

HAHMOTTAMISEN DYNAMIIKKA EMPIIRISEN TIETEEN METODINA

Kaarle Kurki-Suonio
LFS Tiistaina 27.10.2015

Tiivistelmä. Pohdiskelen esityksessäni sitä ajatusta, että tieteen alku on ihmisen mielen rakentamiseen kuuluvassa hahmotuskyvyssä. Ihmisen asteittain hahmotuva tietoisuus olevasta ja omasta asemasta syntyy mielen ja todellisuuden vuorovaikutuksesta. Tulkitsen empirisen tieteen metodin syntyvän tämän vuorovaikutuksen hierarkkisesta kehityksestä empirian ja teorian vuorovaikutukseksi. Sen dynamiikkaa voidaan tarkastella kolmen kaksisuuntaisen prosessin, tieteellisen, teknologisen ja sosiaalisen, yhteenkietoutumana. Dynamiikan kuusi peruselementtiä, nuo kolme prosessia kaksine suuntineen, voidaan tunnistaa hahmotusprosessissa sen alkuvaiheista lähtien. Tällainen tulkinta tarjoaa kiitollisen lähtökohdan keskustelulle fysiikanopetuksesta.

1 JOHDANTO

Olen saanut ainutlaatuisen tilaisuuden esitellä ajatuksiani tälle viisaiden yhteisölle. Kiitos. Vaikka olenkin ollut täällä äänessä vähän väliä, arvelen, että johdannoksi on sopivaa kerata lyhyesti taustojani.

Vuonna 1973 sain nimityksen virkaan, jonka tehtävänä oli ”**opettajien fysiikan opetus**”. Viran ala oli yleisesti ja epämääräisesti fysiikka. Sen puitteissa olisin voinut harjoittaa mitä tahansa fysiikan tutkimusta, kunhan olisin huolehtinut ”opettajalinjan” hallinnollisista järjestelyistä. Tämä oli selvästi osaston ajatus virkaa perustettaessa. Valitsin kuitenkin toisin. Olin joutunut vastuuseen fysiikan opettajien koulutuksesta. Virkani oli 20 vuoden ajan ainoa tällainen professuuri Suomessa Matemaattis-luonnontieteellisissä tiedekunnissa. Halusin kantaa tämän vastuun.

Olin kyllin naiivi ajatellakseni, että minun pitäisi luoda viralle oma, sen tehtävää vastaava opetusala. Otin käyttöön nimikkeen ”**didaktinen fysiikka**” tarkoittamaan kaikkea sellaista fysiikkaa, joka voisi edistää fysiikanopetusta. Suomen akateemisessa ilmapiirissä tämä tosin merkitsi pitkälti sitä, että opiskeluaikainen painajaisuneni oli käynyt toteen. Unessa olin joutunut muuttujaksi ratkeamattomaan yhtälöön. Piittaamatta siitä, että kollegat pitivät toimintaani fyysikon arvolle sopimattomana, onnistuimme, yhdessä edesmenneen puolisoni Riitan kanssa, rakentamaan vuoteen 1995 mennessä täyden ”didaktisen fysiikan” syventävien opintojen ohjelman. Kerron jotakin siinä yhteydessä syntyneistä ajatuksista, joita olen kutsunut ”käytännölliseksi opetusfilosofiakseni”.

Paljon siitä emme ehtineet kirjoitella:

- Vuonna 1994 saimme kokoon ajatustemme silloisesta kehitysvaiheesta kirjan¹, jota käytimme sitten didaktisen fysiikan opetuskeskustelujen lähtökohtana.
- Joitakin sen ajatuksia esittelimme koti- ja pohjoismaisissa symposioissa ja kotimaisissa lehdissä, kuten matemaattisten aineiden opettajien liiton Dimensiossa.
- Ainoan varsinaisen nk. tieteellisen julkaisun aiheesta väänsin, siihen ankarasti painostettuna, vasta muutama vuosi sitten².
- Pari vuotta sitten esittelin täällä hahmoteorian 100-vuotisjuhlasymposiossa ajatuksiani erityisesti mekaniikan perusteiden opetukseen sovellettuna.³

¹ Kaarle ja Riitta Kurki-Suonio. *Fysiikan merkitykset ja rakenteet*. Limes ry. Helsinki (1994).

² Kaarle Kurki-Suonio. *Principles Supporting the Perceptual Teaching of Physics: A “Practical Teaching Philosophy”* Science & Education 20:211–243 (2011).

³ Kaarle Kurki-Suonio. *Concepts as Gestalts in Physics Teacher Education*. GESTALT THEORY, Vol. 35, No.1 (2013).

En kuvittele esittäväni mitään uutta. Kaikki sanomani on historian kuluessa puitu läpi moneen kertaan. Minulle on osoitettu ajatusteni yhtymäkohtia tieteen suurmiesten ajatuksiin. Tämä on sinänsä lohdullista. Ymmärrän sen merkitsevän, etten ole ollut ihan hakoteillä. Suokaa anteeksi, että puhun kuitenkin ikään kuin omista ajatuksistani, enkä niinkään siitä, mitä kuka kulloinkin on sanonut tai kirjoittanut.

Sen palautteen mukaan, mitä sain kouluttamiltani fysiikanopettajilta, didaktisen fysiikan opit olivat heille uutta. Ne saivat heidät muuttamaan opetustottumuksiaan. Minulla on tallessa aarteeni tällaisia kirjallisia lausumia, muutama varsin rajukin, tyyliin: *”Olin ennen opettanut ihan väärin!”* Tämä esitys on tosin sen verran yleisluonteinen, ettei näiden ajatusten vaikutusta käytännön opetustyöhön välttämättä ole helppoa havaita.

”Käytännöllinen opetusfilosofia” on oma koherentilta maistuva reduktio tieteen ja oppimisen luonteesta, empirian ja teorian ja tieteen ja teknologian suhteesta. Sen pohjalta käydyt opetuskeskustelut, osanottajien opetuskokeilut ja palautteet niistä ovat vaikuttaneet ratkaisevasti sen kehittämiseen. Tämä jatkuva vuorovaikutus käytännön opetustoiminnan kanssa sekä sen yhteydessä ohjaamamme didaktisen fysiikan opinnäytetutkimukset⁴ antavat sen tutkimuksellisen pohjan, johon voin vedota ”filosofiani” tueksi. Muuten voin sanoa työtäni tutkimukseksi *Newtonin* menetelmällä. Kysyttäessä, miten hän oli onnistunut keksimään gravitaatiolakinsa, *Newton* oli vastannut *”by thinking persistently”*.

2 TIEDE JA OPPIMINEN

Ajatteluni siis nousee fysiikanopettajien koulutuksen viitekehyksestä. Ajattelen, että **tiede ja oppiminen ovat sama prosessi kahdella eri tasolla.**

Oppiminen on yksilön prosessi. Siinä on tieteen alku. Tiede on oppimisen luonnollista jatkoa. Se on ihmiskunnan yhteinen kulttuurinen ”suuri prosessi”, joka yhdistää yksilöiden oppimisprosessit. ”Tiedeyhteisö” etenee tieteen kehityksen, yksilö oman oppimisensa eturintamassa. Lapset, opiskelijat ja tutkijat ovat vain saman prosessin eri vaiheissa. Opetuksen tehtävä on ohjata yksilöiden prosessit yhteyteen ihmiskunnan kulttuurisen prosessin kanssa ja auttaa oppilaat osallisiksi siitä. Moni viisas on esittänyt saman ajatuksen:

- *John Dewey* piti tiedettä oppimisen luonnollisena jatkona ja tieteellistä ajattelua jaostettuna maataisjärkenä *”common sense”*.
- *T. H. Huxleyn* mukaan *”science is nothing but well organized layman reason”*.
- *Rolf Nevanlinna* on sanonut: *”scientific thinking is nothing but refined everyday thinking”*.
- *Einstein* oli samaa mieltä: *”Scientific reasoning is nothing but more accurate natural thinking.”* Toisaalta hän sanoi, että *”common sense”* on vain joukko pinttyneitä ennakkoluuloja. Mutta näinhän voi usein kuvata myös tiedeyhteisön suhtautumista uusiin ajatuksiin.

Kysymys ”Mistä tiede alkaa?” on minulle sama kysymys kuin ”Mistä oppiminen alkaa?” Oppiminen on ihmisen koko elinajan kattava prosessi. Se alkaa ihmisen syntyessä tiedostamattomana. Minuuden vähittäinen herääminen tekee siitä tietoista ja lisääntyvästi tahdonvaraista. Mutta tahdosta riippumattakin prosessi jatkuu läpi elämän tavalla tai toisella.

Samoin tieteen alku on ihmiskunnan alkuhistorian hämärässä. Historian tutkimuksen asia on selvittää, miten ja miksi se kehittyi yksilöiden prosesseista tiedeyhteisön harjoittamaksi,

⁴ 223 pro gradua tai laudaturtutkielmaa, 16 lisensiaatintutkimusta ja 7 väitöskirjaa.

tutkimuksen avulla eteneväksi "varsinaiseksi tieteenksi". Sen jatkuminen riippuu ihmiskunnan kohtaloista.

3 HAHMOTTAMINEN

Ajattelen, että tämä prosessi on **perusluonteeltaan hahmotusprosessi**. Tästä syystä minun on arveltu saaneen vaikutteita *Eino Kailalta* tai vielä kauempaa *Ernst Machilta*. Onhan se mahdollista, vaikka en olekaan itse siitä selvästi tietoinen. En muista, milloin aloin käyttää tuota sanaa. Se vain on tuntunut jotenkin itsestään selvästi luonteelta.

