

01.02.2025

## Ajan hidastuminen ja Kaksosparadoksi

Ajan kulkunopeus hidastuu gravitaatiokiihtyvyyden ja liikkeen kiihtyvyyden funktiona (ekvivalenssi). Liikkeen kiihtyvyyden seurauksena ajan hidastuessa aikajaksot venyvät nopeuden funktiona - aika on suhteellinen nopeuteen.

Kun tarkastelukoordinaatistossa kelloa kiihdytetään, sen käynti todetaan hidastuvan kiihtyvyyden funktiona. Kun kiihdytys lakkaa ja liike jatkuu saavutetulla nopeudella, kellon todetaan käyvän hitaammin kuin levossa, ja kellon jättämä kasvaa, mitä pidempään se liikkuu tuolla nopeudella. Kun kellon liikettä jarrutetaan, sen käynti todetaan nopeutuvan jarrukiihtyvyyden funktiona, ja kun se on pysähtynyt, käynti todetaan palaneen samaksi, kuin ennen kiihdytystä. Kellon jättämä jää siis pysyväksi. Kello käy kuitenkin normaalisti omassa koordinaatistossaan, jossa *aika* hidastuu.

Kun ”paikalleen lukitussa” koordinaatistossa kohde kiihdytetään, sen ajan kulkunopeus eli ”*ajankäynti*” siis hidastuu - *aika alkaa jättää* (vrt kellon jättäminen). Kiihtyvyyden hidastamalla ajankäynnillä ei ole suuntaa, (kuten ei ole kellon näyttämällä ajallakaan), eikä kohteen liikkeen suunnalla ole siksi merkitystä, ja voi vaihdella ja kiertää vaikka ympyrärataa. Vrt valokello, jossa ajan hidastuminen havaitsijan suhteen todetaan sekä kellon etääntyessä että lähestyessä. Paikallaan olevia koordinaatistoja ei ole olemassa.

Kiihdytyksen lakattua kohde jatkaa liikettä saamallaan nopeudella, ja ajankäyntikin jatkaa sillä jättämällä, minkä kiihtyvyys on sille antanut. Kun jättävän kellon jättämä kasvaa kellon jatkaessa käyntiään, samalla tavalla kohteen liikkeessä tasaisella nopeudella inertiaalissa nopeuden pysyessä samana, kohteen ajankäynnin jättämä hidastaa (venyttää) kumuloituvasti aikaa Lorentzin ajan dilataatio-yhtälön mukaan. Kun sanotaan, että *nopeus hidastaa aikaa*, siinä on yhtä vähän järkeä, kun sanottaisiin, että *aika hidastaa jättävän kellon käyntiä*.

$$\Delta t' = \Delta t / \sqrt{1 - v^2/c^2}$$

;  $\Delta t$  = aikajakso liikkuvassa kohteessa

;  $\Delta t'$  = koordinaatiston suhteen liikkuvan kohteen venynyt aikajakso

Koordinaatistossa havaitaan siinä liikkuvan kohteen tapahtumat hitaampina, aikavälit pidentyneinä suhteessa  $1/\sqrt{1 - v^2/c^2}$ . Kun kohteen liike lakkaa, ajankäynti palaa normaaliksi, mutta kohteen aikaan on jäänyt pysyvä jättämä.

Liikkuvassa kohteessa  $\Delta t = 1,000$  s kestää sinun paikallaan olevalla kellolla mitattuna esim  $\Delta t' = 1,001$  s. Kun sinä paikallaan mittaat tapahtuman kestäneen  $1,000$  s, sinun suhteen liikkuvan kohteen hitaammin käyvällä kellolla se kestää  $0,999$  s.

Termistä  $1/\sqrt{1-v^2/c^2}$  käytetään symbolia  $\gamma$  (gamma).

