

# SYKSY RÄSÄNEN | MITÄ SIIS ON AIKA?



## Maailma kellokoneistona

Jotkut fyysikot tykkäävät siteerata **Aurelius Augustinuksen** (joka tuli tunnetuksi kirkkoisä Augustinuksena) teokseensa *Tunnustukset* 300-luvun lopulla kirjoittamia pohdintoja ajasta. Augustinus kommentoi osuvasti muun muassa sitä, miten vaikeaa ajan ajatteleminen on:

**Mitä siis on aika? Jos kukaan ei kysy minulta, tiedän mitä se on. Jos haluan selittää sen sille, joka kysyy, en tiedä.**

Ajan ja avaruuden käsitteistä on hankala saada kiinni koska ne ovat niin perustavanlaatuisia. Asioita voi selittää vain toisten asioiden avulla, joten niitä pitää pystyä pilkkomaan pienempiin osiin tai suhteuttamaan muihin asioihin. Siksi ajan käsitteleminen hedelmällisesti vaatii arjen ulkopuolisen näkökulman. Fysiikassa käytetty matemaatiikan kieli mahdollistaa asioiden jäsentelemisen arkiajattelusta poikkeavalla tavalla, ja havaintojen johdonmukainen käyttäminen teorioiden kehittämisessä ja testaamisessa auttaa karsimaan virheellisiä ideoita.

**Isaac Newton** muotoili ensimmäisen fysiikan teorian, ja se tunnetaan nykyään nimellä klassinen mekaniikka. Vuonna 1687 julkaistussa pääteoksessaan *Luonnonfilosofian matemaattiset periaatteet* Newton esitti, että aika on absoluuttinen (eli

sama kaikille) ja muuttumaton:

**Voi olla, että ei ole mitään sellaista kuin tasainen liike, jolla aikaa voisi tarkasti mitata. Kaikki liikkeet saattavat olla kiihtyviä tai hidastuvia; mutta absoluuttisen ajan todellinen, eli yhtäläinen, eteneminen ei muutu. Asioiden kesto tai pysyvyys säilyy samana, olivatpa liikkeet nopeita tai hitaita, tai vaikka niitä ei olisi.**

Klassisen fysiikan aika on ikuinen, vailla loppua ja alkua. Aika, kuten avaruus, ei myöskään riipu siitä mitä tapahtuu, vaan on passiivinen. Avaruus on vain tapahtumien näyttämö, ja aika kertoo, missä kohtaa näytelmää ollaan.

Toinen aikaan liittyvä klassisen mekaniikan tärkeä piirre on se, että maailma on deterministinen. Tämä tarkoittaa sitä, että järjestelmän tila nykyhetkellä määrää sen tilan tulevaisuudessa. Klassisen fysiikan lait ovat kuin peli, jossa pelilaudan tilanne määrää aina seuraavan siirron: valinnanvaraa tai sattumaa ei ole. Peliä voi pelata yhtä hyvin myös taaksepäin: nykytilanteesta voi päätellä edellisen siirron, ja siitä edellisen loputtomiin.

**Pierre-Simon Laplace** huomautti 1814, että jos jokin olento tuntisi fysiikan lait ja maailmankaikkeuden kaikkien kappaleiden paikat (oikeasti se tarvitsisi myös nopeudet) jollakin hetkellä ja olisi



tarpeeksi hyvä laskemaan, se tietäisi kaiken mitä on tapahtunut ja mitä tulee tapahtumaan yhtä lailla kuin nykyhetken. (Tällaiselle olenolle annettiin sittemmin lennokas nimi *Laplacen demoni*.) Maa- ilma on kellokoneisto, ja joka ymmärtää sen käyn- nin, tietää, missä asennoissa viisarit ovat olleet ja tulevat olemaan.

Laplacen ajatus valaisee determinismin li- säksi myös sitä, että toisin kuin arkikokemuksessa, klassisessa mekaniikassa ei ole erityistä tapahtu- misen hetkeä: menneisyys, nykyhetki ja tulevai- suus ovat olemassa yhtä lailla.

