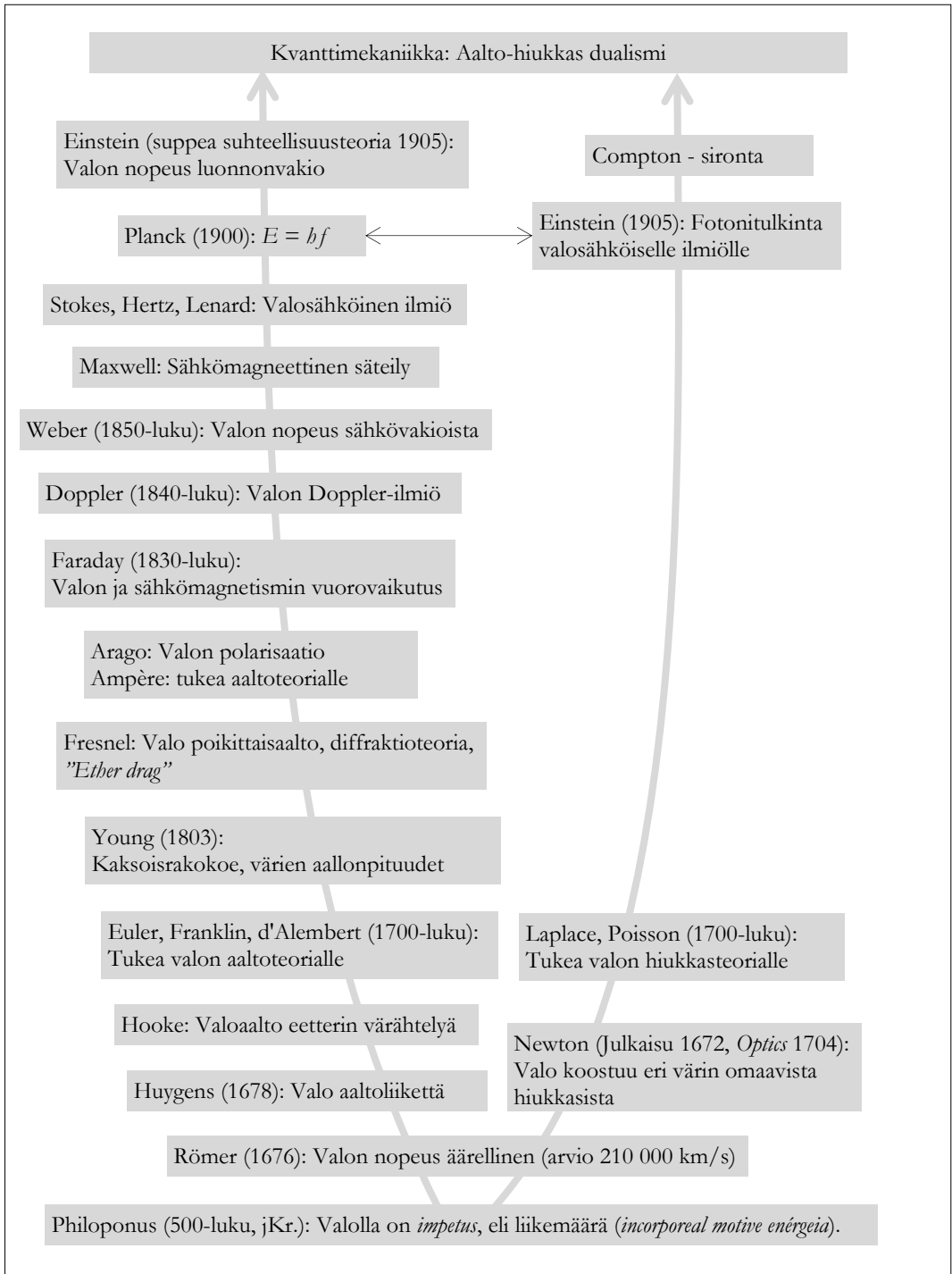
mikä Compton-aallonpituutta  $\lambda_C$  ja vastaavaa aaltolukua  $k_C$  soveltaen voidaan puolestaan ilmaista fotonin energian tapaan

$$E = mc^2 = \frac{h}{\lambda_C} c^2 = \frac{\hbar}{c} k_C \cdot c^2 \quad (2.4)$$

mikä on muodollisesti identtinen aallonpituuden  $\lambda_C$  ja aaltoluvun  $k_C$  omaavan fotonin liike-energian kanssa.

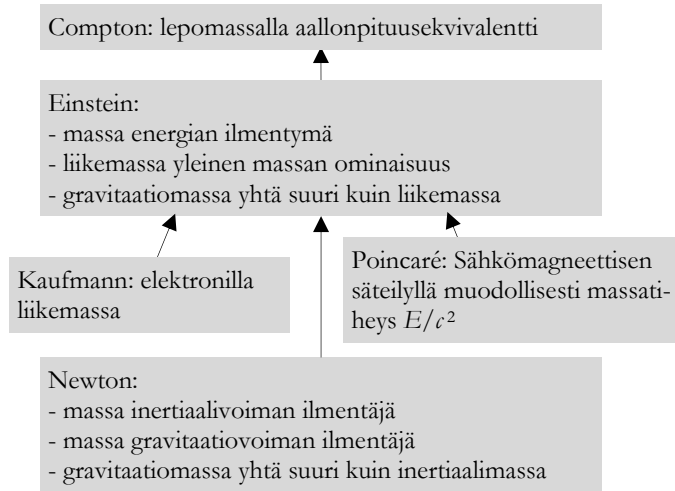
Newtonin massa määrittyi ainemääräksi ja liikeyhtälön  $F = ma$  kautta ominaisuudeksi, joka määräsi kappaleen liiketilän muutosta vastustavan inertiaalivoiman. *Principiassa* Newton määrittelee gravitaation verrannolliseksi kappaleen ainemäärään, joten sekä inertiaali- että gravitaatiovoima olivat massaan verrannollisia ja massaa määritteleviä ominaisuuksia.

Massan määrittely mutkistui, kun 1800-luvun lopulla elektronien inertiaominaisuuden havaittiin muuttuvan elektronin nopeuden kasvaessa. Suppea suhteellisuusteoria määritteli liikkeessä olevan objektin massan liikemassaksi, joka kasvaa kohti ääretöntä objektin nopeuden lähestyessä valon nopeutta.



Kuva 2-2. Vaihteita valon kuvaamisessa; aaltoliikkeestä ja partikkeleista fotoneihin ja aalto-hiukkas dualismiin.





Kuva 2-3. Vaiheita massan määrittelyssä. Massan määrittely on Newtonin liikeyhtälöiden muotoilusta lähtien määrittynyt massan havaittujen ominaisuuksien perusteella. Tärkeimmät näistä ovat olleet inertiaaliominaisuus ja gravitaatio-ominaisuus. Lepomassan käsite johti tulkintaan massasta energian ilmenemismuotona.

Yleisen suhteellisuusteorian perustana oleva ekvivalenssiperiaate edellyttää, että gravitaatiomassa on yhtä suuri kuin inertiaalimassa, mikä tarkoittaa, että massaobjektin liike vaikuttaa myös objektin gravitaatiomassaan.

Klassisen mekaniikan massamäärite perustui ensisijaisesti inertiaalivoimaan ja gravitaatiovoimaan. Suhteellisuusteoria lisäsi massan määrittäeseen lepoenergian ominaisuuden, mikä johti massan tulkintaan energian ilmenemismuotona. Kvanttimekaniikka ei suoranaisesti määrittele massaa, mutta tuo Compton-aallonpituuden kautta massalle aalto-ominaisuuden ja samalla aalto-hiukkas dualismin.

Kuten kuva 2-3 havainnollistaa, massa on tullut määrittelyksi sekä voiman, liikkeen että energian avulla. Luonnonfilosofisessa tarkastelussa voimapohjainen määrittely viittaa paikalliseen vuorovaikutusominaisuuteen, energiapohjainen määrittely kytkee massan säilymlakeihin.

### *Voima, liikemäärä ja kineettinen energia*

Aristoteleen metafysiikassa liike oli potentiaalisuuden toteutuma. Liikettä ylläpiti nopeuteen verrannollinen voima, liikuttaja, ja vastusti nopeuteen kääntäen verrannollinen vastus. Jos auraa vetävä juhta lopettaa vetämisen, auran liike pysähtyy. Putoamisliike oli Aristoteleen mukaan luonnollinen liike, jolla kappale hakeutuu sille kuuluvaan paikkaan kappaleen painoon verrannollisella nopeudella – kevyet ylös ja raskaat alas. Aristoteleen filosofiaa väljästi tulkiten luonnollisessa liikkeessä voidaan nähdä potentiaalisuuden aktualisoituminen kappaleen hakeutuessa kohti potentiaalienergian minimiä, tämä tapahtuu myös ilmassa ylöspäin hakeutuville kappaleille korvaavan ilmamassan kautta.

Aristoteleen pakotettuun liikkeeseen liittyvä liikuttaja ymmärrettiin ulkoiseksi tekijäksi. Ensimmäinen, joka hahmotti liikuttajan liikkeeseen saatetun kappaleen sisäisenä ominaisuutena, lienee ollut Aleksandriassa 500-luvulla vaikuttanut teologi, filosofi ja monitieteilijä Johannes Philoponus. Hänen mukaansa liikettä ylläpiti ”liikkeen energia” (*incorporeal motive energeia*), *impetus*, jonka kappale on saanut liikettä synnyttäessä. Liike jatkuu, ellei impetusta poisteta. Esimerkiksi ilman vastus ja työ painovoimaa vastaan poistaa impetusta, joten ne aiheuttavat liikkeen hidastumisen tai pysähtymisen. Radoillaan tyhjässä avaruudessa kiertävät planeetat eivät Philoponusin mukaan kohdanneet ilman vastusta eivätkä muuttaneet korkeuttaan, joten niiden impetus säilyi. Philoponus esitti, että myös ei-materiaalisen valon liikkeeseen liittyy impetus.

1300-luvulla elänyt ranskalainen pappi ja filosofi Jean Buridan kehitti Philoponusin impetus-käsitettä. Buridanin impetus määritteli kvalitatiivisesti liikemäärän käsitteen. Aristoteleen luonnollisen liikkeen uudelleenarvioinnin toteutti Galileo Galilei kiihtyvään liikkeeseen ja putoamisliikkeeseen keskittyvissä kokeissaan ja niiden matemaattisissa analyyseissa. Galilein työ antoi tärkeän pohjan René Descartes’in, Christian Huygensin, Gottfried Leibnizin ja Isaac Newtonin töille liikettä määrittelevien suureiden ja itse liikkeen ymmärtämiseksi ja kuvaamiseksi.

René Descartes määritteli liikemäärän kappaleen tilavuuden ja nopeuden tulona, ja postuloi kokonaisliikemäärän säilymisen törmäyksessä. Christiaan Huygens ja Gottfried Leibniz määrittelivät liikemäärän kappaleen painon ja nopeuden tulona. Galileo Galilein kokeista ja omista täydentävistä kokeistaan Leibniz päätteli, että kappaleen gravitaatiosta saama *elävä voima* (*vis viva*) on verrannollinen massan ja nopeuden neliön tuloon ( $mv^2$ ) eikä liikemäärään ( $mv$ ), jossa nopeus esiintyy ensimmäisessä potenssissa.

Leibniz otti voimakkaasti kantaa elävän voiman (nykytermein liike-energian) säilymisen puolesta. Hänen ajatteluunsa sisältyi aristoteelinen alkusyy ja toteutuman vuorovaikutus, mikä konkretisoitui pudotuskokeissa ja heilurissa potentiaalienergian ja liike-energian vuorotteluna. Kimmoisessa törmäyksessä Leibniz oletti elävän voiman varastoituvan törmäyshetkellä elastisen aineen ”kuolleeksi voimaksi” (*vis mortua*) ja muuttuvan uudelleen liikkeen edustamaksi eläväksi voimaksi (*vis viva*) jännityksen purkautuessa. Laplace käytti Leibnizin elävän voiman ja gravitaation luovuttaman potentiaalienergian yhtäsuuruutta vuonna 1829 julkaistussa taivaanmekaniikan analyysissaan<sup>97</sup>.

Newtonin *Principian* syntymiseen johtanut taivaanmekaniikan ratkaisu ja sen perustana olleet liikeyhtälöt suuntasivat liikkeen kuvaamisen ensisijaisesti voiman ja kiihtyvyyden pohjalta johdettuun matematiikkaan. Vaikka Newtonin mekaniikasta johdetut Lagrangen, Laplacen ja Hamiltonin formalismit implisittisesti sisälsivät energian käsitteen, oivallettiin energiakäsitteen fyysikaalinen merkitys integroituna voimana ja tehtynä työnä ja systeemien ensisijaisena säilyjänä vasta termodynamiikan kehityksen yhteydessä 1800-luvulla.

<sup>97</sup> Pierre Simon Laplace, *Mécanique Céleste*, (1827) English translation by N. Bowditch, <http://www.archive.org/stream/mcaniquecles01laprich#page/n7/mode/2up>

*Lineaarista maailmasta epälineaariseen maailmaan*

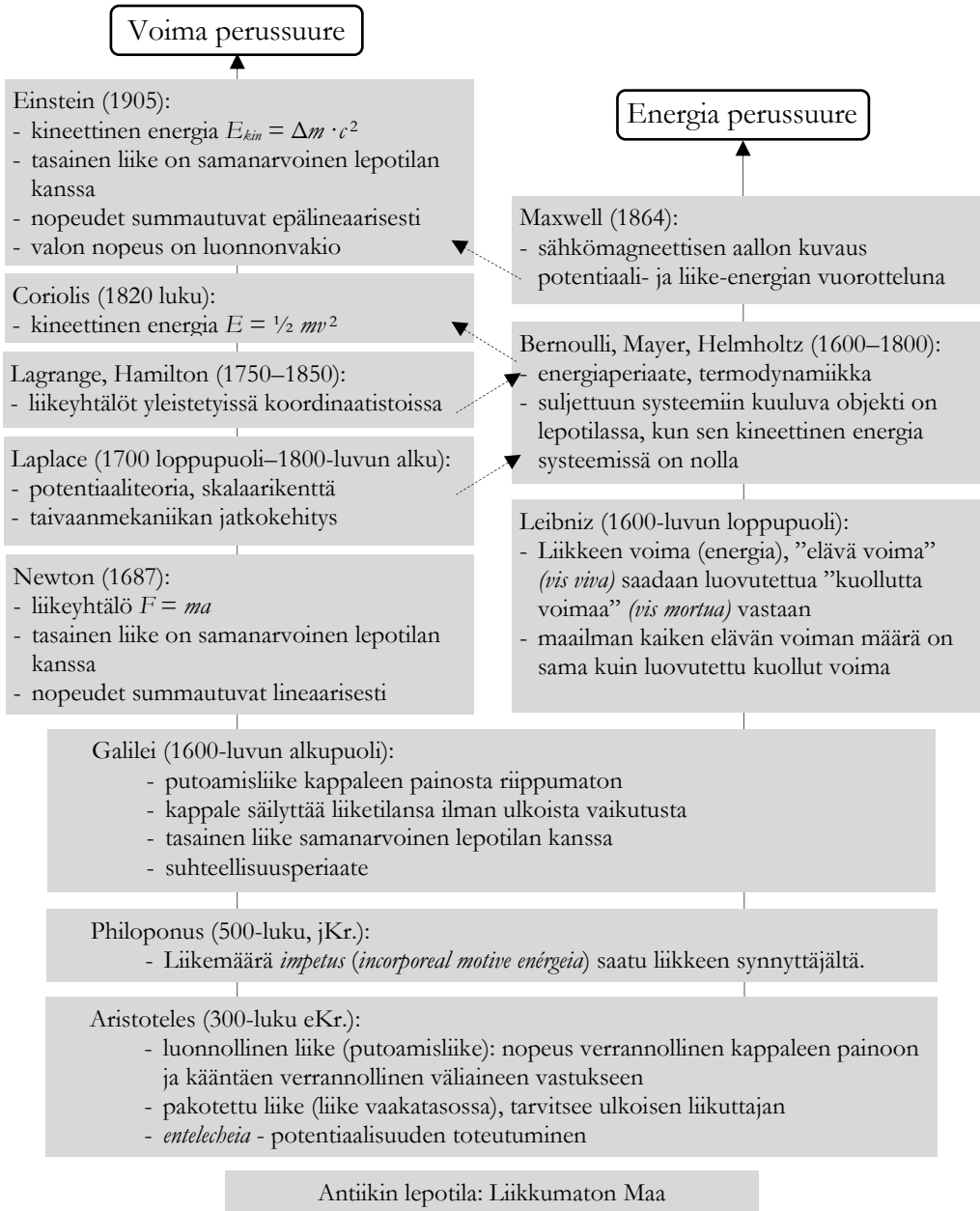
Newtonilainen maailma oli lineaarinen, rajaton ja ääretön. Newton selvästikin vältti ottamasta kantaa aurinkokuntaa ympäröivään kiintotähtien kehään, sen etäisyyteen tai sen takana mahdollisesti olevaan tyhjiyteen. Vaikka aurinko, tai tarkemmin aurinkokunnan painopiste edusti Newtonille absoluuttista lepotilaa, sisälsi liikeyhtälöiden käsittely implisiittisesti olettamuksen paikallisesta lepotilasta missä tahansa aurinkoa kiertävän ja akselinsa ympäri pyörivän maapallon pinnalla.

Newtonin maailmassa kappaleen nopeus kasvaa tasaisesti kohti ääretöntä vakiovoiman vaikuttaessa kappaleeseen. 1800-luvun lopulla tehdyt havainnot valon nopeuden kytkeytymisestä havaitsijan ja valolähteen nopeuteen viittasivat valon nopeuden erityisasemaan suurimpana avaruudessa saavutettavissa olevana nopeutena. Samaa viestittivät havainnot sähkökentässä kiihdytettyjen elektronien nopeuden kasvusta, mikä alitti Newtonin lineaarisen liikeyhtälön ennusteen. Epälineaarisuus tulkittiin elektronien massan kasvuksi kohti ääretöntä nopeuden lähestyessä valon nopeutta.

Havaintojen kuvaamiseksi kehitettiin koordinaatistomuunnoksia, joissa liiketilän oletettiin vaikuttavan paikallisesti havaittavaan etäisyyteen ja aikaan. Alun perin muunnokset pyrittiin kytkemään ainakin etäisyyden osalta liikkeen aiheuttamiin materian rakenteellisiin muutoksiin. Suppeassa suhteellisuusteoriassa Einstein päätyi Lorentzin muunnokseen ajatuskokeiden kautta postuloituna todellisuuden ominaisuutena. Suhteellisuusteorian kuvaamassa einsteinilaisessa maailmassa havaitsijan liike summautuu havaittuun liikkeeseen epälineaarisesti siten, että liikkeiden nopeuksien summa ei milloinkaan ylitä luonnonlain tavoin rajanopeudeksi määriteltyä valon nopeutta. Valon nopeuden kiinnittäminen luonnonvakioksi teki ajasta muuttujan, joka Herman Minkowskin tulkinnan mukaisesti voidaan kytkeä avaruuden kolmeen ulottuvuuteen nähden ortogonaalisen neljännen ulottuvuuden mittatikkuna.

Suppea suhteellisuusteoria tuotti uudet lausekkeet liikemäärälle ja kineettiselle energialle, ja toi uutena käsitteenä massan lepoenergian. Lepoenergian voidaan katsoa määrittelevän massan energian ilmenemismuodoksi, mikä käytännössä on muodostunut massan määritelmäksi. Liikemäärän epälineaarinen kasvu massaobjektin nopeuden kasvaessa tulkittiin joko ”liikemassan” ominaisuudeksi, ”relativistiseksi massaksi” tai yleisemmin vain liikemäärän ominaisuudeksi.

Kuvaan 2-4 on koottu eräitä lepotilan ja liikkeen kuvaamisen keskeisiä kehitysvaiheita. Aristoteleen *entelecheia* muistuttaa liikkeen alkusyystä luovutettuna potentiaalienergiana, joka pudotusliikkeessä on luovutettu gravitaatioenergia. Philoponus oivalsi, että myös Aristoteleen pakotetussa liikkeessä liikettä ylläpitävä *impetus* on peräisin liikkeen synnyttävästä voimasta. Liikkeen kuvauksen kehitystä hallitsivat pitkään Newtonin *Principiassa* muotoilemat liikelait, jotka määrittelivät lepotilan, voiman ja kiihtyvyyden yhteyden sekä voiman ja vastavoiman periaatteen. Voiman ja vastavoiman periaate voidaan tulkita energian säilymisen periaatteen paikalliseksi ilmaisuksi, mikä havainnollistui Lagrangen ja Hamiltonin kehittämien liikeyhtälöiden kautta.



Kuva 2-4. Vaiheita lepotilan ja liikkeen kuvaamisessa. Antiikin lepotila oli kaiken keskellä oleva ikuinen maa. Galilei samasti lepotilan tasaisen liikkeen tilaan. Galilein valinta synnytti suhteellisuusperiaatteen, jonka mukaan kumman tahansa toisiinsa nähden liikkuvista objekteista voidaan katsoa olevan levossa. Suhteellisuusperiaate periytyi suppeaan suhteellisuusteoriaan. Energiaperiaatteeseen perustuvassa tarkastelussa lepotila on tila, jossa objektin kineettinen energia tarkasteltavassa systeemissä on nolla. Aristoteleen *entelecheia*, potentiaalisuuden aktualisoituminen toteutuu Leibnizin kuolleesta voimasta saatavassa elävässä voimassa ja Maxwellin sähkömagneettisessa säteilyssä, jonka energia on vuoroin potentiaalissa ja liikkeessä.

Galilein ja Newtonin määritelmät lepoudesta ja suhteellisuusteoriasta periytyivät Einsteinin suppeaan suhteellisuusteoriaan, joskin suhteellisuusteoria edellytti lisäpostulaatteja, kuten valon nopeuden vakioisuus ja Lorentz-muunnos.

Energiaperiaate, jossa liike määräytyy liikkeelle luovutetusta energiasta, edellyttää tarkasteltavan systeemin määrittelyä. Suljetussa systeemissä energiaperiaate mahdollistaa lepoudesta määrittelyn tilana, jossa systeemiin kuuluvan objektin kineettinen energia on nolla. Käytännössä esim. taivaanmekaniikan tarkasteluissa toteutuu energiaperiaatteen mukainen lepoudesta määrittäminen.

Lineaarisen liikkeen kinemaattinen tarkastelu jättää liikkeen syntyminen dynamiikan huomiotta, mikä on johtanut suhteellisuusteorian hyväksymiseen sekä Newtonin fysiikassa että suhteellisuusteoriassa. Suhteellisuusteoria sallii kumman tahansa toistensa suhteen tasaisessa liikkeessä olevan objektin liiketilän määrittelyn lepoudestaksi. Dynaaminen lähestyminen edellyttää liiketilöiden tarkastelua energiasysteemeissä, jossa liiketilät on aikaansaatu.

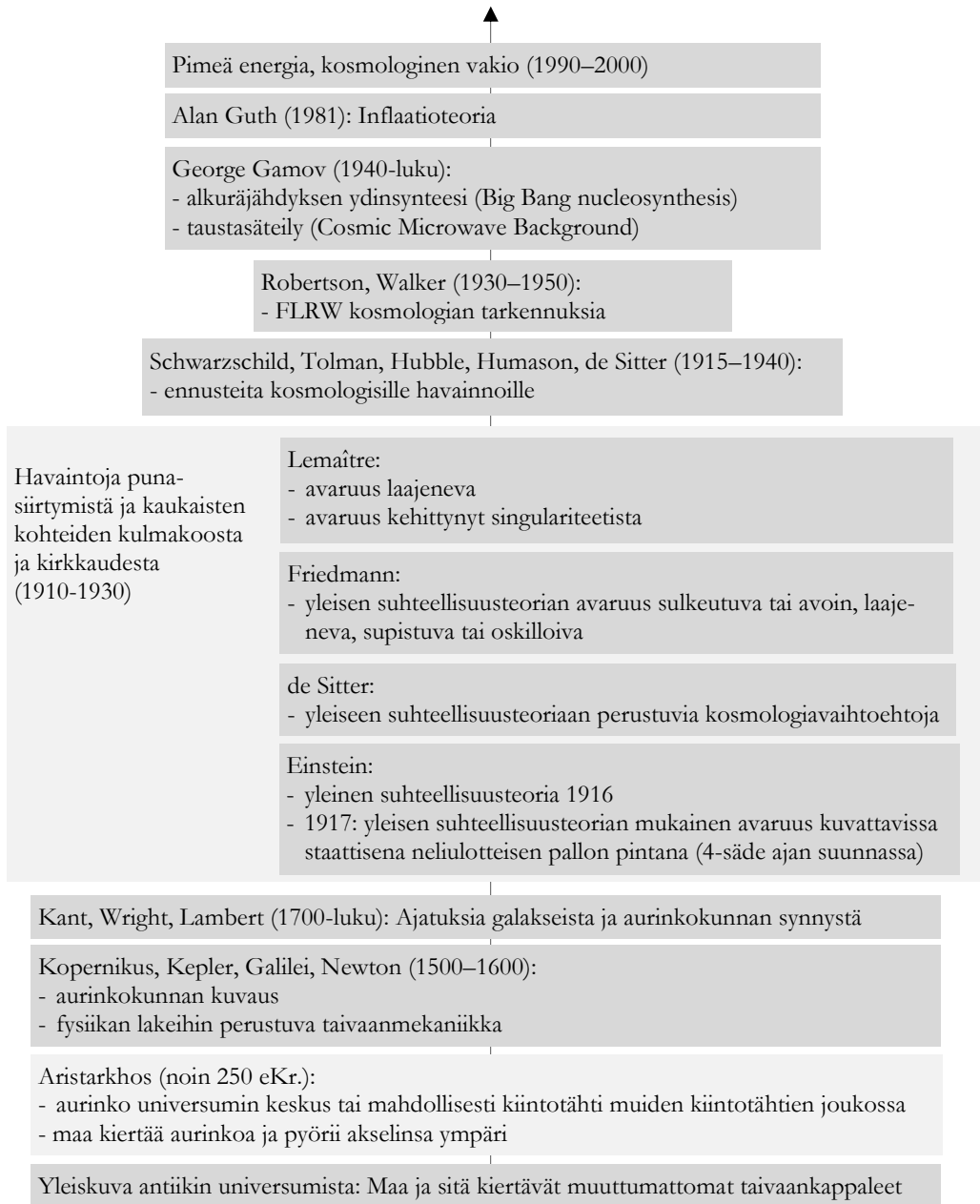
### *Tähtitaivaasta kosmologiaan*

Maa ja taivas olivat antiikin ajattelussa ikuisia. Tähtitaivasta rajoitti pitkään kiintotähtien kuori, joka periaatteessa teki avaruudesta äärellisen. Tähtitieteen painopiste oli maapallolle välittömästi vaikuttavissa ilmiöissä sekä planeettojen epäsäännölliseltä näyttävällä liikkeellä kuvaamisessa, mikä johti monimutkaiseen episykliöiden järjestelmään. Episykliöjärjestelmä edusti lähinnä havaintojen kuvaamista; luonnonfilosofisia perusteluja sille ei kyetty esittämään. Aristarkhoo 200-luvulla eKr. esittämä ajatus aurinkokeskeisestä planeettamallista ei mallin geometrisestä selkeydestä huolimatta saanut kannatusta; maakeskeisyydellä oli empiirisen suoraviivaisuuden ja uskonnollisten perinteiden antama vankka asema, joka säilyi lähes 2000 vuoden ajan ja vielä lähes 200 vuotta Kopernikuksen hyvin perusteleman aurinkokeskeisen planeettamallin jälkeen.

Edellytykset kosmologialle tieteenä syntyivät käytännössä vasta 1900-luvun alkupuolella, kun havainnot kosmologisilla etäisyyksillä tarkentuivat ja yleinen suhteellisuusteoria antoi teoreettisen lähtökohdan avaruuden rakenteen ja kehityksen kuvaamiselle. Käsitteen kosmologia lienee ottanut käyttöön saksalainen filosofi Christian Wolff kirjassaan *Cosmologia Generalis* vuodelta 1730<sup>98</sup>. Ajatuksia galakseista, tähtijoukoista ja aurinkokunnan synnystä olivat 1700-luvulla filosofisella tasolla esittäneet mm. Immanuel Kant, Thomas Wright ja Johann Lambert.

Nykyisen FLRW-kosmologian, alkuräjähdysteorian, perusteet rakentuvat pääosin 1910–1940 välisenä aikana tehdyille havainnoille ja yleisen suhteellisuusteorian tulkinnoille sekä niiden pohjalta johdetuille ennusteille havaittavista suureista, kuva 2-5.

<sup>98</sup> Christian Wolff, *Cosmologia Generalis* (1730) [google book](#)



Kuva 2-5. Antiikin universumista alkuräjähdykskosmologiaan. Nykyisen FLRW kosmologian perusteet rakentuivat pääosin vuosina 1910–1930. Malli on täydentynyt yksityiskohtaisella ydinsynteesiteorialla, jonka pohjalta on voitu mallintaa alkuräjähdykseen sekä tähtien syntyyn ja kehitykseen liittyvää alkuaikojen muodostumista. Avaruuden homogeenisuuden perustelemiseksi alkuräjähdyksen yhteyteen on lisätty myös hypoteettinen äärimmäisen nopean laajenemisen ”inflaatiovaihe”. 1990–2000 luvuilla havaittujen supernovaräjähdyksien kirkkauden ja punasiirtymän suhteen sovittamiseksi ennusteisiin lisättiin negatiivisen gravitaation tavoin toimiva ”pimeä energia”.

Yleinen suhteellisuusteoria määritteli gravitaation aika-avaruuden geometrian ominaisuutena, joka on paikallisesti määrättävissä ympäröivän avaruuden vuorovaikutuksista. Vuorovaikutukset esitetään paine-energia tensorilla. Kytkeä taivaanmekaniikkaan ja lähiavaruuden ilmiöihin saadaan Schwarzschildin ratkaisusta massakeskusten ympäristössä, jossa reunaehtona kaukana massakeskuksesta käytetään Newtonin gravitaatiovoimaa.

Alkuräjähdysteorialle keskeisen ydinsynteesin perusteet esitti venäläis-amerikkalainen fyysikko George Gamov 1940-luvulla. Hän ennusti myös, että mustan kappaleen säteilyn muotoa oleva alkuräjähdyksen lähettämä säteily voisi olla havaittavissa voimakkaasti punasiirtyneenä taustasäteilynä avaruudessa. Taustasäteilyn tunnusmerkit täyttävän mikroaaltosäteilyn löysivät amerikkalaiset Arno Penzias ja Robert Wilson tutkakokeiden yhteydessä vuonna 1964. Alkuräjähdyksellä on täydennetty mm. inflaatioteoriolla, joka tarvittiin tukemaan avaruuden rakenteellista homogeenisuutta ja alkuräjähdyksessä syntyneiden raskaiden alkuaineiden alhaista määrää.

Supernovaräjähdyksistä 1990-luvun lopulla ja 2000-luvun alussa saaduista punasiirtymätuloksista pääteltiin, että avaruus sisältää pimeän ja näkyvän aineen ja säteilyn lisäksi negatiivisen gravitaation tavoin vaikuttavaa pimeää energiaa, jonka osuus avaruuden kokonaisenergiasta olisi noin 74%. Tällöin pimeän aineen osuus avaruuden arvioidusta massasisällöstä olisi noin 22% ja atomeista koostuvan näkyvän aineen osuus noin 4%. Pimeän aineen olemassaolon perusteena ovat lähinnä galaksien rotaatio-ominaisuudet; kaukana galaksien keskustasta olevien tähtien ratanopeudet edellyttävät suurempia keskusmassoja kuin lähellä galaksien keskustaa kiertävien tähtien ratanopeudet.

## Postulaatit ja käsitteet

Tämän päivän teorioiden juuret ovat 1900-luvun alussa määritellyissä postulaateissa, jotka osin periytyvät Galileo Galilein ja Isaac Newtonin ajoilta. Keskeisiä postulaatteja ovat mm. suhteellisuusteorian edellyttämät suhteellisuusperiaate, valon nopeuden vakioisuus, Lorentz-muunnos ja ekvivalenssiperiaate, jotka samalla kiinnittivät teorian edellyttämän ajan, paikan ja etäisyyden määrittelemän havaintotodellisuuden.

Kvanttimekaniikka toi todennäköisyyden uudella tavalla fysiikan käsitemaailmaan, sekä perinteisesti jatkuvaluonteisina pidettyjen suureiden, kuten energian ja liikemäärän kvantittumisen diskreetteihin sallittuihin arvoihin. Se tuotti myös aalto-hiukkasdualismin ja epämääräisyysperiaatteen, jotka edellä mainittujen uusien käsitteiden lisäksi toivat etäisyyttä perinteisiin fysiikan käsitteisiin.

Suhteellisuusteoria on johdettu kinemaattisin perustein paikallisesti tehdyistä havainnoista lähtien. Suppean suhteellisuusteorian tuoma korjaus klassiseen mekaniikkaan tapahtuu havaintotodellisuutta modifioimalla; ajan kulku kytketään havaintotilanteeseen; havaitsijaan nähden liikkeessä olevalle objektille sovelletaan muuntunutta ajan kulkua. Suppean suhteellisuusteorian yleistämiseksi yleiseksi suhteellisuusteoriaksi postuloitiin ekvivalenssiperiaate, jonka mukaan gravitaatiokiihtyvyyden on identtinen inertiaalikihtyvyyden, ulkoisen voiman avulla synnytetyn kiihtyvyyden kanssa.

Yleisen suhteellisuusteorian viitekehyksessä gravitaatio kuvataan aika-avaruuden geometrian avulla; massakeskus kääntää aika-avaruutta siten, että kääntyneessä koordinaatistossa paikallinen aika hidastuu ja paikallinen etäisyys kasvaa, samalla kun koordinaatistoetäisyys kaukana massakeskusta olevaan havaitsijaan nähden pienenee. Yleisen suhteellisuusteorian avaruudessa vapaa pudotus lisää kiihtyvän objektin massaa samalla tavoin kuin liike suppean suhteellisuusteorian avaruudessa.

Suhteellisuusteorian syntyäiköihin ei tunnettu kelloja, joilla nopeuden tai gravitaation mahdollista vaikutusta kellon käyntinopeuteen olisi voitu mitata. Atomikellojen perustana olevien atomien karakterististen emissio- ja absorptiotaajuuksien teoria muotoutui vasta kvanttimekaniikan kehityksen myötä 1920-luvulta lähtien. Ensimmäiset kokeet liikkeen vaikutuksesta atomien emissiotaajuuksien tehtiin 1930-luvun lopulla<sup>99</sup>, atomikellojen käyttö suhteellisuusteorian testaamiseen yleistyi 1960-luvulla. Kokeet antoivat täyden tuen suhteellisuusteorian ennusteille, joka perustui ajan kulun erilaisuuteen havaitsijaan nähden liiketilassa oville kelloille.

Kvanttimekaniikan tuoman ratkaisun mukaan karakteristiset taajuudet määräytyvät emissioon/absorptioon liittyvien elektronien kvanttitiloista; taajuus on suoraan verrannollinen kvanttitilojen erotukseen ja elektronin lepoenergiaan, ja kääntäen verrannollinen Planckin vakioon. Suhteellisuusteorian postulaattien mukaan lepoenergian tekijät, lepomassa ja valon nopeus ovat liike- ja gravitaatiotilasta riippumattomia vakioita kuten myös Planckin vakio, joten selitys liikkeen ja gravitaation vaikutuksesta ajan kulkuun oli ainoa mahdollinen ratkaisu. Planckin vakio ei suoranaisesti liity suhteellisuusteoriaan; Planckin vakiota on käsitelty luonnonvakiona sähkövakioiden tapaan. Suppean suhteellisuusteorian kinemaattisen tarkastelun mukaan liike kasvattaa massaobjektin inertiaalimassaa, mutta säilyttää lepomassan vakiona. Ekvivalenssiperiaate kytkee gravitaatiomassan inertiaalimassaan, joten suhteellisuusteorian mukaan myös gravitaatiomassa kasvaa liikkeen vaikutuksesta. Postulaattia valon nopeuden vakioisuudesta perustellaan ”empiirisenä tosiasiana”, alun perin interferometreillä tehtyihin mittauksiin<sup>100</sup>, sittemmin atomikelloilla tehtyihin lukuisiin mittauksiin<sup>101,102,103,104</sup> perustuen.

Kvanttimekaniikan ratkaisu atomin emissiotaajuudesta sitoo emissioaallonpituuden Bohrin säteeseen l. atomin kokoon; pidentynyt emissioaallonpituus, joka havaitaan liiketilassa olevan atomin emissiossa, merkitsee kvanttimekaniikan ratkaisun mukaan laajentunutta atomia, ei vain liikkeen suunnassa vaan atomin muodon säilyttäen. Suppean suhteellisuusteorian mukaan liiketilassa oleva atomi säilyttää emissioaallonpituuden ja atomin koon liiketilan koordinaatissa ja selittää havaitun, pidentyneen aallonpituuden koordinaatistomuunnoksella, joka tarvitaan liiketilassa olevan atomin koordinaatistosta havaitsijan lepokoordinaatistoon siirryttäessä. Selitys on ongelmallinen, jos havainto tehdään atomikellon kumuloituvasta lukemasta. Eri liiketiloissa oleviin kelloihin kumuloituu eri näyttämät, jotka eivät ole muutettavissa koordinaatistomuunnoksilla.

<sup>99</sup> H.E. Ives and G.R. Stilwell, *J. Opt. Soc. Am.* **28** (1938) 215

<sup>100</sup> A.A. Michelson and E.M. Morley, *Am.J.Sci.* 3. Ser. **34** (203) 333 (1887)

<sup>101</sup> H.J. Hay, J.P. Schiffer, T.E. Cranshaw, and P.A. Egelstaff, *Phys. Rev. Letters* **4**, 4 (1960) 165

<sup>102</sup> D.C. Champeney, G.R. Isaak, and A.M. Khan, *Nature* **198**, 4886 (1963) 1186

<sup>103</sup> J.C. Hafele and R.E. Keating, *Science* **177** (1972) 166

<sup>104</sup> R.F.C. Vessot et al., *Phys. Rev. Letters*, **45**, 26 (1980) 2081



*Vuorovaikutus ja vuorovaikutuksen välittyminen*

Nykyfysiikassa voima kuvataan vuorovaikutuksen ilmenemänä. Vuorovaikutuksia välittävät välittäjähiukkaset, jotka etenevät valon nopeudella. Hiukkasfysiikan standardimallin välittäjähiukkasia sähkömagneettisille, heikoille ja vahvoille vuorovaikutuksille ovat fotonit, bosonit ja gluoni. Gravitaatiovuorovaikutukselle oletetun välittäjähiukkasen, gravitonin, olemassaoloa ei ole onnistuttu kokeellisesti osoittamaan. Kaikkien välittäjähiukkasten nopeudeksi on oletettu valon nopeus. Valon nopeudella etenevä vuorovaikutus on ristiriidassa kvanttimekaniikassa tunnetun lomittumisilmion kanssa. Lomittumisilmiö havaitaan esim. hiukkaspareilla; toisen hiukkasen tilanmuutos havaitaan välittömästi tilanmuutoksena myös toisessa hiukkasessa hiukkasten keskinäisestä etäisyydestä riippumatta.

1800-luvun alussa Laplace selvitti gravitaatiovuorovaikutuksen nopeutta planeettakunnan stabiilisuutta analysoidessaan. Hänen laskelmansa osoittivat, että planeettakunnan stabiilisuus edellyttää välitöntä tai ainakin suuruusluokkia valon nopeutta suurempaa gravitaatiovuorovaikutusta. Yleisen suhteellisuusteorian olettama valon nopeudella välittyvä gravitaatiovuorovaikutus haastoi Laplacen analyysin. Laplacen analyysiä on uudelleenarvioitu suhteellisuusteorian postulaattien pohjalta, joskaan kattavaa taivaanmekaniikkaa ei suhteellisuusteoria ole tuottanut. Keskustelua gravitaatiovuorovaikutuksen nopeudesta on hämärtänyt myös mahdollinen ero massakeskusten välisen gravitaatiovuorovaikutuksen nopeuden ja suhteellisuusteorian ennustamien gravitaatioaaltojen nopeuden välillä.

**Avoimia kysymyksiä***Todellisuuskuvan ongelma*

Suurimmat avoimet kysymykset liittynevät teorioiden viestittämään todellisuuskuvaan – ja sitä kautta teorioiden perusteisiin. Suhteellisuusteorian edellyttämät ajan ja erityisesti samanaikaisuuden suhteellisuus, ovat matemaattisesti käsiteltävissä, mutta arkijärjellä saavuttamattomissa. Matematiikkakaan ei ole ongelmatonta, sillä aika on perussuure, jota tarvitaan mm. energian ilmaisuissa. Ajan suhteellisuus tekee ensisijaisena luonnonlakina pidetyn energian säilymisen tarkastelun ongelmalliseksi. Ajan suhteellisuuden taustalla oleva suhteellisuusperiaate on kuitenkin niin keskeinen nykyfysiikan perustana olevalle suhteellisuusteorialle, että energian säilymisen vaatimuksesta yleisenä luonnonlakina on jouduttu luopumaan.

Myös kvanttimekaniikan tulkintaan ja käsitteisiin liittyy todellisuuskuvaongelmaa; kvanttimekaniikassa keskeinen aaltofunktio kuvaa tilojen toteutumisten todennäköisyyttä, vaikka itse aaltofunktiolle ei ole osoitettavissa fyysikaalista vastinetta. Kvanttilomittumien näyttäisi haastavan kausaalisuuden periaatteen; toisistaan erotetut hiukkasparin hiukkanen tunnistaa toiselle parin hiukkaselle tapahtuneen muutoksen samanaikaisesti hiukkasten etäisyydestä riippumatta.

Oman ongelmansa tuo yleisen suhteellisuusteorian ja kvanttimekaniikan erilainen postulaattikanta ja toisistaan poikkeavat rakenteet.

*Kosmologia ja yleinen suhteellisuusteoria*

Yleiseen suhteellisuusteoriaan perustuva FLRW-kosmologia ei anna vastausta avaruuden kokonaisrakenteelle eikä avaruuden laajenemisen kehittymiselle. Vuosituhannen vaihteessa teoriaan lisätty pimeä energia, jonka on päätelty kiihdyttävän avaruuden laajenemista, on vailla fysikaalista selitystä. Laajenevassa avaruudessa etenevä sähkömagneettinen säteily menettää energiaa, koska Planckin yhtälö tulkitaan säteilyn itseisominaisuudeksi. Kosmologiaan liittyviä avoimia kysymyksiä ovat lisäksi mm. alkuräjähdyksen käynnistäjä, antiaineen puuttuminen, mustien aukkojen teoria ja pimeän aineen ongelma.

### 3. Dynaaminen Universumi

*Dynaamisen Universumin malli (DU) on kirjoittajan omakohtainen näkemys fyysikaalisen todellisuuden kuvaamiseen. DU:n juuret yltävät jatko-opintojeni aikoihin 1960-luvun lopulle, jolloin jään pohtimaan aika-avaruuden ongelmaa: "Olemmekohan löytäneet oikeaa koordinaatistoa teorioidemme perustaksi? Olisiko todellisuus kuvattavissa koordinaatistossa, jossa ajalla ja etäisyydellä on yksiselitteinen merkitys?". Dynaamisen universumin mallin kehitys käynnistyi 1990-luvun puolivälissä, jolloin oivalsin, että subteellisuusteorian ennusteet ovat yksinkertaisella tavalla johdettavissa absoluuttisessa ajassa, kun huomaamme, että kaikkeen liikkeeseen avaruudessa liittyy avaruuden oma liike neljännessä ulottuvuudessa. Avaruuden liike neljännessä ulottuvuudessa oli tunnistettavissa avaruuden laajenemisen liikkeeksi; kun Einsteinin alkuperäisen ajatuksen tavoin kuvaamme kolmiulotteisen avaruuden neliulotteisen pallon sulkeutuvaksi pinnaksi ja hyväsymme avaruuden laajenemisen, on kaikella massalla avaruudessa liikemäärä ja sitä vastaava liikkeeseen energia 4-pallon säteen suunnassa, kohtisuorassa kolmea avaruussuuntaa vasten. Se on energia, joka avaruudessa havaitaan massan lepoenergiana. Neljättä ulottuvuutta ei siis tule ymmärtää ajan suuntana, vaan metrisenä ulottuvuutena, jossa pätevät samat fysiikan lait kuin kolmessa avaruussuunnassa. Nelidimensionaalisen pallon pinnaksi suljettu avaruus toimii säteittäisen heilurin tavoin: avaruuden massa saa energiansa omasta gravitaatiostaan supistumisvaiheessa ja luovuttaa sen takaisin gravitaation energiaksi käynnissä olevassa laajenemisvaiheessa. Avaruuden paikalliset rakenteet, prosessit ja ilmiöt kuvataan nollaenergiaperiaatteeseen nojautuen avaruuden liikkeen ja rakenteen energiatasapainon säilyttäen. Subteellisuuden kuvaamiseen ei tarvita muuttuvaa aikaa ja etäisyyttä; subteellisuus välittyy paikallisesti käytettävissä olevan energian kautta. Liikkeessä tai paikallisessa gravitaationvuorovaikutuksessa oleva kello ei "koe erilaista aikaa" kuten subteellisuusteoriassa, vaan käy hitaammin, koska osa sen energiasta on sidottu paikalliseen liikkeeseen tai gravitaatioon. Dynaamisen Universumin malli tuottaa tarkat ennusteet niin paikallisille ilmiöille kuin kosmologisille havainnoillekin – ilman pimeää energiaa tai muita kokeellisia parametrejä. DU tuottaa holistisen todellisuuskuvan ja teoreettisen viitekehyksen, joka tuo ymmärrettävyyttä myös kvanttimekaniikan ilmiöihin.*

#### Energian yhtenäinen ilmaiseminen

*Planckin yhtälön yhteys Maxwellin yhtälöihin*

Energiaperiaate oli 1800-luvun keskeinen tekijä fysiikan ja kemian silloisten osa-alueiden yhdistäjänä. Maxwell onnistui kuvaamaan havaittujen sähkömagneettisten ilmiöiden ominaisuudet potentiaalienergian ja liikkeen energian vuorovaikutuksina hypoteettisessa eetterissä. Maxwellin yhtälöt, jotka Oliver Heaviside muotoili vektorikentille, mahdollistivat sähkömagneettisen säteilyn emissioon ja absorptioon liittyvän energiakonversion analyysin, mistä periytyy nykyinen antenniteoria.

Planckin yhtälön taustana oli Max Planckin ajatus eri aallonpituuksilla toimivista monokromaattisista resonaattoreista mustan kappaleen säteilyn synnyttäjinä.

Yrityksistään huolimatta Planck ei löytänyt ajatukselleen tukea suuresti kunnioittamistaan Maxwellin yhtälöistä. Mustan kappaleen säteilyn analyysi näytti ongelmalliselta: jos sähkömagneettisen säteilyn oletetaan mustan kappaleen rajaamassa tilavuudessa muodostuvan vapaasti eri harmonisia taajuuksia omaavista seisovista aalloista, joudutaan ”ultraviolettikatastrofiin”, mikä tarkoittaa, että systeemin energiatiheys kasvaisi rajoituksetta korkeilla taajuuksilla.

Ultraviolettikatastrofiin johtavassa Rayleigh-Jeansin säteilymallissa on lähdetty sähkömagneettisen säteilyn aaltoyhtälöstä, mikä sallii rajattoman määrän korkeataajuisia aaltomuotoja. Mallissa ei ole analysoitu säteilyn emissiomekanismia mustan kappaleen seinämällä. Emitterit ja absorbaattorit on oletettu vapaiksi oskillaattoreiksi, jotka lähettävät ja vastaanottavat aaltoja ylläpitäessään systeemiä termisessä tasapainossa.

Planck oletti, että mustan kappaleen seinämällä olevat atomit ovat monokromaattisia oskillaattoreita, joiden ominaistajuudet ovat suoraan verrannolliset oskillaattorin termiseen energiaan. Kun emittereiden energiasisällön oletetaan seuraavan Boltzmannin jakautumaa, korkeiden taajuuksien esiintyminen pienenee ja ultraviolettikatastrofilta vältytään. Emittereiden voidaan olettaa noudattavan Maxwellin yhtälöitä, joten kysymys palautuu yksinkertaisimmillaan dipolivärähtelijän yhteen värähtelyjaksoon emittoimasta energiasta.

Maxwellin yhtälöiden ja Planckin yhtälön yhteys löytyy, kun monokromaattista oskillaattoria kuvataan emittoitavaan aallonpituuteen suhteutetulla dipoliantennilla. Kun sähkövakion  $\epsilon_0$  asemasta käytetään magneettivakiota  $\mu_0 = 1/\epsilon_0 c^2$  voidaan dipolin yhteen säteilyjaksoon emittoima energia ilmaista muodossa

$$E_\lambda = \frac{P}{f} = \frac{N^2 e^2 \epsilon_0^2 \mu_0 16\pi^4 f^4}{32\pi^2 r^2 c f} \frac{2}{3} 4\pi r^2 = N^2 \left( \frac{\epsilon_0}{\lambda} \right)^2 \frac{2}{3} (2\pi^3 e^2 \mu_0 c) f \quad (3.1)$$

missä  $N$  on dipolissa oskilloivien elektronien lukumäärä,  $\epsilon_0$  dipolin pituus,  $\lambda$  emittoidun säteilyn aallonpituus,  $f$  emittoidun säteilyn taajuus,  $e$  elektronin varaus,  $c$  valon nopeus ja kerroin  $2/3$  Hertzin dipoliin liittyvä geometriatekijä. Yhtä oskilloivaa elektronia kohti ( $N=1$ ) yhtälö (3.1) voidaan kirjoittaa muotoon

$$E_{\lambda(0)} = A (2\pi^3 e^2 \mu_0 c) f \quad (3.2)$$

missä  $A = (2/3)(\epsilon_0/\lambda)^2$  on dipolia kuvaava geometriatekijä. Sulkulausekkeella  $(2\pi^3 e^2 \mu_0 c)$  on Planckin vakion dimensio ja numeroarvo  $5,997 \cdot 10^{-34}$  [kgm/s<sup>2</sup>], mikä geometriatekijällä  $A = 1,1049$  tuottaa yhtälöstä (3.2) Planckin yhtälön

$$E_{\lambda(0)} = (1.1049 \cdot 2\pi^3 e^2 \mu_0 c) f = hf \quad (3.3)$$

Yhtälö (3.3) tarkoittaa, että emittoituun aallonpituuteen suhteutettu antenni, jonka geometriatekijä on 1,1049, emittoi yhteen säteilyjaksoon, yhtä antennissa värähtelevää elektronia kohti, energian  $E = hf$ . Planckin vakio voidaan ilmaista alkeisvarauksen ja magneettivakion  $\mu_0$  avulla lausekkeella

$$h = 1.1049 \cdot 2\pi^3 e^2 \mu_0 c \quad (3.3)$$

mikä osoittaa, että Planckin vakio sisältää ”piilotekijänä” valon nopeuden  $c$ . Kun piilotekijä poistetaan ja Planckin vakio korvataan ”pelkistetyllä” Planckin vakiolla  $h_0 = h/c$ , saa Planckin yhtälö muodon

$$E = h_0 \cdot c \cdot f = \frac{h_0}{\lambda} \cdot c^2 = m_{\lambda(0)} \cdot c^2 \quad (3.4)$$

missä suurella  $h_0/\lambda$  on massan dimensio [kg]. Yhtälön (3.4) määrittämä suure  $m_{\lambda(0)} = h_0/\lambda$  tarkoittaa aallonpituuden  $\lambda$  omaavan, yhden alkeisvarauksen oskilloinnin tuottaman sähkömagneettisen aallon jakson massaekvivalenttia.

Yhtälö (3.4) on samaa muotoa kuin massan lepoenergia  $E = h_0/\lambda \cdot c^2 = m_\lambda c^2$ , missä massaa  $m_\lambda$  vastaava aallonpituus on Compton aallonpituus,  $\lambda_{Compton} = h_0/m_\lambda$ .

#### *Pelkistetty Planckin vakio ja hienorakennevakio*

Edellä johdettu pelkistetty Planckin vakio  $h_0 = h/c$  on dimensioiltaan massa  $\times$  pituus [kgm], joten se kytkee säteilyn aallonpituuden  $\lambda$  ja aaltoluvun  $k=2\pi/\lambda$  jakson kuljetamaan massaan tai säteilyjakson *massaekvivalenttiin*

$$m_\lambda = N^2 \frac{h_0}{\lambda} \quad \text{tai} \quad m_\lambda = N^2 h_0 k \quad (3.5)$$

missä  $h_0 = h_0/2\pi$ . Emitterissä oskilloivien yksikkövarausten neliöstä  $N^2$  muodostuu säteilyjakson massaekvivalentille  $m$  intensiteettitekijä, joka atomaariselle *kvanttiemitterille* on 1, jolloin jaksoon emittoitu massaekvivalentti on  $m_\lambda = h_0/\lambda$ . Pelkistetyistä Planckin vakiosta saatu säteilyjakson massaekvivalentti vastaa Henry Poincarén vuonna 1900 Maxwellin ja Poyntingin yhtälöistä päättämää sähkömagneettisen säteilyn massatiheyttä  $m = E/c^2$ .

Planckin yhtälön palauttaminen sähkövakioiden avulla ilmaistuksi johdetuksi suureksi pelkistää alun perin Arnold Sommerfeldin löytämän *hienorakennevakion* muista luonnonvakioista riippumattomaksi numeeriseksi tekijäksi

$$a \equiv \frac{e^2 \mu_0 c}{2h} = \frac{e^2 \mu_0}{2h_0} = \frac{e^2 \mu_0}{2 \cdot 1.1049 \cdot 2\pi^3 e^2 \mu_0} = \frac{1}{1.1049 \cdot 4\pi^3} \simeq \frac{1}{137.0360} \quad (3.6)$$

#### *Energian yhtenäinen ilmaisu*

Pelkistetty Planckin vakio ja sen yhteys aallonpituuteen mahdollistavat yhtenäisen ilmaisun massan, sähkömagneettisen säteilyn ja Coulombin energialle

$$\text{Massan } m \text{ lepoenergia: } E_m = \frac{h_0}{\lambda_m} c^2 = m c^2 = \hbar_0 k_m c^2 \quad (3.7)$$

$$\text{Säteilyjakso } \lambda: \quad E_\lambda = \frac{h_0}{\lambda} c^2 = m_\lambda c^2 = \hbar_0 k_\lambda c^2 \quad (3.8)$$

$$\text{Coulombin energia: } E_{em(r)} = -\frac{e^2 \mu_0}{4\pi r} c^2 = -a \frac{h_0}{2\pi r} c^2 = -m_r c^2 = -\hbar_0 k_r c^2 \quad (3.9)$$

missä  $k = 2\pi/\lambda$  on aallonpituutta  $\lambda$  vastaava aaltoluku. Yhtälön (3.8) säteilyjakso on ”alkeissäteilyjakso”, joka syntyy yhden alkeisvarauksen, elektronin, värähtelystä emittterissä. Jos säteilyjakso on syntynyt  $N$ :n elektronin värähtelystä, tulee säteilyjakson energiaan intensiteettitekijä  $N^2$ . Yhtälö (3.9) kuvaa alkeisvarauksen Coulombin energiaa etäisyydellä  $r$  vastakkaismerkkisestä alkeisvarauksesta.

Massan ja aallonpituuden läheinen yhteys viestittää massasta aaltoluonteisena energian ilmentäjänä ja samalla massaobjektin lepoenergian ja sähkömagneettisen energian läheisestä yhteydestä.

*Planckin vakion pelkästyksellä massan ja aallonpituuden välisen yhteyden ilmaisijaksi ja Planckin yhtälön tulkinnalla emittterin ja absorbaattorin ominaisuutena on suuri merkitys sekä kvanttimekaniikan välittämän todellisuuskuvan tulkinnassa että kosmologisten ennusteiden johtamisessa.*

### *Kvanttiemitteri ja mustan kappaleen säteily*

Edellä johdettu Planckin yhtälön ja Maxwellin yhtälön yhteys merkitsee, että sähkömagneettisen säteilyn pienin annos eli kvantti on yksi säteilyjakso. Pienin energia, joka yhteen säteilyjaksoon emittoituu, on dipolissa heilahtavan yhden elektronin tuottama energia, mitä juuri Planckin yhtälö kuvaa. Yleisessä muodossa minkä tahansa antennin yhteen jaksoon emittoima energia voidaan ilmaista lausekkeella

$$E = A \cdot N^2 \frac{h_0}{\lambda} \cdot c^2 \quad (3.10)$$

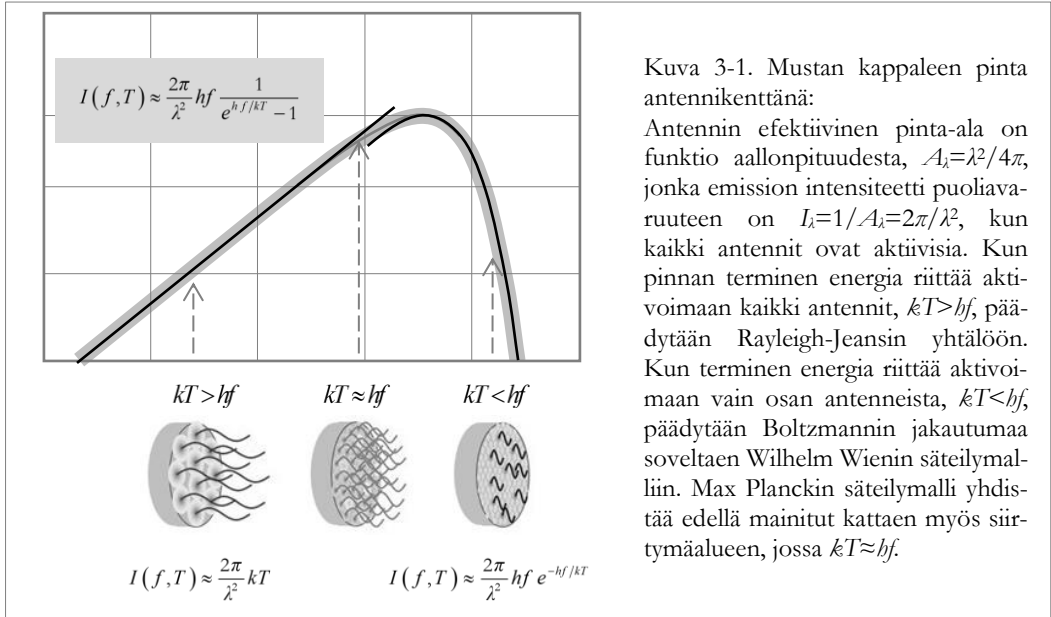
missä  $A$  on antennin geometriatekijä ja  $N$  antennissa värähtelevien elektronien lukumäärä. Planckin yhtälö kuvaa ”kvanttiemitteriä”, joka vastaa oleellisesti ottaen isotrooppista yhden aallonpituuden dipolia,  $A \cdot N^2 = 1$ .

*Miten alle nanometrin suuruinen vetyatomi, joka lähettää 21 cm mikroaaltosäteilyä, voi toimia aallonpituuden mittaisena kvanttiemitterinä?*

Max Planckin yhtälön syntyäikaan vuonna 1900 tälle ei olisi löytynyt selitystä. Ymmärrettävämmäksi se tulee, kun ajattelemme vetyatomia pistelähteenä DU-avaruudessa tai minkowskilaisessa aika-avaruudessa, jossa avaruussuuntiin nähden kohtisuoran viivaelementin  $\Delta s$  pituus ajassa  $\Delta t$  on  $\Delta s = c \cdot \Delta t$ , ja vastaavasti säteilyjakson  $T = 1/f$  aikana  $\Delta s = c \cdot T = c/f = \lambda$ . Max Planckin etsimät mustan kappaleen seinämien resonaattorit olisivat näin kuvattavissa atomaarisilla neljännen ulottuvuuden suuntaisina yhden aallonpituuden pituisina dipoleina, joille kaikki avaruussuunnat edustavat emissiolle suotuisaa normaalitasoa. Yhden elektronisiirtymän lähettämän säteilyjakson energia on tällöin Planckin yhtälön mukainen

$$E = b \cdot f = \frac{h_0}{\lambda} \cdot c^2 \quad (3.11)$$

Antennimallilla tulkittuna Planckin yhtälön mukainen säteilyn energia määräytyy emissiossa Maxwellin yhtälön mukaisesti. Nykyistä antenniteoriaa soveltaen mustan kappaleen pinta voidaan kuvata antennikentällä, jossa antennitiheyden määrää antennin efektiivinen pinta-ala,  $A_i = \lambda^2/4\pi$ . Pitkillä aallonpituuksilla pinnan terminen energia riittää aktivoimaan kaikki pinnan antennit, jolloin päädytään Rayleigh-Jeansin malliin. Lyhyiden aallonpituuksien emissiota rajoittaa pinnan terminen energia, joita



Kuva 3-1. Mustan kappaleen pinta antennikenttänä:

Antennin efektiivinen pinta-ala on funktio aallonpituudesta,  $A_i = \lambda^2/4\pi$ , jonka emission intensiteetti puoliavaruuteen on  $I_i = 1/A_i = 2\pi/\lambda^2$ , kun kaikki antennit ovat aktiivisia. Kun pinnan terminen energia riittää aktivoimaan kaikki antennit,  $kT > hf$ , päädytään Rayleigh-Jeansin yhtälöön. Kun terminen energia riittää aktivoimaan vain osan antenneista,  $kT < hf$ , päädytään Boltzmannin jakautumaa soveltaen Wilhelm Wienin säteilymalliin. Max Planckin säteilymalli yhdistää edellä mainitut kattaen myös siirtymäalueen, jossa  $kT \approx hf$ .

kuva, jota kuvaa Boltzmannin jakautuma, jolloin päädytään Wilhelm Wienin malliin. Yhdistämällä nämä kaksi mekanismia saadaan Planckin säteilylaki, kuva 3-1.

*Planckin yhtälön kuvaama energiakvantti on energia, jonka yksi elektroni emittoi yhteen säteilyjaksoon. Periaatteessa kvanttiemitteri/absorbaattori voi olla joko isotrooppinen tai suuntaava. Kvanttiemitteri/absorbaattori on ymmärrettävä kapeakaistaiseksi, aallonpituusselektiiviseksi antenniksi, mikä vastaa Max Planckin ajatusta monokromaattisesta resonaattorista. Säteilykvantin vastaanotto edellyttää, että saapuvan säteilyn aallonpituus vastaa resonaattorin aallonpituutta, ja että jakson energiasisältö antennin sieppauspinta-alalla on riittävä yhden elektronin virittämiseen. Valosähköisen ilmiön selittäminen ei edellytä lokalisoituneita valokvantteja.*

### Nollaenergiatasapaino

Neliulotteisen pallon pintana kuvattu 3-dimensionaalinen ”pinta” oli Einsteinin ensimmäinen ajatus yleisen suhteellisuusteorian mukaisesta avaruuden rakenteesta. 1900-luvun alun yleisen käsityksen mukaisesti Einstein etsi staattista ratkaisua, minkä vuoksi hän lisäsi teoriaan kuuluisan kosmologiavakionsa estämään rakenteen luhistumisen ”pallopinnassa” vaikuttavan gravitaation vuoksi.

Suljetun pallosymmetrisen avaruuden dynaaminen tulkinta merkitsee dynaamista tasapainoa palloa kasvattavan liikkeen ja sitä vastustavan gravitaation välillä. Fysikaalisesti se voidaan tulkita siten, että avaruus saa liikkeen energian (=aineen lepoenergian) rakenteen supistuessa ja luovuttaa sen takaisin gravitaatioenergiaksi rakenteen laajetessa, eli nykyisessä laajenemisvaiheessa. Matemaattisesti gravitaatioenergian ja liikkeen energian tasapaino voidaan esittää yhtälöllä

$$E_{m(tot)} + E_{g(tot)} = 0 \quad \Rightarrow \quad M_{tot} c^2 - \frac{GM_{tot} M''}{R_4} = 0 \quad (3.12)$$

missä  $M_{tot} = \Sigma m$  on kokonaisuudessaan avaruudessa,  $M''$  4-pallon keskipisteeseen sijoitettu massaekvivalentti  $M''=0,776 \cdot M_{tot}$ ,  $G$  gravitaatiovakio ja  $R_4$  avaruuden 4-säde, kuva 3-2.

Neliulotteisen pallon ”pintana” kuvatun avaruuden tilavuus on  $V=2\pi^2 R_4^3$ . Kun  $R_4$ :n arvoksi annetaan nykyinen arvio avaruuden kaarevuussädetä kuvaavasta Hubblen säteestä, 13,7 valovuotta, ja avaruuden massalle nykyisestä massatiheysarviosta saatava kokonaisuudessaan, saadaan avaruuden lepoenergiaksi

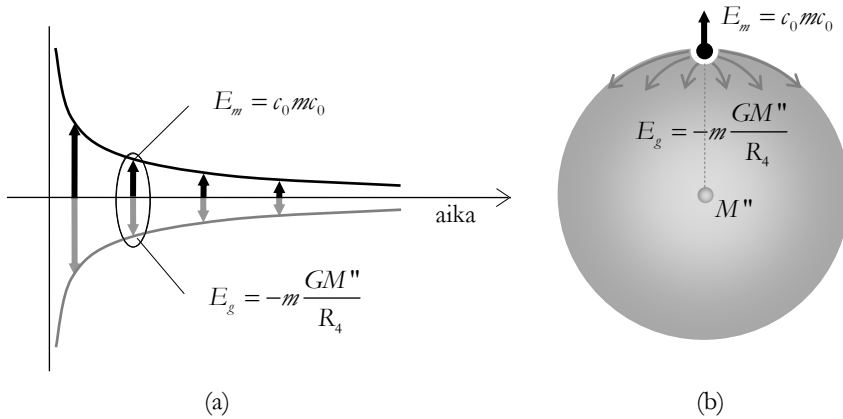
$$E_{rest(tot)} \approx M_{tot} c^2 \approx 2 \cdot 10^{70} \quad [\text{J}] \quad (3.13)$$

ja gravitaatioenergiaksi

$$E_{g(tot)} \approx -\frac{GM_{tot} M''}{R_4} \approx -2 \cdot 10^{70} \quad [\text{J}] \quad (3.14)$$

Nopeus  $c$  määräytyy avaruuden liikkeen ja gravitaation tasapainosta neljännessä ulottuvuudessa, missä se kuvaa avaruuden määrittelevän 4-pallon supistumis- ja laajenemisnopeutta

$$c \approx \mp \sqrt{\frac{GM_{tot}}{R_4}} \approx 300\,000 \quad [\text{km/s}] \quad (= \text{valon nopeus}) \quad (3.15)$$



Kuva 3-2(a) Liikkeen ja gravitaation nollaenergiatasapaino. Avaruuden 4-säteen suunnassa laajenevassa avaruudessa levossa olevan massaobjektin liike-energia havaitaan objektin lepoenergiana, joka on tasapainossa avaruuden muun massan synnyttämän gravitaatioenergian kanssa. Avaruuden muun massan vaikutus on kuvattavissa 4D pallon keskipisteeseen sijoitetun massaekvivalentin  $M''=0,776 \cdot M_{total}$  avulla. Avaruuden laajetessa liike tekee työtä gravitaatiota vastaan, joten laajenemisnopeus hidastuu. Nykytilanteessa suhteellinen hidastuminen on noin  $dc/c \approx 3,4 \cdot 10^{-11}$  vuodessa, mikä samalla merkitsee lepoenergian pienenevää. Avaruudessa fyysikaalisten prosessien nopeus, kuten esim. atomikellojen käyntinopeus määräytyy lepoenergiasta, joten hidastuminen on vain epäsuoraan havaittavissa.



Nollaenergiatasapaino kytkee maksiminopeuden ja samalla valon nopeuden avaruuden laajenemisnopeuteen neljännen ulottuvuuden suunnassa. Nollaenergiatasapaino kytkee myös massaobjektin lepoenergian avaruuden muun massan synnyttämään gravitaatioenergiaan. Avaruuden 4-keskustaan sijoitetun massaekvivalentin  $M''$  arvo  $M''=0,776 M_{tot}$  on saatu integroimalla etäisyyteen kääntäen verrannollinen gravitaatioenergia yli 4-pallon pintana kuvatun 3D avaruuden.

Avaruuden kokonaislepoenergian ja gravitaatioenergian yhtäsuuruus on tunnettu jo useita vuosikymmeniä. Gravitaatioluennoissaan 1960-luvulla Richard Feynman totesi asian seuraavasti <sup>105</sup>

*”Jos nyt vertaamme koko avaruuden gravitaatioenergiaa  $E_g=GM_{tot}^2/R$  avaruuden koko lepoenergiaan,  $E_{rest} = M_{tot} c^2$ , katsokaa, teemme hämmästyttävän havainnon, että  $GM_{tot}^2/R = M_{tot} c^2$  mikä merkitsee, että universumin kokonaisenergia on nolla. — On jännittävää ajatella, että uuden hiukkasen luominen ei maksa mitään, sillä voimme luoda sen universumin keskelle, jossa sillä on negatiivinen gravitaatioenergia, joka on yhtä suuri kuin  $M_{tot} c^2$ . — Miksi näin tulisi olla, on yksi suurista mysteereistä — ja siksi yksi fysiikan suurista kysymyksistä. Kaiken kaikkiaan, mikä merkitys olisi fysiikan opiskelulla, elleivät mysteerit olisi tärkeimpiä tutkittavia asioita.”*

Samassa luentosarjassaan hän pohti myös mahdollisuutta avaruuden kuvaamiseen neliulotteisen pallon pintana:

*”... Eräs kiehtova ehdotus on, että universumin rakenne on analoginen pallopinnan kanssa. Kulkiessamme mihin tahansa suuntaan pinnalla, emme koskaan kohtaa rajaa tai reunaa, silti pinta on rajattu ja äärellinen. Saattaa olla, että kolmedimensionaalinen avaruutemme on sellainen, kolmedimensionaalinen nelipallon pinta. Galaksien järjestys ja jakautuma näkemässämme maailmassa olisi silloin jokseenkin verrattavissa pyöreän pallon pintaan pürrettyihin pisteisiin.”* <sup>106</sup>

Ilmeisestikään Feynman ei tullut ajatelleeksi dynaamista ratkaisua, joka yhdistää nollaenergian ”suuren mysteerin” ”houkuttelevaan ajatukseen” pallosymmetrisesti suljetusta avaruudesta. Suhteellisuusteorian viitekehyksessä ongelman dynaamiselle ratkaisulle muodostaa ajan suuntana ymmärretty neljäs ulottuvuus, sillä nopeus tai liikemäärä ajan suunnassa ei ole fyysikaalisesti mielekäs käsite.

Dynaaminen avaruus toimii pallosymmetrisen heilurin tavoin; supistumisvaiheessa gravitaatiopotentiaali aktualisoituu liikkeeksi, laajenemisvaiheessa liike luovuttaa saamansa energian (aineen lepoenergian) takaisin rakenteen potentiaalienergiaksi. Lähtötilanteeksi voidaan ajatella homogeeninen avaruus, jossa kaikki massa on tasaisesti jakautunut 4-pallon pintana sulkeutuvaan avaruuteen. Reaaliavaruuden kuvaus voidaan johtaa homogeenisesta avaruudesta olettaen, että liikkeen ja gravitaation tasapaino avaruuden 4-säteen suunnassa säilyy massan kerääntyessä massakeskuksiin, mikä kuvaa suhteellisuuden ja valon nopeuden erityisaseman suorina seurauksina energiatasapainon säilymisestä.

