

Einsteinin aika-käsitteen kehitys: mesokosmisesta mikrokosmiseen ja megakosmiseen

Raimo Lehti

Einsteinin artikkelin ”Zur Elektrodynamik Bewegter Körper” (Einstein 1952a) satavuotismuistoa juhlittiin vuonna 2005 merkittävänä esimerkkinä ’tieteellisestä vallankumouksesta’. Einsteinin näkemyksiä ajasta pidettiin tieteenharjoittajien piirin ulkopuolellakin erityisen vallankumouksellisina. Hänen kritiikkinsä universaalista aikaa kohtaan ja sen hylkääminen nähdään usein avaimena erityiseen suhteellisuusteoriaan.

Sanoilla *mikrokosmos*, *megakosmos*, *mesokosmos* tarkoitan alkeishiikkasdimensioiden, galaktisten dimensioiden ja näiden ’puolivälissä’ sijaitsevien ’ihmisen dimensioiden’ maailmoja. Missä mielessä niissä voisi olla erilainen aika? Vaikka Einstein kirjoittikin erilaisista ’ajoista’ (esim. eri ’havaitsojoiden’ ajoista), ei mainittua kolmijakoa eikä siihen viittaavaa terminologiaa Einsteinilla esiinny.

Klassinen käsite ajasta ja sen kritiikki

Klassisessa fysiikassa ennen Einsteinia oli käsite *aika* fundamentaalinen ja sen mittaamiseen käytetyt välineet kuten *kellot* ’johdannaisia’. Newton vakuuttaa *Principia*-teoksessa absoluuttisen paikan ja ajan olemassaoloa (Lehti 2003 s. 326):

”Absoluuttinen, oikea ja matemaattinen aika sellaiseen ja oman luontonsa mukaisesti virtaa tasaisesti vailla relaatiota mihinkään ulkoiseen, ja toisella nimellä sitä kutsutaan kestoksi. Relatiivinen, havaittu ja tavanomainen aika on jokin aistittavissa oleva ja ulkoinen (joko täsmällinen tai epäsäännöllinen) keston mitta liikkeen avulla, ja sitä käytetään yleisesti todellisen ajan sijasta, kuten tuntia, päivää, kuukautta ja vuotta.”

Ajan mittaamisen menetelmät, esimerkiksi kellot, ovat tämän mukaan sitä parempia, mitä *oikeammin* ne antavat ajan mitan. Itsestään sel-

vänä pidetty samanaikaisuus ei tarvinnut *määritelmää*, signaaleja mahdollisesti käytettäessä oli kyse sen *määräämisestä*. Maapallon vuorokautisen liikkeen avulla saatiin paikallisesti käyttökelpoinen kello, mutta eri paikoissa sijaitsevaa samanaikaisuuden kriteeriä varten tarvittiin jokin erityinen tähtitaivaan ilmiö, vaikkapa Jupiterin kuiden pimentyminen (vrt. Lehti 2000, s. 83).

Newtonilainen käsitys ajasta esiintyy fyysikoilla 1800-luvun loppuun asti; kritiikkiä tosin esitti George Berkeley jo vuonna 1710. Vuoden 1905 artikkelissa ja myöhemmissä kirjoituksissaan Einstein vetosi metodista tyyppiä oleviin argumentteihin perustellakseen absoluuttisen ajan hylkäämisen tarvetta. Argumentit hän oli jo opiskeluvuosinaan omaksunut englantilaisilta empiristeiltä kuten David Humelta, mutta ennen kaikkea itävaltalaiselta fyysikolta Ernst Machilta. Tämä oli kritisoinut Newtonin ’absoluuttista’ aikaa ja varsinkin paikkaa siitä, että näille käsitteille ei ole vastinetta havainnoissa. Mach syyttää Newtonia (Mach 1960 s. 280):

”Newton on jälleen menetellyt vastoin vakuutustaan pyrkiä tutkimaan vain *aktuaalisia tosiasioita*. Kukaan ei pysty sanomaan mitään absoluuttista paikkaa ja absoluuttista liikettä koskevaa asiaa, sillä ne ovat silkkoja ajatusrakennelmia, pelkkiä mentaalisia konstruktioita, joita ei voi löytää kokemusmaailmasta.”

Machin mukaan *riippuvuus ajasta* merkitsee kahden olion muuttumisen suhdetta toisiinsa, esimerkiksi heilurin heilumisen ja Maan pyörimisen. Aika on abstraktio, johon päädyimme vertaamalla toisiinsa olioiden muuttumista. Machin ajattelu auttoi Einsteinia: ”Samanaikaisuuden määritelmä erityisessä suhteellisuusteoriassa perustuu Machin vaatimukselle, että fysiikan jokaisen lausuman täytyy sanoa jotain havaittavien kvantiteettien välisestä relaatiosta.” Tähän tarttuivat positivistit, esimerkik-

si Moritz Schlick (*Mach* 1960 s. 272–273, *Frank* 1957 s. 272–273).

Mesokosmisen ajan suhteellisuus ennen Einsteinia

Hollantilainen fyysikko Hendrik Antoon Lorentz tutki mm. Maxwellin yhtälöitä käyttäen koordinaattitransformaatioita, joissa tuodaan mukaan uusien paikkakoordinaattien lisäksi myös muuntunut aika. Sittemmin *Lorentz-transformaatioksi* kutsuttua siirtymistä koordinaatistosta toiseen Lorentz piti mukavana tapana todistaa teoreema, että maanpäälliset havainnot ovat riippumattomia Maan liikkeestä.

Uusi olennainen yhtälö oli *ajan muunnosoyhtälö*; se sai Lorentzin ottamaan käyttöön termit *yleinen aika t ja lokaali aika t'* . Lorentzin mielestä oli vain yleinen aika 'oikea'; lokaali aika oli vain yhtälöiden käsittelemistä helpottava formaali parametri. Lorentzin ja Einsteinin kenties näytävien ero on, että Lorentzin mukaan yksi aika-parametri on *oikea*, vaikka se monissa suhteissa käyttäytyy kuten hänen lokaaleiksi eli 'efektiivisiksi' kutsumansa ajat. Asian huomasi aikaan Lorentz itse ja katsoi nimitysten "efektiiviset koordinaatit", "efektiivinen aika" valmistelun tietä Einsteinin tulkintaan, jonka mukaan liikkuvan systeemin kellot osoittavat 'efektiivisen ajan' kulkua, eikä sitä mikään erota 'oikeasta' ajasta (*Lehti* 2003 s. 378–379, *Lehti* 2000 s. 86–87). Mesokosminen kello käy liikkeessaan 'väärin', johtuen kellon mikrokosmista rakennetta hallitsevista voimista ja niiden laeista. Lorentz kirjoitti 1927 (*Lehti* 2003 s. 383):

"Kaksi havaitsijaamme A ja B käyttäessään eri aikoja t ja t' , pystyvät molemmat kuvailemaan ilmiöitä täsmälleen samalla tavalla, vaikka se, mikä toiselle on samanaikaista, ei ole toiselle. Suhteellisuusteoria korostaa, että yksi näistä on yhtä hyvä kuin toinenkin. Vanhan koulun fyysikko sanoo: "Minä pidän parempana aikaa, jota mittaa eetterissä lepotilassa oleva kello, ja pidän sitä todellisena aikana, vaikka myönnänkin, että en pysty selvittämään, kumpi näistä ajoista on oikea, A :n aika vai B :n aika." Relativisti kuitenkin väittää, että ei voi nousta minkäänlaista kysymystä siitä, että yksi aika olisi parempi kuin toinen."