## Kutistuvat kellot

Seuraava edistysaskel ajan ymmärtämisessä oli suppea suhteellisuusteoria, jonka **Albert Einstein** löysi vuonna 1905. Einstein osoitti, että aika ei ole absoluuttista, vaan sen kulku riippuu havaitsijan liikkeestä. Mitä nopeammin liikkuu, sitä hitaam- min kello kulkee.

Newton saattoi luulla aikaa absoluuttiseksi, että erot ajan kulussa ovat arkisessa mitta- kaavassa mitättömän pieniä. Ero paikallaan istu- van ja juoksevan ihmisen ikääntymistahdissa vain 10-15 miljardisosan miljoonasosa. Koko ihmiselä- män aikana tästä kertyisi vain sekunnin miljoonas- osan eli mikrosekunnin ikäero.

Paikannuksessa käytettyjen GPS-satelliittien tapauksessa tällainen viive ei kuitenkaan ole mi- tätön. Satelliitit viuhuvat Maan ympäri neljä kilo-

metriä sekunnissa, ja vuorokaudessa niiden kellot tikittävät tämän takia seitsemän mikrosekuntia vähemmän kuin Maan suhteen paikallaan olevat kellot. Tässä ajassa GPS-satelliittien radiosignaalit kulkevat kaksi kilometriä, joten paikannuksesta ei tulisi mitään, jos aikavälien kutistumista ei ottaisi huomioon.

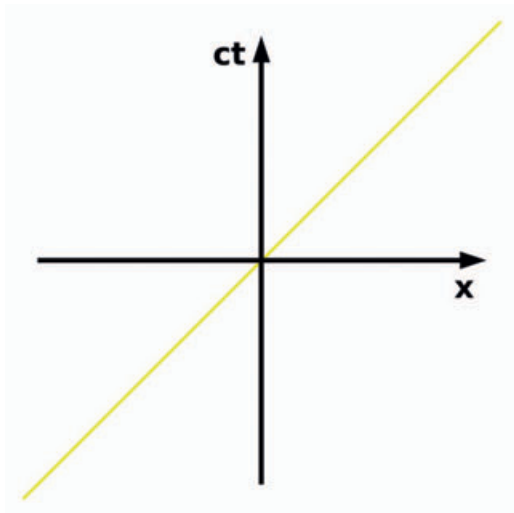
Einsteinille mekaniikkaa ja matematiikkaa opettanut **Hermann Minkowski** ymmärsi, että suppea suhteellisuusteoria ei ole vain teoria suh- teellisesta ajasta ja avaruudesta, se yhdistää ne aika-avaruudeksi, joka on absoluuttinen. Aika ja avaruus ovat vain suuntia tässä neliulotteisessa kokonaisuudessa. Vuonna 1908 Minkowski lausui kuuluisat sanat:

**Tästä lähin avaruus itsessään, ja aika itsessään, ovat tuomittuja hiipumaan pelkiksi varjoiksi, ja vain niiden erään- lainen liitto säilyy riippumattoman todellisena.**

Tämä oivallus avasi oven yleiselle suhteellisuus- teorialle.

## Näyttämöstä näyttelijäksi

Einsteinin ja **David Hilbertin** vuonna 1915 löytä- mä yleinen suhteellisuusteoria paljasti, että aika- avaruus ei ole vain näyttämö, johon tapahtumat sijoittuvat, vaan aktiivinen toimija. Yleisen suhteel-



TO EXPLAIN MINKOWSKI  
DIAGRAMS: CHOOSING CT  
INSTEAD OF T ON THE TIME AXIS  
THE WORLD LINE OF A PHOTON  
BECOMES A STRAIGHT LINE WITH  
A SLOPE OF 45°.