Hahmottamisesta puhutaan tavallisesti aistihavaintojen muodostumisen yhteydessä. Termillä luonnehditaan myös signaalien erottamista kohinasta tai yleisemmin järjestyksen etsintää kaaoksesta. Tässä yhteydessä tarkoitan sillä merkitysten luomista, joka mielestäni kattaa nuo erityismerkitykset.

Hahmottaminen on todellisuutta edustavien merkitysten syntymistä ja kehittymistä luonnon ja mielen vuorovaikutuksessa.

Merkitykset ovat ymmärtämisen avain. **Ymmärtäminen on merkitysten hahmottumista osaksi mielen rakennetta ja niiden käsitteellistä hallintaa. Merkitykset syntyvät intuitiivisesti** empirian, havaintojen, kokemusten ja niiden pohtimisen kautta. Niitä ei voi johtaa millään logiikalla. Niiden ainoa peruste on hahmotusprosessi, joka ne luo.

Merkitykset on hahmotettava ennen kuin ne voidaan **käsitteistää**. Opetukseni ensimmäinen motto on ollut "**Merkitykset ovat ensin**". **Käsitteet ovat hahmotettujen merkitysten esityksiä**. Kun, jokin luonnon "aspekti" hahmotetaan, se kiinnittyy mielen rakentamiseen tämän "aspektin" ymmärrettynä merkityksenä, ja sen käsitteistäminen tulee mahdolliseksi. Käsitteet perivät intuitiivisen perusluonteen hahmotetuilta merkityksiltään.

Käsitteistäminen johtaa merkitysten kielelliseen esitykseen ja tekee mahdolliseksi keskustelun niistä. Kirjallisuudesta olen sittemmin löytänyt tukea tälle ajattelulle:

- Arons julistaa klassikkoteoksessaan⁵: "*Idea first and name afterwards*".
- Hadamard on perustellut tätä ajatusta laajassa tutkimuksessaan⁶, joka koski intuitiivista merkitystä matemaattisten ideoiden synnyssä.
- *Nevanlinna* on korostanut voimakkaasti empiirisiä merkityksiä kaiken matematiikan lähtökohtana.
- *Einstein* on kirjoittanut: "*The concepts...get "meaning," viz. "content," only through their connection with sense-experiences*".

4 HAHMOTUSKYKY JA PERUSHAHMOT

Aistihavaintojen muodostumista voidaan pitää oppimisen alkuna. Niinpä siinä on myös empiirinen tiede idullaan. Ihmisen mieli ei ole "*tabula rasa*", johon luonto kirjoittaa. Ajattelen sen sijaan, että ihmisellä on lähtökohtaisesti tietty **hahmotuskyky**, joka ohjaa aistimusten syntyä. Se ohjaa meidät kokemaan luonnon tietynlaiseksi aika- ja paikkasuhteisiin sitoutuneeksi havaittavaksi maailmaksi, jossa

- kaikki, mitä ON, on **olioita**,
- olioille tapahtuu **ilmiöitä**, eli ne "käyttäytyvät" jollakin tavalla, liikkuvat tai muuttuvat.

⁵ Arons A.B. *Teaching Introductory Physics*. John Wiley & Sons, New York. (1997)

⁶ Hadamard J. *An Essay on the psychology of invention in the mathematical field*. Princeton University Press, New York. (1945)

- olioilla ja ilmiöillä on **ominaisuuksia**, jotka voivat olla pysyviä tai muuttuvia
- olioiden, ilmiöiden ja ominaisuuksien välillä on **kausallisia vaikutussuhteita**.

Oliot, ilmiöt, ominaisuudet ja niiden syysuhteet ovat hahmotuskykymme mukaiset **perushahmojen tyypit**.

- Oliot konkretisoivat todellisuuden paikka-aspektin. Ne ovat jossakin. Ne antavat operationaalisen merkityksen paikan käsitteelle. **Paikkoja ei ole ilman olioita**.
- Ilmiöt antavat operationaalisen merkityksen ajalle. **Aikaa ei ole ilman ilmiöitä**. Olion pelkkä oleminenkin on olemista jossakin jolloinkin, ja se on tässä katsannossa ilmiö.
- Hahmotettujen ominaisuuksien perusteella **tunnistamme** olioita ja ilmiöitä.
- Syysuhteiden hahmottaminen luo kuvan ymmärrettävästä maailmasta.

Kieli heijastaa hahmotuskykymme rakennetta. Substantiivit, verbit ja adjektiivit ovat syntyneet tarpeesta käsitteistä oliot, ilmiöt ja ominaisuudet. Niistä rakennetuilla lauseilla kuvataan näiden välisiä yhteyksiä ja syysuhteita. Mihin tahansa fysiikan alueeseen tutustuttaessa on ensimmäiseksi opittava tunnistamaan elinympäristössä esiintyvät tämän alueen perushahmot ja puhumaan niistä. **Fysiikka on luonnosta puhumisen kieltä**.

Hahmotuskyky on eräänlainen pohjapiirustus, puitteet, joihin asteittain hahmottuvat merkitykset kokoavat mielen rakennetta. Se on ihmismielen **primaarinen teoria**. Usein täälläkin julistettu kaikkien havaintojen teorialadannaisuus sisältää tämän ajatuksen.

Ihmismieli syntyy vuorovaikutuksesta luonnon kanssa. Pidän mahdollisena, että hahmotuskyvyn ohjaava olemus on heijastusta tästä alkuperästä niin, että havaitsemiamme olioita, ilmiöitä ja ominaisuuksia syysuhteineen voidaan pitää aidosti olemassa olevina.

Olen usein korostanut, että oliot, ilmiöt ja ominaisuudet ovat oikeastaan kuvitteellisia. Ne ovat mielen rakentamaa, aistien vastaanottamien signaalien tulkintaa. Olen kehottanut oppilaitani ajattelemaan tätä, jotta he osaisivat asettaa oppimansa fysiikan ja siinä kohtaamansa ymmärtämisen ongelmat oikeaan arvoonsa. Mutta ne ovat ymmärryksemme välttämättömiä välineitä. Ne ovat ne merkityselementit, joihin fysiikan kaikkien käsitteiden, lakien ja teorioiden ymmärtäminen nojautuu.

Viittaamalla mielen ja luonnon vuorovaikutukseen ihmismielen hahmotuskyvyn synnyttäjänä olen kuitenkin halunnut jättää avoimeksi senkin mahdollisuuden, että fysiikan teorioihin kiteytynyt ymmärrys on havaittavan ”todellisuuden” oikeutettu ekstrapolaatio ja saattaa kuvata ”oikein” todellisuuden luonnetta ja että siinä on jotakin, jolle ei ole mahdollisia tulkinnallisia vaihtoehtoja.

5 DYNAMIIKKA

5.1 Tieteellinen ja teknologinen prosessi

Fysiikassa dynamiikka on ilmiöiden selittämistä vuorovaikutusten avulla. Vastaavasti tarkoitan **hahmottamisen dynamiikalla** sen tulkintaa **ihmismielen ja luonnon vuorovaikutuksen aiheuttamaksi prosessiksi**.

Tämä vuorovaikutus kytkee mielen ja luonnon erottamattomasti yhteen niin, ettei ole mahdollista sanoa tuottaako luonto mielen vai mieli luonnon. Osapuolten roolit voidaan kuitenkin tunnistaa niin, että on mielekästä puhua niistä ja niiden vuorovaikutuksesta. Luonto tuottaa aistittavia signaaleja. Mieli havaitsee ja tulkitsee luontoa, hahmottaa siinä merkityksiä, mielikuvia, jotka kertyvät mielen rakenteeksi.

Mielen rakenne toimii kahdella vastakkaisella tavalla. Se on luovuuden lähde, joka tarjoaa merkitysten luomisen mahdollisuuden. Toisaalta, se rajoittaa ja säätelee mahdollisten hahmojen luonnetta. Se määrittää sekä ”hahmottamispotentiaalin” että ”-kapasiteetin”.

Vuorovaikutus kohdistuu kumpaankin osapuoleensa. Niin kuin mekaniikassa kahden kappaleen vuorovaikutus ilmenee osapuoliin vaikuttavina voimana ja vastavoimana, niin mielen ja luonnon vuorovaikutuskin vaikuttaa sekä mieleen että luontoon. Kutsun näitä kahta vastakkaissuuntaista vaikutusta **tieteelliseksi ja teknologiseksi prosessiksi**, sillä tulkitsemme tieteen ja teknologian näiden vaikutusten hierarkkisen kehityksen tuloksiksi.

Prosessin määrittää sen tavoite, joka antaa prosessille **etenemissuunnan**.

– Tieteellisen prosessin tavoite on **ymmärtäminen**, todellisuuden käsitteellinen hallinta ja käsitys ihmisen omasta asemasta siinä. Tavoite on saavuttamaton. Mutta, eikö olekin niin, että vain saavuttamattomat tavoitteet voivat olla pysyvästi arvokkaita, niin kuin vain ratkeamattomat ongelmat voivat olla aidosti mielenkiintoisia. Prosessi on siten periaatteessa päättymätön.

– Teknologisen prosessin tavoitteena on **hyöty** eli luonnon muokkaaminen ihmisen toivomusten mukaiseksi.

Prosessi luo **tuotteita**. Tuotteet ovat prosessin edistymiselle välttämättömiä.