Vuoden 1905 artikkelissaan Einstein piirtää kuvan, jonka mukaan hänen työnsä on ennen kaikkea ajan ja paikan fundamentaalinen analyysi eikä Lorentzin tulosten uudelleen tulkinta. Epistemologista aspektia korostava näkemys saavutti vastakaikua filosofien parissa; he näkivät tässä esimerkin siitä, miten keskeistä

saattaa käsitteiden analysoiminen olla fysiikan kehitykselle.

Einstein itse ilmoitti vaikeuksien voittamiseksi riittäneen ajan käsitteen selvän määrittelemisen, jolloin Lorentzin lokaalin ajan voi yksinkertaisesti määritellä ajaksi. Kuitenkaan ei ajan tai minkään muunkaan *määritelmällä* voi olla fyysikaalisia seurauksia. Tällaisia voi olla sillä, että *kaikki* fysiikan peruslait ovat (jos ovat) invariantteja Lorentz-transformaatioissa, jolloin aika-parametrina voi olla t tai t' , siitä riippuen, missä koordinaatistossa tilannetta tarkastellaan. Einstein palasi myöhemmin lähemmäksi Lorentzin näkemystä (*Einstein* 1957 s. 58, *Fischer* 1999 s. 124–125).

Lorentzin tapaa lähestyä suhteellisuusteoriaa ei voi pitää *periaatteellisesti vääränä*. Se oli vain ennenaikainen pyrkiessään palauttamaan tarvittavat reduktiot pelkästään sähkömagneettisiin ilmiöihin (*Lehti* 2003 s. 389–390).

Lorentzin ohella toinen erityisen suhteellisuusteorian ja sen aika-käsitteen ennakoija oli ranskalainen matemaatikko Jules Henri Poincaré.

Einsteinin mesokosmiset kellot

Vuoden 1905 artikkelissa Einstein toteaa, että aikaa koskevien vaikeuksien voittamiseksi voisi ajaksi kellon sijaintipaikassa määritellä kellon lukema. Kun halutaan määrätä samanaikaisuus myös eri paikoissa, tarvitaan jokin menetelmä.

Einstein olettaa kahdessa pisteessä A ja B sijaitsevat havaitsijat, jotka molemmat määräävät tapahtumien ajankohdat omien kellojensa avulla. Einstein olettaa, että kaikki mahdolliset 'minun kelloni' näyttävät samaa aikaa; oletus on tarpeen, jotta ylipäänsä kellonlukemia voisi kutsua *ajaksi*. Einstein olettaa *määritelmänomaisesti*, että aika, minkä valo tarvitsee kulkeakseen A :sta B :hen on sama kuin aika, minkä se tarvitsee kulkeakseen B :stä A :han. Näin hän on "kuviteltujen fyysikaalisten kokeiden avulla" saanut määritelmät käsitteille 'samanaikainen', 'synkronisoitu', ja 'aika'. *Tapahtuman 'aika' on tapahtuman paikassa sijaitsevan kellon tapahtuman kanssa samanaikainen lukema.*

Kysymys, onko olemassa *absoluuttinen samanaikaisuus*, muuntuu kysymykseksi, onko olemassa *absoluuttinen kellonlukema*. Einsteinin itsensä *kuvitelluiksi* luonnehtimia eksperimenttejä selostetaan usein, kuin ne olisivat todella suoritettuja tai vähintäänkin suoritettavissa olevia kokeita (*Einstein* 1952 s. 39–40, *Leh-*

ti 2000 s. 89-91). Vuoden 1905 jälkeen Einstein esitteli vuoteen 1917 asti monissa kirjoituksissa variaatioita edellä esitetystä. Artikkelin "Über das Relativitätsprinzip und die aus demselben gezogenen Folgerungen" (Einstein 1989 s. 433-488) julkaistiin vuonna 1908 vuosikirjassa *Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik* Artikkelissa annetaan 'mesokosmisen ajan' määritelmä (s. 437-438):

"Ajatteleme moniin pisteisiin sijoitetuiksi koordinaatiston suhteen lepotilassa olevia kelloja. Ne olkoot kaikki samanarvoisia, t.s. kahden tuollaisen kellon lukemien erotuksen tulee pysyä muuttumattomana, jos ne sijoitetaan rinnakkain. Jos näiden kellojen lukemat ajatellaan jollain tavoin asetetuiksi, ja jos kello on sijoitettu kyllin lähelle toisiaan, antaa kellojen joukko mahdollisuuden arvioida ajallisesti kutakin pistetapahtumaa – vaikkapa lähimpänä sijaitsevan kellon avulla.

Kaikkien edellä selostetulla tavalla asennettujen, yksittäisissä paikan pisteissä käytetyn koordinaatiston suhteen levossa oleviksi ajateltujen kellojen lukemien kokonaisuutta kutsumme annettuun koordinaatistoon liittyväksi ajaksi, tai lyhyemmin tuon systeemin ajaksi."

Konstruktio, jossa kautta 'paikan' sijoitetaan lukuisiin pisteisiin samanlaisia kelloja, näyttää naivistiselta maalaukselta. Kellojen yhteensopivuuden konstruktion riippuvuus systeemin liiketilasta on tuiki 'epämetafyysinen' ja jopa uskottava asia. Vuonna 1910 Einstein kysyi (Einstein 1993 s. 147): Mikä on kello? Kellona pidämme jokaista kappaletta, jota luonnehtii jaksollisesti samoina faaseina toistuva ilmiö sellaisella tavalla, että "riittävän syyn periaatteen ansiosta" olemme pakotettuja hyväksymään, että kaikki, mikä tapahtuu yhden annetun jakson aikana on identtistä kaiken sen kanssa, mikä tapahtuu mielivaltaisen jakson aikana. Jos kello on viisareita omaava mekanismi, niin viisarien palaaminen samaan asentoon tekee mahdolliseksi laskea kuluneet jaksot. Einsteinin antama mielikuva kellosta on erinomaisen mesokosminen; kellon paradigma on isoisän taskunauris.

Vuoden 1917 populaarikirjassaan (Einstein 2003 s. 21-121) Einstein introdusoi "objektiivisen lokaalin ajan" kellon lukemina. Kelloa hän luonnehtii suljetuksi systeemiksi, "jossa esiintyy jaksollisia tapahtumia". Einstein olettaa kaikkien kellojen käyvän "'yhtä nopeasti', kun ne ovat rakenteeltaan samanlaisia", ja hän toteaa tämän sisältävän "fysikaalisen hypoteesin, jonka oikeellisuutta voi ilman empirisiä vastakkaisia perusteita tuskin epäillä". Edel-

leen hän tekee valon etenemisnopeutta koskevan fysikaalisen hypoteesin, jonka "täytyy ehdottomasti olla täytetty, jotta olisi mahdollista pitää kiinni valon nopeuden vakioisuudesta tyhjiössä": jos kolmesta tapahtumasta "A on samanaikainen B:n kanssa ja B samanaikainen C:n kanssa", niin myös A ja C ovat samanaikaisia.

