



Paikka suhteellisuusteoriassa ja kosmologiassa

Raimo Lehti

Fyysikot ja tähtitieteilijät molemmat hyväksyvät ainakin pääpiirteittäin suhteellisuusteorian hyväksi teoriaksi, mutta kun on kyse sen mukaisesta paikan käsitteestä heillä tuntuu olevan asiasta erilainen näkemys. Asia tuntuu liittyvän kysymykseen yleisen teorian ja sen konkreettisen realisaation välisestä suhteesta. Näkemysten eroa ei ole kovinkaan selvästi tuotu yleisesti näkyviin. Ehkäpä syynä on ollut vastenmielisyyden nostaa pöydälle suhteellisuusteorian kaltaiseen erinomaiseen teoriaan sisältyviä ristiriidan poikasia.

Kysymyksen liikkeen suhteellisuudesta oli nostanut esille jo Galilei vuonna 1632 teoksessa Dialogi kahdesta suuresta maailmanjärjestelmästä. Hänen probleeminaan oli perustella, että Maan pyörimisliike ei aiheuta maanpinnalla katastrofaalisia ilmiöitä, joihin vedoten se oli kiistetty. Galilei ehdotti, että tasainen liike, johon sekä havaitsijat että heidän ympäristönsä ottavat yhtäläillä osaa, on sillä tavoin "epäoperatiivista", että se ei aiheuta mitään lepotaan ilmiöistä poikkeavia ilmiöitä. Galilein suhteellisuusperiaate oli tyypiltään "salaliittoteoria"; se kylläkin piti absoluuttista liikettä olemassaolevana asiana, mutta perusti logiikkansa siihen, että luonnonlait ovat tehneet "salaliiton", jonka takia sitä ei voi havaita. Maanpäälliset kokeet eivät sitä voi paljastaa, koska ilmiöt tapahtuvat samalla tavalla paikallaan pysyvässä ja tasaisesti liikkuvassa systeemissä. Näihin Galilein esille nostamiin ajatuksiin otti Isaac Newton kantaa pohtiessaan, miten voimme kuvailla liikettä absoluuttisen paikan muutokseksi, kun kuitenkin havaitsimme vain relativisia paikkoja. Newtonin Scholium *Principia* -teoksesta sisältää tunnetun ja sittemmin paljon pohdittuun tekstiin, jossa vakuutetaan absoluuttisen paikan ja ajan olemassaolo. Galilein tavoin myös Newton omaksui "luonnonlakien salaliittoteorian".

Formuloimme tämän seuraavasti:

Tutkimme kappaleiden liikkeitä ajan t funktiona käyttäen niiden sijainnin määrittämiseksi koordinaatteja x, y, z . Otamme käyttöön myös toisen koordinaatiston x', y', z' , joka liikkuu edellisen suhteen tasaisella nopeudella. Yksinkertaisuuden vuoksi oletamme, että koordinaatistojen akselit ovat samansuuntaiset, ja niiden suhteellinen liike tapahtuu x -akselin suuntaan nopeudella v . Tällöin

$$(1) x' = x - vt, y' = y, z' = z$$

Absoluuttisen paikan oletetun olemassaolon takia ei ole mahdollista, että molemmat koordinaatistot olisivat "oikeita" siinä mielessä, että ne antaisivat kappaleiden "oikean" sijainnin paikassa. Aika t on molemmissa koordinaatistoissa sama, joten neljänenten "koordinaattina" tarvittavan ajan avulla ei voi tehdä mitään johtopäätöksiä siitä, mitä paikkakoordinaatistoa on pidettävä "oikeana" ja mitä oikean suhteen liikkuvana. Suhteellisuusperiaatteen mukaan mekaniikan lakien hallitsemat ilmiöt tapahtuvat samalla tavalla käyttäen kumpia tahansa koordinaatteja.

Sähkömagneettisten ja optisten ilmiöiden tarkastelu johti uudenlaisiin liikkeen suhteellisuuden kysymyksiin. James Clerk Maxwellin ja muiden kehittämän klassillisen teorian mukaan on sähkömagneettisten ilmiöiden "kantajana" *eetteriksi* kutsuttu universaalinen väliaine. Teorian mukaan eetterin suhteen levossa olevassa koordinaatistossa sähköiset ja magneettiset kentät toteuttavat *Maxwellin yhtälöiksi* kutsutun yhtälöryhmän. Tämä tuntui merkitsevän, että sähkömagneettisten ilmiöiden avulla voisi ratkaista, mikä koordinaatisto on siinä mielessä *oikea*, että siinä ilmiöt tapahtuvat Maxwellin yhtälöiden mukaisesti; sen avulla voisi "absoluuttisen paikan" määritellä. Erityisesti tutkittiin, miten Maapallon liikenopeus vvaikuttaisi ilmiöihin. Asian ratkaisemiseksi suoritettiin useita kokeita, mutta ne antoivat "nollatuloksen": liikkeen aikaansaamaa eroa ei havaittavista ilmiöistä löytynyt. Kokeiden vaikeutena oli kuitenkin, että liikenopeus w oli pieni verrattuna sähkömagneettiseksi aaltoliikkeeksi identifioitun *valon* nopeuteen c . Kokeiden tarkkuus salli yleensä vain päättyä, että mitään "ensimmäisen kertaluokan efektiä" eli suhteeseen w/c verrannollista efektiä ei löytynyt.



Sittemmin nousi erityisen tunnetuksi koe, jossa yritettiin määrätä Maan vuotuisen liikkeen aiheuttamaksi ajateltu muutos valon havaittuun nopeuteen. Kokeen suoritti Albert Abraham Michelson vuonna 1881 ja hän yhdessä Edward William Morleyn kanssa vuonna 1887. Jälkimmäisen kokeen tarkkuus oli niin suuri, että siinä olisi pitänyt olla mahdollista havaita "toisen kertaluokan efekti" eli neliön $(vc)^2$ verrannollinen efekti. Tällaista ei havaittu, vaan edelleenkin saatiin nollatulos. Maxwellin teoriaa tutkinut George Francis Fitzgerald kirjoitti vuonna 1889:

"Olen suurella mielenkiinnolla lukenut herrojen Michelson ja Morley ihmeteltävän delikaatista kokeesta tärkeän kysymyksen ratkaisemiseksi, missä määrin Maa kuljettaa eetteriä mukanaan. Heidän tuloksensa näyttää olevan toisten kokeiden vastainen; näiden mukaan ilmassa olevaa eetteriä on mahdollista kuljettaa mukana vain havaitsemattoman vähän. Ehdottaisin miltei ainoaksi hypoteesiksi, joka pystyy saamaan nämä vastakohtat sopusointuun, että materiaalien kappaleiden pituus muuttuu sen mukaisesti, miten ne liikkuvat eetterin läpi tai sen halki, sellaisella määrällä, joka riippuu niiden nopeuden ja valon nopeuden suhteen neliöstä. Tiedämme, että sähköisiin voimiin vaikuttaa varattujen kappaleiden liike eetterin suhteen, eikä näytä epätodennäköiseltä olettaa, että liike vaikuttaa molekulaarisiiin voimiin, ja että kappaleiden koko sen seurauksena muuttuu."

Hendrik Antoon Lorentz

Artikkelissaan vuonna 1892 kirjoitti Hendrik Antoon Lorentz olleensa jo kauan ratki huolestunut Michelsonin - Morleyn kokeesta. Lorentz ei tuntenut Fitzgeraldin tekemää ehdotusta, vaan päätyi itse samaan tulokseen. Hän löysi kokeen nollatulokselle vain yhden ratkaisun, nimittäin että mittauksessa käytetty laite liikkuaan lyhenee liikesuunnassa. Tuloksen tulkitsemista varten Lorentz oletti sauvan molekyylien välisten voimien vaikuttavan eetterin välityksellä sähkömagneettisten voimien tavoin, jolloin niiden etäisyydet liikkeen vaikutuksesta muuttuvat. Jälleen vuonna 1895 Lorentz pohti, miten Michelsonin-Morleyn kokeen tulos on yhteensovitettavissa muiden valon liikettä koskevien tunnettujen tulosten kanssa. Lorentz oli laatinut aineen rakenteen selittämiseksi *elektroniteorian* nimellä tunnetun teorian. Jotta se olisi uskottava, täytyi selittää, *miksi* Maan liikkeen efektiä ei havaittu (McCormach 1981 s. 495). Lorentz kertoo ehdottaneensa asialle selitystä vuosina 1892-1893 ja kuulleensa sitten, että Fitzgerald oli esittänyt saman selityksen jo aikaisemmin (Lorentz 1952b s. 4). Lorentzin ehdotus on, että Maan liikkeen suuntainen interferometrin varsi muuttuu liikkeen takia Maan liikettä vastaan kohtisuoraa vartta lyhyemmäksi. Ehdotustaan Lorentz perustelee (s. 5-6):

"Vaikka tämä hypoteesi saattaa ensi näkemältä näyttää yllättävältä, meidän täytyy myöntää, että se ei ole laisinkaan kaukaa haettu, heti kun oletamme myös molekulaaristen voimien välittyvän eetterin kautta sähköisten ja magneettisten voimien tavoin, joiden kohdalla voimme nykyisin definiittisesti tehdä tuollaisen väitteen. Jos ne välittyvät sillä tavoin, niin translaatio erittäin todennäköisesti vaikuttaa kahden molekyylin tai atomin väliseen aktioon tavalla, joka muistuttaa varattujen partikkelien välistä veto- tai poistovoimaa. Koska nyt kiinteän kappaleen muoto ja dimensiot ovat perimmäältään molekulaaristen vaikutusten intensiteetin määrittämiä, ei dimensioiden muuttuminen voi olla ilmenemättä."