Nollaenergiatarkastelu, jossa paikallisen massaobjektin lepoenergia on tasapainossa avaruuden muun massan kanssa syntyvän potentiaalienergian kanssa johtaa

<sup>105</sup> R. Feynman, W. Morinigo, and W. Wagner, Feynman Lectures on Gravitation (during the academic year 1962-63), Addison-Wesley Publishing Company, p. 10 (1995)

<sup>106</sup> R. Feynman, W. Morinigo, and W. Wagner, Feynman Lectures on Gravitation (during the academic year 1962-63), Addison-Wesley Publishing Company, p. 164 (1995)

holistiseen todellisuuskuvaan. Paikalliseen massaobjektiin liittyy erottamattomasti yli koko avaruuden ulottuva gravitaatiopotentiaali.

*Avaruuden kaiken massan yhteisvaikutuksesta syntyvä gravitaatiopotentiaali on ymmärrettävä skalaarikenttänä, jossa avaruuden jokaisessa pisteessä on määrätty gravitaatiopotentiaalin arvo. Paikallinen massaobjekti tunnistaa avaruuden muun massan synnyttämän gravitaatiopotentiaalin omaan massaansa verrannollisena gravitaatioenergiana ja gravitaatiopotentiaalin gradientin gravitaatiovoimana.*

### *Liike avaruudessa*

Filosofisesti tarkastellen suhteellisuus viestittää resurssien äärellisyydestä. Newtonin mekaniikan mukaan massaobjektin nopeus kasvaa kohti ääretöntä vakiovoiman vaikuttaessa kappaleeseen. Suhteellisuusteoria määritteli valon nopeuden rajanopeudeksi; suppean suhteellisuusteorian aikadilaatiolla ja pituuskontraktiolla korjattu Newtonin toinen liikelaki on tulkittavissa siten, että kiihdytettävän objektin liikemäärä (tai massa) kasvaa kohti ääretöntä nopeuden lähestyessä valon nopeutta. Tämä tarkoittaa, että massaobjektin kiihdyttäminen valon nopeuteen avaruudessa vaatisi äärettömän paljon energiaa.

Vastaava päätelmä valon nopeuden asemasta ja kiihdytettävän massaobjektin liikemäärän kasvusta voidaan dynaamisessa avaruudessa tehdä ilman suhteellisuusteoriassa tarvittavia aikadilaatio- ja pituuskontraktio-oletuksia. 4D pallon pinnaksi suljetussa avaruudessa levossa olevalla massalla on pallon laajenemisliikkeestä johtuva nopeus  $c$  neljännessä ulottuvuudessa. Kun liikkeen energia ilmaistaan avaruudessa nopeudella  $c$  etenevän valon energian tapaan muodossa

$$E_m = c \cdot |\mathbf{p}| = c \cdot mc = mc^2 \quad (3.16)$$

voidaan aineen lepoenergia tunnistaa avaruuden laajenemiseen liittyväksi liikkeen energiaksi. Neljäs, avaruussuuntia vastaan kohtisuora ulottuvuus, on havainnollista kuvata imaginaarisuuntana, jolloin lepoenergia ilmaistaan muodossa

$$E_{\text{rest}} = E_m = c \cdot i mc \quad (3.17)$$

Tämä tarkoittaa, että jokaiseen liikemäärään avaruudessa liittyy avaruuden liikkeen tuoma kohtisuora liikemäärä neljännessä ulottuvuudessa.

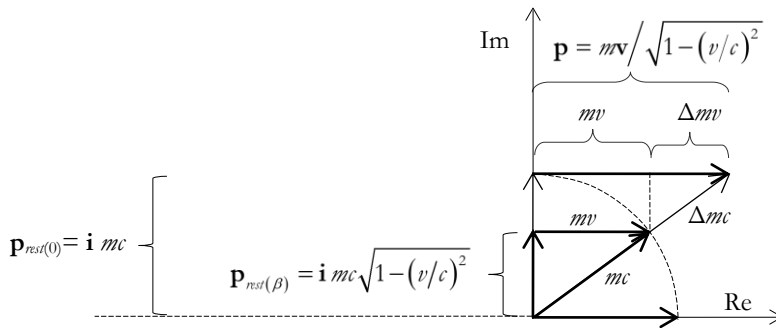
Kuvassa 3-3 on havainnollistettu kompleksifunktiona ilmaistun kokonaisenergian ja liikemäärän rakennetta. Kokonaisliikemäärä muodostuu osasta  $mc$ , joka on lepotilan lepoliikemäärän suuruinen, ja lisäosasta  $\Delta mc$ , joka liittyy liikkeen aikaansaamiseen

$$|\mathbf{p}_{\text{tot}}| = mc + \Delta m \cdot c = (m + \Delta m) c \quad (3.18)$$

Kun merkitsemme kokonaisliikemäärän osan  $mc$  reaalikomponenttia  $mv$ :llä ja  $\Delta mc$ :n reaalikomponenttia  $\Delta mv$ :llä, saadaan avaruudessa, reaaliakselin suunnassa, havaittavalle liikemäärälle  $\mathbf{p}$  lauseke

$$\mathbf{p} = (m + \Delta m) \mathbf{v} = m\mathbf{v} / \sqrt{1 - (v/c)^2} \quad (3.19)$$

ja kokonaisenergialle lausekkeet



Kuva 3-3. Avaruudessa nopeudella  $\mathbf{v}$  ( $=\beta c$ ) liikkuvan massaobjektin liikemäärä  $\mathbf{p}$  on kokonaisliikemäärän  $p_{tot}=mc+\Delta mc$  reaalikomponentti. Osa  $mv=\text{Re}\{mc\}$  ja  $\Delta mv=\text{Re}\{\Delta mc\}$ , ts. kokonaisliikemäärän suuntaan kääntynyt lepoliikemäärä  $mc$  luovuttaa liikkeen  $\mathbf{v}$  suuntaan komponentin  $mv$ , jolloin liikkuvan objektin lepoliikemääräksi jää  $\mathbf{p}_{rest(v)}=i mc\sqrt{1-(v/c)^2}$ . Liikemäärää  $\Delta mc$  vastaava energia  $\Delta E=c\cdot\Delta mc$  on objektin kineettinen energia, joka on saatu liikkeen synnyttämiseen luovutetusta energiasta.

$$E_{tot} = c \cdot (m + \Delta m)c = c \cdot mc / \sqrt{1 - (v/c)^2} = c \cdot \sqrt{(mc)^2 + p^2} \quad (3.20)$$

jotka ovat tarkalleen samat kuin suppean suhteellisuusteorian kinemaattisella johdolla ja niihin liittyvillä koordinaatistomuunnoksilla saadut lausekkeet.

Eriyksen tärkeä viesti, joka on nähtävissä havainnollisesti kuvassa 2-1 on, että kokonaisliikemäärän suuntaan ”kääntyneen” lepoliikemäärän  $mc$  luovuttaessa osan  $mv$  reaaliakselin suuntaan esiintyvälle, avaruudessa havaittavalle liikemäärälle  $\mathbf{p}$ , pienenee vastaava imaginaariakselin suuntaan havaittava lepoliikemäärä

$$\mathbf{p}_{rest(\beta)} = i mc \sqrt{1 - (v/c)^2} \quad (3.21)$$

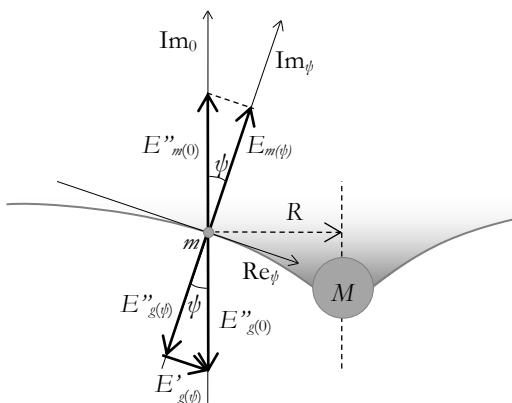
mikä voidaan tulkita nopeudella  $v=\beta c$  avaruudessa liikkuvan objektin lepomassan pienenemisenä. Seurauksena on mm., että nopeudella  $v=\beta c$  avaruudessa liikkuvan atomaarisen värähtelijän taajuus pienenee kertoimella  $\sqrt{1-(v/c)^2}$ , mikä on sama, joka suppean suhteellisuusteorian kinemaattisella tarkastelulla selitettiin ajan kulun muutoksella.

Jokainen liike pallosymmetrisesti suljetussa avaruudessa on keskeisliike avaruuden 4-keskipisteen suhteen. Keskeisliikkeen synnyttämä keskeisvoima pienentää avaruuden muun massan neljännen ulottuvuuden suunnassa vaikuttavaa gravitaatiovoimaa. Inertiaalityö, joka matemaattisesti näkyy kineettisen energian imaginaarikomponenttina (=lepoenergian pientyminen), on työ, joka liikettä synnytetessä tehdään avaruuden muun massan gravitaatiota vastaan, mikä tarkoittaa Machin periaatteen kvantitatiivista selitystä.

### Paikallisten massakeskesten synty

Avaruuden kaikesta massasta syntyvä, imaginaariakselin suunnassa vaikuttava globaali gravitaatioenergia muodostuu homogeenisessa avaruudessa paikalliseen testimassaan nähden symmetrisesti joka suunnasta vaikuttavasta gravitaatiosta. Paikallisen massakeskuksen muodostuminen merkitsee paikallista symmetrian särkymistä, mikä synnyttää reaalikomponentin, paikallisen avaruuden suuntaisen komponentin gravitaatioenergiaan. Reaalikomponentin,  $E'_g$ , syntyminen homogeenisen avaruuden gravitaatioenergian  $E''_{g(0)}$  säilyttäen, merkitsee paikallisen avaruuden taipumista neljännen ulottuvuuden suuntaan, jolloin paikallinen imaginaarisuunta  $\text{Im}_\psi$  muodostaa kulman  $\psi$ , homogeenisen avaruuden imaginaarisuuntaan  $\text{Im}_0$  nähden, kuva 3-4.

Avaruuden taipuma ja reaalikomponentin syntyminen gravitaatioenergiaan  $E''_{g(0)}$ , merkitsee vastaavan reaalikomponentin syntymistä myös liikkeen energiaan ja nopeuteen; vapaan pudotuksen nopeus  $v_{ff}$  kaartuneessa avaruudessa syntyy ortogonaalisena komponenttina avaruuden paikalliselle imaginaarinopeudelle  $c$ , joka määrää paikallisen valon nopeuden, kuva 3-5.

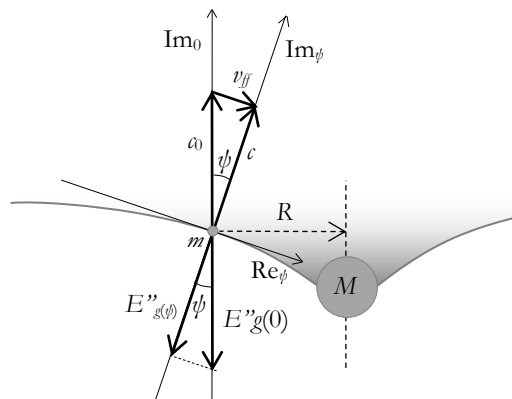


Kuva 3-4. Liikkeen ja gravitaation energian säilyminen vapaassa pudotuksessa. Objektin lepoenergia ja imaginaarinen gravitaatioenergia paikallisesti kaareutuneessa avaruudessa ovat pienempiä kuin vastaavat energiat homogeenisessa avaruudessa,

$$E''_{g(\psi)} = E_{g(0)} \cos \psi = E_{g(0)} (1 - \delta)$$

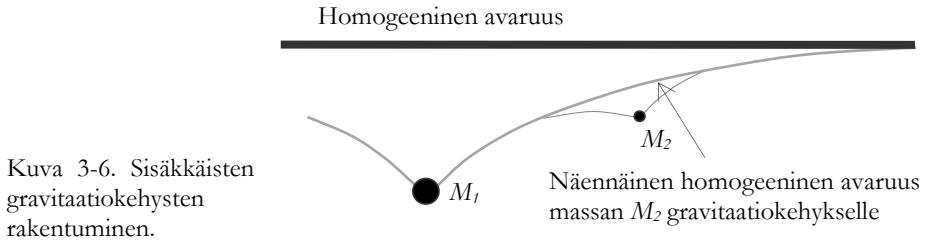
$$E''_{m(\psi)} = E''_{m(0)} (1 - \delta),$$

missä  $\delta = GM/Rc^2$ .



Kuva 3-5. Avaruuden taipuma massakeskuksen läheisyydessä kääntää osan avaruuden liikkeestä liikkeeksi avaruudessa. Homogeenisen avaruuden imaginaarinen nopeus  $c_0$  jakautuu keskenään ortogonaalisiin, avaruuden paikalliseen imaginaarinopeuteen  $c$ , ja paikallisen avaruuden suuntaiseen vapaan pudotuksen nopeuteen,  $v_{ff}$ . Paikallinen valon nopeus gravitaatiotilassa  $\delta$  on avaruuden paikallisen imaginaarinopeuden suuruinen,

$$c_\delta = c_0 (1 - \delta).$$



Kuva 3-6. Sisäkkäisten gravitaatiokehysten rakentuminen.

*DU-avaruudessa paikallinen gravitaatio ei vaikuta ajan kulkuun kuten suhteellisuusteoriassa, vaan paikalliseen valon nopeuteen ja siten myös paikallisten massaobjektien lepoenergiaan ja mm. atomikellojen käyntinopeuteen.*

Avaruudessa massakeskusten muodostuminen on monivaiheinen prosessi. Jokaisessa vaiheessa muodostuu avaruuden painautuma ympäristöönsä nähden sekä siihen liittyvä paikallisen lepoenergian ja valon nopeuden pieneneminen, kuva 3-6.

#### *Sisäkkäisten energiakehysten järjestelmä*

Kuva 3-7 havainnollistaa dynaamisen avaruuden energiakirjanpidolle keskeistä sisäkkäisten energiakehysten systeemiä. Reaaliavaruudessa objekti kuuluu useaan sisäkkäiseen gravitaatio- ja liikejärjestelmään. Maan pinnalla kuulumme maan gravitaatiokehykseen, jossa meillä on maan pyörimisnopeudesta johtuva nopeus ja paikallinen gravitaatiotila, aurinkokunnan gravitaatiokehykseen, jossa maapallon gravitaatiokehyksellä on ratanopeutensa ja gravitaatiotilansa, Linnunradan gravitaatiokehykseen, jossa aurinkokunnalla on oma ratanopeutensa ja gravitaatiotilansa, jne.

Yleisessä muodossa paikalliskehyksessä  $n$  gravitaatiotilassa  $\delta_n$  nopeudella  $\beta_n$  liikkuvan objektin lepoenergia on muotoa

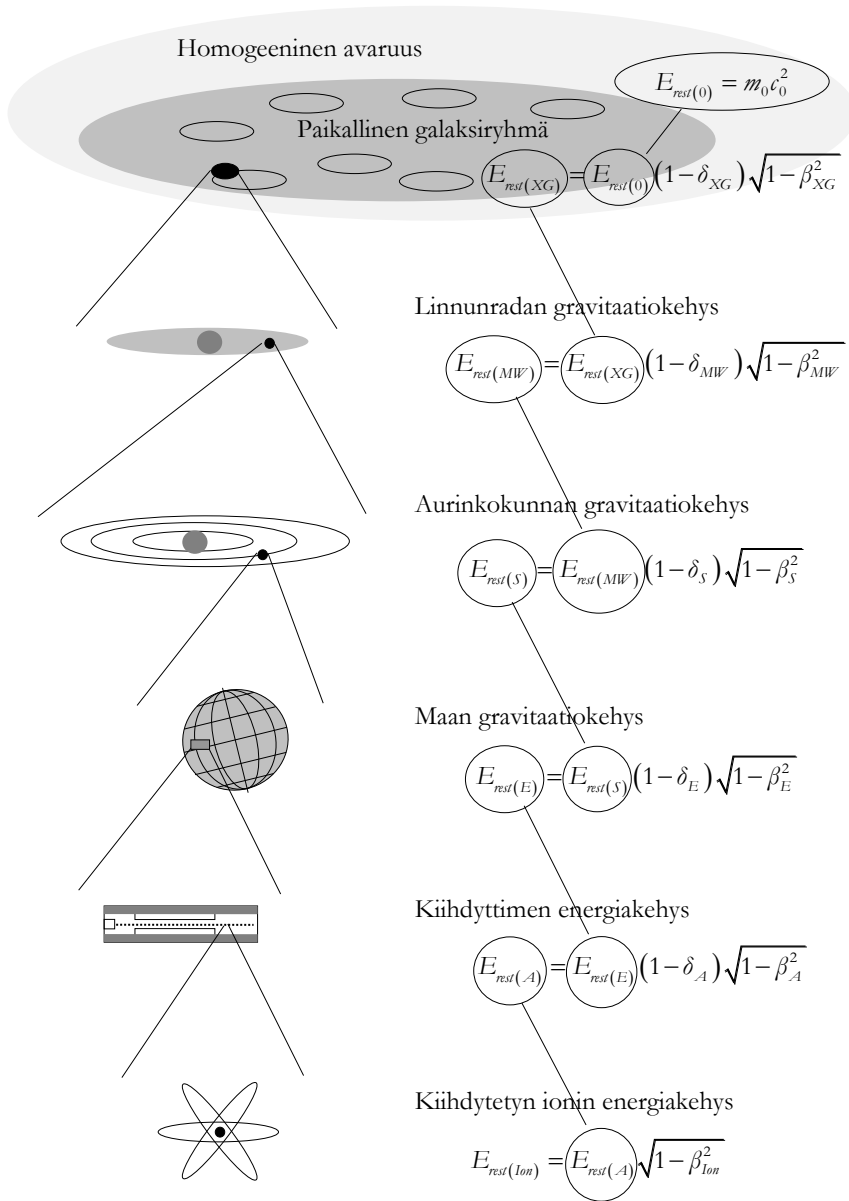
$$E_m = c_0 mc = c_0 m_0 c_0 \prod_{i=1}^n (1 - \delta_i) \sqrt{1 - \beta_i^2} \quad (3.22)$$

missä  $m_0$  ja  $c_0$  ovat objektin massa ja valon nopeus hypoteettisessa homogeenisessa avaruudessa. Yhtälössä (3.22) gravitaatiotekijät  $(1 - \delta_i)$  määräävät paikallisen valon nopeuden ja nopeustekijät  $\sqrt{1 - \beta_i^2}$  paikallisessa liiketilassa havaittavan lepomassan

$$c = c_0 \prod_{i=1}^n (1 - \delta_i) \quad \text{ja} \quad m = m_0 \prod_{i=1}^n \sqrt{1 - \beta_i^2} \quad (3.23)$$

Atomaaristen värähtelijöiden, kuten atomikellojen, taajuus on suoraan verrannollinen oskilloivien elektronien lepoliikemäärään, joten värähtelijöiden taajuudelle voidaan kirjoittaa yhtälöä (3.22) vastaava lauseke

$$f_n = f_{(0,0)} \prod_{i=1}^n (1 - \delta_i) \sqrt{1 - \beta_i^2} \quad (3.24)$$



Kuva 3-7. Sisäkkäisten energiakeräysten järjestelmä. Jokainen energiakeräys sitoo osan objektin lepoenergiasta. Kiihdytetyn ionin energiatilaan ei liity gravitaatiotilan muutosta kiihdyttimessä, joten lepoenergiaa alentaa vain nopeustekijä. Kiihdyttimellä on sekä liike- että gravitaatiotila maapallon energiakeräyksessä, maapallolla auringon energiakeräyksessä, aurinkokunnalla Linnunradan energiakeräyksessä, Linnunradalla paikallisen galaksiryhmän energiakeräyksessä ja paikallisen galaksiryhmän energiakeräyksellä homogeenisessa avaruudessa.

Yhtälössä (3.24)  $f_{(0,0)}$  on värähtelijän taajuus levossa hypoteettisessa homogeenisessä avaruudessa. Paikallisessa gravitaatiokehyksessä, kuten maapallolla ja lähiavaruudessa, yhtälö (3.24) pelkistyy muotoon

$$f_{(\beta,\delta)} = f_{(0,\beta,0\delta)} (1-\delta) \sqrt{1-\beta^2} \quad (3.25)$$

missä  $f_{(0,\beta,0\delta)}$  on kellon taajuus levossa maapalloon nähden kaukana maapallosta ja  $\beta$  ja  $\delta$  nopeus ja gravitaatiotekijät maapallon gravitaatiokehyksessä (ECI-kehyksessä, Earth Centered Inertial Frame). Yhtälö (3.25) on DU vastine yleisen suhteellisuusteorian Schwarzschildin ratkaisusta johdetulle vastaavalle lausekkeelle ajan hidastumisesta

$$dt_{(\beta,\delta)} = dt_{(0,0)} \sqrt{1-2\delta-\beta^2} \quad (3.26)$$

Maapallolla ja lähiavaruudessa yhtälöiden (3.25) ja (3.26) ennusteet ovat oleellisesti ottaen samat, eroa syntyy vasta 18:n desimaalin kohdalla.

### *Globaali ja paikallinen lepotila*

Sisäkkäisten energiakehysten järjestelmä suhteuttaa jokaisen energiatilan avaruudessa lepotilaan paikalliskehyksessään, isäntäkehyksessään ja lopulta lepotilaan kuvitteellisessa homogeenisessä avaruudessa. Liike ja paikallinen gravitaatio kussakin energiakehyksessä pienentää objektin lepoenergiaa. Pienentynyt lepoenergia havaitaan esim. atomikellojen pienentyneenä käyntinopeutena liiketilassa.

### **Kvantin käsite**

Planckin yhtälön johto Maxwellin yhtälöistä kuvaa energiakvantin yhteen säteilyjaksoon emittoituna energiana. Radio-insinöörin käsittein kvantti on pienin annos sähkömagneettista säteilyä; *se on säteilyjakso, jonka antenni lähettää yhtä elektronin oskillaatiota kohti.*

Säteilykvantti ei määrittele aallon jakautumista avaruuteen. Jakautuminen määräytyy antennin geometriasta. Yksidimensionaalinen resonaattori, kuten laser lähettää kaupan aaltojonon yhteen avaruussuuntaan.

Absorbaattori on emitterin tavoin kuvattavissa dipolina tai minä tahansa antennina. Elektronisiirtymän tapahtuminen l. säteilykvantin absorbtio edellyttää, että

- 1) *saapuvan aallon taajuus vastaa vastaanottavan dipolin resonanssitaajuutta,*
- 2) *dipolin efektiivisellä alueella (antennin sieppauspinta-alalle) saapuvan aaltorintaman sisältämä energia vastaa vähintään kvantin energiaa = yhden elektronisiirtymän vaatimaa energiaa.*

Tämä tarkoittaa mm., että valosähköinen ilmiö, jossa absorbtiossa esiintyy määrätty energiakynnys, on absorbaattorin, ei säteilyn ominaisuus. Valosähköinen ilmiö ei edellytä säteilykvantin, fotonin, hiukkasluonnetta. Absorbaattorin (antennin) selektiivisyys on ensisijaisesti selektiivisyyttä aallonpituuden (ja taajuuden) suhteen, ja vain epäsuorasti selektiivisyyttä energian suhteen.

### Energiaobjektin aaltokuvauks

Energiaobjektina kuvatun massaobjektin liikkeen kokonaisenergia voidaan ilmaista massan aaltoekvivalenttia  $m = h_0 k$  käyttäen

$$E_m^{\text{a}} = c_0 h_0 k_{\beta} c = c_0 (i h_0 k_0 c + h_0 k_{\beta} \beta c) \quad (3.27)$$

missä  $h_0 k_0$  ilmaisee objektin lepotilan lepomassan  $m$  ja  $h_0 k_{\beta}$  objektin liikemassan  $(m + \Delta m)$ . Objektin liiketilan lepoliikemäärä on

$$p_{\text{rest}(\beta)} = h_0 k_0 c \sqrt{1 - \beta^2} \quad (3.28)$$

Objektiin kiinnitettyssä energiakehyksessä objekti on levossa, ja se on kuvattavissa aaltoluvun  $k_{\text{rest}(\beta)} = k_0 \sqrt{1 - \beta^2}$  omaavien vastakkaisten aaltojen muodostaman seisovan aallon sisältävänä resonaattorina.

Objektin liikkuaessa paikalliskehyksessä nopeudella  $\beta$ , resonaattorin vastakkaisuun-taisiin aaltoihin kohdistuu vastakkaiset Doppler-siirtymät; liikkeen suuntaisen aallon aaltoluku kasvaa ja liikettä vastaan etenevän aallon aaltoluku pienenee. Doppler-siirtyneiden aaltojen kantamien liikemäärien ero ilmenee paikalliskehyksessä objektin nopeudella etenevänä aaltona, jonka aaltoluku on  $k_{\beta}$  ja liikemäärä,

$$\mathbf{p}'_{(\beta)} = \frac{h_0 k_0 \cdot \beta c}{\sqrt{1 - \beta^2}} \hat{\mathbf{r}} = \frac{m}{\sqrt{1 - \beta^2}} \mathbf{v} = \frac{\beta m}{\sqrt{1 - \beta^2}} \mathbf{c} \quad (3.29)$$

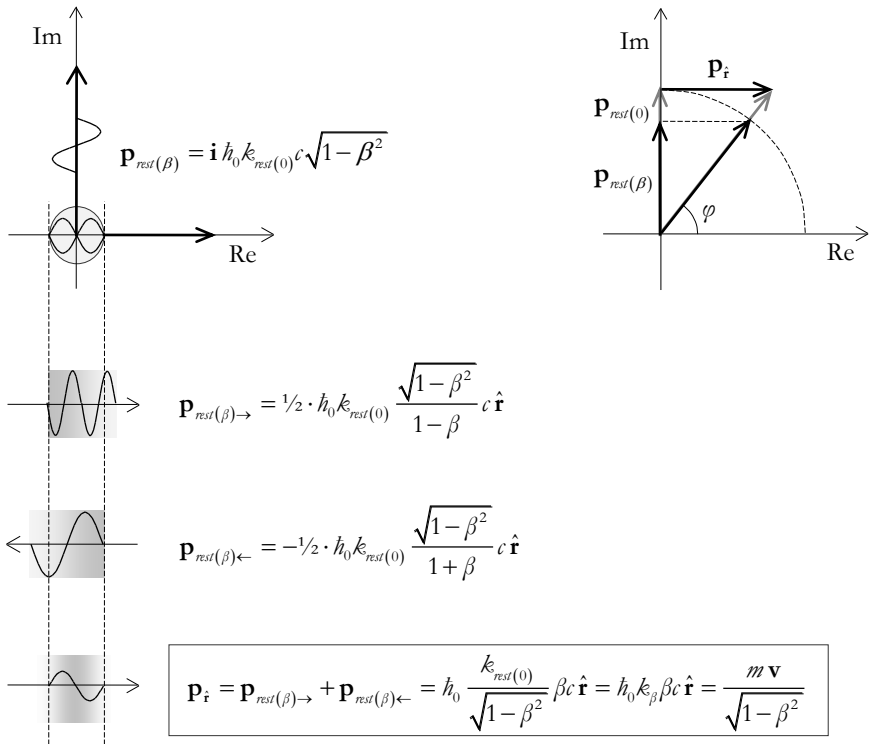
Yhtälön (3.29) liikemäärä voidaan tunnistaa nopeudella  $v = \beta c$  liikkuvan massaobjektin  $m'_{\text{eff}} = m / \sqrt{1 - \beta^2}$  liikemääräksi tai valon nopeudella  $c$  liikkuvan massan  $m'_{\text{eff}} = \beta m / \sqrt{1 - \beta^2}$  liikemääräksi, joka vastaa deBroglie aallon synnyttämää liikemäärää, kuva 3.8.

Edellä käsitelty massa-aaltoresonaattorin kuvaus pätee sellaisenaan energiaobjektina tarkasteltavalle sähkömagneettisten aaltojen muodostamalle resonaattorille. Resonaattoriin kiinnitettyssä energiakehyksessä resonaattoria voidaan tarkastella lepotilassa olevana, jolloin sen aaltoluku on pienentynyt samalla tavoin kuin aaltoluku massa-aaltoresonaattorissa. Resonaattori säilyttää resonanssitilan liiketilassa, mikä riittää selittämään Michelson-Morley tyypisissä interferometrimittauksissa resonaattoreilla saadut nollatulokset myös maapallon pyörimisen suhteen<sup>107</sup>.

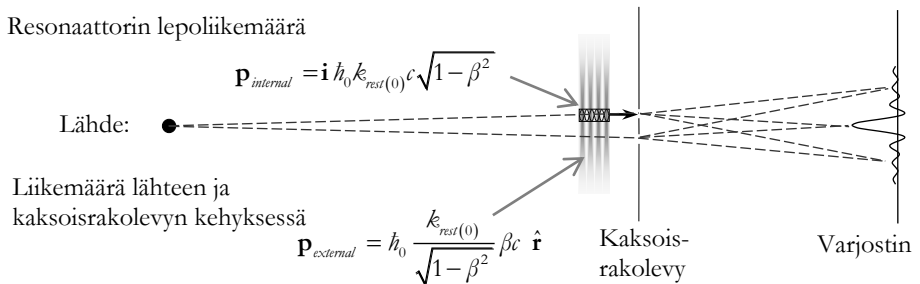
Resonaattorin Doppler-siirtyneiden aaltojen summa-aallon voidaan päätellä antavan paikallisessa energiakehyksessä liikkuvalla massaobjektilla sen paikallisessa energiakehyksessä havaittavat aaltoluonteiset ominaisuudet kuten interferenssin kaksoisrakokokeessa, kuva 3-9. Resonaattorin sisäinen, aaltolukuun  $k_{\beta(\text{rest})}$  perustuva seisova aalto objektiin kiinnitettyssä energiakehyksessä kuvaa paikallista lepotilaa.

<sup>107</sup> A. Brillat and J.L. Hall, Phys. Rev. Lett. **42**, 9 (1979) 549





Kuva 3-8. Avaruussuunnassa  $\mathbf{r}$  nopeudella  $\beta$  liikkuvan massaobjektin kuvaaminen Compton aaltoluvun  $k_{rest(\beta)}$  omaavana nopeuden suuntaisena resonaattorina. Doppler-ilmiö kasvattaa liikkeen suuntaisen massa-aallon aaltolukua ja pienentää vastakkaisen massa-aallon aaltolukua. Aaltolukujen erotuksena syntyy liikkeen suuntainen aalto, jonka liikemäärä on  $\mathbf{p}'_{(\beta)}$ . Aalto kuvaa objektin liikemäärää objektin rinnalla etenevänä massa-aaltona.



Kuva 3-9. Resonaattorina kuvattu objekti kaksoisrakokeksessä. Objektin rinnalla liikemäärää kuljettava massa-aalto läpäisee kummankin raon riippumatta siitä, kummasta raosta itse objekti kulkee. Varjostimella havaitaan liikemääräaallon synnyttämä interferenssikuvio.

### Vetyatomien perustilat

Vetyatomien elektronin energia ydintä kiertävän resonoivan massa-aallon kineettisen ja potentiaalienergian summana voidaan ilmaista yhtälöllä

$$E_n = E_{kin} + E_{Coulomb} = c_0 \hbar_0 k_m c \left[ \sqrt{1 + (n/k_m r)^2} - 1 - Za/k_m r \right] \quad (3.30)$$

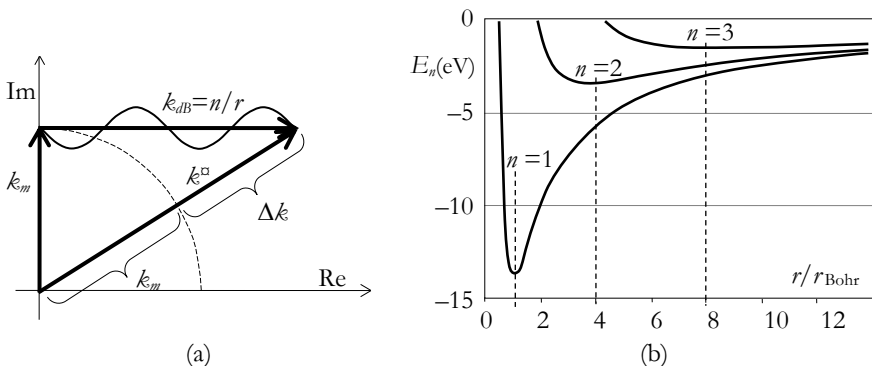
missä elektronia kuvaavan massa-aallon liikemäärä on  $\hbar_0 c \cdot (r/n)$  ja Coulombin energia on esitetty pelkistetyin Planckin vakion ja hienorakennevakion  $a$  avulla. Kuva 3-10 esittää yhtälön (3.30) mukaista energiaa elektroniaallon radan säteen  $r$  ja kvanttiluvun  $n$  funktiona. Energia  $E_n$  saavuttaa minimiarvonsa kun

$$E_{Z,n} = -c_0 mc \left[ 1 - \sqrt{1 - (Za/n)^2} \right] \approx -(Z/n)^2 a^2 / 2 \cdot mc^2 \quad (3.31)$$

mikä vastaa kvanttimekaniikan formalismissa ”relativistista” ratkaisua. Sivukvanttilukuja vastaavien energiatilojen ratkaisu edellyttää, että elektronin massa-aalto esitetään aaltoyhtälön muodossa pallokoordinaatistossa, jolloin saadaan näkyviin kaikki palloharmoniset ratkaisut.

Kuten kuvan 3-10 energiakäyristä havaitaan, energiatilat kullakin kvanttiluvun  $n$  arvolla ovat jatkuvia orbitaalisäteen  $r$  suhteen. ”Kvantittuneet” energiatilat tarkoittavat siis resonanssiehdon täyttävien tilojen energiaminimejä.

Esitetty ratkaisu on sukua Bohrin ja erityisesti Sommerfeldin ”vanhan kvanttimekaniikan” mukaiselle ratkaisulle. Oleellinen ero kuitenkin on Planckin vakion ”pelkistyksestä” seuraavasta massa-aallon käsitteestä. Massa-aaltoon perustuva ratkaisu käsittelee elektronia orbitaalille jakautuneena massa-aaltona, eikä näin ollen tarvitse klassista pistemäistä elektronia kuten vanhan kvanttimekaniikan puoliklassiset ratkaisut.



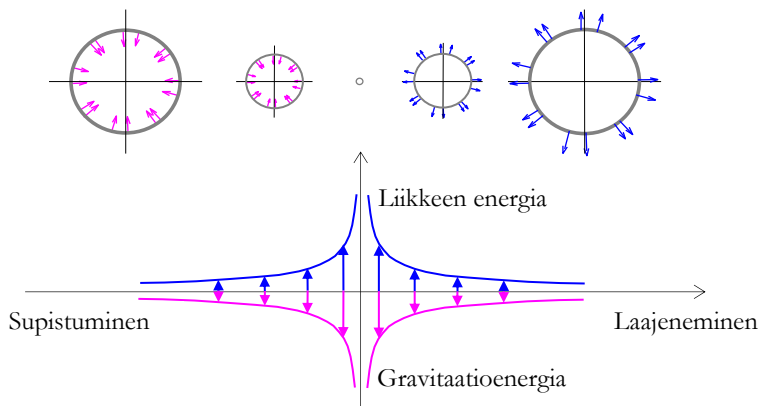
Kuva 3-10. Vetyatomien elektronin perustilat massa-aallon resonanssiehdosta ratkaistuna. (a) kompleksisen massa-aallon reaalikomponentin  $k_{dB}=n/r$  resonanssiehto. (b) Yhtälön (3.30) mukaiset kokonaisenergiat, kun  $n = 1, 2, 3$ . Elektroni hakeutuu kullakin  $n:n$  arvolla yhtälön (3.31) mukaiseen energiatilan minimienergiaan, joka vastaa tarkalleen kvanttimekaniikan antamia energioita.

## Havainnot ja todellisuuskuva

### Energian rakentuminen Dynaamisessa Universumissa

Koko avaruuden lepoenergian ja gravitaatioenergian yhtäsuuruus on tunnettu usean vuosikymmenen ajan. Yhtäsuuruuden mahdollista viestiä ei yleisen suhteellisuusteorian viitekehyksessä kuitenkaan ole tunnistettu. Dynamisen universumin viitekehyksessä lepo- ja gravitaatioenergian yhtäsuuruus viestittää nollaenergiaperiaatteesta, ja palauttaa Aristoteleen *entelecheian*, potentiaalisuuden aktualisoitumisen, ensisijaisen luonnonlain asemaan. Gravitaatio edustaa avaruudessa kaikkialla läsnä olevaa potentiaalisuutta liikkeen aktualisoimiseen. DU-avaruus kuvataan neliulotteisen pallon sulkeutuvana, 3-ulotteisena pintana. Supistumisvaiheessa rakenne luovuttaa gravitaatioenergiansa liikkeen energiaksi, joka avaruudessa havaitaan massan lepoenergiana. Lepoenergia on ”lainaa” gravitaation energialta. Laajenemisvaiheessa liike palauttaa energiansa rakenteen potentiaalienergiaksi, kuva 3-11. Avaruus kehittyy tyhjiydestä äärettömän kaukana menneisyydessä ja palaa tyhjiyteen äärettömän kaukana tulevaisuudessa. Se, jatkuuko laajeneminen äärettömyyteen vai kääntyykö laajeneminen lopulta uuteen supistumisvaiheeseen jää avoimeksi kysymykseksi. Massa saa merkityksen energian ilmentämisen substanssina. Massa ilmentää energiaa joko gravitaation tai liikkeen kautta.

DU kytkee aineen energian ilmenemisen ja alkuperän koko avaruuden dynamiikkaan ja suhteuttaa liikkeen avaruudessa koko avaruuden liikkeeseen. Suhteellisuus dynaamisessa avaruudessa ilmenee ensisijaisesti paikallisen suhteen kokonaisuuteen; suhteellisuus on seurausta kokonaisenergian äärellisyydestä ja ilmaistaan paikallisessa gravitaatio- ja liiketilassa käytettävissä olevan energian avulla. DU-avaruus ei tarvitse suhteellisuusperiaatetta eikä kinemaattisin perustein johdettuja koordinaatistomuunnoksia eri liike- tai gravitaatiotiloissa tehtävien havaintojen kuvaamiseen.



Kuva 3-11. Massan lepoenergian rakentuminen gravitaatioenergiasta avaruuden supistumisvaiheessa ja palautuminen gravitaatioenergiaksi laajenemisvaiheessa.

Objektin paikallisen gravitaation ja liikkeen energia avaruudessa on peräisin koko avaruuden gravitaatioenergiasta ja liikkeen energiasta (lepoenergiasta); mitä enemmän objekti käyttää energiaansa paikallisessa avaruudessa, sitä vähemmän energiaa jää käytettäväksi objektin sisäisiin, lepoenergiaan verrannollisiin, prosesseihin, mikä havaitaan esim. liikkeessä tai massakeskittymän läheisyydessä olevan atomikellon käyntitajuuden alenemisena. Yhtenä seurauksena paikallisen ja kokonaisuuden kytkeytymisestä on avaruuden paikallisten gravitaatiojärjestelmien kytkeytyminen avaruuden laajenemiseen, galaksit ja planeettakunnat laajenevat suhteessa avaruuden laajenemiseen. Atomit, molekyylit ja sähkömagneettisin vuorovaikutuksin sitoutuneet systeemit eivät laajene avaruuden laajetessa.

### *Avaruuden tulevaisuus*

Nykyinen teoria kuvaa avaruuden synnyn yksittäisenä tapahtumana. Se ei sisällä enustetta laajenevan avaruuden kohtalolle tulevaisuudessa. Avaruuden laajenemisen kehittyminen on sidottu massatiheyteen ja teoriaan 2000-luvun alussa lisätyn pimeän energian määrään. Nykyisen teorian mukaan avaruuden laajeneminen jatkuu kohti ääretöntä kiihtyvällä nopeudella.

DU-avaruus laajenee hidastuvalla nopeudella laajenemisen tehdessä työtä rakenteen gravitaatiota vastaan. DU ei ota kantaa avaruuden supistumis-laajenemisjaksojen toistumiseen, toistuvat jaksot merkitsisivät sykkivää universumia.

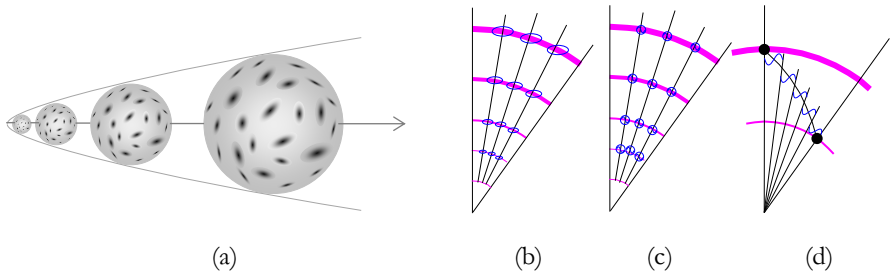
### **Laajenevat ja ei-laajenevat objektit ja järjestelmät**

Nykyisessä teoriassa gravitaatiolla sidotut paikalliset systeemit, kuten kvasaarit, galaksit ja planeettajärjestelmät eivät laajene avaruuden laajetessa. Myös atomit ja kiinteät taivaankappaleet säilyttävät mittansa. Avaruudessa etenevän sähkömagneettisen säteilyn aallonpituus kasvaa suoraan verrannollisena avaruuden laajenemiseen.

Paikallisjärjestelmien, kuten galaksien koon säilymisen päätteli Willem de Sitter 1930-luvun alussa paikallisen energian säilymisestä. de Sitterin päätelmät jäivät osaksi FLRW kosmologiaa. Avaruuden laajenemista kuvataan Hubblen virtana (Hubble flow), joka etäännyttää paikallisjärjestelmiä toisistaan.

DU-avaruudessa gravitaatiolla sidotut paikalliset järjestelmät laajenevat avaruuden laajenemisen mukana. Atomit ja kiinteät kappaleet eivät laajene. Avaruudessa etenevän sähkömagneettisen säteilyn aallonpituus kasvaa suoraan verrannollisena avaruuden laajenemiseen, kuva 3-12.

Paikallisjärjestelmien laajeneminen avaruuden laajenemisen mukana on suora seuraus kokonaisenergia säilymisestä avaruudessa. Tämä merkitsee mm., että maa ja planeetat loittonevat auringosta ja kuu etäänntyy maasta. DU:ssa kaikki vaikuttaa kaikkeen. Kun maa on lähimpänä aurinkoa tammikuun alussa, kasvaa kuun etäisyys maasta. Valon nopeus maan ympäristössä alenee, samoin atomikellojen käyntitajuus. Kuun etäisyyden mittauksessa laser-säteen edestakaisella kulkuajalla kaikki nämä tekijät kumoavat toisensa siten, että tulos on vuodenajasta ja siis maan ja auringon välisestä etäisyydestä riippumaton.



Kuva 3-12. (a) Avaruus laajenevan 4D pallon 3D pintana. (b) Gravitaatiolla sidotut systeemit kuten galaksit ja planeettakunnat laajenevat suoraan verrannollisina avaruuden laajenemiseen, (c), atomit ja atomeista rakentuvat kiinteät kappaleet eivät laajene, (d) avaruudessa etenevä sähkömagneettinen säteily laajenee suoraan verrannollisina avaruuden laajenemiseen.

## Vuorokauden ja vuoden pituuden kehittyminen

### *Päivien lukumäärä vuodessa*

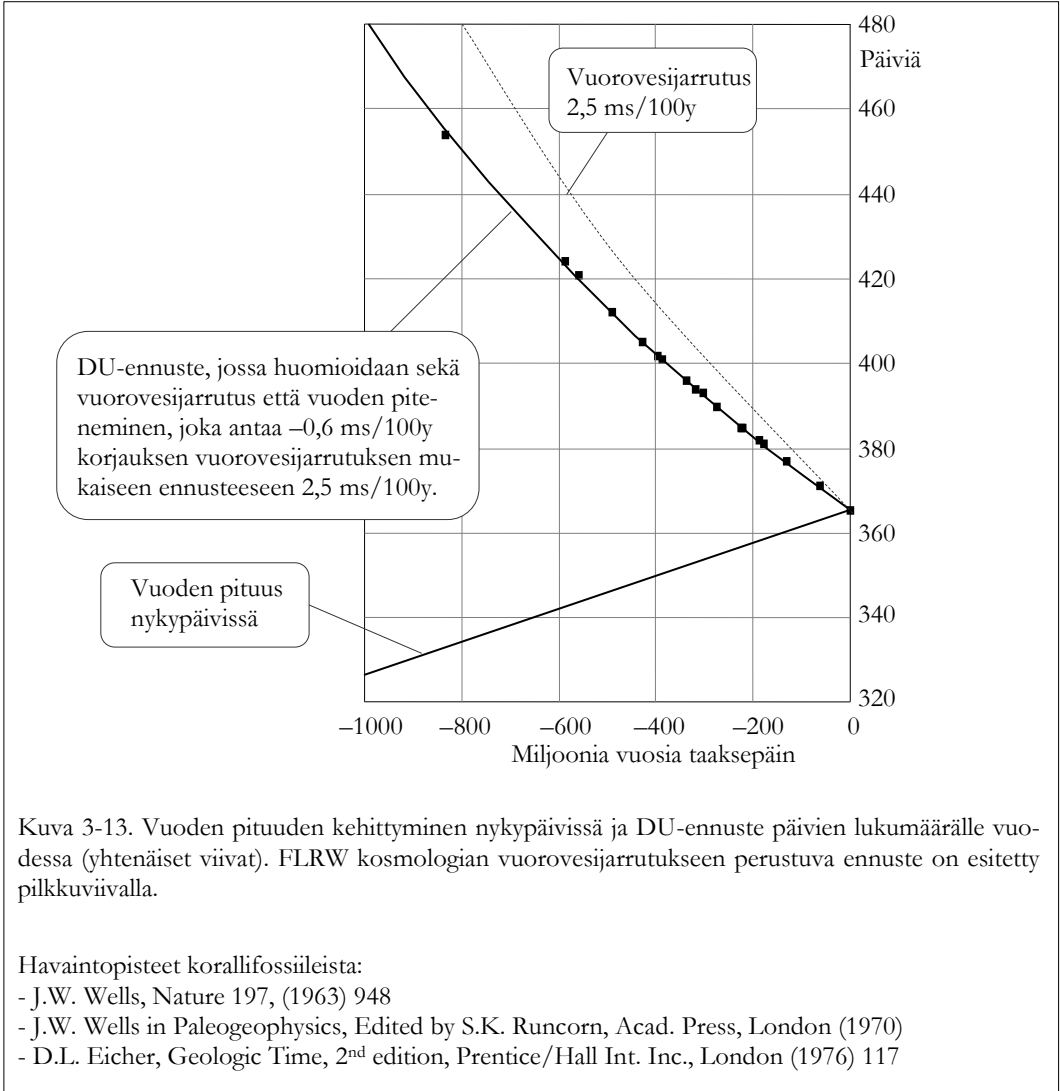
Päivien pituuden ja vuotuisen lukumäärän kehittymistä on voitu jäljittää auringonpimennystiedoista lähes kolmen vuosituhannen ajalta, korallifossiileista lähes miljardin vuoden ajalta. Nykyisen teorian mukaan aurinkokunta ei laajene avaruuden laajetessa, ja vuoden pituus säilyy muuttumattomana. Maapallon pyörimistä hidastaa vuorovesi-ilmiö sekä kuun että auringon gravitaatiovaikutuksen johdosta, mikä merkitsee, että päivien lukumäärä vuodessa pienenee.

Babyloniassa ja Kiinassa muistiin merkittviä auringonpimennyshavaintoja on lähes 3000 vuoden takaa<sup>108,109</sup>. Niistä laskettu päivän pitenemä on noin 1,9 ms/100 vuotta. Korallifossiilien päivä- ja vuosirenkaista on voitu laskea päivien lukumäärän kehitys vuodessa lähes miljardin vuoden ajalta, kuva 3-13. Kun DU-mallin mukainen vuoden pitenemä huomioidaan, on korallifossiileista laskettu nykyinen päivän pitenemä jokseenkin sama 1,9 ms/100 vuotta kuin auringonpimennyksistä laskettu pitenemä. Nykyteorian mukainen, pelkistä vuorovesivuorovaikutuksista laskettu päivän pitenemä on noin 2,5 ms/100 vuotta. Päivän pitenemistä on mitattu atomikelloilla 1950-luvulta lähtien. Ilmoitettu arvo on 1,5 ms/100 vuotta. Tähän on DU:n mukaan lisättävä atomikellon oma muutos, 0,3 ms/100 vuotta, jolloin päästään lähelle 1,9 ms/100 vuotta, mikä on korallifossiileista laskettu päivän pitenemä.

DU:n mukaan aurinkokunta laajenee avaruuden laajenemisen mukana, mikä merkitsee, että etäisyys aurinkoon ja kuuhun kasvaa ja vuosi pitenee. Vuorovesivaikutukset näkyvät DU-mallissa samoin kuin standardimallissa. Kun DU:n mukainen vuoden piteneminen huomioidaan päiviä/100 vuotta laskelmassa, vastaa saatu ennuste hyvällä tarkkuudella havaintoja, kuva 3-13.

<sup>108</sup> Stephenson, F. R.; Morrison, L. V., *Philosophical Transactions: Physical Sciences and Engineering*, Volume 351, Issue 1695, pp. 165-202 (1995)

<sup>109</sup> F. R. Stephenson, L. V. Morrison, C. Y. Hohenkerk, *Measurement of the Earth's rotation: 720 BC to AD 2015*, *Proceedings of the Royal Society A*, 7 December 2016. DOI: 10.1098/rspa.2016.0404, <http://rspa.royalsocietypublishing.org/content/472/2196/20160404>



### *Kuun etääntyminen maasta*

Suhteellisuusteorian mukaan avaruuden laajeneminen ei vaikuta kuun etäisyyteen maasta, eikä maan radan eksentrisyys tuo kuun etäisyyteen vuotuista vaihtelua.

Maan ja kuun välistä etäisyyttä on mitattu jo 1970-luvulta lähtien suurella tarkkuudella amerikkalaisessa Lunar Laser Ranging avaruusohjelmassa<sup>110</sup>. Mittaus perustuu laser-pulssin edestakaisen kulkuajan tarkkaan mittaamiseen. Mittausta varten kuun pinnalle on asetettu peili, josta maasta lähetetty mittaussignaali heijastuu takaisin maahan. Lunar Laser Ranging ohjelmassa maan ja kuun välisen etäisyyden on

<sup>110</sup> J.O. Dickey, et.al. Science 265 (1994) 482

havaittu kasvavan 3,8 cm/vuosi. Nykyisen teorian mukaan kasvu selitetään kokonaisuudessaan auringon ja kuun vuorovesivaikutuksilla.

Dynaamisen Universumin viitekehyksessä planeettajärjestelmien ratojen säteet kasvavat suhteessa avaruuden laajenemiseen. Kuun etäisyydessä nykyinen laajenemisnopeus merkitsee noin 2,8 cm:n vuotuista kasvua, mikä tarkoittaa, että havaitusta 3,8 cm:n kasvusta vain noin 1 cm jää selitettäväksi vuorovesivaikutuksilla.

Maan ja kuun väliseen etäisyyteen vaikuttavat monet tekijät, kuten vuorovesi, auringon säteilypaino, jne. Erityisen kiinnostava on häiriö, joka aiheutuu maan radan elliptisyydestä auringon ympärillä.

Radan perihelipisteessä maan ja kuun välinen etäisyys saavuttaa maksiminsa. Samalla maan ratanopeus on suurimmillaan ja auringon gravitaatiopotentiaali pienimmillään, mitkä molemmat tekijät hidastavat kuun etäisyyden mittauksessa käytettyjen kellojen käyntiä. Auringon gravitaatiopotentiaalista johtuen myös valon nopeus maan ympäristössä on pienimmillään. Kun kaikki nämä tekijät huomioidaan, ei kuun etäisyyden vuotuista muutosta havaita laser-mittauksessa, minkä havainnot vahvistavat.

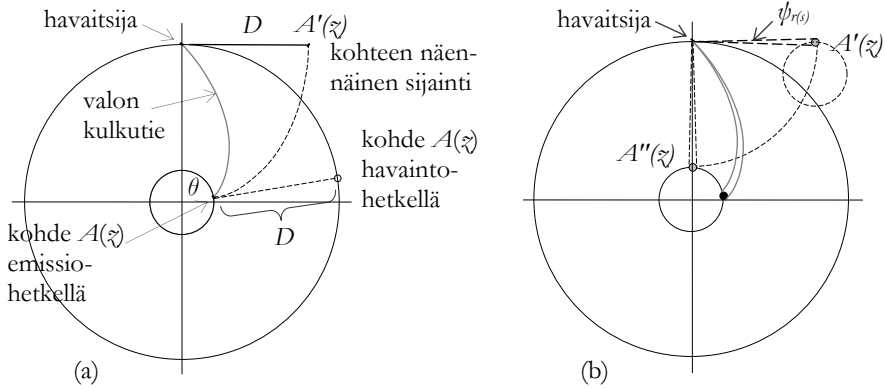
## Kaukoavaruuden havaitseminen

### *Valon eteneminen laajenevassa avaruudessa*

Pallosymmetristä avaruutta voidaan luonnehtia kaareutuneeksi kolmiulotteiseksi avaruudeksi, jonka kaarevuussäde on neljännen ulottuvuuden suunnassa. Aika ei ole ulottuvuus vaan skalaarinen koordinaatistosuure, joka ilmenee yhtäläisesti nopeuden käsitteessä avaruuden kolmessa ulottuvuudessa kuin avaruuden nopeudessa neljännessä ulottuvuudessa. Universaali aika mahdollistaa dynamiikan sekä avaruudessa että neljännessä ulottuvuudessa, ja toimii yhteisenä mittana nopeuksille, taajuuksille ja yleisesti kaikille muutoksille. 4D pallon pinnaksi suljetun avaruuden laajeneminen merkitsee nopeutta neljännessä ulottuvuudessa; etäisyys  $dR_4 = v_0 dt$  on matka, jonka avaruus laajetessaan etenee aikavälin  $dt$  kuluessa 4-säteensä suunnassa.

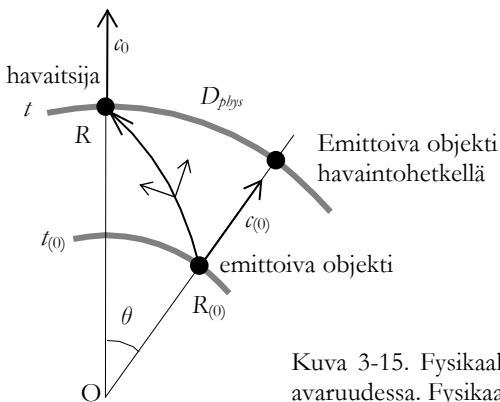
Avaruuden koon ja nopeuden määrää avaruuden dynamiikka. Dynaamiselta kannalta katsottuna avaruus on 3-ulotteinen ”nollaenergiapinta”, joka supistuu ja laajenee 4-ulotteisessa universumissa. Supistumisesta ja laajenemisesta johtuva liikemäärä ja liikkeen energia havaitaan aineen lepoliikemääränä ja lepoenergiana avaruudessa. Sähkömagneettinen säteily etenee neljättä ulottuvuutta vastaan kohtisuorissa avaruussuunnissa. Sähkömagneettisen säteilyn etenemisnopeus määräytyy avaruuden nopeudesta paikallisen neljännen ulottuvuuden suunnassa. Sähkömagneettisen säteilyn liikemäärä ilmenee vain säteilyn etenemissuunnassa – avaruuden laajeneminen antaa säteilylle etenemissuuntaan nähden kohtisuoran siirtymän tai ”vapaakyydin” neljännessä ulottuvuudessa.

Kosmologiset kohteet havaitaan näennäisesti lineaarisessa euklidisessa avaruudessa, vaikka valon kulkutie seuraa kaareutunutta 3-ulotteista avaruutta, kuva 3-14.



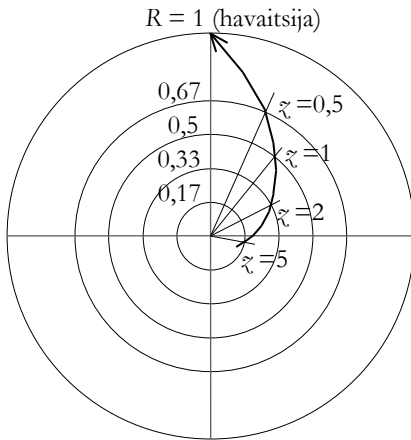
Kuva 3-14. (a) Valon eteneminen laajenevassa pallosymmetrisesti suljetussa avaruudessa. Kuvien projektioidissa ympyröiden kehät edustavat avaruussuuntaa ja säteen suunta neljättä ulottuvuutta. Valon kulkutie avaruudessa on avaruutta kuvaavan ympyrän kehän suuntainen. Etäisyys kohteen näennäiseen sijaintiin  $A'(z)$  on optinen etäisyys  $D = R_{(observation)} - R_{(emission)}$ , joka on 4D kulkutien tangentialinen komponentti. (b) Kohteen kulmakoko  $\psi_{r(s)}$  näennäisessä sijainnissa  $A'(z)$  on yhtä suuri kuin kulmakoko hypoteettisessa sijainnissa  $A''(z)$  etäisyydellä  $D$  säteen  $R_4$  suunnassa.

Valo etenee 4-pallon pinnan suunnassa samalla nopeudella kuin pallo laajenee säteensä suunnassa. Havaittu valon nopeus on valon avaruudessa kuljettaman energian siirtonopeus. Kohteen optinen etäisyys määrytyy kohteesta havaintsijaan laajenevassa avaruudessa kulkeman tien pituudesta. Koska valon nopeus avaruudessa on koko kulkuajan yhtä suuri kuin avaruuden 4-säteen kasvunopeus, on optinen etäisyys yhtä pitkä kuin avaruuden 4-säteen muutos valon kulkuajana, kuva 3-15, 3-16.



Kuva 3-15. Fysikaalisen ja optisen etäisyyden muodostuminen suljetussa avaruudessa. Fysikaalisella etäisyydellä (koordinaatistoetäisyydellä) tarkoitetaan kohteen etäisyyttä havaintohetkellä. Havainnoinnin kannalta tärkein etäisyys on kohteen optinen etäisyys, joka on kulkutien tangentialisen komponentin integroitu pituus. Koska valon nopeus avaruudessa (tangentialisessa suunnassa) määrytyy avaruuden radiaalisesta nopeudesta, on optinen etäisyys yhtä suuri kuin avaruuden 4-säteen kasvu valon kulkuajana.





Kuva 3-16. Avaruuden 4-säteen  $R$  pituus ja kohteen sijainti punasiirtymillä  $z = 0 \dots 5$ . Sijainti  $R = 1$  on havaitsijan sijainti. Spiraalin muotoinen nuoli kuvaa valon etenemistä avaruuden laajetessa. Kuvassa valon, joka on lähtenyt liikkeelle  $R_4$ -säteen ollessa 0,17, punasiirtymä on  $z = 5$  valon edettyä matkan  $D = (1-0,17)R_4$  laajenevassa avaruudessa.

#### Kohteen kulmakoko ja kirkkaus

Avaruuden laajetessa, kokonsa (halkaisijan  $d$ ) säilyttävän kohteen kulmakoko saadaan suoraan optisesta etäisyydestä

$$\psi_{r(z)} = \frac{d}{D} = \frac{d}{R_0} \frac{z+1}{z} \quad (3.21)$$

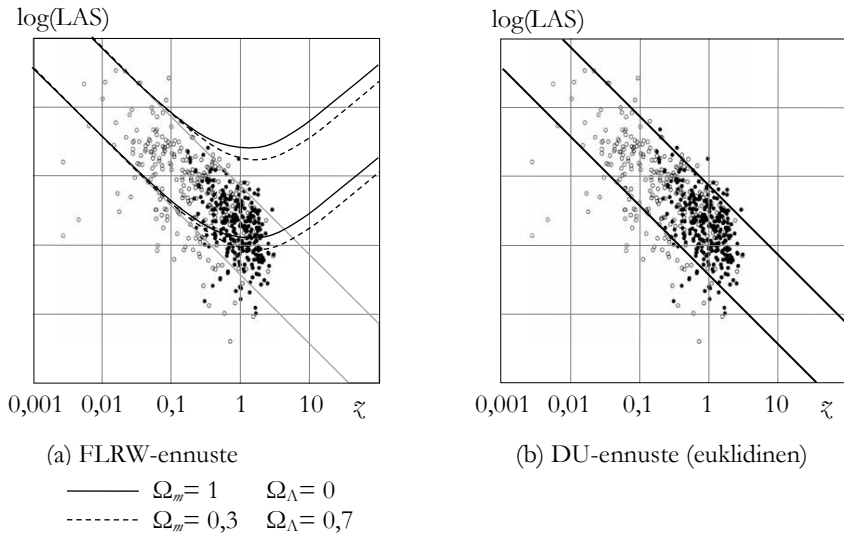
Kokonsa säilyttäviä objekteja ovat kiinteästä aineesta muodostuvat taivaankappaleet. Galaksit ja muut gravitaatiolla sidotut systeemit laajenevat suoraan verrannollisina avaruuden laajenemiseen (toisin kuin yleiseen suhteellisuusteoriaan perustuvassa kosmologiassa), joten niiden kulmakoko on

$$\psi_{r(z)} = \frac{d_R / (1+z)}{D} = \frac{d_R}{R_0} \frac{1}{z} \quad (3.22)$$

missä  $d_R$  on kohteen halkaisija havaintohetkellä. Yhtälö (3.22) merkitsee, että laajenevista kohteista muodostuva avaruus näyttää havaitsijalle euklidiselta, ts. kohteet näyttävät pienentyvän suoraan verrannollisina etäisyyteen.

Nykyisen FLRW kosmologia ennustaa, että kvasaarien ja galaksien havaittava kulmakoko (=kohteen halkaisijan suhde sen etäisyyteen havaitsijasta) pienenee lähiavaruudessa suoraan verrannollisesti etäisyyden kasvuun, mutta kasvaa lähes suoraan verrannollisena etäisyyteen hyvin suurilla etäisyyksillä, kohteen etäisyyttä kuvaavan punasiirtymän arvoilla  $z > 10$ , kuva 3-17(a).

Suurilla etäisyyksillä ennustettu havaittavan kulmakoon kasvu johtuu suhteellisuusperiaatteeseen perustuvasta tulkinnasta, jonka mukaan havaittava kulmakoko on sama kuin se on ollut valon lähtiessä kohteesta. Ennusteeseen vaikuttaa myös se, että FLRW kosmologian mukaan galaksit ja kvasaarit eivät laajene avaruuden laajetessa.



Kuva 3-17. Havaintoja galaksien (avoimet ympyrät) ja kvasaarien (mustat ympyrät) kulmakooosta (LAS) punasiirtyäalueella  $0.001 < z < 3$ <sup>111</sup>. (a) FLRW-kosmologian ennusteet kaksille tiheysparametrien arvoilla. (b) DU-avaruuden euklidinen ennuste (3.22) vastaa hyvin havaintoja.

Havainnot eivät tue ennusteen mukaista kulmakoon suurenemista, kuva 3-17. Pimeän energian vaikutus ennusteeseen on vähäinen. DU:n mukaan kvasaarien ja galaksien havaittava kulmakoko pienenee suoraan verrannollisesti etäisyyden kasvuun kaikilla etäisyyksillä, mikä tarkoittaa, että galaksiavaruus havaitaan Euklidisena. DU:n Euklidinen ennuste on suora seuraus avaruuden pallosymmetriasta, laajenemisnopeuteen kytkeytyvästä valon nopeudesta ja galaksien ja kvasaarien laajenemisesta avaruuden laajenemisen mukana. DU:n ennuste vastaa havaintoja, kuva 3-17(b).

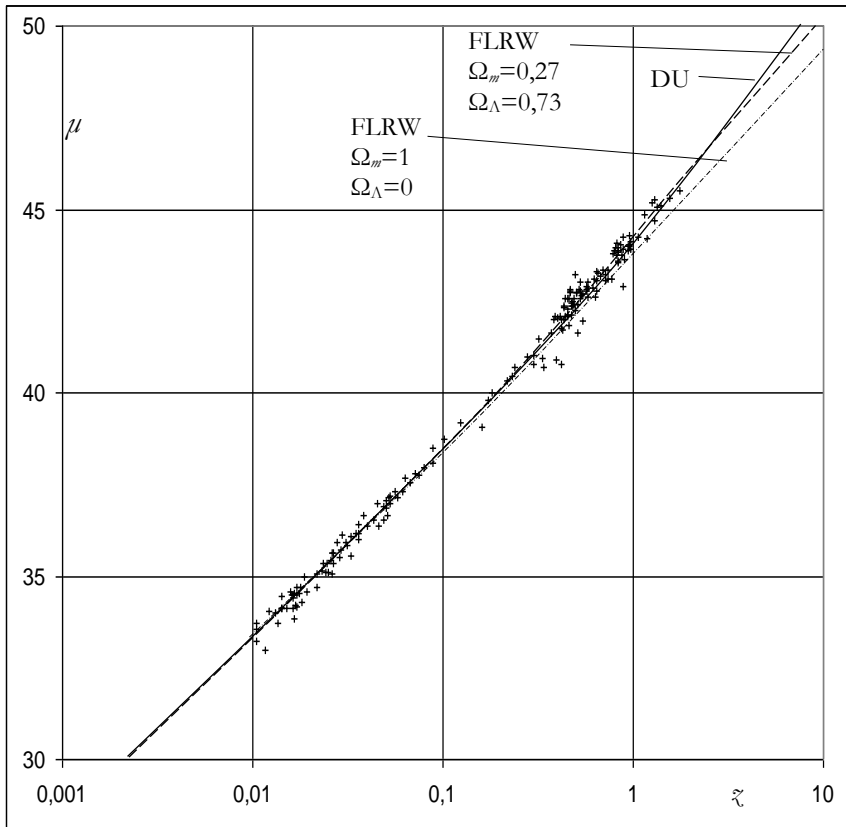
### *Supernovahavainnot; magnitudin ja punasiirtymän suhde*

Kohteesta etenevän säteilyn energiatiheys pienenee verrannollisena optisen etäisyyden neliöön ja suoraan verrannollisena punasiirtymän aiheuttamaan aallonpituuden kasvuun, mistä päädytään yksinkertaiseen ennusteeseen punasiirtymän  $z$  omaavan kohteen magnitudille

$$m = M + 5 \log \frac{R_0}{d_0} + 5 \log z - 2.5 \log(1+z) + K \quad (3.23)$$

missä  $M$  on absoluuttinen magnitudi,  $d_0 = 10$  pc on absoluuttiseen magnitudiin liittyvä vertailuetäisyys ja  $K$  on  $K$ -korjaus. Ennusteen sovittaminen nykyiseen mittauskäytäntöön, jossa havaitut magnitudit redusoidaan ”lähteen lepokehykseen” on yhtälössä (3.23)  $K$ -korjaukseen lisättävä termi  $5 \log(1+z)$  mahdollisen instrumentaalisen ja ilmakehän vaimennuksen vaatiman korjauksen lisäksi.

<sup>111</sup> K. Nilsson et al., *Astrophys. J.*, 413, 453, (1993)



Kuva 3-18. Etäisyysmoduuli  $\mu = m - M$ , punasiirtymän funktiona Riess et al. "high-confidence" havaintojoukosta ja havainnoista Hubble-avaruusteleskoopilla. FLRW-ennuste perinteisillä  $\Omega_m=1$  ja  $\Omega_\Lambda=0$  parametreilla on esitetty katko-pisteiviivalla ja pimeää energiaa sisältävä ennuste  $\Omega_m=0,27$  ja  $\Omega_\Lambda=0,73$  katkoviivalla. Kuvassa esitetty FLRW-ennusteen soveltaminen supernovahavaintoihin johti hypoteesiin pimeästä energiasta. Dynaamisen Universumin ennuste (kiinteä viiva) ei sisällä pimeää energiaa, mutta vastaa pienimmän neliosumman vertailussa parhaiten havaintoja.

1990- luvun lopulla ja 2000-luvun alussa tehdyt supernovahavainnot antoivat mahdollisuuden magnitudi/punasiirtymäennusteiden aiempaa oleellisesti tarkempaan testaamiseen. Havaittujen magnitudien selittämiseksi jouduttiin FLRW-ennusteessa ottamaan käyttöön aikoinaan hylätty "kosmologiavakio", joka fysikaalisesti tulkittiin negatiivisen gravitaatiovoiman antavaksi "pimeäksi energiaksi", kuva 3-18.

FLRW kosmologian magnitudiennusteessa käytetään kirkkausetäisyyden perustana havaintohetken fysikaalista etäisyyttä, joka on suurempi kuin valon kulkuajakaetaisyys (tai DU:n optinen etäisyys). Avaruuden laajenemisen aiheuttamaan säteilyn tehokkuuden pienentymiseen on sovellettu sekä Doppler ilmiötä että Planckin yhtälön mukaista vaimennustekijää, mikä johtaa energian häviämiseen laajenevassa avaruudessa. Ko. tekijöiden vaikutus eliminoiduu, kun ennustetta verrataan ns. *K*-korjattuihin havaintoihin, jota perustellaan "palauttamalla suorat bolometriset havainnot lähteen lepokehykseen".

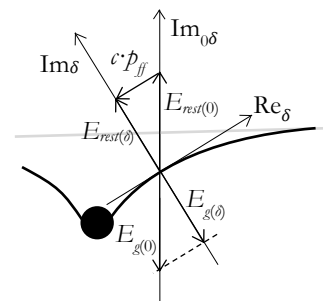
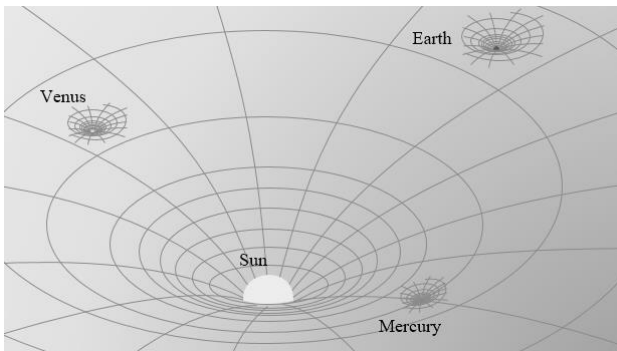
## Massakeskuksen ympäristö

Yleinen suhteellisuusteoria kuvaa gravitaation aika-avaruuden geometrian ominaisuutena. Geometrian määrää avaruuden massan ja energian jakautuminen avaruudessa. Massakeskusten ympärille syntyy aika-avaruuteen painautuma, jonka ratkaisu tunnetaan Schwarzschildin avaruutena.

Dynaamisen Universumin viitekehyksessä neljäs ulottuvuus ei ole ajan suunta vaan 3D avaruuden sulkevan pallopinnan säteen suunta. Avaruuden geometria massakeskusten ympäristössä voidaan ratkaista kokonaisenergian säilymisestä; näin saatu geometria on läheistä sukua Schwarzschildin aika-avaruuden geometrialle.

DU:n viitekehyksessä avaruuden energiarakenne ja vastaava geometria ovat kuvattavissa sisäkkäisten energiakehysten järjestelmänä. Maapallon ja planeettojen ”gravitaatiokuopat” kiertävät auringon gravitaatiokuopassa, joka puolestaan kiertää Linnunradan gravitaatiokuopassa, kuva 3-19. Paikallinen kaareutuminen pienentää samalla paikallista valon nopeutta ja massaobjektien lepoenergiaa, mikä havaitaan esim. paikallisten atomikellojen käyntitajuuden hidastumisena.

Avaruuden kokonaisenergian säilyminen edellyttää avaruuden taipumista neljännen ulottuvuuden suhteen massakeskusten läheisyydessä. Avaruuden taipuminen synnyttää paikallista massakeskusta kohti putoavan massan liikemäärän sen lepoenergian pienenemisen kustannuksella. Vastaavasti, paikallisen valon nopeuden määräävä avaruuden 4D nopeus pienenee kaareutumattoman avaruuden 4D nopeuteen nähden. Painautumien muodostuminen massakeskusten ympärille tapahtuu vaiheittain; painautuma auringon ympärille muodostuu Linnunradan gravitaatiokehykseen (painautumaan), painautumat planeettojen ympärille muodostuvat auringon gravitaatiokehykseen.