– Tieteellisen prosessin tuotteet ovat **käsitteitä ja käsiterakenteita, tietoa** luonnon olioista, ilmiöistä ja ominaisuuksista. **Tieteen saavutukset ovat käsitteellisiä oivalluksia. Tiede rakentaa maailmankuvaa**

– Teknologisen prosessin tuotteet ovat **artefakteja**, uusia olioita, ilmiöitä ja ominaisuuksia, taikka vaikutuksia oleviin. Koska itsekkin kuulumme luontoon, näitä vaikutuksia ovat myös omat uudet toimintavalmiudet ja sopeutuminen luonnon olosuhteisiin. **Teknologian saavutukset ovat keksintöjä. Teknologia rakentaa maailmaa.**

Prosessin **edistyminen ilmenee tuotteista**. Mutta tuotteet eivät ole prosessi, eivätkä ne sellaisenaan edistä prosessia. Niinpä opetuksen tieteellisyysskään ei ole tieteen uusimpien tulosten tarjoamisessa, vaan ohjaamisessa tieteelliseen prosessiin. Opetuksen tarkoitus ei ole nostaa Tarzaneita puuhun, vaan opettaa heidät kiipeämään.

5.2 Hahmottava empiria

Vain **mieli on aktiivinen osapuoli** tässä vuorovaikutuksessa. Mielen aktiivisuus on prosessien käyttövoima. Luonnon rooli on mielen luoma metafora.

– **Tieteellinen aktiivisuus** suuntautuu ontologisiin kysymyksiin. Se kysyy mitä ja millaisia olioita ja ilmiöitä on, miten ne riippuvat toisistaan ja vaikuttavat toisiinsa. Se **etsii vastauksia tutkimalla luontoa**.

– **Teknologinen aktiivisuus** suuntautuu käytäntöön. Se kysyy, miten oliot ja ilmiöt ominaisuuksineen ja syysuhteineen vaikuttavat tai voisivat vaikuttaa elämäämme ja elinympäristöömme. Se pyrkii **ratkaisemaan** tähän liittyviä **ongelmia manipuloimalla luontoa**.

Vain mielen aktiivisuus tekee **hahmottavan empirian** mahdolliseksi. Tämä koskee kaikkea empiriaa aistihavainnoista alkaen. Tätä korostaa opetukseni toinen motto: **Tutkimalla saa selville!** Tieteellisen prosessin lähtökohtainen empiria ei merkitse, että luonto kertoo

itsestään ja me kuuntelemme. Empiriaa voidaan perustellusti luonnehtia kysymiseksi luonnolta.

Kerrotaan, että *Eino Kaila* oli joskus aloittanut luentonsa astumalla avoimen ikkunan ääreen huudahtaen dramaattisesti: *”Luonto, kerro, mikä sinä olet!”* En ole kuullut tarinan jatkoa.

Mutta ei luonto kerro. Jos vain käymme kuuntelemaan, luonto jaarittelee mitä sattuu. **Koejärjestely on kysymyksen muotoilua** luonnon ”ymmärtämälle” operationaalisuuden kielelle. Eikä kysymyksen muotoilu riitä. **Luonto on pakotettava vastamaan** juuri asetettuun kysymykseen, ja sen muu lavertelu on vaiennettava. Kaksi alkeisesimerkkiä.

1. Mekaniikan luennollani tarkasteltiin kerran vierimistä. Demoassistentti vieritti pyöreitä kappaleita kaltevalla radalla ja mittaili, mitä mittaili. Kerran rulla kierähti sivuun ja koe piti uusia. Neitokainen eturivistä tokaisi: *”Tällaista fysiikka on, koetta toistetaan, kunnes saadaan toivottu tulos.”* Minä siihen: *”Olet sekä oikeassa että väärässä. Kokeen lähtökohtana on tunnistettu ilmiö, tässä vieriminen. Sitä tutkittaessa hyväksytään vain sellaiset kokeet, joissa tämä ilmiö toteutuu. Mutta sellaisten kokeiden tulokset, joissa se toteutuu, otetaan vastaan sellaisina kuin ne saadaan.”*

2. Opettajien täydennyskoulutuskurssilla tarkasteltiin kokeita, joiden avulla voitaisiin hahmottaa jousen varassa riippuvan kappaleen liikkeen erilaisia riippuvuussuhteita ja määrittää niiden tunnusuuhteita. Yhtenä perusasiaana määritettiin liikkeen jaksonajan riippuvuutta kappaleen massasta. Heräsi kysymys jousen oman hitauden vaikutuksesta. Sen selvittämiseksi valittiin pitkä jousi ja keveitä kappaleita. Tutkittavaksi ilmiöksi tunnistettiin perusvärähtely, jossa jousi värähtelee koko mitaltaan samassa tahdissa. Sen toteuttaminen vaati kuitenkin suurta huolellisuutta. Luonto ei ihan helposti alistunut vastaamaan asetettuun kysymykseen. Sitä piti tarkkaan paimentaa, jotta saataisiin kelvollisia vastauksia.

5.3 Sosiaalinen prosessi

Tieteellinen ja teknologinen prosessi toimivat ja etenevät **sosiaalisen prosessin** alaisina. Siitä voidaan käyttää konstruktivistisen oppimisteorian termiä **”neuvottelu merkityksistä”**. Sen tavoitteena on ymmärryksen yhteisyys, yhteiset merkitykset. Ei ole yksityistä tiedettä eikä teknologiaa. Oppiminenkin tavoittelee alusta lähtien yhteisiä merkityksiä.

Sosiaalinen prosessi syntyy mielten vuorovaikutuksesta, joka yhdistää mielet eräänlaiseksi **sosiaalseksi yhteismieleksi**, joka kokonaisuutena on vuorovaikutuksessa luonnon kanssa. Sosiaalinen prosessi kattaa tieteellisen ja teknologisen prosessien kaikki elementit, tavoitteet, merkitykset, tuotteet, proseduurit, tulkinnat jne. Se tuo yksilöiden ja yhteisöjen motivaatiot, tarpeet ja toiveet tietoiselle tasolle yhteisesti arvioitaviksi ja sovittaviksi.

Tieteen ja oppimisen prosessien tärkein periaatteellinen ero on selvästikin sosiaalisen prosessin luonteessa, mutta en ehdi tässä ryhtyä sen pohtimiseen.

5.5 Yhteen kietoutuminen

Hahmottamisen dynamiikan kolme prosessia ovat erottamattomasti yhteen kietoutuneet ja muodostavat dynaamisen kokonaisuuden.

Tieteellinen prosessi ei elä ilman teknologista, eikä teknologinen ilman tieteellistä – niin kuin voimaa ei ole ilman vastavoimaa. Ne sekä tarvitsevat että ruokkivat toisiaan.

Tieteellisen prosessin hahmottava empiria vaatii luonnon manipulointia, joka kuuluu teknologiseen prosessiin. Perustutkimusta tekevän tutkimuslaboratorion tavoitteet määrää tieteellinen prosessi, mutta sen toiminnan arkea hallitsee teknologinen prosessi. Toisaalta, etenevä käsitteellinen hallinta luo uusia teknologisia mahdollisuuksia.

Vastaavasti teknologinen artefaktien kehittäminen edellyttää niiden empiirisen merkityksen hahmottamista. Toisaalta, teknologisen prosessin tuottamalla artefakteilla on usein ratkaiseva merkitys tieteellisen prosessin etenemiselle ja uusien käsitteellisten ideoiden oivaltamiselle.

- *Arkhimedeen* koneet johtivat statiikan ja hydrostatiikan lakien oivaltamiseen.
- *Voltan* sähköpari uuden fysiikan alueen kehitykseen.
- Lämpövoimakoneet antoivat alun termodynamiikan kehitykselle jne.

Dynamiikan kolme prosessia ovat samanaikaisesti mukana kaikissa hahmotuksen vaiheissa. Ne myös jättävät jälkensä kaikkiin tuotteisiin. Niin käsitteillä kuin artefakteilla, on aina **kolminkertainen merkitys**, tieteellinen, teknologinen ja sosiaalinen.

Tästä kolmelle prosessille rakentuvasta dynamiikasta seuraa myös suoraan se, mitä olen täällä aikaisemmin esittänyt tiedon perusteluista. Tiedolle tarvitaan aina **kolminkertainen perustelu**, empiirinen, teoreettinen ja sosiaalinen – tässä järjestyksessä.

6 PROSESSIN ALKUVAIHEISTA

Minulla on tallessa varsin yksityiskohtaisia merkintöjä yhden lapsen parin ensimmäisen vuoden kehityksestä. Niistä on helppoa tunnistaa tieteellisen, teknologisen ja sosiaalisen prosessin roolit ja prosessin etenemisen perusvaiheet.

Aluksi lapsi tavoittelee keskittyneesti ja kokonaisvaltaisesti omien aistimiensa, kehon ja raajojen tunnistamista ja hallintaa sekä vuorovaikutusta niiden avulla kodin lähiympäristön kanssa.

Perushahmojen mukaisia **merkityksiä syntyy** paljon ennen kuin niiden käsitteistäminen tulee mahdolliseksi. ”Merkitykset ovat ensin!”. Lapsi oppii tunnistamaan

- **olioita**: kädet, sormet, varpaat, äidin, tyynyn, ruuan, tutin, helistimen jne.
- **ilmiöitä**: kosketuksen, syömisen, liikkeen, lämpenemisen, erilaisia ääniä jne.
- näiden **ominaisuuksia**, kovan, pehmeän, lämpimän, kylmän jne. sekä
- näiden välisiä **kausalisuhteita**: äiti syöttää, lämmittää, kädellä voi tarttua esineisiin ja liikuttaa niitä, helistimellä saa aikaan äänen. Äiti tulee, kun itkee. jne.