Kun kello on otettu peruskäsitteeksi, on ymmärrettävää ajatella kelloilla olevan oloiloista riippuvia eroja. Erityisen suhteellisuusteorian oletuksen mukaan on olemassa tasaisia liikkeitä ja samanlaisia kelloja, ja kellojen systeemien vertailun probleemi koskee niiden taasta suoraviivaista liikettä. Määriteltyjen kellosystemien 'ajat' ajatellaan keskenään samanarvoisiksi kaikkien fysikaalisten tapahtumien aikaparametreiksi, jolloin saadaan juuri Lorentzin käyttöön ottamia 'lokaaleja aikoja'.

Mukana on niin paljon idealisaatioita, että on vaikea ymmärtää, miksi positivistit ja muutkin pitivät tätä konstruktioita suurena filosofisena edistysaskeleena. Alkuperäisessä erityisessä suhteellisuusteoriassa Einstein ei muuttanut klassista ajan käsitettä, hän eliminoi sen. Aika ei ole enää 'ontologisesti olemassa oleva' asia kuten Lorentzillä; se on laskuskeema. Niinmuodoin ei olekaan kyse mesokosmisen, mikrokosmisen ja megakosmisen ajan probleemista, vaan eri dimensioita olevien kellojen probleemista.

Määritelmän mielekkäisyys vaatii, että useiden sellaisinaan 'yhtä hyvien' jaksollisten ilmiöiden avulla saadaan määritellyksi sama aika. Ei surra, minkälaisia fysikaalisia oletuksia tarvitaan, jotta tällaisia olioita olisi olemassa. Luennossa Wienissä 1913 Einstein kuvailee *valokellon*, jossa jäykän sauvan molempiin päihin sijoitettujen peilien välillä liikkuu valonsäde, ja *gravitaatiokellon*, jossa kaksi massapistettä kiertää gravitaation vaikutuksesta toistensa ympäri (Einstein 1995 s. 492, Einstein 1957 s. 54, ks. Frank 1967 s. 58-59).

Samanaikaisuus

Toistensa suhteen liikkuvien kellojen vertailua Einstein valaisi vuoden 1917 populaarikirjassaan junaesimerkillä (Einstein 2003 s. 26-35). Siinä pohditaan, mitä tarkoittaa, että kaksi ratapenkereen eri kohdissa sattuvaa salamaniskua ovat samanaikaisia:

"Mieleesi tulee kenties seuraava vastaus: "Lausuman mieli on sellaisenaan selvä eikä vaadi enempää selityä. Tosin minun täytyy käyttää jonkin verran har-

kintaa, jos antaisit minulle tehtäväksi selvittää havaintojen avulla, sattuvatko konkreettisesti tapauksessa molemmat tapahtumat samanaikaisesti vai eivätkö.” Tähän vastaukseen on kuitenkin seuraavasta syystä voi tyytyä. ... Fyysikolle käsite on olemassa vasta siten, kun on annettu mahdollisuus selvittää konkreettisesti tapauksissa, sopiiko käsite niihin vai eikö sovi. Tarvitaan siis sellainen samanaikaisuuden määritelmä, että tämä määritelmä antaa käyttöön metodin, jolla esillä olevassa tapauksessa voi kokeiden avulla ratkaista, tapahtuivatko molemmat salamaniskut samanaikaisesti vai eivätkö tapahtuneet.”

Tämän operationalistisen näkemyksen mukaan lausuman mieli rakentuu lausuman empiirisen todentamisen menetelmästä. Einsteinin antama samanaikaisuuden määritelmä johtaa siihen, että toistensa suhteen liikkuville kellosysteemeille saadaan eri samanaikaisuus, mikä herätti vastarintaa. Lukuisat suhteellisuusteorian popularisoijat ovat reprodusoineet Einsteinin esimerkin, miten junassa liikkuva havaitsija tulee tulokseen, että ratapenkeeseen suhteen samanaikaiset salamaniskut eivät junan suhteen olekaan samanaikaisia. Einsteinin johtopäätös, että aika ei ole absoluuttinen, oli suhteellisuusteorian eräässä mielessä ratkaiseva teesi; tällä kohdin se poikkesi radikaaleimmin traditionaalisesta fysiikasta.

Kun Einstein perustelee ‘absoluuttisen’ ajan ei-olemassaoloa sillä, että se on yhteen sopimaton hänen antamansa samanaikaisuuden määritelmän kanssa, niin tämä tietenkään ei *sellaisenaan* estä mahdollisuutta, että muita syystä tai toisesta ‘parempi’ aikamuuttuja olisi määriteltävissä. Ajan käsitteen kritiikki oli ilmeisesti Einsteinin syvästi kokeman kriisin tulos, ja tämä saattaa olla syynä siihen, että hän leimasi sen vastustajat vanhoillisiksi. Kun vielä Einsteinin aikakäsitteen outouteen tarttuivat henkilöt, jotka muista (esim. antisemitistisistä) syistä vastustivat Einsteinia, johti tämä syytöksiin, että ajan absoluuttisuuteen vetoavat ajatuskuviot olivat primitiivisiä ja ”alitajuiseen ankkuroituneita”.

‘Universaalisen ajan’ olemassaoloa voi kuitenkin perustella asiallisellakin tavalla; Einstein itsekin myöhemmin hyväksyi sen yleisen suhteellisuusteorian mukaisen kosmologian seuraukseksi. Kysymyksenä on, onko tämä käyttökelpoinen abstraktio vai eikö ole. Einstein ajatteli vuonna 1905, että *ei ole*, ja tähän hänet oli ilmeisesti johtanut kokemus ajan absoluuttisuudesta luopumisen synnyttämästä vapaudesta. Einstein syytti absoluuttisen samanaikaisuuden illuusion syyksi sitä, että arkikokemuksessamme voimme jättää huomiotta valon etenemisen tarvitseman ajan. ”Tä-

män takia meillä on tapana jättää erottamatta ‘samanaikaisesti nähtyä’ ja ‘samanaikaisesti tapahtuvaa’” (Einstein 2003 s. 151).

Kuitenkin, vaikka arkiajattelussa tällainen virhe esiintyisikin, on *tieteessä* jo kauan ennen suhteellisuusteoriaa tiedetty, että astronomisessa mittakaavassa nähty ja ‘todellinen’ samanaikaisuus ovat eri käsitteitä. Max Planck luonnehti vuonna 1909 fysiikassa nousutta uutta aikakäsitettä ylivertaisen rohkeaksi maailmankuvamme mullistajaksi, ”jonka laajuutta ja syvyyttä voidaan verrata ainoastaan siihen, minä kopernikaanisen maailmanjärjestyksen läpimurto aiheutti” (Fisher 1999 s. 148, Cohen 1985 s. 421, 444).

Kellon ottaminen peruskäsitteeksi sitoo aikalukeman *automaattisesti* tiettyyn koordinaatistoon. Einsteinin kritisoijat eivät kohdistaneet vimmaansa oikeaan asiaan, kun he väittivät Einsteinin ‘vääntävän’ aikaa. Aikaa, jota olisi voinut venyttää tai supistaa, ei Einsteinin tuolloisessa teoriassa ollut olemassakaan. Aika oli muuttunut määrättyä tyyppiä olevien materiaalien systeemien (kellojen) avulla konstruoiduksi laskusuureksi. Tämän jälkeen esimerkiksi partikkelin likeyhtälö ei periaatteessa enää ollut paikan ja *ajan*, vaan partikkelin sijainnin ja erään toisen materiaallisen kappaleen (kellon viisarin) sijainnin välinen relaatio.