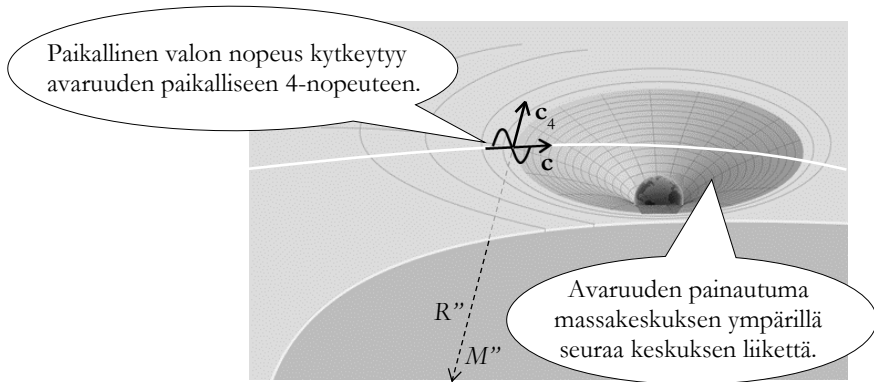
Kuva 3-19. Aurinkokunnan ”syvyysprofiili” neljännen ulottuvuuden suunnassa. Maapallo on noin 26 000 km ”korkeammalla” kuin aurinko; kaukainen Pluto, joka ei näy kuvassa on noin 180 000 km aurinkoa korkeammalla.

*Valon nopeus massakeskuksen läheisyydessä*

Suhteellisuusteorian viitekehyksessä valon nopeus on määritelty vakioksi kaikissa havaintokehyksissä; aika-avaruuden kaartuminen massakeskusten läheisyydessä hidastaa paikallisen ajan kulkua.

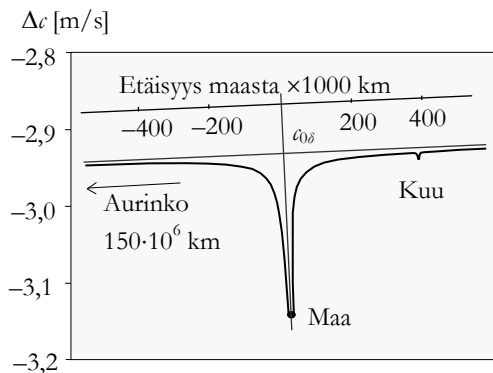
DU:n viitekehyksessä avaruuden kaartuminen massakeskusten läheisyydessä pienentää paikallista valon nopeutta.

Valon nopeuden lukkiutuminen paikallisen avaruuden 4D nopeuteen merkitsee, että valon nopeus on funktio paikallisesta gravitaatiopotentiaalista – käytännössä etäisyydestä paikalliseen massakeskukseen ja keskuksen massasta. Maapallon kiertäessä aurinkoa, potentiaalikuoppa seuraa maapallon mukana, kuva 3-20 (a). Kuva 3-20 (b) kuvaa valon nopeutta maan ja kuun läheisyydessä. Kuvan tilanteessa kuu on maan takana aurinkoon nähden. Auringon vaikutus näkyy valon nopeusprofiilin kaltevuutena auringon suuntaan.



Kuva 3-20 (a). Avaruudessa etenevän sähkömagneettisen säteilyn nopeus kytkeytyy avaruuden nopeuteen paikallisessa neljänneen ulottuvuuden suunnassa.

Kuva 3-20 (b). Valon nopeus maan ja kuun läheisyydessä kaukana auringosta havaittavaan valon nopeuteen nähden. Linnunradan massan vaikutus valon nopeuteen aurinkokunnassa on noin  $\Delta c \approx -300$  m/s.



### *Michelson-Morleyn koe*

Eräs tunnetuimpia ja historiallisesti tärkeimpiä kokeita valon nopeuden etenemiskehyksen määrittämiseksi oli Michelsonin ja Morleyn 1880-luvun lopulla suorittama koe, jossa pyrittiin selvittämään maapallon rataliikkeen vaikutusta valon etenemiseen. Koe suoritettiin pyörivään alustaan asennetulla interferometrillä. Mitään interferenssieroja ei havaittu, mikä osaltaan johti eetteriteorian kumoamiseen ja valon nopeuden määrittelyyn vakioksi missä tahansa liiketilassa olevalle havaitusijalle.

DU:n viitekehyksessä tapahtuva valon nopeuden lukkiutuminen avaruuden paikalliseen 4D nopeuteen merkitsee, että maapallon ratanopeus ei summaudu valon nopeuteen, mikä puolestaan merkitsee nollatulosta M-M kokeessa.

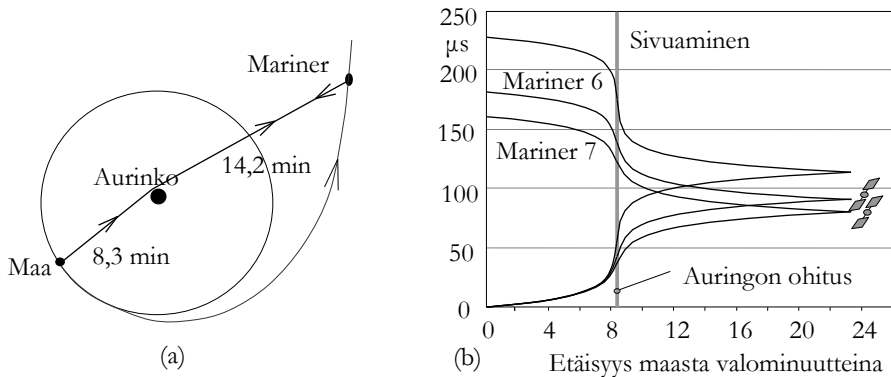
Myöhemmin M-M koetta on toistettu resonaattoreilla, joiden erottelukyky olisi riittänyt maapallon pyörimisliikkeen mahdollisen vaikutuksen havaitsemiseen. Myös nämä kokeet ovat antaneet nollatuloksen, minkä on katsottu vahvistaneen valon nopeuden määrittelyä vakioksi kaikissa liiketiloissa. Maanpäällisissä kokeissa resonaattorilla on maapallon pyörimisestä johtuva nopeus. Maapallon pyöriminen säilyttää resonaattorin resonanssitilan, mikä havaitaan vaihenopeuden säilymisenä vastakkaisissa aalloissa. Valon signaalinopeus määriytyy paikallisesta gravitaatiopotentiaalista, mikä ei riipu maapallon pyörimisestä, joten signaalinopeus havaitaan maapallon gravitaatiokehyksessä suhteessa ei-pyörivään maapalloon (Earth Centered Inertial Frame, ECI-frame).

Signaalinopeuden lukittuminen ECI kehykseen havaitaan satelliittien ja maa-asemien välisessä kommunikaatiossa kuten esim. GPS paikannusjärjestelmässä. Maan pyörimisliike satelliittisignaalin kulkuaikana pidentää tai lyhentää signaalin kulkumatkaa vastaanottimen siirtyessä. Valon nopeus on näin saatu kulkumatka jaettuna kulkuajalla. Suhteellisuusteorian viitekehyksessä kulkumatkan pitenemisen vaikutus huomioidaan erillisenä Sagnac-korjauksena. Lopputulos on kummassakin sama.

### *Valon taipuminen ja Shapiro-viive*

Valon taipuma massakeskuksen läheisyydessä oli eräs ensimmäisiä yleisen suhteellisuusteorian ennusteita. Ennusteen todentaminen vuoden 1919 auringonpimennyksen yhteydessä merkitsi läpimurtoa teorialle. Taipuman lisäksi massakeskuksen ohitus aiheuttaa valon kulkuaikaan viiveen, joka tunnetaan Shapiro-viiveenä. Shapiro-viivettä on menestyksellisesti testattu tutkahavainnoissa lähiplaneettoihin. Merkitävä testi tehtiin vuonna 1970 Mariner 6 ja Mariner 7 avaruusluotaimilla niiden matkalla Mars-planeetalle. Kun luotaimet olivat maahan nähden auringon takana, sivusi niistä lähetetty radiosignaali aurinkoa 3,5:n ja 5,9:n auringon säteen etäisyydeltä, kuva 3-21.

Shapiro-viiveen ennusteessa suhteellisuusteorian mukaan ja DU:n mukaan on erona vakiotermi. Mariner-luotainten signaaliviiveet määrättiin suhteessa hypoteettiseen viiveeseen tilanteessa, jossa signaali olisi sivunnut aurinkoa. Koska vakiotermi vaikuttaa yhtäläisesti vertailuviiveenä käytettyyn sivuamisviiveeseen, on tulos samanarvoisesti kummankin teorian mukainen, erona selitykseen on se vaikuttaako massakeskus valon nopeuteen vai valon ”kokemaan aikaan”.



Kuva 3-21. (a) Auringon gravitaatiosta johtuvan kulkuaikaviiveen mittaus auringon ohittavasta radiosignaalista. (a) Mariner-luotainten reitti maasta kohti Mars-planeettaa, ja kokeessa käytetyn radiosignaalin kulkutie auringon ohi. (b) Radiosignaalin edestakaisen kulkuajan viiveen kehittyminen Mariner 6 ja Mariner 7 kokeissa.

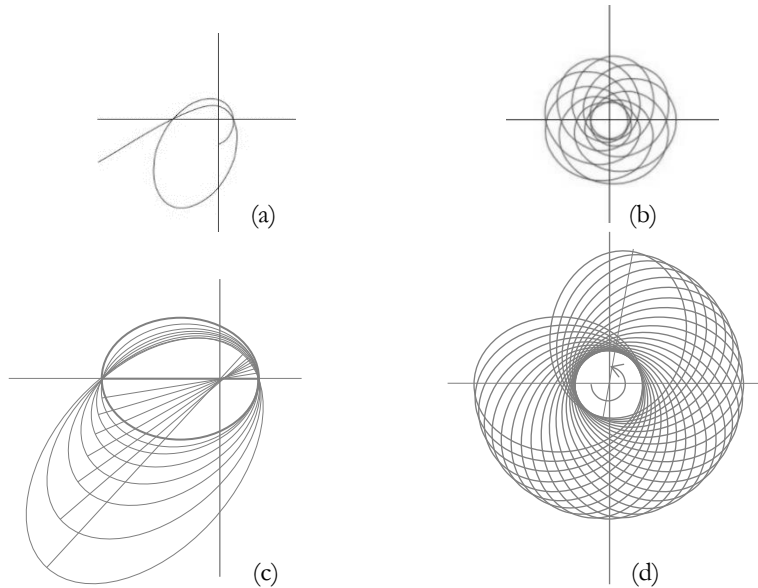
## Taivaanmekaniikka, ellipsiradan pääakselin kiertyminen

### *Merkuriuksen perihelikiertymä*

Merkuriuksen perihelikiertymän selityksestä puuttuvaan 43 kaarisekuntiin/100 vuotta oli yleisen suhteellisuusteorian ensimmäinen empiirinen todiste. Ennusteen johto perustuu Schwarzschildin ratkaisuun yleisen suhteellisuusteorian kenttäyhtälöistä.

Oppikirjoissa Merkuriuksen perihelikiertymälle esitetyt ratkaisut ovat tyypillisesti yhdelle ratakierrokselle Schwarzschildin metriikasta laskettuja kiertymiä, jolloin ennusteeseen sisältyvä kiertosädetä kasvattava termi on voitu jättää huomioimatta. Jos vastaava laskutoimitus tehdään mustan aukon läheisyydessä, lähellä kriittisen säteen etäisyyttä, aiheuttaa sädetä kasvattava termi kiertoradalla olevan massan sinkoutumisen radaltaan, kuva 3-22 (a). Jos Merkuriuksen annetaan kiertää radallaan muutamman sadan tuhannen vuoden ajan, saavuttaa pääakselin kiertymä  $45^\circ$ , mikä Schwarzschildin ratkaisun mukaan aiheuttaisi vastaavasti Merkuriuksen sinkoutumisen ulos aurinkokunnasta, kuva 3-22 (c). DU-ratkaisuun ei sisälly kierrosten mukana kumuloituvaa häiriötä, 3-22 (b) ja (d).

Schwarzschildin avaruudessa myös ympyräradat tulevat epästabiileiksi mustan aukon läheisyydessä. Matemaattisesti tämä näkyy siinä, että ratanopeus ylittää pakonopeuden, kun radan säde on pienempi kuin  $3 \times$  Schwarzschildin kriittinen säde. Schwarzschildin kriittinen säde on  $2 \times$  DU:n kriittinen säde.



Kuva 3-22. Ellipsiradan kehittyminen mustan aukon läheisyydessä, (a) Schwarzschildin avaruudessa ja (b) DU-avaruudessa. Merkuriuksen perihelikiertymä (c) Schwarzschildin avaruudessa ja (d) DU-avaruudessa. Schwarzschildin avaruuden ratkaisut (a) ja (c) perustuvat M. Berryn kirjassa *Principles of Cosmology and Gravitation*, Cambridge University Press, p.83 (1989) esitettyihin yhtälöihin. Schwarzschildin ratkaisussa radan säteeseen sisältyy kumulatiivisesti kierrosmäärän mukana kasvava termi, joka tulee merkittäväksi kiertymäkulman kasvaessa.

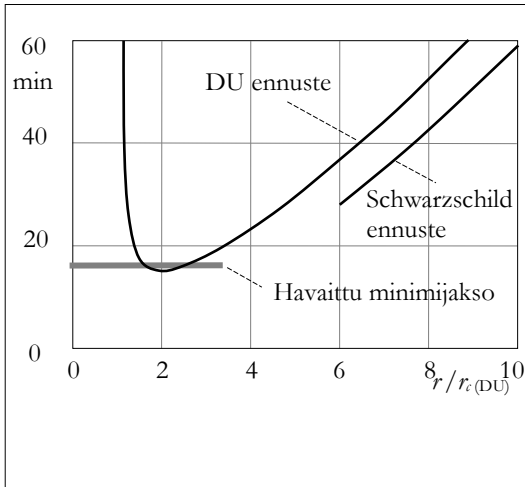
### *Kiertoradat mustan aukon läheisyydessä*

DU-ratkaisussa ympyräradan kiertoaikalle muodostuu minimi, kun radan säde on kaksi kertaa kriittinen säde. Kokeellista tukea DU-ratkaisun mukaiselle minimille saadaan Linnunradan keskuksessa olevan mustan aukon, Sagittarius A\*<sup>n</sup>, ympärillä havaitut 16,8 minuutin periodiset vaihtelut, jotka viittaavat mustaa aukkoa kiertäviin objekteihin. Kun DU:n ennusteeseen sijoitetaan Sagittarius A\*<sup>n</sup> massaa vastaava kriittinen säde, saadaan miniperiodiksi noin 15 minuuttia, mikä selittäisi hyvin havaitut vaihtelut. Schwarzschildin stabiilien ratojen minimillä päästäisiin pienimmillään noin 29 minuutin periodeihin, kuva 3-23. Nopeammat radat selittää Kerrin mustilla aukoilla, joissa avaruus itsessään pyörii periodin vaudittamiseksi.

### *Kaksoistähtien radan supistuminen*

Gravitaatio-säteily on saanut suurta huomiota LIGO ja VIRGO detektoreilla vuonna 2016 tehdyistä havainnoista. Yleisen suhteellisuusteorian viitekehyksessä gravitaatio-säteilyn aiheuttaa kiertosysteemin kvadrupolimomentti. Gravitaatio-säteilyn emissioon liittyvä energian menetys havaitaan kiertosysteemin kiertoaajan lyhenemisenä.





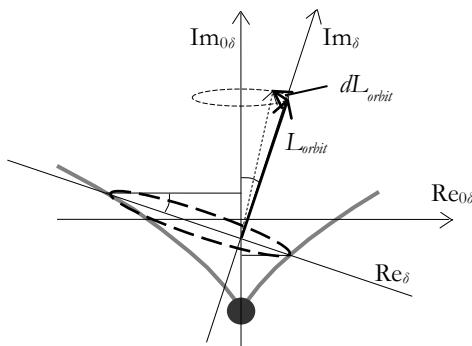
Kuva 3-23. Linnunradan keskustassa (Sgr A\*) olevan mustan aukon ympärillä on havaittu jaksollisia ilmiöitä, jotka viittaavat keskustaa kiertäviin objekteihin. Pienin havaittu kiertoaika on  $16,8 \pm 2$  min. (R. Genzel et al., Nature **425** (2003) 934).

Schwarzschildin avaruuden stabiileille kiertoradoille minimikiertoaika on noin 28 minuuttia, mikä toteutuu, kun kiertoradan säde on 6 kertaa DU:n kriittinen säde.

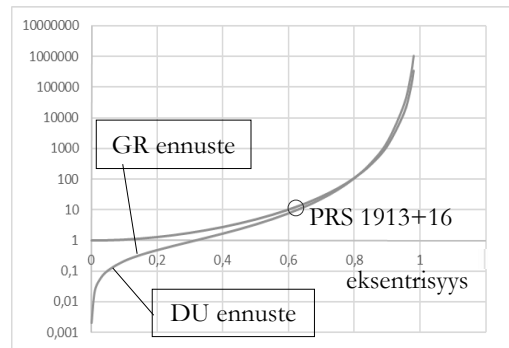
DU:n ennuste Sgr A\*:n nopeimmalle kiertojalle on 14,8 minuuttia, mikä tapahtuu ympyräradalla, jonka säde on 2 kertaa DU:n kriittinen säde.

DU:n viitekehyksessä kiertoaajan lyhenemisen voidaan johtaa elliptisen radan pääakselin kiertymään liittyvän, neljännessä ulottuvuudessa esiintyvän impulssimomentin (pyörimismäärän) muutoksesta, kuva 3-24 (a).

Erilaisista lähtökohdistaan huolimatta GR:n ja DU:n ennusteet kiertoaajan lyhenemiselle ovat lähes identtiset; ainoa ero tulee radan eksentrisyyden vaikutuksesta. DU-ennusteessa periodin lyheneminen tapahtuu vain elliptisille radoille, kun taas GR-ennusteessa supistuminen tapahtuu myös ympyräradalle. Kuvan 3-24 (b) käyrät havainnollistavat radan eksentrisyyden vaikutusta: eksentrisyyserroin, joka DU-ennusteessa lähestyy nollaa ympyrärataa lähestyttäessä, kyllästyy ykköseen GR-ennusteessa. Periodin lyhenemiseen ja 4D impulssimomentin kiertoon mahdollisesti liittyvää gravitaatio säteilyä ei DU:n viitekehyksessä ole analysoitu.



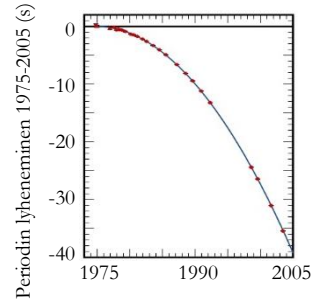
(a)



(b)

Kuva 3-24. (a) Ellipsiradan pääakselin kiertymä aiheuttaa  $Im_{\delta}$  suunnassa esiintyvän 4D impulssimomentin  $L_{orbit}$  kiertymän, johon tarvittava energia vastaa periodin hidastumisesta. (b) Ennuste elliptisten ratojen periodin hidastumiselle on jokseenkin sama GR:n ja DU:n viitekehyksissä. DU:n mukaan hidastumista ei tapahdu ympyräradoille, GR:n mukaan myös ympyrä ratojen periodi lyhenee. Kaksoispulsarin PSR 1913+16 eksentrisyys on 0,616, jolloin GR:n ja DU:n ennuste periodin lyhenemiselle ovat samat, vastaten kuvan 3-25 havaintoja.

Kuva 3-25. Sekä GR:n että DU:n ennusteet (yhtenäinen viiva) kaksoispulsarin PSR B1913+16 kiertoajan lyhenemiseen vastaavat hyvällä tarkkuudella havaintoja (pisteet). Kuva: *Wikimedia Commons*.



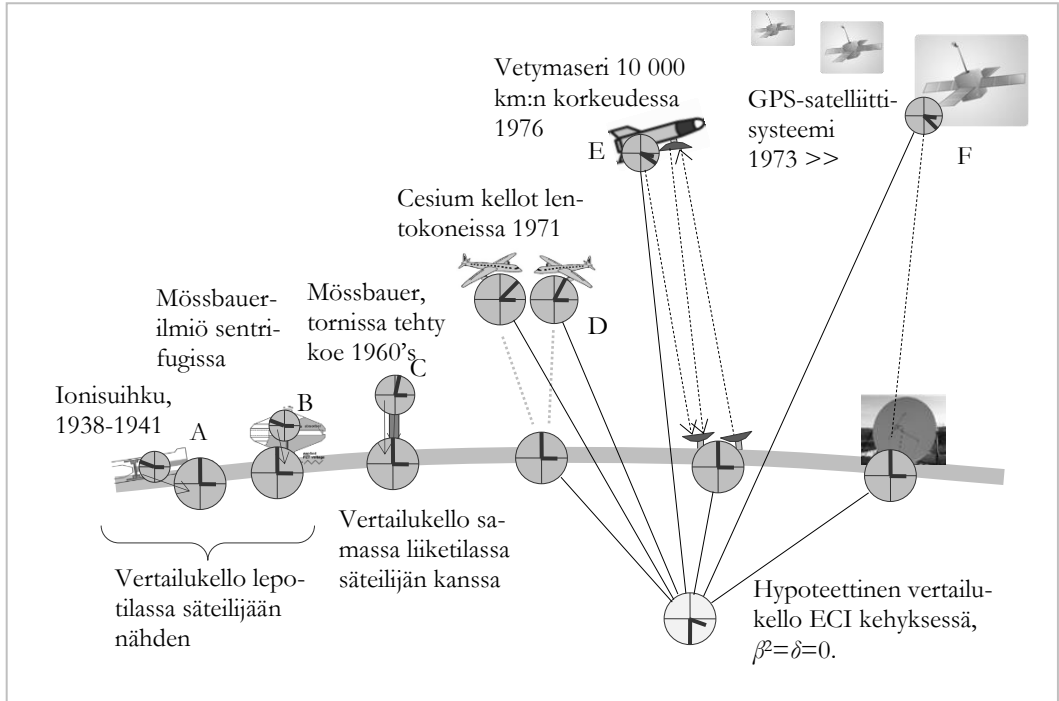
Tunnetuin havaintosarja kaksoispulsarin periodin lyhenemisestä on R. A. Hulsen ja J. H. Taylor Jr.:n raportoima kaksoispulsarin PSR B1913+16 periodin lyhenemä, mikä vastasi yleisestä suhteellisuusteoriasta johdettua gravitaatioaaltojen emissiota, kuva 3-25.

### Atomikellojen käyntitaajuus maapallolla ja lähiavaruudessa

Suhteellisuusteorian viitekehyksessä valon on nopeus vakio kaikissa havaintokehyksissä. Laboratoriokokeissa liikkeen vaikutus värähtelijään selitetään suppean suhteellisuusteorian mukaisesti ajan hidastumisella levossa olevan tarkkailijan ja hänen vertailukellonsa ”kokemaan” aikaan nähden. Maapallon pyörimisestä tai rataliikkeestä johtuva nopeus ei vaikuta koetuloksiin, kuva 3-26 (A,B). Maanpäällisissä, paikallisissa gravitaation vaikutusta mittaavissa kokeissa sekä tutkittava kello että vertailukello ovat samassa liike-tilassa. Ero kellojen käyntinopeudessa selitetään lähempänä maan pintaa olevan kellon kokemalla hitaammalla ajalla, kuva 3-26 (C).

Lähiavaruuden kokeissa on huomioitava sekä maan pinnalla olevan vertailukellon nopeus ja gravitaatiotila akselinsa ympäri pyörivällä maapallolla että lentokoneessa tai satelliitissa olevan kellon gravitaatiotila ja nopeus ei-pyörivään maapalloon nähden (maakeskeisessä havaintokehyksessä), kuva 3-26 (D,E,F).

DU:n viitekehyksessä atomikellon käyntinopeus voidaan määrätä suoraan kvanttimekaniikan atomien emissiotaajuudelle antamasta ratkaisusta, jonka mukaan taajuus on suoraan verrannollinen värähtelevien elektronien lepoliikemäärään, joka on tulo elektronin lepomassasta ja paikallisesta valon nopeudesta. Kokonaisliikemäärän säilyminen merkitsee, että liike pienentää lepomassaa ja gravitaatio valon nopeutta. Liike pienentää kellon taajuutta suhteessa paikallisen energiakehyksen lepotilaan ja alentunut gravitaatiopotentiaali suhteessa kaukana massakeskusta olevan hypoteettisen vertailukellon taajuuteen nähden.



Kuva 3-26. Laboratorio- ja lähiavaruuden kokeita, joissa on testattu liike- ja gravitaatiotilan vaikutusta atomaarisiin värähtelijöihin ja atomikelloihin.

A. Sähkökentässä kiihdytettyjen vetyionien sinivihreän spektriviivan,  $4861 \text{ \AA}$ , siirtymän todettiin vastavan aallonpituuden kasvua tekijällä  $\frac{1}{2}(v/c)^2$  emittoivien ionien nopeuden  $v$  funktiona <sup>112,113,114</sup>.

B. Sentrifugin keskustaan sijoitetun koboltti-57 gammasäteilylähteen säteilyä mitattiin sentrifugin pyörivälle kehälle sijoitetun rauta-57 absorbaattorin takaa. Absorbaattorin läpäisy lisääntyi kehänopeuden kasvaessa vastaten absorbaattorin nimellistajuuden muutosta kertoimella  $\frac{1}{2}(v/c)^2$  absorbaattorin kehänopeuden  $v$  kasvaessa <sup>115,116,117,118</sup>.

C. Koboltti-57 lähteellä ja rauta-57 absorbaattorilla tehty gravitaatiolinisiirtymää testaava koe. Kokeessa todennettiin tornin korkeutta vastaavaa gravitaatiopotentiaalin muutosta vastaava muutos emissiotajuudessa <sup>119,120,121</sup>.

D. Kaupallisilla lentoreiteillä toteutettu koe, jossa cesium kelloja kuljetettiin maapallon ympäri sekä itä-että länsisuuntaan. Koe vahvisti, että sekä lennoilla olleiden kellojen että maa-aseamalla olleiden

<sup>112</sup> H.E. Ives and G.R. Stilwell, J. Opt. Soc. Am. **28** (1938) 215

<sup>113</sup> H.E. Ives and G.R. Stilwell, J. Opt. Soc. Am. **31** (1941) 369

<sup>114</sup> H.I. Mandelberg and L. Witten, J. Opt. Soc. Am. **52**, 5 (1962) 529

<sup>115</sup> H.J. Hay, J.P. Schiffer, T.E. Cranshaw, and P.A. Egelstaff, Phys. Rev. Letters **4**, 4 (1960) 165

<sup>116</sup> D.C. Champeney, G.R. Isaak, and A.M. Khan, Nature **198**, 4886 (1963) 1186

<sup>117</sup> W. Kundig, Phys. Rev. **129** (1963) 2371

<sup>118</sup> Turner, K.C., and Hill, H.A., Phys. Rev. B, **134** (1964) 252

<sup>119</sup> T.E. Cranshaw, J.P. Schiffer, and A.B. Whitehead, Phys. Rev. Letters **4**, 4 (1960), 163

<sup>120</sup> R.V. Pound and G.A. Rebka Jr., Phys. Rev. Letters **4** (1960) 337

<sup>121</sup> R.V. Pound and J.L. Snider, Phys. Review **140**, 3B (1965) B788

vertailukellon käyntitaajuudet suhteutuivat maapallon pyörimiseen nähden levossa olevaan kuvitteelliseen kelloon<sup>122,123,124</sup>.

E. Eräs tarkimpia ja useimmin referoituja kokeita atomikellojen taajuuden gravitaatio- liikeriippuvuuden testaamiseen oli vuonna 1976 toteutettu koe, jossa vetymaseri lähetettiin 10 000 km:n korkeuteen<sup>125</sup>. Avaruuskapseliin sijoitetun kellon taajuus lähetettiin jatkuvana radiosignaalinä maa-asemalle. Doppler-ilmiön eliminoimiseksi mitattavasta kellotaajuudesta maa-asemalta avaruuskapselille lähetettiin edestakainen vertailusignaali. Koe todensi gravitaatiosinisirtymän suurella tarkkuudella. Liikkeen vaikutus kellon taajuuteen raportoitiin suppean suhteellisuusteorian mukaisesti avaruudessa liikkuvan kellon ja maa-aseman kellon suhteelliseen nopeuteen verrannollisena ilmiönä, mikä oli vastoin ennakkoon tehtyä teoreettista tarkastelua<sup>126</sup>. Kokeen tarkempi analyysi osoittikin, että sekä avaruudessa lentäneen kellon että maa-aseman kellon nopeus on ilmaistava suhteessa kuvitteelliseen lepokelloon maapallon gravitaatiokehäyksessä (ECI-kehäyksessä), kuten alkuperäinen ennuste edellytti<sup>127</sup>. Näennäinen kytkentä suhteelliseen nopeuteen syntyi lisätermistä, joka johtui maapallon pyörimisen aiheuttamasta erosta kokeessa käytetyn edestakaisen Doppler-efektin eliminointiin käytetyn signaalin meno ja paluutien välillä.

F. Paikannukseen käytettävä GPS-systeemi (Global Positioning System) toimii monipuolisena ja tarkkana testisysteeminä kaikille kelloihin vaikuttaville liike- ja gravitaatioilmiöille maapallon lähipiirissä.

---

<sup>122</sup> J.C. Hafele and R.E. Keating, *Science* **177** (1972) 166

<sup>123</sup> J.C. Hafele, *Nature Phys. Sci.* **229** (1971) 238

<sup>124</sup> R. Schlegel, *Nature Phys. Sci.* **229** (1971) 237

<sup>125</sup> D. Kleppner, R.F.C. Vessot, and N.F. Ramsey, *Astrophysics and Space Science* **6** (1970) 13

<sup>126</sup> R.F.C. Vessot et al., *Phys. Rev. Letters*, **45**, 26 (1980) 2081

<sup>127</sup> [T. Suntola, Galilean Electrodynamics, 14, No.4 \(2003\)](#)

## 4. Luonnontieteen mallien arvioinnista

### *Filosofiset arviointiperusteet*

Aristoteles määritteli tieteen tehtäväksi tuottaa ymmärrettävä kuva todellisuudesta. Parhaimpina hän piti tieteitä, jotka voidaan johtaa primäärisistä luonnonlaeista mahdollisimman vähin lisäpostulaatein. Yksinkertaisuus, selkeys ja ymmärrettävyys, lähtöolettamusten vähäisyys sekä ennusteiden kattavuus ja tarkkuus ovat yleisesti hyväksytyjä tunnusmerkkejä hyvälle teorialle. Väitöskirjassaan *Economical Unification as a Method of Philosophical Analysis* (2016)<sup>128</sup> Avril Styman esittää tieteellisen teorian hyvyyskriteeriksi ekonomian periaatetta, joka tunnetaan myös Occamin partaveitsenä: tarkasteltavan tieteenalan ilmiöt tarkimmin ennustava ja selittävä teoria on paras; kahdesta yhtä tarkasta teoriasta, metafysisesti yksinkertaisin on paras. Teorian metafysiikka tarkoittaa sen oletuksia sellaisten asioiden olemassaolosta, joiden olemassaoloa ei ole havainnoin vahvistettu. Tarkkuus on siis ensisijainen kriteeri, yksinkertaisuus toissijainen. Ekonomia suosii kaikkein tarkimmista teorioista niitä, jotka selittävät ilmiöt mahdollisimman rajatulla, yhtenäisellä postulaattikannalla. Muut teoreettiset hyveet kuten ymmärrettävyys ja käytettävyys ovat pitkälti johdannaisia teorian ekonomisuuden asteesta.

Fysiikkaan sovellettuna ekonomian periaate painottaa fysiikan eri osa-alueella käytettävien teorioiden yhteistä postulatikkantaa, mikä nykyisissä teorioissa on ongelmallista: suhteellisuusteoria vaatii omat postulaattinsa, joihin ei sisälly esim. energian säilyminen, mikä on keskeistä esim. temodynamiikassa ja kvanttimekaniikassa. Kosmologia vaatii lisäpostulaatteja, kuten pimeän energian. Kvanttimekaniikka on rakenteellisesti yhteensopimaton suhteellisuusteorian kanssa, se sisältää mm. aaltofunktion ja todennäköisyyden periaatteita, jotka ovat vieraita fysiikan muille osa-alueille.

### *Nykyinen fysiikka*

Nykyfysiikassa käytetyt postulaatit ovat ensisijaisesti havaintojen pohjalta pääteltyjä lainalaisuuksia. Galileo Galilei postuloi suhteellisuusperiaatteen havaittuaan, että tasainen liike ei vaikuttanut hänen pudotuskokeisiinsa. Einstein laajensi suhteellisuusperiaatteen kattavuutta lisäämällä liiketilaan koordinaatistomuunnokset, mihin tarvittiin ”kokeellisena tosiasiana” myös valon nopeuden vakioisuus. Edelleen, hän postuloi ekvivalenssiperiaatteen, jolla koordinaatistomuunnoksilla korjattu Newtonin liikelaki voitiin ulottaa gravitaatiokiihtyvyyteen. Sekä suppea että yleinen suhteellisuusteoria ovat luonteeltaan paikallisteorioita, jotka kuvaavat havainnon suhteessa havaittajaan. Kinemaattisen lähestymisen tuomat koordinaatistomuunnokset ovat synnyttäneet aika-avaruuden käsitteen, joka hallitsee suhteellisuusteorian todellisuuskuvaa. Yleisen suhteellisuusteorian laajennus kosmologiateoriaksi edellytti

<sup>128</sup> <https://helda.helsinki.fi/handle/10138/169481>

lisäpostulaattina kosmologiaperiaatetta, joka toteaa, että kosmologisilla etäisyyksillä tarkasteltuna avaruus on homogeeninen ja isotrooppinen, oleellisesti ottaen samanlainen kaikille havaintasijoille. Kosmologiamalliin lisättiin vuosituhannen vaihteessa työntävän gravitaatiovoiman synnyttävä pimeä energia, joka tarvittiin ennusteen soveltamiseksi kaukaisista supernovista havaittuun punasiirtymän ja kirkkauden suhteeseen.

Kvanttimekaniikassa massaobjektia (hiukkasta) kuvataan aaltofunktiolla, jonka itseisarvon neliö kuvaa todennäköisyyttä, jolla objekti on määrättyssä paikassa määrättyllä hetkellä. Systemin, kuten esim. atomin elektronien, kvantittuneet energiatilat saadaan Schrödingerin aaltoyhtälön ominaisarvoista.

### *Dynaaminen Universumi*

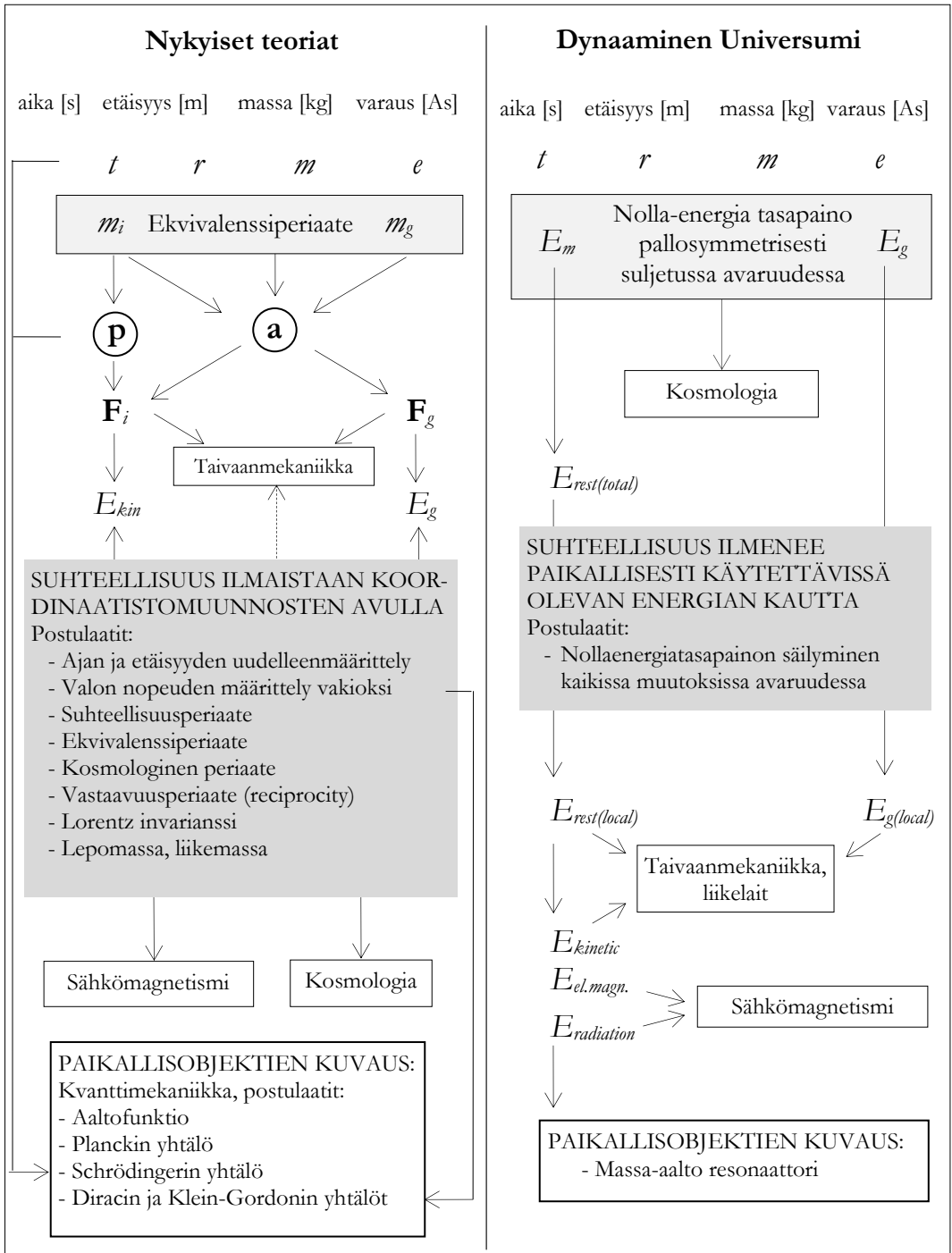
Dynaamisen Universumin teoria on rakennettu energian säilymiseen, tarkkaan ottaen nollaenergiaperiaatteeseen, joka palautuu Aristoteleen entelekheia-käsitteeseen, potentiaalisuuden aktualisoitumiseen. Nollaenergiaperiaatteessa toteutuu kaksinkertaisen kirjanpidon periaate: Kun jotakin saadaan, se on jostakin pois. Aristoteleen entelekheian hengessä se tarkoittaa esim., että liikkeen energiaa saadaan, kun luovutetaan rakenteen energiaa, potentiaalienergiaa. Yksinkertaisimmillaan tämä toteutuu heilurissa: yläasennossa heilurilla on potentiaalienergiaa, joka aktualisoituu liikkeen energiaksi alaspäin mennessä ja palautuu potentiaalienergiaksi ylöspäin mennessä. Avaruudessa keskeinen potentiaalienergia on gravitaatioenergia; koko avaruuden gravitaatioenergian määrittämiseksi on tunnettava avaruuden rakenne. DU:ssa 3D avaruus kuvataan sulkeutuvana neliulotteisen pallon ”pintana”, mikä mahdollistaa gravitaatioenergian määrittelyn.

DU on holistinen teoria, joka perustuu nollaenergiaperiaatteeseen ja pallosymmetrisesti suljettuun avaruuteen, mikä mahdollistaa koko avaruuden dynamiikan tarkastelun pohjana paikallisten ilmiöiden tarkastelulle. DU:ssa paikalliset rakenteet ja niiden dynamiikka suhteutuu koko avaruuteen ja sen dynamiikkaan. Paikallisten havaintojen suhteellisuus välittyy liikkeen ja gravitaation vaikutuksesta paikalliseen energiatiilaan, mikä kytkee suhteellisuuden myös kvanttimekaniikkaan. Massa saa merkityksen aaltoluonteisena energian ilmentämisen substanssina, massaobjektit kuvataan massa-aaltojen resonanssirakenteina, jossa ”kvantttilat” näkyvät resonanssiehdot täyttävien energiatiilojen minimikohtina.

Aika ja etäisyys ovat DU:ssa ihmisen arkitodellisuudelle luonnollisia koordinaatistosuureita.

### **Teoriarakenteet**

Kuvassa 4-1 on verrattu nykyisten teorioiden ja Dynaamisen Universumin postulaattikantaa, käsittehierarkiaa, ja fysiikan osa-alueiden kytkeytymistä toisiinsa. Perusyksiköt, aika, etäisyys, massa ja sähkövaraus ovat yhteiset molemmille teoriarakenteille.



Kuva 4-1. Keskeisten fysiikan määritteiden ja suureiden hierarkia nykyisissä fysiikan ja kosmologian teoriarakenteissa ja Dynaamisessa Universumissa, jossa tarkastelu perustaa oleellisesti ottaen kokonaisenergiatasapainon säilymiseen – fysiikan osa-alueet eivät tarvitse erillispostulaatteja kuten nykyisten teoriarakenteiden postulaateista lähdettäessä.

Nykyisten teorioiden juuret ovat Newtonin liikelaeissa. Newton yhdisti hitausvoiman ja gravitaatiovoiman, mikä teki voimasta fysiikan perussuureen. Ratkaisu määritteli implisiittisesti ekvivalenssiperiaatteen, joka massaansa sovellettuna toteaa inertiaalimassan ja gravitaatiomassan yhtäsuuruuden. Voiman, massan ja kiihtyvyyden suhteen määrittävä Newtonin toinen laki sai ensisijaisen luonnonlain aseman. Ratkaisu antoi ymmärrettävän perusteen Keplerin elliptisille planeettaradoille ja mahdollisti tarkat ennusteet planeettojen liikkeille ja keskinäisille vuorovaikutuksille.

Periaatteessa voima kuvaa paikallista vuorovaikutusta tarkasteltavaan objektiin. Gravitaatiovoima, jonka Newtonin mekaniikka kuvaa etäällä olevan massan aiheuttamana vuorovaikutuksena, merkitsee voiman kaukovaikutusta, joko välittömänä tai äärellisen vaikutusnopeuden kautta vaikuttavana ilmiönä.

Dynaamisessa Universumissa energia on perussuure ja voima liikemäärän aikaderivaatta ja potentiaalienergian tapauksessa energian paikallinen gradientti. Gravitaation suhteen energialähestyminen voidaan jäljittää Laplacen 1700-luvulla kehittämään potentiaaliteoriaan, joka mahdollisti ennennäkemättömän tarkkuuden planeettaratojen määrittäisiin. Fysikaalisesti tulkittuna Laplacen laskentamenetelmä perustui kaikkialla läsnä olevaan skalaaripotentialikenttään, jonka paikallinen massa tunnisti gravitaatioenergian ja jonka paikallinen gradientti kuvasi massaobjektiin vaikuttavaa voimaa.

Laplacelle menetelmä oli puhtaasti matemaattinen ratkaisu – periaatteessa se kuitenkin viestitti skalaarikentästä ensisijaisena fysikaalisena entiteettinä, joka ratkaisee filosofisen ongelman voiman välittömästä vaikutuksesta ilman ”vuorovaikutusnopeutta” potentiaalientää ylläpitäviin objekteihin.

### *Paikallisteoria vai systeemikuvaus*

Voimalähtöisen fysiikan ja energialähtöisen fysiikan keskeinen ero syntyy ”voimafysiikan” paikallislähtöisyydestä ja ”energiafysiikan” systeemilähtöisyydestä.

Voimavuorovaikutuksia voidaan tutkia vuorovaikuttavien objektien välisinä ilmiöinä, jolloin peruspostulaatteina ovat vaikutuksen ja vastavaikutuksen yhtäsuuruus sekä ekvivalenssiperiaate, joka kytkee liikevoiman rakenteelliseen voimaan. Voimatarkastelu tukee suhteellisuuspriaatetta; voimatarkastelussa lepotila voidaan kiinnittää mihin tahansa tarkasteltavista objekteista, mikä määrittelee suhteellisuuden objektien väliseksi suhteellisuudeksi.

Energialähtöisessä fysiikassa lähdetään tarkasteltavan systeemin määrittelystä. DU:ssa enesijainen energiasysteemi muodostuu koko avaruudesta. Fysikaalinen todellisuus monitasoisine rakenteineen kuvautuu sisäkkäisten energiasysteemien järjestelmänä. Paikallisuus syntyy paikallisesti käytettävässä olevasta potentiaalienergiasta, jota luovuttamalla saadaan paikallista liikettä. Paikallinen lepotila on tila, jossa paikallista potentiaalienergiaa ei ole muutettu liikkeen energiaksi.

Suhteellisuuden ilmaisu energiatilan kautta ja massan aaltoluonne energian ilmentäjänä kytkee kvanttimekaniikan luonnolliseksi osaksi yleistä fysiikkaa ja luo perusteet kvanttimekaniikan ontologian ymmärtämiselle. Näyttää siltä, että resonanssiehto, jota havainnollistettiin vetyatomin perustilojen määrittämisessä, on nollaenergiatasapainon verrattavissa oleva luonnonlaki.



## Ekonomian periaatteen soveltaminen

### *Teoriarakenne ja unifikaatio*

Kuten kuvan 4-1 kaavio osoittaa, Galilein suhteellisuusperiaatteen ja Newtonin liike- ja gravitaatiolaeista kehittynyt nykyfysiikka on pitkän kehityshistorian tulos, mikä on mutkistanut teoriarakenteita ja tuonut huomattavan määrän lisäpostulaatteja ja eri osa-alueille ominaisia määrittäjä.

Dynaaminen Universumi on ”puhtaalta pöydältä” kehitettynä teoriana voitu perustaa oleellisesti vähäisempiin postulaatteihin ja yksinkertaisempaan rakenteeseen. Oleellisinta kuitenkin on systeemilähtöisyys ja energian valinta perussuureksi, mikä on mahdollistanut säilymisperiaatteen soveltamisen hiukkastasolta koko avaruuteen. DU avaa suhteellisuuden energian säilymisen ilmentymänä ilman erillistä suhteellisuusteoriaa. Systeemilähtöisyys on avannut paikallisen ja muun avaruuden kiinteän yhteyden. Kvanttimekaniikkaan suhteellisuus välittyy paikallisesti käytettävissä olevan energian kautta, lepoenergian kytkeytyessä objektin liike- ja gravitaatiotilaan paikalliskehyksessä ja paikalliskehyksen liike- ja gravitaatiotilaan isäntäkehyksissään. Unifikaatio on nähtävissä liikkeen energian yhtenäisessä ilmaisussa sekä paikallisen ja kokonaisuuden kiinteässä yhteydessä, mikä kytkee liikkeen energian avaruuden gravitaatioenergiaan.

Vaikka Dynaamisen Universumin teoria merkitsee perusteellista paradigmuutosta erityisesti suhteellisuusteorian ja kosmologia suhteen, se ei olisi syntynyt ilman suhteellisuusteorian tuottamia tuloksia ja suhteellisuusteorian testaamisen yhteydessä tehtyjä monipuolisia havaintoja.

### *Havainnot, ennusteet ja todellisuuskuva*

Dynaamisen Universumin teoria vastaa huomattavaan osan nykyisten teorioiden ratkaisemattomista kysymyksistä. Tärkein niistä on todellisuuskuvaan liittyvä kysymys; suhteellisuusteorian edellyttämä ajan ja samanaikaisuuden suhteellisuus ei ole sovittavissa ihmisen havaintotodellisuuteen, vaikka se matemaattisesti olisikin hallittavissa. Dynaaminen Universumi toimii ihmiselle luonnollisessa havaintotodellisuudessa, jossa ajalla ja etäisyydellä on yksiselitteinen merkitys koordinaatistosuureina.

DU:n nollaenergiatasapaino kytkee paikallisen massaobjektin lepoenergian avaruuden muun massan synnyttämään gravitaatioenergiaan; paikallisobjektin ”antiobjekti” on koko muu avaruus, mikä ratkaisee nykyteorioihin liitetyn antimaterian ongelman. Avaruuden muun massan gravitaation kytkeytyminen paikallisobjekteihin antaa samalla kvantitatiivisen ratkaisun Machin periaatteeseen; inertiaityö, joka tehdään massaobjektia kiihdytettäessä, on työ, joka liikkeeseen saatettu objekti tekee avaruuden muun massa gravitaatiota vastaan.

Yleiseen suhteellisuusteoriaan perustuva mustan aukon taivaanmekaniikka johtaa epästabiilisuuteen mustan aukon kriittistä sädettä lähestyttäessä. DU:n energiatasapainoon perustuva ratkaisu palauttaa stabiilisuuden ja selittää mustaa aukkoa ylläpitävän massan kriittisen säteen tuntumassa olevilla hitailla kiertoradoilla. DU ei tarvitse nykyisen kosmologiateorian vaatimaa alkuräjähdyttä; massan lepoenergia on

rakentunut avaruuden supistumisvaiheessa luovutetusta gravitaatioenergiasta ennen käännettä laajenemisvaiheeseen. Avaruuden selkeä geometria, yksiselitteinen laajenemisen dynamiikka ja paikallisen ja kokonaisuuden yhteys yksinkertaistavat keskeisiä kosmologiaennusteita. Paikalliset, gravitaatiolla sidotut järjestelmät laajenevat suorassa suhteessa avaruuden laajenemiseen, mikä yhdessä pallosymmetrian kanssa selittää kaukaisten galaksien kulmakoon näkymisen euklidisena, etäisyyteen kääntäen verrannollisena. Aurinkokunnan laajeneminen selittää myös maan varhaisen geologisen kehityksen edellyttämät olosuhteet ja nestemäisen veden olemassaolon varhaisen Mars-planeetan pinnalla. Kosmologisia havaintoja vastaavat ennusteet ovat vapaat lisäparametreista, kuten pimeää energiaa.

## Liite I. Henkilögalleria

Galleria on järjestetty henkilöiden syntymäajan mukaiseen järjestykseen. Kuvat on kerätty *Wikimedia Commons* tiedostoista.

### Thales (noin 625–546 eKr.)



Thales oli Joonian Miletoossa, nykyisen Turkin länsiosassa vaikuttanut monitieteilijä, jonka uskotaan saaneen vaikutteita sekä egyptiläisestä tähtitieteestä että geometriasta.

Thalesia pidetään tunnetun tieteen historian ja joonialaisen luonnonfilosofian perinteen luoja. Thales pyrki erottamaan luonnonfilosofian uskonnosta ja etsimään luonnon ilmiöille järjellä ymmärrettäviä selityksiä. Thaleelle kaiken aineen perustana oli vesi – maan hän kuvasi vedessä kelluvana laattana.

Thales teki tähtitieteellisiä mittauksia, ja ennusti mm. vuoden 585 eKr. auringonpimennyksen sekä kuunpimennyksiä. Thales jakoi vuoden 365 päivään ja määritteli kevät- ja syyspäiväntasausten sekä talvi- että kesäpäivänseisausten ajankohdat.

<http://www-history.mcs.st-and.ac.uk/Biographies/Thales.html>

<http://www.iep.utm.edu/thales/>

[http://en.wikipedia.org/wiki/Thales\\_of\\_Miletus](http://en.wikipedia.org/wiki/Thales_of_Miletus)

### Anaksimandros (noin 610–546 eKr.)



Anaksimandros oli Thaleen oppilas, ja Anaksimeneen (noin 585–525 eKr.) ja Pythagoraan (noin 582–496 eKr.) oppi-isä, joka pyrki kuvaamaan luonnon peruslakeja ja taivaankappaleiden suhdetta maahan. Anaksimandroolta ei ole säilynyt alkuperäistekstejä, hänen ajatuksensa tunnetaan lähinnä Aristoteleen kirjoitusten kautta.

Anaksimandros opetti, että kosminen järjestys ei ole ylhäältä johdettua, vaan luonteeltaan geometristä; kosmistä järjestystä hallitsee tasapaino ja harmonia. Universumi rakentuu ikuisesta, rajattomasta *apeironista*. Universumin keskustassa olevaa maata ympäröi avaruus, jossa taivaankappaleet kiertävät maata kolmessa kehässä. Lähimpänä maata olevassa kehässä kiersivät tähdet, seuraavassa kuu ja kaukaisimmassa kehässä aurinko.

<http://www-history.mcs.st-andrews.ac.uk/Biographies/Anaximander.html>

<http://www.iep.utm.edu/anaximan/>

<http://en.wikipedia.org/wiki/Anaximander>

## Anaksimenes (noin 585–528 eKr.)

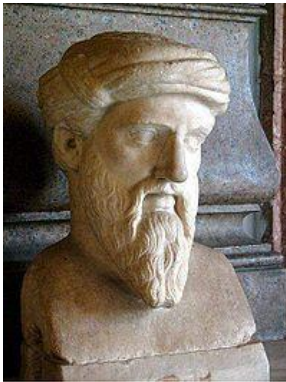


Anaksimenes oli Anaksimandroon oppilas ja samalla Thaleen nuorempi oppilas. Anaksimenes palasi vanhemman oppi-isänsä Thaleen ajatukseen siitä, että maailman kaikki aineet on johdettavissa yhdestä tunnetusta perusaineesta – hän kuitenkin korvasi Thaleen veden ilmalla, jonka hän katsoi olevan vettä ensisijaisempi. Anaksimeneen mukaan kaikki aineet, myös litteä maa, koostuivat tiivistyneestä ilmasta. Ajatus ilman primäärisyydestä lienee ainakin osittain peräisin havaitusta vesihöyryn kondensoitumisesta. Valinnalla saattoi olla myös syvällisempiä juuria sieluun ja elämän ilmenemiseen hengittämisen kautta. Anaksimenes lienee ensimmäinen, joka otti materian kuvaamisessa käyttöön Aristoteleen fysiikkaan periytyneet vastakkaiset ominaisuusparit kuuma/kylmä ja kuiva/kosteus.

<http://www.iep.utm.edu/anaximen/>

[http://en.wikipedia.org/wiki/Anaximenes\\_of\\_Miletus](http://en.wikipedia.org/wiki/Anaximenes_of_Miletus)

## Pythagoras (noin 570–490 eKr.)



Pythagoras syntyi Samoksen saarella, joka sijaitsee itäisellä Aigeian merellä. Pythagoraan arvellaan matkustelleen nuorena laajalti ”tiedon lähteillä” Egyptissä ja Lähi-idän maissa ja jopa Intiassa. Matkojensa jälkeen, vuoden 530 eKr. aikoihin hän asettui Crotoniin, eteläisessä Italiassa.

Pythagoras tunnetaan parhaiten geometriasta ja matematiikasta, aikalaistensa keskuudessa hänet ilmeisesti tunnettiin ennen kaikkea uskonnollisuuntatuneesta koulukunnastaan. Pythagoras noudatti askeettista elämäntapaa ja opetti esoteerista uskonnollista elämäntatsumusta. Pythagoraan arvoasteikossa korkeimmalla olivat ne jotka ”rakastavat viisautta”, seuraavana ne, jotka ”rakastavat kunniaa” ja alimpana ne, jotka ”rakastavat voittoa (rahaa)”.

Pythagoraalta ei ole säilynyt alkuperäiskirjoituksia, joten Pythagoraan aikaansaannoksiksi on todennäköisesti kirjautunut myös hänen oppilaidensa, ”pythagoralaisten”, töitä ja ajatuksia. Tietoa Pythagoraan opetuksista rajoittanee myös se, että hänen Crotonin koulukuntansa jäseniltä edellytettiin uskollisuutta ja salassapitoa. Koulukunta joutui konfliktiin alueen hallinnon kanssa, mikä johti koulukunnan hävittämiseen vuoden 508 aikoihin. Pythagoraan arvellaan paenneen Metapontiumiin parisataa kilometriä pohjoiseen Crotonista.

- 1) Pythagoraan ja pythagoralaisten matematiikka sisälsi mm. seuraavia löydöksiä:
- 2) Kolmion kulmien summa on 2 x suora kulma.

- 3) Pythagoraan teoreema: Suorakulmaisen kolmion kateettien neliöiden summa on yhtä suuri kuin hypotenuusan neliö.
- 4) Geometrinen algebrallisten yhtälöiden ratkaisu; esim. yhtälö  $a(a-x)=x^2$ .
- 5) Irrationaaliluvut.

Pythagoraan kosmologisia ajatuksia ohjasi hänen vakaumuksensa luonnon rakenteiden matemaattisesta säännönmukaisuudesta ja yksinkertaisuudesta. Hän oletti, että maapallo on pyöreä, ja huomasi mm., että kuun rata muodostaa pienen kulman päiväntasaajan tason kanssa. Hän lienee myös ensimmäisiä, joka ymmärsi, että iltatähti Venus on sama kuin aamutähti Venus. Pythagoraan jälkeen, vuoden 450 eKr. aikoihin Oenopideen on sanottu havainneen, että päiväntasaajan taso muodostaa 24 asteen kulman maan ratatason, ekliptikan, kanssa.

<http://www-history.mcs.st-andrews.ac.uk/Biographies/Pythagoras.html>

<http://plato.stanford.edu/entries/pythagoras/>

<http://en.wikipedia.org/wiki/Pythagoras>

## Herakleitos (noin 535–475 eKr.)



Herakleitos eli ja vaikutti Efesoksessa Vähä-Aasiassa lähellä Miletosta.

Herakleitoon ajattelussa yhdistyi pyrkimys syvälliseen ymmärrykseen ja aistihavainnoin saatavaan empiriseen tietoon. Herakleitos etsi henkistä valpautta ja tietoista elämäntapaa ja toteaa, että *”useimmat ihmiset elävät kuin unissakävelijät”*. Hän kritisoi edeltäjiensä puuttuvaa kykyä nähdä asioiden yhteys. Herakleitoon universumissa kaikella on yhteinen pe-

rusta luonnonlaiksi ymmärrettävän *Logoksen* kautta.

Herakleitoon *Logos* on laaja-alaisempi kuin myöhemmin lähinnä järkeen ja päättelyyn liitetty logos-käsite. Herakleitoon logos tarkoitti kaiken taustalla olevaa tietoisuutta ja luonnonlakia samaan tapaan kuin Intian filosofiaperinteen, *Advaita Vedantan*, *Brahman* käsite. Herakleitos korosti jumaluuden ykseyttä, vaikka sitä kutsutaan eri nimillä; ”Jumalalle kaikki on hyvää ja oikein, ihmisistä toiset asiat näyttävät oikeudenmukaiselta, toiset eivät”.

Herakleitos näki kiinalaisen taoismin tapaan ilmenemisessä vastakohtien harmonian sekä kaikessa luonnossa tapahtuvan jatkuvan muutoksen. Herakleitoon ajatukset logoksesta kaiken taustalla olevana luonnonlakina välittyivät pari sataa vuotta myöhemmin syntyneeseen stoalaiseen koulukuntaan.

Herakleitos tunnetaan ehkä parhaiten ”muutoksen filosofiasta”, jonka mukaan kaiken voidaan katsoa olevan jatkuvassa muutoksessa – mitä puolestaan Platon ja Aristoteles kritisoivat. Platon ja Aristoteles kritisoivat myös Herakleitoon ajatusta vastakohtien yhteydestä. Vastakohtien yhteys sisältää kuitenkin ajatuksen havaittavuuden syntymisestä; kylmä tunnistetaan suhteessa lämpimään, ja lämmin suhteessa kylmään. Herakleitoolle tuli oli muutoksen ja prosessin symboli. Tuli ei näin ollen ollut yhteismitallinen alkuaineiden kanssa, eikä siis nimettävissä yhdeksi alkuaineista.

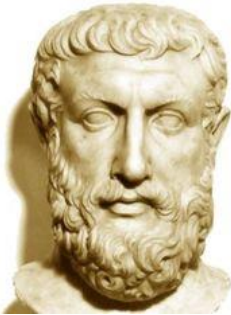
Herakleitoon muutosten filosofiassa on tunnistettavissa ajatus säilymislaeista; ”saadetta saadaan sama määrä kuin vettä haihtuu”, mistä myös välittyy myöhemmin Aristoteleen esittämä kehäkausalliteetti; asiat voivat olla toisilleen sekä syitä että seurauksia.

<http://www.illc.uva.nl/~seop/entries/heraclitus/>

<http://www.iep.utm.edu/heraclit/>

<http://en.wikipedia.org/wiki/Heraclitus>

## Parmenides (noin 510 eKr.)



Parmenides syntyi ja vaikutti Eleassa, Etelä-Italiassa, jonne hän perusti elealaisen koulukunnan. Parmenideelle todellisuus oli yksi jakamaton, mutta vastoin muiden esisokraattikojen käsitystä, muuttumaton. Aistein havaittava maailma on epätodellinen. Parmenideen muuttumattomuus lienee ymmärrettävä jonkinlaisen perussubstanssin säilymiseksi; ”mitään ei synny tyhjästä”. Parmenides kielsi tyhjiön olemassaolon, mikä johti hänet ristiriitaan Leukippoon noin vuonna 460 esittämän atomihypoteesin kanssa. Leukippoon mukaan kaikki maailmassa on joko atomeita tai tyhjää.

Parmenideen filosofiassa *luulo* perustui aistihavaintoihin ja arkiseen ajatteluun, *todellisuus* sen sijaan oli muuttumaton kokonaisuus, jonka vain puhdas järki ja intuitio saattoi saavuttaa. Parmenides käyttää puhtaasta järjestä ilmaisua *logos*, millä hänelle oli samantapainen sisältö kuin Herakleitoon logoksella. Parmenideen jälkeen Sokraateen, Platonin ja Aristoteleen käyttämän logoksen merkitys samastui yhä selvemmin loogiseen ajatteluun ja järjen käyttöön. Parmenideen ajatukset välittyivät jälkipolville hänen osittain säilyneestä runomuotoon kirjoittamastaan teoksesta *Luonnosta*.

<http://www.illc.uva.nl/~seop/entries/parmenides/>

<http://www.iep.utm.edu/parmenid/>

<http://en.wikipedia.org/wiki/Parmenides>

*The Parmenides of Plato:* [openlibrary.org](http://openlibrary.org)

*The Fragments of Parmenides:* [openlibrary.org](http://openlibrary.org)

## Anaksagoras (noin 500–428 eKr.)



Anaksagoras oli Anaksimeneen oppilas. Hän oli syntynyt Klazomenain kaupungissa, Jooniassa, nykyisessä Turkissa. Anaksagoras oli ensimmäinen filosofi, joka toi filosofian Jooniasta Ateenaan. Anaksagoras tunnetaan parhaiten nous-käsitteestään. Persoonaton jumaluus nous (järki) on luonut näkyvän maailman ikuisesta, äärettömästä ainemassasta. Ainemassa muodostui hienojakoisista osasista, jotka sisälsivät rakenneosat kaikkiin materiaalisiin rakenteisiin ja kappaleisiin sekä elollisiin olentoihin. Pienimmätkin ainesosat säilyttivät yhteytensä ainemassan muodostamaan kokonaisuuteen.

Anaksagoraan järki oli irrallinen ainemassasta. Se sisälsi kaiken voiman ja tiedon rakenteiden, olemassaolon ja elämän ohjaamiseen. Anaksagoraan ajattelua hallitsi mieltiskelyn tuottama holistinen kuva todellisuudesta, aistihavainnot eivät Anaksagoraan mukaan voineet synnyttää oikeaa kuvaa todellisuudesta.

<http://www-history.mcs.st-andrews.ac.uk/Biographies/Anaxagoras.html>

<http://plato.stanford.edu/archives/fall2011/entries/anaxagoras/>

<http://www.iep.utm.edu/anaxagor/>

<http://en.wikipedia.org/wiki/Anaxagoras>

## Empedokles (noin 492–432 eKr.)



Empedocles.

Empedokles oli Sisilian saarelta kotoisin oleva filosofi. Hänen katsotaan vakiinnuttaneen ja täsmentäneen antiikin neljän alkuaineen järjestelmän, jonka perusaineet olivat tuli, vesi, ilma ja maa. Empedokleen maailma oli jatkuvassa muutoksessa, jonka lähteinä olivat toisilleen vastakkaiset voimat, rakkaus ja riita, fysiikassa kokoavat ja hajottavat voimat. Alkuaineet olivat ikuisia, muutokset syntyivät niiden erilaisista yhdistelmistä.

Empedokles päätteli, että valo etenee auringosta äärellisellä nopeudella.

<http://www-history.mcs.st-andrews.ac.uk/Biographies/Empedocles.html>

<http://plato.stanford.edu/entries/empeocles/>

<http://www.iep.utm.edu/empeocle/>

<http://en.wikipedia.org/wiki/Empedokles>

## Filolaus (noin 470–385 eKr.)



Filolaus oli Crotonissa, Etelä-Italiassa vaikuttanut pythagoralainen filosofi ja monitieteilijä. Hän kirjoitti kirjan *Μονοστα* (*On Nature*), jota pidetään ensimmäisenä Pythagoraan koulukunnan kirjoista ja ensisijaisena pythagoralaisuuden lähteenä Platonille ja Aristoteleelle. Filolauun kosmos muodostui kahdenlaisista prinsipeistä: rajoittavista ja ei-rajoittavista. Ei-rajoittavat olivat jatkumoja ilman muotoa tai kokoa, kuten antiikin alkuaineet sekä aika ja avaruus. Rajoittavat prinsipit määrittelivät muodot ja määrät siten, että näin lokalisoitujen objektien olivat matemaattisesti ilmaistavassa harmoniassa rajoittamattomien prinsippien kanssa. Esimerkkinä harmonisesta rajauksesta Filolaus esitti sävelaskeleet, missä sävelkorkeuden jatkumo on jaettu kokonaislukujen suhteessa kuten esim. oktaavi suhteessa 1:2. Pythagoralaisen filosofian mukaan maailma rakentuu harmonisista suhteista ja se voidaan tuntea vain näiden suhteiden tuntemisen kautta.

Filolaus lienee ensimmäinen maakeskeisestä universonista luopunut filosofi. Filolaauun universonia hallitsi keskustuli, jota kaikki taivaankappaleet, maa mukaan lukien kiersivät. Keskustuli ei siis ollut aurinko – aurinko oli lasikiekko, joka heijasti keskustulen valon. Filolauun havainnoinnista ei ole säilynyt dokumentteja, kuitenkin hän määritteli synodisen kuukauden pituudeksi  $29\frac{1}{2}$  päivää (tarkka arvo 29,53) ja aurinkovuoden pituudeksi  $365\frac{1}{2}$  päivää (tarkka arvo 365,2564).

<http://plato.stanford.edu/entries/philolaus/>

<http://en.wikipedia.org/wiki/Philolaus>

## Leukippos (400-luku eKr.)



Joonialaiseen luonnonfilosofian koulukuntaan kuulunutta Leukippoota pidetään yleisesti atomismin isänä. Leukippoon tunnetuimmassa teoksessa, *Megas Diakosmos (Suuri maailmanjärjestelmä)*, hän kuvaa näkemystään seuraavasti: ”Maailma sai pallosymmetrisen muodon: atomit joutuivat jatkuvaan nopeaan ennustamattomaan liikkeeseen”. ”Sekä aineella että tyhjiöllä on paikkansa todellisuudessa. Aine koostuu täysin kiinteistä alkeisosasista, joita on lukemattomia, joilla on lukemattomia muotoja, ja jotka ovat jatkuvassa liikkeessä”. Hän opetti, että maailma on syntynyt atomien satunnaisen liikkeen synnyttämistä kasautumista, suurimmat atomit kasaantuivat keskelle ja pienemmät kauemmaksi keskustasta.

Atomien satunnaisesta liikkeestä huolimatta hän näyttää uskoneen olemassaolon tarkoituksellisuuteen ja tarkoituksenmukaisuuteen. Teoksessaan ”*Mieli*” hän toteaa: ”Mikään ei tapahdu turhaan, vaan kaikki syystä ja tarpeesta.”

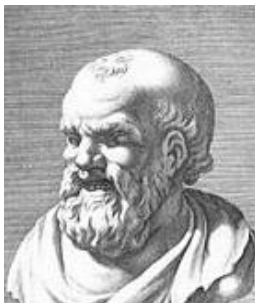
<http://www-history.mcs.st-andrews.ac.uk/Biographies/Leucippus.html>

<http://www.iep.utm.edu/leucippu/>

<http://plato.stanford.edu/entries/leucippus/>

<http://en.wikipedia.org/wiki/Leucippus>

## Demokritos (noin 460–370 eKr.)



Demokritos syntyi Abderan kaupungissa, Jooniassa Kreikan koillisrannikolla. Hän peri isältään suuren omaisuuden, mikä antoi hänelle mahdollisuuden matkustaa laajalti Aasiassa, Etiopiassa ja jopa Intiassa. Hän oli Leukippoon oppilas, joka kehitti edelleen Leukippoon atomiteoriaa. Sekä Leukippos että Demokritos edustivat rationalismia, jossa yhdistyi sekä determinismi että materialismi. He uskoivat, että ilmiöiden takana ovat täsmälliset luonnonlait. Aristoteleesta ja Platonista poiketen he pyrkivät kuvaamaan todellisuutta ja sen ilmiöitä perustelematta niiden tarkoitusta, alkusyitä tai ensisijaista liikuttajaa, vaikkakin he tarkastelivat yksittäisiin ilmiöihin liittyvää kausaalisuutta. Atomistit keskittyivät mekanistisiin kysymyksiin.



Demokritoon universumi oli Leukipoon ajatuksia seuraten muodostunut atomeista, jotka kaaoksessa pyöriessään törmäilivät ja muodostivat suurempia kokonaisuksia – mukaan lukien maan ja kaikki mitä maa päällään kantaa. Demokritoon atomit olivat ikuisia, absoluuttisen pieniä näkymättömiä ympäristöstään riippumattomia hiukkasia, jotka olivat lähinnä mekaanisessa vuorovaikutuksessa toisiin atomeihin. Demokritoon maailma toimi koneen tavoin, se oli kuin monimutkainen mekanismi, jolla oli alku ja loppu; maailma saattoi myös tuhoutua törmäyksessä toiseen maailmaan, millä hän ilmeisesti tarkoitti taivaankappaleen törmäämistä maahan. Demokritos oivalsi, että Linnunrata koostuu kaukaisista tähdistä, ja ajatteli, että elämää voi esiintyä myös näissä tuntemattomissa taivaankappaleissa. Demokritos muistutti myös siitä, että ihminen ei saa todellista tietoa ilmiöistä – hän ainoastaan määrittelee mitä hän uskoo niiden olevan.

<http://www-history.mcs.st-andrews.ac.uk/Biographies/Democritus.html>

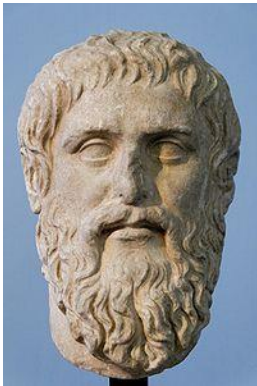
<http://plato.stanford.edu/entries/democritus/>

<http://www.iep.utm.edu/democrit/>

<http://www.crystalinks.com/democritus.html>

<http://en.wikipedia.org/wiki/Democritus>

## Platon (424–348 eKr.)



Platon oli Sokrateen (469–399 eKr.) oppilas, Ateenan Akatemian perustaja ja eräs jälkipolvien parhaiten tuntemista antiikin filosofeista. Vaikka Platonin pääasiallinen aktiiviteetti suuntautui yleisen filosofian alueelle, oli hänellä huomattava vaikutus myös luonnontieteiden kehitykseen. Sokrateen lisäksi Platon sai vaikutteita ainakin Herakleitolta ja Parmenideelta. Hän tutustui myös Pythagoraan töihin ja oppi arvostamaan matematiikkaa luonnon kuvaamisessa; ”... *todellisuuden kuvauksen, jota tieteellisessä ajattelussa tavoitellaan, täytyy olla ilmaistavissa matematiikalla, sillä matematiikka on tarkin ja määritellyin ajattelutapa, johon kykenemme*”.

