

Gravitaatioaaltojen ensimmäiset sata vuotta

Perustutkimus ei elä kvartaalitaloudessa. Aika-avaruuden väreily eli gravitaatioaaltojen ennustamisen ja niiden suoran havaitsemisen välissä ehti vierähtää lähes täsmälleen sata vuotta. Riittävän herkkien havaintolaitteiden rakentamisvaikeuksien lisäksi etenemistä hidastivat myös monenkirjavat teoreettiset ongelmat.

Suppeasta yleiseen suhteellisuusteoriaan

Vuonna 1907 **Einstein** sai ajatuksen, jota hän myöhemmin kutsui elämänsä onnellisimmaksi. Hän oli muutaman vuoden ajan yrittänyt etsiä tapaa yleistää suppea suhteellisuusteoria havaitsijoihin, jotka ovat toistensa suhteen kiihtyvässä liikkeessä. Suppea suhteellisuusteoria toki tarkastelee kiihtyvää liikettä, mutta sen havaitsijoiden suhteellinen nopeus oli rajattu vakioksi. Sen sijaan esimerkiksi gravitaatiokentässä putoava havaitsija on maan pinnalla sijaitsevan havaitsijan

suhteen kiihtyvässä liikkeessä. Siksi suppea suhteellisuusteoria ei ole teoria painovoimasta.

Tätä miettiessään Einstein muisti, että vapaassa putoamisessa havaitsija ei tunne omaa painoaan. Painovoiman voi siis eliminoida siirtymällä sopivaan koordinaatistoon. Tämä kertoi Einsteinille, ettei gravitaatio ole oikea voima. Hänen mielestään fysiikan lait eivät näet voineet riippua koordinaatiston valinnasta. Tämä vaatimus tunnetaan ekvivalenssiperiaatteen nimellä, ja se on yleisen suhteellisuusteorian kivijalka.

Einsteinin pohdinta [1] huipentui loppuvuoteen 1915, jolloin hän viimein julkaisi yleisen suhteellisuusteoriaansa. Sen ”yleisyys” viittaa siis havaitsijoiden liikkeen mielivaltaisuteen. Syntymähetkeksi tavataan laskea marraskuun 25. päivä. Tuolloin Einstein esitelmöi Preussin Tiedeakatemiaan fysiikan ja matematiikan sektorin kokouksessa ja esitteli kuulijoille teoriaansa. Sen mukaan ajalla ja

avaruudella on sisäisiä ominaisuuksia, jotka riippuvat aineesta ja energiasta dynaamisella tavalla.

Esimerkiksi Auringon voi massansa ansiosta ajatella painavan avaruuden kudelman eräänlaisen kuopan ikään kuin avaruus olisi joustava kumimatto. Maapallo kulkee tässä avaruudessa suora- viivaista rataa, sillä Aurinko ei vaikuta siihen millään voimalla. Mutta avaruus on kuopalla, ja siihen kuoppaan Maakin kiepsahtaa. Siksi meistä näyttää kuin Aurinko vetäisi Maata puoleensa.

Yleisen suhteellisuusteorian voi formuloida avaruuden ja ajan rakennetta kuvaavien kenttäyhtälöiden avulla. Kyseessä ovat differentiaaliyhtälöt, joiden vasemmalla puolella istuu aika-avaruuden geometrian muutos. Yhtäläisyysmerkin oikealla puolella on geometrian lähde, ainetta ja energiaa kuvaava energia-impulssitensori T . Jälkimmäistä kertoo Newtonin vakio G_N , joka on eräänlainen mita avaruusan ajan jäykkyydelle.

Einsteinin kenttäyhtälöt

Matemaattisesti Einsteinin yhtälöt ovat muotoa

$$G[g] = 8\pi G_N T[g, aine],$$

missä olemme yksinkertaisuuden vuoksi pudottaneet pois kaikki indeksit [2] (puristeille: kirjoittaneet Einsteinin yhtälön differentiaaligeometristen muotojen avulla [3]). Tässä olemme valinneet yksiköt, joissa valon nopeus $c = 1$. Näissä yksiköissä Einsteinin kuuluisa ”atomipommikaava” on yksinkertaisesti $E = m$; massa on energiaa ja energia massaa.

Koska suppea suhteellisuusteoria on yleisen suhteellisuusteorian erityistapaus, massan ja energian yhtäläisyys pätee myös gravitaatiolle. Toisin sanoen, myös energia on painovoiman lähde. Itse asiassa aine ja energia eivät eroa toisistaan millään periaatteellisella tavalla; ne ovat saman perussubstanssin kaksi erilaista ilmentymää.