Vuonna 1899 Lorentz julkaisi aiheesta uuden esityksen *Théorie simplifiée des phénomènes électriques et optiques dans des corps en mouvement*. Tällöin hän käsitteli dynaamista kontraktiohypoteesia aivan kuin se olisi liikkeen suuntaiseen x-koordinaattiin vaikuttava koordinaattitransformaatio. Tämän Lorentz yhdisti toiseen "temppeuun", jonka hän oli ottanut käyttöön Maxwellin yhtälöitä käsitellessään. Hän oli todennut, että yhtälöitä oli mukavinta käsitellä liikkuvassa koordinaatistossa ottamalla aikamuuttujan t sijasta käyttöön toisen muuttujan t' , joka oli liikenopeuden funktio. Yhtä määäämätöntä kerrointekijää lukuunottamatta olivat annetut ajan ja paikan transformaatioyhtälöt ekvivalentit niiden kanssa, jotka Lorentz sitten esitti paremmin tunnetussa vuoden 1904 artikkelissa, ja joita kutsutaan *Lorentz-transformaatioksi* (McCormach 1981 s. 496). Transformaatioyhtälöt ovat lopullisessa muodossaan seuraavat:

$$(2) \quad x' = (x - vt) / (1 - v^2/c^2)^{1/2}, \quad t' = (t - vx/c^2) / (1 - v^2/c^2)^{1/2}, \quad y' = y, \quad z' = z$$

Tällöin Lorentz myös totesi, että kontraktio on seuraus näistä transformaatioista (Pais 1983 s. 126). Transformaatioiden (1) ja (2) *olennaisin* ero, on, että yhtälöissä (2) on myös

aikakoordinaattia muutettu. Lorentz itse tulkitse "ajan" t vain matemaattiseksi apusuureksi, mutta Einstein sittemmin tulkitse asiat toisella tavalla. Tätä aihetta käsittelem tarkemmin artikkelissa *Lehti* 2000.

Vuonna 1909 julkaisemassaan *Elektronien teoria* -teoksessa Lorentz päätyy olennaisesti transformaatioyhtälöihin (2) suorittamalla "kahden askeleen transformaatoin": Ensinnä suorittaa klassillisen mekaniikan mukaisen "Galilei-transformaation" (1) ja sitten muuntaa saadut koordinaatit toisiksi. Näin hän saa muunnoksen, joka vakiokerrointa lukuunottamatta antaa lopulliset Lorentz-transformaatiot (2) (vrt. Lorentz 1952c s. 14). Hän kirjoittaa (Lorentz 1952a s. 196-197):

"Jos x, y, z ovat pisteen koordinaatit suhteessa eetteriin kiinnitettyihin akseliin, eli, kuten sanomme "absoluuttisiin" koordinaatteihin, ja jos translaatio tapahtuu OX -akselin suuntaan, niin koordinaatit suhteessa systeemin mukana liikkuviin ja hetkenä $t = 0$ kiinteisiin akseliin yhtyviin akseliin tulevat olemaan $x_r = x - vt$, $y_r = y$, $z_r = z$. Nyt introdusoimme koordinaattien x, y, z sijasta uudet riippumattomat muuttujat, jotka poikkeavat näistä "relatiivisista" koordinaateista tietyillä kaudella systeemin vakioilla kertoimilla. Asettaen $c^2/(c^2 - v^2) = k^2$, määrittelme uudet muuttujat yhtälöillä $x' = kx_r$, $y' = ly_r$, $z' = lz_r$ eli $x' = k(x - vt)$, $y' = ly$, $z' = lz$, ja näihin lisäksi neljänneksi riippumattomaksi muuttujaksemme $t' = (l/k)t - (klvc^2)(x - vt) = kl(t - vx/c^2)$."

Uusia koordinaatteja x', y', z' Lorentz kutsuu *efektiivisiksi* koordinaateiksi; näiden avulla hän määrittelee efektiivisen etäisyyden, efektiivisen tilavuuselementin dS' , efektiivisen varaustiheyden ρ' jne. (Lorentz 1952a s. 200-201). Lorentz merkitsee stationaarista ja liikkuvaa systeemiä symboleilla S_0 ja S , ja toteaa (s. 201):

"Olen viivähtänyt jonkin aikaa näissä nimityskysymyksissä. koska mutkikkaita probleemeissa on termien asianmukainen valinta erittäin arvokasta. Nyt tekemämme mahdollistaa meidän tiivistämään muutamat sanaksi sen, mitä edeltävässä pykälässä sanottiin systeemeistä S ja S_0 nimittäin: Kahdessa sähköstaattisessa systeemissä, joista toinen liikkuu ja toinen ei, ja joissa sähkövarauksen efektiivinen tiheys on efektiivisten koordinaattien sama funktio, on [sähköisen kentän] vektori ... vastaavissa pisteissä sama, ja voimat suhtautuvat toisiinsa yhtälön [...] ilmaisemalla tavalla."

Kun Lorentz rupeaa käyttämään yhtälöillä stationaarisen kuin liikkuvan systeemin suureista attribuuttia *efektiivinen*, ja toteaa, että tämän puhutavan mukaan ei systeemien sähköstaattikalla ole mitään eroa, voi lukijalle tietenkin tulla mieleen, onko mitään aihetta enää kutsua eräitä erityisiä efektiivisiä suureita *oikeiksi*. Lorentz kuitenkin on tätä mieltä. Lorentz saa "oikeita" ja "efektiivisiä" koordinaatteja vertaamalla tuloksen, että kappaleen dimensiot muuttuvat vaadittavalla tavalla (Lorentz 1952a s. 202). Tällöin hän on oletanut, että Lorentz-transformaatioiden sähköstaattisille voimille antamat tulokset pätevät kaikille molekulaarisille voimille. Hän kirjoittaa (s. 229):

"Edellä sanotun perusteella on selvää, että kahden havaitsijan A_0 ja A saamat vaikutelmat olisivat kaikissa suhteissa samat. Olisi mahdollista ratkaista, kumpi heistä liikkuu tai pysyy paikallaan eetterin suhteen."

Lorentz kuten monet muutkin suhteellisuusteoriasta kirjoittaneet identifioi tässä sen, että tietyt yleisen teorian mukaiset yhtälöt ja siis yleiset luonnonlait ovat eri havaitsijoiden mielestä samat, ja että heidän maailmasta saamansa vaikutelmat ovat samat. Tähän ongelmaan tulemme toistuvasti viittaamaan. Vaikka yleiset lait asettaisivatkin kaikki toistensa suhteen tasaisesti liikkuvat havaitsijat tasa-arvoiseen asemaan, ei tästä välttämättä seuraa, että luonnonlait olisivat konkretisoituneet sellaisella tavalla, että tosiasiallisessa maailmassa havaitsijat olisivat tasa-arvoisia. Tämä kysymys nousee kosmologiassa keskeiseksi.

Einsteinin erityinen suhteellisuusteoria

Paikan perusprobleemi

Mainitsimme jo aluksi, että Einsteinin asti oli ajateltu mekaniikan lakien pysyvän samoina

koordinaattitransformaatiossa (1). Tätä kutsui Philipp Frank vuonna 1909 *Galilei-transformaatioksi* (Pais 1983 s. 140). Vuonna 1905 ei mekaniikasta löytynyt mitään Galilei-invarianssin vastaista evidenssiä. Konflikti syntyy, kun Galilei-invarianssi kohotetaan universaaliseksi periaateksi, jonka siinä myös tulisi päteä elektrodynamiikassa ja optiikassa. Tätä ongelmaa käsittelee Albert Einsteinin fundamentaalinen vuoden 1905 artikkeli *Zur Elektrodynamik Bewegter Körper* (Einstein 1952). Artikkelin johdannossa Einstein mainitsee probleemim, että sähkömagneettisia ilmiöitä koskevat kokeet eivät ole paljastaneet mitään Maan liikkeestä johtuvaa efektiä, ja jatkaa (s. 37-38):

"Tämän kaltaiset esimerkit, yhdessä epäonnistuneiden yritysten kanssa löytää mitään Maan liikettä "valovälialueen" suhteen, viittaavat siihen, että elektrodynamiikan sen enempää kuin mekaniikan ilmiöillä ei ole mitään ominaisuuksia, jotka vastaisivat absoluuttisen levon ideaa. Pikemminkin ne viittaavat siihen, kuten jo on osoitettu ensimmäisen kertalukuaan pieneiden tapauksissa, että samat elektrodynamiikan ja optiikan lait pätevät kaikissa referenssijärjestelmissä, joissa mekaniikan yhtälöt pätevät. Nostamme tällaisen ehdotuksen (jonka ajatusta tästä eteenpäin kutsutaan "suhteellisuusperiaateksi") postulaatin asemaan, ja introdusoimme myös toisen postulaatin, joka on vain näennäisesti yhteensovittamaton edellisen kanssa, nimittäin että valo etenee tyhjiässä avaruudessa aina määrättyllä nopeudella c , joka on säteilevän kappaleen liikelilasta riippumaton. Nämä kaksi postulaattia riittävät pääsemään liikkuvien kappaleiden elektrodynamiikan yksinkertaiseen ja ristiriidattomaan teoriaan, joka perustuu stationaarille kappaleille pätevään Maxwellin teoriaan. "Valoa kuljettavan eetterin" introdusoiminen osoittautuu sikäli turhaksi, että tässä kehiteltävä näkemys ei vaadi mitään "absoluuttisesti stationaarista paikkaa", jolla olisi erityisiä ominaisuuksia, eikä se aseta mitään nopeusvektoria tyhjän avaruuden pisteelle, jossa sähkömagneettiset prosessit tapahtuvat."

