

DI Paul Talvio

Toimiiko GPS-järjestelmä
kaikilta osin Suhteellisuus-
teorian mukaisesti?

Alustus Luonnonfilosofian seuran
tilaisuudessa 30.10.2018

Ajan ominaisuudet:

Nykyhetki. Tapahtuma on olemassa vain nykyhetkessä. Tapahtuman aika fysiikassa on tapahtuman paikassa olevan kellon lukema. ("Tällä tavalla annetaan jokaiselle tapahtumalle ajanhetki, joka on periaatteessa havaittavissa")

Kesto. Kesto on kahden nykyhetken välinen aikaero. Ajan määritelmästä seuraa, että kesto jossakin paikassa on siinä olevan kellon lukemien erotus.

Samanaikaisuus. Samanaikaisuus on kahdessa eri paikassa olevien kellojen näyttämien samuutta.

Kello

- Kello on laite, jossa on jokin samaa tapahtumaa toistava ilmiö (tikitys) ja niitä kumulatiivisesti laskeva ilmaisin. Kellokoneiston rakenne määrittelee sen montako pulssia siirtää ajan lukemaa esim. yhden sekunnin.

Heilurikello

- Heilurikellon heilahdusaika on
- $T = 2 \pi \sqrt{l/g}$
- Jos kello viedään kauemmaksi maasta niin gravitaatiokiihtyvyys g pienenee ja kello alkaa käydä hitaammin. Silloin lyhennetään heilurin pituutta l ja heilahdusaika saadaan entiseksi.
- Jos taas kello lämpiää, niin heilurin varsi pitenee ja kello käy hitaammin. Silloinkin lyhennetään heilurin pituutta l ja heilahdusaika saadaan entiseksi..

Atomikello

Atomikellon taajuus syntyy elektronin hyppimisestä atomin kuorella kahden energiatason välillä. Gravitaatiopotentiaali ja liike gr-kentässä vaikuttavat suoraan elektronin energiatilaan ja siten sen resonanssitaajuuteen. Yhtälö on sama kuin suhteellisuusteoriassa.

$$f_v = f_0 \sqrt{1 - 2GM/rc^2 - v^2/c^2}$$

$$\approx f_0 (1 - GM/rc^2 - \frac{1}{2} v^2/c^2)$$

Atomaariseen resonaattoriin liitetään kumulatiivinen laskin. Siihen voidaan asettaa se lukumäärä pulsseja joka siirtää ajan näyttöä yhden sekunnin. Jos siis kelloa siirretään esim. Maan gravitaatiokentässä tai sen liiketilaa muutetaan, niin laskimen sekuntia vastaava pulssimäärä asetetaan niin, että kello käy aina haluttuun tahtiin.

Peruskello

- Jotta voisimme verrata eri paikoissa ja eri aikoina tehtyjä ajanmittauksia, niin meidän täytyy olettaa, että mittaajilla on ollut samanlaiset kellot. On siis valittava kello, johon kaikkia muita kelloja verrataan. Tuosta peruskellosta on vain uskottava, että se tikittää tasaisella nopeudella.
- **Nykyinen peruskello on cesium 133 atomikello paikassa Boulder, Colorado, USA. Aika, jonka tuo tikittäjä tarvitsee tehdäkseen 9.192.631.770 jaksoa, määrittelee yhden sekunnin.**
- Nimenomaan siis noin monta jaksoa ja piste; ei siis noin monta jaksoa sekunnissa, sillä peruskellon taajuutta ei voi mitata.
- Muiden kellojen samassa ajassa tekemiä tikitysmääriä voidaan verrata peruskellon tikitysmääriin ja esim. säätää niitä, mutta ei koskaan päinvastoin. Näin on ihmiskunta sopinut (vuonna 1967), mikään luonnonlaki se ei ole. Cesiumkellojen stabilisuus on yhden suhde 10^{15} eli 1 sek. 27:ssä miljardissa vuodessa - ja vielä tarkempaan ollaan menossa.