‘Aika’ tulee mukaan vain kellosysteemin viisareiden sijainnin ekvivalenssiluokkana. *Tähän* asiaan olisi Einsteinin aika-käsitteen kritiikkoon tullut kiinnittää huomionsa, mutta ilmeisesti se ylitti niin perinpohjaisesti tuolloisen horisontin, että filosofoivat analyysoijat eivät ‘todellista jujua’ oivaltaneet. Einsteinin tekstit antavat usein mahdollisuuden väärälle tulkinnalle. Jos lukija ei ‘sisäistänyt’ kellojen primääristä merkitystä, hän saattoi tulkita asian niin, että Einstein hyväksyy klassisen fysiikan mukaisesti ajan fysikaaliseksi reaaliseksi entiteetiksi, mutta antaa sille aikaisemmista poikkeavia ominaisuuksia, joita sitten kauhisteltiin. Einsteinin ystävä Philipp Frank kirjoitti ajan suhteellisuudesta (Frank 1967 s. 62-63):

”Monet kirjoittajat ovat tulkinneet Einsteinin selkeän ja yksikäsitteisen lausuman näennäisesti syvällisellä mutta tosiasiaa epämielekkäällä tavalla kertomalla: ”Einstein sanoi, että joskus aika virtaa nopeasti ja joskus hitaasti.” Sellaisen sanominen, että aika virtaa on toden teolla kuvannollista puhetta, joka vain osittain sopii fysikaalisten ilmiöiden kuvailemiseen. Kun puhutaan ‘nopeammasta virtaamisesta’ otetaan tämä yksinkertainen metafora vakavasti. --- Einsteinin ajan suhteellisuus on semantiikkaa, ei metafysiikkaa.” Tämä erityisen suhteellisuusteorian tulkinta

yhtyyne instrumentalistiseen tulkintaan; sen mukaan Einsteinin ja Lorentzin välinen ainoa ero aikakäsitteen kohdalla on semanttinen.

Minkowskin avaruus ja ominaisaika

Standardimuodon ajan ja paikan kombinoiminen sai nelidimensioisessa ajasta ja paikasta kombinoituvassa Minkowskin avaruudessa Hermann Minkowskin vuonna 1908 pitämän "Avaruus ja aika" -luennon iskevät alkusanat sävähdyttivät kuulijoita (*Lehti* 2003 s. 218):

"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."

Minkowskin esittämä merkitsee väitettä, että aika on 'siirretty syrjään' eräistä perusteorioista, ei, että se olisi syrjäytetty *ilmiöistä*. Minkowski ilmoittaa asettamansa 'maailmanpostulaatin' sallivan aika- ja paikkakoordinaattien identtisen käsittelyn. Tämä on johtanut perusteetomaan metafyyssiseen spekulointiin, sillä aika-koordinaatti käyttäytyy paikkakoordinaateista poikkeavalla tavalla sekä matemaattisessa formalismissa että sen fysikaalisissa tulkinnoissa (*Lehti* 2000 s. 94-95).

Minkowskin avaruuden merkitystä voi luonnehtia näin: Kun joku luonnonlaki, yhtälö, tms. on formuloitu Minkowski-avaruuden termein, se on *automaattisesti* invariantti Lorentz-transformaatioissa. Minkowski-avaruudessa formuloitu fysiikka on siinä mielessä 'absoluuttista', että se on havaitsijan aika-paikka-jaosta riippumatonta.

Einstein piti ensin Minkowskin teoriaa matemaattisena abstraktiona, joka sekoittaisi suhteellisuusteorian fysikaaliset perusajatuksat. Tämä saattaa olla yhteydessä 'kvasimetafyyssiseen' olemassaolon oletukseen, jonka Minkowski teki avaruus-aika-kombinaation tapauksessa, ja joka ei tunnu yhteensopivalta Einsteinin aikaisemman positivistishenkisen näkemyksen kanssa. Vasta Minkowski-avaruuden yleistyksen käyttökelpoisuus yleisessä suhteellisuusteoriassa sai Einsteinin suhtautumaan siihen myönteisemmin ja samalla omaksumaan nelidimensioisen maailman 'olemassaolosta' metafyyssisempiä näkemyksiä (*Lehti* 2003 s. 219). Vuonna 1913 Einstein kertoi (*Einstein* 1995 s. 484):

"Mahdollisten yleistysten häkellyttävää moninaisuutta suhteellisuusteoria rajoittaa siten, että jälkimmäisen mukaan esiintyy aikakoordinaatti kaikissa yhtälösystemeissä muutamia etumerkkieroja lukuun ottamatta samalla tavalla kuin kolme paikkakoordinaattia. Tämä nyt vain epämääräisesti vihjattu Minkowskin suuri formaali oivallus osoittautuu suhteellisuusteorian mukaisia vastaavia yhtälöitä etsittäessä mitä merkittävimmäksi apuvälineeksi."

Yksi avaruus-aika-maailman 'ontologisen' näkemyksen seurauksista oli 'ikuisesti olemassa olevan' maailman fatalistinen tulkinta. Prahan filosofikongressissa 1934 F. Lipsius siteerasi Minkowskin lausumaa itsenäisen ajan ja paikan katoamisesta ja kysyi (*Frank* 1938 s. 51):

"Jäljelle jää kysymys, voiko pitää yllä matemaattisformalistista teoriaa, joka haluaa tehdä ajasta paikan neljännen dimensioin, vaikka tällainen tarkastelu tuo filosofiaan takaisin muutoksen irrealisuuden ja julistaa kaiken kehittymisen illuusioksi."

Myös James Jeans vuonna 1935 ilmestyneessä teoksessa *Man and the Universe* katsoi suhteellisuusteorian antavan tukea fatalismille. Kun eri havaitsijoiden mielestä tapahtumien aikajärjestys ei ole sama, on epäselvää, mikä on tulevaisuutta ja mikä menneisyyttä. Jeansin mukaan: "Tällainen näkemys redusoi elävät olennot automaateiksi", ja ihminen on muuttunut maailmannäyttämön toimijasta pelkäksi katselijaksi. Minkowskin olennaisena aikaansaannoksena, otaksuttavasti tärkeimpänä kontribuutiona fysiikan alalla, on pidettävä *ominaisajan* käsitettä. Liikkuvan ainepisteen maailmanviivan suunta nelidimensioisessa Minkowskin avaruudessa on aikaluonteinen. Tuon viivan 'pituutta' eräänä integraalina pitkin maailmanviivaa alkupisteestä loppupisteeseen kutsutaan maailmanpisteen ominaisajaksi; se on riippuvainen kappaleen kulkutiestä nelidimensioisessa maailmassa.