Tämä **tieteellinen prosessi** vaatii **teknologista prosessiä**, vaikuttamista näihin olioihin ja ilmiöihin ja ilmiöiden tuottamista, aistien ja raajojen harjoittamista, erilaisten äänten tuottamista, esineiden koskettelua, maistelua, liikuttamista ja käyttämistä. Näkyy hyvin, miten kokonaisvaltaista ja kaikkia aisteja tarvitsevaa hahmottaminen on ja miten tärkeätä oppimiselle on oma osallistuminen ilmiöihin. Pari poimintoa:

- ”Tänään (ikä 10 viikkoa) hän huomasi oikean kätensä, katsoi sitä vähän hämmästyneenä näköisenä pitkän aikaa.”
- ”Äiti tarjosi kättään tartuttavaksi. Mahtava keskittyminen, oikea jalka pumppasi hurjasti ja oikea käsi jännittyi ja haki oikeaa liikesuuntaa hitaasti, kunnes löysi sen ja nousi sitten koskettamaan äidin kättä useita kertoja.

– Seuraavana päivänä hän löysi kätensä uudella tavalla, leikki pitkään tunnustelemalla käsiään.”

Hahmotuksen etenemistä uusiin kohteisiin on jännittävää seurata. En vaivaa enemmällä esimerkeillä. Totean vain, että abstraktisiakin hahmoja opitaan tunnistamaan jo varhain:

- Ikä 4 kk. ”Ihastunut lauluun ”Aasilla Buffaloon”. Tunnistaa sävelmän ensi tahdeista.
- Ikä 8 kk. ”Tunnisti Mozartin klarinettikvinteton variaatiot, kun teosta soitettiin radiossa, katsoi ihmetellen vuoroin radioon ja vuoroin pianoon, jolla isä oli niitä soittanut.”

Mistä ja milloin tällainen hahmojen tunnistus ja merkitysten rakentaminen oikein alkaa?

Äidin odotusaikana harjoittelin pianolla päivittäin Mendelssohnin ”Vakavia muunnelmia”. Sitten teos jäi vuosiksi sivuun. Lapsi oli jo kouluiässä, kun seuraavan kerran otin nuotit esiin ja aloin palauttaa sitä mieleen. Lapsi tuli kuin narusta vedettynä lastenhuoneesta ja kysyi: ”Isi, mitä sinä soitat?”

Käsitteistämisen tarve herää, ja se orastaa jo ennen puhumaan oppimista. Jossakin vaiheessa sitä vain huomaa, että lapsen tietyt ääntelyt edustavat tiettyjä merkityksiä. Sanojen oppimisessa tietyt sosiaalinen prosessi on olennainen. Mutta tässäkin lapsi on luova. Mozartin klarinettikvinteton variaatioiden hahmoa kutsuttiin nimellä ”gäggä”.

7 RAKENTEELLINEN HAHMOTUS

7.1 Rakenteellisuus

Hahmotus on alusta alkaen rakenteellisia. Oliot ja ilmiöt hahmotetaan suhteessa muihin olioihin ja ilmiöihin. Ominaisuudet eivät leiju ilmassa. Ne ovat aina jonkin ominaisuuksia. Tämä itsestäänselvyydeltä tuntuva toteamus on yllättävän tärkeä fysiikan ymmärtämisen kannalta.

Suuret ovat mitattavia ominaisuuksia. Niillä on aina jokin ”kantaja”, olio tai ilmiö, jonka ominaisuuksia ne ovat. Suuret ovat **fysiikan peruskäsitteitä**. Kun mitataan, mitataan suureita, ja suureet ovat kaiken teorian peruselementtejä. Teoreettiset ennusteet koskevat suureiden arvoja.

On ollut hämmentävää huomata, miten läpäisevästi fysiikan kielenkäytössä suureista puhutaan tyyliin: ”*Tunnetaan massa ja voima, laske kiihtyvyyttä*.” levitoivina abstraktioina kytkeä niitä kantajiinsa, jotka ovat niiden merkityksen kannalta olennaiset. Olen opetus-työssäni kohdannut paljon tästä johtuneita väärinkäsityksiä ja ymmärtämisvaikeuksia. Kysymyksessä, ”**minkä mikä ominaisuus tämä suure on**”, on kaikkien suureiden merkityksen avain. Se on siten kaiken, sekä kokeellisen että teoreettisen fysiikan ymmärtämisen perusta. Mutta se on osoittautunut yllättävän ongelmalliseksi. Ajatelkaapa vaikka suureita voima, energia ja entropia.

Hahmon syntyminen ja mieltäminen joksikin olioksi, ilmiöksi tai ominaisuudeksi vaatii jatkuvia ja toistuvia ja toisiaan tukevia yhtäpitäviä aistimuksia eri aisteilla. Hahmo muodostuu, kun aistimusten ja kokemusten yhtäpitävyys koetaan intuitiivisesti riittäväksi. Sitä edeltää sen tähden aina **hapuuluvaihe**, jota *Hadamard* luonnehtii näin: “... *mainly unconscious incubation stage and the preceding “preparation stage” of conscious attempts to “solve a problem”*”.

7.2 Pysyvyys

Yhtäpitävyyden kokemus johtaa intuitiiviseen vakuuttumiseen siitä, että hahmo on ”todellinen”. Hahmottamalla luotu ymmärrys on sen tähden luonteeltaan pysyvää. Hahmot kiinnittyvät mielen rakenteen elementeiksi, osaksi kehittyvää ymmärrystä. Kerran hahmotettu tuoli, pallo, putoaminen, pyöreä, punainen jne. on aina tuoli, pallo, putoaminen, pyöreä, punainen. Sama pätee prosessin edetessä hahmotettuihin rakenteellisiin hahmoihin. Kerran hahmotetut massan, voiman ja kentän merkitykset ja vuorovaikutuksen ja liikkeen kausaalisuhteen mielikuva säilyvät mielessä. Varauksen, sähkövirran ja magnetismin hahmot rakenteellisine yhteyksineen tarttuvat oppijan mieleen hänen kehittyvän maailmankuvansa pysyviksi elementeiksi.

Intuitiivisesti oikeaksi ja todeksi koettu ymmärrys on tunnetusti hyvin stabiili mielen rakenne. Pysyviksi juurtuneet hahmot tarjoavat kasvualustan oppimisprosessin etenemiselle. Mutta ne myös pönkittävät mielen rakenteen vastakkaista, hahmotusta säätelevää roolia. Tulee vaikeuksia, kun uudet empiiriset näytöt vaatisivat muuttamaan käsityksiä. Opettajat tietävät hyvin, miten vaikeata on saada opiskelijoita muuttamaan intuitiivisia ”arkikäsityksiään”, kun ne ovat omista arkikokemuksista hahmottuneita. Kasvatustieteellinen kirjallisuus on pullollaan niiden tutkimusta.

Tästä ongelmasta keskusteltiin kurssellani paljon. Eräs osanottaja, kokenut fysiikanopettaja kertoi omasta kokemuksestaan: Tunnin aiheena oli ilmanvastus. Piti kuvailla laskuvarjohyppääjän liikettä. Eräs oppilas sanoi, että varjon auetessa hyppääjä lähtee äkkiä ylöspäin. Opettajan yllätykseksi luokka yhtyi tähän kantaan *in corpore*. Tämä televisiosta nähty ”tosiasia” oli niin vahvasti juurtunut mieliin, että hänellä oli suuria vaikeuksia keskustelun johtamisessa kohti oikeampaa kuvausta.

Hahmojen periaatteellinen pysyvyys ei tietenkään estä ”käyttämättä jäävien” hahmojen ”haalustumista” eikä ”huoltamatta” jäävien rakenteiden ”ruostumista”. Mutta tämä on kuitenkin olennaisesti eri asia, kuin palasten putoileminen irtotiedon kokoelmasta, vaikka ulkoa opitut detaljit saattavatkin olla hyvin pysyviä – niin kuin minulla koulussa opitut saksan prepositioiden luettelot.

7.3 Portaittainen kehitys

Empiiriset merkitykset eivät ole koskaan lopullisia. Fysikaalisen käsitteen kehitykseen kuuluu peräkkäisten **merkitysten ketju** tai merkitysten **verkko**. Niiden jokaisella vaiheella tai solmukohtalla on oma erilainen pätevyys- tai käyttöalueensa. Käsitteet luodaan yksinkertaisista pelkistetyistä tilanteista. Niitä täsmennetään ja yleistetään kattamaan laajempia tai kokonaan uusia olio- ja ilmiöjoukkoja. Arons sanoo tämän näin: “... *scientific terms go through an evolutionary sequence of redefinition, sharpening, and refinement as one starts at a crude, initial, intuitive level, ...*”.

Käsitteiden nk. **määritelmät ovat aina avoimia**. Valmiista määritelmistä lähtevä perinteinen oppikirjaesitys antaa sen tähden harhaanjohtavan kuvan fysiikan luonteesta. Määritelmät eivät ole prosessin lähtökohtia vaan tuotteita, edistyvän ymmärryksen välietappeja. Niillä on aina niihin johtaneen empirian mukainen rajallinen pätevyysalue.

Käsitteen kehitys etenee portaittain jatkuvasti laajenevan ja täsmentyvän empirian pakottamana. Jokaiseen askeleeseen kuuluu oma hapuiluvaiheensa, joka edeltää uutta kehittyneempää hahmoa. Jokainen etappi on kuitenkin empiirisen perustansa luoma ”**valmis hahmo**”, joka säilyttää merkityksensä omalla pätevyysalueellaan.