Ajatuskokeista on tullut empiriaa

Teknologian kehitys on antanut meille mahdollisuuksia, joista Einsteinin aikalaiset eivät osanneet edes uneksia. (Ensimmäinen toimiva atomikello 1955)

Niitä ovat:

- kellot, joiden tarkkuus on yhden suhde 10^{15} (pian jo parempikin) Virhe voi olla 1 sekunti 80 miljoonassa vuodessa.
- voimme seurata taajuuksia kumulatiivisilla laskimilla, kaukoasettaa ja kaukolukea niitä
- voimme kaukoasettaa lukemia kelloihin ja kaukolukea niitä
- voimme lähettää informaatiota digitaalisesti koodattuna

On erityisesti huomioitava, että digitaalisesti koodattuna informaatio radiosignaalissa säilyy muuttumattomana gravitaatiopotentiaalin ja nopeuden vaihteluista huolimatta ja missä tahansa koordinaatiston vaihdossa. Se on luonnon todellinen invariantti.

Havainnot atomikelloilla

1. Hafele – Keating

- Vuonna 1971 tehtiin koe, joka tunnetaan Hafele-Keating kokeen nimellä. Siinä pantiin atomikellot kiertämään lentokoneissa myötä- ja vastapäivään maapallon ympäri, kolmas kello jäi maahan.
- **Kun kellot palasivat maakellon luo, niin itään mennyt kello oli jätettänyt $59 \text{ ns} \pm 10 \text{ ns}$ ja länteen mennyt kello edistänyt $273 \text{ ns} \pm 7 \text{ ns}$.**
- Suhteellisuusteorian mukaan odotettiin, että kumpikin kello olisi jätettänyt, koska ne liikkuvat maakellon suhteen. Oikea tulos saatiin kuitenkin, kun laskettiin kellojen liike pyörimättömässä Maakeskeisessä koordinaatistossa. Nopeimmin on siis liikkunut itään mennyt kello, toiseksi nopeimmin maakello ja hitaimmin länteen mennyt kello. Lepokello sijaittisi Pohjois- tai Etelänavalla, ei lentokentällä.

2. Satelliittikello

- Vuonna 1974 The US Naval Observatory lähetti ensimmäisen atomikellon avaruuteen kiertämään Maata. Todettiin, että sen tikitystaajuuden muutos ei noudattanut Suht. teorian kaavaa, jos nopeuden v paikalle pantiin kellon suhteellinen nopeus maakelloon nähden. Tuo nopeus ei edes pysy vakiona.

Nopeudeksi piti laittaa niin maakellolle kuin satelliittikellolle niiden nopeus Maa-keskeisessä pyörimättömässä koordinaatistossa.

Nuo nopeudet ovat muuttumattomia ja niin oli myös tikitystaajuuksien ero.

Myös synkronointi antoi aina saman tuloksen riippumatta siitä missä suunnassa satelliitti oli Maan rataliikkeeseen nähden.

3. Radiosignaalin kulku aika

- National Bureau of Standards USA lähetti (Science, April 1985) radiosignaaleja kiertämään Maapalloa myötä- ja vastapäivään. Havaittiin, että ne saapuivat takaisin aikaerolla, joka vastasi vakio-nopeutta Maa-keskeisessä pyörimättömässä koordinaatistossa.