Liikkuva dimensioiltaan rajoitettu systeemi voidaan erityisessä suhteellisuusteoriassa usein idealisoida massapisteeksi. Tällöin fysikaalinen tapahtuminen tuossa systeemissä tapahtuu ainakin hyvänä approksimaationa lakien mukaisesti, joissa aikaparametrina käytetään ominaisaikaa. Teoriaan on tuotu uusi aksiooma, joka tekee vuoden 1905 artikkelin aksioomien merkityksen kyseenalaiseksi, sillä ominaisajan käyttäminen yleisenä aikaparametrina ei ole seuraus Einsteinin aikaisemmin esittämästä. Se on kuitenkin erityisen suhteellisuusteorian keskeinen piirre, joka tekee siitä merkittävän ja käyttökelpoisen fysikaalisen teorian. Samalla se selvittää *konkreettista* eroa, jonka suhteellisuus-

teoria on saanut aikaan Newtonin absoluuttista aikaa käyttävään fysiikkaan.

Vaikka jokin 'aika' (siis jotkut kellot) olisivatkin aiheellisesti universon erikoisasemassa, ei niiden määrittelemää aikaa ole asiallista käyttää ainoana eri tavoilla liikkuvien fysikaalisten systeemien yhteisenä aikaparametrina. Oletus, että mielivaltaisella tavalla liikkuva 'kello' näyttää ominaisaikaa, tai yleisemmin sekä fysikaaliset että biologiset systeemit elävät, kasvavat, kehittyvät ja vanhenevat ominaisaikaansa mukaan, on niin merkittävä suhteellisuusteorian oletus, että sen keskeiseksi nostanutta Minkowskia on pidettävä yhtenä erityisen suhteellisuusteorian luoja.

Einsteinin vuoden 1905 artikkelissaan (*Einstein 1952 s. 49*) mainitsee lyhyesti myöhemmin *kelloparadoksiksi* kutsutun ilmiön. Jos A:ssa sijaitsee kaksi synkronoitua kelloa, ja toinen niistä liikkuu suljettua käyrää myöten, niin palattuaan pisteeseen A se on jättänyt paikallaan pysyneen kellon suhteen. Einstein ei kutsunut tätä paradoksiksi, vaan korosti, että ristiriitaa ei ole. Paul Langevin esitti vuonna 1911 kelloparadoksista muunnelman, jossa matkaan lähetetäänkin kellon sijasta ihminen, jolloin hänen maailmanviivansa ominaisaika on hänen vanhenevistään säätelevä aikaparametri (*Cohen 1985 s. 411-412*). Samana vuonna Einstein vetosi Langevinin antamaan esimerkkiin (*Einstein 1993 s. 436*):

"Asia tulee hassunkurisemmaksi, kun ajattelee suoritetuksi seuraavaa: annetaan tälle kellolle erittäin suuri nopeus (miltei c) ja annetaan sen lentää tasaisella liikkeellä eteenpäin. Kun se on lentänyt pitkän matkan, annetaan sille impulssi päinvastaiseen suuntaan, jolloin se palaa takaisin alkuasemaansa, mistä se singottiin matkaan. Tällöin ilmenee, että tuon kellon viisariden asento ei sen koko matkan aikana ole muuttunut juuri ollenkaan, kun taas samassa sinkoamispaikassa lepotilassa pysyneen täsmälleen samanlaisen kellon viisariden asento on hyvin olennaisesti muuttunut. Tähän on lisättävä, että mikä pätee tälle kellolle, jonka olemme ottaneet kaiken fyysisen tapahtumisen yksinkertaiseksi edustajaksi, pätee myös mitä tahansa muuta tyyppiä olevalle suljetulle fyysikaaliselle systeemille. Jos esimerkiksi sulkisimme elävän organismin rasiaan ja antaisimme sen suorittaa edestakaisen matkan kuten edellä teimme kellolle, niin voisi saada aikaan, että tuo organismi mielivaltaisen pitkän lennon jälkeen palaisi takaisin alkuperäiseen paikkaansa mielivaltaisen vähän muuttuneena, kun taas aivan samankaltaiset alkuperäisessä paikassa lepotilassa pysyneet organismit olisivat jo kauan sitten tehneet tilaa uusille sukupolville. Liikkuvalle organismille oli pitkä matka-aika vain silmänräpäys, jos liike tapahtui miltei valon nopeudella. Tämä on väistämätön seuraus perustaksi asettamistamme periaatteista, jotka kokemus meille pakottaa."

Voi kysyä, *seuraako* organismeja koskeva sittemmin *kaksosparadoksin* nimen saanut väite alkuperäisestä olettamuksesta, joka koski nimenomaan *kelloja*. Oletamus on nyt laajennettu kaikkia ajallisia tapahtumia koskevaksi, myös sellaisia palautumattomia tapahtumia, joissa aikaparametrin merkitys on toinen kuin jaksollisten ilmiöiden luonnehtimissa kelloissa.

Mikrokosmiset kellot ja gravitaatio

Artikkelissaan "Über die Möglichkeit einer neuen Prüfung des Relativitätsprinzips" vuonna 1907 Einstein introdusoi 'mikrokosmisen ajan' ja samalla muunsi tieteenfilosofiaansa pois päin positivismista. Einstein viittaa Johannes Starkin vuonna 1906 suorittamaan tutkimukseen, joka koski silloin kanavasäteiksi kutsuttujen hiukkassäteiden (*Kanalstrahlen*) viivaspektrien frekvenssin riippuvuutta säteilyn lähettäjän liiketilasta. Stark tulkitsti riippuvuuden Doppler-ilmiöksi, mutta Einstein päätteli, että lisäksi on mukana toinen frekvenssin muuttumisen aiheuttaja (*Einstein 1989 s. 402*):

"Määrättyjä frekvenssejä lähettävää ja absorboivaa kanavasäteiden atomi-onia on nyt pidettävä nopeasti liikkuvana kellona, ja sen tähden on juuri annettua relaatiota pidettävä myös siihen soveltuvana."

Jahrbuch-artikkelissa vuonna 1908 Einstein jatkoi asian käsittelyä (*Einstein 1989 s. 44*):

"Kun spektriviiva vastaava värähtelytapahtumaa on kaiketi pidettävä atomin sisäisenä tapahtumana, jonka frekvenssin määrää yksinomaan tuo ioni, niin voimme pitää tuollaista ionia määrätyn frekvenssiluvun ν_0 omaavana kellona, ja frekvenssin saa tutkimalla esimerkiksi samankaltaista havait-sijan suhteen levossa olevan ionin lähettämää valoa. Edellä esitetty tarkastelu osoittaa nyt, että liikkeen vaikutus havait-sijalle välittyvän valon frekvenssiin ei täysin määräydy Doppler-ilmiön kautta."