[Gamman  $\gamma$  laskenta on hankalaa moninumeroisten lukujen vuoksi, mutta sen arvo pienillä nopeuksilla  $v \ll c$  on helppo laskea likiarvokaavalla

$$\gamma = 1/\sqrt{1-v^2/c^2} \approx 1/(1-0,5 \cdot v^2/c^2) \approx 1+0,5 \cdot v^2/c^2 .]$$

Koordinaatistossa ei tarvita toista kohdetta referenssiksi, kuten Lorentzin ajan dilataatioyhtälö käyttää, ja sen suhteen teoria olisi syytä muuttaa. Onko edes mielekästä verrata paikallaan olevan kohteen aikaa liikkuvan kohteen suhteen, kun se on koordinaatiston aika.

Planeettaesimerkki ajan hidastumisesta nopeuden funktiona:

(Planeettojen nopeuden tuottaneen kiihtyvyyden ja sen seurauksena ajan kulkunopeutensa ne ovat saaneet jo aurinkokunnan syntyvaiheessa.)

Aurinkoon lukitussa koordinaatistossa (ks jälj.) Maalla on suurempi ratanopeus kuin Marsilla. Maasta tarkastellen Marsin aika siis kulkee Maan aikaa *nopeammin*.

Auringon koordinaatiston suhteen sekä Maan aika että Marsin aika *hidastuvat*

$$\text{Maan aika: } \Delta t_1' = \Delta t / \sqrt{1-v_1^2/c^2}$$

$$\text{Marsin aika: } \Delta t_2' = \Delta t / \sqrt{1-v_2^2/c^2}$$

;  $\Delta t$  = aikajakso Auringon koordinaatistossa

;  $\Delta t'$  = liikkuvan planeetan venynyt aikajakso

$$\Delta t_1' - \Delta t_2' = \text{Maan hidastunut aika Marsin suhteen}$$

$$= \text{Marsin nopeutunut aika Maan suhteen}$$

Ajan Lorentz-muunnos-teorian mukaan molempien planeettojen aikojen pitäisi hidastua toistensa suhteen *symmetrisesti*, mutta vain nopeamman Maan aika *hidastuu* ja hitaamman Marsin aika *nopeutuu*. Samoin koordinaatiston aika *nopeutuu* liikkuvien planeettojen suhteen.

Vrt sivu 5. *Hafele-Keating koe*, jossa lennätettiin atomikelloja maapallon ympäri, toista itään ja toista länteen. ”Suhteellisuusteorian mukaan odotettiin, että kumpikin kello olisi jätättänyt, ...”. Mutta vain itään lennätetyn kellon käynti *hidastui*, kun länteen lennätetyn kellon käynti *nopeutui* – suureksi hämmästykseksi.

Lorentz ja Einstein uskoivat virheellisesti aikojen hidastuvan symmetrisesti eli liikkuvan kohteen kokevan paikallaan olevan kohteen ajan hidastuvan yhtä paljon. Lorentzin ja Einsteinin *symmetrisyys*-ajattelun virhe saattoi johtua siitä, etteivät ehkä hoksanneet tarvittavan aina koordinaatisto, joka on "paikallaan", johon kohteiden liikkeitä voidaan verrata. Kun suhteellisuusteoria pohjautuu koordinaatisto-ajatteluun, miksi se heiltä unohtui tässä aikadilataation ideassa?

Lasketamenetelmät, jotka perustuvat ajan dilataation symmetrisyyteen, ei ole mitään käyttöarvoa ja ne pitäisi virheellisinä poistaa kaikista oppimateriaaleista. *Itseisajalla* ei siis ole käyttöarvoa, kun se määritellään ilman koordinaatistoa. Jos universumissa koordinaatistoa ei voida lukita mihinkään, vain kohteiden keskinäinen nopeus voidaan itseisajalla määritellä.

[Lorentzin ja Einsteinin suhteellisuuden havainto oli niin mullistava, ettei tuo yksi erehdys heidän arvovaltaansa horjuta. Tuota erehdystä tuskin olisi tapahtunut, jos tekniikka ja lentokoneteollisuus olisi silloin ollut 1970-luvun tasolla, jolloin Hafele-Keating kokeen tulokset olisivat olleet heidän käytettävissään.]

### Kiihtyvyys

Lorentzin ajan dilataatioyhtälöön pitää lisätä kiihtyvyys, joka nopeuden tuottaa. Ilman kiihtyvyystermiä yhtälö antaisi väärinymmärtää ajan hidastuvan symmetrisesti, sillä *vain kiihdyttävän aika hidastuu*, ja kiihtyvyyden aikanakin aika hidastuu.