$G[g]$ on nimeltään Einsteinin tensori. Se riippuu aika-avaruuden metriikasta g ja on siis auki kirjoitettuna epälineaarinen differentiaaliyhtälö metriikalle. Metriikka puolestaan on ajan ja paikan funktio.

Newtonin vakion G_N voi esittää myös Planckin massan $M_{\text{pl}} = 1.2 \times 10^{19} \text{ GeV} \sim 10^{19} m_p$ avulla, missä m_p on protonin massa:

$$G_N = 1/M_{\text{pl}}^2.$$

Sähkömagneettisen vuorovai-
kutuksen voimakkuutta kuvaa al-
keistodennäköisyys, jolla elektro-
nin ja fotonin kohdatessa tapahtuu
jotakin, esimerkiksi absorptio. Sen
kertaluvun antaa hienorakenneva-
kio $\alpha = 1/137$, joka on dimensioton
luku. Jotta voisimme verrata ai-
neen (energian) ja aika-avaruuden
välistä gravitaatiovuorovaikutus-
ta sähkömagnetismiin, meidän tu-
lee muodostaa Newtonin vakioon
verrannollinen dimensioton luku.
Sellainen saadaan suureesta

$$E^2 / M_{\text{pl}}^2,$$

missä E on energia per Planckin
etäisyyden kokoinen yksikkö-
koppi. Kun voimakkaimmis-
sakin hiukkaskiihdyttimissä
(pistemäisten) alkeishiukkasten
energia on vain muutama tuhat
protonin massaa, ymmärrämme
oitis: gravitaatio on todella heikko
voima. Aine (eli energia) modifioi
aika-avaruutta vain vaivoin. Siksi
gravitaatioaaltojen havaitseminen
on hankalaa.

Yhtälöiden gravitaatioaalto-ratkaisut

Jos ainetta eli energiaa ei lähitie-
noolta löydy, Einsteinin teorian
ratkaisut palautuvat (lokaalisti)
suppean suhteellisuusteorian
Minkowskin avaruuteen, joka on
kaikin puolin vakioinen ja tyhjä
ajan ja avaruuden muodostama
neli-ulotteinen monisto. Se on
tosin epäeuklidinen, mikä kuulos-
taa hienolta mutta on käytännössä
vain pieni tekninen sivuseikka.

Kuten jokainen järkevä teo-
reettinen fyysikko, Einstein tutki
oitis kenttäyhtälöitään tapaukses-
sa, jossa Minkowskin avaruudessa
esiintyy pieniä häiriöitä. Hän
linearisoi häiriöt ja etsi niiden rat-
kaisut. Ne osoittautuivat tasoaal-
loiksi, jotka kulkevat tausta-ava-
ruuden suhteen täsmälleen valon
nopeudella. Näitä häiriöitä alettiin
kutsua gravitaatioaaltoiksi.
Einstein siis oletti metriikan muo-
doksi (pudotamme taas indeksit)

$$g = \eta + h,$$

missä η on vakioinen Minkows-
kin metriikka ja h pieni häiriö eli
gravitaatioaalto. Sillä on kaksi
polarisaatiotilaa, ja sähkömag-
neettisen kentän lailla se toteuttaa
aaltoyhtälön, josta sen nopeuden
voi lukea yhdellä silmäyksellä.
Alimmassa kertaluvussa Einstei-
nin yhtälön vasemmaksi puoleksi
nimittäin saadaan

$$G[g] = \square h + O(h^2),$$

missä ”laatikko” \square on
aalto-operaattori.

Seuraava kysymys oli: missä
oloissa näitä gravitaatioaaltoja
syntyy, ja voidaanko ne havaita?

Vai onko niitä sittenkään olemassa?

Gravitaatioaaltojen loiskinta ja
liplatus osoittautui kuitenkin
monimutkaiseksi. Niinpä vuonna
1936 **Max Bornille** lähettämäs-
sään kirjeessä Einstein kirjoitti [4]:

”Yhdessä nuoren kollaboraattorin kanssa olen tullut kiintoisaan johtopäätökseen, jonka mukaan gravitaatioaaltoja ei ole olemassa vaikka näin on varmuudella oletettu alimmassa approksimaatiossa. Tämä osoittaa, että yleisen suhteellisuusteorian epälineaariset kenttäyhtälöt voivat kertoa meille enemmän, tai pikemmin rajoittaa enemmän, kuin mitä olemme tähän mennessä usko- neet.”