Vuonna 1916 Einstein julkaisi teorian tunnetun yleiskatsauksen *Über die spezielle und allgemeine Relativitätstheorie (Gemeinverständlich)*. Teoksen pykälän 3 (Einstein 1920 s. 6-7) otsikko on *Paikka ja aika klassisessa mekaniikassa*. Einstein ilmoittaa tietyn varauksin mekaniikan tehtäväksi tutkia, miten kappaleet muuttavat ajan mukaan sijaintiaan paikassa. Varauksiaan hän selittää seuraavasti:

"On epäselvää, miten tässä on käsiteltävä "sijainti" (Ort) ja "paikka" (Raum). Seison tasaisesti etenevän junavaunun ikkunassa ja pudotan kiven ratapenkereelle antamatta sille mitään vauhtia. Siitten näen kiven putoavan suoraan alaspäin (jättäen ilman vastuksen huomiotta). Jalkakäytävältä käsin rikkomustani katsova jalankulkija huomaa kiven putoavan maahan paraabelinkaarta myöten. Kysyn nyt: sijaitsevatko "sijainnit", joiden kautta kivi putoaa, suoralla viivalla vai paraabelilla? Edelleen, mitä tässä tarkoittaa liike "paikassa"? ... Ensimmäiseksi jätämme tyystin sivuun hämärän sanan "paikka", jota vastaavaksi emme rehellisesti tunnustaneen voi ajatella yhtään mitään. Sen sijaan asetamme "liikkeen suhteessa johonkin käytännöllisesti katsoen kiinteään vertailukappaleeseen". ... Kun nyt otamme "vertailukappaleen" sijasta käyttöön matemaattista kuvailua varten käyttökelpoisen "koordinaattisysteemin" käsitteen, voimme sanoa: Kivi piirtää vaunuun kiinteästi yhdistetyssä koordinaattisysteemissä suoran viivan, maanpintaan kiinteästi yhdistetyssä koordinaattisysteemissä paraabelin. Tästä esimerkistä nähdään selvästi, että ei ole olemassa ratakäyrää sellaisenaan, vaan ainoastaan ratakäyrä suhteessa johonkin määrättyyn vertailusysteemiin."

Logiikan perspektiivistä katsoen Einstein tekee nyt liian vahvan väitteen. Eihän hänen esimerkkinsä osoita, että "absoluuttista paikkaa" ei olisi olemassa. Sekä Galilei että Newton olisivat ymmärtäneet ja hyväksyneet Einsteinin esimerkin, mutta hyväksyivät siitä huolimatta myös absoluuttisen paikan.

Suhteellisuusperiaate

Vuoden 1905 artikkelissa annetaan kaksi postulaattia (Einstein 1952 s. 41):

"Seuraavat pohdiskelut perustuvat suhteellisuusperiaatteelle sekä valon nopeuden vakioisuuden periaatteelle. Määrittelemme nämä kaksi periaatetta seuraavalla tavalla:

1. Lakeihin, joiden mukaan fyysikaalisten systeemien tilat muuttuvat, ei vaikuta, jos nuo tilojen muutokset esitetään jommassakummassa kahdesta tasaisessa translaatioliikkeessä olevassa koordinaattisysteemistä.

2. Jokainen valonsäde liikkuu "stationarisessa" koordinaattisysteemissä määrättyllä nopeudella c , emittoipa säteen stationaarinen tai liikkuva kappale. Niinmuodoin nopeus = valon kulkema matka / aikaväli, missä aikaväli on ymmärrettävä § 1:n määritelmän mielessä."

Näistä periaateista lähtien Einstein johtaa jo edellä

tarkastelemamme sittemmin nimellä *Lorentz - transformaatio* tunnetun koordinaattitransformaation (2). Einstein johtaa transformaatioyhtälöt Lorentzista poikkeavalla tavalla, joka ei vetoa Maxwellin yhtälöihin eikä niiden invarianssiominaisuuksiin. Einstein lähtee liikkeelle *samanaikaisuuden* analyysistä ja nostaa tärkeimmäksi asiaksi näkemyksen, että tähän on klassillisessa fysiikassa kiinnitetty liian vähän huomiota. Tällä tavalla hän antaa uuden teorian perusteille *epistemologisen* sävyn, jota sitten jotkut pitivät teorian olennaisena ja nimenomaan Lorentzin teoriasta poikkeavana piirteenä.

Lorentzin tulkinnaissa oli yhtälöissä (2) esiintyvä parametri t' vain matemaattinen apusuure, mutta Einsteinin antaman samanaikaisuuden analyysin mukaan se oli fysikaalisesti täysin tasa-arvoinen "alkuperäisen" ajan t kanssa. Tämä johti Einsteinin formuloiman *suhteellisuusteorian* siihen piirteeseen, joka herätti aikalaisissa suurinta kohua, nimittäin ajan riippuvuuteen systeemin liikekilasta. Käsittelem tätä aihetta perusteellisemmin kirjoituksessa *Lehti* 2000; nyt keskityn paikan probleemeihin. Yhtälöt (2) kylläkin osoittavat, että ajan ja paikan probleemeja ei voi erottaa toisistaan sellaisessa fysiikassa, joka pitää näitä yhtälöitä perustavina.

Kun yhtälöitä (2) verrataan aikaisempiin Galilei-transformaation yhtälöihin (1), todetaan eräs periaatteellinen ero. Aikaisemmissa transformaatioissa kaikki toistensa suhteen liikkuvat paikalliset koordinaatit olivat mahdollisia *saman* aikakoordinaatin t kanssa. Yhtälöissä (1) oletetaan ajan pysyvän "absoluuttisena", mutta tämä ei anna mitään ratkaisua sen puolesta, kumpi koordinaateista x , x' olisi "oikeampi". Niinmuodoin paikka saattoi olla 'ei-absoluuttinen', vaikka aika olikin 'absoluuttinen'. Jos sen sijaan yhtälöissä (2) *jostain* syystä pidämme aikaa t oikeampana kuin aikaa t' , niin tämä tuo heti mukanaan sen, että myös paikkakoordinaatti x on "oikeampi" kuin paikkakoordinaatti x' . Lorentz-transformaation (2) mukaan *aikakoordinaatin kiinni lyöminen lyö samalla kiinni paikkakoordinaatit*. Tämä merkitsee, että jos hyväksymme yhtälöt (5) jossain mielessä oikeammiksi kuin yhtälöt (1), niin *ajan absoluuttisuuden oletaminen tuo mukanaan paikan absoluuttisuuden*. Nyt on siis vain seuraavat mahdollisuudet: *Joko* kaikki 'ajat' ja kaikki 'paikat' ovat samanarvoisia, *tai* on olemassa erikoisasemassa oleva aika, *ja myös erikoisasemassa oleva paikka*. Tämän asian implikaatioihin palaamme kosmologian yhteydessä.

Vuoden 1916 yleiskatsauksessa Einstein kertoo (*Einstein* 1920 s. 8-10):

"... Jos suhteellisuusperiaate (suppeammassa mielessä) ei päde, niin eivät toistensa suhteen tasaisesti liikkuvat Galileilaiset koordinaattijärjestelmät K , K' , K'' jne olisi luonnonilmiöiden kuvaajina tasa-arvoisia. Silloin kaiketi olisi tuskien muuta ajateltavissa, kuin että luonnonlait olisi mahdollista formuloida erityisen yksinkertaisesti ja luonnollisesti ainoastaan, jos kaikkien Galileilaisten koordinaattisysteemien joukosta valittaisiin yksi (K_0) vertailukappaleeksi... Tätä kutsuisimme sitten (johtuen sen eduista luonnonkuvauksen kannalta) oikeutetusti "absoluuttisesti levossa olevaksi", ja muita Galileilaisia systeemejä "liikkuviksi". ... Nytpä on meidän Maamme Auringon ympäri tapahtuvasta rataliikkeestä johtuen verrattavissa noin 30 kilometrin nopeudella liikkuvaan vaunuun. Niinpä olisi suhteellisuusperiaatteen toteutumattomuuden tapauksessa odotettavissa, että Maan hetkellisen nopeuden suunta sisältyisi luonnonlakeihin, jolloin siis fyysikaalisten systeemien käyttäytyminen riippuisi niiden paikallisesta orientoitumisesta Maan suhteen. Johtuen vuoden mittaan tapahtuvista Maan kiertoliikkeen nopeuden suunnan muutoksista ei Maa voisi kautta vuoden olla levossa suhteessa hypoteettiseen systeemiin K_0 . Suuresta huolellisuudesta huolimatta ei milloinkaan ole havaittu sen kaltaista maanpäällisen fyysikaalisen paikan anisotropiaa, t.s. eri suuntien fyysikaalista eriarvoisuutta. Tämä on painava argumentti suhteellisuusperiaatteen puolesta."