Tämä portaittainen kehitys ja sen etappihahmojen pysyvyys koskevat kaikkia hahmoja rakenteellisuuden asteesta riippumatta. Fysiikan varsinaiset teoriat, kuten klassinen mekaniikka, sähködynamiikka ja kvanttimekaniikka ovat korkeimman tason rakenteellisia hahmoja. Esimerkiksi Newtonin mekaniikka on pysyvä hahmo, jolla on oma vakiintunut empiirinen merkityksensä omalla pätevyysalueellaan. Lagrangen mekaniikka, Hamiltonin mekaniikka, jopa kvanttimekaniikka ja suhteellisuusteoria eri muodoissaan edustavat uusia vaihteita liikkeen ja vuorovaikutusten ilmiöalueen ymmärtämisen kehityksessä. Niiden hahmottumisen vaatimat pitkät hapuiluvaiheet ovat luonnollista seurausta niiden valtavasta rakenteellisuuden asteesta. Ne eivät kuitenkaan kyseenalaista Newtonin mekaniikan alkuperäistä oikeutusta.

7.4 Teoreettisuusaste

On ollut tapana ajatella, että fysiikassa on erikseen empiirisiä ja teoreettisia käsitteitä. Teoreettiset käsitteet määritellään muiden käsitteiden rakenteellisina yhdistelminä (algebraalisina lausekkeina). Rakenteelliset relaatiot muodostaisivat tyhjentävästi niiden merkityksen.

Fysiikan opetuksessa on usein ”unohdettu” suureiden alkuperäinen empiirinen merkitys olioiden ja ilmiöiden ominaisuuksina. Esimerkiksi liikemäärä, työ, voima ja energia on usein otettu käyttöön ”teoreettisina suureina” pelkkien teoreettisten tarkastelujen perusteella, jopa vain kaavoina.

– Fysiikan oppikirjoista ei juuri hakemallakaan löydy **liikemäärälle** ja **työlle** muuta lähtökohtaista esittelyä kuin kaavat $p = mv$ ja $W = Fs$. Kuitenkin liikemäärän ja työn kaavat voidaan kirjoittaa vasta niiden empiiristen merkitysten perusteella.

– **Voima** on selitetty teoreettiseksi käsitteeksi, jonka ymmärtäminen ei ole edes mahdollista ennen kuin *Piaget*’n formaalisten operaatioiden tasolla. Voiman hahmottaminen vuorovaikutuksen voimakkuudeksi ei kuitenkaan vaadi erityistä ”formaalista ajattelua”, vaikka se ei olekaan aivan suoraviivaista.

– *Feynmanin* mukaan⁷ **energia** on matemaattinen käsite: *“There is a law governing all natural phenomena ... called the conservation of energy. ... That is a most abstract idea, because it is a mathematical principle; ... it is just a strange fact that we can calculate some number and when we finish watching nature go through her tricks and calculate the number again, it is the same. ... However, there are formulas for calculating some numerical quantity, and when we add it all together it gives ... always the same number. It is an abstract thing in that it does not tell us the ... reasons for the various formulas.”*

Niin suuri nero kuin *Feynman* olikin, tässä kohdassa olen eri mieltä. Energian säilymlaki ei ole sen matemaattisempi periaate kuin muutkaan fysiikan lait. Kaavoilla, joihin hän tässä viittaa, on ”reasons”, empiiriset merkitykset, jotka luonto on kertonut, kun siltä on oikein osattu kysyä. Ja vasta näiden merkitysten esityksenä kaavat ovat saaneet muotonsa. Monessa muussa yhteydessä, esim. Brasilian fysiikan opetusta arvioidessaan, *Feynman* itsekin päivittelee empiiristen merkitysten puuttumista opetuksesta, vaikka hän ei tätä sanaa käytäkään.

Käsitteenmuodostuksen tulkinta hahmotusprosessiksi johtaa toisenlaiseen ajatteluun. Hahmotetuilla käsitteillä voidaan sanoa olevan **teoreettinen merkitys**, jonka määrittää niiden asema teorioiden käsiterakenteissa eli suhteet teorian muihin käsitteisiin.

⁷ Feynman RP, Leighton RB, Sands M. *The Feynman Lectures on Physics, vol I*. Addison Wesley, New York. (1963)

Jokaisella teoriolla on tietyt perus- tai lähtösuureet, joiden avulla muotoillaan ilmiöiden malleja ennusteiden määrittämiseksi joillekin johdettaville suureille. (Tällä ei ole mitään tekemistä suure- ja yksikköjärjestelmän perus- ja johdannaissuureiden ja -yksiköiden kanssa, jotka perustuvat sopimukseen.)

Esimerkiksi *Newtonin* mekaniikan perussuureita ovat massa ja voima. Energia ja liikemäärä kuuluvat johdettaviin suureisiin. *Lagrangen* ja *Hamiltonin* mekaniikassa energian ja voiman asemat ovat vaihtuneet. Energiasta on tullut teorian perussuure. Olen sanonut tätä kehitysaskelta invarianttien vallankumoukseksi. Energian perustava asema siirtyy sitten edelleen kvanttimekaniikkaan, jossa voimalla ei enää ole mitään asemaa.

Käsitteiden **teoreettiset merkitykset ovat teoriaspesifiset**. Yksittäisten käsitteiden merkitykset ovat erilaiset eri teorioissa yksinkertaisesti, koska jokainen teoria on oma rakenteensa. Sen sijaan niiden primaariset **empiiriset merkitykset**, kuten ajan, massan ja voiman merkitykset tapahtumien aikaväleinä, kappaleiden hitauksina ja vuorovaikutuksen vektorivoimakkuutena **ovat teoriasta riippumattomat**. Ne muodostavat niiden kaikkien teoreettisten merkitysten yhteisen ytimen, johon teorioiden kokeellisesti testattavat ennusteet palaavat.

Merkitysten hahmotetut relaatiot johtavat rakenteellisiin hahmoihin, joista syntyy uusia käsitteitä. Tällaiset käsitteet on mielletty teoreettisiksi. Voima ja energia ovat tyypillisiä esimerkkejä. Niidenkin primaariset merkitykset ovat kuitenkin empiirisiä. Uudet käsitteet ovat aikaisemmista käsitteistä koostuvia rakenteellisiä hahmoja. Niiden rakenteellisuus kasvaa hierarkkisesti prosessin edetessä, mikä voidaan tulkita kasvavaksi **teoreettisuusasteeksi**. Tämä ei kuitenkaan muuta sitä perusasiaa, että käsitteiden ydinmerkitys on niiden hahmotettu intuitiivinen empiirinen merkitys, johon fysiikan kehittyessä liittyy erilaisia teoreettisia merkityksiä. Käsitteideni mukaan **puhtaasti teoreettisia käsitteitä ei fysiikassa ole**.

8 HIERARKKINEN KEHITYS

Aistihavainnoista alkava hahmotusprosessi käy läpi valtavan hierarkkisen kehityksen, joka koskee kaikkia sen elementtejä. Se rakenteistuu opiskeluksi, tieteeksi ja teknologiaksi.

8.1 Tuotteet

Tieteellinen prosessi johtaa hierarkkisesti kerrostuvaan käsiterakenteeseen, jonka uudet kerrokset aina perustuvat edellisille.

Vastaava tuotteiden hierarkkinen kehitys on helppo nähdä teknologisessa prosessissa, joka on muokannut ihmisen luonnollisen elinympäristön tuotteittensa ja proseduuriensa kyllästäväksi teknologiseksi ympäristöksi.

Fysiikan käsitteellisen ymmärryksen kehityksessä voidaan erottaa kaksi linjaa: **yhdentyminen** ja **täsmentyminen**. Kumpikin generoi omaa hierarkiaansa. Fysiikan käsittehierarkia rakentuu niiden yhteisestä punoksesta.

Yhdentyminen on sitä, että joukko yksittäisiä olioita, ilmiöitä tai ominaisuuksia koetaan "ymmärretyiksi", kun ne hahmottuvat yhden yleisemmän erityistapauksiksi. Hyvän esimerkin tarjoaa sähködynamiikan kehitys, jossa sähköinen vuorovaikutus, sähkövirta, magnetismi ja valo asteittain hahmottuvat yhden ja saman ilmiön, sähkömagnetismin eri ilmene-mismuodoiksi.

Täsmentyminen taas merkitsee ennen muuta kvalitatiivisen käsitteistön **kvantifiointia** suureiksi, laeiksi ja teorioiksi.

Nämä kaksi kehityslinjaa tarjoavat hyvän rungon fysiikan kaikkien eri alueiden opetukselle, mutta niiden lähempi tarkastelu ei tässä ole mahdollista.

8.2 Ymmärrys

Hahmottaminen kerryttää mielen rakennetta. Ymmärretyt hahmot ovat edelleen hahmottamisen perusaineistoa. Mielen rakenne, joka muodostaa edistyvän ymmärryksen perustan, kumuloituu ja laajenee. Mielen hahmotuspotentiaali, **ymmärtämisen kyky kasvaa** prosessin edetessä.

Tästä seuraa ymmärrykselle **luonnollisen kasvun laki**, jonka mukaan ”organismien” kasvunopeus on verrannollinen sen kokoon. Tämä merkitsee eksponentiaalista kasvua. Voidaan siis perustellusti ajatella, että hahmotukseen perustuvassa oppimisessa **ymmärrys kasvaa eksponentiaalisesti**, kun ”rutiinioppimisessa” tiedot **kertyvät lineaarisesti**. Nämä oppimisen äärimallit toteutunevat opiskelussa aina jossakin määrin rinnakkain.