Kollaboraattori oli **Nathan Rosen**, joka muistetaan kvanttifysiikan Einstein-Podolsky-Rosen-paradoksista. Hän ja Einstein olivat lähettäneet Physical Reviewhin julkaistavaksi artikkelin ”Do Gravitational Waves Exist?” ja kuten aina, kun artikkelin otsikossa on kysymysmerkki, vastaus oli ”Ei”.

Tämä oli luultavasti ainoa kerta, kun Einsteinin artikkeli torjuttiin. Referee oli näet hyvin kriittinen, ja editori toivoi Einsteinin vastaavan refereen kommentteihin. Tästä Einstein kuitenkin suutahti ja veti artikkelinsa pois. Hän kirjoitti editorille:

”Me (hra Rosen ja minä) lähetimme Teille käsikirjoituksen julkais- tavaksi emmekä valtuuttaneet Teitä näyttämään sitä asiantun- tijoille ennen julkaisua. En näe mitään syytä tarkastella anonyy- min eksperttinne – joka tapauk- ssa virheellisiä – kommentteja. Tämän tapahtuman johdosta julkaisen artikkelin jossakin muualla.”

Tämän jälkeen Einstein ei enää

julkaissutkaan mitään Physical Reviewissä.

Einsteinin huoli gravitaatioaaltojen olemassaolosta oli sinänsä oikeutettu. Kun teoria on epälineaarinen, on mahdollista, että aliman kertaluvun approksimaatio tuottaa epäfysikaalisia ratkaisuja kenttäyhtälöihin. Einstein ja Rosen uskoivatkin osoittaneensa, että täydellisen teorian tasoalto- ratkaisut luovat metriikkaan singulariteettejä. Myöhemmin kävi kuitenkin selväksi, että kyseiset singulariteetit voitiin poistaa sopivalla koordinaatistovalinnalla.

Yleisessä suhteellisuusteoriassa puhutaankin nykyään fysikaalisista ja epäfysikaalisista singulariteeteista. Esimerkiksi musta aukko, jota tapahtumahorisontti ympäröi, on fysikaalinen singulariteetti: se ei poistu millään muunnoksella. Tapahtumahorisontti itsessään on singulaarinen vain Schwarzschildin koordinaateissa ja katoaa koordinaatistoa vaihtamalla. Tällainen epäfysikaalinen koordinaattisingulariteetti on analoginen maapallon pinnan pituuspiirin kanssa, jolla on Pohjoisnavalla määräämätön arvo vaikkei siellä mitään merkillistä tapahdukaan.

Kantaako aalto energiaa?

Einsteinin vuonna 1916 löytämä linearisoitu gravitaatioaalto- ratkaisu pysyy siis ratkaisuna yleisessäkin tapauksessa. Kaksi vuotta myöhemmin hän laski myös aallon kantaman energiavuon ja

argumentoi energian säilymisen perusteella, että gravitaatioaalto siirtävät energiaa pois niitä gene- roivasta systeemistä.

Nämä ratkaisut ovat analogi- sia sähkömagneettisten aaltojen kanssa, mutta on myös olemassa tärkeitä eroja.

Tunnetusti värähtelevä varaus synnyttää aaltoja; niiden lähde on sähköisen dipolimomentin $d = ex$ kokema kiihtyvyyden (tässä x on varauksen kulkema matka ja e sähkövaraus). Värähtelevä massa M tuottaa analogisesti dipolimo- mentin $d = Mx$, mutta sen toinen aikaderivaatta on nolla: eristetyssä systeemin kokonaisimpulssi näet säilyy. Niinpä gravitaatioaalto eivät ole dipolisäteilyä vaan kyseessä olevan multipooliek- sansion seuraavaa astetta eli kvadrupolisäteilyä.

Kvadrupooli mittaa värähte- lyn asymmetriaa. Siksi esimerkiksi pallosymmetrisen tähti ei ole gravitaatioaaltojen lähde, ei myöskään pallosymmetrisesti rä- jähtävä supernova. Asymmetrisiä ilmiöitä löytyy helposti astrofysiikan maailmasta, kuten törmäävät neutronitähdet tai mustat aukot.

Keskustelu gravitaatioaalto- jen konkretiasta jatkui kuitenkin pitkälle 1960-luvulle asti. Aallot ovat teorian ratkaisuja ja ne kantavat energiaa, mutta onko tuo energia fysikaalista? Voidaanko se havaita?