Suhteellisuusperiaate formuloidaan sekä tässä että muualla yleisiä lakeja koskevaksi. Periaatteesta ei seuraa, etteivätkö lait realisoituisi maailmassa, jossa jokin koordinaatisto K on selvästi erikoisasemassa. On tapahtunut siirtymä, jonka monet suhteellisuustoriasta kirjoittavat tekevät. Ehdotetaan, että jos *luonnonilmiöt* nostaisivat jonkin koordinaatiston erikoisasemaan saamalla siinä erityisen yksinkertaisen muodon, niin myös *luonnonlakien* pitäisi saada tuossa koordinaatistossa muita yksinkertaisempi muoto. Erityinen suhteellisuusteoria *matemaattisena teoriana* tulee aivan mainiosti toimeen ilman *koordinaatistojen tasa-arvo-
prinsippiä*, mutta teorian filosofiselle tulkinnalle se tuntuu olevan olennainen. Absoluuttisesti levossa olevan systeemin, siis myös *absoluuttisen paikan*, Einstein määrittelee sellaiseksi, jossa *ilmiöt* saavat erityisen yksinkertaisen



muodon, jolloin siis myös *lakien* pitäisi saada. Tämän jälkeen absoluuttisen paikan ei-olemassaolo vetoaa tasa-arvo-prinsiippiin, jonka mukaan tuollaista systeemiä ei ole.

Erityisen suhteellisuusteorian probleemeja

Periaatekysymyksiä

Einstein kirjoitti vuonna 1919 (*Einstein* 1956 s. 277):

"Mekaniikassa hyväksyttyä koordinaattijärjestelmää kututaan "inertiaalisysteemiksi". Inertiaalisysteemin liiketila ei mekaniikan mukaan ole luonnon yksikäsitteisesti määräämä. Päinvastoin, seuraava määrittelmä pätee: - inertiaalisysteemin suhteen tasaisesti ja suoraviivaisesti liikkuva koordinaattijärjestelmä on samoin inertiaalisysteemi. "Erityisellä suhteellisuusprinsiipillä" tarkoitetaan tämän määrittelmän yleistystä kattamaan jokaisen mahdollisen luonnollisen tapahtuman. Niinpä jokaisen universaalisen luonnonlain, joka pätee suhteessa koordinaattisysteemiin C, täytyy myös olla sellaisenaan [as it stands] voimassa suhteessa koordinaattisysteemiin C, joka on tasaisessa translaatioliikkeessä C:n suhteen."



Einstein korosti nimen "suhteellisuusteoria" johtuvan siitä, että meillä voi olla liikkumisesta kokemus vain jonkun objektin suhteen. Olemme jo kiinnittäneet huomiota seuraavaan erikoisuuteen: Einsteinin formulaatio on ambivalentti tavalla, joka kenties on tähän päivään asti jossain määrin hämärtänyt kysymyksen, mitä suhteellisuusprinsiipillä oikeastaan tarkoitetaan. Hän kirjoittaa ensin, että suhteellisuusprinsiippi kattaa jokaisen mahdollisen luonnollisen tapahtuman. Sen jälkeen hän kirjoittaa, että jokaisen universaalisen luonnonlain tulee olla samaa muotoa kaikissa inertiaalisysteemeissä. On kuitenkin aivan eri asia, jos suhteellisuusprinsiippi formuloidaan luonnollisille tapahtumille tai jos se formuloidaan luonnonlaeille. Luonnollisissa tapahtumissa on yleisten universaalisten lakien lisäksi määräävinä tekijöinä alkuarvot. Hyväksyimmepä tai emmepä hyväksyneet suhteellisuusprinsiippiä luonnonlaeille, joka tapauksessa voi nykyisin antaa hyviä perusteluja väitteelle, että on virheellistä hyväksyä se alkuarvojen määräämille luonnon tapahtumille. Tilanteen logiikka oli tietenkin ollut alun alkaen selvää, mutta asiaan kiinnitettiin huomio vasta kun se kosmologian yhteydessä konkretisoitui.

Einstein argumentoi vuonna 1905, että eetteri ja absoluuttinen paikka ovat turhia ja soveltumattomia johdonmukaista elektrodynamiikkaa varten. Lorentz ihaili Einsteinin näkemystä mutta ei omaksunut sitä. Elämänsä loppuun asti Lorentz piti absoluuttista aikaa ja paikkaa mielekkäinä käsitteinä (*McCormach* 1981 s. 498). Lorentz kirjoitti vuonna 1913 (*Pais* 1983 s. 166-167):

"Einsteinin mukaan ei ole mielekäästä puhua liikkeestä eetterin suhteen. Hän kiistää myös absoluuttisen samanaikaisuuden olemassaolon.

On tosiaan merkillepantavaa, että nämä suhteellisuuskäsitteet, myös aikaa koskevat, ovat tulleet niin nopeasti hyväksytyiksi.

Näiden käsitteiden hyväksyminen kuuluu pääasiassa epistemologian alaan. ... On kuitenkin varmaa, etä ajatustottumuk sistamme suuressa määrin riippuu, vetäkö toinen vai toinen tulkinnosta meitä voimakkaammin puoleensa. Mitä tähän luonnoisijaan tulee, hän löytää tiettyä tyydytystä vanhemmasta tulkinnasta, jonka mukaan eetterillä on vähintäänkin tietty määrä substantiaalisuutta, aika ja paikka voidaan tiukasti erottaa toisistaan, ja voidaan puhua samanaikaisuudesta ilman enempää spesifikaatioita."

Lorentzin voi katsoa kannattaneen "luonnonlakien salaliittoteoriaa", jonka mukaan luonnonlait eivät tee eroa liikkuvan ja paikallaan pysyvän koordinaatiston välillä, vaikka ero sellaisenaan maailman tosiasiana onkin olemassa. Monet ovat sitä mieltä, että jos joku asennoituu näin, hän ei ole ymmärtänyt suhteellisuusteoriaa. Tämä syytös sekoittaa intellektuaalisen käsittämisen emotionaaliseen hyväksymiseen. Riittääkö teoriaa varten, että sen voi intellektuaalisella tasolla käsitellä ja sen mukaisesti käyttää, vai täytyykö se myös sydämen vakaumuksella hyväksyä "todeksi"?

Minkowskin teoria paikasta ja ajasta

Palaamme Einsteinin vuoden 1905 artikkelia välittömästi seuranneisiin kehitelmiin. Artikkelin *Minkowski* 1952 on matemaatikko Hermann Minkowskin vuonna 1908 Kölnissä pitämän "Avaruus ja aika" -luennon englanninkielinen käännös.



Sen iskevät alkusanat samoin kuin luennon loppu sävähdyttivät suuresti kuulijoita. Luento alkaa seuraavasti (s. 75):

"Avaruutta ja aikaa koskevat näkemykset, joita haluan teille selostaa, ovat peräisin kokeellisen fysiikan maaperästä, ja siinä on niiden voima. Ne ovat radikaaleja. Tästä eteenpäin paikka sinänsä ja aika sinänsä ovat tuomittuja lakastumaan pelkiksi varjoiksi, ja ainoastaan eräänlainen niiden yhdistelmä tulee säilymään riippumattomana realiteettina."