Einstein tekee *uuden hypoteesin*, joka yhdistää atomien avulla määritellyn 'mikrokosmisen ajan' aikaisemmin määritellyyn 'mesokosmiseen aikaan'. Oletustaan varten hän ei tarvitse konstruoimaansa 'systeemin A aikaa'; hän tarvitsee oletusta, että liikkuvan mikrokosmisen systeemin sisäisiä tapahtumia määräävä aikaparametri käyttäytyy aikadilataation määräämällä tavalla. Tätä hän ei voi *perustella* sellaisella konstruktiolla, jota käyttäen hän määritteli ajan kellonlukemien yhdeksi; tuo konstruktio oli korkeintaan *heuristinen* apuväline, joka teki mikrokosmisen ajan uskottavaksi. Tätä tes-

tattiin liikkuvien atomien spektriviivojen siirtymisellä, jolloin korostetusti ilmoitettiin, että *ei* ole kyseessä Dopplerin efekti, vaan siirtyminen ei ole atomin liikkeen suunnasta riippuvaa (Frank 1967 s. 60-61). Einstein itse selostaa vuonna 1911 siirtymistä mesokosmisten kellojen tarkastelusta mikrokosmisten kellojen tarkaste- luun (Einstein 1993 s. 437):

”Suhteellisuusteorian fysikaalisesti tärkeistä seurauksista on mainittava seuraava. Olemme edellä nähneet, että suhteellisuusteorian mukaan liikkuva kello käy hitaammin kuin sama kello lepotilassa. Voi hyvinkin pysyä ikuisesti mahdolltomana, että tulisimme verifi- oimaan tämän kokeellisesti taskukellon avulla, sillä nopeudet, jotka pystymme tuollaiselle kellolle anta- maan, ovat häviävän pieniä valon nopeuteen verrat- tuina. Luonto kuitenkin tarjoaa meille kohteita, joiden olemus on aivan sama kuin kellojen, ja joita lisäksi voi liikuttaa erinomaisen nopeasti. Spektriviivoja lähettä- vät atomit ovat tällaisia; niille voimme sähkökentän avulla antaa useiden tuhansien kilometrien nopeuk- sia +sekunnissa?, (kanavasäteet). Teorian perusteella on odotettavissa, että näiden atomien liike näyttää vaikuttavan niiden värähtelyn frekvensseihin juuri samalla tavalla, joka voidaan johtaa liikkuville kelloil- le. Vaikka kyseessä olevat kokeet kohtaavatkin suuria vaikeuksia, voimme kuitenkin toivoa pääsevämme seuraavina vuosikymmeninä joko suhteellisuus- teorian tärkeään varmennukseen tai kumoamiseen.”

Jahrbuch-artikkelin lukua ”Suhteellisuusperiaate ja gravitaatio” (Einstein 1989 s. 476-484) si- teerataan ensimmäisenä julkaistuna viittaukse- na yleiseen suhteellisuusteoriaan. Einstein kir- joittaa:

”Tähän asti olemme soveltaneet suhteellisuusperiaatetta, siis oletusta luonnonlakien riippumatto- muudesta referenssijärjestelmän liikkeestä, vain *vaiilla kiihtyvyyttä oleviin* referenssijärjestelmiin. Onko ajateltavissa, että suhteellisuusperiaate pätsi myös systeemeille, jotka ovat toistensa suhteen kiihtyvässä liikkeessä?

Tämä oletus laajentaa suhteellisuusperiaatteen referenssijärjestelmän tasaisesti kiihtyvän translaatioliik- keen tapaukseen. Oletuksen heuristinen arvo on siinä, että se sallii homogeenisen gravitaatiokentän korvaa- misen tasaisesti kiihtyvällä referenssijärjestelmällä, ja jälkimmäinen tapaus on tietysti määrin teoreettisesti käsiteltävissä.”

Tämä sisältää Einsteinin ensimmäisen for- mulaation näkemykselle, että tasaisessa liik- keessä oleva koordinaatisto, jossa vaikuttaa va- kiogravitaatiokenttä, on samanarvoinen tasai- sesti kiihtyvässä liikkeessä olevan koordina- atiston kanssa, kun siinä ei esiinny gravitaatio- kenttää; tätä Einstein myöhemmin kutsui *ekviva- lenssiperiaatteeksi*. Gravitaatiokentän vaikutus kelloihin yhdessä ’mikrokosmisen kellon’ kä-

sitteen kanssa johti Einsteinin ehdottamaan havaittavaksi mahdollista efektiä, joka on seu- raus siitä, että yhden ’kellon’ lähettämää vä- rähtelyä havaitaan toisen gravitaatiopotentiaa- lin alueella sijaitsevaa kelloa käyttäen (Einstein 1989 s. 480-481):

”Nyt on olemassa ’kelloja’, jotka sijaitsevat eri gra- vitaatiopotentiaalin omaavissa paikoissa, ja joiden käyntinopeutta voi erittäin tarkoin kontrolloida; nämä ovat spektriviivojen synnyttäjiä. Edellä sano- tusta päätellään, että tuollaiselta synnyttäjältä peräi- sin olevalla Auringon pinnalta saapuvalla valolla on noin kaksi miljoonasosaa suurempi aallonpituus kuin saman aineen Maan päällä synnyttämällä valolla.”

Tämä oli Einsteinin ensimmäinen prediktio ilmiöstä, joka sittemmin sai nimen *gravitaatio- punasiirtymä*. Erityisessä suhteellisuusteoriassa Einstein oli *määritellyt* ajan käyttäen käsitteitä *koordinaatisto* ja *kellonlukema*. Erityiselle suhteel- lisuusteorialle leimaa antavana oli ’kellonluka- ma-ajan’ kuljettaminen koko avaruuteen kaik- kiolla määritellyn koordinaatiston avulla. Kun kaikkialla määriteltä ’galileinen’ koordinaatis- to muuttui yleisessä suhteellisuusteoriassa epä- mielekkääksi käsitteeksi, kävi myös sellaisen avulla konstruoitu ajan käsite problemaattiseksi. Kun suhteellisuusteoria tästä huolimatta toi- mii, voi kysyä, onko vuonna 1905 esitetty ’ajan kuljettaminen’ kenties tarpeeton. Sen voi meso- kosmoksen ja mikrokosmoksen ilmiöissä kor- vata *ominaisajan* käsitteellä. Ajan konstruktio vuoden 1905 artikkelin mukaisella tavalla esi- tellään edelleenkin ’filosofisesti’ fundamentaa- lisena asiana, vaikka Einstein vuoden 1917 po- pulaarikirjassa kirjoitti (Einstein 2003 s. 78-79):

”Gravitaatiokentät vaikuttavat myös kellojen käyntiin sellaisella tavalla, että suoraan kellojen avulla tapahtuva fysikaalinen ajan määrittelmä ei ensinkään ole yhtäläillä evidentti kuin erityisen suhteellisuus- teorian tapauksessa.”

Megakosminen aika

Vuonna 1917 kosmologisessa artikkelissaan Einstein hyväksyi universumin paikkadimensi- on. Hän kirjoitti asiasta Paul Ehrenfestille (Fis- her 1999 s. 167): ”Hullunkurista on, että nyt il- maantuu kuitenkin jälleen kvasiabsoluuttinen aika ja erikoisasemassa oleva koordinaatisto, mutta säilyttäen täydelleen suhteellisuuden vaatimukset.”

Mitä väite suhteellisuuden vaatimusten säi- llyttämisestä mahtaa tarkoittaa? Vuoteen 1922

asti Einstein pitäytyi näkemukseen stationaarisesta maailmasta. Hänen kuvittelemallaan yleisen suhteellisuusteorian mukaisella universumilla oli avaruusdimensiossaan vakio-kaarevuus, ja ajan suunnassa se oli 'lieriömäisen'; Einstein preferoi positiivisen kaarevuuden omaavaa äärellistä universumia (*Einstein* 1951 s. 98-99, seuraavasta ks. *Lehti* 2000 s. 107-108). Julkistetussa tekstissä Einstein *ei viihjaa* siihen, että hän on näin tehnyt maailmankaikkeuden rakenteesta ehdotuksen, joka *ei ole suhteellisuusteorian mukainen*. Einsteinista poiketen Arthur Stanley Eddington korosti aikaa ja paikkaa koskevilla näkemyksillä tapahtunutta muutosta ja liitti asiaan itselleen tyypillistä metafysiikkaa (*Eddington* 1960 s. 192-193).