Platon ei arvostanut havaintoja ja empiristä tietoa, vaan piti niitä alempiarvoisina ihmisen sisäiseen ideamaailmaan nähden. Matematiikan ja tähtitieteen Platon näki linkkinä havaintomaailman ja ideamaailman välillä. Platonin suhdetta luontoon ja luonnontieteisiin hallitsi Herakleiton *logoksen* kaltainen maailmansielu, jonka vaikutus kuvastui luonnonlakien kautta.

Platon piti luonnonlakeja ikuisina ja muuttumattomina, mutta havaintomaailmamme jatkuvasti muuttuvana.

<http://www-history.mcs.st-andrews.ac.uk/Biographies/Plato.html>

<http://plato.stanford.edu/entries/plato/>

<http://www.iep.utm.edu/plato/>

<http://en.wikipedia.org/wiki/Plato>

Plato (1914), [openlibrary.org](http://openlibrary.org)

George Burges, *The Works of Plato* (1850): [openlibrary.org](http://openlibrary.org)

## Eudoksos (noin 408–355 eKr.)



Eudoksos oli Platonin oppilas, joka opiskeli tähtitiedettä ja matematiikkaa myös Egyptin Heliopoliksessa. Eudoksos oli pythagoralaisen perinteen mukaisesti suuntautunut numeroihin ja harmonisiin suhteisiin. Hän käsitteli rationaalilukujen lisäksi irrationaalilukuja ja ratkaisi geometrisin menetelmin matemaattisten käyrien rajoittamia pinta-aloja, mikä oli esiaste integraalilaskennalle.

Eudoksos esitti ajatuksen taivaankappaleiden pallonmuotoisuudesta ja kuvasi maapalloa pallokartalla. Hän kehitti myös maakeskeisen planeettakuvauksen tarvitsemaa episyklimalia 370-luvulla eKr., jota täydensivät Platonin oppilaat, Euktemon ja Meton maan radan elliptisyydestä johtuvalla epäsymmetrialla syys- ja kevätpäiväntasausten ajankohdissa talvi- ja kesäpäiväntasausten välillä. Maakeskeisessä mallissaan he ratkaisivat asian siirtämällä auringon radan keskipisteen maan keskipisteestä maan ulkopuolelle.

Planeettamallillaan Eudoksos pyrki planeettojen liikkeen havainnollistamiseen. Aristoteles kuvaa Eudoksoon mallin *Metafysiikassaan*. Vaikka Eudoksos ajatteli mallinsa lähinnä geometriseksi kuvaukseksi, Aristoteles tulkitsi sen tähtitaivaan todelliseksi mekanismiksi.

<http://www-history.mcs.st-andrews.ac.uk/Biographies/Eudoxus.html>

[http://en.wikipedia.org/wiki/Eudoxus\\_of\\_Cnidus](http://en.wikipedia.org/wiki/Eudoxus_of_Cnidus)

## Herakleides (noin 387–312 eKr.)



Herakleides oli Pontoksesta, nykyisestä Länsi-Turkista koitoisin oleva Platonin Akatemian oppilas ja monipuolinen tutkija, joka tähtitieteen ohella kirjoitti mm. fysiikasta, matematiikasta, musiikista, etiikasta, runoudesta ja retoriikasta. Hänen tiedetään myös olleen kiinnostuneen pythagoralaisesta mystiikasta.

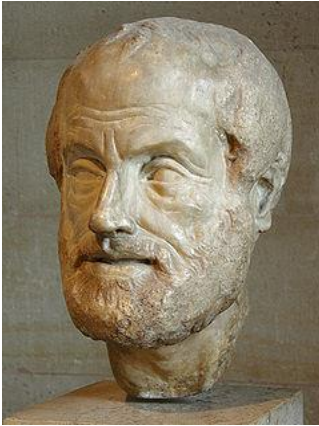
Herakleides oli tiettävästi ensimmäinen, joka esitti, että auringon ja tähtitaivaan näennäinen liike johtuu maan pyörimisestä oman akselinsa ympäri kerran vuorokaudessa. Hän havaitsi myös, että ainakin Merkurius ja Venus kiertävät aurinkoa. Hänen pythagoralaiset kollegansa, Ekfantos ja Hiketas jakoivat Herakleideen näkemyksen. On myös pidetty mahdollisena, että Ekfantos ja Hiketas eivät olisi olleet todellisia henkilöitä, vaan pythagoralaisuutta edustavia henkilöähahmoja Herakleideen dialogeissa.

<http://www-history.mcs.st-andrews.ac.uk/Biographies/Heraclides.html>

<http://plato.stanford.edu/entries/pythagoreanism>

[http://en.wikipedia.org/wiki/Heraclides\\_Ponticus](http://en.wikipedia.org/wiki/Heraclides_Ponticus)

## Aristoteles (384–322 eKr.)



Aristoteles syntyi Stageirassa, Khalkidiken niemimaalla Koillis-Kreikassa. Aristokraattiperheen poikana hän sai hyvän koulutuksen Ateenassa. Kahdeksantoista vuoden ikäisenä hän pääsi Platonin oppilaaksi Akatemiaan, jossa hän jatkoi opintojaan ja tutkimuksiaan lähes kahdenkymmen vuoden ajan. Akatemian ajan jälkeen hän matkusti Vähän-Aasian alueella. Vuonna 343 eKr. Makedonian kuningas Philip II kutsui hänet poikansa Aleksanteri Suuren opettajaksi ja Makedonian Kuninkaallisen Akatemian johtajaksi. Aristoteles rohkaisi Aleksanteri Suurta valloitusretkilleen itään. Vuonna 335 eKr. Aristoteles palasi Ateenaan perustaen oman koulun, *Lyceumin*.

Aristotelesta pidetään yleisesti yhtenä kaikkien aikojen merkittävimmistä filosofeista. Hänen säilyneitä kirjoituksiaan ovat: *Fysiikka*, *Metafysiikka*, *Etiikka*, *Politiikka*, *Sielu ja Runous*. Yhdessä hänen työnsä muodostavat kattavan hakuteossarjan antiikin Kreikan tietämyksestä.

Luonnontieteiden alueella Aristoteleen fysiikkaa pidettiin alan auktoriteettina pitkälle keskiajan alkuun. Aristoteleen fysiikka on nykykäsitusten valossa enemmän filosofiaa kuin luonnontiedettä. Aineen ja liikkeen tarkastelun lisäksi se sisälsi ihmismielen ja ruumiin tuntemusta, muistin ja aistitoimintojen kuvausta sekä luonnonfilosofian taustalla olevia yleisiä periaatteita.

Kuten Platon, Aristoteles katsoi, että luonnontieteen tutkimuksen kohteena oleva todellisuus on olemassa havaitsijasta riippumatta – minkä voidaan katsoa määrittelyvän tieteellisen tutkimuksen ja sen tuottaman mallin tämän todellisuuden kuvaukseksi.

Aristoteleen tieteen perustana on ihmisen luontainen halu tietää. Aristoteles katsoo, että tieteen ja taiteen perustana on synn tuntemus; havainnot ja kokemus tuottavat tietoa, mutta eivät syiden (*first causes*) ja luonnon lainalaisuuksien (*principles*) tuntemusta, mikä on viisauden perustana. Tieteen tavoitteena on alkusyiden tunnistaminen. Alkusyiden tunnistamiseksi on tutkittava ilmiön taustalla olevia periaatteita, substanssia, sekä syitä muutoksen käynnistymiseen ja päättymiseen [Metafysiikka, kirja I, osa 3].

<http://www-history.mcs.st-andrews.ac.uk/Biographies/Aristotle.html>

<http://plato.stanford.edu/entries/aristotle/>

<http://www.iep.utm.edu/aristotl/>

Plato, *Physics*, [https://en.wikisource.org/wiki/Physics\\_\(Aristotle/Wikisource\\_translation\)](https://en.wikisource.org/wiki/Physics_(Aristotle/Wikisource_translation))

A.E. Taylor, *Aristotle* (1912): [openlibrary.org](http://openlibrary.org)

Aristotle Metaphysics: <http://classics.mit.edu//Aristotle/metaphysics.html>

Aristotle Physics: <http://classics.mit.edu//Aristotle/physics.html>

Aristotle Categories: <http://classics.mit.edu/Aristotle/categories.html>

Aristotle, e-kirjoja [openlibrary.org](http://openlibrary.org)

Thomas Aquinas (Akvinolainen), *Commentary on Aristotle's Physics*, <http://dhspritory.org/thomas/Physics.htm>

## Eukleides (noin 350–280 eKr.)



Eukleides oli Aleksandriassa vaikuttanut matemaatikko, joka lienee saanut oppia myös Platonin Akatemiassa. Parhaiten hänet tunnetaan euklidisestä geometriasta, jonka vastakohta, epä-euklidinen geometria, tunnistettiin vasta 1800-luvulla. Hänen kirjoittamansa *Elements* on eräs matematiikan historian merkkiteoksia. *Elements*-kirjassaan hän päättelee euklidisen geometrian periaatteet ja ominaisuudet pienestä määrästä aksiomeja.

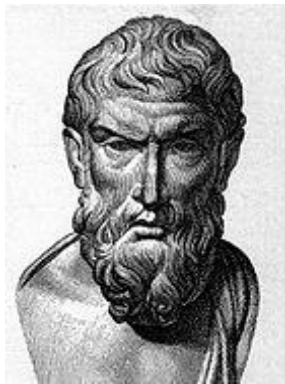
Eukleides tutki myös mm. perspektiiviä, pallogeometriaa, kartioleikkauksia ja lukuteoriaa.

<http://www-history.mcs.st-andrews.ac.uk/Biographies/Euclid.html>

<https://www.biographyonline.net/scientists/euclid.html>

*Elements*: <http://farside.ph.utexas.edu/Books/Euclid/Elements.pdf>

## Epikuros (341–270 eKr.)



Epikuros oli pääosin Ateenassa vaikuttanut filosofi ja Platonin Akatemian jäsen. Myöhemmin hän perusti Ateenaan oman koulunsa, josta vähitellen tuli yksi kolmesta filosofian keskuksista. Päinvastoin kuin esisokraattikot, hän korosti havaintojen ja aistien merkitystä, ja halusi luopua jumalien palvonnan perinteistä. Epikuros edusti materialistista maailmankatsomusta; hänelle universumi oli ikuinen ja ääretön, jossa tapahtumat olivat kuvattavissa atomien liikkeinä ja vuorovaikutuksina muutoin tyhjässä avaruudessa. Hänen mukaansa ihmiselle parasta on mielihyvä. Epikuros katsoi, että mielihyvä saavutetaan parhaiten kohtuullisuutta noudattamalla, tietoa hankkimalla ja ystävyydellä muiden ihmisten kanssa.

Epikuros oli empiirisen tieteen perinteen pioneeri; hän edellytti, mitään ei tule uskoa ennen kuin asia on todennettu havaintojen ja päättelyn avulla.

Epikuros oli empiirisen tieteen perinteen pioneeri; hän edellytti, mitään ei tule uskoa ennen kuin asia on todennettu havaintojen ja päättelyn avulla.

Epikuros omaksui Demokritoon atomiopin, vaikka se oli kohdannut vastustusta mm. Aristoteleeltä. Aristoteleen tulkinnan mukaan, Demokritoon atomeina epäjätkä kuva aine vaatisi, että myös liike ja aika olisivat epäjätkäviä. Tällöin esim. kappaleen liikkuessa atomien pitäisi hyppiä tahdissa samalla nopeudella epäjätkävyyksien yli. Epikuros vastasi Aristoteleen kritiikkiin selittäen, että vaikka atomi on jakamaton, liikkeen pituudella ei ole minimiä. Hän ajatteli kuitenkin, että atomien liikelait ovat erilaisia kuin makroskooppisten kappaleiden ja, että aika ja liike ovat epäjätkäviä.

<http://plato.stanford.edu/entries/epicurus/>

<http://www.iep.utm.edu/epicur/>

<http://en.wikipedia.org/wiki/Epicureanism>

<http://en.wikipedia.org/wiki/Epicurus>

## Aristarkhos (310–230 eKr.)



Aristarkhos oli Samoksen saarelta kotoisin oleva matemaatikko ja astronomi. Hänen tiedetään ehdottaneen aurinkokeskeistä universumia, jossa maa ja planeetat kiertävät aurinkoa. Aristarkhoolta ei ole säilynyt hänen omia kirjoituksiaan aiheesta, mutta mm. hänen oppilaansa Arkhimedes kuvaa lyhyesti hänen aurinkokeskeistä malliaan. Aristarkhohon aurinkokeskeiseen malliin viittaavat myös eräät hänen aikalaisensa aurinkokeskeistä mallia vastustaessaan.

Arkhimedes siteeraa Aristarkhohon kuvausta seuraavasti: *”Hänen hypoteesinsa oli, että kiintotähdet ja aurinko ovat liikkumattomia ja, että maa kiertää aurinkoa ympyräradalla, jonka keskellä aurinko on. Kiintotähtien kehä, jolla on sama keskus kuin auringolla, on niin suuri, että maan rata subtautuu siihen kuten kehän keskipiste sen pinnan etäisyyteen”*.

Aristarkhos arvioi kiintotähtien kehän koon lähes äärettömäksi planeettojen etäisyyksiin nähden. Ilmeinen tarkoitus Aristarkhoolla lienee ollut ilmaista, että maan radan säde on mitätön verrattuna kiintotähtien kehän säteeseen, jolloin maassa oleva havaitsija voi katsoa olevansa kiintotähtien kehän keskipisteessä.

Aristarkhos oletti Herakleideen tavoin, että vuorokausirytmii syntyi maan pyörimisestä oman akselinsa ympäri, minkä Arkhimedes oli päätellyt siitä, että Aristarkhos oletti auringon ja kiintotähtien olevan paikallaan. Joitakin Aristarkhohon mallin yksityiskohtia on voitu päätellä hänen vastustajiensa kirjoituksista. Stoalaisen koulukunnan Kleantes syytti Aristarkhosta epäkunnioituksesta jumalia kohtaan laittaessaan universumin keskuksen liikkumaan; *”Aristarkhos asettaa auringon kiintotähtien joukkoon ja väittää, että maa kiertää aurinkoa, ja saa maan varjoon inkliinaation määräämään”*<sup>1</sup>. Lause osoittaa, että Aristarkhos oli selittänyt vuodenajat maan inkliinaation avulla.

Nykypäiviin säilyneessä kirjassaan *Auringon ja kuun koosta ja etäisyyksistä* Aristarkhos päätteli auringon ja kuun etäisyyksien suhteen mittaamalla auringon ja kuun välisen kulman puolenkuun aikaan. Laskelmat perustuivat maakeskeiseen aurinkokuntaan. Tulos oli noin 87°, mikä antoi arvioksi, että aurinko on noin 20 kertaa kauempana maasta kuin kuu. Todellinen kulma mittaustilanteessa on 89°50'; auringon ja kuun etäisyyksien suhde on lähes 400. Saavutukset olivat kuitenkin erinomaisia Aristarkhohon ajan instrumentteja käytettäessä.

Koska auringon ja kuun maasta havaittava kulmakoko on jokseenkin sama, on auringon halkaisija etäisyyksien suhteessa suurempi kuin kuun halkaisija. Kuun halkaisijan hän päätteli seuraamalla maan varjon kulkua kuun pinnan yli kuunpimennyksessä. Koska maan varjon täytyminen kesti puolet täyden pimennyksen ajasta, hän päätteli, että kuun halkaisija on puolet maan halkaisijasta, mikä oli kertoimella kaksi liian suuri.

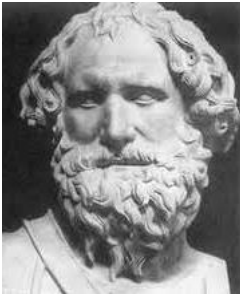
<http://www-history.mcs.st-andrews.ac.uk/Biographies/Aristarchus.html>

<http://www.archive.org/stream/aristarchusorpr00withgoog>

[http://en.wikipedia.org/wiki/Aristarchus\\_of\\_Samos](http://en.wikipedia.org/wiki/Aristarchus_of_Samos)

<sup>1</sup>T. Heath, *Aristarchus of Samos, the Ancient Copernicus* (1913) [openlibrary.org](http://openlibrary.org)

## Arkhimedes (noin 287–212 eKr.)



Arkhimedes oli antiikin ja kaikkien aikojen merkittävimpiä matemaatikkoita. Lisäksi hän oli filosofi, fyysikko, insinööri ja astronomi. Arkhimedes syntyi ja vaikutti Sisiliassa Syrakusan kaupungissa, jonka puolustamisen roomalaisten hyökkäyksiä vastaan kerrotaan onnistuneen Arkhimedeen keksimien sotakoneiden avulla.

Arkhimedes kehitti edelleen Eudoksoon käyttämiä menetelmiä pinta-alojen ja tilavuuksien laskemiseen, mikä loi perustan integraalilaskennalle. Hänen katsotaan olleen myös ensimmäinen geometrisen sarjan käyttäjä. Piin arvon Arkhimedes ratkaisi kolmen desimaalin tarkkuudella.

Arkhimedes määritteli perusteet kappaleiden ja systeemien painopisteiden laskemiseen, ja oivalsi hänen nimeään kantavan Arkhimedeen lain, jonka mukaan noste nesteessä on yhtä suuri kuin syrjäytetyn nestemäärän paino.

<http://www-history.mcs.st-andrews.ac.uk/Biographies/Archimedes.html>

<http://en.wikipedia.org/wiki/Archimedes>

T.L. Heath, *The Works of Archimedes*, [openlibrary.org](http://openlibrary.org)

T.L. Heath, *Geometrical solutions derived from mechanics: a treatise of Archimedes*, [openlibrary.org](http://openlibrary.org)

T.L. Heath, *The Method of Archimedes*, [openlibrary.org](http://openlibrary.org)

## Eratosthenes (276–194 eKr.)



Eratosthenes oli kreikkalainen matemaatikko, maantieteilijä, runoilija, urheilija, astronomi ja musiikin teorian tutkija, joka syntyi Kyrenen kaupungissa, nykyisen Libyan alueella. Eratosthenes tunnetaan yleisesti maantieteen isänä. Hän määritteli mm. maapallon ympärysmittaan mittaamalla auringon keskipäiväkorkeuden Aleksandriassa ja Assuanissa, jossa se kesäpäivän tasauksen aikaan oli kohtisuorassa taivaalla. Aleksandriassa mitattu pystysuoran tangon varjosta mitattu auringon kulma poikkesi pystysuorasta noin  $7,2^\circ$ , mikä Aleksandrian ja Syenen etäisyyteen, 5000 stadionia, suhteutettuna

antoi maapallon ympärysmittaksi 250 000 stadionia. Metreiksi muutettuna stadionmitalle on tiedossa kolme eri arvoa, 157, 185 ja 210 metriä. Mikäli Eratostheneen käyttämä stadion oli 157 metriä olisi tulos ollut 39 250 km, mikä on noin 2%:n tarkkuudella oikea tulos. Yleisesti kuitenkin uskotaan hänen käyttäneen 185 metrin stadionia, mikä merkitsisi 46 250 km arviota maapallon ympärysmitalle, mikä sekään ei ole huono tulos. Eratosthenes mittasi vuoden pituudeksi  $365\frac{1}{4}$  päivää, ja ehdotti karkauspäivän lisäämistä joka neljäs vuosi.

<http://www-history.mcs.st-andrews.ac.uk/Biographies/Eratosthenes.html>

<http://en.wikipedia.org/wiki/Eratosthenes>

## Apollonius (noin 262–190 eKr.)



Apollonius oli Länsi-Turkin Anatoliassa, Pergan kaupungissa elänyt astronomi ja matemaatikko, joka tunnetaan parhaiten hänen *Konika*-teoksessaan nimeämistä kartioleikkauksista, ellipsoidistä, paraabelista ja hyperbelistä. Apollonius teki merkittäviä tarkennuksia episykliseen planeettamalliin, ja kuvasi mm. kuun nopeuden vaihtelut radan eksentrisyydellä, sijoittaen kuun radan keskipisteen hieman sivuun maan keskipisteestä. Kirjassaan *Polttavista peileistä*, Apollonius osoitti, että yhdensuuntainen valo ei fokusoidu pisteeseen pallopeilistä vaan parabolisesta peilistä.

<http://www-history.mcs.st-andrews.ac.uk/Biographies/Apollonius.html>

[http://en.wikipedia.org/wiki/Apollonius\\_of\\_Perga](http://en.wikipedia.org/wiki/Apollonius_of_Perga)

## Hipparkhos (noin 190–120 eKr.)



Hipparkhos oli Nikeassa, nykyisessä Iznikin kaupungissa, Länsi-Turkissa syntynyt astronomi ja matemaatikko, jota pidetään tieteellisen tähtitieteen uranuurtajana. Perustan työllään hän lienee saanut babylonialaisilta tähtitieteilijöiltä.

Hän määräsi huomattavalla tarkkuudella päiväntasauspisteet, auringon radan elementit ja vuoden pituuden, 365 päivää, 5 tuntia ja 55 minuuttia. Hän tarkensi myös Aristarkhoon mitaamia kuun ja auringon etäisyyksiä; hänen arvionsa kuun etäisyydelle oli välillä 59 – 67 maan sädettä (oikea arvo on 60 x maan säde). Hipparkhos määräsi maan pyörimisakselin kiertymän (prekession), laati laajan kiintotähtien luettelon ja kehitti useita trigonometrisia menetelmiä tähtitieteellisten havaintojen käsittelyyn. Hipparkhos julkaisi töidensä tuloksia kirjassaan *Peri eniausíou megéthous* (*Vuoden pituudesta*), joka ei kuitenkaan ole säilynyt jälkipolville.

Hipparkhoon on arveltu laskeneen Aristarkhoon aurinkokeskeisen mallin mukaista systeemiä, mutta hylänneen sen koska radat eivät olleet täydellisiä ympyrä ratoja.

<http://www-history.mcs.st-andrews.ac.uk/Biographies/Hipparchus.html>

<http://www.crystalinks.com/hipparchus.html>

<http://en.wikipedia.org/wiki/Hipparchus>

## Seleukos (noin 190–150 eKr.)

Seleukos oli yksi harvoista Aristarkhoon aurinkokeskeisen järjestelmän kannattajista. Plutarkhoon mukaan Seleukos oli ensimmäinen, joka perusteli aurinkokeskisyyden havainnoista päättämällä, mahdollisesti Hipparkhoon kehittämää trigonometriaa hyödyntäen. Seleukos selitti vuorovedet kuun ja maan liikkeiden avulla jokseenkin nykyisen käsityksen mukaisesti ja näki avaruuden äärettömänä.

[http://en.wikipedia.org/wiki/Seleucus\\_of\\_Seleucia](http://en.wikipedia.org/wiki/Seleucus_of_Seleucia)



## Klaudios Ptolemaios (noin 85–165 jKr.)



Klaudios Ptolemaios oli Aleksandriassa, Egyptissä vaikuttanut Rooman kansalainen. Hän oli matemaatikko ja astro-nomi, joka kokosi aikansa tähtitieteellisen tiedon 13-osaiseen teokseensa *Mathematike Syntesis*, joka myöhemmin tuli tunnetuksi arabialaisperäisellä nimellä *Almagest*.

Almagestin kaksi ensimmäistä osaa esittelevät aristoteelisen maakeskeisen tähtitaivaan ja pallotrigonometrian perusteet, sekä taivaankappaleiden päivittäiset liikkeet ja niiden riippuvuudet havaitsijan sijainnista maapallolla. Osassa 3, Ptolemaios kuvaa auringon radan ympyräradalla, jonka keskipiste on sivussa maan keskipisteestä. Hän esittää myös Hipparkhoon havaitseman päiväntasausten siirtymän ja esittelee episykliä teoriaa.

Osat 4 ja 5 käsittelevät kuun liikettä, johon hän Hipparkhoon tavoin soveltaa episyklejä. Auringon ja kuun liikkeet yhdistäen hän saa teorian auringon- ja kuunpimennyksille (osa 6). Osat 7 ja 8 käsittelevät kiintotähtiä. Vertaamalla omia mittauksiaan Metonin ja Hipparkhoon vastaaviin mittauksiin noin 300 vuotta aikaisemmin, hän pääättelee, että kiintotähdet ovat säilyttäneet paikkansa toisiinsa nähden. Osat 7 ja 8 sisältävät yli tuhannen kiintotähden luettelon. Kirjan 5 viimeistä osaa käsittelevät planeettojen liikkeitä.

Kahdeksanosaisessa teoksessaan *Geografia* Ptolemaios luettelee tunnettujen paikkojen pituus- ja leveyskoordinaatit. Kirjassaan *Optiikka* hän tarkastelee värejä, heijastusta, valon taittumista väliaineiden rajapinnoissa sekä erimuotoisten peilien ominaisuuksia.

Ptolemaioon *Almagest* säilytti asemansa tähtitieteen perusteoksena ja auktoriteettina lähes 1500 vuotta.

<http://www-history.mcs.st-andrews.ac.uk/Biographies/Ptolemy.html>

<http://en.wikipedia.org/wiki/Ptolemy>

<http://en.wikipedia.org/wiki/Almagest>

Almagestum: [http://www.univie.ac.at/hwastro/books/1515\\_ptole\\_ColMed.pdf](http://www.univie.ac.at/hwastro/books/1515_ptole_ColMed.pdf)

R. Fitzpatrick, *A Modern Almagest*, <http://farside.ph.utexas.edu/Books/Syntaxis/Almagest.pdf>

Karl Manitius, *Des Claudius Ptolemäus Handbuch der Astronomie* (1912) [openlibrary.org](http://openlibrary.org)

## Johannes Philoponus (490–570)



Johannes Philoponus (Johannes Filoponos) Aleksandriassa vaikuttanut teologi, filosofi ja monitieteilijä Johannes Philoponus oli ensimmäisiä Aristoteleen fysiikkaa kritisoivia filosofeja. Hän on julkaissut kirjoituksia logiikasta, matematiikasta, fysiikasta, astronomiasta, kosmologiasta, psykologiasta, teologiasta ja kirkon politiikasta.

Philoponus kritisoi Aristoteleen liikeoppia, ja esitti *impetus*-käsitteen selittämään liikkeen jatkuvuutta liikkeeseen sisältyvänä liikevoimana tai liike-energiana. Aristoteleen



ulkoisen liikuttajan sijaan, impetus kuvasi liikettä ylläpitävää ”liikkeen energiaa” (*incorporeal motive energeia*), jonka liikkuva kappale oli saanut liikkeen aiheuttajalta. Philoponusin mukaan liiketila säilyy, ellei impetusta poisteta liikkuvasta kappaleesta. Philoponus näki impetuksen kuvaavan myös planeettojen liikettä, tyhjiö ei ole este liikkeen jatkuvuudelle. Philoponus esitti, että myös ei-materiaalinen valo kantaa impetusta. Philoponusin ajatukset olivat reilut tuhat vuotta aikaansa edellä. Esimerkiksi Galileo Galilei viittaa suurella kunnioituksella Philoponusin töihin. Philoponus kyseenalaisti antiikin ajatuksen avaruuden ikuisesta olemassaolosta.

<http://plato.stanford.edu/entries/philoponus/>

<http://en.wikipedia.org/wiki/Philoponus>

Ioannes Philoponus, *De Alternitate Mundi* [openlibrary.org](http://openlibrary.org)

C. Widberg, *John Philoponus' Criticism of Aristotle's Theory of Aether* (1988) [google books](http://google.com/books)

## Jean Buridan (noin 1300–1360)



Jean Buridan oli Béthunessa Picardyssa Ranskassa syntynyt pappi ja filosofi, joka Pariisissa yliopiston rehtorina ja taiteiden maisterina ja kehitti opetustyönsä ohella impetukseen perustuvaa liikeoppia ja esitti impetukselle liikemäärää kuvaavan lausekkeen liikkuvan kappaleen painon ja nopeuden tulona.

Buridanin kirjalliset työt ovat suurelta osin hänen Aristoteleen kirjoituksiin tekemiään kommentteja, joita hän oli käyttänyt luentomateriaalinaan. Hänen päätyönsä *Summulae de dialectica* (*Kootut vuoropuhelut*) oli kattava logiikan oppikirja. Kirjassaan Buridan korvasi perinteistä Aristoteleen logiikkaa uudella *terministisellä logiikalla*, jota hän sovelsi niin etiikassa kuin luonnonfilosofiassakin. Buridanin kirjat tulivat hyvin suosituiksi eurooppalaisissa yliopistoissa.

Philoponusin impetus oli tarkoitettu kuvaamaan Aristoteleen liikettä ylläpitävän voiman ”liikuttajan” olemusta. Hän hylkäsi aristoteelisen käsityksen, että impetus laimentaisi spontaanisti. Buridanin mukaan impetuksen mahdollisen vähenemisen aiheuttaisi liikettä vastustava voima, kuten ilman vastus tai gravitaatio – näin ollen kappale jatkaisi liikettään loputtomiin, ellei siihen kohdistu vastustava voima. Buridan kirjoitti:

”... kun kappale jättää heittäjän käden, kappaletta pitää liikkeessä impetus, jonka heittäjä on sille antanut, ja jatkaa liikettä niin kauan kuin impetus on suurempi kuin liikettä vastustanut voima, loputtomiin, ellei tällaista vastustavaa voimaa, joka kääntää liikkeen suunnan vastakkaiseksi, ole.<sup>1</sup>”

Buridan oivalsi myös, että putoavan kappaleen kiihtyvyys on peräisin kasvavasta impetuksesta ja päätteli, että impetus on verrannollinen kappaleen nopeuteen ja painoon. Buridan näki impetuksen käsitteen toimivan myös taivaankappaleiden liikkeissä; rataliikkeeseen ei sisälly gravitaatiotilan muutosta eivätkä taivaankappaleet kohtaa ilman vastusta, joten niiden impetus säilyy ja liike jatkuu muuttumattomalla nopeudella.

Jean Buridan lienee ensimmäinen, joka pohti heiluria ja oskilloivaa liikettä ”tunnelikokeessa”, jossa ajatellaan putoavan kappaleen liikettä maapallon lävitse johtavassa tunnelissa. Peruseriaate sekä tunnelikokeesta että heilurissa on, että pudotuksessa saatu nopeus nousee kappaleen samalle korkeudelle, josta pudotus on alkanut.

Buridanin oppilas Dominicus de Clavasio kirjoitti impetuksesta vuonna 1357 ilmestyneessä *De Caelo* julkaisussa: ”Kun joku laittaa kiven liikkeeseen, hän kohdistaa siihen liikkeelle-panevan voiman, joka antaa myös kivelle tietyn impetuksen. Samalla tavoin gravitaatio ei ainoastaan synnytä liikettä putoavalle kappaleelle, vaan antaa sille myös liikkeen energian (motive power) ja impetuksen.

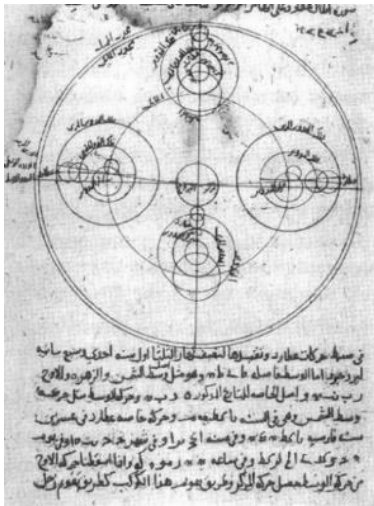
<http://plato.stanford.edu/entries/buridan/>

[http://en.wikipedia.org/wiki/Jean\\_Buridan](http://en.wikipedia.org/wiki/Jean_Buridan)

[http://en.wikipedia.org/wiki/Theory\\_of\\_impetus](http://en.wikipedia.org/wiki/Theory_of_impetus)

<sup>1</sup> T.F.Glick, S.J.Livesay, F.Wallis, *Medieval Science, Technology and Medicine Encyclopedia* (2005), p. 107

## Ibn al-Shatir (1304–1375)

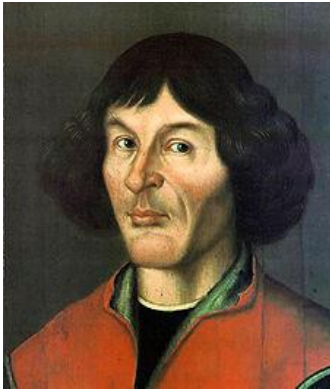


Ibn al-Shatir (1304–1375) oli syyrialainen tähtitieteilijä ja matemaatikko, joka toimi Damaskuksessa Umayyadin moskeijan kirkollisena ajanmäärääjänä. Hänen tähtitieteellisistä julkaisuistaan tunnetaan parhaiten *Kitab nihayat al-sul fi tashih al-usul* (*Kohhti Korjattuja Periaatteita*), jossa hän esittää vaihtoehdoisen mallin ptolemaiolaiselle planeettajärjestelmälle. Ibn al-Shatirin malli on maakeskinen, hän ei pyrkinyt ontologiseen tähti-taivaan kuvaamiseen vaan ainoastaan löytämään vastaavuuden havaintoihin. Ibn al-Shatir käytti mallissaan sisäkkäisiä ympyräpareja, joilla korvattiin Ptolemaioon episyklejä ja eliminoitiin ekvantti. Malli vastaa havaintoja tarkemmin kuin Ptolemaioon malli.

Maakeskisyydestään huolimatta, Ibn al-Shatirin mallin on todettu sisältäneen huomattavia matemaattisia yhtäläisyyksiä Kopernikuksen aurinkokeskeisen mallin kanssa. Kirjassaan *De Revolutionibus* Kopernikus mainitsee kiitollisuutensa Ibn al-Shatiria ennen vaikuttaneelle muslimitähtitieteilijälle ja matemaatikolle Muhammad al-Battanille (858–929 jKr.) hänen kehittämistään matemaattisista menetelmistä.

[http://en.wikipedia.org/wiki/Ibn\\_al-Shatir](http://en.wikipedia.org/wiki/Ibn_al-Shatir)

## Nikolaus Kopernikus (1473–1543)



Nikolaus Kopernikus syntyi 19.2.1473 nelilapsisen perheen nuorimmaisiksi Thornin kaupungissa silloisessa Länsi-Preussissa (nykyisen Gdanskin eteläpuolella, Puolassa). Nikolauksen ollessa kymmenvuotias hänen isänsä kuoli, jolloin hänen enonsa Lucas Wattenrode nuorempi otti Nikolauksen holhottavakseen. Lucas Wattenrode, oli Frauenburgin tuomiokirkon kaniikki (*canonicus, canon*), mikä ohjasi myös Nikolauksen opinnot kirkollisen kaniikin viran vaatimusten täyttämiseen.

Käytyään Wloclawekin katedraaliskoulun Keski-Puolassa, Kopernikus aloitti opintonsa vuonna 1491

Krakovan yliopistossa, Etelä-Puolassa, jossa hän opiskeli matematiikkaa ja tutustui astronomian perusteisiin Aristoteleen filosofian professorina toimineen Albert Brudzewskin opastuksella perehtyen mm. itävaltalaisen astronomin, Georg von Peurbachin (1423–1461) vuonna 1454 julkaisemaan teokseen *New Theories of the Planets*. Peurbach oli uskollinen Ptolemaioon maakeskeiselle mallille, mutta arvelee teoksessaan auringon hallitsevan planeettojen liikkeitä. Astronomian oppikirjana oli Johannes de Sacroboskon *Tractatus de Sphaera (Maailman ympyröistä)* vuodelta 1220. Kirja sisälsi ptolemaiolaisen tähtitieteen lisäksi islamilaista tähtitiedettä. Sacroboscon tiedetään myös perehtyneen arabialaiseen matematiikkaan.

Krakovassa ollessaan Kopernikus osti latinankielisen käännöksen Eukleideen teoksesta *Elements*, joka oli julkaistu Venetsiassa vuonna 1482 sekä auringon, kuun ja planeettojen sijainnin laskemista käsittelevän *Alfonsine Tables* ja pallosymmetristä astronomiaa käsittelevän teoksen *Tables of Directions*. Kopernikuksen kirjasto päättyi myöhemmin sotasaaliina Uppsalan yliopiston kirjastoon, jossa sitä edelleen säilytetään.

Vuosina 1496–1501 Kopernikus jatkoi opintojaan Bolognassa, jossa hänen opintonsa keskittyivät kirkon kanonisiin lakeihin. Bolognassa hän tapasi tunnetun italialaisen astronomin Domenico Maria Novara de Ferraran, ja toimi hänen apulaisenaan. Hän tutustui Georg von Peurbachin ja Johannes Regiomontanuksen vuonna 1496 julkaistuun lyhennelmään Ptolemaioon *Almagest* teoksesta. Lyhennelmässä oli esitetty mm. Ptolemaioon teorian mukaisia omituisuuksia kuun liikkeisiin liittyen. Kopernikus tarkisti Ptolemaioon ennusteet 9.3.1497 havainnoimalla Härän tähdistön kirkkainta tähteä, Aldebarania, ja totesi tuloksen vahvistaneen hänen epäilyjään maakeskeisen teorian toimivuudesta. Hän etsi lisää tukea epäilyilleen antiikin tähtitieteilijöiden kirjoituksista. Tietävästi saatavilla oli ainakin Plutarkhoksen (noin 45–125 jKr.) kirjoittamia antiikin filosofien elämäkertoja sekä kreikankielisiä tekstejä Pythagoraan, Platonin, Philolauun, Herakleideen, Ekfantoon ja Aristarkhoon ajatuksista.

Astronomisten harrastustensa ohella Kopernikus opiskeli Bolognassa lääketiedettä, opetteli kreikan kielen ja sai suoritetuksi tohtorin tutkinnon kanonisessa oikeudessa. Bolognasta hän palasi Linzbark Warminskin kaupunkiin Warmian maakunnassa

nykyisessä Puolassa, jossa hän toimi enonsa Lucas Watzzenrode nuoremman sihteerinä ja lääkärinä tämän kuolemaan asti vuonna 1512. Marraskuussa 1512 Kopernikus nimitettiin katolisen kirkon Warmian alueen omaisuudenhoidtajaksi, ja hän sai kirkolta talon asuttavakseen Fromborgin kaupungissa paikallisen tuomiokirkon yhteydessä. Työ antoi hänelle mahdollisuuden jatkaa samalla tähtitieteellistä havainnointia ja aurinkokeskeisen mallin kehittelyä.

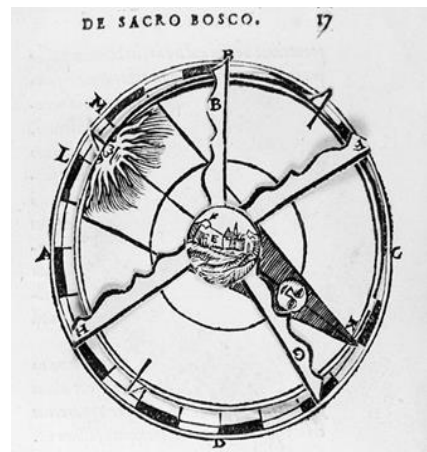
Kopernikus kokosi aurinkokeskeisen järjestelmänsä perusteet vuoden 1514 aikoihin kirjoittamaansa 40-sivuiseen yleiskuvaukseen *Commentariolus*, jota hän jakoi Krakovassa vuosina 1515–1530 työskennelleille kollegoilleen kommentoitavaksi. Painettuna *Commentariolus* ilmestyi vasta vuonna 1878.

Vuonna 1533 paavi Klemens VII:n sihteeriksi Johann Widmanstetter esitti Kopernikuksen aurinkokeskeisen järjestelmän paaville ja kahdelle kardinaalille. Paavin ensireaktio oli ilmeisen suotuisa. Ensimmäiset hyökkäykset Kopernikuksen teoriaa vastaan tulivat joitakin vuosia tämän jälkeen protestanttisen kirjailijan Wilhelm Gnapheuksen näytelmässä *Typerä tietäjä*, jossa kirjoittaja pilkkaa Kopernikusta ”yksinäisenä, koppavana miehenä, joka uskoi saaneensa Jumalalta innoituksen puuhasteluunsa tähtitieteessä, ja jonka hubuiliin kirjoittaneen laajan, kirstuun mätä-nemään jääneen työn”.

Näihin aikoihin Kopernikus lienee jo saattanut valmiiksi käsikirjoituksen pääteokseensa *De Revolutionibus Orbium Coelestium* (*Täivaallisten kehien kierroksista*). Hän viivytti kuitenkin teoksen julkaisua niin, että se ilmestyi vasta hänen kuolinvuotenaan 1543. Kirjan julkaisuun saatamiselle oli ilmeisen tärkeää Wittenbergin yliopiston nuoren matematiikan ja astronomian professorin, Georg



Kolmen suuren planeetan ja Venuksen malli Georg von Peuerbachin *Theoricae novae planetarum* teoksessa. Keskiosan pisteen ylhäältä alas: C[entrum] æquantis (ekvantin keskus), C[entrum] deferentis (deferentin keskus), C[entrum] mundi (maailman keskus). Kuva, [Wikimedia Commons](#).



Tractatus de Sphaera kirjan kuva esittää pyörivistä paperikiekoista tehtyä havaintovälinettä, ”tähtitieteen laskukiekkoa”, joka demonstroi kuun ja auringon liikkeitä. Kuva, [Wikimedia Commons](#).

Rheticusin panos. Rheticus oli tullut opiskelemaan Kopernikuksen systeemiä vuonna 1539. Samana vuonna hän sai Danzigin pormestarilta taloudellista tukea julkaistakseen *Narratio Priman*, joka sisälsi Kopernikuksen teorian esittelyn. *Narratio Prima* koko otsikko oli: ”*Ensimmäinen raportti Johann Schönerille Torunista kotoisin olevan, Warmian kaniikin, oppineen miehen ja ainutlaatuisen matemaatikon, Kunnioitetun Tohtori Nikolaus Kopernikuksen De Revolutionibus kirjoista – kirjoittanut muuan matematiikalle omistautunut nuorukainen*”.

*Narratio Prima* sai hyvän vastaanoton, mikä rohkaisi Kopernikusta viimeistelemään pitkäaikaisen työnsä julkaistavaksi.

Paaville omistamansa kirjan esipuheessa Kopernikus perustelee työtään taivaankappaleiden liikkeiden uudelleenarvioinnista silloisen mallin puutteilla ja toteaa astronomian tilasta mm.:

*”Ensinnäkin, astronomit ovat siinä määrin epävarmoja auringon ja kuun liikkeistä, että he eivät pysty määrittelemään ja havainnoimaan edes trooppisen vuoden pituutta [trooppinen vuosi: Maan akseli on uudelleen samassa asenossa aurinkoon nähden – trooppinen vuosi huomioi maapallon akselin kiertymän, precession, toisin kuin sideerinen vuosi, joka on maan kiertoaika auringon ympäri kiintotähtien suhteen].*

*Toiseksi, määrittäessään viiden planeetan liikkeitä he eivät käytä yhtäläisiä olettamuksia ja periaatteita. Samalla kun osaan planeetoista sovelletaan samankeskisiä ympyrä ratoja, toisiin erikeskeisiä ratoja ja episyklejä – eivätkä he siitä huolimatta täysin saavuta tavoitettaan.” Edelleen hän toteaa, että ”esittäessään monenlaisia lisäyksiä, he ilmeisesti synnyttävät ristiriitoja tasaisen liikkeen periaatteen kanssa”. ”He eivät myöskään ole keyenneet päättämään universumin rakennetta ja sen osien symmetriaa. Päinvastoin, heidän ratkaisunsa on kuin joku ottaisi eri paikoista käsiä, jalkoja, päin ja muita osia, ehkä hyvin kuvattuina erillisinä osina, mutta edustamatta kokonaista ihmistä; sillä erillisinä osat eivät muodosta ihmistä, vaan lähinnä hirviön ihmisen asemasta”.*

Kopernikus viittaa kirjansa esipuheessa Philolaon, Herakleideen ja Ekfantoon maan liikkumisen alkuperäisinä ehdottajina. Kopernikus varoittaa paavia asiattomista hyökkäyksistä kirjaansa vastaan. Hän mainitsee esim. Lactantiuksen (noin 240–340 jKr.), jonka tiedettiin kaunopuheisin sanakääntein pilkanneen niitä, jotka pitivät maata pallon muotoisena.

<http://plato.stanford.edu/entries/copernicus/>

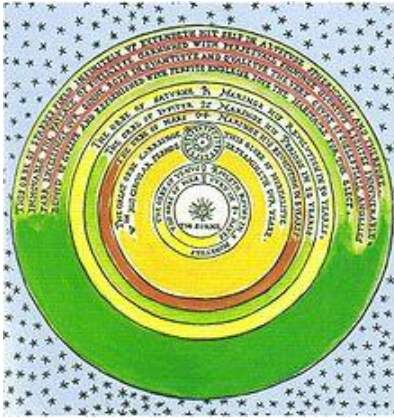
<http://www-history.mcs.st-andrews.ac.uk/Biographies/Copernicus.html>

<http://en.wikipedia.org/wiki/Copernicus>

*The Commentariolus*, <http://dbanach.com/copernicus-commentariolous.htm>

*De revolutionibus orbium coelestium*, <http://www.webexhibits.org/calendars/year-text-Copernicus.html>

## Sir Thomas Digges (1546–1595)



Thomas Digges oli englantilainen matemaatikko ja astronomi, joka oli yksi ensimmäisistä Kopernikusta kannattavista astronomeista. Anonssaan rahoitusta astronomiselle työlleen, hän perusteli asiaansa ”selvittääkseen onko inhimilliset kyvyt ylittävä jumalainen Nikolaus Kopernikus kertakaikkisesti korjannut tähtitaivaan systeemin, vai olisiko siihen vielä jotakin lisättävää”.

Digges käänsi osan Kopernikuksen *De Revolutionibus* teoksesta englanniksi. Hän poisti Kopernikuksen tekstistä kuvauksen kiintotähtien kehästä ja korvasi sen omalla ajatuksellaan äärettömästä määrästä kiintotähtiä, jotka sijaitsivat

Kopernikuksen kiintotähtien kehän takana äärettömyyksiin ulottuvassa avaruudessa. Digges lienee myös ensimmäinen, joka pohti pimeän tähtitaivaan paradoksia, jonka ääretön tähtien määrä synnyttää.

<http://www-history.mcs.st-andrews.ac.uk/Biographies/Digges.html>

<http://en.wikipedia.org/wiki/File:ThomasDiggesmap.JPG>

[http://galileo.rice.edu/Catalog/NewFiles/digges\\_tho.html](http://galileo.rice.edu/Catalog/NewFiles/digges_tho.html)

F R Johnson, *The Influence of Thomas Digges on the Progress of Modern Astronomy in 16th Century England*, *Osiris* 1 (1936), 390-410.

## Tyko Brahe (1546–1601)



Tyko Brahe oli astronomi, joka syntyi tanskalaiseen aatelis-perheeseen Skånessa, nykyisessä Etelä-Ruotsissa, joka tuohon aikaan kuului Tanskaan. Kaksivuotiaasta lähtien hän eli lapsuutensa setänsä Jörgen Brahen perheessä Tostrupin linnassa ja myöhemmin setänsä alaisuudessa olevassa Vordingborgin linnassa. Tyko Brahe aloitti yliopisto-opintonsa 12-vuotiaana Kööpenhaminassa opiskellen setänsä toivomuksesta lakia, mutta sen lisäksi myös mm. astronomiaa. Vuoden 1560 ennustetun auringonpimennyksen innoittamana hän hankki astronomian kirjallisuutta. Muutaman vuoden kuluttua hän siirtyi jatkamaan opintojaan Leipzigiin, missä hänellä oli varsinaisten opintojensa ohella mahdollisuus tehdä astronomisia havaintoja. Vuonna 1563, vasta seitsemäntoistavuotias Tyko havaitsi, että tuolloin tapahtunut Saturnuksen ja Jupiterin konjunktion ajankohta poikkesi Ptolemaioon taulukkoarvoista lähes kuukauden ja Kopernikuksenkin taulukkoarvoista muutaman päivän.

Vuonna 1571 Tykon sedän ja isän kuoltua, hän enonsa avustuksella rakennutti observatorion ja alkemian laboratorion Herritzwardin linnaansa. Jo seuraavana vuonna hän teki historiallisesti merkittävän havainnon huomattessaan uuden tähden syttyvän Cassiopeian tähdistöön. Kysymyksessä oli vuoden 1572 supernovaräjähdyksen Tyko

varmisti monin havainnoin, että kysymyksessä oli kiintotähtien etäisyydellä tapahtunut ilmiö, mikä järkytti vallinnutta käsitystä kiintotähtitaivaan muuttumattomuudesta. Havainto innosti Tyko Brahea suuntautumaan jälleen voimakkaammin astronomiaan ja entistä tarkempien havaintojen tekoon.

Tyko Brahe yritti sovittaa havaintojaan alun perin Herakleideen esittämään maakeskeiseen malliin, jossa aurinko, kuu ja ulkoplaneetat kiersivät maata, mutta Merkurius ja Venus kiersivät aurinkoa. Tyko Brahen mallissa, joka oli eräänlainen kompromissi Ptolemaioon ja Kopernikuksen malleista, kaikki planeetat kiersivät aurinkoa, mutta koko aurinkokeskinen planeettakunta maata yhdessä kuun kanssa.

Tyko Brahe sai Tanskan kuninkaan myötävaikutuksella uuden observatorion Venin saarelle Kööpenhaminan läheisyydessä, jossa hän työskenteli parikymmentä vuotta. Vuonna 1599 hän muutti perheineen ja instrumentteineen Prahaan, jossa hän apulaisensa Johannes Keplerin kanssa kokosi havainnoistaan *Rudolphinen taulukot*, rahoittajansa Rudolph II:n mukaan nimettynä. Kopernikuksen mallin hylkäämisestä huolimatta Tyko Brahe osoitti suurta kunnioitusta Kopernikuksen työtä kohtaan, kuten ilmenee hänen sanoistaan: *”Havainnoillaan Kopernikus löysi määrättyjä aukoja Ptolemaioon mallissa, ja hän päätteli, että Ptolemaioon teoria sisältää jotakin matematiikan aksioomien vastaista. Lisäksi hän huomasi, että Alfonsinen taulukot eivät täsmää taivaan liikkeiden kanssa. Siksi, ibailtavalla ähyllisellä tarkkuudella hän loi uuden hypoteesin. Hän arvio uudelleen taivaankappaleiden liikkeiden teorian tavalla, jonka tarkkuutta ei kukaan ennen häntä ollut saavuttanut”*.

<http://www-history.mcs.st-andrews.ac.uk/Biographies/Brahe.html>  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Tyco\\_Brahe](http://en.wikipedia.org/wiki/Tyco_Brahe)

## Giordano Bruno (1548–1600)



Giordano Bruno oli italialainen dominikaanimunkkikunnan jäsen, filosofi, matemaatikko ja astronomi. Hän oli perehtynyt Arabian astronomiaan, uusplatonismiin ja renessanssin ajan hermetismiin. Bruno omaksui muslimifilosofi Averroesin tulkinnan Aristoteleen ajatuksista, jonka mukaan alkusyy ja filosofia ovat uskoa ja uskoon perustuvaa tietoa tärkeämpää. Aristoteleen fysiikkaan Bruno esitti kritiikkiä.

Bruno oivalsi Kopernikuksen aurinkokeskeisen mallin merkityksen ja meni vielä askelta pidemmälle esittäessään, että aurinkokin tulisi ymmärtää yhdeksi äärettömän avaruuden lukemattomista tähdistä. Brunon radikaalit ajatukset johtivat lopulta syvään ristiriitaan kirkon oikeaoppisuuden puolustajien kanssa ja Bruno poltettiin roviolla Roomassa vuonna 1600. Brunon kohtalon arvellaan johtuneen ensisijaisesti hänen uskonnollisista näkemyksistään, mutta hänen kosmologisilla ajatuksillaan oli ilmeinen osansa inkvisition päätöksessä.

Teoksessaan *Perusyyistä, Periaatteesta ja Yksydestä* hän kirjoitti:

*”Tämä koko maapallo, tämä tähti, joka ei tule kuolemaan, ja hajoamisen ja katoamisen ollessa mahdoton kaikkeialla Luonnossa, yhä uudestaan se uusintuu muuttaen ja vaihtaen osiaan. Ei ole absoluuttista ”ylbäällä” ja ”albaalla” kuten Aristoteles opetti; ei absoluuttista paikkaa*



*avaruudessa, vaan kaikkien kappaleiden sijainti on suhteessa muihin kappaleisiin. Kaikkeialla universumissa jatkaa pysähtymätön subteellinen muutos, jonka keskipisteeseen havaitsija itsensä sijoittaa.”*

[http://www-history.mcs.st-andrews.ac.uk/Biographies/Bruno\\_Giordano.html](http://www-history.mcs.st-andrews.ac.uk/Biographies/Bruno_Giordano.html)

<https://plato.stanford.edu/entries/bruno/>

[http://en.wikipedia.org/wiki/Giordano\\_Bruno](http://en.wikipedia.org/wiki/Giordano_Bruno)

J. Lewis McIntyren, *Giordano Bruno* (1903) [openlibrary.org](#)

Eva Martin, *Giordano Bruno, Mystic and Martyr* (1921) [openlibrary.org](#)

## Francis Bacon (1561–1626)



Francis Bacon oli englantilainen filosofi, valtiomies, lakimies ja monitieteilijä, jota pidetään empirisen tieteellisen menetelmän pioneerina. Teoksessaan *Novum Organum Scientiarum – True directions Concerning the Interpretation of Nature (Uusi Tieteen Menetelmä – Todelliset suunnat luonnon tulkitsemiseen)* hän perusteli, että ajan tiedettä ohjasi aristoteelinen deduktiivinen, olettamuksista johdettu päättely induktiivisen, havaittuihin faktoihin perustuvan päättelyn sijaan. Kirjansa esipuheen hän aloittaa toteamuksella: ”Ne, jotka katsovat asiakseen määritellä luonnonlait ikään kuin ne olisivat löydetty ja ymmärretty, riippumatta siitä ovatko ne esitetyt yksinkertaisella vakaumuksella tai tieteellisellä auktoriteetilla, ovat tuottaneet suurta vahinkoa filosofialle ja tieteille”. Hän huomauttaa, että jotkut ovat valinneet vastakkaisen tien oivaltaessaan, että kertakaikkisesti mitään ei voi tietää. Bacon kiteyttää ajatuksensa *Novum Organumin* kahdessa osassa esitettyyn yhteensä 180:een aforismiin.

<http://plato.stanford.edu/entries/francis-bacon/>

<http://www.iep.utm.edu/bacon/>

[http://en.wikipedia.org/wiki/Francis\\_Bacon](http://en.wikipedia.org/wiki/Francis_Bacon)

Francis Bacon, *The New Organon: True Directions Concerning the Interpretation of Nature*

<http://www.earlymoderntexts.com/authors/bacon>

MacAlay & S.R. Gardiner, *Francis Bacon, Selections with Essays* [openlibrary.org](#)

John Nichol, *Francis Bacon, His Life and Philosophy* (1901) [openlibrary.org](#)

## Galileo Galilei (1564–1642)



Galileo Galilei syntyi Pisan kaupungissa, Pohjois-Italiassa. Galilei oli sekä kokeellinen tutkija, tähtitieteilijä, filosofi että matemaatikko. Galileo Galilei tunnetaan ehkä parhaiten ensimmäisenä kaukoputkea käyttäneenä astronomina ja vakaumuksesta kopernikaanisen, aurinkokeskeisen planeettajärjestelmän puolustajana. Galileissa yhdistyi käytännön kyky laitteiden suunnitteluun, tarkkojen kokeiden tekoon sekä koetulosten matemaattiseen analyysiin. Tutkijan ja luennoitsijan uransa hän aloitti opettamalla Aristoteleen filosofiaa Firenzessä ja Siensassa. Hän kiinnostui liikkeen tutkimisesta, ja kokeiden



suorittamiseksi hän mm. konstruoii tarkan hydrostaattisen vaa'an keveiden kappaleiden punnitsemiseen.

Galileo Galilei oli täysin vakuuttunut kopernikaanisesta aurinkokeskeisestä järjestelmästä. Mitä ilmeisimmin Galilein vakaumus perustui ennen kaikkea systeemin selkeyteen sekä sen matemaattiseen kauneuteen ja tarkkuuteen, jonka Kepler oli osoittanut. Näkemyksensä todistamiseksi Galilei joutui kuitenkin vetoamaan enemmän yksityiskohtaisiin havaintoihin ja päätelmiin kuin mallin periaatteelliseen paremmuuteen. Vaikka Galilei teki parhaansa saadakseen ajatuksilleen kirkon hyväksynnän, joutui hän inkvisition tuomitsemaksi pyhän totuuden vastaisen valheellisen opin levittämisestä. Ongelmat kirkon kanssa olivat lähteneet kärjistymään vuoden 1610 jälkeen.

Joulukuussa 1613 Pisan yliopiston matematiikan professori Benedetto Castelli, joka oli entinen Galilein oppilas, puolusti kopernikaanista systeemiä Toscanan herttuatarelle lähettämässään kirjeessä. Seuraavana vuonna dominikaanipappi Tommaso Caccini hyökkää Galileita ja muita Kopernikuksen kerettiläiseksi tuomitsemansa mallin kannattajia vastaan. Caccinin esimies valittaa tapahtunutta Galileille.

Vuoden 1615 joulukuussa Galilei meni Roomaan puolustamaan kopernikaanisia ajatuksiaan. Vuoden 1616 tammikuussa konsulttien komitea selitti inkvisitiolle, että ehdotus, jonka mukaan aurinko olisi universumin keskusta, on filosofisesti absurdi ja muodollisesti kerettiläinen, ja että ajatus, jonka mukaan maa olisi vuotuisessa kierto-  
liikkeessä, on filosofisesti absurdi ja ainakin teologisesti virheellinen.

Paavi Paavali V:n käskystä kardinaali Bellarmine kutsuu Galilein puhutteluun ja varoittaa häntä pitäytymisestä Kopernikuksen teoriaan tai puolustamasta sitä. Galilein ja Francesco Ingolin väittelyn jälkeen sovittiin, että Ingoli kirjoittaa perustelut maakeskeisyydestä ja että Galilei vastaa siihen kirjallisesti. Inkvisition päätöksen mukaan Galilei ei saanut vastata tässä vaiheessa. Galilei pyrki ylläpitämään suhteensa kirkkoon toimivina, missä hän onnistuikin kohtalaisesti useiden vuosien ajan, mistä oli osoituksena mm. hänen nimityksensä Firenzen Akatemian konsuliksi vuonna 1621.

Galilein vastaus sisältyi hänen vuonna 1632 valmistuneeseen kuuluisaan dialogiinsa *Dialogo dei due massimi sistemi del mondo* (*Kahden maailmanjärjestyksen vuoropuhelu*), jossa filosofi *Salviati* puolustaa kopernikaanista järjestelmää ilmeisen yksinkertaisen *Simplicio* nimisen filosofin kannattamaa ptolemaiolaista järjestelmää ja Aristoteleen fysiikkaa vastaan. Terveen järjen edustajana alun perin puolueeton maallikko *Sagredo* omaksuu keskustelun kuluessa *Salviatin* kopernikaanisen järjestelmän. Inkvisitio käsittelee kirjaa seuraavana vuonna. Kirja julistettiin pannaan, ja Galilei tuomittiin ”kerettiläisyydestä epäillyksi”. Galilei joutui viettämään loppuelämänsä kotiinsa suljettuna – *Dialogo* vapautettiin pannasta vasta vuonna 1822.

Galilei joutui julkisesti perumaan oppinsa inkvisition edessä 1633 ja elämään loppuelämänsä kotiarestiin eristettynä. ”Harhaopista” luopumatta jättämisestä oli varoittava esimerkki vuodelta 1600, jolloin Giordano Bruno (1548–1600) oli poltettu roviolla hänen kieltäytyttyään perumasta uskonnollisia näkemyksiään ja kopernikaanisia ajatuksiaan aurinkoa kiertävästä maasta sekä auringosta yhtenä kiintotähtenä lukemattomien muiden joukossa.

Vuonna 1638 Galileo Galilei yritti mitata valon nopeutta havainnoimalla lyhtyjen valon sytyttämistä ja sammumista vajaan mailin etäisyydeltä. Nopea syttyminen ja sammuttaminen toteutettiin sulkijoilla. Kun henkilö A avasi sulkijan, henkilö B testietäisyydellä näki valon syttyvän ja avasi merkiksi oman lyhtynsä sulkijan. Henkilö A havainnoi viiveen, joka kuului hänen oman lyhtynsä sulkijan avaamisesta siihen, että hän näki valon henkilön B lyhdystä. Galilei totesi, ettei hän kyennyt määrittämään valolle kulkuaikaa tässä kokeessa.

<http://www-history.mcs.st-and.ac.uk/Biographies/Galileo.html>

<http://plato.stanford.edu/entries/galileo/>

[http://en.wikipedia.org/wiki/Galileo\\_Galilei](http://en.wikipedia.org/wiki/Galileo_Galilei)

<http://galileo.rice.edu/galileo.html>

[http://en.wikipedia.org/wiki/Dialogue\\_Concerning\\_the\\_Two\\_Chief\\_World\\_Systems](http://en.wikipedia.org/wiki/Dialogue_Concerning_the_Two_Chief_World_Systems)

[http://en.wikisource.org/wiki/Catholic\\_Encyclopedia\\_%281913%29/Galileo\\_Galilei](http://en.wikisource.org/wiki/Catholic_Encyclopedia_%281913%29/Galileo_Galilei)

Sister Maria Celeste, *The Private Life of Galileo* (1870), [openlibrary.org](http://openlibrary.org)

T. Salusbury, *Dialogo* [openlibrary.org](http://openlibrary.org)

## Johannes Kepler (1571–1630)



Johannes Kepler syntyi Weil der Stadtin kaupungissa lähellä nykyistä Stuttgartia Saksassa. Keplerin ilmiömäinen matemaattinen lahjakkuus havaittiin jo varhaisessa iässä. Hän kiinnostui astronomiasta, mutta hänen lapsena sairastamansa isorokko heikensi hänen näköään ja rajoitti havainnointia, mikä saattoi vaikuttaa hänen tulevaan suuntautumiseensa matemaattiseen tähtitieteeseen. Tübingenin yliopistossa Kepler opiskeli ajan tavan mukaan ptolemaiolaista tähtitiedettä. Keplerin opettaja Michael Mästlin esitteli pienelle joukolle, Kepler mukaan luettuna, myös Kopernikuksen aurinkokeskeisen järjestelmän. Mästlin kertoi myös, että Kopernikuksen *De Revolutionibus*-teoksen esipuhe, jossa malli esitetään vain matemaattisena kuvauksena, ei ollut Kopernikuksen itsensä kirjoittama. Kepler, joka etsi luonnosta matemaattista kauneutta, ihastui välittömästi Kopernikuksen malliin ja näki siinä enemmän kuin pelkän matemaattisen kuvauksen.

Keplerin ensimmäinen merkittävä astronomian kirja, *Mysterium Cosmographicum* (*Kosmoksen ihme*) ilmestyi vuonna 1596. Siinä Kepler etsii planeettajärjestelmän matemaattista kauneutta aurinkokeskeisten sisäkkäisten monitahokkaiden (Platonin kappaleiden) avulla. *Mysterium Cosmographicum* oli samalla ensimmäinen kopernikaanisen järjestelmän julkinen puolustus.

Tyko Brahe vaikutti Keplerin teoksesta *Mysterium Cosmographicum* ja kutsui Keplerin assistenttikseen Prahaan vuonna 1600. Vaivalloisesti alkanut yhteistyö Tyko Brahen kanssa jäi lyhyeksi, sillä Tyko Brahe kuoli yllättäen lokakuussa 1601. Kepler nimitettiin Tyko Brahen seuraajaksi ja Kepler sai käyttöönsä Tyko Brahen tarkat havaintotulokset. Erityisen tärkeiksi osoittautuivat Mars-planeettaa koskevat mittaustulokset, joiden perusteella Kepler monien epäonnistuneiden yritysten jälkeen vuonna 1605 huomasi, että *planeettarataa on kuvattava ellipsillä, jonka toinen polttopiste on auringossa*

(Keplerin I laki). Jo tätä ennen hän oli Maan ja Marsin ratojen periheli- ja aphelipisteissä havaittuja nopeuksia vertaamalla päätellyt, että planeetan nopeus on suurin lähellä aurinkoa ja pienin etäällä auringosta siten, että *säde, joka yhdistää auringon ja planeetan, pyyhkäisee saman pinta-alan aikayksikössä* (Keplerin II laki). Kepler julkaisi nämä kaksi lakiaan vuonna 1609 kirjassaan *Astronomia nova (Uusi Astronomia)*. Vuonna 1618 Kepler keksi kolmannen lain koskien planeettojen liikkeitä: *Kiertoaajan neliö on verrannollinen puoliakselin pituuden kuutioon*, minkä hän viime hetkellä lisäsi kirjaansa *Harmonices mundi libri (Maailmojen Harmoniat)*.

Kepler oli vakuuttunut luonnon matemaattisesta kauneudesta, ja uskoi, että planeettakunnassa havaittava järjestys toistuu kaikissa luonnon rakenteissa kuten aineen rakenneosissa. Matemaattinen planeettajärjestelmän kuvaus oli tärkeä askel kohti matemaattista fysiikkaa – samalla se oli askel kohti mekanistista maailmankuvaa. Se oli ilmeisen tärkeä löydös Isaac Newtonille hänen muotoillessaan liikelakia gravitaation ja liikkeen yhteiseen matemaattiseen kuvaamiseen. Keplerin matemaattiset kuvaukset perustuivat Kopernikuksen rakennemalliin ja Tyko Brahen tarkkoihin havaintoihin. Tyko Brahen ja Johannes Keplerin yhteistyössä toteutui tarkka havainnointi ja havaintojen matemaattinen kuvaus.

<http://galileo.rice.edu/sci/kepler.html>

<http://www-history.mcs.st-and.ac.uk/Biographies/Kepler.html>

<http://www.science.uva.nl/~seop/entries/kepler/>

<http://en.wikipedia.org/wiki/Kepler>

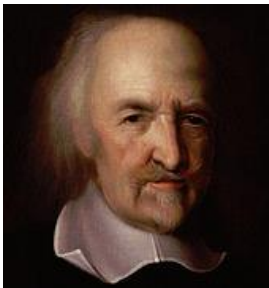
[http://en.wikisource.org/wiki/Author:Johannes\\_Kepler](http://en.wikisource.org/wiki/Author:Johannes_Kepler)

Walter W. Bryant, *Kepler* (1920), [openlibrary.org](http://openlibrary.org)

*Mysterium Cosmographicum*, [http://www.mindserpent.com/American\\_History/books/Kepler/1621\\_kepler\\_mysterium\\_cosmographicum.pdf](http://www.mindserpent.com/American_History/books/Kepler/1621_kepler_mysterium_cosmographicum.pdf)

*Harmonices mundi libri*, [http://posner.library.cmu.edu/Posner/books/pages.cgi?call=520\\_K38PI&layout=vol0/part0/copy0](http://posner.library.cmu.edu/Posner/books/pages.cgi?call=520_K38PI&layout=vol0/part0/copy0)

## Thomas Hobbes (1588–1679)



Thomas Hobbes oli englantilainen filosofi, joka tunnetaan parhaiten poliittisesta filosofiasta. Filosofian ohella hän tutki kaasujen fysiikkaa, geometriaa, teologiaa ja etiikkaa.

Thomas Hobbes tutki myös *conatus* käsitettä, jolle hän antoi liikkeen alkuunpanijan merkityksen. Hobbesin mukaan liikkeen alkuunpanija voi olla esim. jousi tai elastinen aine, johon on varastoitunut voima supistua tai laajeta. Vuonna 1655 hän julkaisi luonnonfilosofian ajatuksiaan käsittelevän kirjan *De Corpore (Kappaleista)*.

<http://www-history.mcs.st-and.ac.uk/Biographies/Hobbes.html>

<http://www.science.uva.nl/~seop/entries/hobbes/>

<http://en.wikipedia.org/wiki/Hobbes>

Sir William Molesworth, *English works of Thomas Hobbes of Malmesbury* (1839) [openlibrary.org](http://openlibrary.org)

Hobbes: Leviathan Part 1: <http://www.earlymoderntexts.com/authors/hobbes>

Hobbes–Wallis controversy: [http://en.wikipedia.org/wiki/Hobbes-Wallis\\_controversy](http://en.wikipedia.org/wiki/Hobbes-Wallis_controversy)

## René Descartes (1596–1650)



René Descartes oli ranskalainen filosofi, matemaatikko ja kirjailija. René Descartes syntyi La Haye en Tourainen, nykyisen Descartes'in kaupungissa. Kahdeksan vuoden ikäisenä hän aloitti koulunkäyntinsä jesuiittojen ylläpitämässä koulussa, jonka opetus perustui aristoteelismiseen skolastiikkaan. Vuonna 1614 hän jatkoi opintojaan Poitiersin yliopistossa ja sai lakitieteen lisensiaatin arvon vuonna 1616. Pian valmistumisensa jälkeen hän muutti Hollantiin ja päätyi Alankomaiden Yhdistyneiden provinssien käskynhaltijan palvelukseen. Jonkinlaisen sisäisen heräämisen kautta hän hylkäsi ”kirjaviisauden” ja halusi löytää viisauden omista ajatuksistaan ja kokemuksistaan. Aluksi hän käytti vapaa-aikansa matematiikan opiskeluun hollantilaisen filosofin ja monitieteilijän Isaac Beeckmanin innoittamana. Descartes matkusti useissa Euroopan maissa, mutta vietti suurimman osan aikuisiän elämästään Hollannissa, missä hän myös julkaisi suurimman osan kirjoituksistaan. Hänen ensimmäinen fysiikkaa käsittelevä teoksensa *Le Monde (Maailma)*, oli valmistumassa vuonna 1633 samaan aikaan kun hän kuuli Galileo Galilein kotiarestituomiosta. Kuulemastaan pelästyneenä hän viivytti kirjan julkaisua, sillä kirja sisälsi mm. voimakkaan kannanoton Kopernikuksen aurinkokuntamallin puolesta. Yksi *Le Monden* täydennys oli *La géométrie (Geometria)*, jossa kuvataan hänen mukaansa nimetty karteesinen koordinaatisto ja karteesinen geometria.

Vuonna 1641 Descartes julkaisi metafysiikan periaatteita sisältävän kirjan *Meditationes de Prima Philosophia* (Mietitiskelyä Filosofista) ja vuonna 1644 kirjan *Principia Philosophiae* (Filosofian Periaatteet) ja vuonna 1649 *Les Passions de l'âme* (Sielun Intohimot).

René Descartes kuoli vuonna 1650 Tukholmassa, jonne hänet oli kutsuttu kuningatar Kristiinan opettajaksi. Vuonna 1663 Paavi liitti hänen kirjansa kiellettyjen kirjojen luetteloon.

<http://www-history.mcs.st-andrews.ac.uk/Biographies/Descartes.html>

<http://www.science.uva.nl/~seop/entries/descartes/>

<http://www.earlymoderntexts.com/authors/descartes>

<http://www.iep.utm.edu/descarte/>

<http://en.wikipedia.org/wiki/Descartes>

*Discourse on the Method* (1637): <http://www.earlymoderntexts.com/assets/pdfs/descartes1637.pdf>

*Meditations on First Philosophy* (1641): <http://www.earlymoderntexts.com/assets/pdfs/descartes1641.pdf>

*Objections to the Meditations, and Descartes's Replies* (1642): <http://www.earlymoderntexts.com/assets/pdfs/descartes1642.pdf>

*Correspondence with Princess Elisabeth* (1643-9): <http://www.earlymoderntexts.com/assets/pdfs/descartes1643.pdf>

*Principles of Philosophy* (1644): <http://www.earlymoderntexts.com/assets/pdfs/descartes1644.pdf>

*Conversation with Burman* (1648): <http://www.earlymoderntexts.com/assets/pdfs/descartes1648.pdf>

*The Passions of the Soul* (1649): <http://www.earlymoderntexts.com/assets/pdfs/descartes1649.pdf>

## Pierre de Fermat (1601–1665)



Pierre de Fermat oli ranskalainen lakimies ja Tolousen parlamentin jäsen, joka harrastuksenaan kehitti matematiikkaa, luoden lähtökohtia differentiaali- ja integraalilaskennan ja lukuteorian kehitykselle.