Asiatekstin Minkowski alkaa kertomalla Newtonin mekaniikan invarianssiominaisuuksista eli nykyisen terminologian mukaan "Galilei-invarianssista", josta tämän esityksen alussa mainitsimme. Emme voi fysikaalisten ilmiöiden perusteella päätellä, onko stationaariseksi oletettu paikka mahdollisesti tasaisessa translaatioliikkeessä (Minkowski 1952 s. 76-77):

"... Olkoot x, y, z paikan suorakulmaiset koordinaatit, ja merkitkään t aikaa. Havaitsemimme objekteihin sisältyvä poikkeus koinaatioina paikkoja ja aikoja. Kukaan ei ole milloinkaan havainnut paikkaa muuten kuin jonain aikana, eikä aikaa muuten kuin jossain paikassa. Kunnioitan kuitenkin vielä dogmia, jonka mukaan sekä paikalla että ajalla on itsenäinen merkitys. Paikan pistettä jonain ajan hetkenä, siis lukusysteemiä x, y, z, t , kutsun maailmanpisteeksi. Kaikkien ajateltavissa olevien lukusysteemien x, y, z, t moninaisuudelle annamme nimen maailma. ... Kiinnitämme huomion maailmanpisteessä x, y, z, t sijaitsevaan substantiaaliseen pisteeseen ja kuvittelemme, että pystymme tunnistamaan tuon substantiaalisen pisteen jokaisena muuna aikana. Olkoot tämän substantiaalisen pisteen aikaelementtiä dt vastaavat paikkakoordinaattien muutokset dx, dy, dz . Täten saamme niin sanoaksemme tuon substantiaalisen pisteen ikuisen elinkaaren, maailmassa sijaitsevan käyrän, maailmanviivan, jonka pisteet voi yksikäsitteisesti liittää parametrin t arvoihin välillä $- \infty, + \infty$. Näemme kokonaisuniversumin jakautuvan samanlaisiksi maailmanviivoiksi.

... mekaniikan lakien formulaatioita muuttamatta [voimme] korvata [koordinaatit] x, y, z, t [koordinaateilla] $x - t, y - t, z - t, t$, missä [kertoimilla] γ, β, β^2 , on mielivaltaiset vakioarvot. Niinmuodoin voimme antaa aika-akselille minkä tahansa haluamamme suunnan kohti maailman ylempää puoliskoa $t > 0$."

Minkowski esittää seuraavaksi hieman aprioristisia perusteluja sille, että Galilei-transformaatio (1) on syytä korvata Lorentz-transformaatiolla (2). Hän osoittaa tällöin mahdolliseksi määrätellä nelidimensioiseen avaruuteen sellaisen geometrisen rakenteen, että siinä kutakin "aika-akselia" vastaa sitä vastaan eräässä yleistetyssä mielessä "kohtisuora" kolmidimensiainen paikka. Tällöin voi Lorentz-transformaatiot tulkita eräänlaisiksi "kierroiksi" yhden "aika-paikka-systeemin" koordinaatistosta toisen koordinaatistolle. Tämän geometrisen konstruktion suoritettuaan Minkowski kirjoittaa (Minkowski 1952 s. 79-80):

"Liittyen edellä selostettuun kuvioon voimme esimerkiksi merkitä aikaa t :lla, mutta tällöin täytyy tämän yhteydessä myös määrätellä paikka kolmen parametrin x', y', z' monistoksi, jolloin fysiikan lait esitettäisiin täsmälleen samalla tavalla koordinaattien x', y', z', t' kuin koordinaattien x, y, z, t avulla. Silloin ei maailmassa enää olisi paikkaa, vaan ääretön määrä paikkoja, analogisesti sen kanssa, että kolmidimensioisessa avaruudessa on ääretön määrä tasoja. Kolmidimensioisesta geometriasta tulee luku nelidimensioista fysiikkaa. Nyt tiedätte, miksi alkajaisiksi sanoin, että paikka ja aika kalpenevat varjoiksi, ja vain itse maailma tulee säilymään."

Seuraavaksi Minkowski osoittaa, että Lorentzin transformaatioihin (2) johtanut hypoteesi on täysin ekvivalentti paikan ja ajan uusien käsitteiden kanssa, ja "ne, tosiaankin, tekevät hypoteesista ymmärrettävämmän" (Minkowski 1952 s. 81). Hän kirjoittaa (s. 82-83):

"Lorentz kutsui $x:n$ ja $t:n$ t' -koinaatiota tasaisessa liikkeessä olevan elektronin lokaaliksi ajaksi, ja sovelsi tämän käsitteen fysikaalista konstruktiota ymmärtääkseen paremmin kontraktiohypoteesia. A. Einsteinille kuuluu kuitenkin ansio sen selkeästä oivaltamisesta, että yhden elektronin aika on juuri yhtä hyvä kuin toisenkin, toisin sanoen, että [aikoja] t ja t' täytyy käsitellä samalla tavalla. Niinpä aika ilmiöiden yksikäsitteisesti määräämäänä käsitteenä siirrettiin ensimmäiseksi korkealta sijaltaan syrjään. ... [Suhteellisuus]postulaatti tulee tarkoitamaan, että ilmiöt antavat vain nelidimensioisen maailman paikassa ja ajassa, mutta että vielä on tietty vapausaste sen projisoimisessa paikaksi ja ajaksi. Pidän parempana kutsua sitä absoluuttisen maailman postulaatiksi (tai lyhyesti maailmanpostulaatiksi)."

Minkowskin molemmissa edellä siteeratuissa teksteissä ilmenee jälleen käsitteellinen lukuma, johon olemme jo kiinnittäneet huomion. Kaikki tähänastinen on tarkoitettu sen osoittamiseksi, että aika on "siirretty syrjään" eräistä perusteorioista. Ei tästä seuraa, että se olisi syrjäytetty myös ilmiöistä. Minkowski lähtee ajatuksesta, että ilmiöitä hallitsevat

lait eivät määrää yksikäsitteistä referenssijärjestelmää, mutta kääntää asian muotoon, että *ilmiöt* itse eivät määräisi. Minkowskin avaruutta käsitellään kaikissa suhteellisuusteorian esityksissä. Kaikki eivät kuitenkaan olleet sen käyttöön varauksettoman ihastuneita. Esimerkiksi operationalistisen filosofian kannattaja P. W. Bridgman selostaa, miten Lorentz-transformaation yhtälöt tulkitaan nelidimensioisen Minkowskin avaruuden koordinaattitransformaatioksi, ja mainitsee sitten jossain määrin hyväksyvään sävyyn Herbert Dinglen mielipiteen (Bridgman 1963 s. 10):

"Ensimmäisen kertaluokan turma (ymmärtämisen kannalta eri asiana kuin teorian ulottuvuuden kannalta) tapahtui vuonna 1908, kun Minkowski siirsi asian fysiikan alueelta matematiikan alueelle."

Ainutlaatuisen paikan mahdollisuus

Operationalisti Percy Williams Bridgman selostaa, millä tavoin geometrinen (t.s. kolmidimensioisessa paikassa sijaitseva) väli mitataan. Voidaan käyttää monia komplisoituja operaatioita, mutta ne kaikki johtavat lopulta "intuitiiviseen tulokseen". Tästä Bridgman kirjoittaa (Bridgman 1957 s. 350-351):

"Kaikki komplisoidut prosessit saavat mielensä ja merkityksensä tosiasiana, että taustalla on yksi määrätty proseduri, johon voimme palata, ja josta emme tahdo joutua pysyvästi eroon. Jos joku kysyy, "miksi" väli on asioiden kuvailemista varten niin välttämätön, niin mitään vastausta ei mielestäni ole. Raakana tosiasiana jokainen yksittäinen havaitsija huomaa, että luonnon kuvailemiseen soveltuu erityisen hyvin hänen itsensä suhteen stationaarisella mittakapilla mittaamansa väli. Tosiasia, että luonto itse tarjoaa tämän yksikäsitteisen kuvailemisen tavan, näyttää niistä osan intuitiivisesta viehätuksesta väitteeltä, että kaikki referenssijärjestelmät ovat yhtä merkittäviä."

Bridgmanin tekstissä on eräs kummallisuus. Toisaalta hän kertoo, että jokainen *yksittäinen havaitsija* huomaa tietyn proseduurin hyväksi, toisaalta hän vakuuttaa, että *luonto itse* on tarjonnut tämän yksikäsitteisen tavan. Jos luonto itse on sen tarjonnut, se on tarjonnut sen *kaikille havaitsijoille yhdessä*, ja juuri tästä johtuu, että he menettelevät samalla tavalla. Bridgman korostaa edelleen luontoa itseään kertomalla, että se tarjoaa meille myös yksikäsitteisen koordinaatiston, nimittäin tähtien universumiin kiinnitetyn. Tämän on Mach todennut. Bridgmanin mukaan Einstein ei pidä tätä koordinaatistoa merkittävänä, sillä se ei sovi hänen "kenttä"-näkemysensä, jonka mukaan lokaalit tapahtumat voi merkitystä omaavalla tavalla korreloida vain niiden välittömään ympäristöön (Bridgman 1957 s. 351). - On oikeastaan väärin puhua yksikäsitteisestä *koordinaatistosta*, sillä voihan sellaisessa aina suorittaa puhtaasti paikassa tapahtuvia muunnoksia. Pitäisi pikemminkin puhua yksikäsitteisestä *paikasta*. Mach ei ollut ensimmäinen, joka vetosi tähtiin paikan kiinnittäjänä; näin teki jo Kopernikus.