WIKIMEDIA.ORG

lisuusteorian mukaan aine määrää millainen aika-avaruus on, ja aika-avaruus määrää miten aine liikkuu. Gravitaatio on aika-avaruuden ominaisuus: painovoimassa ei ole kyse siitä, että massat vetäisivät toisiaan puoleensa. Sen sijaan massat muuttavat aika- ja paikkaetäisyyksiä, mikä vaikuttaa kappaleiden liikkeeseen. Tämä aikaetäisyyksien muutos tarkoittaa myös sitä, että mitä lähempänä massoja on, sitä hitaammin aika kulkee.

Arjessa gravitaation vaikutus ajan kulkuun on vähäinen. Koko Maan massa saa kellot käymään vain miljardisosan hitaammin. Mutta GPS-satelliiteille tämäkin ero on merkittävä kellot edistävät 45 mikrosekuntia vuorokaudessa. Kun tämä lasketaan yhteen nopeudesta johtuvan eron kanssa, tulokseksi saadaan, että satelliittien kellot edistävät vuorokaudessa 38 mikrosekuntia, missä ajassa radiosignaali kulkee yli 10 kilometriä.

Auringon pinnalla gravitaatio on tuhat kertaa voimakkaampi kuin Maapallolla, joten sen massa hidastaa kellojen käyntiä miljoonasosan verran. Mustien aukkojen lähistöllä aika taasen hidastuu rajatta lähestyttäessä tapahtumahorisonttia. Niinpä niiden avulla voi kulkea tulevaisuuteen muita nopeammin. (Kaikkihan me matkaamme jatkuvasti tulevaisuuteen.) Jos matkaja laskeutuu tarpeeksi lähelle tapahtumahorisonttia ja nousee takaisin, muualla maailmankaikkeudessa on voinut kulua vaikka miljoona vuotta vaikka hänen kellonsa on edennyt vain minuutin.

Jos musta aukko pyörii tarpeeksi nopeasti,

sen luona on reittejä, jotka vievät menneisyyteen. Jos matkaja laskeutuu tarpeeksi lähelle, kiertää aukkoa, ja nousee ylös, hän voi tulla takaisin aikaan, joka on varhaisempi kuin se, milloin hän laskeutui aukkoon.

Kymmeniä mustia aukkoja on mitattu suoraan gravitaatioaaltojen kautta, ja lisäksi taivaalla näkyy satojatuhansia kvasaareja, kiihkeitä säteilylähteitä, joiden energianlähteenä on pyörivä musta aukko. Vuonna 2019 Event Horizon Telescope otti jopa valokuvan galaksin M87 keskustan mustan aukon tapahtumahorisontin seuduilta.

Mustia aukkoja on siis olemassa. Mutta vaikka mustien aukkojen tienoilla voi kulkea tulevaisuuteen muita nopeammin, niiden avulla ei oikeasti voi matkata taaksepäin ajassa. Musta aukko, joka pyörii tarpeeksi nopeasti, että sen liepeillä avautuisi reitti menneisyyteen, on epävakaa. Pienikin häiriö tuhoaa tällaisen aukon, eli niitä ei oikeasti ole olemassa.

Yleinen suhteellisuusteoria ei kuitenkaan kiellä matkustamista taaksepäin ajassa. Itse asiassa tunnetaan useita aikamatkailua kuvaavia yleisen suhteellisuusteorian ratkaisuja, joista kaikki eivät ole epävakaita. Ei kuitenkaan ole selvää, kuvaako mikään niistä todellisuutta.

Kaikki fysiikan teoriat (paitsi kaiken teoria, jos sellainen on olemassa) pätevät vain rajallisella alueella. Esimerkiksi klassinen mekaniikka kuvaa tapahtumia tarkasti vain, kun liikkeet ovat hitaita (verrattuna valonnopeuteen), gravitaatio heikkoa

ja kappaleiden koko iso (verrattuna kvanttifysiikan ilmiöihin). Klassisen mekaniikan yhtälöiden mukaan kappaleet voivat liikkua valoa nopeammin, mutta tällaiset ratkaisut ovat sen pätevyysalueen ulkopuolella, eli ne eivät kuvaa todellisuutta edes likipitään.