"Tätä teoriaa vastaan voi esittää kaksi vastaväitettä. Ensiksikin: absoluuttiset avaruus ja paikka on palautettu kosmisen skaalan ilmiöihin. --- Maailmalla 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 riittävää tähän mennessä kuvailulle teorialle, olemme taipuvaisia katsomaan tätä rajoitusta melko vastahakoisesti. --- Meidän ei tarvitse häiriytyä siitä, vaikka absoluuttisen ajan käsite nousisikin uudessa muodossa esiin kosmisen mittakaavan ilmiöissä, joista ei vielä ole saatavissa mitään kokeellista tietoa. Aivan kuten jokaisella rajoitetulla havaitsijalla on oma erityinen tapansa erottaa paikka ja aika toisistaan, samoin olemassaololtaan maailmaan yhtyvällä olennolla voisi hyvinkin olla erityinen hänen kannaltaan luonnollinen ajan ja paikan erottelu. Tämän olennon ajan ylennämme tässä arvoon "absoluuttinen"."

Vuonna 1946 olivat jo avaruuden laajenemisen mukaiset kosmologiset mallit syrjäyttäneet stationaariset mallit. Einstein kirjoitti (*Einstein* 1951 s. 107-108), että on löydettävä "matemaattinen muoto ehdolle, että universumi on paikallisuudesta puhuen kaikkialla isotrooppinen." On valittava 'paikkojen perheen' "radiaaliset suunnat aikaluonteisiksi ja vastaavasti perheen pinnat paikkaluonteisiksi".

Jälleen asiaa korostamatta Einstein hyväksyy, että maailmassa itsessään onkin yksikäsitteinen jako aikaan ja paikkaan mahdollinen. Kaikki koordinaatit eivät siis ole ensinkään yhdenvertaisia. Einstein hautaa suhteellisuusteorian lausumatta sille edes muistosanoja.

James Jeans iloitsi, että tieteen, eritoten astronomian, kehitys on osoittanut fatalismiin johdettavan ajan ja paikan toisiinsa sekoittamisen virheeksi. Vedoten Einsteinin ja de Sitterin käyttöön ajan ja paikan toisistaan erottaviin koordinaatteihin Jeans kirjoitti (*Frank* 1938 s. 107):

"Jos suhteellisuusteoria aiottiin laajentaa astronomian tosiasiat koskevaksi, niin täytyi hylätä ajan ja paikan siihen asti vallinnut symmetria, Niinpä aika sai takaisin todellisen objektiivisen olemassaolon, vaikkakin vain astronomisissa mittasuhteissa ja astronomisia ilmiöitä koskien. ---

Tämä antaa meille täyden oikeutuksen palata takaisin vanhoihin intuitiivisiin tuntemuksiimme, että menneisyydellä, nykyisyydellä ja tulevaisuudella on todellinen objektiivinen merkitys, eivätkä ne ole meidän yksilöllisten mielitteimme hallusinaatioita – lyhyesti sanoen, olemme vapaita uskomaan ajan realisuuteen."

Metafyysisistä antifatalistisista tuntemuksista riippumatta Jeans on maininnut erityisen suhteellisuusteorian aikakäsitteen ja kosmologian aikakäsitteen todellisen ja olennaisen ristiriidan. Mitä tarkoittaa, että ajalla on 'objektiivinen eksistenssi' vain astronomiassa? Miten saatavat 'lokaalit' fysikaaliset ilmiöt, myös mikrofysikaaliset, käyttäytyä kuin ne kuuluisivat eri maailmaan kuin astronomiset ilmiöt? Tämä merkitsi eräänlaista isolaatiota megakosmoksen ja mesokosmoksen-mikrokosmoksen välillä, jolloin olisi mahdollista käyttää edellisessä 'absoluuttista' aikaa ja jälkimmäisissä 'relatiivista aikaa'.

Einstein otti jo vuonna 1917 kosmologisessa artikkelissaan (*Einstein* 2003 s. 125-136) käyttöön muista poikkeavan aikamuuttujan, jolle on sitemmin vakiintunut nimi *kosminen aika*. Suhteellisuusteoriassa yhden aikaparametrin asettaminen erikoisemaan merkitsee samalla, että yksi miltei 'absoluuttiseksi' luonnehdittavan kaltainen paikka asetetaan erikoisemaan. Erikoisemassa olevaksi paikaksi saattoi (asiallisesti Berkeleytä ja Machia seuraten) määritellä sen, joka on levossa kaukaisimpien galaksien keskimääräisen liikkeen suhteen. Tämän selvittelyminen ei kuitenkaan ollut aivan helppoa, joten asetetun määritelmän 'operatiivinen' arvo jäi kyseenalaiseksi.

Asiaan toi muutoksen vuonna 1965 löydetty avaruuden mikroaaltotaustasäteily. Se on kaikista suunnista homogeenista, mutta poikkeuksen muodostaa dipoliefektin säteily on yhdessä suunnassa 'kylmempää' ja päinvastaisessa suunnassa 'kylmempää'. Dipoliefektin avulla voi päätellä, mihin suuntaan ja millä nopeudella Maapallo liikkuu säteilykentän suhteen. Koordinaatisto eli 'paikka', josta katsoen säteily näyttäisi kaikissa suunnissa samalta, on hyvin asiaperustein asetettavissa erikoisemaan ja siis paikan määrittelijäksi. Kun havaitsija sijaitsee lepotilassa tällaisessa 'paikassa', niin hä-

nen kellonsa näyttää kosmista aikaa (*Lehti* 2000 s. 113-114).

Maaailmankaikkeuden 'laajuus' tai kosmoksen 'säde' on kosmisen ajan yksikäsitteinen funktio, ja sen suuruutta vuorostaan voi luonnehtia taustasäteilyn lämpötilalla. Niinpä tämä kelpaisi suoraviivaisesti ajan määrittelijäksi, jolloin voimme *periaatteessa* suoraan katsoa, *mitä kosminen kello näytti* jossain universumin paikassa sinä hetkenä, kun sieltä meille saapuva säteily lähti liikkeelle. Jos lämpötilan arvo määriteltäisiin suoraan ajaksi, saisimme lukuarvoltaan pysyvästi *pienenevän* ajan. Tämän korjaamiseksi aika on syytä määritellä joksikin mikroaaltotaustasäteilyn pieneneväksi funktioksi. Funktion valinnalla ei ole paljoa väliä, sillä ihmiskuntaa kiinnostavan ajanjakson ajan olisi merkitystä vain tuon funktion differentiaalilla, joten relaatio olisi miltei lineaarinen. Otamme yksinkertaisen funktion $1/x$, hyväksymme kosmisen ajan 'oikeaksi' ajaksi, ja asetamme monet murheet sivuuttavan määritelmän:

Aika on kosmisen mikroaaltotaustasäteilyn Kelvin-lämpötilan käänteisarvo.