Pierre de Fermat kehitti menetelmän erilaisten käyrien tangenttien, sekä minimien että maksimien määrittämiseen, sekä painopisteen määrittämiseen erilaisille tasokuvioille ja kappaleille. Hän lienee myös ensimmäinen, joka on määrännyt potenssifunktioiden integraaleja.

Pierre de Fermat oli innoittaja sekä René Descartes'ille, Gottfried Leibnizille että Isaac Newtonille. Isaac Newton totesikin, että hänen ajatuksensa differentiaali- ja integraalilaskennasta ovat peräisin Fermat'n tavasta piirtää tangentteja. Pierre de Fermat kehitti yhdessä Blaise Pascalin kanssa myös todennäköisyyslaskennan perusteita.

Pierre de Fermat tunnetaan myös *pienimmän ajan periaatteesta*, mikä sisältää väitteen, että valo valitsee nopeimman reitin kulkiessaan paikasta toiseen. Pienimmän ajan periaatteella voidaan yksinkertaisella tavalla johtaa esim. valon taittuminen linssissä tai veden pinnassa.

<http://www-history.mcs.st-and.ac.uk/Biographies/Fermat.html>

<http://en.wikipedia.org/wiki/Fermat>

## Ismael Boulliau (1605–1694)



Ismael Boulliau (tai Bullialdus) oli ranskalainen pappi, notaari ja amatööriastronomi ja -matematiikko, joka kannatti aktiivisesti Kopernikuksen, Keplerin ja Galilein teorioita. Hän piti kuitenkin virheellisenä Keplerin olettamaa etäisyyteen kääntäen verrannollista gravitaatiovoimaa. Hän väitti, että jos gravitaatiovoima on olemassa, sen tulee olla kääntäen verrannollinen etäisyyksien neliöön. Päätelmänsä hän teki valon intensiteetin pienenemisestä kääntäen verrannollisesti etäisyyden neliöön. Boulliau julkaisi useita astronomiaan ja matematiikkaan liittyviä julkaisuja,

joista tunnetuin on vuonna 1645 ilmestynyt *Astronomia philolaica*.

<http://www-history.mcs.st-and.ac.uk/Biographies/Boulliau.html>

[http://en.wikipedia.org/wiki/Ismael\\_Boulliau](http://en.wikipedia.org/wiki/Ismael_Boulliau)

## John Wallis (1616–1703)



John Wallis oli englantilainen matemaatikko, joka tutki mm. René Descartes'in (1596–1650) analyyttistä geometriaa ja päättymättömiä sarjoja, ja loi perusteita Isaac Newtonin ja Gottfried Leibnizin differentiaali- ja integraalilaskennan kehitykselle.

John Wallisin tiedonhalu näyttäytyi jo Tenterden Grammar Schoolissa, jossa hän aloitti koulunkäyntinsä vuonna 1625. Vuonna 1635 hän totesi autobiografissaan, että ”*matematiikka sopii mielenlaatuuni niin hyvin, että harjoitin sitä paremminkin rentouttavana harrastuksena kuin muodollisena oppina*”. Vuonna 1633 hän aloitti Emmanuel Collegessa, Cambridgessa. Koska Cambridgessa kukaan ei kyennyt ohjaamaan häntä matematiikassa, hän valitsi oppiaineikseen etiikkaa, metafysiikkaa, maantiedettä, astronomiaa, lääketiedettä ja anatomiaa. Wallis valmistui vuonna 1640, ja sai kappalaisen viran, ensin Yorkshiressä sitten Essexissä ja Lontoossa. Wallis sai Englannin sisällissodan aikana 1640-luvulla erityistä mainetta salakirjoitusten avaamisessa, mikä ilmeisesti liittyi hänen ilmiömäiseen kykyynsä päässä laskutaidossa. Hänen kerrotaan ratkaisseensa neliöjuurten arvoja kymmenien desimaalien tarkkuudella päässä laskun avulla.

Vuonna 1649 Wallis nimitettiin geometrian (Savilian Chair) professoriksi Oxfordin yliopistoon.

Wallis kirjoitti useita tutkielmia matematiikasta. Tunnetuin niistä lienee vuonna 1656 julkaistu *Arithmetica infinitorum*, jossa hän mm. esittää sarjakehitelmän piin arvon laskemiseen. Muita julkaisuja ovat mm. *Tract on Conic Sections* ja *Treatise on Algebra* (1685), jossa hän esittää kattavan historian matematiikan kehityksestä. Matematiikan lisäksi hän julkaisi useita uskontoon liittyviä kirjoja.

<http://www-history.mcs.st-and.ac.uk/Biographies/Wallis.html>

[http://en.wikipedia.org/wiki/John\\_Wallis](http://en.wikipedia.org/wiki/John_Wallis)

*A Treatise of Algebra, both Historical and Practical* (1685), etusivu, esipuhe:

<http://mathdl.maa.org/mathDL/46/?pa=content&sa=viewDocument&nodeId=2591&bodyId=3037>

Hobbes–Wallis controversy: [http://en.wikipedia.org/wiki/Hobbes-Wallis\\_controversy](http://en.wikipedia.org/wiki/Hobbes-Wallis_controversy)

## Blaise Pascal (1623–1662)



Blaise Pascal oli ranskalainen matemaatikko, fyysikko, keksijä, kirjailija ja katolinen filosofi. Hänen isänsä päätti, että Blaise ei tule opiskella matematiikkaa ennen 15 vuoden ikää. Pojan mielenkiinto kuitenkin heräsi, ja hän alkoi opiskella geometriaa 12 vuoden iässä. Kun hän päätteli, että kolmion kulmien summa on kaksi kertaa suora kulma, isä päätti kuitenkin hankkia hänelle Eukleideen *Elements* kirjan.

Pascal kirjoitti merkittävän tutkielman analyyttisestä geometriasta jo 16-vuotiaana. Vuonna 1642, 18-vuotiaana, hän konstruoi ensimmäiset



mekaaniset laskukoneensa monien yritysten jälkeen. Vuonna 1648 hän havaitsi, että ilman paine laskee korkeammalle siirryttäessä, ja päätteli, että ilmakehän yläpuolella on tyhjiö – mikä oli vastoin tuolloin vallinnutta yleistä käsitystä.

1650-luvulla Pascal teki yhteistyötä Pierre de Fermat'n kanssa todennäköisyysmatematiikan kehittämässä. Yhteistyö loi perustaa mm. Leibnizin differentiaali- ja integraalilaskennalle. Vuonna 1653 hän kirjoitti kuuluisan *Pascalin kolmion* sisältävän aritmetiikan tutkielmansa *Traité du triangle arithmétique*.

Matematiikan filosofian alueella Pascal pohti määritelmien ja aksioomien merkitystä ja luonnetta. Hänen näkemyksensä oli, että aksioomat perustuvat intuitioon, eikä niiden oikeellisuutta voi päättelyllä todistaa. Vuonna 1654 Pascal liittyi vallassa olevia jesuiittoja vastustavaan katolilaiseen jansenismi-liikkeeseen, ja suuntautui pääasiassa filosofiaan ja teologiaan.



Pascalin laskukone vuodelta 1642.

1650-luvulla Pascal alkoi julkaista nimettömiä uskonnollisia julkaisuja. Eräs hänen julkaisuistaan oli *Pascal's wager* (*Pascalin uhkapeli*), jossa hän väittää voivansa todistaa, että usko Jumalaan on rationaalista seuraavin perustein: *Jos Jumalaa ei ole, emme menetä mitään uskomalla häneen, jos taas hän on, menetämme kaiken olemalla uskomatta*. Hänen loppupäätelmänsä on, että ... *olemme pakotetut pelaamaan uhkapeliä ...*

<http://www-history.mcs.st-and.ac.uk/Biographies/Pascal.html>

<http://www.science.uva.nl/~seop/entries/pascal/>

[http://en.wikipedia.org/wiki/Blaise\\_Pascal](http://en.wikipedia.org/wiki/Blaise_Pascal)

Blaise Pascal, *Thoughts* (1910), [openlibrary.org](http://openlibrary.org)

Blaise Pascal, *Pensées* (1669), [wikisource.org](http://wikisource.org)

Blaise Pascal, *Of the Geometrical Spirit*, [wikisource.org](http://wikisource.org)

## Giovanni Cassini (1625–1712)



Giovanni Cassini oli italialais-ranskalainen astronomi, astrologi, matemaatikko ja insinööri, joka tunnetaan parhaiten Jupiterin kuihin, Saturnukseen ja Marsiin liittyvistä havainnoistaan. Cassini oli kotoisin Imperiasta, joka tuohon aikaan kuului Genovan tasavaltaan nykyisen Italian luoteisrannikolla.

Cassini toimi astronomian professorina Bolognan yliopistossa Italiassa ja vuodesta 1669 Pariisin observatorion johtajana. Bolognan aikana hän määritteli Jupiterin, Marsin ja Venuksen pyörähdysajat, Pariisissa työskennellessään hän löysi neljä Saturnuksen kuuta ja Saturnuksen renkaiden välisen, hänen mukaansa nimetyn Cassinin jaon.

<http://www-history.mcs.st-and.ac.uk/Biographies/Cassini.html>

[http://en.wikipedia.org/wiki/Giovanni\\_Domenico\\_Cassini](http://en.wikipedia.org/wiki/Giovanni_Domenico_Cassini)

## Robert Boyle (1627-1691)



Robert Boyle oli Irlannissa syntynyt englantilainen luonnonfilosofi, kemisti, fyysikko ja keksijä. Ennen opintojaan Eton Collegessa Englannissa hän oli saanut yksityisopetusta latinan, kreikan ja ranskan kielessä. Etonin jälkeen Boyle matkusti muutaman vuoden Manner-Euroopassa viettäen vuoden 1641 talven Italiassa, jossa hän tutustui mm. Galileo Galilein töihin.

Palattuaan Englantiin vuonna 1644, hän liittyi kokeelliseen fysiikkaan ja ”uuteen filosofiaan” suuntautuneiden luonnonfilosofien muodostamaan ”Näkymättömään yliopistoon” (Invisible College), jota pidetään Royal Societyn edeltäjänä.

Oleskeltuaan välillä Irlannissa, Boyle palasi Englantiin. Kuultuaan vuonna 1657 Otto von Guericken ilmapumpusta, hän konstruoi Robert Hooken avustuksella ”pneumaattisen koneen”, jolla hän teki lukuisia kokeita ilman ominaisuuksista. Tulokset julkaistiin vuonna 1659 kirjassa *New Experiments Physico-Mechanical, Touching the Spring of the Air, and its Effects...* (*Uusia fysiikaalis-mekaanisia kokeita, jotka käsittelevät ilman elastisia ominaisuuksia...*).

Robert Boyle tunnetaan parhaiten ”Boylen laista”, jonka mukaan kaasun paine ja tilavuus ovat suljetussa vakioämpöisessä systeemissä kääntäen verrannolliset. Boylen teos *The Sceptical Chymist* (*Skeptinen kemisti*), jossa hän pyrki nostamaan kemian alkemiasta tieteeksi, muodostui erääksi modernin kemian perusteoksista. Boyle edellytti tieteelliseltä kemialta teorioiden todennusta käytännön kokeilla. Boyle otti vahvasti kantaa atomiteoriaan; aine koostuu atomeista ja atomiryhmistä, kaikki ilmiöt ovat selitettävissä partikkelien liikkeillä ja törmäyksillä.

Boyle luotti vahvasti empirismiin, jopa oman työnsä arvioinnissa. Hän hyökkää Aristoteleen moniselitteisiä määritelmiä ja käsitteitä vastaan. Kirjansa *The Grounds for and Excellence of the Corpuscular or Mechanical Philosophy* (*Kappaleiden ja mekaniikan filosofian perusteet*) esipuheessa hän rajoittaa mekaanisen filosofiansa koskemaan vain ainetta ja materiaalisia kappaleita poissulkien kaiken mikä koskee mieltä.

<http://www-history.mcs.st-and.ac.uk/Biographies/Boyle.html>

<http://www.science.uva.nl/~seop/entries/boyle/>

[http://en.wikipedia.org/wiki/Robert\\_Boyle](http://en.wikipedia.org/wiki/Robert_Boyle)

Flora Mason, *Robert Boyle, a Biography* [openlibrary.org](http://openlibrary.org), [wikisource.org](http://wikisource.org)

Robert Boyle, *Sceptical Chymist* (1661), [wikisource.org](http://wikisource.org)

Robert Boyle, *The Grounds for and Excellence of the Corpuscular or Mechanical Philosophy*:

<http://www.earlymoderntexts.com/assets/pdfs/boyle1674a.pdf>

Robert Boyle, *The Origin of Forms and Qualities, Part 1*: <http://www.earlymoderntexts.com/assets/pdfs/boyle1666.pdf>



## Christiaan Huygens (1629–1695)



Christiaan Huygens oli hollantilainen matemaatikko, astronomi, fyysikko ja kellonrakentaja. Christiaan Huygens syntyi Haagin kaupungissa, Hollannissa; hänen isänsä oli René Descartesin läheinen ystävä, René Descartesilla oli ilmeinen vaikutus Christiaanin kiinnostukseen matematiikka kohtaan. Christiaan opiskeli lakia ja matematiikkaa Leidenin yliopistossa ja College of Oran-gessa, Bredassa. Lyhyen diplomaattiuransa jälkeen Christiaan Huygens suuntautui tieteeseen. Fysiikan alueella hänen tärkeimmät saavutuksensa liittyvät heilurin ominaisuuksien matemaattiseen ratkaisuun, keskipakoisvoiman ja liikemäärän määrittelyyn sekä valon aaltoteoriaan ja optiikan perusteisiin.

Kokeellisen fysiikan alueella Huygens teki merkittävää työtä teleskooppien kehityksessä, selvitti Saturnuksen renkaiden rakennetta ja löysi Saturnuksen Titan kuun. Lisäksi hän konstruoi sekä heiluri- että jousikelloja.

Vuonna 1678 ilmestyneessä kirjassaan kirjan *Treatise on light*<sup>1</sup> (*Kirjoituksia valosta*) hän tarkastelee mm. valon nopeutta ja analysoi Ole Römerin Jupiterin Io kuusta tekemät mittaukset. Huygensin arvio Römerin mittauksista saadulle valon nopeudelle oli noin 600 000 kertaa äänen nopeus, mikä vastaa nopeutta noin 210 000 km/s. Tähän tulokseen vedoten hän päättelee, että Descartesin esittämä hypoteesi valon äärettömästä nopeudesta ei ole perusteltavissa. Descartes oli päätenyt hypoteesiinsa kuunpimennyksiin liittyvistä havainnoista. Huygens osoitti, että kuunpimennyksistä voidaan päätellä ainoastaan, että valon kulku-aika kuusta on pienempi kuin 10 sekuntia, mikä tarkoittaisi että valon nopeus on ainakin suurempi kuin noin 30 000 km/s.

Huygensin valon aaltoteoria perustui ensisijaisesti hänen kokeisiinsa valon heijastuksesta, taantumuksesta ja interferenssistä. Huygensin teoria jäi Newtonin hiukkasteorian varjoon noin sadaksi vuodeksi, kunnes Thomas Young ja Augustin-Jean Fresnel 1800-luvun alussa vahvistivat Huygensin päätelmät ja aaltoteorian ensisijaisuuden valon ja optisten ilmiöiden kuvaamisessa.

Huygensin tärkeimpänä työnä pidetään vuonna 1673 ilmestynyttä teosta *Horologium oscillatorium sive de motu pendularium* (*Heilurikellon teoria ja suunnittelu*). Nimen mukaisesti hän käsittelee kirjassaan heilurin teoriaa, keskipakoisvoimaa ja heilurikelloja.

Eräässä kirjeessään vuonna 1687 saksalaiselle matemaatikolle, Tschirnhausille, Huygens selittää tieteellistä työtään: “... aluksi tuntuu olevan suuria vaikeuksia, joista selviää vain aloittamalla kokeista ... joiden pohjalta voi kehitellä hypoteesin ... Mutta sittenkin tarvitaan vielä paljon kovaa työtä, eikä vain älyä ja osaamista vaan myös usein myös annoksen hyvää onnea”.

<sup>1</sup> <http://www.gutenberg.org/files/14725/14725-h/14725-h.htm>  
<http://www-history.mcs.st-andrews.ac.uk/Biographies/Huygens.html>  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Christiaan\\_Huygens](http://en.wikipedia.org/wiki/Christiaan_Huygens)

## Christopher Wren (1632–1723)



Christopher Wren oli eräs arvostetuimpia englantilaisia arkkitehtejä, joka mm. vastasi Lontoon palossa vuonna 1666 tuhoutuneiden kymmenien kirkkojen jälleenrakentamisesta. Hänet tunnetaan myös astronomina, matemaatikkona ja fyysikkona, jolla oli tärkeä rooli tiedettä voimakkaasti edistäneen Royal Societyn perustamisessa ja toiminnan aktivoinnissa. Christopher Wren syntyi East Knoylessa, lounaisessa Englannissa. Lapsena melko paljon sairastellut Christopher Wren eli 90-vuotiaaksi.

Christopher Wren osoitti kiinnostusta sekä piirtämiseen että tieteisiin jo nuorena. Saatuaan yksityisopetusta kotona, hän aloitti koulunkäyntinsä yhdeksänvuotiaana Westminsterin koulussa Lontoossa. Tärkeä innostaja Christopher Wrenille oli hänen vanhemman sisarensa mies, matemaatikko William Holder, joka sekä opetti Christopherille matematiikkaa että rohkaisi häntä astronomian opiskeluun ja havainnointiin. Jätettyään Westminsterin koulun vuonna 1646 hän jatkoi omatoimista perehtymistään tieteisiin konstruoiden mm. aurinkokelloja ja malleja aurinkokunnasta sekä havaintovälineitä lihasten toiminnan demonstrointiin lääketieteen opetuksessa.

Christopher Wren jatkoi opintojaan Wadham Collegessa, Oxfordissa vuodesta 1649. Hänen tieteellinen kiinnostuksensa ulottui astronomiasta anatomiaan, hänelle oli ominaista teoreettisen tiedon havainnollistaminen ja kyky konstruoida mitä erilaisimpia apuvälineitä ja instrumentteja.

Vuonna 1657 Christopher Wren nimitettiin astronomian professoriksi Gresham Collegeen, Lontooseen. Hänellä oli selvä näkemys elliptisten planeettaratojen ja etäisyyden neliöön kääntäen verrannollisen voiman yhteydestä, jonka Newton 30 vuotta myöhemmin ratkaisi – Wrenin aktivoitua ongelman ratkaisun Royal Societyssä vuonna 1684. Wrenillä oli tärkeä rooli Royal Societyn perustamisessa; hänen astronomian luentonsa kokosivat ”näkymättömän yliopiston” jäseniä jatkokeskusteluihin, jotka vuonna 1662 johtivat Royal Societyn perustamiseen.

Vuosina 1661–73 Wren toimi astronomian (Savilian) professorina Oxfordissa. Oxfordin aikana hän oli aktiivinen myös arkkitehtinä ja aloitti mm. St. Paul’s Cathedralin suunnittelun ja lukuisat työnsä Lontoon vuoden 1666 palon jälkeiseen rakentamiseen.

Kaiken muun toiminnan ohella Wren teki geometriassa ja matematiikassa tärkeitä löytöjä, jotka edesauttoivat Newtonia taivaanmekaniikan ratkaisussa ja Principian synnyssä.

<http://www-history.mcs.st-and.ac.uk/Biographies/Wren.html>

[http://en.wikipedia.org/wiki/Christopher\\_Wren](http://en.wikipedia.org/wiki/Christopher_Wren)

Lena Milman, *Christopher Wren* (1908), [openlibrary.org](http://openlibrary.org)

## Robert Hooke (1635–1703)



Robert Hooke oli englantilainen luonnonfilosofi, arkkitehti ja matemaatikko, joka tunnetaan työstään mikroskopian ja moninaisten mekaanisten laitteiden kehittämisessä sekä Royal Societyssä tekemästään monipuolisesta empiirisestä tutkimuksesta. Hooke syntyi Isle of Wightin saarella. Hän oli käden taitoihin suuntautunut, kolmentoista vuoden iässä hän hakeutui Lontooseen muotokuvamaalari Peter Lelyn oppipojaksi.

Pian hän kuitenkin kiinnostui kouluopinnoista ja pääsi Westminsterin kouluun Lontoossa. Koulun rehtorin, Richard Busbyn opastuksella Hooke omaksui Eukleideen *Elements* kirjan kuusi ensimmäistä osaa ensimmäisen kouluvuikkonsa aikana. Hän sovelsi geometrian oppiaan yrittäessään suunnitella ”lentävää laitetta”. Hooke oli kiinnostunut myös musiikista, ja opetteli soittamaan urkua.

Vuonna 1653 hän muutti Oxfordiin, jossa hän osallistui Robert Boylen, John Wilkinsin, John Wallisin, Christopher Wrenin ja muiden tunnettujen luonnonfilosofien perustaman ”näkymättömän yliopiston” (invisible college) kokouksiin. Hän sai koulusten kautta monipuolisen tieteellisen koulutuksen ilman virallista tutkintoa. Vuodesta 1655 hän oli Boylen apulaisena konstruoiden Boylen tutkimusten edellyttämän ilmapumpun. Pian hän ryhtyi kehittämään ajatusta merenkulkijoiden tarvitsemasta tarkasta kellosta, ja päätyi jousien käyttöön heilurin asemasta. Työnsä yhteydessä hän keksi Hooken lain paineen ja tilavuuden (tai jousen pituuden) yhteydestä.

1650-luvun lopulla tapahtuneiden poliittisten muutosten vuoksi useat Oxfordin ”näkymättömän yliopiston” avainhenkilöistä muuttivat Lontooseen ja perustivat Royal Societyn vuonna 1662. Hooke nimitettiin Societyn kokeellisen työn kuraattoriksi, mikä edellytti, että hän demonstroi kolme tai neljä koetta jokaisessa Societyn kokouksessa. Society ei kyennyt maksamaan Hookelle palkkaa; vuonna 1663 hänet hyväksyttiin Societyn Fellow jäseneksi jäsenmaksuista vapautettuna. Hooke hakeutui sivutoimiseksi geometrian professoriksi Greshamin yliopistoon vuonna 1665.

Hooken kirja *Micrographia* ilmestyi vuonna 1665. Kirjassa oli näyttävä kuvitus hänen rakentamallaan mikroskoopilla tutkimista biologisista näytteistä. Hooke oli ensimmäinen, joka onnistui rakentamaan paraboliseen peiliin perustuvan teleskoopin. Teleskoopillaan hän havaitsi Jupiterin pyörimisen ja laati Marsin pintakuvioista piirustuksen, jonka perusteella Marsin pyörimisnopeus myöhemmin mitattiin. Vuonna 1666 hän oivalsi gravitaation mittaamisen heilurin avulla, ja suoritti mittauksia eri korkeuksissa. Samana vuonna hän piti Royal Societyssä esitelmän *Maailman systeemistä*, joka muodostui tärkeäksi virikkeeksi Newtonille liike- ja gravitaatiolakien johtamisessa. Hooke oli mikroskooppi- ja teleskooppitöidensä yhteydessä tutkinut myös valon taittumista. Hän päätteli valon aaltoluonteen ja kuvasi sitä eetterin värähtelynä. Lontoon vuoden 1666 suurpalon jälkeen Hooke toimi Christopher Wrenin apulaisena Lontoon jälleenrakentamisen suunnittelussa, ja kehitti mm. kartanpiirtämisen periaatteita.

Newtonin esitettyä oman hiukkasteoriansa valosta ja väreistä, Hooke väitti, että kaikki mikä on oikein Newtonin työssä, on peräisin hänen ideoistaan vuodelta 1665. Erityisen katkera hän oli Principian ilmestyttyä katsoessaan, että Newton oli ottanut kunnian gravitaatiolaeista viittaamatta hänen esittämiinsä ajatuksiin. Hooke ei ollut ainoa, joka oli päätellyt gravitaatiovoiman heikkenevän kääntäen verrannollisesti etäisyyden neliöön massakeskuksesta. Newton oli kuitenkin ensimmäinen, joka pystyi matemaattisesti osoittamaan ko. riippuvuuden ellipsiradan perusteeksi.

<http://www-history.mcs.st-andrews.ac.uk/Biographies/Hooke.html>

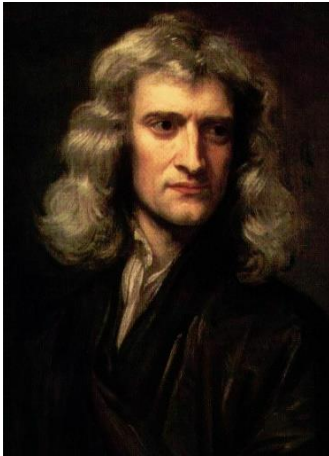
[http://en.wikipedia.org/wiki/Robert\\_Hooke](http://en.wikipedia.org/wiki/Robert_Hooke)

Allan Chapman, *England's Leonardo: Robert Hooke and the art of experiment in Restoration England*.

<http://www.roberthooke.org.uk/leonardo.htm>

Hooke, *Micrographia* (1664), <http://www.gutenberg.org/files/15491/15491-h/15491-h.htm>

## Isaac Newton (1643–1727)



Isaac Newton oli englantilainen fyysikko, matemaatikko, astronomi, luonnonfilosofi, teologi ja alkemisti, joka työstä on muodostunut ehkä kaikkien aikojen suurin harppaus tieteen kehityksessä. Isaac Newton syntyi varakkaan maanomistajan perheeseen Granthamissa lähellä Lincolnshireä.

Hänen isänsä kuoli vähän ennen Isaacin syntymää. Äidin mentyä uusiin naimisiin parin vuoden kuluttua, Isaac jäi isoäitinsä kasvatettavaksi. Newtonin ensimmäinen koulu oli Grantham Grammar School, missä hän ei osoittanut erityistä edistymistä; Isaac kuvattiin passiiviseksi ja eristyväksi. Isaacin äiti keskeytti hänen koulunkäyntinsä tehdäkseen Isaacista omaisuutensa hoitajan, mutta Isaac ei osoittanut tähän kiinnostusta.

Setänsä aloitteesta 1660 Isaac pääsi jatkamaan koulunkäyntiä. Tällä kertaa hänen kykynsä tulivat esille, ja koulun rehtori taivutti Isaacin äidin lähettämään poikansa Trinity Colleegeen Cambridgeen vuonna 1661. Newton opiskeli Aristoteleen ja Platonin ohella mm. Descartes'in, Hobbesin ja Boylen filosofiaa sekä Kopernikuksen ja Galilein taivaanmekaniikkaa ja tutustui Keplerin *Optics* teokseen. Newtonin kiinnostus matematiikkaan lienee käynnistynyt Eukleideen *Elements* teoksesta sekä Wallisin *Algebrasta*.

Vuodesta 1663 Newtonin matematiikan opettajana oli Isaac Barrow, joka oli kehittänyt differentiaali- ja integraalilaskennan alkeita. Newton suoritti loppututkinnon vuonna 1665. Pian sen jälkeen yliopisto suljettiin ruttoepidemian vuoksi ja Newton palasi Lincolnshireen, missä hän parin vuoden aikana loi pohjan elämäntyölleen matematiikassa, optiikassa, fysiikassa ja astronomiassa.

Trinity Collegen avauduttua uudelleen vuonna 1667 Newton sai Fellow-nimityksen ja vuonna 1669 Barrow lähetti Newtonin *De Analsi* matematiikan tutkielman kollegoilleen Lontoossa, jolloin siihen tutustui mm. Royal Societyn puheenjohtaja, irlantilainen matemaatikko William Brouncker. Vielä samana vuonna Newton nimitettiin

Isaac Barrowin seuraajaksi matematiikan professoriksi (Lucasian chair) Trinity Collegessa. Hän aloitti professuurinsa luennoilla valon ominaisuuksista ja päätelmästä, että valkoinen valo on spektrivärien summa.

Vuonna 1672 Newton sai Royal Societyn jäsenyyden hänen lahjoittettuaan Societylle heijastavan teleskoopin. Hän julkaisi ensimmäisenä tieteellisenä julkaisunaan optiset tutkimuksensa valon ominaisuuksista *Philosophical Transactions of the Royal Society* julkaisusarjassa. Hooke ja Huygens vastustivat Newtonin yritystä osoittaa valon muodostuvan partikkeleista aaltoliikkeen sijaan. Newton julkaisi *Optics* tutkimuksensa täydellisenä vasta Hookeen kuoleman jälkeen vuonna 1704.

Hooken ja Newtonin välille kehittyi kiista myös etäisyyden neliöön kääntäen verrannollisen gravitaatiovoiman alkuperästä. Hooke oli oletanut näin olevan, mutta Newton löysi matemaattisen todistuksen, mikä samalla loi liikeyhtälöistä ja gravitaatiovoimasta matemaattisesti ehjän taivaanmekaniikan formalismin.

Vuonna 1687 ilmestyneessä *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica* (Luonnonfilosofian matemaattiset periaatteet) Newton määrittelee klassisen mekaniikan perusteet ja ratkaisee Keplerin planeettaratojen fysikaalisen perustan liike- ja gravitaatiolakien avulla.

Newtonin työ vahvisti yksiselitteisesti Kopernikuksen tähtitaivaan mallin ja samalla Kopernikuksen työstä käynnistyneen tieteellisen vallankumouksen.

Newtonin merkitystä matemaattisen fysiikan edelläkävijänä voidaan tuskin yliarvioida. On kuitenkin huomattava, että Newtonilla oli käytettävissään oleellisen tärkeitä aineksia sekä yleisen gravitaatiolain että mekaniikan peruslakien muotoilemiseksi sekä pitkälle johdetut perusteen differentiaali- ja integraalilaskennan kehittämiseksi. Näitä olivat Kopernikuksen aurinkokeskinen planeettajärjestelmä ja Keplerin löytämät matemaattiset kuvaukset planeettaradoille ja niiden ominaisuuksille, Galileo Galilein kiihtyvän liikkeen matemaattinen kuvaus ( $d=t^2$ ) ja suhteellisuusperiaate sekä René Descartes'in (1596–1650) hahmotelmat liikelaeista, liikemäärän käsitteestä ja säilymislaeista, sekä Pierre de Fermat'n ja John Wallisin hahmotelmat differentiaali- ja integraalilaskennan perusteista.

Newtonin työ merkitsi empirismin läpimurtoa. Principiassa hän halusi perustaa päätelmänsä havaintoihin ja omaksua havaitut vuorovaikutukset mieluummin käytännön tosiasioina kuin hypoteeseihin perustuvina luonnonlakeina. Newton ei kuitenkaan kiistänyt luonnon lainalaisuutta. Hänen olettamansa luonnonlakien metafyyminen tausta välittyi Principian loppuyhteenvedosta <sup>1</sup>: ”Mitä kaunein auringon, planeettojen ja komeettojen systeemi voi syntyä ja säilyä vain älyllisen olennon toimesta. Ja mikäli kiintotähdet ovat samanlaisten systeemien keskuksia, jotka sama viisas lainsäätäjä on laatinut, tulee niiden kuulua saman Yhden alaisuuteen, erityisesti koska valo kiintotähdistä on samanlaista kuin valo auringosta, ja kaikki systeemit lähettävät valoa toisilleen. Ja jotta kiintotähdet eivät lubistuisi toisiinsa gravitaation vuoksi, hän on asettanut ne suunnattomille etäisyyksille toisistaan”.

Newtonin näki Jumalan yhtenä ja samana kaikkialla, aina ja ikuisesti, ”läsnä olevana, ei vain kuvitteellisesti vaan substantiaalisesti; sillä toiminta vaatii substanssin”.

<http://plato.stanford.edu/entries/newton/>

<http://www-history.mcs.st-andrews.ac.uk/Biographies/Newton.html>

[http://en.wikipedia.org/wiki/Isaac\\_Newton](http://en.wikipedia.org/wiki/Isaac_Newton)

<http://plato.stanford.edu/entries/newton-principia/>

*Philosophiæ naturalis principia mathematica* (Latin) [openlibrary.org](https://openlibrary.org)

*Principia* (in English), [openlibrary.org](http://openlibrary.org)

Newton, *Descartes, Space, and Body*, <http://www.earlymoderntexts.com/assets/pdfs/newton1666.pdf>  
 Newton, *A New Theory of Light and Colour*, <http://www.earlymoderntexts.com/assets/pdfs/newton1671.pdf>

Newton, *Arithmetica Universalis*, <http://archive.org/stream/arithmetica01newtuoft> (Latin)

Newton, *Optics: or a Treatise of the reflections, refractions, inflexions and colours of Light*, [google book, http://www.rarebookroom.org/Control/nwtopt/index.html](http://www.rarebookroom.org/Control/nwtopt/index.html),

David Brewster, *The life of sir Isaac Newton*, [openlibrary.org](http://openlibrary.org)

<sup>1</sup> Newton, *Principia*, third edition (1726), A new translation by I. Bernard Cohen and Anne Whitman, p. 940.

## Ole Römer (1644–1710)



Ole Römer oli tanskalainen astronomi, joka tunnetaan parhaiten Jupiterin kuiden jakson muutoksiin perustuneista valon nopeuden mittauksista vuonna 1676. Römer oli kotoisin Aarhuusista, Jyllannin itärannikolla, hän opiskeli Kööpenhaminan yliopistossa, jonka jälkeen hän työskenteli alun perin Tyko Brahelle perustetussa Uraniborgin observatoriossa Venin saarella Kööpenhaminan lähellä, jossa Jupiterin kuiden havainnointi tapahtui.

Römer työskenteli joitakin vuosia Ranskassa osallistuen Versaillesin puutarhan suihkulähteiden suunnitteluun. Pariisissa hän jatkoi Jupiterin Io kuun kiertoaikojen havainnointia italialais-ransklaisen astronomin Giovanni Cassinin apulaisena. Römer palasi Tanskaan vuonna 1681 Kööpenhaminan yliopiston astronomian professoriksi ja kuninkaalliseksi matemaatikoksi. Hän työskenteli navigointitekniikoiden kehittämisessä ja mittastandardien luomisessa, hänen standardihinsa perustuu esim. Fahrenheit-lämpötila-asteikko.

<http://galileo.rice.edu/Catalog/NewFiles/roemer.html>

[http://en.wikipedia.org/wiki/Ole\\_R%C3%B6mer](http://en.wikipedia.org/wiki/Ole_R%C3%B6mer)

## Gottfried Leibniz (1646–1716)



Gottfried Leibniz oli saksalainen filosofi, fyysikko ja matemaatikko. Hän syntyi Leipziginissä heinäkuun 1. päivänä vuonna 1646. Gottfriedin isä kuoli pojan ollessa kuusivuotias, jolloin Gottfried jäi äitinsä hoidettavaksi. Äidin maailmankatsomuksella uskotaan olleen tärkeä merkitys Leibnizin filosofialle, toisaalta hän peri Leipzigin yliopiston moraalifilosofian professorina toimineen isänsä laajan kirjaston, jonka teoksia hän ilmeisellä kiinnostuksella tutki jo kouluaikanaan. Leipzigin yliopistoon hän kirjautui 14-vuotiaana ja suoritti filosofian kandidaatin tutkinnon 16-vuotiaana vuonna 1662 ja maisterin tutkinnon vuotta myöhemmin. Leibniz jatkoi nopeaa etenemistään lakiopinnoilla ja oli valmis tohtorintutkintoon vuonna 1666. Leipzigin yliopisto ei kuitenkaan hyväksynyt ilmiömäisen

nopeasti aikaansaattua väitöskirjaa, jolloin Leibniz siirtyi Altdorfin yliopistoon, jossa hänelle jokseenkin välittömästi myönnettiin lakitieteen tohtorin arvo ja oikeus ammatin harjoittamiseen. Leibniz päätyi pian diplomaattisiin tehtäviin Pariisiin, jossa hänellä oli tilaisuus tutustua Christiaan Huygensiin, jonka opastuksella ja innoittamana hän alkoi perehtyä matematiikkaan ja fysiikkaan tutkien mm. René Descartes'in ja Blaise Pascalin töitä. Leibniz saavutti nopeasti opettajiensa tason ja kehitti eteenpäin heidän ajatuksiaan.

Vuoden 1671 kirjoituksissaan *Theoria motus abstracti* (1671) ja *Theoria motus concreti* Leibniz pyrkii muotoilemaan liikelakeja Hobbesin *conatuksesta* lähtien. Tulos jäi kuitenkin vaatimattomaksi.

Vuonna 1676 Leibniz oivalsi Descartes'in liikemäärän säilymiseen liittyvän ongelman, joka samalla selkiytti hänen omaa näkemystään fysiikkaan ja erityisesti liikelaikkeihin. Galilein pudotuskokeisiin perustuen Leibniz päätteli, että Descartes'in liikemäärän säilyminen loukkaa syyn ja toteutuman (Aristoteleen *entelecheia*) yhtäläisyyttä. Syy putoavan kappaleen saavuttamaan elävään voimaan (*vis viva*) on pudotuksessa luovutettu kuollut voima (*vis mortua*).

Leibnizin lähestymistavassa fysiikan ilmiöihin korostui vahvasti luonnonfilosofinen perusta. Kiinnittäessään huomiota liikkeen alkuperään, hän – päinvastoin kuin Descartes ja Newton – tunnisti liikemäärän  $mv$  sijaan energiaa tarkoittavan suureen  $mv^2$  (*vis viva* – *elävä voima*) ensisijaiseksi säilyjäksi liikejärjestelmissä.

Leibnizin *vis viva* ja *vis mortua* käsitteistä voidaan päätellä hänen ajatuksensa energian säilymisestä. Kappaleella on kuollut voima edellytyksenä liikkeen syntymiselle kuten keskihakuisvoima lingossa, kiveen välittyvä jännitysvoima lingon köydessä tai painovoima. Nykykäsittein tämä tarkoittaa, että kineettinen energia saadaan sitä vastaan luovutetusta potentiaalienergiasta.

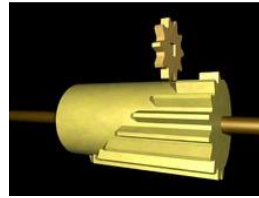
Filosofiassaan Leibniz luetaan yleensä 1600-luvun rationalisteihin René Descartes'in ja Baruch Spinozan ohella. Vaikka Leibnizin rationalistisessa luonnonfilosofiassa painottuu alkusyy, on hän perustanut päätelmänsä myös havaintoihin ja kokeisiin, kuten voidaan päätellä hänen tavastaan osoittaa elävän voiman (*vis viva*) säilyminen pudotus- ja heilurikokeissa. Empirististä asennetta ideoiden konkretisoinnissa osoittaa myös hänen insinöörityönsä laskukoneen konstruktiossa.

Leibnizin metafysiikassa substanssi on keskeinen attribuutti ”todelliseen filosofiaan”. Leibniz etsi todellisuuden perusrakenteita ja ”yksinkertaista substanssia”, jolla on tahto ja tietoisuus. Monadologiassaan Leibniz sovelsi substanssiajatustaan materiaaliisiin kappaleisiin kuvaamalla aineen alkeisosat monadeilla, jotka ”peilikuvina avaruuden muusta massasta” säilyttävät yhteytensä kaikkeen muuhun aineeseen, missä välittynee Anaksagoraan hahmottaman ainemassan alkeisosan ominaisuus. Tämän tapainen ajatus lienee ollut taustana Leibnizin voimakkaalle kritiikille Newtonin gravitaatiovoimalle irrallisten atomien ja niistä muodostuneiden kappaleiden välillä. Monadina kuvattun alkeishiukkasen ero atomistisen ajattelun mukaiseen alkeishiukkaseseen on siinä, että monadina kuvattu hiukkanen säilyttää yhteyden, kuten gravitaatiovuorovaikutuksen, avaruuden muuhun massaan.





Leibnizin laskukone vuodelta 1673. Laskukoneen perusajatus periytyi Pascalilta. Leibnizin kone oli ensimmäinen, joka pystyi laskemaan kaikki neljä aritmeettista laskutoimitusta, yhteen-, vähennys-, kerto- ja jakolaskun.



Leibnizin laskukoneen sisältämää ”Leibnizin ratasta” käytettiin ensimmäisissä sarjatuotantoon otetuissa mekaanisissa laskimissa.

Vuonna 1676 Leibniz asettui Hannoveriin, jossa hän vuodesta 1677 lähtien toimi Oikeusneuvoston pääkonsulina. Hän jatkoi matkustelua ja työtään integraali- ja differentiaalilaskennan kehittämisessä ja julkaisi vuonna 1684 mm. derivoimissääntöjä sisältävän julkaisun *Nova Methodus pro Maximis et Minimis, itemque Tangentibus* sekä kahta vuotta myöhemmin integraaleja käsittelevän julkaisun. Näissä julkaisuissa hän esitti matematiikkaan pysyvästi omaksutut derivaatan ja integraalin merkintätavat. Leibnizin matemaattisiin saavutuksiin kuuluvat myös mm. binäärilukujen teoria ja determinanttien käyttö yhtälöryhmien ratkaisussa.

Leibniz oli yksi kaikkien aikojen monipuolisimpia ja tuotteliaimpia luonnonfilosofoja. Vuonna 1710 hän julkaisi filosofisen työn *Théodicée*, joka käsittelee pahan olemusta Jumalan luomassa hyvässä maailmassa. Hänen kuuluisa työnsä *Monadologia* ilmestyi vuonna 1714.

Leibnizin elämän viimeisiä vuosia himmensi Newtonin lähipiirin häntä vastaan esittämä väite integraalilaskennan plagioinnista. Nykyinen käsitys on, että kumpikin kehitti integraalilaskentaa riippumattomasti. Kumpikin oli saanut lähtövaikutteita Pierre de Fermat’lta ja René Descartes’ilta, mikä mitä ilmeisimmin toi määrättyä yhdenmukaisuutta heidän töihinsä. Leibnizin käyttämistä merkintätavoista muodostui sittemmin käytäntö matematiikassa. Leibniz kuoli Hannoverissa 14. marraskuuta 1716, hänen hautansa oli merksemättömänä yli 50 vuotta.

<http://www-history.mcs.st-and.ac.uk/Biographies/Leibniz.html>

<http://www.science.uva.nl/~scop/entries/leibniz/>

<http://en.wikipedia.org/wiki/Leibniz>

*Leibniz’s correspondence with Arnauld* (1686–7): <http://www.earlymoderntexts.com/authors/leibniz>

*Leibniz’s exchange of views with Pierre Bayle* (1697–1702): <http://www.earlymoderntexts.com/assets/pdfs/leibniz1697a.pdf>

*New Essays on Human Understanding* (1705): <http://www.earlymoderntexts.com/authors/leibniz>

*Leibniz’s exchange of papers with Clarke* (1715–16): <http://www.earlymoderntexts.com/assets/pdfs/leibniz1715.pdf>

*Freedom and possibility* (1680): <http://www.earlymoderntexts.com/assets/pdfs/leibniz1680.pdf>

*Meditations on knowledge, truth, and ideas* (1684): <http://www.earlymoderntexts.com/assets/pdfs/leibniz1684.pdf>

*Contingency* (1686): <http://www.earlymoderntexts.com/assets/pdfs/leibniz1686b.pdf>

*First truths* (1686): <http://www.earlymoderntexts.com/assets/pdfs/leibniz1686c.pdf>

*Discourse on metaphysics* (1686): <http://www.earlymoderntexts.com/assets/pdfs/leibniz1686d.pdf>



*Real-life dialogue on human freedom and the origin of evil* (1695): <http://www.earlymoderntexts.com/assets/pdfs/leibniz1695a.pdf>  
*Essay on dynamics* (1695): <http://www.earlymoderntexts.com/assets/pdfs/leibniz1695b.pdf>  
*New system* (1695): <http://www.earlymoderntexts.com/assets/pdfs/leibniz1695c.pdf>  
*The ultimate origin of things* (1697): <http://www.earlymoderntexts.com/assets/pdfs/leibniz1697b.pdf>  
*Nature itself* (1698): <http://www.earlymoderntexts.com/assets/pdfs/leibniz1698.pdf>  
*Making the case for God* (1710): <http://www.earlymoderntexts.com/assets/pdfs/leibniz1710.pdf>  
*Principles of nature and grace* (1714): <http://www.earlymoderntexts.com/assets/pdfs/leibniz1714a.pdf>  
*Monadology* (1714): <http://www.earlymoderntexts.com/assets/pdfs/leibniz1714b.pdf>  
*An Examination of the Claims of Leibniz and Newton to the Invention of the Analysis of Infinites*, [https://en.wikipedia.org/wiki/Leibniz%E2%80%93Newton\\_calculus\\_controversy](https://en.wikipedia.org/wiki/Leibniz%E2%80%93Newton_calculus_controversy)  
 Leibniz, e-kirjoja [openlibrary.org](http://openlibrary.org)

## Edmond Halley (1656–1742)



Edmond Halley oli englantilainen astronomi, matemaatikko ja geofyysikko, meteorologi ja fyysikko, joka muistetaan parhaiten hänen nimeään kantavasta komeetasta. Halley syntyi Haggerstonissa Lontoon alueella, Englannissa. Jo lapsena hän oli kiinnostunut matematiikasta. Hän opiskeli St Paulin koulussa, ja vuodesta 1673 Queen's Collegessa, Oxfordissa.

Vuonna 1676 Halley vieraili St. Helenan saarella Etelä-Atlantilla ja perusti sinne observatorion eteläisen tähtitaivaan tutkimiseksi. Työ johti kattavaan eteläisen tähtitaivaan tähtiluetteloon. Halley laati myös kartan vallitsevista tuulista ja oivalsi auringon lämmön merkityksen vallitsevien tuulten mekanismeissa. Hän havaitsi myös ilmanpaineen muutosta merenpinnasta mitatun korkeuden ilmaisemisessa.

Halley oli päätellyt, että vuosina 1456, 1531, 1607 ja 1682 tehdyt komeettahavainnot liittyivät samaan komeettaan, jonka uuden tulemisen hän ennusti vuodelle 1758. Halley ei ollut itse toteamassa ennusteen toteutumista, mutta komeetta nimettiin Halley'n komeetaksi.

Halleyllä oli tärkeä rooli Newtonin Principiaan johtaneen työn aktivoimisessa ja tukemisessa.

Halley tutki myös maan magneettikentän epähomogeenisuuksia ja laati kartan kompassin poikkeamista merillä. Tulokset julkaistiin vuonna 1704 ilmestyneessä *General Chart of the Variation of the Compass* (1701) karttateoksessa. Poikkeamat selittääkseen hän ideoi mallin kerrostuneesta maapallosta, jonka uloin kuori olisi noin 800 kilometrin paksuinen. Uloimman kuoren sisällä olisi kolme samankeskistä kuorta, joiden halkaisijat olisivat Venuksen, Marsin ja Merkuriuksen halkaisijoiden luokkaa. Kuoret olisivat ilmakehien toisistaan erottamat, mikä sallisi niiden erilaisen pyörimisen, mikä voisi selittää kompassisuuntien poikkeamat.

<http://www.history.mcs.st-andrews.ac.uk/Biographies/Halley.html>

[http://en.wikipedia.org/wiki/Edmond\\_Halley](http://en.wikipedia.org/wiki/Edmond_Halley)

Edmond Halley, *Astronomical Tables with Precepts* (1752), [openlibrary.org](http://openlibrary.org)

## James Bradley (1693–1762)



Vuonna 1727 englantilainen astronomi James Bradley vahvisti Römerin tuloksen valon äärellisestä nopeudesta oivaltaessaan aberraation ja parallaksin vaikutusten eron noin vuonna 1730. James Bradley'n havainnot perustuivat hänen yhdessä parlamentin jäsenen ja amatööriastronomin, Samuel Molyneuxin kanssa tekemiin tarkkoihin, alle kaarisekunnin erotuskyvyn omaaviin kulmamittauksiin. James Bradley oivalsi myös maapallon akselin nutaation.

Bradley toimi Edmund Halley'n seuraajana kuninkaallisena astronomina vuodesta 1742. Ranskalainen matemaatikko ja astronomi Jean Delambre arvioi Bradley'n astronomian historiassaan vuodelta 1821 Hipparkhoon ja Keplerin ohella kaikkien aikojen suurimpien astronomien joukkoon.

[http://en.wikipedia.org/wiki/James\\_Bradley](http://en.wikipedia.org/wiki/James_Bradley)

*Papers of James Bradley*, <http://jap>

[nsl.lib.cam.ac.uk/db/node.xsp?id=EAD%2FGBR%2F0180%2FERGO%203](http://nsl.lib.cam.ac.uk/db/node.xsp?id=EAD%2FGBR%2F0180%2FERGO%203)

## Pierre Louis Maupertuis (1698–1759)



Pierre Louis Maupertuis oli ranskalainen matemaatikko, tähtitieteilijä ja luonnonfilosofi. Suomessa Maupertuis muistetaan matkastaan Lappiin mittaamaan maapallon litistyneisyyttä. Vastaava mittaus toisen retkikunnan toimesta tehtiin päiväntasaajalle nykyisen Ecuadorin alueelle.

Kysymys maapallon muodosta oli noussut keskeiseksi mekaniikan ja astronomian haasteeksi 1730-luvulla. Newtonin mekaniikkaan perustuen, Maupertuis oletti maapallon olevan navoiltaan litistynyt, astronomisiin havaintoihinsa perustuen

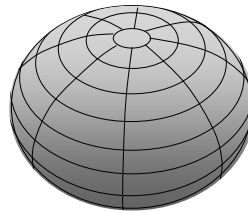
Jacques Cassini, Giovanni Cassinin poika, väitti maapallon olevan päiväntasaajaltaan kuristunut.

Fysiikassa Maupertuis tunnetaan parhaiten ”pienimmän vaikutuksen periaatteesta”, joka osoittautui tärkeäksi analyttisen mekaniikan menetelmissä. Pienimmän vaikutuksen periaatetta voidaan pitää yleistyksenä Pierre de Fermat'n ”pienimmän ajan periaatteelle”, joka toteaa, että valo etenee pisteestä toiseen kulkuajan suhteen lyhintä tietä.

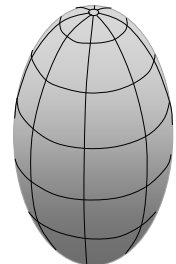
<http://www-history.mcs.st-andrews.ac.uk/Biographies/Maupertuis.html>

[http://en.wikipedia.org/wiki/Pierre\\_Louis\\_Maupertuis](http://en.wikipedia.org/wiki/Pierre_Louis_Maupertuis)

*Essai de Cosmologie* (1751), [openlibrary.org](http://openlibrary.org)



Pierre Louis  
Maupertuisin  
maapallo



Jacques Cassinin  
maapallo

## Daniel Bernoulli (1700–1782)



Daniel Bernoulli syntyi Hollannissa tunnettujen matemaatikkojen perheeseen. Hän oli Leonhard Eulerin hyvä ystävä ja työtoveri heidän työskennellessään Pietarissa vuosina 1727–33.

Pietarissa työskennellessään Bernoulli tutki mm. värähtelevän jousen aaltomuotoja, ja osoitti, että musiikki-instrumenttien josten värähtely muodostuu äärettömästä määrästä harmonisia taajuuksia. Hänen vuonna 1738 ilmestyneessä päätyössään, *Hydrodynamique* (*Hydrodynamiiikka*), hän mm. ratkaisee nesteen valumisen säiliöstä. Erityisen merkittäväksi ratkaisun teki se, että se perustui energian säilymiseen ensi askeleena energian käsitteen hahmottamiseen ja energian säilymisen periaatteen merkityksen oivallukseen mekaniikan peruslakina. Bernoulli muotoili *Hydrodynamique* kirjassaan myös kineettisen kaasuteorian perusteet Boylen laista lähtien. Yhteistyö Eulerin kanssa jatkui kirjeitse Bernoullin siirryttyä Pietarista Baseliin.

Värähteleviä jousia kuvaavan aaltoyhtälön ratkaisun esittivät Taylorin sarjoista ja Taylorin teoreemasta tunnettu Brook Taylor ja parhaiten juuri aaltoyhtälön ratkaisusta tunnettu Jean le Rond d'Alembert.

[http://www-history.mcs.st-and.ac.uk/Biographies/Bernoulli\\_Daniel.html](http://www-history.mcs.st-and.ac.uk/Biographies/Bernoulli_Daniel.html)

[http://en.wikipedia.org/wiki/Daniel\\_Bernoulli](http://en.wikipedia.org/wiki/Daniel_Bernoulli)

## Benjamin Franklin (1706–1790)



Benjamin Franklin oli yksi Amerikan vallankumoukseen, Amerikan Yhdysvaltojen perustajiin kuulunut poliitikko, monitieteilijä, muusikko, historioitsija, kirjailija ja keksijä, joka tieteen alalla tunnetaan parhaiten sähköön liittyvistä kokeistaan ja keksinnöistään. Hänen liberaali elämäntätönsä kuvastui hänen suhtautumisestaan keksintöihinsä ”koska hyödyimme suuresti muiden keksinnöistä, meidän tulisi iloita mahdollisuudestamme tarjota muille omia keksintöjämme; ja se meidän tulee tehdä vapaasti ja anteliaasti”. Franklin perusti American Philosophical Societyyn vuonna 1743.

Benjamin Franklin oli Leonhard Eulerin kanssa harvoja Christiaan Huygensin esittämän valon aaltoteorian kannattajia.

Franklinin aikana sähköä kuvattiin lähinnä sähkönesteeksi. Franklin tunnisti ja nimesi positiivisen ja negatiivisen sähkövarauksen. Franklin oivalsi, että salamit ovat sähköpurkauksia, minkä todistamiseksi hän vuonna 1750 ehdotti koetta, jossa ukkospilven sähkövaraus purettaisiin leijan lankaa myöten maahan. Tiedot mahdollisen salamakokeen tuloksista ovat ristiriitaisia. Franklin kuitenkin oivalsi, että

sähkövaraus purkautuu helpommin teräväkärkisestä kuin tylpästä johtimesta, mikä johti ukkosenjohdattimen keksimiseen. Franklinin keksintöihin kuului myös käytännön apuvälineitä kuten kaksitehoiset silmälasit.

[http://www-history.mcs.st-andrews.ac.uk/Biographies/Franklin\\_Benjamin.html](http://www-history.mcs.st-andrews.ac.uk/Biographies/Franklin_Benjamin.html)

[http://en.wikipedia.org/wiki/Benjamin\\_Franklin](http://en.wikipedia.org/wiki/Benjamin_Franklin)

*Benjamin Franklinin julkaisuja*, [wikisource.org](http://wikisource.org)

## Leonhard Euler (1707–1783)



Sveitsiläinen matemaatikko ja fyysikko Leonhard Euler oli eräs kaikkien aikojen merkittävimpiä matemaatikkoja. Leonhard Euler syntyi Baselissa Sveitsissä. Hänen isänsä oli läheinen ystävä Bernoullin matemaattikoperheen perheen kanssa, millä lienee ollut vaikutusta Leonhardin kiinnostukseen matematiikkaan. Leonard aloitti opintonsa kolmetoistavuotiaana Baselin yliopistossa, josta hän valmistui filosofian maisteriksi vuonna 1723, väitöstutkimanaan Descartesin ja Newtonin filosofioiden vertailu. Suurimman osan aikuisiästään hän vietti Pietarissa Venäjällä ja Berliinissä silloisessa Preussissa.

Euler teki lukuisia tulevalle matemaattisen fysiikan kehitykselle oleellisia matemaattisia oivalluksia. Eräs tärkeimpiä oli Eulerin kaavana tunnettu yhtälö, jossa kompleksiluku ilmaistaan eksponentiaalifunktion muodossa

$$e^{i\varphi} = \cos\varphi + i\sin\varphi.$$

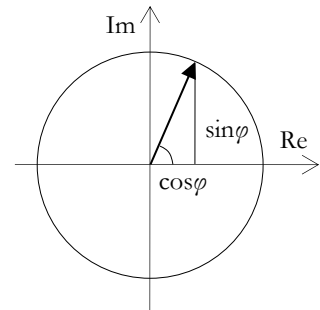
Eulerin aktiviteetti kattoi lähes kaikki matematiikan alat, kuten esim. geometrian, trigonometrian, algebran, differentiaali- ja integraalilaskennan, potenssisarjat ja lukuteorian. Mekaniikan alalla hän vaikutti mm. Lagrangen mekaniikan kehitykseen (Euler-Lagrange yhtälö). Eulerin optiikan julkaisut 1740-luvulla antoivat tukea valon kuvaamiselle aaltoliikkeenä.

<http://www-history.mcs.st-and.ac.uk/Biographies/Euler.html>

[http://en.wikipedia.org/wiki/Leonard\\_Euler](http://en.wikipedia.org/wiki/Leonard_Euler)

*Kinetic Theories of Gravitation* (1760), [wikisource.org](http://wikisource.org)

V. F. Rickey, *A Reader's Guide to Euler's Introduction*, <http://fredrickey.info/hm/Euler-Introductio.pdf>



## Jean le Rond d'Alembert (1717–1783)



Jean le Rond d'Alembert oli ranskalainen matemaatikko, filosofi, insinööri, fyysikko ja musiikin teorian tuntija. Hän oli tykistöupseerin avioton lapsi, jonka äiti oli jättänyt pariisilaisen kirkon portaille muutaman päivän ikäisenä. Isä kustansi nimettömänä Jean le Rondin koulutuksen tämän adoptiovanhemmille. Jean le Rond d'Alembert opiskeli filosofiaa, lakia ja taiteita. Perusopintojensa jälkeen hän kiinnostui matemaatiikasta, ja julkaisi vuonna 1740 virtausdynamiikkaa käsittelevän artikkelin, jossa hän myös esittää matemaattisen ratkaisun valon taipumiselle optisessa rajapinnassa.

Hänen tunnetuin työnsä on *Traité de dynamique (Tutkielma Dynamiikasta)*, jossa hän pyrkiä tarkentamaan Newtonin mekaniikkaan liittyvien suureiden määrittäitä. Kirjansa esipuheessa hän toteaa, että: ”Rationaalinen mekaniikka oli tiede, joka perustui yksinkertaisiin tarpeellisiin periaatteisiin, joista kaikki erityiset ilmiöt voitiin päätellä yksiselitteisillä matemaattisilla menetelmillä... mekaniikka tulisi kehittää täydelliseksi rationaaliseksi matemaattiseksi systeemiksi”. Kirjassaan hän esittää mm. d'Alembertin periaatteena tunnetun toteamuksen, jonka mukaan ”Inertian sisäiset voimat ovat yhtä suuret ja vastakkaiset kuin voimat, jotka synnyttävät kiihtyvyyden<sup>1</sup>”.

Yleensä Jean le Rond d'Alembert tunnetaan parhaiten aaltoyhtälöiden ratkaisuisista.

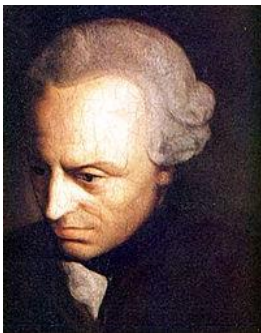
<http://www-history.mcs.st-and.ac.uk/Biographies/D%27Alembert.html>

[http://en.wikipedia.org/wiki/Jean\\_le\\_Rond\\_d'Alembert](http://en.wikipedia.org/wiki/Jean_le_Rond_d'Alembert)

Linkkejä d'Alembertin julkaisuihin, [wikisource.org](http://wikisource.org), e-kirjoja [openlibrary.org](http://openlibrary.org)

<http://www.manhattanrarebooks-science.com/dalembert.htm>

## Immanuel Kant (1724–1804)



Immanuel Kant oli saksalainen filosofi, joka oli kotoisin Königsbergistä, nykyisestä Kaliningradista.

Metafysiikassaan *Metaphysical Foundations of Natural Science* Kant määrittelee materiaaliseksi sen ja vain sen, mikä voi liikkua avaruudessa. Kaikki liike tapahtuu absoluuttisessa avaruudessa, joka on liikkumaton. Kantin mukaan aika ja avaruus eivät edusta materiaalista todellisuutta, vaan sisäisen intuition tuotteita. Liikettä hän käsittelee kirjansa neljässä luvussa: *Liikkeen teoria (Phoronomy)*, *Dynamiikka*, *Mekaniikka* ja *Havaittavat ilmiöt (Phenomenology)*. Kantin metafysiikka vaikuttaa vieraalta empirismin suuntaan kehityksessä olevalle tiedeajattelulle.

Immanuel Kant lienee ensimmäinen, joka on ehdottanut kaasusumujen teoriaa (*Nebular hypothesis*), jonka mukaan aurinko ja planeetat, ja jopa galaksit ovat tiivistyneet kaasusumuista. Ajatus on ollut vallankumouksellinen, sillä aurinkokuntaa ja koko kiintotähtien järjestelmää oli pidetty ikuisena tai ainakin luomishetkestä samanlaisena

– ainoat tunnetut poikkeukset Kantin aikaan lienevät olleet Tyko Brahen vuoden 1572 ja Keplerin 1604 supernovahavainnot.

<http://www.science.uva.nl/~seop/entries/kant/>

[http://en.wikipedia.org/wiki/Immanuel\\_Kant](http://en.wikipedia.org/wiki/Immanuel_Kant)

*Metaphysics*, <http://www.iep.utm.edu/kantmeta/>

*Critique of Pure Reason (to end of Analytic)* (1781 and 1787): <http://www.earlymoderntexts.com/authors/kant>

*Critique of Pure Reason (Dialectic)* (1781 and 1787): <http://www.earlymoderntexts.com/authors/kant>

*Prolegomena to any Future Metaphysic* (1783): <http://www.earlymoderntexts.com/assets/pdfs/kant1783.pdf>

*Groundwork for the Metaphysic of Morals* (1785): <http://www.earlymoderntexts.com/assets/pdfs/kant1785.pdf>

*Metaphysical Foundations of Natural Science* (1786): <http://www.earlymoderntexts.com/assets/pdfs/kant1786.pdf>

*Toward Perpetual Peace* (1795): <http://www.earlymoderntexts.com/assets/pdfs/kant1795.pdf>

*Kantin julkaisuja*, [wikisource.org](http://wikisource.org), e-kirjoja, [openlibrary.org](http://openlibrary.org)

## Henry Cavendish (1731–1810)



Henry Cavendish oli englantilainen monitieteilijä, joka tunnetaan ilman koostumuksen tutkimuksestaan, sekä kokeetaan gravitaatiovakion määrittämiseksi.

Henry Cavendish syntyi Nizzassa, Etelä-Ranskassa, jossa hänen perheensä tuolloin asui. Kolmisen vuotta kestäneet opintonsa hän aloitti kahdeksantoistavuotiaana Cambridgen yliopistossa. Ennen tultuaan valituksi Royal Societyn jäseneksi, hänellä oli tilaisuus osallistun Societyn kokouksiin isänsä, Lordi Charles Cavendishin kanssa, joka oli Societyn jäsen.

Cavendishin kokeet gravitaatiovakion määrittämiseksi perustuivat lyijypainojen väliseen vetovoimaan. Hänen saamansa arvo gravitaatiovakion olle  $G = 6,754 \cdot 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$  (nykyinen CODATA arvo on  $G = 6,7428 \cdot 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$ ).

Henry Cavendish tutki myös sähköilmiöitä, vaikka vasta James Maxwell 1800-luvun lopulla löysi hänen muistiinpanonsa, joissa oli määritelty sähköpotentiaal, dielektrisyysvakion ja kapasitanssin käsitteet sekä esitetty nykyisin Coulombin lakina ja Ohmin lakina tunnetut yhtälöt. Maxwell julkaisi Cavendishin muistiinpanot vuonna 1879 ilmestyneessä 454-sivuisessa kirjassa ”*The Electrical Researches of the Honourable Henry Cavendish, F.R.S*” (*Kunnioitetun Henry Cavendishin Sähkötutkimukset*).

[http://en.wikipedia.org/wiki/Henry\\_Cavendish](http://en.wikipedia.org/wiki/Henry_Cavendish)

H. Cavendish, *The Electrical Researches*, [openlibrary.org](http://openlibrary.org)

H. Cavendish, Scientific papers, Volume I, *The Electrical Researches*, by J.C. Maxwell (1921), [openlibrary.org](http://openlibrary.org)

H. Cavendish, Scientific papers, Volume II, *Chemical and Dynamical*, by E. Thorpe (1921), [openlibrary.org](http://openlibrary.org)

H. Cavendish, *Experiments on air*, [openlibrary.org](http://openlibrary.org)



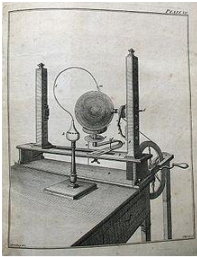
## Joseph Priestley (1733–1804)



Joseph Priestley oli englantilainen luonnonfilosofi, kemisti ja monitieteilijä, joka Antoine Lavoisierin ohella tunnetaan lähinnä hapen keksijänä. Löydöstään huolimatta hän, toisin kuin Lavoisier, jatkoi kuitenkin flogiston-teorian puolustusta.

Joseph Priestley oli tuottelias monella alalla, häneltä tunnetaan yli 150 julkaisua, teologiasta, kemiasta, sähköstä, politiikan teoriasta, pedagogiasta ja metafysiikasta. Liberalismin, uskonnollisen vapaamielisyyden ja sittemmin Ranskan vallankumouksen kannattajana hän joutui kymmeneksi vuodeksi maanpakoon Amerikkaan.

Filosofiassaan Joseph Priestley pyrki yhdistämään kristinuskon valistuksenajan rationalismiin ja luonnonilmiöitä ohjaavaan determinismiin. Hän näki tieteen tavoitteen ihmisyyttä ja yksilön kehitystä edistävän ymmärryksen tuottamisessa.



Kuva: Priestleyn “sähkökone amatöörikokeilijoille”, kuva on editoitu julkaisusta *Familiar Introduction to the Study of Electricity* (1768).  
Kuva: *Wikimedia Commons*

[http://en.wikipedia.org/wiki/Joseph\\_Priestley](http://en.wikipedia.org/wiki/Joseph_Priestley)

Popular Science Monthly Volume 6 November 1874,

Joseph Priestley by T.H. Huxley, [wikisource.org](http://wikisource.org)

J. Priestley, e-kirjoja, [openlibrary.org](http://openlibrary.org)

## Joseph Louis Lagrange (1736–1813)



Joseph Lagrange oli italialais-ranskalainen matemaatikko ja astronomi, joka kehitti merkittävästi mekaniikkaa, taivaanmekaniikkaa ja lukuteoriaa. Hän syntyi Torinossa, Luoteis-Italiassa ja sai peruskoulutuksensa Torinon yliopistossa. Matemaatikko hänestä tuli lähinnä omatoimisen opiskelun kautta kiinnostuttuaan Edmond Halley'n julkaisusta algebrasta optiikassa vuodelta 1693. Lagrange vaikutti osan elämästään Preussissa ja osan Ranskassa.

Matematiikassa hänet muistetaan parhaiten ryhmäteorian perusteista ja variaatiolaskennasta. Taivaanmekaniikassa hänet tunnetaan Lagrange-pisteistä, jotka ovat gravitaatiovoiman nollapisteitä taivaankappaleiden välissä. Parhaiten Lagrange tunnetaan kuitenkin hänen nimeään kantavasta analyyttisen klassisen mekaniikan muodosta, jossa systeemiä kuvataan optimoidussa, vapausasteiden määräämässä koordinaatistossa.

Teoksessaan *”Mécanique Analytique”* Joseph Lagrange käsittelee laajasti Newtonin mekaniikkaa, ja kehittää siitä differentiaaliyhtälöihin perustuvan matemaattisen formalismin. Kirjansa esipuheessa hän toteaa: *”Tässä kirjassa ei ole kuvia. Esittämäni menetelmät eivät tarvitse rakenteita eivätkä geometrisia tai mekaanisia oletuksia, vaan ainoastaan suoraviivaisia algebrallisia operaatioita”*.

Ranskan vallankumouksen pahimman terroriajan laannuttua, vuodesta 1794 Lagrange toimi *École Polytechnique* -yliopiston professorina. Hän oli suuresti arvostettu ja kunnioitettu, mutta hänen luentojensa sanottiin olevan aivan liian abstrakteja opiskelijoille.

<http://www-history.mcs.st-and.ac.uk/Biographies/Lagrange.html>

[http://en.wikipedia.org/wiki/Joseph\\_Lagrange](http://en.wikipedia.org/wiki/Joseph_Lagrange)

Joseph Lagrange, alkuperäisjulkaisuja [http://sites.mathdoc.fr/cgi-bin/oe-toc?id=OE\\_LAGRANGE\\_11](http://sites.mathdoc.fr/cgi-bin/oe-toc?id=OE_LAGRANGE_11)

*Mécanique Analytique*, [openlibrary.org](http://openlibrary.org)

Joseph Lagrange, *Lectures on elementary mathematics*, [openlibrary.org](http://openlibrary.org)

## Charles-Augustin de Coulomb (1736–1806)



Charles Coulomb oli ranskalainen fyysikko, joka tunnetaan parhaiten hänen mukaansa nimetystä sähkövarauksen yksiköstä ja sähköstaattisen voiman lausekkeesta, jonka hän muotoili vuonna 1785.

*Coulombin voiman* mittaamiseksi Charles Coulomb analysoi ensin metallilangasta tehdyn torsiova’an ominaisuuksia, ja käytti sitten vaakaa samanmerkkisesti varattujen metallikuu-  
lien poistovoiman määrittämiseen. Torsiova’an ominaisuudet ja sillä saadut tulokset hän ilmaisi seuraavasti:

Määrätystä metallista tehdyn langan vääntömomentti on suoraan verrannollinen vääntökulmaan, verrannollinen langan paksuuden neljanteen potenssiin ja kääntäen verrannollinen langan pituuteen.

Mittauksiaan hän vuonna 1785 ilmestyneessä kirjassaan *Premier Mémoire sur l’Électricité et le Magnétisme* (*Alustava muistio sähköstä ja magnetismista*) hän kuvaa havaintojaan seuraavasti:

*”...samanmerkkisen sähkövarauksen omaavat metallipallot hylkivät toisiaan voimalla, joka on kääntäen verrannollinen pallojen etäisyyden neliöön.”*

*”...erimerkkisen sähkövarauksen omaavat pallot vetävät toisiaan puoleensa voimalla, joka on verrannollinen varausten tuloon ja kääntäen verrannollinen pallojen välisen etäisyyden neliöön.”*

Charles Coulomb teki magneeteista vastaavia havaintoja, mutta ei olettanut yhteyttä sähköön ja magnetismin välillä.

<http://www-history.mcs.st-and.ac.uk/Biographies/Coulomb.html>

[http://en.wikipedia.org/wiki/Charles-Augustin\\_de\\_Coulomb](http://en.wikipedia.org/wiki/Charles-Augustin_de_Coulomb)

Vier Abhandlungen über die Elektricität und den Magnetismus, [openlibrary.org](http://openlibrary.org)



## William Herschel (1738–1822)



William Herschel oli Hannoverissa Saksassa syntynyt säveltäjä ja astronomi, joka tunnetaan hänen konstruomisistaan peilikaukoputkista ja Uranus-planeetan löytämisestä vuonna 1781. Uranuksen tunnisti planeetaksi suomalainen tähtitieteilijä Anders Lexell (1740–1784).