Ei tiedetä, ovatko aikamatkaratkaisut yleisen suhteellisuusteorian pätevyysalueen sisällä, vai kieltäkö jokin toistaiseksi tuntematon laajempi teoria kulkemisen ajassa taaksepäin. On ehdotettu, että kvanttifysiikan yhdistäminen yleiseen suhteellisuusteoriaan estäisi aikamatkailun, mutta asiasta ei ole saatu selvyyttä.

### **Onko torni valmis?**

Yleinen suhteellisuusteoria kertoo, miten aika kulkee eri tavalla eri kohdissa avaruutta, ja miten avaruus kehittyy ajassa. Yleinen suhteellisuusteoria on yhtä deterministinen kuin klassinen fysiikka: avaruuden nykytila (yhdessä aineen nykytilan kanssa) määrää sen, millainen avaruus on tulevaisuudessa, ja millainen se oli menneisyydessä. Ei ole erityistä nykyhetkeä, kaikki hetket ovat olemassa yhtä lailla. Jos aika-avaruutta ajattelee tornina, missä jokainen kerros vastaa avaruutta tiettyinä ajanhetkenä, niin se on kokonaan valmis. Kaikki tapahtumat ovat olemassa ajattomassa ikuisuudessa, jos tässä yhteydessä on sopivaa puhua ikuisuudesta – kiellemme aikaan ja tapahtumiseen sidotut ilmaisut tuntuvat puutteellisilta.

Kuten aikamatkailun tapauksessa, emme kuitenkaan tiedä pitääkö tämä yleisen suhteellisuusteorian kuva paikkansa. Yleinen suhteellisuusteoria on perustavanlaatuisin teorianamme aika-avaruudesta. Mutta kvanttikenttäteoria on perustavalaatuisin teorianamme aineesta, ja sen käsitys ajasta on aivan erilainen kuin suhteellisuusteorian.

Kvanttifysiikan mukaan maailma on epäterministinen: nykyhetki määrittää vain todennäköisyyden sille, mitä tulevaisuudessa tapahtuu. On tapahtumisen hetki, jolloin eri vaihtoehdoista yksi valikoituu sattumanvaraisesti (tai siltä ainakin näyttää), ja epämääräinen tulevaisuus muuttuu

määrätyksi menneisyydeksi. Ei tiedetä, liittyykö arkikokemuksemme nykyhetkestä tähän kvanttifysiikan piirteeseen vaiko ei, mutta ainakin tällainen tapahtuminen on ristiriidassa yleisen suhteellisuusteorian kanssa. Aine määrää avaruuden kehityksen ja ajan kulun, joten jos aineen tulevaisuus on epämääräinen, ei tuleva avaruuskaan voi olla määrätty. Kvanttifysiikan mukaan aika-avaruuden torni ei ole valmis, vaan rakentuu pala palalta sitä mukaa kun kapuaa ylös.

Koska ei osata täysin sovittaa yhteen yleistä suhteellisuusteoriaa ja kvanttifysiikkaa, emme tiedä, onko tulevaisuus jo olemassa vaiko ei. Niiden yhdistelmän, kvanttigravitaation, löytämisen odotetaan mullistavan käsityksemme ajasta vielä perustavanlaatuisemmin kuin mitä suhteellisuusteoria ja kvanttifysiikka ovat tehneet. Se voi myös auttaa ymmärtämään, miksi aikasuuntia on vain yksi ja paikkasuuntia kolme – ja miksi aikaa ylipäänsä on olemassa.



### **SYKSY RÄSÄNEN**

ON YLIOPISTOTUTKIJA  
HELSINGIN YLIOPISTON  
FYSIKAN LAITOKSELLA.  
HÄNEN TUTKIMUSALANSA ON  
KOSMOLOGIA. HÄN PITÄÄ URSAN  
SIVUILLA HIUKKAFYSIIKAN  
JA KOSMOLOGIAN TIIMOILTA  
POPULAARIA BLOGIA  
KOSMOKSEEN KIRJOITETTUA.