Bridgmanin ajatukset luonnon antamasta yksikäsitteisestä referenssijärjestelmästä ovat nyttemmin toteutuneet. Referenssijärjestelmä on lisäksi määriteltävissä niin operationaalisesti, että otaksuttavasti Bridgmanin olisi ollut siihen tyytyväinen. Palaamme kohta siihen, että Einstein oli *de facto* jo kauan aikaisemmin luopunut kaikkien koordinaatistojen samanarvoisuudesta jakaessaan kosmologisessa mallissaan aika-avaruuden yksikäsitteisellä tavalla ajaksi ja paikaksi. Näin saatu paikka on jopa erinomaisen absoluuttinen, sillä jos hyväksymme erityisen suhteellisuusteorian perusteet ja asetamme yhden aikakoordinaatin "absoluuttiseen" erikoisasemaan, asetamme automaattisesti samalla myös erään paikan "absoluuttiseen" erikoisasemaan, kuten edellä todettiin.

Kosmologiaa

Einstein hylkää erityisen suhteellisuusteorian

Vuonna 1905 Einstein oli päätenyt edellä hahmottelemaamme teoriaan, johon kuului *globaalin* eli kaikkialla universumissa pätevän Lorentz-invarianssin oletus. Einstein muistelee myöhemmin tuolloisia murheitaan, jotka liittyivät kysymykseen: Olisiko mahdollista, että suhteellisuusperiaate olisi pätevä myös toistensa suhteen kiihtyvässä liikkeessä oleville

systemeille? Jo vuonna 1907 Einstein alkoi tiensä kohti tämän periaatteen mukaista yleistä suhteellisuusteoriaa, mikä siis merkitsi, että erityisen suhteellisuusteorian perustana oleva periaate vaati uudelleen arvioimista. Lorentz-invarianssissa (ja siis transformatioyhtälöiden (2) yleispätevydessä) oli jotain vialla, jos yleinen suhteellisuusperiaate haluttiin saada voimaan. Uudenlaisen teorian rakentamisen perusideana oli, että Minkowskin konstruoiman nelidimensioisen avaruuden geometriaa tulisi modifioida jollain sellaisella tavalla, joka sisällyttäisi gravitaation teorian maailman geometriaan. Elokuussa 1912 Einstein oivalsi, että Riemannin geometria oli oikea matemaattinen väline teorialle, joka sitten sai nimen *yleinen suhteellisuusteoria* (Pais 1983 s. 208-210). Vuonna 1922 Einstein kirjoitti gravitaatioprobleemin ratkaisusta (s. 211-212):

"... Probleemi pysyi minulle ratkaisemattomana vuoteen 1912 asti, jolloin yhtäkkiä oivalsin, että Gaussin pintateoria sisältää avaimen tämän mysteerin ratkaisemiseksi. Käsitin, että Gaussin pintakoordinaateilla on syvämerkitys. Tuolloin en kuitenkaan tiennyt, että Riemann oli tutkinut geometrian perusteita vielä syvällisemmällä tavalla... Käsitin, että geometrian perusteilla on fyysikaalinen merkitys."

Geometrian ja gravitaation yhdistäminen tekee yleisen suhteellisuusteorian peruskäsitteistön tulkitsemisen vaikeaksi, emmekä niitä käy selostamaan. Mitä ovat uuden maailman 'maailmanpisteet'? Vaikeus korostuu, kun siirrymme lokaalista 'melkein eukleidisesta' tilanteesta suurempaan mittakaavaan: kosmokseen tai voimakkaisiin gravitaatiokenttiin. Abraham Pais sivuuttaa asian melko vähällä huomiolla kirjoittaessaan yleisestä suhteellisuusteoriasta (Pais 1983 s. 266):

"Sen yksi kinemaattinen uutuus oli selvästi näkyvässä alusta alkaen. Lorentz-invarianssilla riistettiin sen globaali pätevyys, mutta sillä oli jatkuvasti keskeinen rooli lokaalissa invarianssina."

Stationaarisen ja laajenevan avaruuden ongelmat

Vuonna 1917 Einstein esitti kosmoksen kokonaisrakennetta varten teorensa mukaisen "maailmanmallin", johon kohta palaamme. Hänen itsensä parhaana ja täydellisimpänä sekä erityisen että varsinkin yleisen suhteellisuusteorian yleisesityksenä pidettäneen teosta *Einstein 1951*, jonka ensimmäinen painos ilmestyi vuonna 1922. Tällöin ei laajenevan avaruuden mahdollisuus vielä ollut noussut esiin, vaan Einstein piti näkemystä stationaarisesta maailmasta. Tämän mukaisesti hän kirjoitti yleisen suhteellisuusteorian mukaisesta nelidimensioisesta maailmasta seuraavaa (s. 98-99):

"... Tässä kuvittelussa universumissa ovat kaikki avaruussuuntaiset pisteet geometrisesti ekvivalentteja; avaruudimensiossaan sillä on vakioaarevuus, ja se tulee olemaan lieriömäinen x_4 -koordinaatillaan. Erityisen tyydyttävältä näyttää mahdollisuus, että universumi on paikallisesti äärellinen, jolloin [tiheyden] vakioisuusoletuksen mukaisesti sen kaarevuus on vakio, ja se on joko pallomainen tai elliptinen."

Einstein on jakanut universumin nelidimensioisen aika-avaruuden *globaalisti* paikkaan ja aikaan, joilla on aivan erilaiset ominaisuudet. Paikkakoordinaattien suhteen universumille oletetaan vakioaarevuus, jolle Einstein ilmeisen kernaasti antaa positiivisen arvon. Aikakoordinaatti on näistä selvästi poikkeava, ja se saa nelidimensioisen maailman "lieriömäiseksi". Edellä siteeratussa tekstissä Einstein *ei millään tavalla vihjaa* siihen, että hän on näin tehnyt maailmankaikkeuden rakenteesta ehdotuksen, joka *ei ole hänen oman suhteellisuusteoriaansa mukainen*.

Arthur Stanley Eddington kirjoitti vuonna 1920 yleisen suhteellisuusteorian mukaisesta kosmologiasta teoksen *Eddington 1960*. Hän kuvailee varhaisia stationaarista suhteellisuusteoreettisia kosmologioita s. 159-166. Einsteinista poiketen Eddington korostaa selkeästi muutosta, joka aikaa ja paikkaa koskevilla näkemyksillä on tapahtunut verrattuna erityiseen suhteellisuusteoriaan (s. 192-193):

"Tätä teoriaa vastaan voi esittää kaksi vastaväitettä. Ensimmäinen: absoluuttiset avaruus ja paikka on palautettu kosmisen skaalan ilmiöihin. ... Maailman kokonaisuutena on yksi suunta, jossa se ei ole kaareutunut; tuo suunta antaa eräänlaisen paikasta poikkeavan absoluuttisen ajan. Suhteellisuus on redusoitu lokaaliksi ilmiöksi, ja vaikka tämä onkin aivan riittävä tähän mennessä kuvailulle teorialle, olemme taipuvaisia

katsomaan tätä rajoitusta melko vastahakoisesti."

Einstein kirjoitti teoksen *Einstein* 1951 kolmanteen painokseen vuonna 1946 liitteen *Kosmologisesta probleemista* (s. 104-126). Tällöin tunnettiin jo avaruuden laajeneminen, ja sen mukaiset kosmologiset mallit olivat syrjäyttäneet varhaisemmat stationaariset mallit. Einstein kirjoittaa asiasta (s. 107-108):

"Havaitsemme, että tähtien systeemit, sellaisena kuin me ne näemme, sijoittuvat approksimatiivisesti kaikkiin suuntiin yhtä tiheään. Täten johdumme olettamukseen, että systeemin paikkaan liittyvä isotropia pätee kaikille havaitsojille, kaikissa paikoissa ja kaikkina aikoina, kun havaitsija on levossa ympäröivän materian suhteen. Toisaalta emme enää tee olettamusta, että materian keskimääräinen tiheys olisi ajallisesti vakio ympäröivän materian suhteen levossa olevan havaitsijan mielestä. Täten luovumme olettamuksesta, että metrisen kentän esitys olisi ajasta riippumaton.

Meidän tulee nyt löytää matemaattinen muoto ehdolle, että universumi on paikallisuudesta puhuen kaikkialla isotrooppinen. (Nelidimensioisen avaruuden jokaisen pisteen kautta kulkee partikkelin rata (jota seuraavassa lyhyiden vuoksi kutsutaan 'geodeettiseksi viivaksi').

... Tällöin täytyy valita radiaaliset suunnat aikaluonteisiksi ja vastaavasti perheen pinnat paikkaluonteisiksi."

Tässä on tullut mukaan Friedmannin ja Lemaitren kosmologioiden sekä Hubblen havaintojen tuoma muutos alkuperäiseen esitykseen. Ohimennen, asiaa mitenkään korostamatta, Einstein jälleen mainitsee radikaalin oletuksen: *maailma itse onkin sellainen, että siinä on yksikäsitteinen jako aikaan ja paikkaan mahdollinen. Tämän diskreettimmin olisi asiaa tuskin voinut sanoa.*

Yleisen suhteellisuusteorian ensimmäisten kosmologisten mallien rakentamisesta alkaen oli siis selvää, että kosmologiassa oli hyväksyttävä ainakin tavallaan "absoluuttiseksi" luonnehdittavissa oleva paikka, ja siis myös "absoluuttinen" aika sekä liike. Artikkelissa Rees 1998 s. 55 kerrotaan:

"Homogeenisessa avaruudessa voimme määritellä luonnollisen aikakoordinaatin siten, että kaikki universumin osat ovat samanlaisia hyperpinnalla, jotka vastaavat tiettyä arvoa t."