Elämäntyönsä Herschel teki Englannissa, jonne hän muutti 19-vuotiaana. Hän tuli astronomien tietoisuuteen rakennettuaan peilikaukoputken, jolla hän vuonna 1773 sai huomattavasti aikaisempaa tarkempia havaintoja Saturnuksen renkaista ja Orionin kaasusumusta.

[http://en.wikipedia.org/wiki/William\\_Herschel](http://en.wikipedia.org/wiki/William_Herschel)

*William Herschel and his work* by James Sime (1900), [wikisource.org](http://wikisource.org), [openlibrary.org](http://openlibrary.org)

*The Herschels and modern astronomy*, Agnes M. Clerke (1895), [openlibrary.org](http://openlibrary.org)

*Preliminary Discourse of the Study of Natural Philosophy* by Sir J.F.W. Herschel, [openlibrary.org](http://openlibrary.org)

## Antoine Lavoisier (1743–1794)



Pariisissa syntynyt ranskalainen kemisti Antoine Lavoisier tunnetaan modernin kemian isänä.

Antoine Lavoisier teki kvantitatiivisia kemiallisia kokeita, joissa hän punnitsi tarkoin lähtöaineet ja reaktiotulokset, mikä johti hänen yksiselitteisesti esittämäänsä massan säilymiseen keskeisenä kemiallisten prosessien säilymislakina.

Lavoisier tunnisti palamisilmiön palavan aineen ja hapen reaktioksi ja todisti vääräksi vallalla olleen flogiston-teorian.

Lavoisier oli suorittanut myös lakitieteen tutkinnon, ja hankki 26-vuotiaana itselleen verokantajan viran, mikä osoittautui hänelle kohtalokkaaksi. Vaikka Lavoisier oli mielimieliteiltään liberaali, vuosisadan lopulla käynnistyneessä Ranskan vallankumouksessa kaikki veronkantajat teloitettiin. Lavoisier tuomittiin giljotiiniin vuonna 1794 hänen ollessaan 50 vuoden ikäinen.

Lagrange totesi Lavoisierin kuolemasta: *”Vei vain hetken hänen päänsä pudottamiseen, mutta sata vuotta ei riitä sitä vastaavan aikaansaamiseen”*.

Lavoisierin teosta *Traité Élémentaire de Chimie (Kemian Perusteet)* vuodelta 1789 pidetään ensimmäisenä nykyaikaisena kemian oppikirjana.

[http://en.wikipedia.org/wiki/Antoine\\_Lavoisier](http://en.wikipedia.org/wiki/Antoine_Lavoisier)

Antoine Lavoisier, *Traité élémentaire de chimie* (1789), [openlibrary.org](http://openlibrary.org)

Antoine Lavoisier, *Elements of Chemistry: In a New Systematic Order* (1799), [openlibrary.org](http://openlibrary.org)

## Alessandro Volta (1745–1827)



Alessandro Volta oli italialainen fyysikko, joka tunnetaan sähköparin keksimisestä. Volta nimitettiin vuonna 1774 Common Kuninkaallisen koulun fysiikan professoriksi ja viisi vuotta myöhemmin Pavian yliopiston kokeellisen fysiikan professoriksi.

Kokeellisen työn tuloksena hän havaitsi, että elektrolyyttiin upotettujen erityyppisten metallien välille muodostuu sähköjännite. Suotuisimmiksi metallipareiksi hän havaitsi sinkin ja hopean tai sinkin ja kuparin. Elektrolyyttiksi hän keksi rikkihapon tai vahvan suolaliuoksen. Voltan paristo muodostui sarjaan kytketyistä sinkki-kupari-pareista.

[http://en.wikipedia.org/wiki/Alessandro\\_Volta](http://en.wikipedia.org/wiki/Alessandro_Volta)

*Untersuchungen über den Galvanismus, 1796 bis 1800* by Alessandro Volta (1900), [openlibrary.org](https://openlibrary.org)

## Jean Delambre (1749–1822)



Jean Delambre oli Amiensistä Pohjois-Ranskasta kotoisin oleva ranskalainen matemaatikko ja astronomi. Jean Delambre oli pääosin itseoppinut sekä matematiikan että astronomian suhteen. Vuonna 1783 hänestä tuli opettajansa, astronomi Jérôme Lalanden assistentti. Lalanden oli tuolloin keräämässä havaintotuloksia julkaisemansa *Traité d'astronomie* (*Astronomian tutkielmia*) kolmanteen painokseen.

Kun Lalande esitteli Delambren mittaukset Ranskan Tiedeakatemiassa, Delambrella oli tilaisuus tavata Laplace ja kuulla hänen esityksensä matematiikasta, jolla voitiin laskea planeettojen keskinäiset vuorovaikutukset ratoihin. Delambre oli hyvin vaikuttunut kuulemastaan, ja päätti tehdä havaintoja Uranuksesta todentaakseen Laplacen teoreettiset tulokset. Työ toi Delambrelle vuode 1789 Akatemian Grand Prix palkinnon – “...*vaikenuksia pelkäämättömälle viisaalle astronomille, jolla on kyky tarkistaa 130:n vuoden astronomiset havainnot, arvioida niiden virheet, and korjata niiden arvo*”. Vuonna 1792 Delambre sai toisen Grand Prix palkinnon laatimistaan tarkoista taulukoista Jupiterin, Saturnuksen, Uranuksen ja Jupiterin kuiden radoille.

Jean Delambrella oli tärkeä rooli prosessissa, joka lopulta tuotti metrin mittastandardin vuonna 1799. Kun Delambre ojensi platinasta valmistetun metrin määrittelevän tangon keisari Napoleonille, tämä sanoi: “Valloitukset tulevat ja menevät, mutta tämä työ säilyy”.

Vuonna 1809 Delambre toisti Römerin mittaukset, joilla hän määrittä valon nopeuden Jupiterin Io-kuuta havainnoimalla. Delambren arvio valon kulkuajalle auringosta maahan oli 8 minuuttia 12 sekuntia, mikä on vain 7 sekuntia vähemmän kuin kulkujan nykyinen arvio 8 minuuttia 19 sekuntia.

Työuransa lopussa Delambre kiinnostui matematiikan ja astronomian historiasta. Hän totesi tavoitteenaan olleen luoda "...tallelokero josta voitaisiin löytää kaikki ideat, kaikki menetelmät, ja kaikki teoreemat, jotka ovat onnistuneesti palvelleet ilmiöiden laskemista”.

<http://www-history.mcs.st-and.ac.uk/Biographies/Delambre.html>

[http://en.wikipedia.org/wiki/Jean\\_Delambre](http://en.wikipedia.org/wiki/Jean_Delambre)

Jean Delambre, e-kirjoja, [openlibrary.org](http://openlibrary.org).

## Pierre-Simon Laplace (1749–182)



Ranskalainen matemaatikko ja astronomi Pierre-Simon Laplace tunnetaan parhaiten matemaattisessa fysiikassa paljon käytetystä Laplace-muunnoksesta ja Laplace-operaattorista. Taivaanmekaniikassa Laplacen kehittämä matemaatikka mahdollisti mm. planeettojen keskinäisten vuorovaikutuksen tarkan laskemisen.

Laplace syntyi Beaumont-en-Augen kaupungissa, Normandiassa paikallisen maanviljelijän perheeseen. Peruskoulunsa jälkeen Laplace aloitti Caenin yliopistossa kirkolliseen toimeen tähtäävät opinnot, mutta parin vuoden jälkeen hän huomasi matemaattisen lahjakkuutensa ja kiinnostuksensa matematiikkaan. Hänen matematiikanopettajansa antoivat hänelle suosituskirjeen Jean le Rond d'Alembertille Pariisiin. d'Alembert huomasi pian Laplacen kyvyt ja järjesti tälle professorin viran École Militaireen. Laplace alkoi heti tuottaa matematiikan julkaisuja, josta ensimmäinen, Lagrangen menetelmän parannuksia käsittelevä artikkeli esitettiin Tieteiden Akatemialle Pariisissa vuonna 1770.

Laplacen alkuajan matemaattiset työt käsittelivät lähinnä differenssi- ja differentiaaliyhtälöitä. Erittäin tärkeiksi osoittautuivat palloharmoniset funktiot, jotka hän löysi laajenuksena Adrien-Marie Legendren liittofunktioille.

Taivaanmekaniikan jatkokehitykselle oli tärkeää Laplacen kehittämä potentiaaliteoria, jolla esim. gravitaatio- tai sähköpotentiaali voidaan esittää skalaarikenttänä. Potentiaalifunktio toteuttaa Laplacen mukaan nimetyn Laplacen yhtälön.

Laplacen tunnetuin työ taivaanmekaniikan alueella oli planeettojen keskinäisen vuorovaikutuksen ja planeettaratojen stabiilisuuden analyysi. Laplace pohti myös mahdollisuutta äärimmäisestä massakeskittymästä, jossa gravitaatio estäisi valon etenemisen ympäröivään avaruuteen tarvittavan pakonopeuden ylittäessä valon nopeuden. Laplace ennakoi myös galaksiavaruuden löytymisen arvellessaan, että havaitut tähtisummut voisivat olla kaukaisia Linnunradan kaltaisia galakseja.

Kirjassaan *Exposition du système du monde (Maailman Systemi)* Laplace tarkastelee aurinkokunnan syntyä kokoonpuristuvasta hitaasti pyörivästä jäähtyvistä kaasukiekosta.

Laplace kehitti valon partikkeliteoriaa vielä, kun Fresnel esitti aaltoteoriansa 1815.

Tilastomatematiikan alueella Laplace muistetaan pienimmän neliösumman menetelmän kehittäjänä. Hän määritteli myös todennäköisyyslaskennan peruskäsitteitä.

Laplacen menestys erityisesti taivaanmekaniikan ratkaisuissa lienee taustana hänen ajatuksilleen äärimmäisestä determinismistä (Laplacen demoni), jonka mukaan maailman menneisyys ja tulevaisuus on ratkaistavissa, jos kaikkien atomien tarkka sijainti ja liikemäärä jollakin hetkellä tunnettaisiin:

*“Voimme pitää universumin nykytilaa seurauksena sen menneisyydestä ja syynä sen tulevaisuudella. Älyllinen olento, joka määrättyllä hetkellä tuntisi kaikki voimat, jotka ovat saaneet luonnon liikkeeseen, ja kaikkeiden sen osien kaikki sijainnit, jos tämä älyllinen olento olisi riittävä tekemään analyysin kaikesta tästä tiedosta, se tuottaisi yhtiälön universumin kaikeista liikkeistä suurimmista kappaleista pienimpiin atomeihin; sellaiselle olennolle mikään ei olisi epävarmaa, ja niin tulevaisuus kuin menneisyyskin olisi läsnä hänen silmissään.”<sup>1</sup>*

<http://www-history.mcs.st-and.ac.uk/Biographies/Laplace.html>

[http://en.wikipedia.org/wiki/Pierre-Simon\\_Laplace](http://en.wikipedia.org/wiki/Pierre-Simon_Laplace)

Pierre Simon Laplace, *A Philosophical Essay on Probabilities* (1814), [openlibrary.org](http://openlibrary.org)

The Mechanics of Laplace, [openlibrary.org](http://openlibrary.org)

Pierre Simon Laplace, *Elementary illustrations of the Celestial mechanics: Part 1*, [openlibrary.org](http://openlibrary.org)

Pierre Simon Laplace, *Mécanique Céleste*, (1827) English translation by N. Bowditch, <http://www.archive.org/stream/mcaniquecles01laprich#page/n7/mode/2up>

Pierre Simon Laplace, *The system of the world*, (1830), [openlibrary.org](http://openlibrary.org)

Pierre Simon Laplace, e-kirjoja, [openlibrary.org](http://openlibrary.org)

<sup>1</sup> Laplace, *A Philosophical Essay*, New York, 1902, p. 4

## Adrien-Marie Legendre (1752–1833)



Adrien-Marie Legendre oli ranskalainen matemaatikko, joka tunnetaan parhaiten hänen mukaansa nimetystä *Legendren funktiosta*. Vuosina 1775–1780 Legendre opetti matematiikkaa *École Militaire* -yliopistossa Laplacen kanssa. Hänen matemaatikon uransa kehittyminen sai huomattavaa lisävauhtia hänen voitettuaan Berliinin Akatemian julistaman kilpailun tykinkuulan lentoradan määrittämiseksi vuonna 1782. Seuraavaksi Legendre tutki vetovoimaa ellipsoidin pinnalla. Työ, joka tuotti myös Legendren funktiot, sai vahvan tunnustuksen Laplacelta, ja Legendre nimitettiin Tiedeakatemian liitännäisjäseneksi. Seuraavina vuosina Legendre julkaisi töitään taivaanmekaniikassa, lukuteoriasta sekä elliptisistä funktioista ja elliptisten kaarien integroinnista. Julkaisut sisälsivät myös summittaisen todistuksen neliönjäännösten resiprokkilauseesta, jonka Gauss, ollessaan vasta 18-vuotias, täsmensi.

Vuonna 1787 Legendre nimitettiin Tiedeakatemian täysjäseneksi ryhmään, jonka tehtävänä oli yhteistyössä Greenwichin Royal Observatoryn kanssa kehittää maanmittausta ja suorittaa kolmiomittaus Pariisiin ja Greenwichin observatorioiden välillä. Vuonna 1791 Legendre nimitettiin mittojen ja painojen standardisointia kehittävään työryhmään. Samalla hän kirjoitti tunnetuinta teostaan *Éléments de géométrie (Geometrian perusteet)*, joka valmistui vuonna 1794. Legendren muita teoksia olivat mm. kolmiomaiset *Exercices du Calcul Intégral (Harjoituksia integraalien laskemiseksi)* ja *Traité des Fonctions Elliptiques (Tutkielmia Elliptisistä funktioista)* sekä useaan otteeseen täydennetty *Théorie des nombres (Lukuteoria)*.

<http://www-history.mcs.st-and.ac.uk/Biographies/Legendre.html>

[http://en.wikipedia.org/wiki/Adrien-Marie\\_Legendre](http://en.wikipedia.org/wiki/Adrien-Marie_Legendre)

Adrien-Marie Legendre, *Elements of Geometry and Trigonometry* (1839), [openlibrary.org](https://openlibrary.org)

Adrien-Marie Legendre, e-kirjoja, [openlibrary.org](https://openlibrary.org)

## John Dalton (1766–1844)



John Dalton oli englantilainen kemisti, fyysikko ja meteorologi, joka tunnetaan parhaiten atomiteorian varhaisesta kehityksestä.

Daltonin perhe kuului eristäytyvään uskonnolliseen ryhmään, minkä johdosta Johnin ei haluttu osallistuvan julkiseen yliopisto-opetukseen. Hänen tieteellinen koulutuksensa tapahtui lähinnä sokean matemaatikon ja luonnonfilosofin John Groughin ja kokeneen meteorologin ja instrumentinvalmistajan Elihu Robinsonin ohjauksessa. John Daltonin ensimmäinen julkaisu vuonna 1793 käsittelee meteorologiaa, mutta sisälsi samalla aineksia hänen tuleviin tieteellisiin löydöksiinsä.

Vuonna 1800 Dalton valittiin Manchesterin Kirjallisuuden ja Filosofian seuran sihteeriksi. Seuraavana vuonna hän esitti suullisesti laatimansa tutkielman *Experimental Essays (Kokeellisia tutkielmia)* seoskaasujen ominaisuuksista. Daltonin tutkielmat sisälsivät oleellisesti ottaen vuonna 1802 julkaistut ranskalaisen kemistin Joseph Gay-Lussacin mukaan nimetyt *Gay-Lussacin lait*. Daltonin tärkeimmäksi työksi muodostui kuitenkin hänen tutkimuksensa alkuaineiden suhteista yhdisteissä ja hänen päätelmänsä atomeista ja molekyyleistä. Atomiteoriaansa hän esittää vuonna 1808 ilmestyneessä kirjassaan *New System of Chemical Philosophy*<sup>1</sup> (*Uusi Systemi Kemian Filosofiaan*).

Dalton etsi yksinkertaisia luonnonlakeja ja piti ”suurimman yksinkertaisuuden sääntöä” luonnonlain veroisena. Daltonin työtä jatkoi hänen oppilaansa James Joule.

[http://en.wikipedia.org/wiki/John\\_Dalton](http://en.wikipedia.org/wiki/John_Dalton)

John Dalton by J.P. Millington (1906), [openlibrary.org](https://openlibrary.org)

John Dalton, Dictionary of National Biography, 1885-1900, Volume 13, [wikisource.org](https://www.wikisource.org)

<sup>1</sup> *A New System of Chemical Philosophy*, Part I, second edition (1842), [openlibrary.org](https://openlibrary.org)

John Dalton, *Foundations of the Molecular Theory*, [openlibrary.org](https://openlibrary.org)

John Dalton, *Foundations of the Atomic Theory*, [openlibrary.org](https://openlibrary.org)

*John Dalton and the rise of modern chemistry* by Sir Henry E. Roscoe, [openlibrary.org](https://openlibrary.org)

## Joseph Fourier (1768–1830)



Joseph Fourier oli ranskalainen matemaatikko ja fyysikko, joka tunnetaan parhaiten Fourier-sarjoista ja Fourier-muunnoksesta, joiden taustalla oli lämmön siirtymiseen liittyvän teorian kehittäminen.

Joseph Fourier oli räätälin poika Auxerre'sta keskeisestä Ranskasta. Hän aloitti koulunkäyntinsä Pallais'n koulussa,

jota piti paikallisen kirkon kanttori. Vuonna 1780 Fourier pääsi Auxerre'n École Royale Militaire-kouluun, missä hän pian kiinnostui matematiikasta. Vuonna 1794 hän aloitti opinnot École Normale'ssa Pariisissa, missä hänen opettajanaan oli mm. Lagrange and Laplace.

Fourier'n vuonna 1807 valmistunut tutkielma *Lämmön siirtymisestä kiinteässä aineessa* sai verrattain nihkeän vastaanoton Pariisin Instituutissa, jossa työtä arvioivat Lagrange, Laplace, Monge ja Lacroix, jotka kritisoivat mm. trigonometrinen sarjojen käyttöä, mikä myöhemmin osoittautui erääksi arvokkaimmista Fourier'n perinnöistä.

<http://www-history.mcs.st-and.ac.uk/Biographies/Fourier.html>

[http://en.wikipedia.org/wiki/Joseph\\_Fourier](http://en.wikipedia.org/wiki/Joseph_Fourier)

Joseph Fourier, e-kirjoja, [openlibrary.org](http://openlibrary.org)

## Thomas Young (1773–1829)



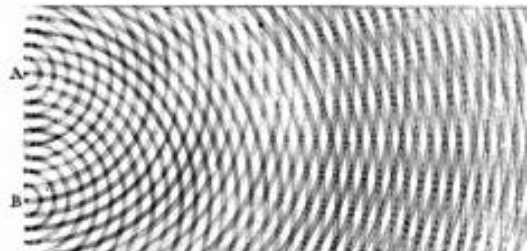
Thomas Young oli englantilainen monitieteilijä ja matemaatikko, joka tunnetaan ehkä parhaiten egyptiläisten hieroglyfien tulkinnasta. Egyptologian lisäksi hän vaikutti usean tieteenalan kehitykseen tutkimalla valoa, mekaniikkaa, energiaa, fysiologiaa, kieliä ja musiikin harmoniaa.

Thomas Young oli kotoisin Milvertonista, Lounais-Englannista. Hän oli paikallisen kveekariperheen vanhin poika. Thomas Young oli kielinero, joka jo 14-vuotiaana hallitsi tieteen perinteiset kielet, kreikan ja latinan sekä lisäksi ranskan, italian, heprean, saksan, syyrian ja sen kaldealaisen murteen, samarian, arabian, persian, turkin ja Etiopiassa puhutun seemiläisen amharan kielen.

Young aloitti lääketieteen opinnot Lontoossa vuonna 1792 ja täydensi opintojaan Göttingenissä, Saksassa, jossa hän suoritti fysiikan tohtorin tutkinnon vuonna 1796. Hän avasi lääkärin vastaanoton Lontoossa vuonna 1799. Hän julkaisi useita akateemisia artikkeleita nimettöminä suojellakseen mainettaan lääkärinä.

Vuonna 1801 Thomas Young nimitettiin luonnonfilosofian professoriksi Royal Instituuttiin, joskin hän pian luopui nimityksestä hoitaakseen lääkärinammattiaan. Hänen Royal Instituutissa luonnonfilosofiasta pitämänsä luennot ”*Course of Lectures on Natural Philosophy and Mechanical Arts*” (*Luonnonfilosofian ja Mekaniikan Luentokurssit*) julkaistiin vuonna 1807. Teos sisälsi luentojen lisäksi hänen julkaisemattomia kirjoituksiaan ja yli 20 000 nimikettä sisältävän luettelon tieteellisistä julkaisuista antiikin ajoista lähtien.

Thomas Youngin yksi tärkeistä tieteellisistä saavutuksista oli valon aaltoteoria (1803), jota hän todensi lukuisten interferenssikokeiden avulla, joilla hän myös oli



Interferenssikuvio kaksoisrakokokeessa, Royal Society 1803 / Kuva, [Wikimedia Commons](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Young's_experiment.jpg)



määritellyt eri värien aallonpituudet. Kvanttimekaniikan yhteydessä uudelleen tunnetuksi tullut kaksoisrakokoe oli alun perin Youngin vuonna 1803 löytämä vahva todiste valon aaltoluonteen puolesta. Young esitti myös kolmeen perusväriin perustuvan värinäön teorian. Youngin aaltoteoria vahvisti samalla Huygensin kirjassaan *Treatise of Light* vuonna 1678 esittämän teorian.

Thomas Young oli tietävästi ensimmäinen, joka käytti Leibnizin *vis viva* käsitteestä nimitystä energia.

[http://en.wikipedia.org/wiki/Thomas\\_Young\\_%28scientist%29](http://en.wikipedia.org/wiki/Thomas_Young_%28scientist%29)

*A Course of Lectures on Natural Philosophy and the Mechanical Arts* (1845), [openlibrary.org](https://openlibrary.org)

*Miscellaneous Works of the Late Thomas Young*, edited by George Peacock (1855), [openlibrary.org](https://openlibrary.org)

## André-Marie Ampère (1775–1836)



André-Marie Ampère oli ranskalainen matemaatikko ja fyysikko, joka tunnetaan parhaiten hänen mukaansa nimetystä sähkövirran yksiköstä, ”ampeerista”. Ampère’a pidetään yleisesti yhtenä sähkömagnetismin pioneereista.

André-Marie Ampère on kotoisin Lyonin kaupungin läheltä itäisestä Ranskasta. Hänen isänsä oli suuri Jean-Jacques Rousseau ihailija, minkä vuoksi hän opasti poikaansa ”opiskeluun suoraan luonnosta”.

Ampère kiinnostui matematiikasta jo nuorena perehtyen mm. Eulerin ja Bernoullin töihin. Hän avasi näkemyksiään matkustelemalla ja opiskelemalla historiaa, ruoutta, filosofiaa ja luonnontieteitä. Ensimmäisen säännöllisen työnsä hän otti vuonna 1799 matematiikan opettajana. Vuonna 1809 hänet nimitettiin matematiikan professoriksi École Polytechnique -yliopistoon. Matematiikan lisäksi hänen kiinnostuksensa kohdistui metafysiikkaan, fysiikkaan ja kemiaan. Vuonna 1815 hän julkaisi valon taittumista käsittelevän artikkelin. Hän tuki voimakkaasti Fresnelin aaltoteoriaa vielä vallalla ollutta Laplacen ja Biotin hiukkasteoriaa vastaan. Fresnelistä tuli Ampèren läheinen ystävä ja työtoveri.

Örstedin vuonna 1820 tekemistä havainnoista aktivoituneena André-Marie Ampère julkaisi jo muutaman kuukauden kuluttua raportin, jossa hän käsitteli Örstedin havaitsemaa ilmiötä. Huolellisiin kokeisiin perustuen Ampère muotoili matemaattisen ilmaisun sähkömagneettisesta voimasta liikkuvien varausten ja johtimissa kulkevien sähkövirtojen välillä. Tulokset hän julkaisi vuonna 1827 ilmestyneessä tutkielmassa *Mémoire sur la théorie mathématique des phénomènes électrodynamiques uniquement déduite de l'expérience* (Muistio Matemaattisesta Teoriasta Sähködynamiikan Ilmiöistä, Erityisesti Havainnosta pääteltynä). Ampèren työllä oli tärkeä merkitys sähkömagnetismin teorian myöhemmälle kehittämiselle.

Kunnian sähkömagneettisen induktion keksimisestä katsotaan kuuluvan Michael Faradaylle hänen vuonna 1821 tekemiensä kokeiden perusteella, minkä myös Ampère tunnusti.

Ampèren elämään liittyi hyvin traagisia tapahtumia. Hänen isänsä, jolta hän oli saanut alkeisopetuksensa, mestattiin Ranskan vallankumouksen yhteydessä vuonna 1792.

Samana vuonna hän menetti myös sisarensa. Ampère meni naimisiin vuonna 1797, mutta hänen vaimonsa kuoli vain kuuden avioliittovuoden jälkeen. Elämänsä loppu-aikoina hän kärsi vaikeista suhteista poikaansa ja hänen luonaan asuneen tyttärensä ja tämän aviomiehen ongelmallisesta avioliitosta.

<http://www-history.mcs.st-and.ac.uk/Biographies/Ampere.html>

[http://en.wikipedia.org/wiki/Andr%C3%A9-Marie\\_Amp%C3%A8re](http://en.wikipedia.org/wiki/Andr%C3%A9-Marie_Amp%C3%A8re)

André-Marie Ampère, e-kirjoja [openlibrary.org](http://openlibrary.org)

## Amedeo Avogadro (1776–1856)



Amedeo Avogadro oli italialainen fyysikko ja matemaatikko, joka tunnetaan parhaiten hänen mukaansa nimetystä *Avogadron vakiosta*.

Pian valmistuttuaan lakiopinnoistaan, Avogadro suuntautui matematiikkaan ja fysiikkaan ja ryhtyi opettajaksi vuonna 1809. Ajatuksen Avogadron vakiosta hän sai kaasuteorian tutkimuksistaan, jotka hän julkaisi vuonna 1811 tutkielmassaan *Essai d'une manière de déterminer les masses relatives des molécules élémentaires des corps, et les proportions selon lesquelles elles entrent dans ces combinaisons* (*Tutkielma Yhdisteiden Alkuainemolekyylien Suhteellisen Massan Määrämisestä ja Suhteista Jonon Ne Asettuvat Näissä Yhdisteissä*).

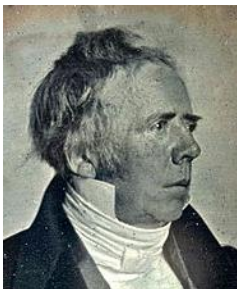
Hän päätteli, että kaksi eri kaasua, jotka ovat samassa lämpötilassa ja paineessa, sisältävät saman määrän molekyyliä. Päättelmänsä pohjalta ja vertaamalla kemiallisiin reaktioihin osallistuvien kaasujen tilavuuksia, hän pystyi päättelemään syntyvien yhdisteiden kemiallisen rakenteen ja erottamaan kaksiatomiset kaasut yksiatomisista kaasuista. Hän kiinnitti myös huomiota *massan* ja *painon* eroon.

Avogadron työ jäi pitkäksi aikaa vaille suurempaa huomiota. Eräät kokeet antoivat poikkeavia tuloksia, ja vasta vuonna 1860 italialainen kemisti Stanislao Cannizzaro selvitti, että poikkeamat olivat johtuneet molekyylien dissosioitumisesta, ja että Avogadron laki pätee sekä atomeille että molekyylielle.

[http://en.wikipedia.org/wiki/Amedeo\\_Avogadro](http://en.wikipedia.org/wiki/Amedeo_Avogadro)

*Fisica de' corpi ponderabili* (1837), [openlibrary.org](http://openlibrary.org)

## Hans Christian Ørsted (1777–1851)



Christian Ørsted oli tanskalainen fyysikko ja kemisti, joka keksi sähkövirran ja magnetismin välisen vuorovaikutuksen. Christian Ørsted syntyi Rudköbingin kaupungissa Langelandin saarella eteläisessä Tanskassa. Alkeisopetuksensa hän hoiti itseopiskelulla ennen hakeutumistaan Kööpenhaminan yliopistoon vuonna 1793.

Vuonna 1801 Ørsted sai matka-apurahan, jonka turvin hän matkusti Euroopassa. Saksassa hän tapasi Johann Wilhelm



Ritterin, fyysikon, joka uskoi, että sähkön ja magnetismin välillä on yhteys. Ørsted oli omaksunut Kantin filosofian luonnon ykseydestä, joten ajatus sähkön ja magnetismin yhteydestä tuntui hänestä luontevalta.

Ørsted sai professuurin Kööpenhaminan yliopistosta vuonna 1806, ja tutki akustiikkaa ja sähkövirtojen ominaisuuksia. Yliopisto kehitti merkittävän fysiikan ja kemian tutkimusohjelman ja perusti uusia laboratorioita Ørstedin johdolla.

Vuonna 1820, luennon aikana, Ørsted huomasi, että kompassineula liikahti hänen kytkiessään sähkövirran läheiseen johtimeen. Tarkemman tutkimuksen jälkeen hän julkaisi havaintonsa, jotka osoittivat, että sähkövirta synnyttää magneettikentän sähköjohtimen ympärille. Ørstedin havainto ei ollut puhdas sattuma sikäli, että hän oli etsinyt sähkön ja magnetismin yhteyttä jo vuosia.

[http://en.wikipedia.org/wiki/Hans\\_Christian\\_%C3%98rsted](http://en.wikipedia.org/wiki/Hans_Christian_%C3%98rsted)

## Carl Friedrich Gauss (1777–1855)



Carl Friedrich Gauss oli saksalainen matemaatikko ja monitieteilijä, jonka työllä on ollut tärkeä merkitys lukuteoriaan, statistiikkaan, analyysiin, differentiaaligeometriaan, geodesiaan, geofysiikkaan, sähköoppiin, optiikkaan ja astronomiaan.

Gauss syntyi vuonna 1777 Braunschweigissa, Saksassa köyhään työläisperheeseen. Gauss oli lapsinero, joka teki tärkeitä matemaattisia oivalluksia jo teini-ikäisenä. Gaussin poikkeava lahjakkuus huomattiin jo alkeiskoulussa. Braunschweigin herttuan myöntämän stipendin turvin hän aloitti yliopisto-opintonsa, Braunschweigissa vuonna 1792 ja Göttingenin yliopistossa vuonna 1795.

Vuonna 1799 valmistuneessa väitöskirjassaan, *A new proof of the theorem that every integral rational algebraic function of one variable can be resolved into real factors of the first or second degree*, Gauss todisti *algebran peruslauseen*, jonka mukaan jokaisella kompleksikerrotoimisella polynomilla on nollakohta.

21-vuotiaana hän kirjoitti yli 700 sivuisen latinankielisen kirjan *Disquisitiones Arithmeticae* (*Aritmetiikan tutkimuksia*), joka julkaistiin vuonna 1801. Kirjassa Gauss käsittelee 1700-luvun huippumatemaatikkojen, kuten Fermat, Euler, Lagrange ja Legendre tuloksia sekä omia merkittäviä löydöksiään.

Vuonna 1809 Gauss julkaisi taivaanmekaniikan kirjan *Theoria Motus Corporum Coelestivum (Teoria Taivaankappaleiden Liikkeistä)* ja vuonna 1827 differentiaaligeometriaa käsittelevän kirjan *Disquisitiones Generales Circa Superficies Curvas*, jossa hän mm. käsittelee kolmiulotteisen avaruuden kaareutumista.

Vuonna 1807 Gauss nimitettiin astronomian professoriksi ja Göttingenin observatorion johtajaksi, missä virassa hän toimi elämänsä loppuun asti. 1830-luvulla hän teki hedelmällistä yhteistyötä professori Wilhelm Weber kanssa sähkömagnetismin tutkimuksissa. Vuonna 1833, hän yhdessä Wilhelm Weberin kanssa konstruoi

sähkömekaanisen lennättimen, joka muodosti yhteyden Göttingenin observatoriosta kolmen kilometrin päässä sijaitsevaan fysiikan laitokseen.

<http://www-history.mcs.st-and.ac.uk/Biographies/Gauss.html>

[http://en.wikipedia.org/wiki/Carl\\_Friedrich\\_Gauss](http://en.wikipedia.org/wiki/Carl_Friedrich_Gauss)

Carl Friedrich Gauss, *Werke* [openlibrary.org](#)

*Theory of the Motion of the Heavenly Bodies Moving about the Sun in Conic Sections: Gauss's Theoria Motus* by

Charles Henry Davis (1857), [openlibrary.org](#)

Carl Friedrich Gauss, e-kirjoja, [openlibrary.org](#)

## Siméon Denis Poisson (1781–1840)



Siméon Denis Poisson oli ranskalainen matemaatikko ja fyysikko, kotoisin Pithiviers'n kaupungista Pariisin eteläpuolella. Poisson tunnetaan parhaiten hänen mukaansa nimitystä *Poissonin yhtälöstä*, joka on yleistetty muoto Laplace'n potentiaaliyhtälöstä.

Vuodesta 1798 Siméon Poisson opiskeli École Polytechnique -yliopistossa Pariisissa opettajinaan mm. Joseph Louis Lagrange ja Pierre-Simon Laplace. Vuonna 1802 hän sai apulaisprofessorin ja vuonna 1806 nimityksen matematiikan professoriksi paikan vapautuessa Jean Fourier'ltä; muutaman vuoden kuluttua hänestä tuli mekaniikan professori.

Poissonille maailmassa oli vain kaksi hyvää asiaa: matematiikka ja sen opettaminen. Hän jatkoi Laplace'n työtä planeettaratojen stabiilisuuden tutkimisessa. Laplacea seuraten Poisson kehitti valon hiukkasteoriaa, ja vastusti voimakkaasti Fresnelin esittämää aaltoteoriaa. Poisson uskoi voivansa todistaa Fresnelin teorian vääräksi osoittamalla, että Fresnelin teorian mukaista valopistettä ei syntyisi pyöreän kappaleen synnyttämän varjon keskelle. François Aragon järjestämä koe kuitenkin osoitti, että valopiste muodostui Fresnelin teorian mukaisesti. Valopiste tuli tunnetuksi joko Aragon tai Poissonin pisteenä.

Poissonille maailmassa oli vain kaksi hyvää asiaa: matematiikka ja sen opettaminen. Hän jatkoi Laplace'n työtä planeettaratojen stabiilisuuden tutkimisessa. Laplacea seuraten Poisson kehitti valon hiukkasteoriaa, ja vastusti voimakkaasti Fresnelin esittämää aaltoteoriaa. Poisson uskoi voivansa todistaa Fresnelin teorian vääräksi osoittamalla, että Fresnelin teorian mukaista valopistettä ei syntyisi pyöreän kappaleen synnyttämän varjon keskelle. François Aragon järjestämä koe kuitenkin osoitti, että valopiste muodostui Fresnelin teorian mukaisesti. Valopiste tuli tunnetuksi joko Aragon tai Poissonin pisteenä.

[http://en.wikipedia.org/wiki/Sim%C3%A9on\\_Denis\\_Poisson](http://en.wikipedia.org/wiki/Sim%C3%A9on_Denis_Poisson)

*A Treatise on Mechanics*, englanninkielinen käännös Henry H. Harte (1842), [openlibrary.org](#)

Siméon Denis Poisson, e-kirjoja, [openlibrary.org](#)

## François Arago (1786–1853)



François Arago oli ranskalainen matemaatikko, fyysikko, astronomi ja poliitikko, kotoisin Estagelin kylästä Välimeren rannikon tuntumassa, Etelä-Ranskassa.

Vuodesta 1803 Arago opiskeli, alun perin sotilasura mielessään, École Polytechnique -yliopistossa vasta virkaansa nimetyn Siméon Poissonin oppilaana ja pian hänen läheisenä yhteistyökumppaninaan.

Vuonna 1805 vielä opiskeluvaiheessa ollut Poisson sai tehtäväkseen osallistua metrin tarkkaan määrittämiseen liittyvään mediaanin mittaukseen, joka suoritettiin Espanjassa. Poliittisen tilanteen takia mittausretkikuntaa kohtaan tunnettiin vahvoja epäilyjä, ja Arago vangittiin vakoojana. Retki johti monivaiheiseen seikkailuun, joka päättyi vasta vuonna 1809, jolloin hän palasi Pariisiin ja tuli nimitetyksi apulaisprofessoriksi École Polytechnique -yliopistoon ja tiedeakatemian jäseneksi. Muiden toimiensa ohella Arago piti suosittuja astronomian yleisöluentoja vuodesta 1813 vuoteen 1845, jolloin hänestä tuli Pariisin observatorion johtaja. Hän toimi pitkään tiedeakatemian sihteerinä ja käynnisti akatemian *Proceedings of the Academy of Sciences* sarjan julkaisun vuonna 1835.

Arago oli yksi Thomas Youngin ja Augustin-Jean Fresnelin aaltoteorian vahvoja kannattajia. Hän tutki yhdessä Fresnelin kanssa valon polarisaatiota, oivalsi ympyräpolarisaation ja keksi polarisaatiofiltterin. Hän ehdotti myös valon nopeuden mittaamista pyörivään peiliin perustuvalla instrumentilla, koetta, jonka Fizeau ja Foucault toteuttivat vuonna 1850.

<http://www-history.mcs.st-and.ac.uk/Biographies/Arago.html>

[http://en.wikipedia.org/wiki/Fran%C3%A7ois\\_Arago](http://en.wikipedia.org/wiki/Fran%C3%A7ois_Arago)

François Arago, e-kirjoja, [openlibrary.org](http://openlibrary.org)

## Augustin-Jean Fresnel (1788–1827)



Augustin-Jean Fresnel oli Broglie'sta, Pohjois-Ranskasta kotoisin oleva insinööri, jonka tunnetuimmat saavutukset liittyvät diffraktioon, Fresnelin linssiin ja valon aaltoteoriaan.

Peruskoulutuksensa jälkeen vuonna 1804 kuusitoistavuotias Fresnel aloitti tekniikan opiskelunsa École Polytechnique -yliopistossa, jonka jälkeen hän suoritti insinöörin tutkinnon École des Ponts et Chaussées -yliopistossa.

Valmistumisensa jälkeen Fresnel osallistui tienrakennushankkeisiin, kunnes hän vuoden 1812 aikoihin aloitti koheensa valolla vapaa-ajallaan. Poliittisten levottomuuksien vuoksi hän joutui jättämään insinöörityönsä – mikä toisaalta antoi hänelle aikaa optisiin tutkimuksiinsa. Yhdistämällä matemaattiset analyysinsä ja kokeelliset havaintonsa, hän tuli täysin vakuuttuneeksi valon aaltoluonteesta – tietämättä Huygensin, Eulerin, ja Youngin aikaisemmin tekemistä töistä.

Valoaaltojen vaiheisiin perustuen Fresnel onnistui johtamaan yhtälöt, jotka antoivat ennusteet kirkkaiden ja tummien kuvioiden sijainneille diffraktiokokeissa. Vuonna 1815 hän julkaisi ensimmäisen tutkielmansa aaltoteoriastaan, jossa hän kuvasi lähestymistään diffraktion selittämiseen. Tämän jälkeen hän sovelsi samaa teoriaa interferenssiin.

Vuonna 1817 Ranskan Tiedeakatemia ilmoitti vuoden 1819 Grand Prix palkinnosta, joka annetaan parhaasta työstä diffraktion selittämiseksi. Komiteassa, joka käsittelee

Fresnelin lähettämää kilpailutyötä olivat Arago puheenjohtajana, ja jäseninä Poisson, Biot ja Laplace. Todennettuaan kokeellisesti "Poissonin pisteen", komitea myönsi Grand Prix palkinnon Fresnelille.

Fresnel oli oivaltanut valon aaltomekanismin intuitiivisena näkemyksenä. Käytännön lähestymistapansa ja riittävien matematiikan taitojensa avulla, hän kykeni todentamaan intuitiivisen näkemyksensä ja tarkentamaan aaltomallia monin yksityiskohdin. Vuonna 1821 osoitti, että polarisaatioilmiöiden ymmärtämiseksi valo on kuvattava poikittaisena aaltoliikkeenä. Fresnel kehitti myös "ether drag" teorian, jonka mukaan optisesti tiheän väliaineen liike vaikuttaa siinä etenevän valon nopeuteen. Muutama vuosikymmen myöhemmin ranskalainen fyysikko, Hippolyte Fizeau todensi Fresnelin johtaman ennusteen virtaavalla vedellä tekemällään kokeella.

Fresnel sai elinaikanaan varsin niukasti julkista tunnustusta työstään. Vuonna 1824 hän kirjoitti Thomas Youngille: "Turhamaisuus, jota ihmiset kutsuvat kunniaksi turruttaa – kaikki kohteliaisuudet, joita olen saanut arvostetuilta kollegoiltani, eivät koskaan tuoneet minulle niin paljon iloa kuin teoreettisen totuuden löytäminen; laskelman vahvistaminen kokeella".

Fresnel kuoli tuberkuloosiin vuonna 1827 vain 39 vuoden ikäisenä.

Käytännönläheisenä tutkijana Fresnel ei ottanut periaatteellista kantaa valoaaltoja kantavaan väliaineeseen, eetteriin. Eetterin olemassaolosta ja sen mahdollisista ominaisuuksista syntyi kuitenkin keskeinen, pitkään 1900-luvun puolelle jatkuva keskustelu, kunnes eetteri suppean suhteellisuusteorian viitekehyksessä katsottiin tarpeettomaksi.

<http://www-history.mcs.st-and.ac.uk/Biographies/Fresnel.html>

[http://en.wikipedia.org/wiki/Augustin\\_Fresnel](http://en.wikipedia.org/wiki/Augustin_Fresnel)

*The Wave Theory of Light, Memoirs by Huygens, Young and Fresnel* (1900), Henry Crew (editor), [openlibrary.org](http://openlibrary.org)

## Georg Simon Ohm (1789–1854)



Georg Ohm oli saksalainen fyysikko ja matemaatikko, joka tunnetaan parhaiten "Ohmin laista" ja hänen mukaansa nimeytystä sähkövastuksen yksiköstä, ohmista. Ohm sai itseoppineelta isältään tasokkaan alkeisopetuksen matematiikassa, fysiikassa, kemiassa ja filosofiassa.

Ohm toimi matematiikan opettajana Gottstadtissa, Sveitsissä vuosina 1806–1809 jatkaen omia matematiikan opintojaan tutustumalla mm. Eulerin, Laplacen ja Lacroix'n töihin. Tohtorin tutkinnon hän suoritti Erlangenin yliopistossa vuonna 1811 ja jäi matematiikan luennoitsijaksi yliopistoon, josta hän pian siirtyi kouluopettajaksi Bambergiin.

Vuonna 1817 hän sai opettajan paikan Kölnin Jesuiittalyseossa, jossa oli hyvin varustettu fysiikan laboratorio. Kuultuaan Örstedin havaitsemasta sähkövirran ja magneetin vuorovaikutuksesta, hän aloitti omat kokeilunsa sähkövirtojen vaikutuksista.

Hän havaitsi, että johteen yli havaittava potentiaaliero (jännite) oli suoraan verrannollinen johteen läpi kulkevaan virtaan, mikä tunnetaan ”Ohmin lakina”. Ohm oletti sähköiset ilmiöt toisiinsa liittyvien partikkelien vuorovaikutukseksi ilman kaukovaikutuksia, mikä sinänsä oli riittävää Ohmin lain kuvaamiseen. Ohm julkaisi tutkimustuloksensa vuonna 1827 ilmestyneessä kirjassaan *Die galvanische Kette, mathematisch bearbeitet* (Galvaaninen johde, matemaattinen kuvaus).

<http://www-history.mcs.st-andrews.ac.uk/Biographies/Ohm.html>

[http://en.wikipedia.org/wiki/Georg\\_Ohm](http://en.wikipedia.org/wiki/Georg_Ohm)

Georg Ohm, *Die galvanische kette* (1827), [openlibrary.org](http://openlibrary.org),

Georg Ohm, *The Galvanic Circuit Investigated Mathematically*, [openlibrary.org](http://openlibrary.org)

## Michael Faraday (1791–1867)



Englantilainen Michael Faraday oli itseoppinut tutkija ja yksi kaikkien aikojen merkittävimmistä kokeellisista tutkijoista, joka tunnetaan useista löytämistään ja hänen mukaansa nimeytyistä sähkömagnetismin liittyvistä ilmiöistä ja kapasitanssin yksiköstä.

Michael Faraday syntyi Newington Butts’n kylässä nykyisen Lontoon alueella. Työn ja toimeentulon etsiminen vei perheen Lontooseen, missä Michael kävi päiväkoulua ja oppi lukemaan, kirjoittamaan ja laskemaan. Kolmetoistavuotiaana hän meni kirjapainon juoksupojaksi ja jatkoi kirjansitojan oppipoi-

kana lähes kymmenen vuoden ajan. Hän ei vain sitonut kirjoja vaan myös luki niitä työajan jälkeen – erityisesti tieteellisiä kirjoja. Eräät hänen suosikeistaan lienevät olleen Isaac Watt’n *The Improvement of the Mind* (*Mielen Kehittäminen*), ja Jane Marcet’n *Conversations on Chemistry*. Faradayn tieteellinen kiinnostus kohdistui erityisesti sähköön.

Vuonna 1808 brittiläinen filosofi ja tiedemies John Tatum perusti City Philosophical Societyn. Michael Faradaylla oli tilaisuus osallistua John Tatumien talossa pidettyihin luentoihin. Erityisesti Faraday oli kiinnostunut sähköön, sähkökemiallisiin ilmiöihin ja mekaniikkaan liittyvistä luennoista.

Vuonna 1812 hänellä oli tilaisuus kuunnella Humphry Davyn luentoja Royal Instituutissa. Hän kirjoitti Royal Societyn presidentille kysyen mahdollisuudesta päästä tieteelliseen työhön. Vastausta ei tullut, ja hän kirjoitti Humphry Davylle, jonka kemian luennoista hän oli tehnyt 300-sivuisen muistiinpanokokoelman. Davy otti Faradayn apulaisekseen vuonna 1813. Faraday osallistui Davyn apulaisena ja sihteerinä tieteelliselle kiertomatkalle Manner-Eurooppaan, jolloin Faraday tapasi mm. Ampèren Pariisissa ja Voltan Milanossa.

Vuoden 1820 aikoihin Davy kiinnostui Aragon ja Ampèren havainnoista sähköä ja magnetismin vuorovaikutuksesta, ja yritti huonolla menestyksellä yhdessä William Wollastonin kanssa konstruoida sähkömoottorin. Faraday sen sijaan onnistui demonstroimaan alkeellisen homopolaarisen moottorin. Epäonnekseen Faraday innostuksissaan unohti kiittää työnsä ohjaajia ja yhteistyökumppaneitaan Wollastonia

ja Davya moottoristaan ja siihen liittyvistä kokeista kirjoittamassaan julkaisussa. Huomaamattomuus synnytti ristiriitaisuuksia Royal Societyssä, ja kiristi Faradayn suhteita kollegoihinsa ja ohjaajiinsa, millä lienee rajoittanut hänen aktiviteettiaan sähkömagnetismiin liittyvässä tutkimuksessa usean vuoden ajan.

Kaksi vuotta Davyn kuoleman jälkeen vuoden 1833 aikoihin, Faraday aloitti perusteellisen koesarjan, joka johti sähkömagneettisen induktion keksimiseen ja ilmiön yksityiskohtaiseen analysointiin. Amerikkalainen fyysikko, Joseph Henry oli ilmeisesti havainnut induktion muutamaa kuukautta aikaisemmin – induktio oli periaatteessa pääteltävissä myös italialaisen fyysikon Francesco Zantedeschin tekemistä kokeista. Faradayn huolelliset muistiinpanot kokeistaan muodostivat keskeisen perustan James Maxwellille hänen muotoillessaan kuuluisia Maxwellin yhtälöitä.

Sähköön olemusta selvittäessään, Faraday vuonna 1839 oivalsi, että sähkövarausten vuorovaikutus ei ulotu sähköä johtavasta materiaalista tehtyyn suljettuun tilaan. Sähkö- ja magneettikentistä tilaa on myöhemmin kutsuttu ”Faradayn häkiksi”.

Kun brittiläinen teoreettinen fyysikko William Thomson kuuli Faradayn (sähkö- ja magneettikenttää kuvaavista) voimaviivoista hän, vuonna 1845, kirjoitti Faradaylle matemaattisista tuloksistaan, joiden mukaan magneettikentän pitäisi vaikuttaa valon polarisaatiotasoon. Faraday oli kokeillut asiaa jo vuosia aikaisemmin, kuitenkin löytämättä ilmiötä. Thomsonin aktiivisena hän yritti uudelleen, ja havaitsi lisäksi, että polarisaation kääntyminen on verrannollinen magneettikentän voimakkuuteen.

Vaikka Faraday muistetaan lähinnä sähkömagnetismiin liittyvistä töistään, hän ehti Humphry Daven assistenttina tehdä huomattavia kemiaan liittyviä löydöksiä. Hän onnistui nesteyttämään useita kaasuja, hän kehitti seosmetalleja, ja teki lasiseoksia optisiin tarkoituksiin. Hän tunnisti elektrolyysin periaatteet, keksi Bunsen polttimon ja kuvasi metallisten nanopartikkeleiden optisia ominaisuuksia. Elektrolyysin tutkimuksissaan hän määrittä Faradayn vakion, joka kuvasi sähkövarausta, joka tarvittiin moolin suuruisen ainemäärän siirtoon elektrolyysissä. Mooliin suhteutettu varaus viestitti atomiin sidotusta alkeisvarauksesta, minkä George Stoney oivalsi 1870-luvulla.

Kesäkuussa 1832, Oxfordin yliopisto myönsi Faradaylle kunniatohtorin arvon. Faraday ehti elinaikanaan saada useita tunnustuksia. Hän kuitenkin hylkäsi nimityksen ritariksi ja hylkäsi hänelle kahdesti tarjotun Royal Societyn presidentin nimityksen.

<http://www-history.mcs.st-and.ac.uk/Biographies/Faraday.html>

[http://en.wikipedia.org/wiki/Michael\\_Faraday](http://en.wikipedia.org/wiki/Michael_Faraday)

Michael Faradayn julkaisuja: [http://en.wikisource.org/wiki/Author:Michael\\_Faraday](http://en.wikisource.org/wiki/Author:Michael_Faraday)

*The Life and Discoveries of Michael Faraday* by James Arnold Crowther (1920), [openlibrary.org](http://openlibrary.org)

M. Faraday by J.H. Gladstone (1874), [openlibrary.org](http://openlibrary.org)

M. Faraday, *Experimental researches in electricity* (1839, 1914, 1922), [openlibrary.org](http://openlibrary.org)

M. Faraday, *A course of six lectures on the various forces of matter and their relations to each other* (1860), [openlibrary.org](http://openlibrary.org)

## Gustave Coriolis (1792–1843)



Gustave Coriolis oli ranskalainen matemaatikko insinööri ja monitieteilijä, joka tunnetaan ennen kaikkea pyörivien systeemeihin liittyvien voimien analysista ja hänen mukaansa nimetystä *Coriolis voimasta*.

Gustave Coriolis syntyi Pariisissa, kävi koulua Nancyssä ja opiskeli insinööritieteitä École Polytechniquessa. Opintojensa jälkeen Coriolis alkoi kehittää koneisiin liittyvän mekaniikan matemaattikkaa, minkä puitteissa hän määritteli *työn* ja *kineettisen energian* käsitteet. Kineettiselle energialle hän johti lausekkeen  $\frac{1}{2}mv^2$ , mikä esiintyy hänen laatimassaan mekaniikan oppikirjassa *Calcul de l'Effet des Machines (Koneiden Tebon Laskenta)* vuodelta 1829.

Vuonna 1835 hän julkaisi kirjan *Théorie Mathématique des Effets du Jeu de Billard* (Matemaattinen Teoria Pallojen Törmäyksistä).

<http://www-history.mcs.st-and.ac.uk/Biographies/Coriolis.html>

[http://en.wikipedia.org/wiki/Gustave\\_Coriolis](http://en.wikipedia.org/wiki/Gustave_Coriolis)

## Sadi Carnot (1796–1832)



Sadi Carnot oli ranskalainen sotilasinsinööri, joka tunnetaan hänen työstään termodynamiikan perusteissa ja hänen mukaansa nimetystä *Carnot'n kierrosta*.

Sadi Carnot syntyi Pariisissa; hän sai matematiikan, fysiikan, kielten ja musiikin perusopetuksen isältään, joka oli tuohon aikaan eläköitynyt Napoleonin armeijan korkea-arvoisen upseerin virasta. Sadi pääsi École Polytechnique -yliopistoon 16-vuotiaana, jossa hänen opettajinaan toimivat mm. Siméon-Denis Poisson, André-Marie Ampère ja François Arago.

Valmistuttuaan kahden vuoden kuluttua hän jatkoi opintojaan École du Génieessä Metzissä. Lyhyen sotilasuransa jälkeen hän kiinnostui höyrykoneista, ja alkoi kehittää teoriaa niiden toiminnasta. Carnot'n päätyö lämpövoimakoneista, *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance*, (*Näkökohtia tulen liikevoimaan ja koneisiin jotka käyttävät tätä voimaa*) julkaistiin vuonna 1824; hänen julkaisematon alkuperäistyönsä vuosilta 1822-23 löydettiin vasta vuonna 1966.

Vuonna 1824 julkaistussa kirjassaan Carnot esitti ensimmäisen käyttökelpoisen lämpövoimakoneiden toimintaa kuvaavan teorian. Hän oivalsi, että ideaalinen prosessi, Carnot'n kiertäminen on reversiibeli, ts. mekaaninen työ voi myös synnyttää lämpötilaeroja.

[http://www-history.mcs.st-and.ac.uk/Biographies/Carnot\\_Sadi.html](http://www-history.mcs.st-and.ac.uk/Biographies/Carnot_Sadi.html)

[http://en.wikipedia.org/wiki/Nicolas\\_L%C3%A9onard\\_Sadi\\_Carnot](http://en.wikipedia.org/wiki/Nicolas_L%C3%A9onard_Sadi_Carnot)

Sadi Carnot, *Reflections on the Motive Power of Heat* by W. Thomson (Lord Kelvin), (1897), [openlibrary.org](http://openlibrary.org)

## Benoît Paul Émile Clapeyron (1799–1864)



Émile Clapeyron oli ranskalainen insinööri ja fyysikko, joka kehitti edelleen Sadi Carnot'n hahmottelemia termodynamiikan perusteita.

Clapeyron oli syntynään pariisilainen ja opiskeli *École Polytechnique* ja *École des Mines*ä. Hän vietti vuodesta 1820 kymmenen vuotta opettajana Pietarissa, mistä palattuun hän johti mm. Pariisin ja Versaillesin yhdistävän rautatien rankennusta.

Vuonna 1834 ilmestyneessä tutkielmassaan *Puissance motrice de la chaleur* (*Lämmön liikkeellepaneva voima*) Clapeyron jalosti Carnot'n työtä muokkaamalla Carnot'n kierto-prosessista havainnollisen graafisen esityksen, jota hän myöhemmin täydensi muotoilemalla *Carnot'n periaatteen*, joka oleellisesti ottaen määrittellee termodynamiikan toisen pääsäännön.

<http://www-history.mcs.st-and.ac.uk/Biographies/Clapeyron.html>

<http://en.wikipedia.org/wiki/Clapeyron>

## Christian Doppler (1803–1853)



Christian Doppler oli itävaltalainen matemaatikko, fyysikko ja astronomi, joka tunnetaan parhaiten hänen mukaansa nimetystä Doppler-ilmiöstä.

Christian Doppler oli kotoisin Salzburgista Itävallasta. Hän valmistui Wienin teknillisestä korkeakoulusta vuonna 1825 ja jatkoi matematiikan, mekaniikan ja astronomian opintojaan Wienin yliopistossa. Vuodesta 1829 hän toimi yliopiston matematiikan professorin assistenttina, matematiikan opettajana Prahan teknillisessä koulussa ja vuodesta 1839 geometrian ja matematiikan professorina Prahan teknillisessä korkeakoulussa.

Lyhytaikaiseksi jääneen professuurin jälkeen Banská Štiavnícassa hänet nimitettiin Wienin teknilliseen korkeakouluun perustetun Fysiikan instituutin johtajaksi.

Christian Dopplerin merkittävin julkaisu oli vuonna 1842 valmistunut *Über das farbige Licht der Doppelsterne und einiger anderer Gestirne des Himmels* (*Kaksoistähtien ja eräiden muiden taivaan tähtien värityksestä valosta*), missä hän päätelee, että taivaankappaleiden spektrin siirtymä voi johtua niiden suhteellisesta nopeudesta maahan (havaintsijaan) nähden. Julkaisussaan hän kuvaa Doppler-ilmiön sekä valolle että äänelle. Vuonna 1846 hän täydensi teoriaa huomioimalla erikseen lähteen ja vastaanottimen liikkeen vaikutuksen havaittavaan taajuusmuutokseen.

<http://www-history.mcs.st-and.ac.uk/Biographies/Doppler.html>

[http://en.wikipedia.org/wiki/Christian\\_Doppler](http://en.wikipedia.org/wiki/Christian_Doppler)



## Wilhelm Eduard Weber (1804–1891)



Wilhelm Weber oli saksalainen fyysikko, jonka sähkömagneettinen teoria sisälsi pisimmälle kehitetyn kuvauksen sähkömagnetismista 1800-luvun puolivälissä.

Wilhelm Weber syntyi Wittenbergissä itäisessä Saksassa. Hän sai alkeisopetuksen isältään, joka oli teologian professori. Vuonna 1821 seitsemäntoistavuotias Wilhelm opiskeli Franke Instituutissa päästäkseen jatkamaan opintojaan Hallen yliopistossa. Vuonna 1825 hän julkaisi yhdessä vanhemman veljensä Ernstin kanssa tekemiään tut-

kimuksia nesteiden virtauksista sekä vesi- ja ääniaalloista. Julkaisu oli 575-sivuinen monografia *Wellenlehre auf Experimente gegründet (Kokeisiin perustuva aalto-oppi)*, jossa he muotoilivat hydrodynamiikan peruslait. Wilhelm Weber jatkoi aaltotutkimuksia erityisesti akustiikan alueella, ja julkaisi tutkimuksistaan useita julkaisuja. Nuoremman veljensä Eduardin kanssa hän julkaisi kävelyn mekanismista tutkimuksia, joita julkaistiin vuosina 1825–1838. Wilhelm Weberin vuonna 1826 valmistunut väitöstyö käsitteli urkuharmonin kielen ja resonoivan ilmatilan akustista kytkentää.

William Weber nimitettiin Hallen yliopiston dosentiksi, ja seuraavana vuonna luonnonfilosofian professoriksi. Weberin esitelmöidessä väitöskirjansa aiheesta vuonna 1828 pidetyssä luonnontutkijoiden konferenssissa Berliinissä Carl Friedrich Gauss kiinnostui kuulemastaan ja ehdotti Weberille muuttoa yhteistyökumppanikseen Göttingeniin, heti kun siellä vapautuisi sopiva paikka. Göttingenin yliopistossa vapautui vuonna 1831 fysiikan professuuri, joka välittömästi osoitettiin Weberille. Jo seuraavana vuonna Gauss ja Weber julkaisivat yhdessä artikkelin, jossa mm. määriteltiin magnetismin mittayksiköitä. Työn edellyttämiä kokeita varten Weber oli kehittänyt mm. entisiä huomattavasti herkempiä magnetometrejä. Vuonna 1833 Gauss ja Weber perustivat yhdessä *Göttingenin magneettiklubin*, jonka tavoitteena oli organisoida maapallon magneettikentän globaali kartoitus<sup>1</sup>. Royal Societyn kanssa yhteistyössä tehdyn kartoituksen tulokset julkaistiin vuonna 1840. Kartoituksessa havaittiin mm. koko maapallon kattavia häiriöitä, jotka nimettiin magneettisiksi myrskyiksi.

Yhteistyönsä tehostamiseksi Gauss ja Weber konstruoivat kolmen kilometrin mittaisen lennätinlinjan Göttingenin yliopiston fysiikan laitoksen ja observatorion välille vuonna 1832. Yhteys tarjosi samalla mahdollisuuden maan magneettikentän samanaikaiseen mittaamiseen.

1830-luvun poliittisten heilahtelujen johdosta Weber joutui luopumaan professuuristaan Göttingenin yliopistossa. Vuonna 1838 hän vieraili Berliinissä, Lontoossa ja Pariisissa tavaten alansa paikallisia tutkijoita. Vuonna 1843 hän sai professuurin Leipzigin, missä hän jatkoi Göttingenissä aloittamaansa sähkömagnetismiin liittyvää tutkimusta, jonka tuloksena oli vuosina 1846–1848 ilmestyneet julkaisut *Electrodynamische Massenbestimmungen (Sähködynaamisia Mittauksia)*. Weberin työ muodosti perustan sähkösuureiden ja yksiköiden määrittelylle. Samalla se liitti toisiinsa kolme keskeistä sähkömagnetismin lainalaisuutta: levossa olevien varausten vuorovaikutuksen, Ampèren lain liikkuville varauksille, sekä lain sähkömagneettisesta induktiosta.

Uusien poliittisten muutosten jälkeen William Weber palasi Göttingeniin vuonna 1849 ja jatkoi jo yli 70-vuotiaan Gaussin työtä observatorion johtajana. Gaussin kuoltua vuonna 1855 Weber aloitti yhteistyön Rudolph Hermannin ja Arndt Kohlrauschin kanssa. Yhteistyön puitteissa Weber muotoili sähkömagneettisen voiman lausekkeen, jossa oli sekä staattinen että dynaaminen komponentti. Hän osoitti, että staattisen ja dynaamisen sähkövarauksen suhteen käänteisarvon neliöjuuri,  $1/\sqrt{\epsilon_0\mu_0}$  oli nopeus, noin  $3 \cdot 10^8$  m/s, mikä osoittautui valon nopeudeksi. Weber merkitsi nopeutta symbolilla  $c$ , mikä myöhemmin vakiintui valon nopeuden symboliksi. Viimeiset vuotensa Göttingenissä Weber käytti lähinnä aineen sähköisen rakenteen tutkimiseen.

<http://www-history.mcs.st-andrews.ac.uk/Biographies/Weber.html>

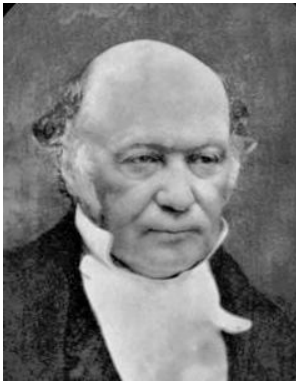
[http://en.wikipedia.org/wiki/Wilhelm\\_Eduard\\_Weber](http://en.wikipedia.org/wiki/Wilhelm_Eduard_Weber)

Wilhelm Weber, *Werke* (1893), [openlibrary.org](http://openlibrary.org)

A.K.T. Assis, H. Torres Silva, *Comparison between Weber's electrodynamics and classical electrodynamics*, *Pramana - J. Phys.*, Vol. 55, No. 3, September 2000

<sup>1</sup> [http://www.phy6.org/earthmag/mill\\_4.htm](http://www.phy6.org/earthmag/mill_4.htm)

## William Hamilton (1805–1865)



William Hamilton oli irlantilainen fyysikko, astronomi ja matemaatikko, joka Lagrangen ohella on merkittävästi kehittänyt klassisen mekaniikan formalismia.

Hamilton syntyi Dublinissa. Kolmevuotiaana hänet lähetettiin asumaan setänsä James Hamiltonin holhouksessa. James Hamilton, kielitieteilijä, joka toimi opettajana paikallisessa koulussa Talbots Castlessa. Hamiltonilla oli jo nuorena poikkeuksellisia kykyjä, kuten ilmiömäinen muisti sekä kieli- ja matematiikkataju.

Kaksitoistavuotiaana hän kielitieteilijäsetänsä opastuksella oli oppinut jo yli kymmenen kieltä. Tuolloin hän tapasi myös amerikkalaisen aritmetiikkavirtuoosin Zerah Colbournin, jolle hän niukasti hävisi päässälaskukilpailussa. Häviön kerrotaan herättäneen Hamiltonin kiinnostuksen matematiikkaan. Kahdeksantoistavuotiaasta kuolemaansa asti Hamilton työskenteli pienessä mutta tasokkaassa matemaatikkojen koulussa, Trinity Collegessa, Dublinissa.

Hamilton tunnetaan työstään optiikassa ja ennen kaikkea mekaniikassa. Vuonna 1828 *Transactions of the Royal Irish Academy* sarjassa ilmestyneessä artikkelissaan *Theory of Systems of Rays (Säteilyjärjestelmien teoria)* hän esitti Hamiltonin funktioon perustuvan klassisen mekaniikan formalismin perusteet. Artikkelin jatko-osassa ja vuonna 1834 julkaistussa artikkelissa *On a General Method in Dynamics (Yleinen Mekaniikan Menetelmä)* hän esittää *muuttuvan vaikutuksen (varying action)* periaatteen, mikä salli sekä säteilyä että partikkeleita sisältävän systeemin tarkastelun.

Matematiikan alueella Hamilton tunnetaan myös mm. kvaternionin keksijänä.

Hamilton lyötiin ritariksi vuonna 1835. Hän kuoli vaikeaan sairauskohtaukseen pian sen jälkeen kun hän sai tietää tulleensa valituksi USA:n Tiedeakatemian (Academy of Sciences of the USA) ensimmäiseksi ulkomaiseksi jäseneksi.

<http://www-history.mcs.st-and.ac.uk/Biographies/Hamilton.html>

[http://en.wikipedia.org/wiki/William\\_Rowan\\_Hamilton](http://en.wikipedia.org/wiki/William_Rowan_Hamilton)

*Life of Sir William Rowan Hamilton,*

Vol I, <http://archive.org/stream/lifeofsirwilliam01gravuoft>

Vol II, <http://archive.org/stream/lifeofsirwilliam02grav>

Vol III, <http://archive.org/stream/lifeofsirwilliam03gravuoft>

*On a general method in dynamics: From the Philosophical transactions,* Part 2 for 1834, [openlibrary.org](http://openlibrary.org)

*Lectures on Quaternions* (1853), [openlibrary.org](http://openlibrary.org)

## Julius von Mayer (1814–1878)



Julius von Mayer oli saksalainen lääkäri ja fyysikko, ja yksi termodynamiikan perusteiden keksijöitä. Julius von Mayer syntyi Baden-Württembergissä nykyisen Saksan lounaisosassa. Hän opiskeli lääketiedettä Tübingenin Eberhard Karls –yliopistossa, jossa hän suoritti tohtorin tutkinnon vuonna 1838.

Pian valmistumisensa jälkeen hän lähti laivalääkäriksi purjehdukselle Jakartaan. Matkallaan hän kiinnitti huomiota siihen, että vaahtopäiset aallot ovat lämpimämpiä kuin tyyni vesi, ja alkoi ajatella ilmiön takana olevia luonnonlakeja. Matkalta palattuaan vuonna 1841 hän omistautui tämän kysymyksen ratkaisuun. Vielä samana vuonna hän kiteytti näkemyksensä toteamukseen:

*”Energiaa ei voida luoda eikä hävittää”*,

mikä on yksi ensimmäisistä termodynamiikan ensimmäisen pääsäännön muotoiluista. Mayer laski lämmön mekaanisen ekvivalentin arvoksi 4,168 J/cal, jonka hän vuonna 1842 julkaisi kirjoituksessaan *Die organische Bewegung im Zusammenhang mit dem Stoffwechsel* (*Orgaaninen Lääke Aineenvaihdunnassa*). Mayerin lämpöekvivalentti on vain 0,4% alle lämpöekvivalentille käytetyn nykyisen arvon. Se julkaistiin vuonna 1845 julkaisusarjassa *Annalen der Chemie und Pharmacie*, tuolloin samoihin aikoihin kuin Joulen tunnetuksi tullut lämmön mekaanista ekvivalentti.

Mayer oivalsi hitaan palamisen kaikkien elävien olentojen lämmönlähteeksi. Hän esitti myös, että kasvit muuntavat auringon valon kemialliseksi energiaksi. Auringon hän arvioi jäähtyvän 5000 vuodessa, ellei sillä ole lämmönlähdettä; mahdolliseksi lämmönlähteeksi hän ehdotti aurinkoon törmäviä meteoriitteja.

Ensireaktionaan ajan fyysikot, mukaan lukien Hermann von Helmholtz ja James Prescott Joule, hylkäsivät Mayerin periaatteen energian säilymisestä ja suhtautuivat vihamielisesti hänen esityksiinsä. Helmholtz epäili Mayerin pätevyyttä fyysikaalisissa kysymyksissä, Joulen kanssa syntyi katkera kiista lämpöekvivalentin prioriteetista.

Lopulta vuonna 1859 Mayer palkittiin kunniaohtorin nimityksellä Tübingenin yliopiston filosofian tiedekunnassa. Hänen väheksytty julkaisunsa arvioitiin uudelleen vuonna 1862. Vuonna 1867 Mayer julkaisi teoksen *Die Mechanik der Wärme (Lämmön mekaniikka)*. Samana vuonna Mayer aateloitiin, jolloin hänestä tuli von Mayer.

[http://en.wikipedia.org/wiki/Julius\\_von\\_Mayer](http://en.wikipedia.org/wiki/Julius_von_Mayer)

Julius Robert von Mayer, *Die Mechanik der Wärme: In gesammelten Schriften* (1867), [openlibrary.org](http://openlibrary.org)

## James Joule (1818–1889)



James Joule oli englantilainen, Salfordista, nykyisen Manchesterin alueelta kotoisin oleva fyysikko ja olutpanimon omistaja, joka tunnetaan parhaiten Joulen laeista ja hänen mukaansa nimetystä energian yksiköstä, joulesta.

Lyhyen, John Daltonin ohjauksessa saamansa koulutuksen jälkeen tiede oli Joulelle lähinnä harrastus, kun hän alkoi tutkia mahdollisuutta korvata panimon höyrykoneet vastikään keksityillä sähkömoottoreilla. Käytännön kokeilut johtivat mekaanisen työn, sähkövirran ja lämmön väli-

sen vastaavuuden selvittämiseen.

James Joule muotoili Joulen lait vuonna 1840. Ensimmäinen laki toteaa sähkövirran johteessa tuottaman lämpömäärän, mikä samalla määritteli energiayksikön *joule*. Joulen toinen laki toteaa, että ideaalikaasun sisäinen energia riippuu vain lämpötilasta ja on riippumaton kaasun tilavuudesta ja paineesta.

Joule määritteli mekaanisen lämpöekvivalentin kalorimetrisin kokein. Ensimmäiset tulokset hän julkisti British Association for the Advancement of Science:n kokouksessa, Corkissa vuonna 1843. Ensireaktio Joulen esittämiin lakeihin oli epäilevä ja vaatimaton. Joule jatkoi mittauksia ja julkaisi uudet tulokset vastaavassa kokouksessa Cambridgessa vuonna 1845. Hänen saamansa arvo lämpöekvivalentille oli 4.14 J/cal.

James Joulen ja Julius Mayerin työt loivat vahvan kvantitatiivisen perustan termodynamiikan ensimmäiselle pääsäännölle.

Hermann Helmholtz tuli tietoiseksi sekä Mayerin että Joulen töistä. Vaikka kumpikin heistä oli saanut nihkeän vastaanoton esityksilleen, Helmholtz vuonna 1847 esittämässään energian säilymisen toteamuksessaan antaa tunnustuksen sekä Mayerille että Joulelle.

[http://en.wikipedia.org/wiki/James\\_Joule](http://en.wikipedia.org/wiki/James_Joule)

*The scientific papers of James Prescott Joule* (1884), [openlibrary.org](http://openlibrary.org)

James Joule, artikkeleita: [wikisource.org](http://wikisource.org)

## Léon Foucault (1819–1868)



Léon Foucault oli ranskalainen fyysikko, joka tunnetaan parhaiten hänen mukaansa nimetystä *Foucault'n heilurista*, jolla voidaan osoittaa maapallon pyöriminen ja rataliike auringon ympäri.