Tieteen ja teknologian kehitys tukee ajatusta prosessin eksponentiaalisesta luonteesta. Siitä on esitetty monenlaisia indikaatioita. Viime perjantaina *Esko Valtaoja* esitti Tampereella tekniikan päivillä Maailman bruttokansantuotteen kehityksen, johon eksponenttifunktio sopi täydellisesti. Oppimisen tulkinta samaksi prosessiksi rohkaisee ajattelemaan, että hahmottavalla lähestymisellä myös oppimiseen voidaan saada eksponentiaalisuutta.

8.3 Empiria ja teoria

Empirian ja teorian vuorovaikutus on **tieteen metodinen ydin**, josta kaikki empiirisen tieteen tuottama ymmärrys rakentuu. Se on siten väistämättä avainasemassa myös opetuksessa, jonka tulisi ohjata tämän ymmärryksen rakentumiseen opiskelijoissa. Se onkin **fysiikan opetuksen ikuinen perusongelma**. Se kulminoituu opettajien asennoitumisessa kokeellisuuteen, jota varjostaa matematiikan ylivoimainen osuus fysiikan opettajien suorittamissa tutkimuksissa. Kysymys on, ei enemmästä eikä vähemmästä kuin opetuksen tiedellisyydestä.

Hahmotusprosessin kehityksessä **luonnon ja mielen vuorovaikutus samastuu empirian ja teorian vuorovaikutukseen**.

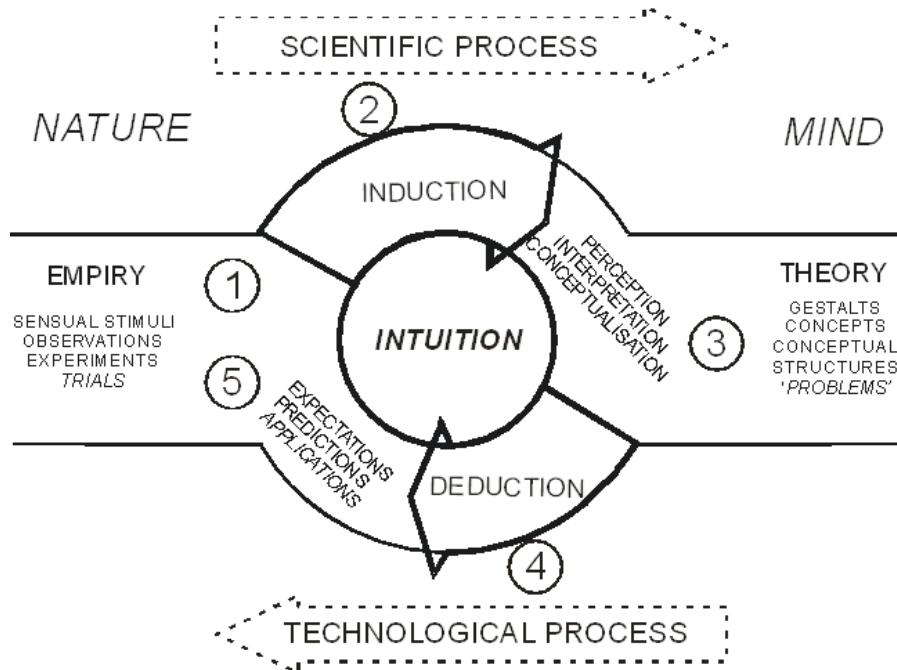
Empiria merkitsee yleisesti havaintoja ja kokemuksia. Se käy läpi kehityksen aistimuksista tietoisien havaintojen, kvalitatiivisten ja kvantitatiivisten kokeiden kautta kokeelliseen tutkimukseen ja organisoituihin tutkimusprojekteihin.

Teoria on tässä yleisessä merkityksessä **empirian vastakohta**. Se viittaa kaikkien käsitteiden teoreettiseen luonteeseen riippumatta niiden hierarkkisesta asemasta. Se samastuu mielen kumuloituvaan rakenteeseen. Sen elementit käyvät läpi hierarkkisen kehityksen vaiheet hahmoista ja mielikuvista, kvalitatiivisten ja kvantitatiivisten käsitteiden kautta käsitteellisiin, kausaalimalleihin ja teorioihin – sanan spesifisessä merkityksessä.

8.4 Hahmotuksen rakenteistuminen

Tietoisten proseduurien käyttöönotto rakenteistaa luonnon ja mielen intuitiivisen vuorovaikutuksen peräkkäisiksi vaiheiksi: empiria, induktio, teoria, deduktio. Näistä muodostuu kuvan esittämällä tavalla jatkuvasti toistuva metodinen sykli.

Sykliin kuuluu **kokeellisia proseduureja** (1) kokeellisten tutkimusten suunnittelua varten ja yhä tarkempien mittausten ja luotettavampien koetulosten tuottamiseksi yhä tehokkaammin, sekä paljolti matemaattisiin menetelmiin ja laskentaan perustuvia **teoreettisia proseduureja** merkitysten hahmottamisen tueksi. On proseduureja koetulosten käsittelyä ja tulkintaa varten (2), tästä seuraavaa käsitteiden ja käsiterakenteiden muodostusta varten (3) ja teoreettisten ennusteiden määrittämistä varten (4). Ennusteiden empiirinen testaaminen vaatii uusia kokeita (5), jotka tuottavat uutta, täydentävää dataa seuraavan kierroksen työstettäväksi.



Termejä **induktio ja deduktio** käytän tässä "arkisesti" samassa mielessä kuin esim. *Arons* puhuu induktiivisesta ja deduktiivisesta päättelystä, ilman formaalisen logiikan muodollisia rasitteita. Ne toimivat vastakkaisiin suuntiin empirian ja teorian välillä.

Induktio on yleistävää. Se suuntautuu erityisestä yleiseen. Empiiristen merkitysten hahmottaminen, havaintojen tulkinta ja käsitteistäminen ovat induktioaskelia. Induktiivinen päättely johtaa spesifisistä havainnoista ja koetuloksista yleisiin teoreettisiin päätelmiin ja tulkintoihin, hypoteeseihin, käsitteisiin, käsitteiden relaatioiksi ymmärrettyihin lakeihin, kausaalimalleihin ja lopulta teorioihin.

Deduktio on spesifioivaa. Se suuntautuu yleisestä erityiseen. Mielikuviin, malleihin ja teorioihin perustuvat odotukset ja ennusteet ovat deduktiopäätelmiä, jotka koskevat tiettyjä olioita ja ilmiöitä tietyissä olosuhteissa.

Ennusteiden testaaminen vaatii uusia kokeita. Koetulokset johtavat uusiin induktiivisiin päätelmiin, tarkempaan mielikuviin käsitteitten pätevyydestä ja uusien käsitteiden hahmottamiseen sekä edelleen uusiin ennusteisiin ja uusiin kierroksiin.

Valmius tarkistaa käsityksiään yhä uudelleen uuden empiirisen näytön perusteella on tietelle ominaista. Arkiajattelulle on tyypillistä juuttuminen yhden tai kahden syklin tuottamaan päätelmään tyyliin "nuoriso on turmeltunutta" ja "maahanmuuttajat ovat rikollisia". Tämä on se pieni ratkaiseva ero tieteellisen ja arkiajattelun välillä.

Sama dynamiikka ylläpitää teknologista prosessia. Siinä toimii sama metodinen sykli. Toki teknologisilla proseduureilla on omat erityisluonteensa, jotka seuraavat prosessin vastakkaisista suunnista ja eri tavoitteesta.

9 INTUITIIVISEN LUONTEEN PYSYVYYS

9.1 Tietoisuuden tulo

Prosessin **hahmotusluonteen tunnusmerkki on sen intuitiivisuus, joka ilmenee empirian ja teorian erottamattomuutena**. Hierarkkisessa kehityksessä prosessiin tulee yhä enemmän tietoisia elementtejä. Proseduurit, jotka rakenteistavat hapuiluvaiheet peräkkäisiksi operaatioiksi vaativat tietoista aktiiviteettia. Tämä luo tieteestä ja teknologiasta mielikuvan tietoisena rationaalisen prosessina. Syklin jokainen vaihe perustuu kuitenkin sen rooliin merkitysten luomisessa, teorian ja empirian erottamattomuuteen ja siis intuitioon.

9.2 Induktiovaiheet

Tämä on ilmeistä kaikissa **induktioaskelissa**. Empiriaan perustuvat yleistävät päätelmät eivät voi perustua pakottavaan loogiseen välttämättömyyteen.

Perushahmojen tunnistaminen on intuitiivista. Hahmot ovat lukemattomien havaintojen pelkistyksiä **ideaalisen ”puhtaan” olion, ilmiön tai ominaisuuden ideoiksi** tai mielikuviksi. *Rolf Nevanlinna* on tarkastellut useissakin artikkeleissaan tätä havaintojen reduktio- ja idealisointiprosessia käsitteenmuodostuksen perustana. Hahmo omaksutaan ”määritelmäksi” ja nimetään. Havainnot tulevat näin tulkituksi ”määritelmän” erilaisiksi esiintymiksi. Tällä tavalla hahmotus ja käsitteistäminen merkitsevät aina intuitiivista idealisoivaa mallintamista. Puhuessamme olioista, ilmiöistä ja ominaisuuksista käsitteillämme, me oikeastaan viittaamme näihin intuitiivisiin ideaalimalleihin.