Tämä merkitsee, että voimme määritellä myös absoluuttisen paikan juuri Reesin mainitsemaksi hyperpinnaksi. Samoin voimme määritellä paikallaan olevan havaitsijan sellaiseksi havaitsijaksi, jonka paikka yhtyy tuohon absoluuttiseen paikkaan. Seuraavaksi voimme määritellä absoluuttisen liikkeen liikkeenä tuon havaitsijan suhteen. Nämä määritelmät tarvitsevat onnistuakseen jotain muuta kuin ajan ja paikan käsitteet sisältävää *yleistä teoriaa*; ne tarvitsevat erityisen struktuurin omaavan universumin, joka tosin on yleisen teorian kanssa yhteensopiva, mutta ei sen määräämä.

Mikroaaltotaustasäteily

Kun suhteellisuusteoriasta spekuloiivat tieteenfilosofit olivat pohjineet "observaabeleiden" ja "ei-observaabeleiden" eroja, he olivat huomattavalla varmuudella puhuneet siitä, että mekaniikkaan tai optiikkaan liittyvillä havainnoilla ei "absoluuttista liikettä" voi määritellä. Tämän väitteen mukainen "suhteellisuusperiaate" sisältää teesin, että toistensa suhteen tasaisella nopeudella liikkuvien "havaitsijoiden" (= koordinaatistojen) perhe on siinä mielessä 'tasa-arvoinen', että mitään niistä ei voi havaittavissa olevien ominaisuuksien perusteella nostaa erikoisasemaan. Tämän puolesta vedottiin erityisesti valon nopeuden vakioisuuteen.

Valolla on kuitenkin myös muita ominaisuuksia kuin liikenopeus. Siihen liittyy mm. Doppler-ilmiö, *johon liike vaikuttaa*. Toistensa suhteen liikkuvat havaitsijat näkevät saapuvan valon aallonpituuden erilaisena. Jos olisi olemassa jokin perusteltu syy pitää jotain saapuvan valon aallonpituutta *oikeana*, niin tämä asettaisi yhden havaitsijan erikoisasemaan. Tällaisen perustellun syy on mikroaaltotaustasäteily antanut, ja samalla se on antanut perustelun havaitsijoiden 'tasa-arvon' epäilemiselle. Tämä on tehnyt osan suhteellisuusteoriasta käytyä 'filosofista' keskustelua varsinkin asiattomaksi. Kosmologiassa asiaa on käsitelty taustasäteilyn löytämisestä alkaen, mutta tiedossani ei ole, että tämä olisi jättänyt filosofiseen keskusteluun juurikaan jälkeä. Tämä on sitäkin

oudompaa, kun toisiin ilmiöihin nojaten oli eräiden havaintojen erikoisasema 'paikallaan pysyvinä' käynyt reaalisiksi mahdollisuuksiksi jo heti laajenevan avaruuden teorian syntyessä, kuten edellä todettiin.

Modernissa kosmologiassa on kaksi "kultaista hetkeä". Toinen oli Hubblen tekemä punasiirtymän keksiminen ja tulkitseminen, toinen oli se, kun Penzias ja Wilson vuonna 1965 Bellin laboratoriossa löysivät mikroaaltotaustasäteilyn (Rees 1998 s. 55). - Molemmat antoivat todelliselle universumille ajallis-paikallista struktuuria, joka ei ole minkään (ainakaan nykyisin tunnetun) teorian seurausta. Artikkelissa Weiss 1980 kerrotaan kosmisen taustasäteilyn spektrin mittaamisesta ja mittalaitteista. On saatu 'Planck-spektri', joka vastaa lämpötilaa $2.96 \text{ }^\circ\text{K}$; vaikeutena on absoluuttinen kalibrointi. (s. 515-518). Säteilyn intensiteettijakautuman anisotropia suuressa skaalassa (avaruuskulmille = 10°) on alle 1/3000 (s. 519). Kuitenkin on mitattu kinemaattinen anisotropia, joka on peräisin Maan liikkeestä säteilyn kaukaisen lähteen suhteen; siitä kirjoitetaan (s. 520):

"Tämä anisotropia on nyt definiitisti havaittu tasolla 10^{-3} , ja se on helposti johdettavissa erityisen suhteellisuusteorian mukaisella laskulla mustan kappaleen ontelon seinämien suhteen liikkuvan havaintajan mittaamasta intensiteetistä. Anisotropia säilyttää Planckin spektrin, mutta siinä on havaintokulmasta riippuva lämpötila (dipolitermi), jonka antaa yhtälö:

$$T() = T_0(1 - v^2/c^2)^{1/2} / (1 - v \cos \theta / c) - T_0(1 + v \cos \theta / c),$$

missä T_0 on lähteiden suhteen levossa olevassa koordinaatistossa havaittu lämpötila, v on havaintajan nopeus, ja θ on havaitsemissuunnan ja nopeuden välinen kulma."

Tilanteen optiikan matemaattinen käsittely on siis erityisen suhteellisuusteorian mukaista, mutta tuloksen voi tulkita siten, että se on paljastanut yhden koordinaatiston *faktuaalisen* erityisaseman, vaikka se ei *yleisessä teoriassa* ilmenisikään.

Maan absoluuttisen liikkeen määrääminen

Teoreettisena mahdollisuutena ymmärrettiin, että taustasäteilyä voisi käyttää Maan absoluuttisen liikkeen määräämiseen jo ennen kuin asia oli käytännössä mahdollista. Teoksessa Weinberg 1983 s. 76-77 kerrotaan:

"Asia, joka tekee mikroaaltotaustasäteilyn suuntariippuvuudesta niin kiehtovan aiheen, on, että tuon säteilyn intensiteetin ei odoteta olevan täysin isotrooppista.... Tämän lisäksi esiintyy melkein varmasti kautta koko taivaan säteilyintensiteetin vähäistä jatkuvaa muutosta, jonka aiheuttaa Maan liike universumin halki. Maa liikkuu Auringon ympäri nopeudella 30 kilometriä sekunnissa, ja galaksimme pyöriminen kuljettaa Aurinkokuntaa noin nopeudella 250 kilometriä sekunnissa. Kukaan ei tiedä täsmälleen, mikä nopeus galaksillamme on suhteessa tyypillisten galaksien kosmiseen jakautumaan, mutta todennäköisesti se liikkuu johonkin suuntaan noin muutaman sadan kilometrin sekuntinopeudella. Jos esimerkiksi oletamme Maan liikkuvan nopeudella 300 kilometriä sekunnissa suhteessa universumin keskimääräiseen materiaan ja siis suhteessa säteilevään taustaan, niin Maan liikkeen etu- tai peräpuolen suunnasta tulevan säteilyn aallonpituuden tulisi vastaavasti vähentyä tai lisääntyä suhteessa, mikä on nopeudella 300 kilometriä sekunnissa valon nopeuteen, eli 0.1 prosenttia. Niinpä vastaavan säteilylämpötilan tulisi jatkuvalla tavalla vaihdella suunnasta riippuen, jolloin se olisi noin 0.1 prosenttia keskimääräistä korkeampi suunnasta, minne Maa on menossa, ja noin 0.1 prosenttia keskimääräistä matalampi suunnasta, josta olemme tulossa. Muutamana viime vuonna on paras yläraja vastaavan säteilylämpötilan minkäänlaiselle suuntariippuvuudelle ollut juuri noin 0.1 prosenttia, joten olemme olleet hämmästyttävässä asemassa, jossa pystymme melkein mutta emme aivan mittaamaan Maan nopeuden universumin halki. Ehkäpä tätä kysymystä ei pysty ratkaisemaan ennen kuin mittauksia voi tehdä Maata kiertävistä satelliiteista."

Edellä Weinberg identifioi Maan 'absoluuttisen' liikkeen liikkeeksi "suhteessa universumin keskimääräiseen materiaan". Tällainen ajatus oli esitetty jo aikaisemmin, mutta tutkimalla pelkästään Maan liikettä näkyvän materiaan eli galaksien suhteen oli asian ratkaiseminen osoittautunut vaikeaksi. Nyt oli avautumassa mahdollisuus, että tutkittaisiinkin Maan liikettä universumissa olevan *säteilykentän* läpi, jolloin ajatuksena oli, että universumin materia on keskimäärin levossa tuon säteilykentän suhteen. Jälkimmäisestä asiasta kenties ei kannata huolehtia, sillä voi hyvinkin pitää aiheellisenä 'paikan' määrittelyä pikemminkin keskimääräisen säteilyn kuin keskimääräisen

materian avulla.