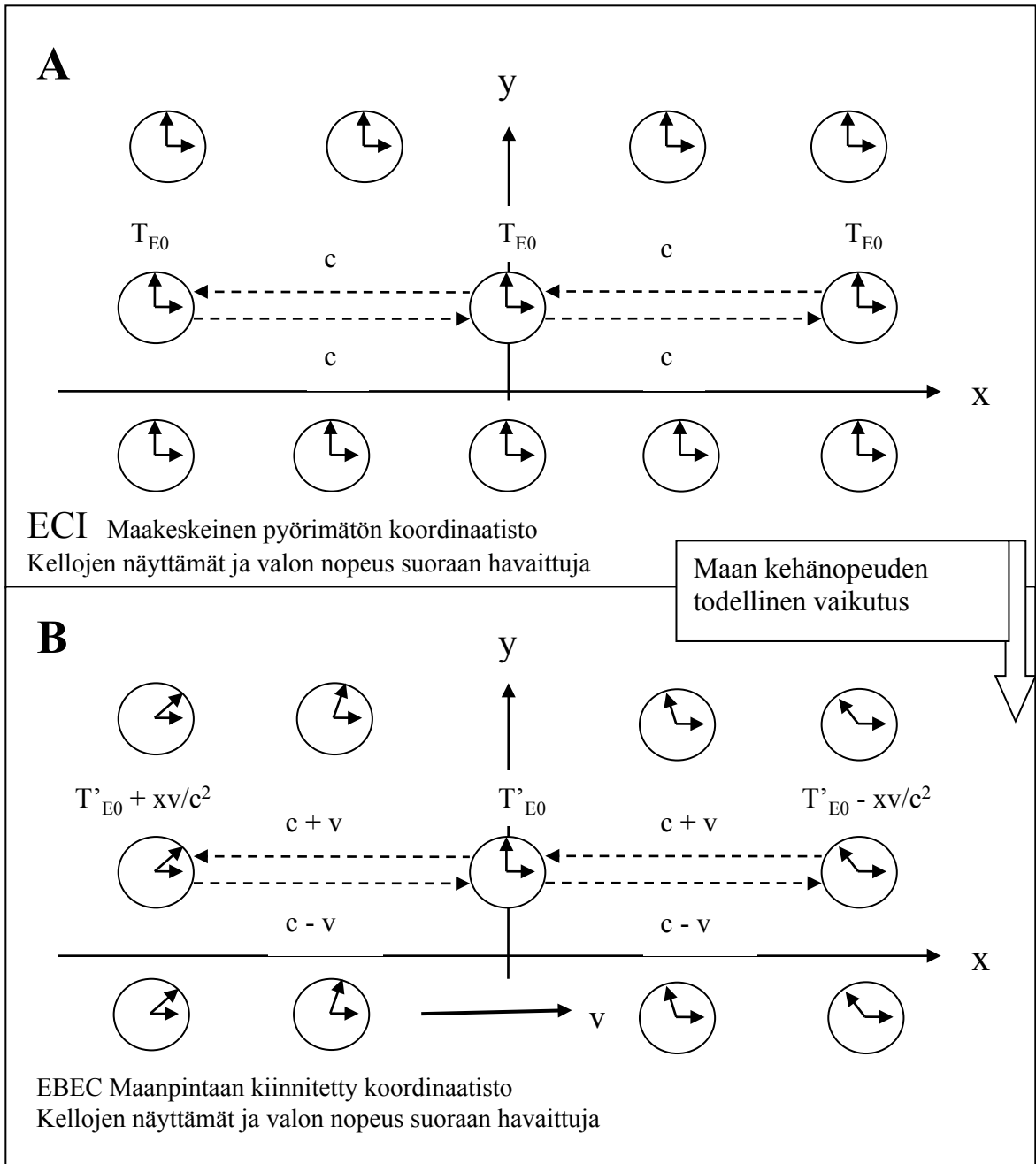
4. Kiihtyvyys

- Syklotronikokeet ovat osoittaneet, että kiihtyvyys ei millään tavalla vaikuta atomikelloihin. Näin ollen radan muoto ei vaikuta - vain nopeuden hetkellinen skalaariarvo. Painoton tila satelliitissa ei siis muuta mitään.

ECI, etuoikeutettu koordinaatisto!

- Edellä kerrottujen havaintojen perusteella kävi ilmeiseksi, että sekä kellot että radiosignaalit (ja siis myös valo) **valitsevat** lepokoordinaatistokseen Maakeskeisen pyörimättömän koordinaatiston. Maan pinnalla ja lähiavaruudessa **siinä ja vain siinä** valon nopeus on suunnasta riippumaton vakio ja vain sen koordinaatiston suhteen kello tunnistaa liikkeensä.
- Koordinaatistolle annettiin nimi **ECI-kehys**. (Earth Centered Inertial frame).