Léon Foucault syntyi Pariisissa ja sai peruskoulutuksensa lähinnä kotona. Opintonsa hän aloitti lääketieteellä mutta siirtyi pian fysiikkaan toimiessaan assistenttina anatomiaan liittyvässä mikroskopiassa. Vuonna 1850, hän yhdessä Hippolyte Fizeaun kanssa mittasi valon nopeuden, käyttäen pyörivään peiliin perustuvaa mittaussysteemiä, jota Fresnel oli aikoinaan ehdottanut.

koinaan ehdottanut.

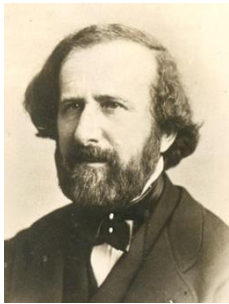
Vuonna 1851, hän konstruoi ensimmäisen demonstraation maapallon pyörimisen toteamiseen, Pariisin Panthéoniin asennetun suuren *Foucaultin heilurin*, jonka heilumistaso säilytti asemansa maapallon pyöriessä ”heilurin alla” kerran tähtivuorokaudessa.

Heilurikoe koettiin sensaationa se tiedepiireissä, että suuren yleisön keskuudessa. *Foucaultin heilureita* asennettiin useisiin kaupunkeihin sekä Euroopassa että Amerikassa.

<http://www-history.mcs.st-and.ac.uk/Biographies/Foucault.html>

[http://en.wikipedia.org/wiki/L%C3%A9on\\_Foucault](http://en.wikipedia.org/wiki/L%C3%A9on_Foucault)

## Hippolyte Fizeau (1819–1896)



Hippolyte Fizeau oli Pariisissa syntynyt ranskalainen fyysikko. Fizeau opiskeli lääketiedettä yhdessä ystävänsä ja pitkäaikaisen työtoverinsa Léon Foucaultin kanssa. Suuntauduttuaan fysiikkaan, he tekivät mm. huomattavia parannuksia valokuvaprosessiin. Fizeau seurasi Aragon kursseja ja opiskeli samalla matematiikkaa ja fysiikkaa perehtymällä veljensä École Polytechnique -yliopistossa tekemiin muistiinpanoihin.

François Aragon ehdotuksesta Foucault and Fizeau tekivät useita interferenssikokeita, ja kokeita valon etenemisestä.

Yksi näistä kokeista oli heidän vuonna 1851 tekemää koe, jossa todettiin virtaavan veden vaikutus valon nopeuteen. Koe vahvisti samalla Fresnelin ilmiölle kolmea vuosikymmentä aikaisemmin löytämän lausekkeen.

Tuntematta Dopplerin vuoden 1842 julkaisua, Fizeau ehdotti, että tähdistä saapuvan valon spektriviivojen punasiirtymä johtuu kohteen etääntymistä (1848), ja että etääntymisnopeuden mittausta voidaan tehdä spektriviivojen siirtymästä. Punasiirtymämäärin otti käyttöön amerikkalainen tähtitieteilijä Walter S. Adams vuonna 1908.

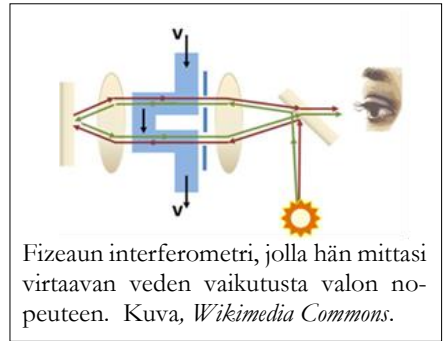
Vuonna 1864 Fizeau ehdotti, että sopivan valon aallonpituutta voitaisiin käyttää pituusstandardina.

<http://www-history.mcs.st-and.ac.uk/Biographies/Fizeau.html>

[http://en.wikipedia.org/wiki/Hippolyte\\_Fizeau](http://en.wikipedia.org/wiki/Hippolyte_Fizeau)

Hippolyte Fizeau, *Hypotheses on luminous ether and on an experiment that appears to demonstrate that the motion of bodies changes the velocity with which light propagates in their interior* (1859), [wikisource.org](http://www.wikisource.org)

Hippolyte Fizeau, *On the Effect of the Motion of a Body upon the Velocity with which it is traversed by Light* (1860), [wikisource.org](http://www.wikisource.org)



Fizeaun interferometri, jolla hän mittasi virtaavan veden vaikutusta valon nopeuteen. Kuva, *Wikimedia Commons*.

## George Stokes (1819–1903)



Sir George Stokes oli irlantilainen matemaatikko ja fyysikko, joka tunnetaan mm. *Stokesin laista*, joka määrittelee pyöreän kappaleen vastuksen nestevirrassa.

George Stokes toimi Cambridgen yliopiston matematiikan professorina vuodesta 1849 kuolemaansa asti vuoteen 1903. Stokes oli vanhin kollegojensa James Clerk Maxwellin ja Lord Kelvinin muodostamasta vahvasta kolmen luonnonfilosofin ryhmästä Cambridgen yliopistossa. Hän oli syvällisesti perehtynyt Lagrangen, Laplacen, Fourier'n, Poissonin ja Cauchyn matematiikkaan, millä oli tärkeä merkitys hänen kollegoilleen ja oppilailleen Cambridgen

yliopistossa.

Stokesin lain George Stokes löysi vuonna 1851 tutkiessaan heilureita viskooseissa nesteissä. Vuonna 1852 Stokes havaitsi fluoresenssi-ilmiön; hän havaitsi, että fluoresoivaan materiaaliin kohdistettu ultravioletti valo aiheutti sinisen valon valoemisiota. Ilmiön selityksen hän perusti elastiseen eetteriin, joka värähteli valaistujen molekyylien vaikutuksesta. Stokes oletti, että maapallo vetää mukanaan eetteriä, jossa valon nopeus suhteutuu maapalloon. Stokesin ajatukset paikallisesta eetteristä eivät osoittautuneet toimiviksi.

Stokes toimi Royal Societyn puheenjohtajana vuodesta 1885 vuoteen 1890, oltuaan sihteeristön jäsen vuodesta 1854.

<http://www-history.mcs.st-and.ac.uk/Biographies/Stokes.html>

[http://en.wikipedia.org/wiki/Sir\\_George\\_Stokes,\\_1st\\_Baronet](http://en.wikipedia.org/wiki/Sir_George_Stokes,_1st_Baronet)

George Stokes, *Science and Revelation* (1887), [wikisource.org](http://www.wikisource.org)

## Hermann von Helmholtz (1821–1894)



Hermann von Helmholtz oli saksalainen lääkäri, fyysikko ja filosofi, joka lihasten metabolismia koskevissa tutkimuksissaan tunnisti energian säilymisen periaatteen ensisijaiseksi luonnonlaiksi.

Helmholtzilla oli vahva luonnonfilosofinen ote tutkimuksiinsa. Kirjassaan *Dictionary of Scientific Biography* (Tieteen Elämäkertojen Sanakirja) Steven Turner luonnehti Helmholtzia ”Viimeisenä Leibnizin perinteen filosofina ja monialaisena tieteilijänä, joka omisti elämänsä luonnon yhdistävien periaatteiden etsimiseen”.

Isänsä painostuksesta luonnontietisiin suuntautunut Hermann haki stipendiä lääketieteen opintoihin Kuninkaallisessa Friedrich-Wilhelmin Lääketieteen ja Kirurgian Instituutissa. Hermann aloitti opintonsa vuonna 1838. Stipendi edellytti opintojen jälkeistä kymmenen vuoden sitoutumista lääkäriksi Preussin armeijassa. Lääketieteen opintojensa ohella hänellä oli kuitenkin tilaisuus osallistua kemian ja fysiologian opetukseen Berliinin yliopistossa. Lisäksi hän perehtyi omatoimisesti Laplacen, Biot’n ja Daniel Bernoullin töihin.

Hän valmistui Lääketieteen Instituutista vuonna 1843 ja sai sotilaslääkäriin viran Potsdamissa. Viranhoidonsa ohella hän teki tutkimustyötä selvittäen lihasten toimintaa fysiikan ja kemian periaatteista lähtien. Työnsä tulokset hän julkaisi vuonna 1847 ilmestyneessä monografissaan *Über die Erhaltung der Kraft* (Voiman säilymisestä), jossa hän tarkasteli laajasti energian säilymisen periaatteita.

*”Tämä laki on Voiman Säilymisen Laki, ilmaisu, jonka merkitystä minun pitää ensin selittää. Se ei ole absoluuttisen uusi; eri luonnonilmiöiden yhteydessä sen esittivät sekä Newton ja Daniel Bernoulli, ja Rumsford ja Humphry Dany ovat oivaltaneet määrättyjä ilmenemisiä sen olemassaolosta lämmön lainalaisuuksissa.*

*Mahdollisuuden, että se olisi universaalisti sovellettavissa, esitti ensimmäisenä Dr. Julius Robert Mayer, Schwabenilainen lääkäri (joka nykyisin asuu Heilbronnissa), vuonna 1842, jonka kanssa melkein samanaikaisesti, ja hänestä riippumatta, James Prescott Joule, Englantilainen tehtailija, teki sarjan tärkeitä ja vaikeita kokeita lämmön suhteesta mekaaniseen työhön, jotka tuottivat pääasialliset todisteet, joita uuden teorian vertaaminen käytäntöön vielä odotti.*

*Kysymyksessä oleva laki toteaa, että **voiman määrä, joka on käytettävissä koko universumissa on muuttumaton**, eikä sitä voida lisätä eikä vähentää. Ensimmäinen aiheeni on selittää mitä voiman määrällä tarkoitetaan; tai yleisluontoisemmin sen teknisiiin sovelluksiin viitaten, **työn määrä** sanan mekaanisessa merkityksessä.”*

Vuonna 1848 Helmholtz vapautettiin sitoumuksestaan sotilaslääkäriin virkaan ja nimitettiin fysiologian professoriksi Königsbergin yliopistossa. Helmholtz tutki laajalti aistien fysiologiaa. Hän kehitti silmän tähhystykseen soveltuvan instrumentin ja julkaisi kirjan *Handbuch der Physiologischen Optik* (Fysiologisen Optiikan KäsiKirja). Vuonna 1863 hän julkaisi kirjan ääniaistimusten fysiologisista perusteista musiikin teoriassa.

Vuodesta 1874 Helmholtz toimi Berliinin yliopistossa fysiikan professorina, oppilainaan ja työtovereinaan mm. Heinrich Hertz, Wilhelm Wien ja Max Planck.

Berliinissä Helmholtzin työ suuntautui suurelta osin sähködynamiikkaan, johon hän sovelsi energian säilymisen periaatteita. Hän mm. tulkitsi Weberin sähkömagnetismin lakien loukkaavan energian säilymistä, tulkinta, jonka Maxwell myöhemmin totesi virheelliseksi.

<http://www-history.mcs.st-and.ac.uk/Biographies/Helmholtz.html>

<http://www.science.uva.nl/~seop/entries/hermann-helmholtz/>

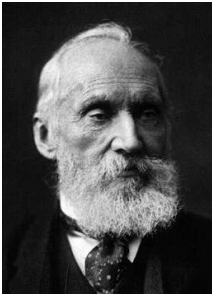
[http://en.wikipedia.org/wiki/Hermann\\_von\\_Helmholtz](http://en.wikipedia.org/wiki/Hermann_von_Helmholtz)

*On the Conservation of Force*, <http://www.bartleby.com/30/125.html>

Hermann von Helmholtz, *The Modern Development of Faraday's Conception of Electricity* (1881), [wikisource.org](http://www.wikisource.org)

Hermann von Helmholtz, e-kirjoja: [openlibrary.org](http://openlibrary.org)

## Rudolf Clausius (1822–1888)



Rudolf Clausius oli saksalainen fyysikko ja matemaatikko, joka oli keskeinen termodynamiikan muotoilija ja mm. entropiakäsitteen esittäjä.

Rudolf Clausius oli kotoisin Koszalinin kaupungista nykyisessä Puolassa, lähellä Itämeren rannikkoa. Clausius opiskeli matematiikkaa ja Berliinin yliopistossa, josta hän valmistui vuonna 1844. Vuonna 1847 hän suoritti tohtorin tutkinnon Hallen yliopistossa, aiheenaan ilmakehän optiset ilmiöt. Clausius sai fyysikan professuurin ”Royal Artillery and Engineering School” -yliopistossa Berliinissä ja dosentuurin Berliinin yliopistossa, jonka jälkeen hän hoiti professuureja Zurichissä, Würzburgissa, Münchenissä ja lopulta Bonnissa vuodesta 1869.

Vuonna 1850 julkaistussa artikkelissaan *Über die bewegende Kraft der Wärme (Lämmön liikettä synnyttävästä voimasta)* Clausius määritteli termodynamiikan keskeiset käsitteet. Clausiuksen työ täsmensi Sadi Carnot'n ja Benoît Clapeyronin teoriaa, ja määritteli termodynamiikan toisen pääsäännön. Täsmällisen muodon toinen pääsääntö sai vasta kun Clausius vuonna 1865 oivalsi entropian käsitteen, löysi sille täsmällisen matemaattisen ilmaisun ja nimesi käsitteen *entropiaksi*.

Clausius teki merkittävää työtä myös kineettisen kaasuteorian kehittämisessä. Hän erotti kaasun lämpösisällössä molekyylien suoraviivaisen liikkeen, pyörimisliikkeen ja värähtelyn. Clausius määritteli myös molekyylin vapaan matkan käsitteen. Clausius kokosi termodynamiikkaan liittyvät artikkelit vuonna 1867 ilmestyneeseen englanninkieliseen kirjaan *The Mechanical Theory of Heat – with its Applications to the Steam Engine and to Physical Properties of Bodies* (*Lämmön mekaaninen teoria – ja sen soveltaminen höyrykoneeseen ja aineen fyysikaalisiin ominaisuuksiin*).

[http://en.wikipedia.org/wiki/Rudolf\\_Clausius](http://en.wikipedia.org/wiki/Rudolf_Clausius)

<http://www-history.mcs.st-and.ac.uk/Biographies/Clausius.html>

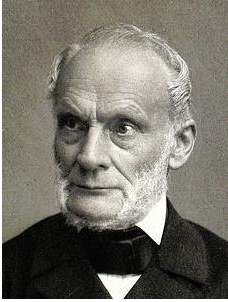
R. Clausius, *Die mechanische Wärmetheori* (1891), [openlibrary.org](http://openlibrary.org)

R. Clausius, *Die Potentialfunction und das Potential. Ein Beitrag zur Mathematischen Physik* (1885), [openlibrary.org](http://openlibrary.org)

*Mechanical Theory of Heat*, edited by T. Archer Hirst (1867), [openlibrary.org](http://openlibrary.org)



## William Thomson (1824–1907)



William Thomson, joka tunnetaan myös nimellä Lord Kelvin, oli englantilainen insinööri, matemaatikko ja fyysikko, joka tunnetaan parhaiten hänen mukaansa nimetyistä absoluuttisen lämpötilan asteikosta.

William Thomson sai alkeiskoulutuksen isältään, joka oli matematiikan ja tekniikan professori Belfastin Kuninkaallisessa Akateemisessa Instituutissa. 10-vuotiaana hän pääsi opiskelemaan Glasgow'n yliopistoon. William Thomson oli kiinnostunut fysiikan, kemian ja astronomian lisäksi klassisista aiheista, mistä oli osoituksena mm. hänen 12-vuotiaana tekemänsä englanninkielinen käännös kreikkalaisen Lucianus Samosatensiin latinankielisestä versiosta teoksesta *Dialogues of the Gods* (Jumalten Dialogi). 1830-luvun lopulla Thomson tutustui Fourier'n julkaisemaan Analyyttiseen lämmön teoriaan. Fourierin työ samoin kuin muiden ranskalaisten 1700-luvun matemaatikkojen työt tekivät häneen suuren vaikutuksen. Vuonna 1841 Thomson julkaisi Fourierin sarjoja käsittelevän kirjoituksen, jolla hän puolusti Fourierin työtä Edinburgin yliopiston matematiikan professorin tekemiä hyökkäyksiä vastaan. Seuraavana vuonna hän julkaisi työn *On the uniform motion of heat and its connection with the mathematical theory of electricity* (Lämmön tasaisesta liikkeestä ja sen yhteydestä sähkön matemaattiseen teoriaan).

Vuonna 1845 Thomsonille tarjoutui tilaisuus työskennellä Pariisissa Henri-Victor Regnault'n laboratoriossa. Ranskalaisen matemaatikon Joseph Liouvillen innostamana Thomson alkoi yhdistää Faradayn, Coulombin ja Poissonin ideoita sähkömagnetismin teoriaksi. Erityisesti tuolloin käytetyt käsitteet eetteri, sähköneste ja kauko-vaikutus olivat vaikeasti yhdistettävissä.

Vuonna 1846 William Thomson nimitettiin Glasgow'n yliopiston luonnonfilosofian professoriksi. Hän aloitti pitkäksi muodostuneen yhteistyönsä Stokesin kanssa tutkimalla hydrodynamiikkaa, jota Thomson sovelsi sähkömagnetismiin ja atomiteoriaan. William Thomsonin kiinnostus termodynamiikkaan heräsi hänen kuultuaan James Joulen työstä lämmön ja mekaanisen työn välisen yhteyden kvantitatiiviseen selvittämiseen. Ensi päätelmänään Thomson kyseenalaisti mekaanisen lämpöekvivalentin olemassaolon, yhteistyö James Joulen kanssa kuitenkin vähitellen muutti hänen käsityksensä. Hän näki, että Joulen työ kaipaasi teoreettisia perusteita. Osana ponnistelujaan lämmön ja työn teoreettisen yhteyden osoittamiseen, hän huomasi, että kaasulämpömittari tuottaa absoluuttisen lämpötila-asteikon. Asteikon nolllapiste kuvaa lämpötilaa, josta ei missään olosuhteissa voida siirtää lämpöä ympäristöön.

Thomsonin tärkein anti lienee välittynyt hänen pyrkimyksistään lämmön, hydrodynamiikan ja sähkömagnetismin teoreettisen kuvaamisen yhdistämisessä. Thomsonin työllä oli tärkeä merkitys James Clerk Maxwellille hänen kootessaan sähkömagnetismita käytetyistä käsitteistä ja tehdyistä havainnoista päätellyt vuorovaikutukset yhtenäiseksi teoriaksi.

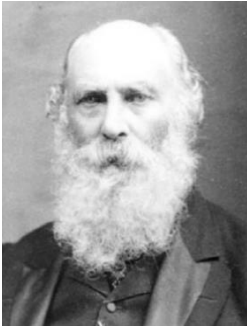
<http://www-history.mcs.st-andrews.ac.uk/Biographies/Thomson.html>

[http://en.wikipedia.org/wiki/Lord\\_Kelvin](http://en.wikipedia.org/wiki/Lord_Kelvin)

*Lord Kelvin, an account of his scientific life and work* by Andrew Grey (1908), [openlibrary.org](http://openlibrary.org)

William Thomson, *The available energy in nature* (1881), [wikisource.org](http://wikisource.org)  
 William Thomson, *The Sun's Heat* (1887), [wikisource.org](http://wikisource.org)  
 William Thomson, *Treatise on natural philosophy* (1871), [openlibrary.org](http://openlibrary.org)  
 William Thomson, e-kirjoja, [openlibrary.org](http://openlibrary.org)

## George Stoney (1826–1911)



George Stoney oli irlantilainen fyysikko, joka tunnetaan parhaiten *elektroni* nimityksen käyttöönnotosta vuonna 1891.

George Stoney oli kotoisin Oakley Parkista, keskeisestä Irlannista. Stoney aloitti tieteellisen uransa toimiessaan opiskeluaikanaan silloisen suurimman teleskoopin rakentaneen astronomi William Parsonsin apulaisena. Hän valmistui fysiikan ja matematiikan opinnoistaan Dublinin yliopistossa vuonna 1852, jonka jälkeen hän toimi viisi vuotta fysiikan professorina Dublinin Trinity Collegessa ja sen jälkeen lähinnä hallinnollisissa tehtävissä ja Royal Dublin Societyn

kunniasihteerinä ja varapuheenjohtajana. Hallinnollisten tehtäviensä ohella hän julkaisi huomattavan määrän tieteellisiä julkaisuja.

Vuonna 1874 Stoney arvioi alkeisvarauksen suuruuden jakamalla Faradayn varauksen Avogadron vakiolla, jolloin hän sai alkeisvarauksen arvoksi noin  $10^{-20}$  Coulombia (nykyarvo on  $1,6 \cdot 10^{-19}$  C). Vuonna 1891 hän antoi alkeisvarausta kantavalle hiukkaselle nimen elektroni. Stoneyn ajatukset elektronista alkeisvarausta kantavana hiukkasena loivat perustan J.J. Thomsonin työlle elektronin kokeelliselle tunnistamiselle.

George Stoney oli myös Planckin yksiköiden edelläkävijä. Vuonna 1881 hän löysi alkeisvarauksen  $e$ , dielektrisyysvaktion  $\epsilon_0$  ja gravitaatiovaktion  $G$  avulla ilmaistavan *Stoneyn massan*, mistä redusoitu Planckin massa  $m_{P(h)}$  ( $= m_p / \sqrt{2\pi}$ ) saadaan kertomalla  $m_s$  hienorakennevaktion  $a$  neliöjuurella

$$m_s = \sqrt{\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 G}} = \sqrt{a} \cdot m_{P(h)}$$

Vastaavasti Stoneyn pituus on

$$l_s = \sqrt{\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 G} \frac{G}{c^2}} = \frac{G}{c^2} m_s = r_G(m_s)$$

mikä on Stoneyn massaa vastaava kriittinen gravitaatiosäde (DU), mikä on puolet vastaavasta Schwarzschildin säteestä.

[http://en.wikipedia.org/wiki/George\\_Johnstone\\_Stoney](http://en.wikipedia.org/wiki/George_Johnstone_Stoney)  
<http://famousirishscientists.weebly.com/george-johnstone-stoney.html>  
*Stoney Units*, Philosophical Magazine, vol. 11, p. 381 (1881)  
 George Stoney, *The story of the November Meteors* (1879), [wikisource.org](http://wikisource.org)

## James Clerk Maxwell (1831–1879)



James Clerk Maxwell oli skotlantilainen fyysikko ja matemaatikko, joka tunnetaan ennen kaikkea Maxwellin yhtälöistä, joissa yhdistyy siihen mennessä lähinnä empiirisellä tutkimuksella saatu ymmärrys sähkömagnetismista.

James Maxwell syntyi Edinburghissa, Skotlannissa. Hänen äitinsä kuoli vuonna 1839. Kaksi vuotta myöhemmin James lähetettiin Edinburgh Academy -kouluun. Maxwell oli kiinnostunut geometriasta ja piirtämisestä. Kolmentoista ikäisenä hän voitti koulun matematiikkapalkinnon ja ensimmäisen palkinnon sekä englannin kielessä että runoudessa. Kuudentoista ikäisenä hän aloitti

Edinburghin yliopistossa, jossa hänen opettajinaan olivat mm. Sir William Hamilton, joka opetti logiikkaa ja metafysiikkaa, Philip Kelland matematiikkaa ja James Forbes luonnonfilosofiaa. Vapaa-aikanaan hän teki kemiallisia kokeita, ja rakenteli sähkö- ja magneettikojeita. Erityisesti hän kiinnostui polarisoidun valon ominaisuuksista.

Vuonna 1850, jo valmiina matemaatikkona, Maxwell jatkoi opintojaan Cambridgen yliopistossa, josta hän siirtyi Trinity Collegeen ja valmistui vuonna 1854. Maxwell jäi Trinity Collegeen vielä kahdeksi vuodeksi Fellowship apurahan turvin, mikä antoi hänelle vapauden keskittyä omiin tieteellisiin intresseihinsä.

Vuonna 1856, 25-vuotias Maxwell sai matematiikan professuurin Aberdeenin yliopistossa, jossa työskennellessään hän ratkaisi Saturnuksen renkaiden stabiilisuuden postuloimalla, että renkaat muodostuvat irrallisista kappaleista. Maxwellin päätelmä voitiin todeta oikeaksi Voyager-luotaimen valokuvista 1980-luvulla.

Maxwellin tutkielma On Faraday's lines of force (Faradayn voimaviivoista) esitettiin Cambridge Philosophical Society -seuran kokouksissa kahdessa osassa, vuosina 1855 ja 1856. Maxwell osoitti, että sähkö- ja magneettikenttä sekä niiden vuorovaikutukset voidaan ilmaista muutamalla yksinkertaisella yhtälöllä. Hän viittaa useamman kerran Weberin töihin, ja toteaa mm. että "...hypoteettisessa väliaineessamme etenevien poikittaisten aaltojen nopeus, laskettuna MM. Kohlrauschin ja Weberin sähkömagneettisista kokeista on niin tarkoin sama kuin M. Fizeaun optisista kokeista laskettu valon nopeus, ettemme voi välttyä päätelmästä, että valo muodostuu saman väliaineen poikittaisesta aaltoliikkeestä kuin mistä johtuvat sähkömagneettiset ilmiöt".

Hänen vuonna 1865 ilmestyneessä teoksessaan A Dynamical Theory of the Electromagnetic field (Dynaaminen Teoria Sähkömagneettisesta Kentästä) esitetyt yhtälöt määrittävät sähköstaattisen ja sähkömagneettisen kentän ominaisuudet ja niiden keskinäiset vuorovaikutukset.

Maxwell julkaisi kuuluisat "Maxwellin yhtälönsä" vuonna 1874 ilmestyneessä kirjassa A treatise on electricity and magnetism. Nykyiseen muotoonsa Maxwellin yhtälöt kirjoitti Oliver Heaviside. Heavisiden divergenssi- ja roottorioperaattoreita käyttäen Maxwellin 15 yhtälöä voitiin ilmaista neljällä vektori yhtälöllä <sup>1</sup>.

<http://www-history.mcs.st-and.ac.uk/Biographies/Maxwell.html>

[http://en.wikipedia.org/wiki/James\\_Clerk\\_Maxwell](http://en.wikipedia.org/wiki/James_Clerk_Maxwell)

Linkkejä artikkeleihin: [http://en.wikisource.org/wiki/Author:James\\_Clerk\\_Maxwell](http://en.wikisource.org/wiki/Author:James_Clerk_Maxwell)

- J C Maxwell, *On Faraday's Lines of Force* (1856), <http://www.scribd.com/doc/39568221/Maxwell-On-Faraday-s-Lines-of-Force>
- J C Maxwell, *On the Stability of the motion of Saturn's rings* (1859), [openlibrary.org](http://openlibrary.org)
- J C Maxwell, *On physical lines of force* (1861), [wikisource.org](http://wikisource.org)
- J C Maxwell, *A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field* (1864), [wikisource.org](http://wikisource.org)
- J C Maxwell, *Theory of Heat* (1871), [openlibrary.org](http://openlibrary.org)
- J C Maxwell, *A treatise on electricity and magnetism* (1873), [openlibrary.org](http://openlibrary.org) ja [wikisource.org](http://wikisource.org)
- J C Maxwell, *A treatise on electricity and magnetism*, Volume I (1873)  
[http://posner.library.cmu.edu/Posner/books/book.cgi?call=537\\_M46T\\_1873\\_VOL\\_1](http://posner.library.cmu.edu/Posner/books/book.cgi?call=537_M46T_1873_VOL_1)
- J C Maxwell, *A treatise on electricity and magnetism*, Volume II (1873)  
[http://posner.library.cmu.edu/Posner/books/book.cgi?call=537\\_M46T\\_1873\\_VOL\\_2](http://posner.library.cmu.edu/Posner/books/book.cgi?call=537_M46T_1873_VOL_2)
- J C Maxwell, *The Theory of Molecules* (1874), [wikisource.org](http://wikisource.org)
- J C Maxwell, *Matter and Motion* (1876), [openlibrary.org](http://openlibrary.org)
- J C Maxwell, *On a Possible Mode of Detecting a Motion of the Solar System through the Luminiferous Ether* (1880), [wikisource.org](http://wikisource.org)
- J C Maxwell, *An elementary treatise on electricity* (1881), [openlibrary.org](http://openlibrary.org)
- The Scientific Papers of James Clerk Maxwell* by W.D. Niven (1890), [openlibrary.org](http://openlibrary.org)
- J C Maxwell, *On Faraday's lines of force* edited by WD Niven, *The scientific papers of James Clerk Maxwell* (New York, Dover, 1965) vol. 1, p. 155–229. Article originally published in 1855.
- <sup>1</sup> André Waser (2000), *On the Notation of Maxwell's Field Equations* [http://www.zpenergy.com/downloads/Orig\\_maxwell\\_equations.pdf](http://www.zpenergy.com/downloads/Orig_maxwell_equations.pdf)

## Ernst Mach (1838–1916)



Itävaltalainen fyysikko ja filosofi Ernst Mach tunnetaan monipuolisesta tieteellisestä työstään, Machin periaatteesta, joka kytkee inertian avaruuden kokonaisuuteen, sekä tieteen filosofiaan ja tieteen historiaan liittyvistä kirjoituksistaan.

Ernst Mach syntyi Brno-Chrlicessä, Määrin maakunnassa (tuolloin Itävallassa, nykyisin Tšekin tasavallassa). Mach aloitti opintonsa Wienin yliopistossa vuonna 1855 opiskellen fysiikkaa, josta hän suoritti tohtorin tutkinnon vuonna 1860.

Machin ensimmäisiä tutkimuskohteita olivat optiikka ja akustiikka. Vuonna 1864 hän sai matematiikan professuurin Grazin yliopistossa ja kahta vuotta myöhemmin fysiikan professuurin ja edelleen vuoden kuluttua kokeellisen fysiikan professuurin Kaarlen yliopistossa Prahassa, jossa hän jatkoi lähes 30 vuoden ajan ennen paluutaan Wieneriin.

Newtonin mekaniikkaa arvostellessaan positivisti hän valmisteli asenneilmapiiriä Einsteinin suhteellisuusteorialle. Machin esittämiin tieteen filosofian periaatteisiin kuului, että ilmiöt on ilmaistava mahdollisimman yksinkertaisesti ja tietoisena siitä, että kuvaukset ilmiöistä eivät ole täydellisiä.

Mach määritteli ideaalisen tieteellisen teorian ominaisuudet:

- 1) Sen tulee perustua pelkästään havaittaviin ilmiöihin
- 2) Sen tulee välttää absoluuttista aikaa ja paikkaa ja suosia suhteellista liikettä
- 3) Ilmiöt, jotka näyttävät kytkeytyvän absoluuttiseen aikaan ja avaruuteen, kuten inertia ja keskeisvoima, tulee nähdä seurauksina aineen laaja-alaisesta jakautumisesta avaruuteen.

Ernst Mach oli viimeisiä atomismin vastustajia. Hän kävi pitkään väittelyjä Boltzmannin atomeihin perustuvasta kineettisestä kaasuteoriasta.

Mach tutki myös äänen nopeutta ja äänen nopeuden ylittämiseen liittyviä ilmiötä. Machin luku ilmoittaa nopeuden suhteessa äänen nopeuteen.

[http://en.wikipedia.org/wiki/Ernst\\_Mach](http://en.wikipedia.org/wiki/Ernst_Mach)

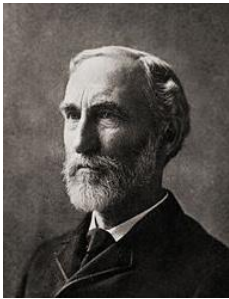
Ernst Mach, *History and root of the principle of the conservation of energy*, englanninkielinen käännös: Philip E.B. Jourdain (1911), [openlibrary.org](http://openlibrary.org)

Ernst Mach, *The Analysis of Sensations, and the relation of the physical to the psychological* (1914), [openlibrary.org](http://openlibrary.org)

Ernst Mach, *The Science of Mechanics, a critical and historical account of its development*, englanninkielinen käännös: Philip E.B. Jourdain (1915), [openlibrary.org](http://openlibrary.org)

Ernst Mach, e-kirjoja: [openlibrary.org](http://openlibrary.org)

## Josiah Willard Gibbs (1839–1903)



Josiah Gibbs oli amerikkalainen fyysikko, kemisti ja matemaatikko, joka tunnetaan urauurtavasta työstään termodynamiikassa ja fysikaalisessa kemiassa sekä vektorianalyysin kehittämisessä.

Josiah Gibbs kuului pitkään Amerikassa vaikuttaneeseen akateemiseen pappisukuun Bostonin seudulla. Valmistuttuaan USA:n ensimmäisenä tekniikan tohtorina (*Ph.D, engineering*) Sheffieldin yliopistosta, Gibbs matkusti Euroopassa tavaten johtavia termodynamiikan ja teoreettisen fysiikan kehittäjiä mm. Herman von Helmholtzin vuosina 1866–69.

Euroopasta palattuaan hänet nimitettiin Yalen yliopiston matemaattisen fysiikan professoriksi. 1870-luvun lopulla hän julkaisi 300-sivuisen monografian *On the Equilibrium of Heterogeneous Substances (Heterogeenisten aineiden tasapainosta)*, josta muodostui fysikaalisen kemian perusteos. Gibbsin käyttöön ottamia käsitteitä ovat mm. *kemiallinen potentiaali, vapaa energia* ja hänen mukaansa nimetty *Gibbsin faasisääntö*.

<http://www-history.mcs.st-and.ac.uk/Biographies/Gibbs.html>

[http://en.wikipedia.org/wiki/Josiah\\_Gibbs](http://en.wikipedia.org/wiki/Josiah_Gibbs)

The Scientific Papers of J. Willard Gibbs (1906), [openlibrary.org](http://openlibrary.org)

Willard Gibbs, *Elementary Principles in Statistical Mechanics* (1902), [openlibrary.org](http://openlibrary.org)

## Ludwig Boltzmann (1844-1906)



Ludwig Boltzmann oli itävaltalainen fyysikko, joka tunnetaan erityisesti töistään tilastollisen mekaniikan ja tilastollisen termodynamiikan kehittämisessä.

Boltzmann oli kotoisin Wienistä. Hän opiskeli fysiikkaa Wienin yliopistossa. Hänen Joseph Stefanin johdolla tekemänsä väitöskirja kineettisestä kaasuteoriasta valmistui vuonna 1866. Boltzmann toimi matemaattisen fysiikan ja kokeellisen fysiikan professorina Grazissa vuosina 1869–73 ja 1876–90

ollen välillä matematiikan professorina Wienin yliopistossa. Vuodesta 1890 hän toimi teoreettisen fysiikan professorina Münchenin yliopistossa kunnes palasi Wieniin vuonna 1902.

Tärkeimmät työnsä tilastollisen mekaniikan ja termodynamiikan kehityksessä hän teki toimiessaan Grazin yliopistossa; Maxwell-Boltzmann jakautuman vuonna 1871 ja Josef Stefanin kokeellisen säteilylain termodynaamisen johdon vuonna 1879. Työuransa loppuosan hän käytti kehittämiensä teorioiden puolustamiseen ja piti suuren suosion saaneita tieteen filosofian luentoja Wienin yliopistossa.

Boltzmannin tilastollista, todennäköisyyksiin perustuvaa teoriaa kohtaan esitetty voimakas kritiikki vaikutti häneen siinä määrin, että hän päätyi masennuskohtaukseen itsemurhaan vuonna 1906.

<http://www-history.mcs.st-and.ac.uk/Biographies/Boltzmann.html>

[http://en.wikipedia.org/wiki/Ludwig\\_Boltzmann](http://en.wikipedia.org/wiki/Ludwig_Boltzmann)

Ludvig Boltzmann, *Vorlesungen über Maxwells Theorie der Electricität und des Lichtes* (1891), [openlibrary.org](http://openlibrary.org)

Ludvig Boltzmann, *Vorlesungen über Gastheorie* (1896), [openlibrary.org](http://openlibrary.org)

## Woldemar Voigt (1850–1919)



Woldemar Voigt oli saksalainen fyysikko, joka kehitti koordinaatistomuunnoksia toisiinsa nähden liikkuvien havaintokehysten välille.

Woldemar Voigt oli kotoisin Leipzigistä. Hän toimi opettajana Georg August -yliopistossa Göttingenissä.

Muunnoksellaan Voigt tavoitteli samaa Larmor ja Lorentz; sovitaa vakio valon nopeus toisiinsa nähden liikkuviin havaintokehyksiin. Voigtin muunnos säilyttää valon nopeuden. Voigtin muunnos muuntuu Lorentzin muunnokseksi, kun muunnoslausekkeet kerrotaan tekijällä  $\sqrt{1 - (v/c)^2}$

[http://en.wikipedia.org/wiki/Woldemar\\_Voigt](http://en.wikipedia.org/wiki/Woldemar_Voigt)

W. Voigt, *On the Principle of Doppler* (1887), [https://en.wikisource.org/wiki/Translation:On the Principle of Doppler](https://en.wikisource.org/wiki/Translation:On_the_Principle_of_Doppler)

W. Voigt, *Kompendium der theoretischen Physik* (1896), [openlibrary.org](http://openlibrary.org)

W. Voigt, *Die fundamentalen physikalischen Eigenschaften der Krystalle in elementarer Darstellung* (1898), [openlibrary.org](http://openlibrary.org)

W. Voigt, *Magneto- und elektrooptik* (1898), [openlibrary.org](http://openlibrary.org)

W. Voigt, *Thermodynamik* (1904), <https://ia802705.us.archive.org/34/items/thermodynamik00voiggoog/thermodynamik00voiggoog.pdf>

## Oliver Heaviside (1850–1925)



Oliver Heaviside oli englantilainen itseoppinut sähköinsinööri, matemaatikko ja fyysikko, joka keksi matemaattisia tekniikoita differentiaaliyhtälöiden ratkaisuun ja otti käyttöön kompleksifunktiot.

Vektorilaskentaa kehittäessään Heaviside otti käyttöön *roottori* ja *divergenssi* operaattorit, joiden avulla mm. Maxwellin yhtälöt voidaan esittää kompaktissa muodossa. Hän otti myös käyttöön useita sähkötekniikkaan pysyvästi jääneitä käsitteitä, kuten *admittanssi*, *konduktanssi*, *impedanssi*, *induktanssi*, *permeabiliteetti*, *permittanssi*.

Vuonna 1884 hän muotoili Maxwellin yhtälöt niiden nykyiseen muotoon, jolloin kaksitoista alun perin kahdestakymmenestä yhtälöstä voitiin kirjoittaa neljän differentiaaliyhtälön muotoon. Nämä neljä yhtälöä kuvaavat staattisten ja liikkuvien varausten ja magneettisten dipolien ominaisuudet sekä näiden keskinäiset vuorovaikutukset.

1880-luvun lopussa ja 1890-luvun alussa Heaviside kehitteli sähkömagneettisen massan käsitettä.

Vuonna 1891 British Royal Society myönsi Heavisidelle Fellow jäsenyyden. Vuonna 1905 hänet nimettiin Göttingenin yliopiston kunniatohtoriksi.

<http://www-history.mcs.st-and.ac.uk/Biographies/Heaviside.html>

[http://en.wikipedia.org/wiki/Oliver\\_Heaviside](http://en.wikipedia.org/wiki/Oliver_Heaviside)

Oliver Heaviside, *Electromagnetic waves, the propagation of potential, and the electromagnetic effects of a moving charge* (1888),

[wikisource.org](http://wikisource.org)

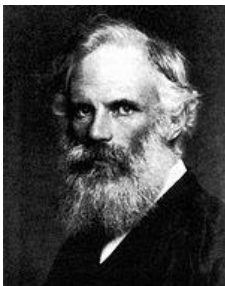
Oliver Heaviside, *On the Electromagnetic Effects due to the Motion of Electrification through a Dielectric* (1889),

[wikisource.org](http://wikisource.org)

*Electromagnetic theory* by Oliver Heaviside (1893), [openlibrary.org](http://openlibrary.org)

*Electromagnetic waves* by Oliver Heaviside (1893), [openlibrary.org](http://openlibrary.org)

## George FitzGerald (1851–1901)



George FitzGerald oli Dublinista kotoisin oleva irlantilainen fyysikko, joka toimi luonnonfilosofian (fysiikan) professorina Dublinin Trinity Collegessa 1800-luvun lopulla.

George FitzGerald oli yksi aktiivisimmista Maxwellin yhtälöitä tutkineista fyysikoista. Vuonna 1883 George FitzGerald esitti laitekonstruktion, jolla voitaisiin synnyttää nopeasti muuttuvia sähkövirtoja sähkömagneettisten aaltojen aikaansaamiseksi.

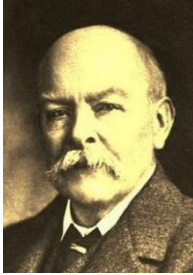
Hän oli myös ensimmäinen tutkija, joka Oliver Heavisiden kannustuksella ehdotti pituuskontraktiota Michelson–Morleyn kokeen nollatuloksen selittämiseen vuonna 1889.

<http://www-history.mcs.st-and.ac.uk/Biographies/FitzGerald.html>

[http://en.wikipedia.org/wiki/George\\_FitzGerald](http://en.wikipedia.org/wiki/George_FitzGerald)

George FitzGerald, *The Ether and the Earth's Atmosphere* (1889), [wikisource.org](http://www.wikisource.org)

## John Henry Poynting (1852–1914)



John Henry Poynting oli englantilainen fyysikko, joka tunnetaan parhaiten hänen mukaansa nimitystä *Poyntingin vektorista*, joka kuvaa sähkömagneettisen säteilyn energiavuota.

Henry Poynting sai alkeiskoulutuksensa isänsä johtamassa koulussa. Hän jatkoi opiskeluaan Owen's Collegessa, nykyisessä Manchesterin yliopistossa sekä Cambridgen yliopistossa. 1870-luvun lopulla hän työskenteli Cavendish Laboratoriossa James Clerk Maxwellin apulaisena.

Poynting nimitettiin fysiikan professoriksi Mason Science Collegeen, nykyiseen Birminghamin yliopistoon vuonna 1880, missä virassa hän oli kuolemaansa saakka.

Poyntingin vektorin ja Poyntingin teoreeman hän esitti vuonna 1884. Vuonna 1893 hän suoritti mittauksia Newtonin gravitaatiovakion määrittämiseksi. John Henry Poynting kirjoitti suosituiksi tulleita oppikirjoja fysiikan eri osa-alueilta.

[http://en.wikipedia.org/wiki/John\\_Henry\\_Poynting](http://en.wikipedia.org/wiki/John_Henry_Poynting)

J.H. Poynting, *On the Transfer of Energy in the Electromagnetic Field*, 1884, [wikisource.org](http://www.wikisource.org)

J.H. Poynting and J.J. Thomson, *Heat* (1909), [openlibrary.org](http://www.openlibrary.org)

J.H. Poynting and J.J. Thomson, *Electricity and Magnetism*, [openlibrary.org](http://www.openlibrary.org)

## Albert Abraham Michelson (1852–1931)



Albert Michelson oli amerikkalainen fyysikko, joka tunnetaan parhaiten kokeistaan valon nopeuden määrittämiseksi ja valon nopeuden riippuvuudesta mittausympäristön liikkeestä.

Albert Michelson syntyi juutalaiseen perheeseen Strzelnessa, nykyisessä Puolassa. Albertin ollessa kahden vuoden ikäinen perhe muutti Amerikkaan, missä hänen isänsä toimi kauppiana Murphy's Campin ja Virginia Cityn kaivoskaupungeissa Kaliforniassa ja Nevadassa. Albert kävi koulua San Franciscossa, missä hän asui tätinsä Henriette Levyn luona.

Vuonna 1869 hän sai stipendin U.S. Naval Academyyn, missä hän opiskeli optiikkaa, lämpöoppia, ilmastotiedettä ja piirustusta.

Valmistumisensa jälkeen hän oli kaksi vuotta merillä, ja palasi vuonna 1875 Naval Academyyn fysiikan ja kemian opettajaksi. Hän teki ensimmäiset valon nopeuteen liittyvät kokeensa vuosina 1877–1879, jolloin hän sai valon nopeudeksi ilmassa  $299,864 \pm 51$  km/s, josta hän arvioi valon nopeudeksi tyhjiössä  $299,940$  km/s.

Vuonna 1879 hän siirtyi laivaston observatorioon, ajanmäärittäyksestä vastaavan astronomian, Simon Newcombin apulaiseksi. Seuraavana vuonna hän sai virkavapaata



jatkaakseen opintojaan Euroopassa, missä hän vieraili mm. Berliinin, Heidelbergin yliopistoissa ja École Polytechniquessa.

Vuonna 1883 Albert Michelson nimitettiin fysiikan professoriksi Clevelandissa, Ohiossa, missä hän keskittyi interferometrin suunnitteluun. Kuuluisan Michelson–Morley kokeensa Edward Morleyn kanssa hän suoritti vuonna 1887.

Vuonna 1889 Albert Michelson nimitettiin Clarkin yliopistoon Worcesterissa ja vuonna 1892 fysiikan professoriksi ja fysiikan laitoksen johtajaksi Chicagon yliopistoon. Vuonna 1907 Albert Michelson sai ensimmäisenä amerikkalaisena fysiikan Nobelin palkinnon.

M–M kokeen nollatuloksella oli tärkeä merkitys Albert Einsteinin postulaatille valon nopeuden vakioisuudesta kaikissa suppean suhteellisuusteorian tarkoittamissa tasaisessa liikkeessä olevissa havaintokehyksissä.

[http://en.wikipedia.org/wiki/Albert\\_Michelson](http://en.wikipedia.org/wiki/Albert_Michelson)

Experimental Determination of the Velocity of Light (1878), <https://www.gutenberg.org/files/11753/11753-h/11753-h.htm>

A.A. Michelson, The Relative Motion of the Earth and the Luminiferous Ether (1881), [wikisource.org](http://www.wikisource.org)

Albert A. Michelson and Edward W. Morley, *Influence of Motion of the Medium on the Velocity of Light*,

American Journal of Science, 1886, Ser. 3, Vol. 31, Nr. 185: 377-386, [openlibrary.org](http://www.openlibrary.org), [wikisource.org](http://www.wikisource.org)

A.A. Michelson, E. Morley, *On the Relative Motion of the Earth and the Luminiferous Ether* (1887), [wikisource.org](http://www.wikisource.org)

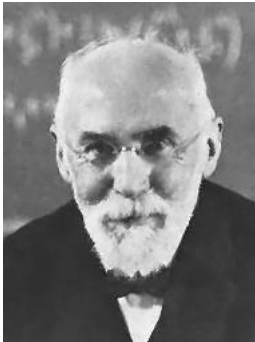
A.A. Michelson, *The relative Motion of the Earth and the Ether* (1897), [wikisource.org](http://www.wikisource.org)

A.A. Michelson, *Light waves and their uses* (1903), [openlibrary.org](http://www.openlibrary.org)

A.A. Michelson, *Relative Motion of Earth and Aether* (1904), [wikisource.org](http://www.wikisource.org)

A.A. Michelson, *Effect of Reflection from a Moving Mirror on the Velocity of Light* (1913), [wikisource.org](http://www.wikisource.org)

## Hendrik Lorentz (1853–1928)



Hendrik Lorentz oli hollantilainen fyysikko, joka tunnetaan parhaiten Einsteinin suppean suhteellisuusteorian perustana olevasta Lorentz-muunnoksesta.

Hendrik Lorentz on kotoisin Arnhemista, Hollannista. Lorentz opiskeli matematiikkaa ja fysiikkaa Leidenin yliopistossa, jossa hän suoritti tohtorin tutkinnon vuonna 1875. Lorentzin väitöskirjan aihe oli *Over de theorie der terugkaatsing en breking van het licht* (Valon heijastumisen ja taittumisen teoriasta), missä hän tarkasteli James Clerk Maxwellin teoriaa.

Henrik Lorentz nimitettiin Leidenin yliopiston teoreettisen fysiikan professoriksi vuonna 1878. Hän hoiti virkaa eläkkeelle siirtymiseensä asti vuoteen 1912, mutta jatkoi senkin jälkeen luennointia yliopistossa.

Lorentzin tieteellinen työ käynnistyi Maxwellin yhtälöiden edelleen kehittelyllä ja kattoi vähitellen laajan alueen fysiikan keskeisistä kysymyksistä mekaniikassa, termodynaamikassa, hydrodynamiikassa, kiinteän olomuodon teoriassa, sähkömagnetismissä

ja elektronien teoriassa. Lorentz-voiman, joka yhdistää Coulombin voiman ja sähkömagneettisen voiman, Hendrik Lorentz julkaisi vuonna 1892.

Lorentzin tärkeimmäksi työksi muodostui hänen kirjassaan *De relatieve beweging van de aarde en den aether* (Maan ja Eetterin suhteellinen liike) esittämä Lorentz-muunnos, joka Einsteinin suhteellisuusteoriassa sai käytännössä luonnonlain aseman.

Aberraation selittämiseksi Fresnel oli olettanut, että eetteri ei kiinnittynyt maan liikkeeseen. Stokes sen sijaan esitti teorian, jonka mukaan maa vetää eetteriä mukanaan, jolloin maan nopeus eetteriin nähden on aina nolla. Lorentz oli valmis hylkäämään Stokesin teorian, sillä hän katsoi, että jokseenkin kaikki havainnot voidaan selittää Fresnelin teorialla, kunhan eetterin vetokerroin selvitetään. Michelson-Morley koe näytti kuitenkin edellyttävän, että materia kutistuu liikkeen suunnassa. Lorentz pohti, mikä määrää kiinteän kappaleen koon ja muodon, ja päätteli, että ilmeisesti kyseessä olivat molekylaariset voimat; mikä tahansa mikä vaikuttaa molekylaarisiin voimiin voi vaikuttaa kappaleen muotoon. Michelson-Morleyn kokeen edellyttämä supistuminen liikkeen suunnassa vastaisi sitä, että maapallo kutistuisi rataliikkeensä suunnassa kuusi senttimetriä, mitä ei millään pystyttäisi havaitsemaan.

Lorentz nimitti Lorentz-muunnettua aikaa paikalliseksi ajaksi. Vuonna 1900, Henri Poincaré ylisti Lorentzin paikallista aikaa "loistavaksi keksinnöksi" ja perusteli asiaa kellojen synkronoinnilla liikkuvassa havaintokehyksessä edestakaisen valosignaalin avulla. Aika-avaruus tulkintansa yhteydessä vuonna 1907, Herman Minkowski otti Lorentzin *paikallisesta ajasta (local time)* käyttöön nimityksen *proper time*, joka jäi käyttöön suhteellisuusteorian viitekehyksessä.

<http://www-history.mcs.st-and.ac.uk/Biographies/Lorentz.html>

[http://en.wikipedia.org/wiki/Hendrik\\_Lorentz](http://en.wikipedia.org/wiki/Hendrik_Lorentz)

H.A. Lorentz, *The Relative Motion of the Earth and the Aether* (1892) [https://en.wikisource.org/wiki/Translation:The Relative Motion of the Earth and the Aether](https://en.wikisource.org/wiki/Translation:The_Relative_Motion_of_the_Earth_and_the_Aether)

H.A. Lorentz, *Attempt of a Theory of Electrical and Optical Phenomena in Moving Bodies* (1895)

[https://en.wikisource.org/wiki/Translation:Attempt of a Theory of Electrical and Optical Phenomena in Moving Bodies](https://en.wikisource.org/wiki/Translation:Attempt_of_a_Theory_of_Electrical_and_Optical_Phenomena_in_Moving_Bodies)

H.A. Lorentz, *Simplified Theory of Electrical and Optical Phenomena in Moving Systems* (1899) [wikisource.org](https://en.wikisource.org/wiki/Translation:Simplified_Theory_of_Electrical_and_Optical_Phenomena_in_Moving_Systems)

H.A. Lorentz, *Considerations on Gravitation* (1900) [wikisource.org](https://en.wikisource.org/wiki/Translation:Considerations_on_Gravitation)

H.A. Lorentz, *On the Apparent Mass of the Ions* (1900) [https://en.wikisource.org/wiki/Translation:On the Apparent Mass of the Ions](https://en.wikisource.org/wiki/Translation:On_the_Apparent_Mass_of_the_Ions)

H.A. Lorentz, *The theory of electrons and the propagation of light* (Nobel Lecture, 1902) [wikisource.org](https://en.wikisource.org/wiki/Translation:The_theory_of_electrons_and_the_propagation_of_light)

H.A. Lorentz, *Electromagnetic phenomena in a system moving with any velocity smaller than that of light* (1904) [wikisource.org](https://en.wikisource.org/wiki/Translation:Electromagnetic_phenomena_in_a_system_moving_with_any_velocity_smaller_than_that_of_light)

H.A. Lorentz, *The Principle of Relativity and its Application to some Special Physical Phenomena* (1910) [wikisource.org](https://en.wikisource.org/wiki/Translation:The_Principle_of_Relativity_and_its_Application_to_some_Special_Physical_Phenomena)

H.A. Lorentz, *Two Papers of Henri Poincaré on Mathematical Physics* (1914/21) [https://en.wikisource.org/wiki/Translation:Two Papers of Henri Poincaré on Mathematical Physics](https://en.wikisource.org/wiki/Translation:Two_Papers_of_Henri_Poincar%C3%A9_on_Mathematical_Physics)

H.A. Lorentz, *The Einstein Theory of Relativity* (1919/20), [wikisource.org](https://en.wikisource.org/wiki/Translation:The_Einstein_Theory_of_Relativity)

H.A. Lorentz, *The Michelson-Morley Experiment and the Dimensions of Moving Bodies* (1921), [wikisource.org](https://en.wikisource.org/wiki/Translation:The_Michelson-Morley_Experiment_and_the_Dimensions_of_Moving_Bodies)

## Henri Poincaré (1854–1912)



Henri Poincaré oli ranskalainen matemaatikko, fyysikko, insinööri ja filosofi – viimeinen ”monitieteilijä ja universalisti”.

Poincaré syntyi Nancyn alueella Koillis-Ranskassa. Hän aloitti koulunkäyntinsä Nancyn lyseossa vuonna 1862. Henri osoittautui yhdeksi parhaista jokseenkin kaikessa, ollen ”peto matematiikassa”. Poincaré aloitti École Polytechnique -yliopistossa vuonna 1873 ja valmistui vuonna 1876. Hän jatkoi insinööriopinnoilla École Mines -yliopistossa ja valmisteli samalla matematiikkaan liittyvää väitöskirjaansa, joka hyväksyttiin Pariisin yliopistossa vuonna 1879. Vuodesta 1881 lähtien, hän opetti Pariisin yliopistossa. Yliopistotyönsä ohella, vuodesta 1893, Poincaré toimi French Bureau des Longitudes -virastossa, jossa hän osallistui mm. maailmanajan synkronointiin.

Poincaré esitti suhteellisuusteorian perustana olevan suhteellisuusperiaatteen, Lorentz-muunnoksen nykyisen muodon ja johti siihen liittyvän nopeuksien yhteenlaskukaavan <sup>1,2</sup>. Suhteellisuusperiaatteen muotoilun taustalla lienee ollut Poincarén vahva tarve löytää loogisesti hyväksyttävä peruste koordinaatistomuunnoksille. Hän oivalsi myös, että valon nopeuden vakioisuus on hyväksyttävä postulaatiksi, jotta teoriat saadaan yksinkertaiseen muotoon. Näillä varauksilla Poincaré piti Lorentzin työtä ja erityisesti ”paikallisen ajan” käsitettä suurenmoisena oivalluksena. Poincaré vahvisti Lorentzin päätelmät Maxwellin yhtälöiden täydellisestä invarianssista Lorentz-muunnoksen suhteen.

Poincaré perusteli sähkömagneettisen säteilyn energian säilymistä koordinaatistosta toiseen siirryttäessä mahdolliseen ettertiin absorboidun sähkömagneettisen massan (ja energian) avulla; tosin hän luokitteli etteriolettamuksen lähinnä ”matemaattiseksi fiktioksi”. Eetterihypoteesi jätti liikemäärän säilymisen kuitenkin ratkaisematta. Poincaré julkaisi suhteellisuusteoriaansa *On the Dynamics of the Electron* vuonna 1905, kolme kuukautta ennen Einsteinin suppean suhteellisuusteorian julkaisua.

Poincaré totesi, että olemme siinä määrin tottuneet ajatukseen euklidisesta avaruudesta, että muutamme mieluummin fysiikan lakeja kuin siirrymme epäeuklidiseen geometriaan. Poincarén työtavoista heijastui vahva filosofinen näkemys ja intuitiivinen ote ongelmien ratkaisuun, ”*logiikalla todistetaan, intuitiolla keksitään*”.

<http://www-history.mcs.st-and.ac.uk/Biographies/Poincare.html>

[http://en.wikipedia.org/wiki/Henri\\_Poincar%C3%A9](http://en.wikipedia.org/wiki/Henri_Poincar%C3%A9)

Henri Poincaré, *The Measure of Time* (1898) [wikisource.org](http://www.wikisource.org)

<sup>1</sup> H. Poincaré, *The Theory of Lorentz and the Principle of Reaction* (1900) <http://www.physicsinsights.org/poincare-1900.pdf>

Henri Poincaré, *Science and Hypothesis* (1902) [wikisource.org](http://www.wikisource.org)

<sup>2</sup> Henri Poincaré, *The Principles of Mathematical Physics* (1904) [wikisource.org](http://www.wikisource.org)

Henri Poincaré, *On the Dynamics of the Electron* (June) (1905), [wikisource.org](http://www.wikisource.org)

Henri Poincaré, *On the Dynamics of the Electron* (July) (1905/6), [wikisource.org](http://www.wikisource.org)

Henri Poincaré, *The End of Matter* (1906) [wikisource.org](http://www.wikisource.org)

Henri Poincaré, *The New Mechanics* (1908) [wikisource.org](http://www.wikisource.org)

Henri Poincaré, *The New Mechanics* (1909) [wikisource.org](http://www.wikisource.org)

Henri Poincaré, *The Value of Science: Science and Reality*, Popular Science Monthly Vol. 71, July 1907, [wikisource.org](http://wikisource.org)  
 Henri Poincaré, *Science and Hypothesis*, englanninkielinen käännös W.J.G. (1905), [openlibrary.org](http://openlibrary.org)  
 Henri Poincaré, e-kirjoja, [openlibrary.org](http://openlibrary.org)

## Johannes Robert Rydberg (1854–1919),



Johannes Robert Rydberg oli ruotsalainen fyysikko, joka tunnetaan *Rydbergin vakioista* ja *Rydbergin kaavasta*, joka kuvaa vetyatomin spektriviivojen aallonpituuksia.

Rydberg oli kotoisin Halmstadista lounaisesta Ruotsista. Hän valmistui Lundin yliopistosta vuonna 1875 ja jatkoi opintojaan matematiikassa. Hänen kartioleikkauksia käsittelevä väitöskirjansa hyväksyttiin vuonna 1879. Rydberg sai nimityksen matematiikan ja pian professoriksi Lundin yliopistossa, jossa hän toimi koko työ-

uransa ajan.

Rydbergin kaava, jonka hän keksi vuonna 1890, oli puhtaasti kokeellinen. Ensimmäisen teoreettisen vahvistuksensa se sai Niels Bohrin atomimallissa ja myöhemmin kvanttimekaniikan pohjalta johdetuissa atomimalleissa.

<http://www-history.mcs.st-and.ac.uk/Biographies/Rydberg.html>  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Johannes\\_Robert\\_Rydberg](http://en.wikipedia.org/wiki/Johannes_Robert_Rydberg)

## Joseph John Thomson (1856–1940)



J.J. Thomson oli englantilainen fyysikko, joka katodisäteitä tutkimalla tunnisti elektronin sähkövarauksen omaavaksi hiukkaseksi vuonna 1897.

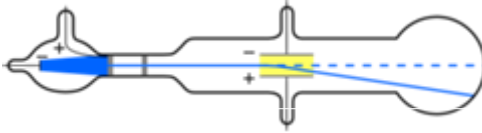
J.J. Thomson syntyi vuonna 1856 Manchesterissa, Englannissa. Hän sai peruskoulutuksensa pienessä paikallisessa koulussa, jossa hän jo osoitti lahjakkuutensa ja kiinnostuksensa luonnontieteisiin. Vuonna 1870 hän jatkoi opintojaan Owens Collegessa, ja vuonna 1876 Trinity Collegessa Cambridgessa. Vuonna 1884 Thomson sai nimityksen fysiikan professoriksi.

Vuonna 1906 Thomson sai fysiikan Nobel-palkinnon elektronin löytämisestä ja työstään sähkönsä johtavuudesta kaasuisissa. Thomson oli myös erityisen lahjakas opettaja; seitsemän hänen oppilaistaan ja hänen oma poikansa saivat fysiikan Nobel-palkinnon.

Thomson löysi elektronin tutkiessa katodisäteitä Crookin putkessa vuonna 1887. Hän nimitti löydöstään hiukkaseksi (*corpuscle*) – George Stoneyn jo vuonna 1894 ehdottama elektroni nimitys kuitenkin vakiintui Thomsonin hiukkaselle.

Vuonna 1901 kirjoittamassaan yhteenvedossa *On bodies smaller than atoms* (Atomeita pienemmistä hiukkasista) hän arvioi elektronin ja vetyatomin massojen suhteeksi 1/1000. Thomson yhdessä George FitzGeraldin, Oliver Heavisiden ja George

Searlen kanssa määritteli energiaan verrannollisen sähkömagneettisen massan käsitteen  $m = (4/3) E/c$ . Vuonna 1900 Wilhelm Wien ja Henri Poincaré määrittelivät sähkömagneettiselle massalle aineen lepoenergiaa vastaavan lausekkeen  $m = E/c^2$ . Philipp Lenardin kokeissaan havaitseman elektronin vapaan matkan perusteella Thomson päätteli, että elektronin täytyy olla paljon pienempi kuin molekyyli.



Crooken katodisädeputki, jota Thomson käytti elektronin massa/varaus suhteen määrittämiseen.

Vuonna 1918 J.J. Thomson nimettiin Trinity College johtajaksi, missä virassa hän oli kuolemaansa saakka. Hän kuoli vuonna 1940. Hänet haudattiin Westminster Abbeyhin lähelle Sir Isaac Newtonia.

[http://en.wikipedia.org/wiki/Joseph\\_John\\_Thomson](http://en.wikipedia.org/wiki/Joseph_John_Thomson)

J.J. Thomson, *On the Electric and Magnetic Effects produced by the Motion of Electrified Bodies* (1881), [wikisource.org](http://www.wikisource.org)

J.J. Thomson, *On the light thrown by recent investigations on Electricity on the relation between Matter and Ether* (1908),

[wikisource.org](http://www.wikisource.org)

J.J. Thomson, *Rays of Positive Electricity and Their Application to Chemical Analyses* (1913), [wikisource.org](http://www.wikisource.org)

J.J. Thomson, *Romanes Lecture: The Atomic Theory*. Clarendon Press (1914), [wikisource.org](http://www.wikisource.org)

J.J. Thomson, "On bodies smaller than atoms", *The Popular Science Monthly*, August 1901 pp. 323–335, <http://books.google.com/books?id=3CMDAAAAMBAJ&pg=PA323&hl=en#v=onepage&q&f=false>

## Heinrich Rudolf Hertz (1857–1894)



Heinrich Rudolf Hertz oli saksalainen fyysikko, joka onnistui demonstroimaan Maxwellin teorian ennustamia sähkömagneettisia aaltoja kokeissaan vuonna 1886–88.

Heinrich Hertz syntyi Hampurissa, Saksassa. Hän opiskeli luonnontieteitä ja tekniikkaa useissa kaupungeissa, Dresdenissä, Münchenissä ja Berliinissä, jossa opiskelu tapahtui Gustav R. Kirchhoffin ja Hermann von Helmholtzin johdolla. Hertz suoritti tohtorin tutkinnon Berliinin yliopistossa vuonna 1880.

Vuonna 1885 Hertz sai professuurin Karlsruhe yliopistossa, missä hän demonstroi sähkömagneettiset aallot vuosina 1886–88. Maxwellin teoria sähkömagneettisista aalloista hyväksyttiin laajalti Heinrich Hertzin onnistuneiden kokeiden jälkeen. Hertz jakoi George Stokesin idean (1845) paikallisesta eetteristä, joka kytkeytyi avaruudessa liikkuvaan materiaan, synnyttäen samalla ongelman toisiinsa nähden liikkuvien eettereiden kytkeytymisestä toisiinsa sähkömagneettisen säteilyn havaitsemistilanteessa.

Kokeissaan Heinrich Hertz havaitsi myös, että ultraviolettivalo paransi hänen sähkömagneettisen säteilyn vastaanottamiseen käyttämänsä kipinäindikaattorin herkkyyttä, mikä oli viite valosähköisestä ilmiöstä.

[http://www-history.mcs.st-and.ac.uk/Biographies/Hertz\\_Heinrich.html](http://www-history.mcs.st-and.ac.uk/Biographies/Hertz_Heinrich.html)

[http://en.wikipedia.org/wiki/Heinrich\\_Rudolf\\_Hertz](http://en.wikipedia.org/wiki/Heinrich_Rudolf_Hertz)

Heinrich Rudolf Hertz, *Electric Waves* (1893), [openlibrary.org](https://openlibrary.org)

Heinrich Rudolf Hertz, *Miscellaneous papers*: with an introd. by Philipp Lenard. Authorised English translation by D.E. Jones and G.A. Schott (1896), [openlibrary.org](https://openlibrary.org)

Heinrich Rudolf Hertz, *Principles of Mechanics*, englanninkielinen käännös D.E. Jones (1899), [openlibrary.org](https://openlibrary.org)

## Joseph Larmor (1857–1942)



Joseph Larmor oli irlantilainen fyysikko ja matemaatikko, joka ehkä tunnetaan parhaiten yhtälöstään NMR spektroskopiaan liittyvästä Larmorin taajuudesta.

Joseph Larmor oli kotoisin Belfastista. Opiskeltuaan Queen's University -yliopistossa Belfastissa hän meni Cambridgeen, missä hän St John's Collegessa valmistui kurssinsa parhaana opilaana.

Toimittuaan muutaman vuoden opettajana Queen's Collegessa, Galwayssa, hän siirtyi matematiikan luennoitsijaksi Cambridgeen vuonna 1885. Vuonna 1903 hänet nimitettiin matematiikan (Lucasian) professoriksi Cambridgeessa, virka, jonka hän piti eläkkeelle jäämiseensä saakka vuoteen 1932.

Larmor määräsi lausekkeen kiihtyvässä liikkeessä olevan varauksen säteilemälle energialle ja kehitti Lorentz-muunnosta vastaavat muunnoskaavat, jotka säilyttivät valon nopeuden toisiinsa nähden liikkuvissa koordinaatistoissa. Larmorin aikadilaation ja pituuskontraktion sisältävät yhtälöt julkaistiin vuonna 1897 *Philosophical Transactions of the Royal Society* julkaisusarjassa. Tämä oli pari vuotta ennen Lorentzin vastaavaa julkistusta ja kahdeksan vuotta ennen muunnoksen käyttöönottoa suppeassa suhteellisuusteoriassa.

Larmor kokosi tieteellisen työnsä vuonna 1900 ilmestyneeseen kirjaansa *Aether and matter*. Larmor kokosi myös George Stokesin ja William Thomsonin työt näiden kuoltua.

<http://www-history.mcs.st-and.ac.uk/Biographies/Larmor.html>

[http://en.wikipedia.org/wiki/Joseph\\_Larmor](http://en.wikipedia.org/wiki/Joseph_Larmor)

Joseph Larmor, *On a Dynamical Theory of the Electric and Luminiferous Medium, Part 3, Relations with material media* (1897, Sections 13-16) (1897) [wikisource.org](https://www.wikisource.org)

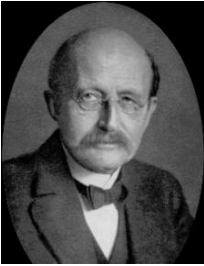
Joseph Larmor, *Aether and Matter* (1900, Ch. 10-11) [wikisource.org](https://www.wikisource.org), [openlibrary.org](https://openlibrary.org)

Joseph Larmor, *On the ascertained Absence of Effects of Motion through the Aether, in relation to the Constitution of Matter, and on the FitzGerald-Lorentz Hypothesis* (1904), [wikisource.org](https://www.wikisource.org)

Joseph Larmor, *Introduction to H. Poincaré's "Science and Hypothesis"* (1905), [wikisource.org](https://www.wikisource.org)

Joseph Larmor, *How could a Rotating Body such as the Sun become a Magnet?* (1919) in Report of the British Association for the Advancement of Science 87th Meeting, pp. 159-160, [wikisource.org](https://www.wikisource.org)

## Max Karl Ernst Ludwig Planck (1858 –1947)



Max Planck oli saksalainen fyysikko, joka tunnetaan parhaiten hänen nimeään kantavista *Planckin yhtälöstä*,  $E = h \cdot f$ , ja *Planckin vakioista*,  $h$ .

Max Planck syntyi Kielissä, Pohjois-Saksassa. Vuonna 1867 perhe muutti Müncheniin, ja Max aloitti koulunkäyntinsä paikallisessa Gymnasiumissa. Innostavan opettajansa, Hermann Müllerin, ansiosta hän kiinnostui astronomiasta, mekaniikasta ja matematiikasta.

Vuonna 1874 Max Planck jatkoi opintojaan Münchenin yliopistossa, ja vuonna 1877 Berliinin yliopistossa, jossa hänen opettajinaan olivat mm. Hermann von Helmholtz ja Gustav Kirchhoff. Vuonna 1879 Planck väitteli tohtoriksi aiheesta *Über den zweiten Hauptsatz der mechanischen Wärmetheorie (Termodynamiikan toisesta pääsäännöstä)*. Vuonna 1885 hänet nimitettiin teoreettisen fysiikan professoriksi Kielin yliopistoon ja vuonna 1892 professoriksi Berliinin yliopistoon.

Max Planck esitti kuuluisan yhtälönsä Deutsche Physikalische Gesellschaftin seminaarissa vuonna 1900 etsiessään ratkaisua mustan kappaleen säteilylle. Yhtälö sisälsi ajatuksen, että säteilevä pinta koostuu resonaattoreista, jotka emittoivat ominaistajuuteensa suoraan verrannollisia energiapaketteja. Hän piti yhtälöä *ad hoc* löydöksenä, joka puolsi paikkaansa ratkaistessaan suurella tarkkuudella mustan kappaleen säteilyn spektrijakauman.

Max Planck tunnettiin perusteellisena ja periaatteellisena tutkijana, joka halusi ymmärtää johtamiensa yhtälöiden perusteet sekä niiden yhteyden suuresti kunnioittamaansa klassiseen mekaniikkaan. Todennäköisesti tästä syystä hän useamman vuoden ajan pidättyi julkaisemasta tieteellisiä kirjoituksia mustan kappaleen säteilystä tai ”kvanttiyhtälön”  $E = h \cdot f$  perusteista. Vasta kymmenkunta vuotta myöhemmin, kun ”kvantin” olemassaololle oli löydetty viitteitä useamman tutkijan toimesta, Max Planck uskoi tehneensä fysiikan perusteisiin liittyvän tärkeän löydön vuonna 1900 esittämässään ”kvanttiyhtälössä”.