Samanaikaisuus merkitsee tällöin mikroaaltotaustasäteilyn samaa lämpötilaa, ja kosmos itse on megakosminen kello, jota ei tarvitse (eikä voi) kuljettaa minnekään. Voi kysyä, onko kyse kellosta siinä merkityksessä, missä mikrokosmisille ja mesokosmisille olioille on käytetty sanaa kello. Näissä on käytetty fyysikaalisen systeemin jonkin ilmiön *jaksottaista* toistumista. Kosminen kello sen sijaan näyttää maailman yhteen suuntaan kulkevaa kehitystä ja vetoa pikemminkin termodynamiikasta tunnettuun entropian kasvuun.

En jatka aika-käsitteen pohtimista siirtymällä termodynaamiin tarkasteluihin enkä puutu kysymykseen, millä tavoin megakosmisen ajan ja Maan päällä tai sen lähiympäristössä määritellyn mikrokosmisen ajan voisi sovittaa toisiinsa. Jälkimmäisestä on parina viime vuosikymmenenä saatu paljon kokemusta atomikellojen ja niitä soveltavan satelliittipaikannusjärjestelmän (GPS-järjestelmän) ansiosta.

Einsteinin kellot olivat usein ajatuskokeen tyyppisiä abstraktioita, mutta nyt on olemassa runsaasti tarkkaa tietoa sekä liikkeen että gravitaatiokenttien vaikutuksesta konkreettisten mikrokosmisten kellojen (cesium-kellojen) todelliseen käyttäytymiseen. Keräytyneen empiirisen tiedon teoreettisesta tulkitsemisesta ei näytä vielä saavutetun yksimielisyyttä; sille on

annettu Einsteinin yleistä ja erityistä suhteellisuusteoriaa ja toisaalta Lorentzin suhteellisuusteoriaa tai klassista newtonilaistakin näkemystä soveltavia tulkintoja. Näihin en nyt puutu; kysymykseen, mikrokosmisen ja megakosmisen ajan relaatiosta ne eivät toistaiseksi antane vastausta. On kylläkin saatu tietoa esimerkiksi Maan pyörimisliikkeen vaikutuksesta atomikellojen kulkuun, mutta (ainakaan tietämäni mukaan) ei evidenssiä esimerkiksi siitä, että Maan liikkeellä taustasäteilyn suhteen olisi vaikutusta, joten taustasäteilyn suhteen levossa olevan mikrokosmisen kellon näyttämään 'aikaan' ei ole saatu valaistusta.

Näkemyksiä ajasta, paikasta ja liikkeestä voi hahmotella eri tavoin. 'Luonnonlakien salaliittoteorioiden'; mukaan 'absoluuttiset' aika, paikka ja liike ovat kylläkin olemassa, mutta luonnonlait ovat sellaisia, että ne estävät meitä havaitsemasta muita kuin relatiivisia suureita. Esimerkiksi Galilein, Newtonin, Poincarén ja Lorentzin suhteellisuusteoriat olivat salaliittoteorioita. Vastakkaista tyyppiä olevien teorioiden mukaan mainittuja 'absoluuttisia' käsitteitä ei ole olemassakaan, jolloin tätä perustellaan juuri sillä, että niiden vaikutuksia ei voi havaita. Tällaisia olivat paikan ja liikkeen tapauksessa Berkeleyyn ja Machin näkemykset, ja sitten Einsteinin suhteellisuusteoria.

Eri tyyppin näkemysten kannattajat ovat usein olleet tiukasti vakuuttuneita oman näkemysensä oikeellisuudesta. Newton vaati *uskoa* absoluuttisen ajan olemassaoloon; Einsteinin ja Lorentzin teorioiden erojen korostajat vaativat *uskoa*, että erikoisasemassa olevaa aikaa ei ole olemassa. Ei tietenkään olisi tarpeen sitoutua mihinkään tällaiseen uskoon; voimmehan vain *pitää mahdollisena* esimerkiksi erikoisasemassa olevan ajan tai kellojen olemassaoloa.

Tällaista luonnonlakien salaliittoteorialle sijaan antavaa asennetta voisi puolustaa sillä, että se antaisi oikeutuksen kokeellisille yrityksille murtaa salaliitto ja löytää erityisasemassa olevan ajan, vaikkapa kosmisen ajan, vaikutuksia. Vastaavasta voi antaa historiallisen esimerkin: Tyko Brahe julisti vuoden 1600 vaiheilla kiinto-tähtien vuotuisen parallaksin etsimisen turhaksi, koska sellaista ei maailmankaikkeuden rakenteen takia voinut olla olemassa. Kopernikus oli päinvastoin ajatellut, että parallaksi kylläkin on olemassa, mutta sen pienuuden takia sitä ei vielä ole havaittu. Runsaat kaksisataa vuotta Tyko Brahen jälkeen parallaksi löydettiin. Luonnon salaliitot saatetaan murtaa aikanaan, vaikka siihen kuluisikin parisataa vuotta.

- Cohen, I. Bernard (1985): *Revolution in Science*. Cambridge Mass.
- Eddington, Arthur Stanley (1960/1920): *Space, Time and Gravitation*. Cambridge.
- Einstein, Albert (1951/1922): *The Meaning of Relativity*. Methuen, London.
- (1952/1924): "On the Electrodynamics of Moving Bodies". Teoksessa Hendrik Antoon Lorentz, Albert Einstein, Hermann Minkowski and Hermann Weyl, *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) Dover, New York, s. 35-65
- (1957): "Autobiographical Notes / Autobiographisches". Teoksessa Schilpp 1957, s. 1-95
- *The Collected Papers of Albert Einstein*. Osat 2, 3, 4. Princeton University Press, Princeton 1989, 1993, 1995
- Einstein, Albert (2003): *Eryityisestä ja yleisestä suhteellisuusteoriasta yleistajuisesti. Kosmologisia tarkasteluja yleisestä suhteellisuusteoriasta. Mitä on suhteellisuusteoria? Fysiikka ja todellisuus. Teoreettisen fysiikan perustukset.* (Suomennos ja kommentit Raimo Lehti.) Ursa, Helsinki.
- Fischer, Klaus (1999): *Einstein*. Herder; Freiburg, Basel, Wien.

- Frank, Philipp (1938): *Interpretations and Misinterpretations of Modern Physics*. Paris.
- (1957): "Einstein, Mach and Logical Positivism". Teoksessa Schilpp 1957, s. 269-286
- (1967/1947): *Einstein; his Life and Times*. New York.
- Lehti, Raimo (2000): "Aika suhteellisuusteoriassa ja kosmologiassa". Teoksessa *Aika* (toim. Sami Pihlström, Arto Siitonen ja Risto Vilkkö). Gaudeamus, Helsinki, s. 82-116
- (2003): "Suomentajan selityksiä ja kommentaari". Teoksessa *Einstein* 2003 s. 187-564.
- (2005): "Einsteinian Time: The Microcosmic, Megacosmic and Mesocosmic". Teoksessa *Human Approaches to the Universe* (toim. Eeva Martikainen). Luther-Agricola Society, Helsinki, s. 154-185
- Mach, Ernst (1960/1893): *The Science of Mechanics*. La Salle Ill.
- Schilpp, Paul Arthur (ed.) (1957/1949): *Albert Einstein: Philosopher – Scientist*. Tudor Publ. Co., New York.

Kirjoittaja on Teknillisen korkeakoulun matemaatiikan emeritusprofessori. Kirjoitus perustuu esitelmään Suomen Oppihistoriallisessa Seurassa 27.10.2005.