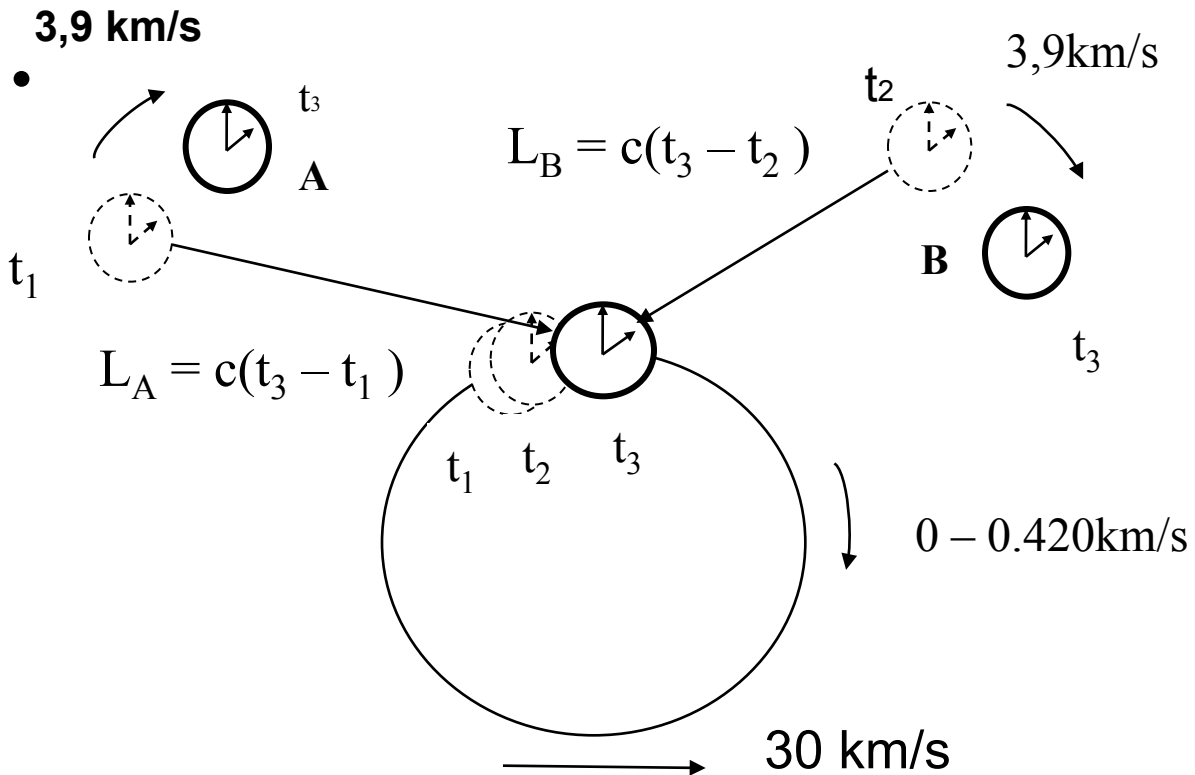
Synkronointi ECI- ja EBEC- kehyksissä



GPS-järjestelmä

- GPS-järjestelmässä pyörii 32 satelliittia Maapallon ympäri. Joka paikasta näkyy aina vähintään 4 satelliittia. Satelliittien etäisyys Maan keskipisteestä on 4 Maan sädettä eli maanpinnasta n. 20.000 km. Satelliittien nopeus on 3,9 km/s.
- Pienemmän gravitaatiopotentiaalin ansiosta satelliittikello edistää 45.900 ns/vrk ja suuremman nopeuden ansiosta jätättää 7.200 ns/vrk eli yhteensä edistää 38.700 ns/vrk. Tämä korjataan siten, että varsinaiseen kellonäyttämään sekunti vaihtuu vähän suuremmalla pulssimäärällä kuin maakellossa.
- Viisi Maa-asemaa suuntii satelliittien paikkoja ja lähettää niille päivitetyn paikkatiedon.
- Maa-asemat pitävät synkronoinnilla myös kellojen lukemat aina samoina.

GPS-paikannus



- GPS-paikannin rekisteröi **yht'aikaa** neljältä satelliitilta saamansa signaalin. Signaali sisältää **satelliitin paikan ja kellolukeman signaalin lähtöhetkellä**. Paikannin laskee aikaerojen ja radio-signaalien kulkunopeuden (c) mukaan paikkansa GPS-koordinaatistossa. Paikka selviää jo kolmella satelliitilla mutta neljättä käytetään vielä tuloksen tarkistamiseen. Lisäksi laite huomioi Maan pyörimisliikkeen (ns. Sagnac-korjaus) ja ionosfäärin vaikutuksen. Kaikki muu GPS-informaatio tulee Maa-asemilta.