*Myonien pidentynyttä elinikää* niiden saapuessa maahan, pidetään esimerkkinä ajan hidastuvuudesta. Syyksi siihen mainitaan niiden suuri nopeus, mutta nopeutta ilman kiihtyvyyttä ei voi olla olemassa. Kosmisten hiukkasten törmäykset ilmakehän ylimmissä osissa ilmamolekyyleihin synnyttävät myoneja, jotka saavat suunnattoman kiihtyvyyden, josta tuo ajan hidastuvuus on seurauksena. (Myonit saavat kiihtyvyytensä kosmisten hiukkasen liike-energiasta.)

Liikkuvan kohteen aika, kun kiihtyvyys on lisätty.

$$\Delta t' = (\Delta t_2 + \Delta t_1) / \sqrt{1 - v(t_1)^2/c^2}$$

;  $\Delta t_1$  = kohteen kiihdytysaika (lähtö, käännös, loppujarrutus)

;  $\Delta t_2$  = kohteen tasaisen liikkeen aika (meno ja paluu)

Nuo ajat eivät vaikuta samaan aikaan

Liikkuvan kohteen oma aika  $\Delta t = \Delta t' / \gamma$

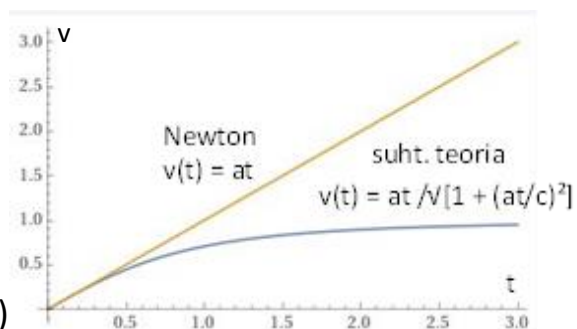
Koordinaatisto, jossa ajan hidastumista tarkastellaan, pitää olla lukittu niin, ettei se vaikuta siinä liikkuvien kohteiden nopeuksiin. Hafele-Keating kokeessa (ks sivu 5) pyörimätöntä maapalloa voitiin käyttää koordinaatistona, johon voitiin verrata koneiden liikkeitä, vaikka Maa pyörii ja liikkuu radallaan.

Liikkumatonta koordinaatistoa ei ole. Em Aurinkoon lukittu koordinaatisto pysyy aurinkokunnan suhteen paikallaan ja sitä voidaan käyttää referenssikoordinaatistona, johon liikkuvien planeettojen ja muiden kohteiden liikettä voidaan verrata, kun kaikki kohteet liikkuvat Auringon mukana aurinkokunnassa. Auringon liike pyörivässä Linnunradassa  $\approx 240$  km/s ja Linnunradan liike 610 km/s universumissa ei vaikuta yhteisessä koordinaatistossa liikkuvien kohteiden keskinäisiin nopeuksiin.

### Nopeus $v(t)$ kiihtyvyyden ja ajan funktiona.

Yhtälö  $v(t)$  toimii pienillä nopeuksilla Newtonin mekaniikan mukaan, mutta suurilla nopeuksilla suhteellisuusteorian mukaan, jolloin kiihtyvyyden aikainen nopeus saadaan yhtälöstä:

$$v(t) = at / \sqrt{1 + (at/c)^2} = c \tanh(\operatorname{arsinh} at/c)$$



Kuva 1. Nopeus  $at$ :n funktiona

### Asymmetria Lorentzin aikadilataatioyhtälössä

Jos kohteet eivät ole samassa oikein lukitussa koordinaatistossa, ei voida sanoa, kumpi kiihdyttää kumman suhteen, vrt. ed. itseisaika, jolloin päädytään siihen vailla logiikkaa olevaan tilanteeseen, että väitetään aikadilataatiota symmetriseksi. Vrt sivu 5, Hafele-Keating koe: länteen lentäneen kellon käynti *nopeutui* lentokentän kellon suhteen, eikä hidastunut.