<http://www-history.mcs.st-and.ac.uk/Biographies/Planck.html>

[http://en.wikipedia.org/wiki/Max\\_Planck](http://en.wikipedia.org/wiki/Max_Planck)

Planckin yhtälö: Max Planck, *Entropie und Temperatur strahlender Wärme*, *Annalen der Physik* 306 (4): 719–737 (1900). Ks. myös [http://en.wikipedia.org/wiki/Planck\\_postulate](http://en.wikipedia.org/wiki/Planck_postulate)

Max Planck, *Treatise on Thermodynamics*, translated by Alexandeer Ogg (1903), [openlibrary.org](http://openlibrary.org)

Max Planck, *The Principle of Relativity and the Fundamental Equations of Mechanics* (1906) [wikisource.org](http://wikisource.org)

Max Planck, *The Measurements of Kaufmann on the Deflectability of  $\beta$ -Rays in their Importance for the Dynamics of the Electrons* (1906) [https://en.wikisource.org/wiki/Translation:The\\_Measurements\\_of\\_Kaufmann](https://en.wikisource.org/wiki/Translation:The_Measurements_of_Kaufmann)

Max Planck, *On the Dynamics of Moving Systems* (1907), [https://en.wikisource.org/wiki/Translation:On\\_the\\_Dynamics\\_of\\_Moving\\_Systems](https://en.wikisource.org/wiki/Translation:On_the_Dynamics_of_Moving_Systems)

Max Planck, *Notes on the Principle of Action and Reaction in General Dynamics* (1908) [https://en.wikisource.org/wiki/Translation:Notes\\_on\\_the\\_Principle\\_of\\_Action\\_and\\_Reaction\\_in\\_General\\_Dynamics](https://en.wikisource.org/wiki/Translation:Notes_on_the_Principle_of_Action_and_Reaction_in_General_Dynamics)

Max Planck, *Das Princip der Erhaltung der Energie*, [openlibrary.org](http://openlibrary.org)

Max Planck, *Eight Lectures on Theoretical Physics* (1909) [wikisource.org](http://wikisource.org)

Max Planck, *General Dynamics. Principle of Relativity* (Lecture VIII), [wikisource.org](http://wikisource.org)

Max Planck, *Uniform Rotation and Lorentz Contraction* (1910) [https://en.wikisource.org/wiki/Translation:Uniform\\_Rotation\\_and\\_Lorentz\\_Contraction](https://en.wikisource.org/wiki/Translation:Uniform_Rotation_and_Lorentz_Contraction)

Max Planck, *The Origin and development of Quantum Theory, Nobel Prize Address*, translated by H.T. Clarke and L. Silberstein (1922), [openlibrary.org](http://openlibrary.org)

## Philipp Lenard (1862–1947)



Philipp Lenard oli unkarilais-saksalainen fyysikko, joka tuli tunnetuksi erityisesti valosähköisen ilmiön selitykseen johtaneista tutkimuksistaan.

Lenardin vanhemmat olivat kotoisin Tirolista, Philipp syntyi silloin Unkariin kuluneessa Pressburgissa, joka on nykyisen Slovakian alueella. Fysiikan ja kemian opinnot hän aloitti Wienissä ja Budapestissa, jatkoi niitä Heidelbergissä, jossa hän suoritti tohtorin tutkinnon vuonna 1886.

Lenard oli havainnut, että Crookesin kylmäkatodiputkissa voitiin synnyttää elektronisäde kohdistamalla katodiin ultraviolettivaloa. Edelleen hän havaitsi, että säteen energia oli riippumaton valon intensiteetistä, mutta kääntäen verrannollinen käytetyn ultraviolettivalon aallonpituuteen, ja siis suoraan verrannollinen valon taajuuteen.

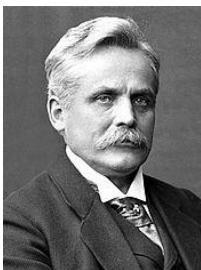
Lenardin työllä, yhdessä Planckin yhtälön kanssa, oli oleellinen rooli Einsteinin valosähköisen ilmiön selityksessä.

[http://en.wikipedia.org/wiki/Philipp\\_Lenard](http://en.wikipedia.org/wiki/Philipp_Lenard)

P. Lenard, *Ann. d. Phys.* 8. p. 169 u. 170. 1902

Philipp Lenard, *Great men of Science, a History of Scientific Progress*. English translation H. Stafford Hatfield (1938), [archive.org](http://archive.org)

## Wilhelm Wien (1864–1928)



Saksalainen fyysikko Wilhelm Wien tuli tunnetuksi erityisesti lämpösäteilyn tutkimuksistaan.

Wilhelm Wien syntyi Gaffkenissa, Preussin provinssissa, nykyisessä Kaliningradissa. Käytyään koulua Heidelbergissä, hän, vuonna 1882, jatkoi Göttingenin yliopistossa ja edelleen Berliinin yliopistossa, jossa hän työskenteli Hermann von Helmholtzin laboratoriossa ja suoritti tohtorin tutkinnon vuonna 1886. Vuonna 1900 hän sai professuurin Würzburgin yliopistossa.

Vuonna 1896 Wien muotoili kokeellisesti mustan kappaleen säteilyn taajuusjakautumaa kuvaavan säteilylain, joka myöhemmin nimettiin hänen mukaansa *Wienin säteilylaki*. Wilhelm Wienin työ oli pohjana Max Planckin mustan kappaleen säteilyn teorialle, joka korjasi ja korvasi Wienin säteilylain, ja tuotti kuuluisan Planckin vakion ja ajatuksen sähkömagneettisen säteilyn kvantittuneisuudesta. Ionisoidun kaasun tutkimuksissaan vuonna 1898 Wien löysi vetyatomin massan omaavan positiivisesti varautuneen partikkelin, joka myöhemmin nimettiin protoniksi.

<http://www-history.mcs.st-and.ac.uk/Biographies/Wien.html>

[http://en.wikipedia.org/wiki/Wilhelm\\_Wien](http://en.wikipedia.org/wiki/Wilhelm_Wien)



Wilhelm Wien, *On the Possibility of an Electromagnetic Foundation of Mechanics* (1900), *Annalen der Physik* 310, Nr. 7, 1901, S. 501-513, [https://en.wikisource.org/wiki/Translation:On\\_the\\_Possibility\\_of\\_an\\_Electromagnetic\\_Foundation\\_of\\_Mechanics](https://en.wikisource.org/wiki/Translation:On_the_Possibility_of_an_Electromagnetic_Foundation_of_Mechanics)

## Hermann Minkowski (1864–1909)



Hermann Minkowski oli saksalainen matemaatikko, joka tuli tunnetuksi erityisesti vuonna 1908 esittämästään aika-avaruus kuvauksesta, joka muodostui osaksi suhteellisuusteorian todellisuuskuvaa.

Hermann Minkowski syntyi liettuassa (tuolloin osa Venäjään Keisarikuntaa). Hermannin ollessa kahdeksan vuoden ikäinen, perhe palasi Saksaan ja asettui asumaan Königsbergiin, jossa Hermann aloitti koulunkäyntinsä Gymnasiumissa ja jatkoi vuonna 1880 Königsbergin yliopistossa, josta hän valmistui tohtoriksi vuonna 1885.

Minkowskin vuonna 1908 esittämässä aika-avaruuskuvauksessa aika esitetään kolmeen avaruussuuntaan kytkettynä ortogonaalisena neljäntenä ulottuvuutena. Aika-avaruus muodostui einsteinilaisen maailmankuvan peruskäsitteeksi. Minkowski tarkasteli Lorentz-muunnosta ja suhteellisuusteoriaa puhtaasti matemaattiselta kannalta, ottamatta kantaa siihen liittyviin fysikaalisiin mekanismeihin.

<http://www-history.mcs.st-and.ac.uk/Biographies/Minkowski.html>

[http://en.wikipedia.org/wiki/Hermann\\_Minkowski](http://en.wikipedia.org/wiki/Hermann_Minkowski)

Hermann Minkowski, *The Fundamental Equations for Electromagnetic Processes in Moving Bodies*, *Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse*, pp. 53–111, Presented in the session of December 21, 1907 [https://en.wikisource.org/wiki/Translation:The\\_Fundamental\\_Equations\\_for\\_Electromagnetic\\_Processes\\_in\\_Moving\\_Bodies](https://en.wikisource.org/wiki/Translation:The_Fundamental_Equations_for_Electromagnetic_Processes_in_Moving_Bodies)

Hermann Minkowski, *Space and Time*, (Raum und Zeit 1909) *Jahresberichte der Deutschen Mathematiker-Vereinigung*, 1-14, B.G. Teubner [wikisource.org](http://wikisource.org)

## Robert Millikan (1868–1953)



Robert Millikan oli amerikkalainen fyysikko, joka tunnetaan parhaiten työstään elektronin varauksen määrittämiseksi.

Millikan aloitti koulunkäyntinsä Maquoketassa, Iowan osavaltiossa. Tohtoriksi hän valmistui Columbian yliopistosta vuonna 1895. Toimittuaan fysiikan professorina Chicagon yliopistossa, hän toimi Caltechin johtokunnan puheenjohtajana vuodesta 1921 vuoteen 1945.

Vuonna 1908, toimiessaan professorina Chicagon yliopistossa, Millikan suoritti öljypisarakokeita elektronin varauksen määrittämiseksi. J.J. Thomson oli 1800-luvun lopulla määrännyt elektronin varauksen ja massan suhteen sekä arvioinut elektronin massan olevan noin 1/1800 vetyatomien massasta sekä osoittanut vuonna 1906, että vetyatomilla on vain yksi elektroni. Vuonna 1910 Millikan onnistui

osoittamaan, että elektronin varaus on yksikkövaraus. Varauksen suuruudeksi hän sai  $1,592 \cdot 10^{-19}$  Coulombia (CODATA 2006 arvo on  $1,60217653 \cdot 10^{-19}$ ). Samalla tarkentui arvio elektronin massasta, millä oli tärkeä merkitys Bohrin vuonna 1913 esittämään puoliklassiseen vetyatomin kuvaukseen.

Millikan suoritti pitkän tutkimussarjan valosähköisen ilmiön mekanismin selvittämiseksi. Hän ei ollut vakuuttunut Einsteinin tulkinnasta; vuonna 1916 hän kirjoitti: ”Einsteinin valosähköinen yhtälö ... ei käsitykseni mukaan perustu minkäänlaiseen tyydyttävään teoreettiseen selitykseen, vaikkakin, ... se todellakin kuvaa ilmiötä suurella tarkkuudella”. Omaelämäkerrassaan vuonna 1950 Millikan kuitenkin toteaa, että hänen työnsä ”tuskien salli muuta kuin Einsteinin alun perin ehdottaman tulkinnan, nimittäin tulkinnan valosta puolittain hiukkaskuonteisena tai fotoneina kuvattuna”.

[http://en.wikipedia.org/wiki/Robert\\_Millikan](http://en.wikipedia.org/wiki/Robert_Millikan)

Robert A. Millikan, *On the Elementary Electrical Charge and the Avogadro Constant*, Phys.Rev. Vol II, Series II (1913), <http://www.aip.org/history/gap/PDF/millikan.pdf>

Robert Millikan, *The Electron* (1917), [openlibrary.org](http://openlibrary.org)

Robert A. Millikan and Henry G. Gale, *A first Course in Physics* (1906), [openlibrary.org](http://openlibrary.org)

## Arnold Sommerfeld (1868–1951)



Arnold Sommerfeld oli saksalainen teoreettinen fyysikko, joka teki urauurtavaa työtä atomifysiikassa ja kvanttifysiikan muotoiluissa. Sommerfeld tunnetaan myös hienorakennevakion löytäjänä.

Sommerfeld opiskeli matematiikkaa ja fysiikkaa Albertinan yliopistossa, kotikaupungissaan Königsbergissä, itäisessä Preussissa (nykyisessä Venäjälle kuuluvassa Kaliningradissa).

Hänen fysiikan uransa alkoi Göttingenin yliopistossa, jossa hän päätyi matematiikan professoriksi Wilhelm Wienin seuraajana. Vuonna 1900 hän siirtyi professoriksi Aacheniin, ja sieltä vuonna 1906 Münchenin yliopistoon, jossa hän toimi teoreettisen fysiikan instituutin johtajana yli 30 vuotta. Hänen oppilaistaan seitsemän päätyi nobelisteiksi, ja suuri joukko näiden lisäksi merkittäviksi fysiikan kehittäjiksi.

Sommerfeld kehitti Bohrin atomimallista yleistetyn mallin, jossa Bohrin mallin ympyrärajoja oli täydennetty elliptisillä radoilla. Malli mahdollisti suhteellisuusteoriaa edellyttävien ratojen ratkaisemisen, ja tuotti saman tuloksen kuin Diracin myöhemmin ratkaisema yhtälö. Sommerfeld tunnetaan myös hienorakennevakion keksijänä.

Sommerfeldin teorian edustaman ”vanhan kvanttiteorian” viimeisimpiä kehitysvaiheita edustanee Bohr-Kramers-Slater (BKS) teoria, jossa klassisiin malleihin on lisätty kvanttiehtoja.

<http://www-history.mcs.st-and.ac.uk/Biographies/Sommerfeld.html>

[http://en.wikipedia.org/wiki/Arnold\\_Sommerfeld](http://en.wikipedia.org/wiki/Arnold_Sommerfeld)

[http://en.wikipedia.org/wiki/Bohr%E2%80%93Sommerfeld\\_theory](http://en.wikipedia.org/wiki/Bohr%E2%80%93Sommerfeld_theory)

[http://en.wikipedia.org/wiki/BKS\\_theory](http://en.wikipedia.org/wiki/BKS_theory)

Arnold Sommerfeld, *An Objection Against the Theory of Relativity of Electrodynamics and its Removal*, *Physikalische Zeitschrift* 8 (23): 841-842 (1907) [https://en.wikisource.org/wiki/Translation:An\\_Objection\\_Against\\_the\\_Theory\\_of\\_Relativity\\_and\\_its\\_Removal](https://en.wikisource.org/wiki/Translation:An_Objection_Against_the_Theory_of_Relativity_and_its_Removal)

Arnold Sommerfeld, *On the Composition of Velocities in the Theory of Relativity*, *Verh. der DPG*, 1909, 21: 577-582 (1909) [https://en.wikisource.org/wiki/Translation:On\\_the\\_Composition\\_of\\_Velocities\\_in\\_the\\_Theory\\_of\\_Relativity](https://en.wikisource.org/wiki/Translation:On_the_Composition_of_Velocities_in_the_Theory_of_Relativity)

Arnold Sommerfeld, *On the Theory of Relativity I: Four-dimensional Vector Algebra* (1910), [https://en.wikisource.org/wiki/Translation:On\\_the\\_Theory\\_of\\_Relativity\\_I:\\_Four-dimensional\\_Vector\\_Algebra](https://en.wikisource.org/wiki/Translation:On_the_Theory_of_Relativity_I:_Four-dimensional_Vector_Algebra)

Arnold Sommerfeld, *On the Theory of Relativity II: Four-dimensional Vector Analysis* (1910), [https://en.wikisource.org/wiki/Translation:On\\_the\\_Theory\\_of\\_Relativity\\_II:\\_Four-dimensional\\_Vector\\_Analysis](https://en.wikisource.org/wiki/Translation:On_the_Theory_of_Relativity_II:_Four-dimensional_Vector_Analysis)

Arnold Sommerfeld, *Atombau und Spektrallinien* (1921), [openlibrary.org](https://openlibrary.org)

## Ernest Rutherford (1871–1937)



Ernest Rutherford oli Uudessa Seelannissa syntynyt brittiläinen kemisti ja fyysikko.

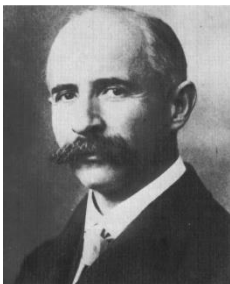
Rutherford teki perustavaa laatua olevaa työtä radioaktiivisuuden tutkimuksissa 1900-luvun alkuvuosina. Hän nimesi alfa- ja beetasäteilyn ja myöhemmin Paul Villardin löytämän gammasäteilyn. Rutherfordin yhdessä Hans Geigerin ja Ernest Marsdenin kanssa vuonna 1909 tekemä ”kultafoliokoe” johdatti hänet planeettakunta-tyyppiseen atomimalliin, jossa positiivisesti varautunutta ydintä ympäröi negatiivisesti varautuneiden elektronien pilvi. Rutherford oli Joseph John Thomsonin oppilas; planeettamalli syntyi, kun hän korvasi Thomsonin oletaman koko atomin tilavuuteen jakautuneen positiivisen varauksen pieneen ytimeen keskittyneellä positiivisella varauksella. Atomimallinsa hän julkaisi 1911. Ajatuksen atomista rakenteena, jossa ydintä ympäröi sähkövarauksen omaavia pienihiukkasia, oli jo ennen 1800-luvun puoliväliä esittänyt englantilainen monitieteilijä Richard Laming (1798–1879).

[http://en.wikipedia.org/wiki/Ernest\\_Rutherford](http://en.wikipedia.org/wiki/Ernest_Rutherford)

Ernest Rutherford, *Radioactivity* (1904), [openlibrary.org](https://openlibrary.org)

Ernest Rutherford, *Radioactive substances and their radiations* (1913), [openlibrary.org](https://openlibrary.org)

## Walter Kaufmann (1871–1947)



Saksalainen fyysikko Walter Kaufmann mittasi elektronin massan kasvun elektronin nopeuden funktiona vuosina 1901–1903 tekemissään kokeissa. Havainnolla oli tärkeä merkitys suppean suhteellisuusteorian muotoilulle.

Walter Kaufmann opiskeli konetekniikkaa ja fysiikkaa Berliinin ja Münchenin yliopistoissa vuodesta 1890 suorittaen tohtorin tutkinnon vuonna 1894. Vuodesta 1896 hän toimi assistenttina Berliinin ja Göttingenin yliopistojen fysiikan laitoksilla, kunnes sai fysiikan professuurin Bonnin yliopistossa

vuonna 1899 ja pian sen jälkeen kokeellisen fysiikan professuurin Königsbergin yliopistossa nykyisessä Kaliningradissa.

[http://en.wikipedia.org/wiki/Walter\\_Kaufmann\\_%28physicist%29](http://en.wikipedia.org/wiki/Walter_Kaufmann_%28physicist%29)

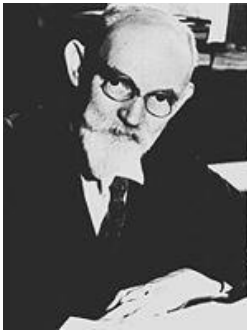
W. Kaufmann, *Die elektromagnetische Masse des Elektrons*, *Physikalische Zeitschrift*, 4 (1b): 54-57 (1902), [http://experimentum-crucis.narod.ru/olderfiles/1/Elektromagnetische\\_Masse.pdf](http://experimentum-crucis.narod.ru/olderfiles/1/Elektromagnetische_Masse.pdf)

W. Kaufmann, *The Electromagnetic Mass of the Electron*, *Physikalische Zeitschrift*, 4 (1b): 54-57 (1902), [https://en.wikisource.org/wiki/Translation:The\\_Electromagnetic\\_Mass\\_of\\_the\\_Electron](https://en.wikisource.org/wiki/Translation:The_Electromagnetic_Mass_of_the_Electron)

W. Kaufmann, *On the Constitution of the Electron*, *Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften*. 45: 949-956 (1905), [https://en.wikisource.org/wiki/Translation:On\\_the\\_Constitution\\_of\\_the\\_Electron\\_\(1905\)](https://en.wikisource.org/wiki/Translation:On_the_Constitution_of_the_Electron_(1905))

W. Kaufmann, *On the Constitution of the Electron*, *Annalen der Physik*, 324 (3): 487-553 (1906), [https://en.wikisource.org/wiki/Translation:On\\_the\\_Constitution\\_of\\_the\\_Electron\\_\(1906\)](https://en.wikisource.org/wiki/Translation:On_the_Constitution_of_the_Electron_(1906))

## Willem de Sitter (1872–1934)



Willem de Sitter oli hollantilainen matemaatikko, fyysikko ja astronomi. Hänet tunnetaan läheisestä yhteistyöstään Albert Einsteinin kanssa yleiseen suhteellisuusteoriaan perustuvan kosmologiamallin kehittämisessä.

Valmistuttuaan Arnhemien Gymnasiumista, Willem de Sitter jatkoi matematiikan opintojaan Groningenin yliopistossa suuntautuen kuitenkin astronomiaan. Valmistuttuaan vuonna 1897 hän lähti Cape Towniin työskennelläkseen kahden vuoden ajan Cape Observatoriossa Etelä-Afrikassa. Hän osallistui fotometrisiin tutkimuksiin ja ohjelmaan auringon tutkimiseksi.

de Sitterin palattua Groningenin yliopistoon vuonna 1899 hän sai assistentuurin Astronomian laboratoriossa. Vuonna 1908 de Sitter nimitettiin astronomian professoriksi Leidenin yliopistossa. Hän toimi Leidenin Observatorion johtajana vuodesta 1919 kuolemaansa saakka.

Willem de Sitter oli ensimmäisiä astronomeja, jotka perehtyivät Albert Einsteinin yleiseen suhteellisuusteoriaan. de Sitter oli kehittänyt ajatuksia 4-ulotteisesta aika-avaruudesta, ja jo vuonna 1916–17 hän julkaisi artikkeleita Einsteinin yleisen suhteellisuusteorian kosmologisista näkökohdista, ja esitti kenttäyhtälöiden ratkaisun tyhjälle avaruudelle herättäen Machin periaatteen haastavan kysymyksen: *Onko inertiaa olemassa, jos ainoa massa avaruudessa on testimassa?*

Vuonna 1932 Einstein ja de Sitter julkaisivat yhdessä *Einstein–de Sitter* -mallin pimeää ainetta sisältävästä universumista, jossa laajeneminen tapahtuu avaruuden gravitaatioenergian ja laajenemisen liike-energian keskinäisessä tasapainossa.

Relativistisen kosmologian lisäksi de Sitter jatkoi vuosisadan vaihteessa aloittamiaan tutkimuksia Jupiterin kuista ja työtään astronomisten vakioiden tarkentamisessa.

<http://www-history.mcs.st-and.ac.uk/Biographies/Sitter.html>

[http://en.wikipedia.org/wiki/Willem\\_de\\_Sitter](http://en.wikipedia.org/wiki/Willem_de_Sitter)

Willem de Sitter, *On the bearing of the Principle of Relativity on Gravitational Astronomy* (1911), [wikisource.org](http://wikisource.org)

Willem de Sitter, *A proof of the constancy of the velocity of light* (1913) [wikisource.org](http://wikisource.org)

Willem de Sitter, *On the constancy of the velocity of light* (1913), [wikisource.org](http://wikisource.org)

- Willem de Sitter, *On Einstein's Theory of Gravitation, and its Astronomical Consequences*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, **76**, 699–728 (1916), <http://articles.adsabs.harvard.edu/full/1916MNRAS..76..699D>
- Willem de Sitter, *On Einstein's Theory of Gravitation, and its Astronomical Consequences*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, **77**, 155–184 (1916), <http://articles.adsabs.harvard.edu/full/1916MNRAS..77..155D>
- Willem de Sitter, *On Einstein's Theory of Gravitation, and its Astronomical Consequences*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, **78**, 3–28 (1917), <http://articles.adsabs.harvard.edu/full/1917MNRAS..78....3D>
- Willem de Sitter, *On the magnitudes, diameters and distances of the extragalactic nebulae, and their apparent radial velocities*, (B.A.N.) **5**, No. 185, 157–171 (1930)
- Willem de Sitter, *The expanding universe. Discussion of Lemaître's solution of the equations of the inertial field*, (B.A.N.) **5**, No. 193, 211–218 (1930)
- W. de Sitter, *Do the galaxies expand with the universe?*, (B.A.N.) **6**, No. 233, 146 (1931)
- W. de Sitter, *The Size of the Universe*, *PASP*, **44**, No. 258, 89–104 (1932)
- A. Einstein, W. de Sitter, *On the Relation between the Expansion and the Mean Density of the Universe*, *PNAS* **18**, 213–214 (1932)
- W. de Sitter, *On distance, magnitude, and related quantities in an expanding universe*, *B.A.N.*, **7**, No 261, 205 (1934)

## Karl Schwarzschild (1873–1916)



Karl Schwarzschild oli saksalainen fyysikko, joka ratkaisi Einsteinin yleisen suhteellisuusteorian kenttäyhtälöt yksittäisen massakeskuksen ympäristössä vuonna 1915 noin kuukausi siitä, kun Einstein oli kenttäyhtälöt esittänyt.

Schwarzschild oli syntyisin Frankfurt am Mainin kaupungista Saksasta. Hän aloitti koulukäyntinsä juutalaisessa koulussa ja jatkoi Gymnasiumissa 11-vuotiaana. Jo Gymnasiumin aikana hän kirjoitti kaksi tutkielmaa kaksoistähtien radoista. Opintojaan hän jatkoi Strasburgissa ja Münchenissä, ja valmistui tohtoriksi vuonna 1896 aiheenaan Henri Poincarén teorit.

Schwarzschildin ratkaisu Einsteinin kenttäyhtälöihin tuotti mustan aukon käsitteen ja siihen liittyvän kriittisen säteen. Kenttäyhtälöt ratkaistessaan Schwarzschild palveli Saksan armeijassa Venäjän rintamalla ensimmäisessä maailmansodassa. Hän kuoli harvinaiseen autoimmuunitautiin vain noin vuosi kenttäyhtälöratkaisun jälkeen.

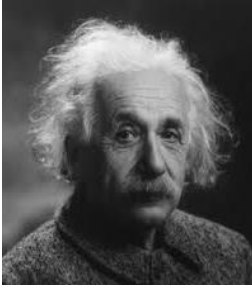
<http://www-history.mcs.st-and.ac.uk/Biographies/Schwarzschild.html>

[http://en.wikipedia.org/wiki/Karl\\_Schwarzschild](http://en.wikipedia.org/wiki/Karl_Schwarzschild)

Karl Schwarzschild, *On the Gravitational Field of a Mass Point According to Einstein's Theory*, *Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften*, S. 831–839 (1915),

<http://zelmanov.ptep-online.com/papers/zj-2008-03.pdf>

## Albert Einstein (1879–1955)



Albert Einstein syntyi vuonna 1879 Ulmissa, nykyisessä Saksassa. Perhe muutti pian Müncheniin, jossa hänen insinööri-isänsä perusti veljensä kanssa tasavirtamoottoreita valmistavan yhtiön. Osoituksena Einsteinin varhaisesta kiinnostuksesta luonnontieteisiin on hänen varsin vaatimattoman koulutuksensa pohjalta vuonna 1895, kuudentoista ikäisenä kirjoittamansa ajankohtaiseen fysiikan aiheeseen liittyvä tutkielma *The Investigation of the state of Aether in Magnetic Fields*, jonka hän lähetti sedälleen luettavaksi. Tutkielma oli luultavasti hänen lukemansa August Föpplin kirjan *Jobdatus Maxwellin teoriaan sähköstä* inspiroima. Kirja käsitteli Maxwellin teoriaa ja Hertzin kokeita ja sisälsi mm. luvun suhteellisesta ja absoluuttisesta liikkeestä ja liikkuvien järjestelmien sähködynamiikasta, mikä lienee jättänyt suhteellisuusteoriaan johtaneita kysymyksiä kypsyämään.

Vuosina 1896–1900 Einstein kävi Zürichin Teknillisessä Korkeakoulussa neljävuotisen matematiikan ja fysiikan opettajaksi pätevöittävästä kurssin. Opettajan virkaa ei kuitenkaan löytynyt hänen valmistuttuaan, ja hän päätyi Berniin, Sveitsin patenttitoimistoon, sähkömagneettisiin laitteisiin liittyvien patenttihakemusten apulaistutkijaksi. Bernin aikana Einstein perusti pienen keskusteluryhmän *Olympia Akatemian*, jossa keskusteltiin Henri Poincarén, Ernst Machin ja David Humen töistä. Samalla hän valmisteli väitöskirjaansa *A New Determination of Molecular Dimensions*, joka hyväksyttiin Zürichin yliopistossa vuonna 1905.

Vuodesta 1905 muodostui kaiken kaikkiaan Einsteinin huippuvuosi, jolloin hän edellisen lisäksi julkaisi neljä kuolemattomaksi muodostunutta julkaisua, *On a Heuristic Point of View about the Creation and Conversion of Light*, jossa hän pohtii Planckin yhtälön tulkintaa valosähköisen ilmiön selittämiseksi, *On the Motion – Required by the Molecular Kinetic Theory of Heat – of Small Particles Suspended in a Stationary Liquid*, joka käsitteli kineettistä kaasuteoriaa ja vahvisti vasta muotoutumassa olevaa atomiteoriaa, *On the Electrodynamics of Moving Bodies*, joka sisältää suppean suhteellisuusteorian ja *Does the Inertia of a Body Depend Upon Its Energy Content?*, joka käsitteli massan ja energian yhteyttä ja perusteli yhtälön  $E = mc^2$  suppean suhteellisuusteorian pohjalta.

Max Planckin tukemana Einstein saavutti julkaisullaan akateemista arvostusta ja hänet nimitettiin luennoitsijaksi Bernin yliopistoon 1908 ja seuraavana vuonna dosentiksi Zürichin yliopistoon. Hänen akateeminen uransa jatkui Karl-Ferdinand yliopistossa Prahassa 1911, josta hän palasi Saksaan vuonna 1914, missä hänet nimitettiin Kaiser Wilhelm Instituutin johtajaksi ja yliopiston professoriksi.

Akateemisten virkojensa ohessa Einstein oli alkanut kehittää tasaiseen, lineaariseen liikkeessä oleviin havaintokehyksiin rajoittuvan suppean suhteellisuusteorian laajentamista myös kiihtyvän liikkeen ja gravitaation sisältävään yleiseen suhteellisuusteoriaan. Perusteeksi hän postuloi sinänsä jo Newtonin mekaniikkaan sisältyvän ekvivalenssiperiaatteen, jonka mukaan kinemaattinen kiihtyvyys ja gravitaatiokiihtyvyys ovat erottamattomat. Suppean suhteellisuusteorian tuoma epälineaarinen kiihtyvyys (liikemassan kasvu) toi ekvivalenssiperiaatteeseen tärkeän lisämerkityksen, mikä tarjoi, että myös kasvanut liikemassa on ymmärrettävä identtiseksi gravitaatiomassan

kanssa – ja, että vapaaseen pudotukseen gravitaatiokentässä liittyy myös liikemassan kasvu.

Vuosina 1907 ja 1908 julkaisemissaan artikkeleissa hän päätteli, että vapaa pudotus gravitaatiokentässä on suppean suhteellisuusteorian mukaista inertiaaliliikettä. Hän päätteli myös, että ekvivalessiperiaatteen mukaisesti suppean suhteellisuusteorian mukainen aikadilaatio esiintyy gravitaatiotilassa, jonka gravitaatiokiihtyvyys vastaa vapaassa pudotuksessa ko. tilaan syntynyttä kiihtyvyyttä. Edelleen hän päätteli, että valo taipuu massakeskusten läheisyydessä.

Yleisen suhteellisuusteorian muotoilu osoittautui matemaattisesti erittäin haastavaksi. Einstein joutuikin turvautumaan ystävänsä Marcel Grossmannin apuun, joka pystyi soveltamaan Tullio Levi-Civitan ja Gregorio Ricci-Curbastron tensorimatematiikkaa Einsteinin yhtälöiden muotoilemiseen. Monien yritysten jälkeen yleinen suhteellisuusteoria valmistui julkaisukuntoon vuonna 1915, ja se julkaistiin vuonna 1916 *Annalen der Physik* julkaisusarjassa nimellä *Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie (Yleisen Suhteellisuusteorian Perusteet)*. Teoriaan liittyviä kosmologisia näkökohtia hän tarkasteli vuonna 1917 ilmestyneessä artikkelissaan *Kosmologische Betrachtungen zur allgemeinen Relativitätstheorie [Sitzungsberichte der Preussischen Akad. d. Wissenschaften]*.

Valon taipumisen osalta yleisen suhteellisuusteorian testaamiseen tarjoutui tilaisuus 1919 Etelä-Afrikassa esiintyneessä auringonpimennyksessä. Englantilaisen Artur Eddingtonin suorittamissa mittauksissa voitiin, vaikkakin hieman kiistanalaisesti, osoittaa, että valon taipuma noudatti yleisen suhteellisuusteorian ennustetta. Mittaustulos uutisoitiin näkyvästi; Lontoon *Times* otsikoi: *Vallankumous tieteessä – Uusi teoria Universumista – Newtonin ideat hylätty*. Uutisointi ja sitä seurannut Einsteinin popularisointi oli epäilemättä yliampuva, sillä tiedeyhteisö oli pitkään epäileväinen sekä Eddingtonin mittaustulosten että Einsteinin suhteellisuusteorian suhteen. Tiedeyhteisön varovaisuutta kuvasi myös Einsteinille vuonna 1921 myönnetty Nobel-palkinto – ei suhteellisuusteoriasta vaan valosähköisestä ilmiöstä.

Einsteinin työtä arvioitaessa kiinnittyy huomio ensinnä siihen, että työ on pääosin tullut tehdyksi akateemisten instituutioiden ulkopuolella, periaatteessa varsin vaatimattoman omakohtaisen tieteellisen työn pohjalta. Einsteinin vahvuus tulee nähdä kyvyssä yhdistää keskeisten ongelmien ratkaisuihin tehtyjen tutkimusten tuloksia.

Suhteellisuusteoria, sekä suppea että yleinen, sisälsivät siinä määrin ennakkoluulottomia ja vallankumouksellisia ajatuksia, että niiden syvälinen, kriittinen tieteellinen tarkastelu olisi mutkistanut tai vaarantanut koko teoriarakenteen synnyn. Kriittinen tarkastelu on jatkunut meidän päiviimme, vaikka teorian on todettu vastaavan havaintoja mitä moninaisimmissa mittaustilanteissa. Sekä suppea että yleinen suhteellisuusteoria ovat saaneet laajan konsensuksen tiedeyhteisössä.

<http://www-history.mcs.st-and.ac.uk/Biographies/Einstein.html>

[http://en.wikipedia.org/wiki/Albert\\_Einstein](http://en.wikipedia.org/wiki/Albert_Einstein)

A. Einstein, *On the Electrodynamics of Moving Bodies*, *Annalen der Physik* **322** (10): 891–921. (Received June 30, 1905; published September 26, 1905), [wikisource.org](http://www.fourmilab.ch/etexts/einstein/specrel/specrel.pdf), <http://www.fourmilab.ch/etexts/einstein/specrel/specrel.pdf>

A. Einstein, *On a Heuristic Point of View about the Creation and Conversion of Light* (1905) [https://en.wikisource.org/wiki/Translation:On a Heuristic Point of View about the Creation and Conversion of Light](https://en.wikisource.org/wiki/Translation:On_a_Heuristic_Point_of_View_about_the_Creation_and_Conversion_of_Light)

- A. Einstein, *The Development of Our Views on the Composition and Essence of Radiation* (1909) [https://en.wikisource.org/wiki/Translation:The Development of Our Views on the Composition and Essence of Radiation](https://en.wikisource.org/wiki/Translation:The_Development_of_Our_Views_on_the_Composition_and_Essence_of_Radiation)
- Albert Einstein, *The Field Equations of Gravitation*, Preussische Akademie der Wissenschaften, Sitzungsberichte, 1915 (part 2), 844–847, [archive.org](https://archive.org), [https://en.wikisource.org/wiki/Translation:The Field Equations of Gravitation](https://en.wikisource.org/wiki/Translation:The_Field_Equations_of_Gravitation)
- <sup>1</sup> A. Einstein, *Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie*, Annalen der Physik 354 (7), 769–822 (1916), [http://www.physik.uni-augsburg.de/annalen/history/einstein-papers/1916\\_49\\_769-822.pdf](http://www.physik.uni-augsburg.de/annalen/history/einstein-papers/1916_49_769-822.pdf), *English translation, The Foundation of the Generalised Theory of Relativity* (1916), [wikisource.org](https://en.wikisource.org)
- A. Einstein, *Relativity: The Special and General Theory* (1916), [wikisource.org](https://en.wikisource.org)
- A. Einstein, *Kosmologische Betrachtungen zur allgemeinen Relativitätstheorie* [http://articles.adsabs.harvard.edu/cgi-bin/get\\_file?pdfs/SPAW..1917/1917SPAW.....142E.pdf](http://articles.adsabs.harvard.edu/cgi-bin/get_file?pdfs/SPAW..1917/1917SPAW.....142E.pdf) (1917)
- A. Einstein, *Dialog about Objections against the Theory of Relativity*, Die Naturwissenschaften, 29 November 1918, [https://en.wikisource.org/wiki/Translation:Dialog about Objections against the Theory of Relativity](https://en.wikisource.org/wiki/Translation:Dialog_about_Objections_against_the_Theory_of_Relativity)
- A. Einstein, *Ether and the Theory of Relativity* (1920), [wikisource.org](https://en.wikisource.org)
- B. Harrow, *From Newton to Einstein* by (1920), [openlibrary.org](https://openlibrary.org)
- M.N. Saha and S.N. Bose, *The Principle of Relativity, Original papers by A. Einstein and H. Minkowski* (1920), [openlibrary.org](https://openlibrary.org)
- A. Einstein, *A Brief Outline of the Development of the Theory of Relativity* (1921), [wikisource.org](https://en.wikisource.org)
- C. Nordmann, *Einstein and the Universe, A popular Exposition of the famous Theory* (1922), [openlibrary.org](https://openlibrary.org)

## Richard Tolman (1881–1948)



Richard Tolman oli amerikkalainen tutkija, jonka erityisaloja olivat matemaattinen fysiikka, fysikaalinen kemia ja statistinen mekaniikka. Parhaiten Tolman kuitenkin tunnetaan työstään yleiseen suhteellisuusteoriaan perustuvien kosmologisten perussuureiden johtamisessa.

Tolman oli syntynyt West Newtonissa, Massachusettsissa. Hän opiskeli kemiaa Massachusetts Institute of Technology (MIT) -yliopistossa, josta hän valmistui tohtoriksi vuonna 1910.

Tolman oli laaja-alainen teoreetikko, joka mm. kehitti statistista mekaniikkaa Max Planckin, Niels Bohrin ja Arnold Sommerfeldin ”vanhan kvanttimekaniikan” pohjalta. 1910-luvun lopulla hän osoitti kokeellisesti, että sähkövirta metallissa on elektronien liikettä.

Tolman alkoi analysoida yleisen suhteellisuusteorian kosmologisia seurauksia pian teorian valmistumisen jälkeen. 1930-luvulla hän analysoi mm. Einsteinin ehdottamaa pallosymmetristä sykkivää universumia. Friedmannin laajenevan universumin mallin pohjalta hän johti lausekkeet kulmakoon etäisyydelle (angular diameter distance) ja kirkkausetäisyydelle (luminosity distance), jotka edelleen ovat käytössä Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker (FLRW) kosmologiassa<sup>1</sup>. Kosmologiassa käytetty ”Tolmanin testi” on Tolmanin johtama ennuste, jonka mukaan laajenevassa avaruudessa kaukaisten kohteiden, kuten galaksien ja kvasaarien pintakirkkaus pienenee punasiirtymän neljänteen potenssiin verrannollisena.

Artikkelissaan *Two Methods of Investigating the Nature of the Nebular Redshift*<sup>2</sup> Tolman johtaa lausekkeet punasiirtymän tulkinnalle kulmakoon ja kirkkauden ja toisaalta



kirkkauden ja kohteiden määrän suhteen. Hän määrittelee myös käytännön mittauksissa tehtävät korjaukset, jotka liittyvät mm. valokuvauslevyjen herkkyyden aallonpituusriippuvuudesta.

[http://en.wikipedia.org/wiki/Richard\\_Tolman](http://en.wikipedia.org/wiki/Richard_Tolman)

Richard Tolman, *The Principle of Relativity, and Non-Newtonian Mechanics* (1909) [wikisource.org](http://www.wikisource.org)

Richard Tolman, *The Second Postulate of Relativity* (1910), [wikisource.org](http://www.wikisource.org)

Richard Tolman, *Note on the Derivation from the Principle of Relativity of the Fifth Fundamental Equation of the Maxwell-*

*Lorentz Theory* (1910), [wikisource.org](http://www.wikisource.org)

Richard Tolman, *Non-Newtonian Mechanics. The Direction of Force and Acceleration* (1911), [wikisource.org](http://www.wikisource.org)

Richard Tolman, *Non-Newtonian Mechanics. The Mass of a Moving Body* (1911), [wikisource.org](http://www.wikisource.org)

Richard Tolman, *Non-Newtonian Mechanics. Some Transformation Equations* (1912)

Richard Tolman, *Some Emission Theories of Light* (1912), [wikisource.org](http://www.wikisource.org)

Richard Tolman, *The Electromotive Force Produced by the Acceleration of Metals* (1916)

<http://www.pnas.org/content/2/3/189.full.pdf+html>

Richard Tolman, *The Mass of the Electric Carrier in Copper, Silver and Aluminium* (1917),

<http://www.pnas.org/content/3/1/58.full.pdf+html>

Richard Tolman, *On the Nature of Light* (1927), <http://www.pnas.org/content/12/5/343.full.pdf+html>

Richard Tolman, *On the Energy and Entropy of Einstein's Closed Universe* (1928)

<http://www.pnas.org/content/14/4/348.full.pdf+html>

Richard Tolman, *On the Possible Line Elements for the Universe* (1929) <http://www.pnas.org/content/15/4/297.full.pdf+html>

"On the Astronomical Implications of the de Sitter Line Element for the Universe", *The Astrophysical Journal*, **69**, 245–274 (1929), [http://adsabs.harvard.edu/cgi-bin/nph-data\\_query?bibcode=1929ApJ....69..245T&db\\_key=AST&link\\_type=ARTICLE](http://adsabs.harvard.edu/cgi-bin/nph-data_query?bibcode=1929ApJ....69..245T&db_key=AST&link_type=ARTICLE)

<sup>1</sup> Richard Tolman, *On the Estimation of Distances in a Curved Universe with a Non-Static Line Element*, *PNAS* **16**, 511–520 (1930), <http://www.pnas.org/content/16/7/511.full.pdf+html>

<sup>2</sup> Richard Tolman, *Two Methods of Investigating the Nature of the Nebular Redshift*, *ApJ* **82**, 302–337 (1935).

## Max Born (1882–1970)



Max Born oli saksalais-englantilainen fyysikko ja matemaatikko, joka tunnetaan parhaiten hänen yhdessä Werner Heisenbergin kanssa kehittämästään matriisimekaniikasta.

Max Born syntyi Sleesiassa Lounais-Puolassa (Preussin provinssi Bornin syntymän aikaan). Saatuaan peruskoulutuksensa König-Wilhelm-Gymnasiumissa, Born jatkoi opintojaan Breslaun yliopistossa, Heidelbergin yliopistossa sekä Zurichin yliopistossa. Tehdessään tohtorintutkintoon tähtäävää tutkimusta

Göttingenin yliopistossa, hän oli yhteydessä useisiin ajan johtaviin matemaatikoihin ja tutkijoihin, kuten Klein, Hilbert, Minkowski, Runge, Schwarzschild ja Voigt.

<http://www-history.mcs.st-and.ac.uk/Biographies/Born.html>

[http://en.wikipedia.org/wiki/Max\\_Born](http://en.wikipedia.org/wiki/Max_Born)

Max Born, *Einstein's theory of Relativity* (1920), [openlibrary.org](http://openlibrary.org)

Max Born, *Zur Quantenmechanik der Stoßvorgänge*, *Zeitschrift für Physik* **37** (12): 863–867 (1926)

Max Born, *The statistical interpretation of quantum mechanics* (1954), [http://www.nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/1954/born-lecture.pdf](http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1954/born-lecture.pdf)

Mehra, *Historical Development of Quantum Theory. Volume 3, The Formulation of Matrix Mechanics and Its Modifications 1925–1926*

## Niels Henrik David Bohr (1885–1962)



Niels Bohr oli tanskalainen fyysikko, joka tunnetaan parhaiten hänen vetyatomien mallistaan, jolla oli tärkeä merkitys kvanttimekaniikan tulevalle kehitykselle.

Bohr oli kotoisin Kööpenhaminasta. Hän aloitti opintonsa Kööpenhaminan yliopistossa vuonna 1903, ja valmistui tohtoriksi vuonna 1911. Jatko-opintoja hän suoritti J. J. Thomsonin johdolla Trinity Collegessa, Cambridgessa ja Cavendish Laboratoriossa. Vuonna 1912 hän tapasi Ernest Rutherfordin Manchesterin yli-

opistossa.

Bohr keskittyi atomimallin kehitykseen vuoden 1912 maaliskuusta lähtien, työskennellessään Ernest Rutherfordin ryhmässä Victoria yliopistossa Manchesterissä. Lähtökohtana oli Rutherfordin planeettamalli, jonka mukaan atomin massa on keskittynyt pieneen ytimeen rakenteen keskellä. Max Planckin ja Albert Einsteinin kvanttihypoteesien pohjalta Bohrin päätteli, että atomin rakenne perustuu diskreetteihin energiatiloihin.

Bohrin ensimmäinen atomin rakennetta koskeva julkaisu oli vetyatomien malli vuodelta 1913, jossa hän yhdisti klassisen mekaniikan Planckin ”vaikutuskvanttiin” ja postuloi, että vetyatomien elektronien stabiilit tilat ovat tiloja, joissa elektronin impulssimomentti on Planckin vakion  $h = h/2\pi$  monikerta. Bohr saattoi päätellä, että stabiilien tilojen erotukset vastaavat energioita, jotka Planckin hypoteesilla tulkittuna antoivat tarkan fysikaalisen merkityksen Johannes Rydbergin vuonna 1890 kokeellisesti löytämälle vetyatomien emissiospektrin selittävälle kaavalle. Bohrin atomimallilla oli keskeinen merkitys kvanttimekaniikan synnylle.

[http://www-history.mcs.st-andrews.ac.uk/Biographies/Bohr\\_Niels.html](http://www-history.mcs.st-andrews.ac.uk/Biographies/Bohr_Niels.html)

[http://en.wikipedia.org/wiki/Niels\\_Henrik\\_David\\_Bohr](http://en.wikipedia.org/wiki/Niels_Henrik_David_Bohr)

Niels Bohr, *On the quantum theory of line-spectra* (1918), [openlibrary.org](http://openlibrary.org)

## Erwin Schrödinger (1887–1961)



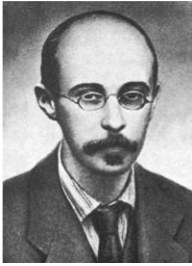
Erwin Schrödinger oli itävaltalainen fyysikko, joka tunnetaan parhaiten Schrödingerin yhtälöstä. Schrödingerin yhtälö on aaltoyhtälö, josta muodostui yksi kvanttimekaniikan perusyhtälöistä.

Schrödinger on syntynyt Wienistä. Hän valmistui Akademisches Gymnasiumista vuonna 1906 ja jatkoi Wienin yliopistossa vuonna 1907. Schrödinger valmistuttua tohtoriksi vuonna 1910 hän toimi kokeellisen fysiikan assistenttina. Schrödingerin ensimmäinen merkittävä julkaisu vuodelta 1914 käsitteli Boltzmannin tilastollista mekaniikkaa. Vuonna 1921 Schrödinger nimitettiin teoreettisen fysiikan professoriksi Zürichiin, missä hän keskittyi atomien rakenteeseen. Vuonna 1927 hänet nimitettiin Max Planckin seuraajaksi Friedrich Wilhelm yliopistoon Berliinissä. Kuuluisan Schrödingerin yhtälön<sup>1</sup> hän esitti vuonna 1926 de Broglie’n työn innoittamana.

Schrödinger lähti Saksasta vuonna 1933 ja luennoi useassa yliopistossa USA:ssa ja Euroopassa.

<sup>1</sup> E Schrödinger, *Quantisierung als Eigenwertproblem*, *Annalen der Physik*, vol. 385, Issue 13, pp.437-490  
<http://www-history.mcs.st-and.ac.uk/Biographies/Schrodinger.html>  
<http://en.wikipedia.org/wiki/Schr%C3%B6dinger>

## Alexander Friedmann (1888–1925)



Alexander Friedmann oli venäläinen fyysikko ja matemaatikko, joka löysi yleisen suhteellisuusteorian kenttäyhtälöihin laajenevaan avaruuteen perustuvan ratkaisun vuonna 1922.

Alexander Friedmann oli syntynyt Pietarissa, missä hän suoritti yliopisto-opintonsa Pietarin valtionyliopistossa. Vuonna 1918 hän sai professuurin Permin valtionyliopistossa.

Friedmannin ratkaisu yleisen suhteellisuusteorian kenttäyhtälöille mahdollisti avaruudelle kaarevuuden, joka voi olla joko nolla tai äärellinen positiivinen tai negatiivinen. Friedmann löysi ratkaisut sekä stationaariselle että ei-stationaariselle universumille. Tulos julkaistiin artikkelissa *Über die Krümmung des Raumes*<sup>1</sup> (*Avaruuden Kaareutumisesta*). Artikkelissa hän totesi, että stationaarinen ratkaisu on mahdollinen vain kahdessa tapauksessa, jotka Einstein ja de Sitter olivat jo analysoineet. Muuttuvan universumin vaihtoehtoja on useita; ”... sellaisia, joissa avaruuden kaarevuussäde kasvaa jatkuvasti, ja sellaisia, joissa kaarevuussäde muuttuu jaksollisesti...”.

Artikkelissaan *Über die Möglichkeit einer Welt mit konstanter negativer Krümmung des Raumes*<sup>2</sup> (*Mahdollisuudesta maailmaan, jossa avaruuden kaarevuus on muuttumaton ja negatiivinen*), Friedmann analysoi yksityiskohtaisesti sekä negatiivisen, positiivisen että nollakaarevuuden vaihtoehdot.

<sup>1</sup> A. Friedmann, *Über die Krümmung des Raumes*, *Zeitschrift für Physik* 10 (1), 377–386 (1922)

<sup>2</sup> A. Friedmann, *Zeitschrift für Physik* 21 (1): 326–332 (1924)

<http://www-history.mcs.st-and.ac.uk/Biographies/Friedmann.html>  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Alexander\\_Friedmann](http://en.wikipedia.org/wiki/Alexander_Friedmann)

## Edwin Powell Hubble (1889–1953)



Amerikkalainen astronomi Edwin Hubble tunnetaan parhaiten havainnoistaan, jotka osoittivat, että kaukaisten galaksien lähettämä valo on sitä enemmän punasiirtynyt mitä kauempana kohteet ovat.

Edwin Hubble oli syntynyt Marshfieldista, Missouriista, josta hänen perheensä muutti Wheatoniin, Illinoisiin, vuonna 1900. Hubble opiskeli matematiikkaa, astronomiaa ja filosofiaa Chicagon yliopistossa ja suoritti kandidaattitutkinnon vuonna 1910, jonka jälkeen hän opiskeli The Queen's

Collegessa, Oxfordissa, Englannissa kolmen vuoden ajan. Oxfordista palattuaan ja toimittuaan vuoden high school -opettajana hän jatkoi astronomian opintojaan Yerkes Observatoriossa, Chicagon yliopistossa, missä hän suoritti tohtorin tutkinnon vuonna 1917. Hänen väitöstyönsä oli *Photographic Investigations of Faint Nebulae* (*Heikkojen Kaasusumujen valokuvatutkimuksia*).

Hubble teki havaintojaan vuodesta 1919 lähtien aikansa suurimmalla, 2,5 m:n teleskoopilla Mount Wilson vuorella Kaliforniassa. Hubblen vuonna 1929 julkaisema tutkimusaineisto osoitti selvää korrelaatiota kohteen etäisyyden ja sen lähettämän valon punasiirtymän välillä. Yhdessä Milton Humasonin kanssa Hubble tulkitsti punasiirtymän Doppler-efektiksi, ja päätteli, että kohteet loittonevat etäisyyksiinsä verrannollisella nopeudella. Analyysissään he käyttivät myös amerikkalaisen astronomin, Vesto Slipherin aikaisemmin tekemiä punasiirtymähavaintoja. Itse asiassa Vesto Slipher oli havainnut punasiirtymän etäisyysriippuvuuden ja oivaltanut sen tulinnan Doppler-ilmiöksi yhdessä kollegoidensa James Keelerin ja William Campbellin kanssa jo vuonna 1917.

<http://www-history.mcs.st-and.ac.uk/Biographies/Hubble.html>

Edwin Hubble, *Photographic investigations of faint nebulae* (1920), [openlibrary.org](http://openlibrary.org)

E. Hubble and M. Humason, *The Velocity-Distance Relation among Extra-Galactic Nebulae*, [Astrophys.J.](#) 74, 43 (1931)

E. Hubble and R. C. Tolman, *Two Methods of Investigating the Nature of the Nebular Redshift*, [ApJ](#), 82, 302 (1935)

E. Hubble, *Effects of Red Shifts on the Distribution of Nebulae*, [Astrophys. J.](#) 84, 517 (1936)

## Louis de Broglie (1892–1987)



Louis de Broglie oli ranskalainen fyysikko, joka tunnetaan parhaiten hänen mukaansa nimetystä *de Broglie* -aallonpituudesta, joka kuvaa liikkuvan partikkelin aallonpituusekvivalenttia.

Louis de Broglie oli syntynyt Seine-Maritime'n alueelta, Pohjois-Ranskasta. Hän aloitti opintonsa humanistisilla tieteillä, mutta suuntautui alkuopintojensa jälkeen matematiikkaan ja fysiikkaan, josta hän suoritti perustutkinnon vuonna 1913, ennen palveluaan Ranskan armeijassa ensimmäisessä maailmansodassa. Opintojaan hän pääsi jatkamaan sodan jälkeen vuonna 1920.

de Broglie pyrki yleistämään Bohrin atomimallin tuottaman ajatuksen elektronin aaltoluonteesta. Väitöskirjassaan vuonna 1924 hän esitti ajatuksen, että avaruudessa liikkuva massapartikkeliä kuvattaisiin avaruudessa etenevällä aallolla. Etenevän aallon liikemäärä määrittäisiin Planckin yhtälöstä siten, että se vastaisi klassisen partikkelin liikemäärää. Tästä saatiin de Broglie -aallonpituus, joka sovitte toisiinsa aallon ja partikkelin liikemäärät.

de Broglie'n aaltohypoteesi sai kokeellisen vahvistuksen amerikkalaisten fyysikkojen, Clinton Davissonin ja Lester Germerin, kokeessa vuonna 1927. Davisson–Germer kokeessa elektronisuihku kohdistettiin nikkelikiteeseen, jolloin heijastuneessa

elektronisuihkussa havaittiin interferenssikuvio, joka vastasi tarkoin de Broglien aallonpituuden nikkelin kidehilassa synnyttämää interferenssiä.

de Broglien aallonpituus soveltuu liikkeessä olevan elektronin tai periaatteessa minkä tahansa liikemäärää omaavan massaobjektin kuvaamiseen. de Broglie ei itse mieltänyt partikkelin nopeudesta riippumatonta massa-aaltoa, sillä hän piti partikkelia lokalisoituneena objektina.

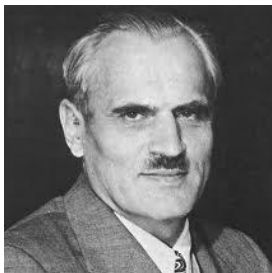
<http://www-history.mcs.st-and.ac.uk/Biographies/Broglie.html>

[http://en.wikipedia.org/wiki/Louis\\_de\\_Broglie](http://en.wikipedia.org/wiki/Louis_de_Broglie)

Louis de Broglie, *Waves and Quanta*, Nature, Volume 112, Issue 2815, pp. 540 (1923)

Louis de Broglie, *Interference and Corpuscular Light*, Nature, Volume 118, Issue 2969, pp. 441-442 (1926)

## Arthur Compton (1892–1962)



Arthur Compton oli amerikkalainen fyysikko, joka tunnetaan parhaiten hänen mukaansa nimetystä *Compton-sironnasta* ja Compton-aallonpituudesta. Comptonin työllä oli tärkeä merkitys kvanttimekaniikan kehittymiseen.

Arthur Compton suoritti tohtorin tutkinnon Princetonia yliopistossa vuonna 1916. Työskenneltyään Minnesotan yliopistossa, Westinghouse Lamp Companyssa ja Cambridgen yliopistossa, hänet nimitettiin fysiikan professoriksi ja fysiikan osaston johtajaksi Washingtonin yliopistoon St. Louisissa, josta hän siirtyi fysiikan professoriksi Chicagoon vuonna 1923. Röntgensäteiden sirontakokeet hän aloitti vuonna 1918, mikä johti Compton-sironnan löytymiseen vuonna 1922. Compton keksi röntgensäteiden kokonaisheijastukseen perustuvan menetelmän atomissa olevien elektronien määrän määrittämiseen, mikä puolestaan johti elektronin varauksen aikaisempaa tarkempaan määrittämiseen. Vuosina 1930–1940 Compton johti maailmanlaajuisia kosmisten säteiden ominaisuuksiin liittyvää tutkimusta. Vuonna 1941 Compton nimitettiin puheenjohtajaksi Kansallisen Tiedekatemian komiteaan, joka arvioi atomiasen käyttöä sodassa. Työ johti ensimmäisten uraanireaktorien sekä lopulta Nagasagin pommiin tarvittun plutoniumin tuottamiseen käytetyn reaktorin rakentamiseen.

[http://en.wikipedia.org/wiki/Arthur\\_Compton](http://en.wikipedia.org/wiki/Arthur_Compton)

## Georges Lemaître (1894–1966)



Georges Lemaître oli belgialainen pappi, astronomi ja Louvainin katolisen yliopiston fysiikan professori. Hän oli ensimmäinen, joka esitti teorian alkupisteestä laajenevasta universumista.

Georges Lemaître aloitti opintonsa insinööritieteillä Louvainin Katolisessa yliopistossa vuonna 1911. Sodan jälkeen hän opiskeli fysiikkaa ja matematiikkaa, ja suoritti tohtorin tutkinnon vuonna 1920.

Vuonna 1923 Lemaître siirtyi Cambridgeen opiskelemaan astronomiaa yhdessä Arthur Eddingtonin kanssa. Hän esitti Einsteinin staattisesta, neliulotteisen pallon pintana kuvatusa avaruudesta lähtien johtamansa laajenevan avaruuden mallin, joka toteutti yleisen suhteellisuusteorian kenttäyhtälöt ja selitti ”Hubblen lain”, jonka Edwin Hubble oli esittänyt punasiirtymähavaintojen selitykseksi. Kirjoitus julkaistiin nimellä *Vakiomassan omaava homogeeninen Universumi, jossa galaksientakaisilla kaasusumuilla on radiaalinen nopeus*<sup>1</sup> belgialaisessa tiedejulkaisussa *Annals of the Scientific Society of Brussels* vuonna 1927. Vuonna 1933 julkaistussa artikkelissaan *L'Univers en expansion (Laajenevasta Universumista)*<sup>2</sup> Lemaître esitti kenttäyhtälöiden epähomogeenisen ratkaisun, joka tunnetaan Lemaître–Tolman metriikkana.

Lemaître jatkoi pitkään tieteellistä työtään. Hän tutki mm. Gaussin menetelmien käyttöä planeettaratojen ratkaisuun kolmeen havaintoon perustuen, kehittäen samalla iterointiprosessin nopeutta. Hän julkaisi töihinsä liittyviä artikkeleita vielä 1960-luvulla.

<http://www-history.mcs.st-andrews.ac.uk/Biographies/Lemaître.html>

[http://en.wikipedia.org/wiki/Georges\\_Lemaître](http://en.wikipedia.org/wiki/Georges_Lemaître)

<sup>1</sup> Georges Lemaître, *Annals of the Scientific Society of Brussels*, 47, 49–59 (1927)

Georges Lemaître, *Expansion of the universe, The expanding universe*, *MNRAS* 91, 490L (1931)

<sup>2</sup> Georges Lemaître, *L'Univers en expansion*, 1933 Ann. Soc. Sci. Bruxelles, A53, 51 (1933)

## Werner Heisenberg (1901–1976)



Werner Heisenberg oli saksalainen teoreettinen fyysikko, joka tunnetaan parhaiten kvanttimekaniikassa keskeisen epämääräisyysperiaatteen muotoilusta sekä työstä matriisiformalismen kehittämisessä.

Heisenberg opiskeli fysiikkaa ja matematiikkaa Arnold Sommerfeldin ja Wilhelm Wienin oppilaana Münchenin yliopistossa 1920-luvun alussa. Valmistuttuaan hän palasi syntymäkaupunkiinsa Göttingeniin, missä hän yhdessä Max Bornin ja Pascual Jordanin kanssa kehitti matriisimekaniikkana tunnettua kvanttimekaniikan formalismia. Vuonna 1926 Heisenberg nimitettiin yliopiston luennoitsijaksi ja Niels Bohrin assistentiksi Kööpenhaminaan, missä hän muotoili nimeään kantavan epämääräisyysperiaatteen. Vuonna 1927 hänet nimitettiin Leipzigin yliopiston teoreettisen fysiikan professoriksi ja fysiikan osaston johtajaksi. 1920-luvun lopulla Heisenberg yhdessä Wolfgang Paulin kanssa kehitti relativistisen kvanttikenttäteorian perusteita. 1930-luvun alussa hän julkaisi Nobel-palkintoon johtaneen työnsä ytimen neutroni-protoni mallista sekä teorian sa positronista.

<http://www-history.mcs.st-and.ac.uk/Biographies/Heisenberg.html>

[http://en.wikipedia.org/wiki/Werner\\_Heisenberg](http://en.wikipedia.org/wiki/Werner_Heisenberg)

W. Heisenberg, *Über quantentheoretische Umdeutung kinematischer und mechanischer Beziehungen*, *Zeitschrift für Physik*, September 1925

## Paul Dirac (1902–1984)



Paul Dirac oli englantilainen fyysikko, joka tunnetaan monipuolisesta teoreettisesta työstään kvanttimekaniikan kehityksessä.

Dirac muotoili Hamiltonin mekaniikan kanssa yhteensopivan kvanttimekaniikan formalismin. Hänen vuonna 1928 esittämänsä Diracin yhtälö on suppean suhteellisuusteorian mukainen kuvaus elektronin aaltofunktiosta. Työ johti mm. ennusteeseen positronista elektronin antihiukkasena ja elektronin  $\frac{1}{2}$ -spiniin. Diracille myönnettiin Nobelin palkinto vuonna 1933 hänen vuonna 1930 julkaisemastaan kirjasta

*Kvanttimekaniikan periaatteet.*

Dirac oli tunnettu selkeästä ilmaisustaan ja pyrkimyksestään matemaattiseen kauneuteen. Hän oli oppinut koululäksynsä: ”Koulussa minulle opetettiin olla aloittamatta lausetta, ellen tiedä miten se päättyy”.

<http://www-history.mcs.st-and.ac.uk/Biographies/Dirac.html>

[http://en.wikipedia.org/wiki/Paul\\_Dirac](http://en.wikipedia.org/wiki/Paul_Dirac)

## Howard Robertson (1903–1961)



Howard Robertson oli amerikkalainen matemaatikko ja fyysikko, joka vaikutti sekä fysikaalisen kosmologian, differentiaalisen geometrian että kvanttimekaniikan kehittämiseen. Parhaiten hänet tunnetaan yhtenä nykyisen FLRW-kosmologian, *Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker* kosmologian kehittäjistä.

Robertson oli syntynyt Hoquiamista, Washingtonin osavaltiota. Hän opiskeli matematiikkaa ja fysiikkaa Seattlessa, ja valmistui vuonna 1923. Tohtoriksi hän väitteli matematiikasta Caltechissa vuonna 1925, aiheenaan *On Dynamical Space-Times Which Contain a Conformal Euclidean 3-Space (Dynaamisista aika-avaruuksista, jotka sisältävät konformaalisen euklidisen 3-avaruuden).*

Robertson kehitti myös yleiseen suhteellisuusteoriaan perustuvan mallin toisiaan kiertäville kaksoistähdille. Malli ei sisältänyt gravitaatioisäteilyä tai muita jarrutusmekanismeja – Robertsonin malli ennusti kaksoistähtien kiertoradat stabiileiksi.

H.P. Robertson, *On the Foundations of Relativistic Cosmology*, *PNAS* 15, 822 (1929)

H.P. Robertson, *The apparent luminosity of a receding nebula*, *Zs.f.Ap.* 15, 69 (1938)

H.P. Robertson, *On the Foundations of Relativistic Cosmology*, *PASP* 67, 82 (1955)

## George Gamov (1904–1968)



George Gamov oli venäläis-amerikkalainen fyysikko, joka syntyi Odessassa, nykyisen Ukrainan alueella. Hänet tunnetaan varhaisena Big Bang teorian kehittäjänä sekä siihen liittyvästä ennusteestaan kosmisesta taustasäteilystä.

Hän aloitti yliopisto-opintonsa Odessassa vuonna 1922 ja jatkoi niitä Leningradissa mm. Alexander Friedmannin johdolla. Väitöskirjatyönsä hän teki kvanttimekaniikasta Göttingenin yliopistossa ja työskenteli Kööpenhaminan yliopistossa vuosina 1928–1931 ja Radium Instituutissa Leningradissa 1931–1933.

Gamov loikkasi vaimonsa kanssa länteen Solvay konferenssin yhteydessä 1933. Hän muutti Yhdysvaltoihin vuonna 1934 ja sai professuurin George Washington yliopistossa Washington D.C.:ssä, missä hän tutki mm. radioaktiivista hajoamista ja astrofysiikkaa. Yhdysvaltojen kansalaisuuden hän sai vuonna 1940.

1940-luvulla hänen työnsä suuntautui yhä enemmän astrofysiikkaan ja kosmologiaan, ja hän kehitteli mm. teoriaa tähtien ja aurinkokunnan synnystä. Hänen tunnetuin työnsä liittyy Big Bang -kosmologian oleelliseksi osaksi muodostuneeseen ydinsynteesiin, josta on mm. pääteltävissä vedyn ja heliumin synty oletetuissa alkuräjähdyksen olosuhteissa. Gamov päätteli myös, että mustan kappaleen säteilyn muotoa oleva alkuräjähdyksen lähettämä säteily voisi olla havaittavissa voimakkaasti punasiirtyneenä taustasäteilynä avaruudessa.

[http://en.wikipedia.org/wiki/George\\_Gamov](http://en.wikipedia.org/wiki/George_Gamov)

## Arthur Geoffrey Walker (1909–2001)



Arthur Walker oli englantilainen matemaatikko, joka osallistui nykyisen FLRW-kosmologian kehittämiseen yhdessä Howard Robertsonin kanssa.

Walkerin erityisala oli geometria; parhaiten hänet kuitenkin tunnetaan yleisen suhteellisuusteoriaan liittyvistä töistään – yhdessä H. P. Robertsonin kanssa kehittämästään ratkaisusta Einsteinin kenttäyhtälöihin, Robertson-Walker metriikasta Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker kosmologiamalliin, sekä yhdessä Enrico Fermín kanssa kehittämästään Fermi-Walker differentioinnista.

[http://en.wikipedia.org/wiki/Arthur\\_Geoffrey\\_Walker](http://en.wikipedia.org/wiki/Arthur_Geoffrey_Walker)

A.G. Walker, *Distance in an Expanding Universe*, *MNRAS* 94,159 (1933)

A.G. Walker, *Formal Comparison of Milne's model*, *MNRAS* 95, 263 (1935)



## David Bohm (1917–1992)



David Bohm oli amerikkalainen fyysikko ja tieteen filosofi, joka tunnetaan erityisesti kvanttimekaniikan tulkintaan liittyvistä ajatuksistaan. David Bohm etsi holistista todellisuuskuvaa, johon kvanttimekaniikan ilmiöt voitaisiin sovittaa ristiriidattomasti ja ymmärrettävästi. Kaiken takana on *piil järjestyks* (*Implicate Order*), jossa systeemi voi esiintyä ei-havaittavassa tilassa. Systeemin stabiilit tilat esiintyvät materiaalisina objekteina, jotka muodostavat havaittavan *ilmijärjestyksen* (*Explicate Order*).

Bohmin pilot-wave teoria, joka tunnetaan myös nimellä de Broglie-Bohm teoria, on deterministinen.

[http://en.wikipedia.org/wiki/David\\_Bohm](http://en.wikipedia.org/wiki/David_Bohm)

## Richard Feynman (1918–1988)



Richard Feynman oli 1900-luvun jälkipuolen merkittävimpiä fyysikkoja. Hän tuli tunnetuksi sekä polkuintegraaliin perustuvan kvanttielektrodynamiikan ja kvanttielektrodynamiikan kehittäjänä että erinomaisena luennoitsijana.

Richard Feynman syntyi Queensissa, New Yorkissa. Hän väitelti tohtoriksi Princetonissa vuonna 1942, jonka jälkeen hän osallistui Manhattan-projektiin Los Alamosissa. Vuodesta 1950 hän toimi fysiikan professorina California Institute of Technology (Caltec) -yliopistossa, luennoituaan teoreettista fysiikkaa viisi vuotta Cornellin yliopistossa.

Luennoillaan Feynman pyrki tekemään fysiikkaa ymmärrettäväksi, mutta myönsi samalla, että ”*kvanttimekaniikkaa ei voi ymmärtää*”.

Monet Feynman’in luennoista on julkaistu kirjoina, kuten *The Character of Physical Law*, *QED: The Strange Theory of Light and Matter*, *Statistical Mechanics*, *Lectures on Gravitation and the Feynman Lectures on Computation*. Feynman voitti opetuksestaan Oersted Medal -palkinnon, mistä hän ansaitusti oli erityisen ylpeä.

[http://en.wikipedia.org/wiki/Richard\\_Feynman](http://en.wikipedia.org/wiki/Richard_Feynman)



PHYSICS FOUNDATIONS SOCIETY  
www.physicsfoundations.org



LUONNONFILOSOFIAN SEURA  
www.lfs.fi

Tuomo Suntolan ”Tieteen lyhyt historia” on kiehtovan asiantunteva – ja rakentavan kriittinen – syväluotaus siitä suuresta löytöretkestä, jonka kautta luonnonfilosofian ja tieteen pioneerit ovat vallitsevan todellisuuskäsityksemme rakentaneet. Ainutlaatuiseksi sen tekee kirjoittajan näkökulma. Hän tarkastelee historiallista prosessia kehittämänsä Dynaamisen Universumin teorian perspektiivistä, mitä kattavaa taustaa vasten monet palapelin asiat ja yhteydet valottuvat ennen näkemättömällä tavalla – ja loksahtavat kauniisti kohdalleen. Kirja antaa lukijalle ainutlaatuisen tilaisuuden itse arvioida nykyisten teorioiden perustana olevien postulaattien kestävyyttä. *Tarja Kallio-Tamminen, FT, teoreettinen filosofia, FM, suurenergiafysiikka*

Teos on poikkeuksellisen kiinnostava esitys tieteen historiasta ja siitä polusta, joka on johtanut nykyiseen tieteelliseen maailmankuvaan. Filosofiseksi kysymykseksi lukijalle jää, kuinka paljon sattuma on johtanut kehitystä ja olisiko nykyinen käsityksemme maailmasta erilainen, jos tehdyt valinnat olisivat olleet toiset. *Heikki Sipilä, TkT, teknillinen fysiikka*

Olisivatko tieteellisen maailmankuvan valinnat olleet toisenlaiset, jos nykyiset havainnot olisivat olleet aikaisempien tutkijoiden tiedossa? Tämä on erinomainen kirja opastetulle matkalle tieteen kehitykseen ja tehtyihin valintoihin haastaessaan lukijan syvälliseen pohdintaan tieteellisen maailmankuvan perusteista. *Ari Lehto, FT, fysiikka*



Tuomo Suntola valmistui tekniikan tohtoriksi Helsingin teknillisestä korkeakoulusta 1971. Ammatillisen työnsä hän on pääosin tehnyt teollisuudessa, kehittäen mm. modernien integroitujen piirien valmistuksessa välttämättömän Atomic Layer Deposition (ALD) teknologian.

*”Luonnon rakenteissa ja prosesseissa toistuvat yksinkertaiset säilymisen ja harmonian lait, jotka filosofisella tasolla avautuivat jo antiikin ajattelijoille. Tässä kirjassa etsitään samoja perusteita modernin tieteen tuottamien teorioiden takaa.”*

ISBN 978-952-68101-4-0 (Sidottu)

ISBN 978-952-68101-5-7 (PDF)