Ilmiön ”puhtaus” edellyttää sen eristämistä ja riippumattomuutta kaikesta muusta. Sen tähden ilmiön tutkimus vaatii laboratorio-olosuhteita, joissa ”riittävä” eristys voidaan toteuttaa. Ilmiön hahmottamiseen kuuluu aina myös mahdollisten häiritsevien tekijöiden tunnistaminen. Jotta tutkimusta voitaisiin pitää **empiirisesti oikeutettuna** ”puhtaan” ilmiön tutkimuksena, tarvitaan intuitiivinen varmuus siitä, että häiritsevien tekijöiden vaikutukset voitaisiin huolellisella koejärjestelyllä pienentää ”pienemmiksi kuin epsilon” eli mitä tahansa ennalta asetettua ylärajaa pienemmiksi. Yritän valaista tämän toteutuksen merkitystä parilla mekaniikan opetuksen alkuvaiheen kokeella:

1. Mekaniikan käsitteenmuodostus voi lähteä liikkeelle siitä hahmotetusta intuitiivisesta perusideasta, että **vain vuorovaikutukset voivat muuttaa kappaleen liiketilaa**. Tästä seuraa heti, että **vapaat kappaleet** eli kappaleet, jotka eivät ole osallisina missään vuorovaikutuksissa **liikkuvat tasaisesti**. Tämä **intuitiivinen idea** tunnetaan **jatkavuuden lain** tai Newtonin I lain nimellä. Puhdas ilmiö, jonka havaitseminen oikeuttaisi idean, on siis **”vapaan kappaleen tasainen liike”**. Mutta ”vapaa kappale” on mahdottomuus. Intuitiivisesti voidaan kuitenkin ajatella ”horisontaalisen vapauden” tilaa, jota voidaan lähestyä pienentämällä liikevastuksia vaakasuoralla alustalla. Nykyisessä opetuksessa tämä motivoi ilmatyynyradan tai ilmatyynypöydän käytön. Tasaisen liikkeen tutkimuksen idea saattaa kuitenkin tulla havainnollisemmin esiin, jos tarkastellaan ”vanhanaikaisesti” kappaleita liukkaalla alustalla. Kitkan pienentäminen mielivaltaisen pieneksi tuntuu mahdolliselta ajatukselta, joka oikeuttaa pitämään tutkimusta ”vapaan kappaleen” tutkimuksena.

2. **Vierivät kappaleet kovalla alustalla** tarjoavat toisen mahdollisuuden empiirisesti oikeutettuun tasaisen liikkeen tutkimukseen. Tasainen liike voidaan niiden avulla to-

teuttaa opetuksessa paljonkin tarkemmin. Kuitenkin, kun opetus sitten etenee vapaiden kappaleiden törmäysten tutkimiseen, vierivien kappaleiden käyttö ei enää olekaan empiirisesti oikeutettua. Liikkeen vierimislouheen säilyminen törmäyksessä perustuu vaakasuoriin kitkaimpulsseihin. Ne muodostavat ehdottoman rajan, jota pienemmäksi vaakasuoria ulkoisia voimia ei ole mahdollista pienentää.

Suureiden käyttöönotto hahmotettujen ominaisuuksien esityksinä vaatii jokaiselle ominaisuudelle erikseen oman intuitiivisen **kvantifioivan idean**. Kvantifiointi on fysiikan käsitteenmuodostuksen ”ahdas portti”, jonka läpi on pakko kulkea edettäessä kvalitatiivisesta ilmiöiden tarkastelusta kvantitatiiviseen. (Se oli opettajankoulutuksessa yksi oudoimmiksi koetuista uusista asioista, ja siitä riittäisi paljon puhumista.)

Lait ovat ilmeisiä intuitiivisia pelkistyskäsitteitä ja yleistyksiä. Kokeellisesti voidaan havaita ilmiöissä toisiinsa liittyvien suureiden korrelaatioita. Ne tulkitaan osoitukseksi suureiden välisestä riippuvuudesta ”puhtaissa ilmiöissä”, ja niitä esitetään suureiden kuvitteellisten tarkkojen arvojen välisillä algebrallisilla yhtälöillä. ”Sisäinen silmämme” etsii tarkkoja lakeja epätarkkojen mittaustulosten takaa. Intuitiivisesti **pidämme lakia mittaustuloksia aidompana todellisuuden esityksenä**. Näin oikeutamme mitta-arvojen tasoituksen, interpolaation ja ekstrapolaation ja tulosten yleistyksen muihin systeemeihin ja tilanteisiin.

Teoriat ovat korkeimman hierarkiatason käsitteitä. Teoria on tiettyjen peruslakien virittämä koherentti käsitteellinen rakenne, joka ymmärretään tietyn ilmiöluokan ilmiöiden **selittäväksi malliksi**. Esimerkiksi, Newtonin mekaniikka ja Maxwellin sähködynamiikka ovat teorioita tässä mielessä. Teorian kaikilla elementeillä, suureilla, laeilla ja niiden relaatioilla on empiiriset merkitykset. Niistä rakentuu itse **teorian intuitiivinen empiirinen merkitys**, joka tekee mahdolliseksi empiiriset ennusteet.

9.3 Deduktiovaiheet

Empiirisen tieteen metodisessa deduktiossa esiintyy matematiikan pakottavan logiikan alaisia vaiheita, mutta kokonaisuutena se on intuitiivista siinä kuin induktiokin. Jokainen spesifinen teoreettinen ennuste koskee jonkin ”puhtaaksi” ajatellun ilmiön jotakin hahmotettua esiintymistilannetta. Ensimmäiseksi tämä esiintyminen on sovittava ilmiötä koskevan teorian viitekehukseen. Sille on luotava teorian mukainen malli. Tämä vaatii tilanteessa hahmottuvien empiiristen merkitysten identifiointia ja intuitiivista samastusta teorian rakenteen ja rakenne-elementtien merkityksiin.

Sitten, kun tämä on onnistunut, seuraa matemaattinen probleema, jonka määrittää teorian formaalinen rakenne. Fysiikan kannalta tämä on loogisen välttämättömyyden sanelema itseäänselvyys. Kuitenkin myös laskenta operoi empiirisillä merkityksillä, jotka on pidettävä mielessä koko laskennan ajan.

Lopulta, empiiriset merkitykset määräävät tulosten mahdolliset tulkinnat.

– *Hadamard kirjoittaa: “Some mathematicians are ‘intuitive’ and others ‘logical’”, mutta lisää “...every mental work and especially the work of discovery implies the cooperation of the unconscious ... there is hardly any completely logical discovery. Some intervention of intuition ... is necessary at least to initiate the logical work.”*

– *Einstein sanoo kirjeessään Hadamardille: “the desire to arrive finally at logically connected concepts is the emotional basis of this rather vague play with the above-mentioned elements. ... this combinatory play seems to be the essential feature in productive thought – before there is any connection with logical construction ...”.*

Olen päätenyt *Hadamardiakin* tiukempaan kantaan ilmeisen yhtäpitävästi *Einsteinin* kanssa: **Loogista ajattelua ei ole**. Sekin, mitä *Hadamard* kutsuu loogiseksi työskentelyksi, on intuitiivista logiikan tavoittelua. Hahmotuksen hapuiluvaihe on **loogisen rakenteen intuitiivista tavoittelua**. Rakenteellinen hahmo koetaan ”valmiiksi”, kun sille on onnistuttu saamaan intuitiivisesti riittävä sisäinen looginen konsistenssi.

Tämä näkyy hyvin tieteellisten ideoiden ja tulosten muotoilun vaivalloisessa prosessissa. Tavoitellun rationaalisen esitystavan logiikka on intuitiivisen prosessin tulosta. Mutta tieteellisessä artikkelissa tulokset esitetään, ikään kuin ne olisi saavutettu ”loogisesti”. **Teeskennelty logiikka on tieteen ”valkoinen valhe”**, joka helposti peittää näkyvistä tieteen intuitiivisen perusluonteen.

10 OSAPUOLTEN EROTTAMATTOMUUS

Tiede ja teknologia voidaan esitetyllä tavalla tulkita hierarkkisesti laajentuneeksi luonnon ja mielen vuorovaikutukseksi. *Rolf Nevanlinna* kuvaa useissakin julkaisuissaan yksityiskohdaisesti tieteen, erityisesti matematiikan kehittymistä jokapäiväisestä aistein havaitsemisesta. Tiede ja teknologia ovat kuin *Kirsi Kunnaksen*⁸ ”*Marjan pikku sammakko*”, joka ”*hiivapalan söi, paisui niin kuin taikina ja päänsä kattoon löi*”.

Tieteen ja teknologian yhteinen alkuperä on siinä, mistä oppiminen alkaa, varhaisissa aistimusten hahmotuksessa – tai jopa jossakin vielä aiemmassa vaiheessa, mielen ja todellisuuden alkuykseyden hiivapalassa. Mihin niiden kehitys sitten johtaakaan? Runon jatko: ”*ja aamusella auringon ... se vahingossa nielaisi ja poltti suunsa pahasti.*” kuulostaa enteelliseltä.

Prosessin alussa vallitseva luonnon ja mielen ykseys säilyy empirian ja teorian erottamattomana yhteen kietoutumisena. Niiden vuorovaikutus on niin vahva, että se hävittää osapuolten erilliset identiteetit. Tieteessä ja teknologiassa kaikki on samanaikaisesti sekä teoreettista että empiiristä. Ei ole erikseen ”empiirisiä ja teoreettisia termejä”. Kaikki käsitteet, suureet, lait ja teoriat ovat **duaalisia empiiris-teoreettisia entiteettejä**, vaikka prosessin edetessä muodostuukin yhä korkeamman ”teoreettisuusasteen” käsitteitä. Niin kuin ei ole puhtaasti empiiristä kokeellisuutta, ei ole puhtaasti teoreettisia teorioitakaan, **kaikki empiria on teorialadannaista ja kaikki teoria empirialadannaista**. Kirjallisuudessa korostetaan usein havaintojen teorialadannaisuutta sivuuttaen teorian empirialadannaisuuden.