Sagnac korjaus

ECI-kehys on kiinnitetty kaukaiseen tähteen, joten sen koordinaatit pysyvät paikallaan. Maan pinnalla oleva kysyjä sen sijaan liikkuu ECI-kehyksessä Maan pyörimisliikkeen mukana 0 - 460m/s riippuen hänen sijainnistaan navan ja päiväntasaajan välissä. Tämä liike on huomioitava valon ja havaitsijan välisenä nopeuserona. Liikehän vastaa 0 – 37m:n siirtymää radiosignaalin kulkuaihana (0.08s). The Cosultative Committee for the Defination of the Second ja International Radio Consultative Comittee ovat sopineet, että korjaus tehdään siten, että kulkuaikaan lisätään:

$$\Delta t = 2\Delta/c^2 \int A_E$$

A_E on päiväntasaajan tasoon projisoitu pinta-ala sellaisen vektorin pyyhkäisylle, jonka alkupää on Maan keskipisteessä ja kärki seuraa maakellon rataa. Merkki ω on Maan pyörimisliikkeen kulmanopeus. Ero on positiivinen, jos vektorin kärki pyyhkäisee lännestä itään ja negatiivinen päinvastaisessa tapauksessa. Korjauksen akulähde on Sagnagin 1913 tekemä koe pyörivällä levyllä ja Michelsonin ja Gale`n 1925 tekemä ison mittakaavan koe, jossa pyörivänä alustana oli Maapallon päiväntasaajan kohdalta tehty poikkileikkaus. (Selostettu kirjoituksessani ”Atomikellojen kertomaa.”)

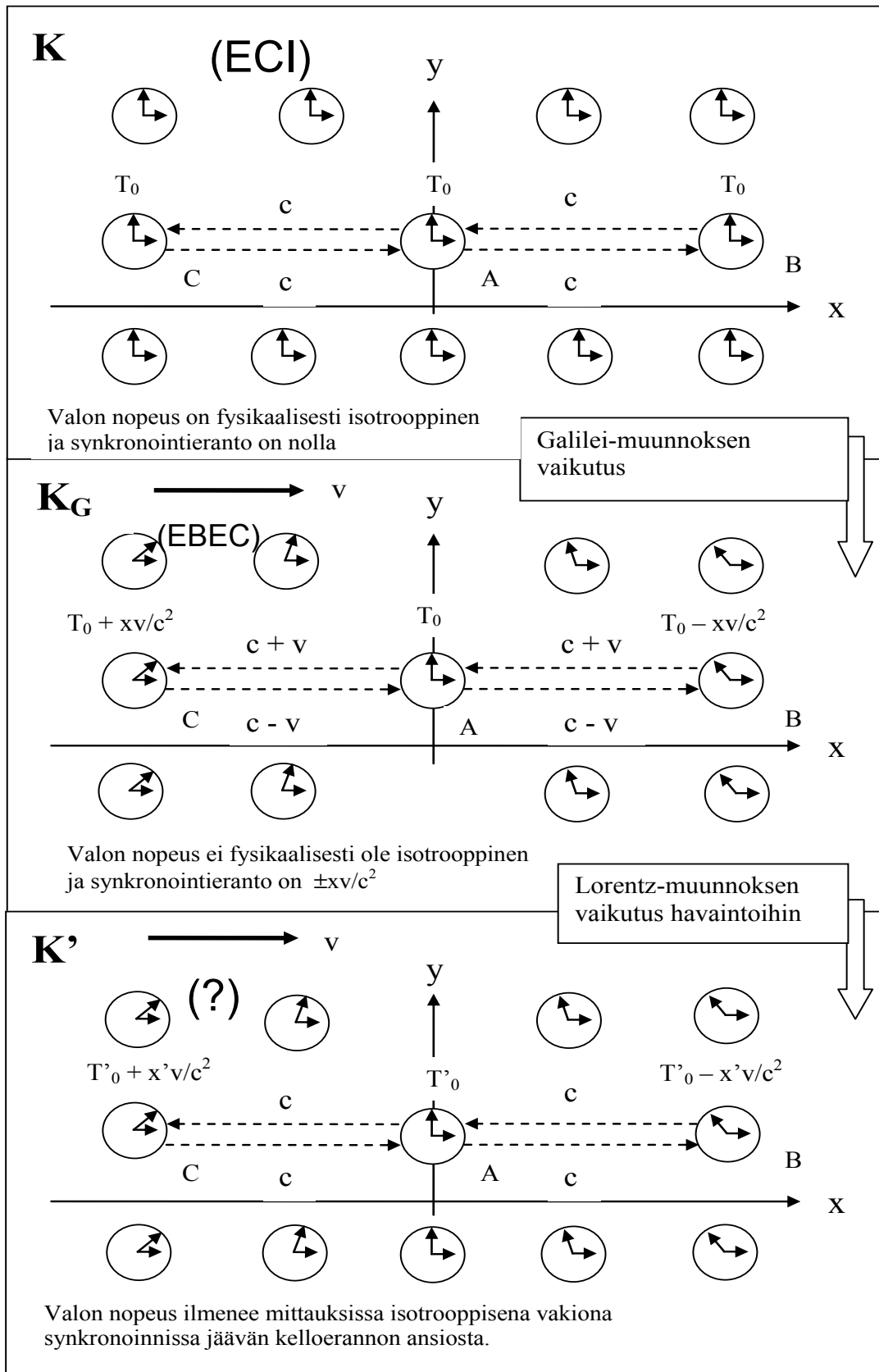
Einstein sanoo seuraavasti kirjoituksessaan
Teoreettisen fysiikan perusteet
(Science 24.5.1940):