Liikkuvan kohteen suhteen paikallaan olevan kohteen aika on Lorentzin yhtälön mukaan käänteinen, eli paikallaan olevan aika (= koordinaatiston aika) *nopeutuu* saman verran kuin liikkuvan aika *hidastuu* paikallaan olevan suhteen.

$\Delta t' = (\Delta t_2 + \Delta t_1) / \sqrt{1 - v(t_1)^2/c^2}$  liikkuvan kohteen aika "paikallaan olevan" suhteen

$\Delta t' = (\Delta t_2 + \Delta t_1) \cdot \sqrt{1 - v(t_1)^2/c^2}$  "paikallaan olevan" kohteen aika liikkuvan suhteen

;  $\Delta t_1$  = kohteen kiihdytysaika (lähtö, käännös, loppujarrutus)

;  $\Delta t_2$  = kohteen tasaisen liikkeen aika (meno ja paluu)

Nuo ajat eivät vaikuta samaan aikaan

Jos molemmat kohteet kiihdyttävät, Lorentzin ajan dilataatioyhtälö toimii siten, että enemmän kiihdyttäneen kohteen aika *hidastuu* toisen kohteen suhteen, vähemmän kiihdyttäneen kohteen aika *nopeutuu* toisen kohteen suhteen yhtä paljon.

### Hafele – Keating koe

*”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 jätättänyt  $59\text{ ns} \pm 10\text{ ns}$  ja länteen mennyt kello edistänyt  $273\text{ ns} \pm 7\text{ ns}$ .*

*Suhteellisuusteorian mukaan odotettiin, että kumpikin kello olisi jätättänyt, 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 sijaitsisi Pohjois- tai Etelänavalla, ei lentokentällä.)*

[https://fi.wiki7.org/wiki/%D0%AD%D0%BA%D1%81%D0%BF%D0%B5%D1%80%D0%B8%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D1%82\\_%D0%A5%D0%B0%D1%84%D0%B5%D0%BB%D0%B5\\_%E2%80%94%D0%9A%D0%B8%D1%82%D0%B8%D0%BD%D0%B3%D0%B0](https://fi.wiki7.org/wiki/%D0%AD%D0%BA%D1%81%D0%BF%D0%B5%D1%80%D0%B8%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D1%82_%D0%A5%D0%B0%D1%84%D0%B5%D0%BB%D0%B5_%E2%80%94%D0%9A%D0%B8%D1%82%D0%B8%D0%BD%D0%B3%D0%B0)

[https://en.wikipedia.org/wiki/Hafele%E2%80%93Keating\\_experiment](https://en.wikipedia.org/wiki/Hafele%E2%80%93Keating_experiment)

*Itään lennon analyysia: Kun kone kiihdyttää lentonopeuteen, sen kello alkaa jätättää, ja jätättämien säilyy maapallon koko kierron aikana, mutta vaihtelee hiukan koneen liikkeen mukaan normaaleilla linjalennoilla useilla kentillä lentoa vaihdettaessa ja tuulien vaikutuksesta. Eli koneen nopeuden hidastuessa kellon käynti nopeutuu, ja nopeuden kiihtyessä käynti hidastuu. Kellon jättämä kasvaa jatkuvasti lentokoneen nopeuden funktiona Lorentzin aikadilataatioyhtälön mukaan. Gravitaatiokin vaihtelee korkeuden vähän vaihdellessa ja paikkakunnittain, vaikuttaen kellon käyntiin. Ympyräradalla maapallon ympäri keskeiskiihtyvyyden vaikutusta ei ole mainittu marginaalisena lainkaan suuren säteen ja pienen nopeuden vuoksi.*

*Länteen lentäneessä koneessa todettu kellon käynnin nopeutuminen johtuu siitä, että lentokoneen kiihdytys maapallon pyörimistä vastaan kumoaa maapallon syntyaikana pyörivän ainepilven tiivistyessä esiintynyttä pyörimisen kiihtymistä, joka on aiheuttanut ajan hidastumisen kasvavasti navoilta päiväntasaajaa kohti siirryttäessä, ja siten lentokentän ajan hidastumisen suhteessa pyörimättömään maapalloon.*