Satelliitti *Cosmic Background Explorer* eli *COBE* laukaistiin vuonna 1989. Sen antamien tulosten merkityksestä kertoo Malcolm Longair, että ekstragalaktiset radiolähteet ovat jakautuneet tasaisesti ja todistavat universumin isotropiasta. Sitten hän jatkaa (Longair 1998 s. 284-285):

"Herkkyyden tason kasvaessa tulokset ovat seuraavia:

Kokonaisintensiiteetin noin yhden tuhannesosan herkkyydellä esiintyy yli koko taivaan suuren mitan poikkeama isotropiasta. Se liittyy Maan liikkeeseen koordinaatistossa, jossa säteily olisi sama kaikista suunnista. Tämä on pelkästään seuraus Maan liikkeen aiheuttamasta Doppler-ilmiöstä, ja sen seurauksena säteily on noin yhden tuhannesosan intensiivisempi yhdessä suunnassa ja täsmälleen saman verran vähemmän intensiivinen päinvastaisessa suunnassa. Intensiiteillä on täsmälleen odotettavissa oleva kaksinapainen jakautuma, ja osoittautuu, että Maa liikkuu noin 350 km/sek suhteessa koordinaatistoon, jossa jakautuma olisi 100% isotrooppinen."

Taustasäteilyä ja sen keksimisestä sekä havaitsijan liikkeen aiheuttamasta 'dipolitermistä' kerrotaan lukuisissa teoksissa. Maan absoluuttinen nopeus katsotaan jo niin selväksi asiaksi, että sitä käytetään laskettaessa erästä vaikeammin määrättävissä olevaa nopeutta, nimittäin Linnunratajärjestelmän nopeutta. Täksi löydetään nopeus noin 600 km/sek. Kummallista kylläkin, asiaa tutkineet astronomit harvoin eksplisiittisesti toteavat tämän olevan suhteellisuusteorian perustaksi otetun *suhteellisuusperiaatteen* vastaista.

Fysiikan ja tähtitieteilijän "paikka"

Edellä esitetty antaa aiheen pohdiskelulle. Fysikot ja tähtitieteilijät molemmat hyväksyvät ainakin pääpiirteittäin suhteellisuusteorian hyväksi teoriaksi, mutta kun on kyse sen mukaisesta *paikan* käsitteestä heillä tuntuu olevan asiasta erilainen näkemys. Asia tuntuu liittyvän jo edellä useasti mainitsemaamme kysymykseen yleisen teorian ja sen konkreettisen realisaation välisestä suhteesta. Formuloidimme asian hieman kärjistettynä.

Fysiikan mielestä tieteen varsinaisena kohteena ovat *yleiset teoriat*. Konkreettinen *kosmos* on hänen mielestään fysiikan teorioiden soveltamista valaiseva harjoitustehtävä. Tämän mukaisesti fysikot hyväksyvät Minkowskin teesin ajan ja paikan katoamisesta itsenäisinä entiteetteinä, ja nelidimensioisen maailman nousemisen varsinaiseksi fyysikaaliseksi todellisuudeksi.

Tähtitieteilijän mielestä tieteen kohteena on *kosmos*, sellaisena kuin sen ympärillämme näemme. *Yleiset teoriat* ovat hänen mielestään kosmoksen konkreettisten olioiden ymmärtämistä varten käyttökelpoisia instrumentteja. Tämän mukaisesti tähtitieteilijät hyväksyvät maailman jakautumisen yksikäsitteisiin paikkaan ja aikaan, sillä tällaiset löytyvät kosmoksesta.

Eron fysiikan ja tähtitieteen välillä voi itsekukin helposti todentaa silmäilemällä näiden tieteiden oppikirjoja sekä näiden tieteiden harrastajien esityksiä fyysikaalisen tieteen kehityksen suurista yleislinjoista. Fysiikan oppikirjat etenevät *teorioiden* mukaisessa järjestyksessä: kerrotaan mekaniikasta, akustiikasta, optiikasta, termodynamiikasta, elektrodynamiikasta, suhteellisuusteoriasta, ydinfysiikasta, kvanttimekaniikasta ym. Tähtitieteen oppikirjat etenevät *tähti maailman konkreettisten objektien* mukaisessa järjestyksessä: kerrotaan Kuusta, planeetoista, tähdistä, tähtiäparvista, galakseista, galaksiparvista, kosmoksesta kokonaisuutena ja sen alkuhetkestä. Samoin fysiikan ajattelutavan mukaisesti fyysikaalisen tieteen suuret kehityslinjat kulkevat tiedon kasvuna Aristoteleen fysiikasta Newtonin mekaniikan, Maxwellin elektrodynamiikan, Einsteinin suhteellisuusteorian, Bohrin ynnä muiden kvanttimekaniikan kautta nykyisiin teorioihin. Tähtitieteilijä kuvaa tiedon kasvua kulkuna Aristoteleen maakeskisyydestä Kopernikuksen aurinkokeskisyyteen, sieltä Herschelin ym. ajatuksiin tähti maailmasta, Hubblen ja muiden perustelevaan näkemukseen galaksien täyttämästä maailmankaikeudesta, Friedmannin ja Lemaitren ajatuksiin maailman synnystä suuressa 'jymypaukussa', jonka jälkeen maailmamme täyttää kosminen mikroaaltotaustasäteily. Niinpä fyysikko tuntuu näkevän *paikan* yleisten teorioiden perspektiivistä ja tähtitieteilijä meidän ainutlaatuisen kosmoksemme rakenteen perspektiivistä. Näkemysten eroa ei ole kovinkaan selvästi

tuotu yleisesti näkyviin. Ehkäpä synnä on ollut vastenmielisyys nostaa pöydälle suhteellisuusteorian kaltaiseen erinomaiseen teoriaan sisältyviä ristiriidan poikasia. Paikkaa koskevien näkemysten kohdalla fyysikot ja tähtitieteilijät tuntuivat käyttäytyvän kuin kaksi mullahien koulukuntaa, joiden oppineet kumartavat kohti eri suunnassa sijaitsevaa Mekkaa. Ehkä tästä on paras vaieta, jotta mullahien hurskaiden kuulijoiden joukossa ei syttyisi minkäänlaista epäuskon kipinää.

KIRJALLISUUTTA

Bondi, Hermann and Miranda Weston-Smith (ed) (1998): *The Universe Unfolding*. Oxford University Press.

Bridgman, Percy Williams (1957): *Einstein's Theories and the Operational Point of View*. S. 313- 332 teoksessa Paul Arthur Schilpp (ed.): *Albert Einstein: Philosopher - Scientist*. New York 1957 (1949).

Bridgman, Percy Williams (1963): *A Sophisticate's Primer of Relativity*. Routledge and Kegan Paul, London.

Eddington, Arthur Stanley (1960): *Space, Time and Gravitation*. Cambridge 1966 (1920).

Einstein, Albert (1920): *Über die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie (Gemeinverständlich)*. Siebente Auflage, Braunschweig 1920 (1916).

Einstein, Albert (1951): *The Meaning of Relativity*. London 1951 (1922).

Einstein, Albert (1952): *On the Electrodynamics of Moving Bodies*. S. 35-65 teoksessa Lorentz - Einstein - Minkowski - Weyl.

Einstein, Albert (1956): *Out of my Later Years*. Secaucus N. J.

Lehti, Raimo (2000): *Aika suhteellisuusteoriassa ja kosmologiassa*. Ilmestyy vuonna 2000 Suomen filosofisen yhdistyksen kollokviojulkaisussa *Aika (Gaudeamus)*.

Longair, Malcolm (1998): *Modern cosmology - a critical assessment*. S. 275-314 teoksessa Bondi - Weston-Smith.

Lorentz, Hendrik Antoon (1952a): *The Theory of Electrons*. Dover, New York 1952 (1915; first ed. 1909).

Lorentz, Hendrik Antoon (1952b): *Michelson's Interference Experiment*. S. 1-7 teoksessa Lorentz - Einstein - Minkowski - Weyl.

Lorentz, Hendrik Antoon (1952c): *Electromagnetic Phenomena in a System Moving with any Velocity less than that of Light*. S. 9-34 teoksessa Lorentz - Einstein - Minkowski - Weyl.

Lorentz, Hendrik Antoon, Albert Einstein, Hermann Minkowski and Hermann Weyl (1952): *The Principle of Relativity, a collection of original memoirs on the special and general theory of relativity* (transl. by W. Perrett and G. B. Jeffery) New York 1952(?) (1924).

McCormach, Russell (1981): Lorentz, Hendrik Antoon. *Dictionary of Scientific Biography* 8, s. 487-500 (ed. by Charles Coulston Gillispie). Scribner's, New York.

Minkowski, Hermann (1952): *Space and Time*. S. 73-91 teoksessa Lorentz - Einstein - Minkowski - Weyl.

Pais, Abraham (1983): *'Subtle is the Lord ...'*. *The Science and the Life of Albert Einstein*. Oxford etc. 1983 (1982).

Rees, Martin J. (1998): *Our universe and others*. S. 51-68 teoksessa Bondi - Weston-Smith.

Weinberg, Steven (1983): *The First Three Minutes. A modern view of the origin of the universe*. London 1983 (1977).

Weiss, Rainer (1980): *Measurement of the Cosmic Background Radiation*. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* 18, 1980, s. 489-535.

Kirjoittaja on Teknillisen korkeakoulun matematiikan emeritusprofessori.