- *'Suppeamman suhteellisuusteorian sisällön voi siis tiivistää yhteen lauseeseen: Kaikkien luonnonlakien **täytyy** toteuttaa ehto, että ne ovat Lorentz-transformaatioissa kovariantteja. Tästä seuraa, että kahden kaukaisen tapahtuman **samanaikaisuus ei ole invariantti käsite**, ja että jäykän kappaleen dimensiot ja kellojen käynti riippuvat niiden liiketilasta'.*
- Lorentz-muunnos:
- $x' = \gamma(x - vt)$
- $y' = y$
- $z' = z$
- $t' = \gamma(t - xv/c^2) = \gamma t - \gamma xv/c^2$

Yhtälöissä $\gamma = 1/\gamma(1 - v^2/c^2)$

$w + v = (w + v)/(1 + wv/c^2)$ josta seuraa:

$$w + c = c$$



Kuva 1. Koordinaatistojen väliset suhteet

Einstein (1916):

- *Samanaikaisuuden määritelmälle on asetettava vain yksi vaatimus, että se tekee jokaisessa todellisessa tapauksessa empiirisen ratkaisun siitä, onko kyseessä määriteltävän käsitteen mukainen tapaus vai eikö ole. Antamani määritelmä täyttää kiistatta tämän ehdon. Että valo tarvitsee matkan $A \sqrt{2} M$ kulkemista varten ja matkan $B \sqrt{2} M$ kulkemista varten saman ajan, ei tosiasiassa ole mikään valon fysikaalista luontoa koskeva ennakko-oletus tai hypoteesi, vaan päätös, jonka voin vapaasti harkiten tehdä, päästäkseni samanaikaisuuden määritelmään.*

- **Samanaikaisuuden absoluuttisuus on**
- **GPS-järjestelmän perusta.**

• Signaalin kulku-aika lasketaan kahden eri kellon, satelliitin ja paikkansa kysyjän, lukemien erotuksena. Kaikkien GPS-kellojen on näytettävä aina täsmälleen samaa aikaa. ECI-kehys ei siis voi olla Lorenz-muunnettu koordinaatisto.

• Lorenz muunnetussa koordinaatistossa synkronoitavaan kelloon jää eranto xv/c^2 . Ero on siis riippuvainen kellojen välisestä etäisyydestä x . GPS-järjestelmässä satelliittikellot liikkuvat koko ajan, joten mikään synkronointi ei säilyisi hetkeäkään. Systeemiä ei yksinkertaisesti olisi voitu rakentaa.

- Tom van Flandern lopettaa artikkelinsa "What the Global Positioning System Tells Us about Relativity".

- **What physical consequences arise from the differences between LR and SR?**

•
In **Special Relativity (SR):** Speed causes changes in time and space themselves, not just in clocks and rulers.

There is no absolute time or space in the universe. The time at remote locations depends on what frame one observes from. All frames are equivalent.

•
In **Lorentz Relativity (LR):** Speed relative to the preferred frame (the local gravity field) causes clocks to slow and rulers to contract

The frame of the local gravity field acts as a preferred frame. Universal time and remote simultaneity exist.

Kumpi kuvaa paremmin GPS- järjestelmää eli itse todellisuutta?

Viitteet:

Edellä oleva kuvaus on lyhennelmä
perusteellisemmista kirjoituksistani

Atomikellojen kertomaa.

ja

***Atomikellojen tikitystaajuuden riippuvuus
gravitaatiosta ja liikkeestä.***

Kirjoitukset löydät seuramme
internetosoitteesta:

www.lfs.fi/Julkaisuja/Verkkojulkaisuja

Artikkeleissa löytyy myös runsaasti viitteitä
alkuperäisiin lähteisiin.