Samoin kuin empiria ja teoria, myös tiede ja teknologia ovat tässä vuorovaikutuksessa yhteen kietoutuneet. Niiden vuorovaikutus hävittää niiden identiteetin. Kaikki tiede on teknologialadannaista ja kaikki teknologia tiedeladannaista.

Intuitio kytkee nämä peruselementit ”eläväksi kokonaisuudeksi”. Se sitoo tieteen ja teknologian empiirisiin merkityksiin, käynnistää ja ylläpitää niiden vastakkaisiin suuntiin etenevät tavoitteelliset prosessit, joilla on yhteinen syklinen dynamiikka.

⁸ Kirsi Kunnas. *Tiitiäisen satupuu*. WSOY (1968)

Järvenpäässä torstaina 29.10.2015

KESKUSTELUSSA ESIIN OTETTUJA KYSYMYKSIÄ

Kuuntelijat virittivät esitykseni pohjalta mielenkiintoisen, rakentavan kritiikin sävyttämän keskustelun. Kiitos siitä. Mainitsen tässä lopuksi muutaman muistamani aiheen:

Yrjö Reenpää.⁹

Reenpää on yksi niistä monista johdannossa tarkoittamistani tieteen suurmiehistä, joiden esittämiin ajatuksiin ”opetusfilosofiallani” on sanottu olevan yhtymäkohtia. Hänestä on minulle kerrottu jo melko varhain ajatusten kehittelyvaiheessa. Kun kysytään, onko hänet unohdettu, vastaukseni on, etten ole voinut unohtaa, kun en valitettavasti ole hänen kirjoituksiaan lukenut. Ehkä vielä ehdin, jos elää saan.

Laiminlyöntini on aiheutunut siitä, että olen vain fyysikko ja hän fysiologina edustaa hyvin erilaista luonnontieteen aluetta. Ajatuskehittelyjeni painopiste on ollut fysiikan opettajien koulutuksessa. Olen keskittynyt sen tähden siihen, mitä tämä ”opetusfilosofia” merkitsee fysiikan eri alojen opetuksen käytäntöjen kannalta.

Tämä ”filosofia” on tavallaan ”sivutuote”. Sen kehittämistä ja siitä keskustelua olen pitänyt tärkeänä opettajankoulutuksessa siksi, että opettaja mielestäni tarvitsee selvän ”taustafilosofian” opetuksensa suunnittelun ja käytännön ratkaisujensa perustaksi.

Yksi tärkeimpiä asioita opettajan työssä on sen tiedostaminen, että hän opetuksellaan puuttuu oppilaittensa oppimisprosessiin, joka on jo pitkälle edennyt. Osatakseen oikein ohjata sitä hänen on välttämätöntä harjaantua näkemään siinä jo valmiina olevat tieteen prosessuaaliset elementit. Sen tähden olen pitänyt tärkeänä huomion kiinnittämistä prosessin alkuvaiheisiin ja näiden elementtien kehittymiseen ja yleisemminkin prosessin psykofysiikkaan. Mutta jo ajan rajallisuuden vuoksi nämä näkökulmat on ollut pakko jättää sivuosaan paneutumatta yksityiskohtiin ja niiden tutkimuksellisiin taustoihin.

Abduktion suhde ”hahmottamisen dynamiikkaan”.

Abduktio on minulle uusi käsite, josta kuulin ensimmäisen kerran viime keväänä¹⁰. Vaikutelma, jonka silloin sain, oli sellainen, että abduktio sopii hyvin yhteen ”opetusfilosofiani” kanssa.

Abduktiosta puhuttiin ikään kuin se olisi jotakin induktion ja deduktion rinnalle tai pohjaksi tarvittavaa ”intuitiivista logiikkaa”, vähän kyseenalaisesti ”naisen logiikaksi” leimattua. Intuition vahva korostus sai minut ajattelemaan, että abduktion käsitteen käyttöönotto loogisten prosessien, induktion ja deduktion rinnalle sisältää pitkälti saman ajatuksen kuin esittämäni hahmottamisen dynamiikan erittely: Induktio ja deduktio, sellaisina kuin niistä puhutaan arkisesti empiirisen tieteen yleistävänä ja spesifioivana päättelynä, ovat intuition kyllästä-mää ”teeskenneltyä logiikkaa.” En ole varma siitä tulkitsisinko abduktion ihan suoraan samaksi kuin hahmotuksen dynamiikka, vai pitäisinkö sitä sen hierarkkisen rakentumisen välietappina.

⁹ Aivan hiljan sain sähköpostitse vasta ilmestyneen kirjan *From Psychophysics and Psychophysiology to Phenomenology of Perception: The Ontological and Epistemological Approach of Yrjö Reenpää* by Tapani Jauhiainen, Veikko Häkkinen, Dieter Schaffrath. www.amazon.com/dp/B014V1ACHE. Sen lähetti minulle ystävällisesti ensimmäinen tekijä, jonka tytär on ollut oppilaanani opettajankoulutuksessa.

¹⁰ Luonnonfilosofian seuran teemailta: Pragmatismi. 31.3.2015.

Etiikan asema.

Esittämässäni ”hahmottamisen dynamiikassa” eettinen näkökulma tulee mukaan prosessiin sosiaalisen prosessin kautta. Etiikka on yksi ”merkityksistä neuvottelun” tärkeimpiä näkökulmia. Tässä dynamiikan rakenteen erittelyssä etiikka koskee suoranaisesti teknologista prosessia, joka ”muuttaa maailmaa” ja vaikuttaa ihmisten elämään. Tieteellistä prosessia se koskee prosessien erottamattoman yhteen kietoutumisen kautta.

Opettajankoulutuksen kursseihin sisältyi jakso, jossa pohdittiin yhteisesti tieteen ja teknologian, tutkimuksen, opetuksen ja opiskelun etiikkaa.

Mahdollinen ristiriidan epäily empirian korostuksen ja ”*tabula rasa*” -idean kieltämisen välillä.

Ymmärrän kysyjän näkökulman, kun hän epäilee, että empirian korostukseni itse asiassa merkitsisi mielen pitämistä ”*tabula rasana*”. Painotan uudelleen kahta esittämääni ajatusta, joilla olen pyrkinyt torjumaan tämän epäilyn.

1. Puhun rakenteesta, joka ihmismielellä on mielen ja luonnon erottamattomuuden takia, mielen ”primaarisena teoriana”. Samalla, kun se luo empiiristen merkitysten muodostumisen mahdollisuuden se säätelee niiden hahmottumista.

2. Mielen ja luonnon vuorovaikutuksessa vain mieli on aktiivinen osapuoli. Tämä merkitsee, että sillä on primaarisen rakenteen ohella myötäsyntyinen merkitysten hahmottamisen tarve, intentio, jota myös kosketeltiin erikseen jossakin kommenttipuheenvuorossa.

Vaikka syntyvässä mielessä ei vielä hahmotettuja merkityssisältöjä olekaan, siinä piilee primaariteoria ja intentio, joiden vuoksi se on paljon enemmän kuin ”*tabula rasa*”.

Ajatus mielestä ”*tabula rasana*”, johon empiria kirjoittaa, johtaa opetuksessa siihen, mitä kutsun ”naiiviksi empirismiksi”. Olen toistuvasti joutunut torjumaan sellaisia tulkintoja tai pelkoja, että ”filosofiani” johtaisi tällaiseen opetukseen, jossa uskotaan oppilaiden itse keksivän kaikki ihmiskunnan nerojen oivallukset vain sopivia kokeita tekemällä. Pois se minusta!

Korrelaatioiden tulkinta riippuvuudeksi ja edelleen laeiksi.

Korrelaatioiden intuitiivinen tulkinta riippuvuudeksi, sellaisena kuin siitä puhuin, kuuluu hahmotukseen. Kausaalisuhteet ovat yksi primaarihahmojen perustyyppi. Riippuvuuden hahmo on etukäteen valmiina tutkittavaksi. Tämä hahmo on kuitenkin kuvitteellinen tai metafyyminen samassa mielessä kuin olen korostanut hahmotettujen olioiden, ilmiöiden ja ominaisuuksien kuvitteellisuutta, erotukseksi havaintojen objektiivisesti todeksi osoittamalle. Suureet, joiden keskinäistä riippuvuutta fysiikassa tutkitaan, ovat tarkasteltavassa ilmiössä ”yhteen kuuluvia”, sellaisiksi hahmotettuja. Kokeen tarkoitus on selvittää, missä määrin tätä hahmoa voidaan pitää empiirisesti oikeutettuna.

Ymmärsin, että esitetty kommentti viittasi korrelaatioihin, joita esimerkiksi sosiologisissa tutkimuksissa voidaan havaita ennalta ”yhteen kuulumattomiksi” hahmotettujen ominaisuuksien välillä, ja niistä seuraaviin – joskus pilailumielisiin – riippuvuustulkintoihin. On tietysti mahdollista, ja näinhän tapahtuukin, että tutkimuksessa havaitut korrelaatiot johtavat oikeutettuihin riippuvuustulkintoihin. Tutkimus on tällöin toiminut hahmotusta edistävänä proseduurina.