Taustalla piili huoli yleisen suhteellisuusteorian koordi- naatti-invarianssista. Teoria on

konstruoitu siten, että se pysyy samana mielivaltaisessa aika- ja paikkakoordinaattimuunnoksessa muotoa

$$x \rightarrow f(x),$$

missä olemme jälleen pudottaneet pois indeksit. Tässä f on mikä tahansa riittävän hyvin käyttäytyvä funktio (indekseineen nelivektori). Tämän ominaisuuden – eli ekvivalenssiperiaatteen – vuoksi vapaassa pudotuksessa oleva havaitsija ei tunne omaa painoaan, sillä voimme paikallisesti ja hetkellisesti tehdä aina koordinaattimuunnoksen, joka muuntaa metriikan siten että $g \rightarrow \eta$.

Voitaisiinko siis gravitaatioaallon kantamasta energiasta päästä eroon sopivalla koordinaattimuunnoksella? Toisin sanoen: kumoutuvatko gravitaatioaalot jossakin tietyssä liike-tilassa?

Ongelmaa mutkistivat myös yleisen suhteellisuusteorian kenttäyhtälöt. Päinvastoin kuin Maxwellin yhtälöiden tapauksessa, myös kenttäyhtälön ratkaisujen alkuarvojen tulee toteuttaa liikeyhtälöt. Sähkömagnetismissa voimme ottaa elektronin käteen ja heiluttaa sitä, ja tällä tavoin syntyy aaltoja. Voimme myös heiluttaa käsiämme ja synnyttää gravitaatioaaltoja, mutta käsien heiluttelu itsessään ei toteuta Einsteinin yhtälöitä. Käsia heiluttaa sähkömagnetismi. Mitä siis tapahtuu, kun liikkeen alkuperä – vaik-

kapa kahden neutronitähden muodostamassa systeemissä – on pelkästään gravitaatioaalto?

Chapel Hillin konferenssi

Einsteinin yhtälöiden mukaista kappaleen rataa kutsutaan geodeetiksi. Esimerkiksi maapallo putoaa vapaasti pitkin geodeettiaan paikallisessa aika-avaruudessa, jonka muodon määrää pääpiirteisään Auringon massa.

Vastaavasti voimme ajatella testikappaleita, jotka putoavat pitkin geodeettejaan gravitaatioaallossa. Miten nuo kappaleet käyttäytyvät?

Näitä kysymyksiä pohdittiin ankarasti vuonna 1957 Pohjois-Carolinan yliopiston Chapel Hill -konferenssissa, joka osoittautui gravitaatioaaltojen kannalta käännteentekeväksi [5]. Chapel Hilliin oli paria vuotta aiemmin perustettu Institute of Field Physics -niminen tutkimusinstituutti, jonne palkattiin nuoria tutkijoita mm. kosmologisista ratkaisuistaan nykyään tunnetun, King's Collegessa vaikuttaneen Herman Bondin ryhmästä. Heihin kuuluivat esimerkiksi gravitaation kimpussa silloin puurtanut **Peter Higgs** sekä englantilaisyyntyinen **Felix Pirani**. Tosin Higgs on myöhemmin tunnustanut puuhas-telleensa enemmän kenttäteorian symmetriarikon kuin gravitaation parissa, mikä hänelle on jo varmaan annettu anteeksi.

Felix Pirani sen sijaan toi Chapel Hillissä esille oleellisen

oivalluksen. Hän muistutti, että ekvivalenssiperiaatteen vuoksi gravitaatiokenttä ei itsessään ole fysikaalinen. Sen sijaan gravitaatiokentän muutokset ovat fysikaalisia. Vapaasti putoavien kappaleiden geodeettien suhteelliset erot antavat informaatiota Einsteinin yhtälöissä esiintyvistä tensorista G ja sitä kautta metriikasta g . Niinpä ohi kulkevan gravitaatioaallon vaikutuksen voisi nähdä kahden testikappaleen geodeettien suhteellisessa poikkeamassa. Aalto saisi vapaasti putoavat kappaleet ajautumaan joko erilleen tai lähemmäksi toisiaan.

Tämä innosti kokouksessa mukana olleen **Richard Feynmanin** päättelemään, että gravitaatioaaltoista täytyy pystyä siirtämään energiaa. Aallon heiluttelemalla hiukkanen kykenisi raapimaan paikallaan pysyvää tikkua ja generoisi näin lämpöä, joka on reaalinen ja mitattavissa oleva asia. Ja jos aallon energiaa voi absorboida, energiaa voi myös emittoida aaltoina.

Kenties vuosikymmeniä kestäneen hämmennyksen eräs syy oli gravitaatioaaltojen mieltäminen tyhjässä avaruudessa eteneväksi säteilyksi, kuten Einsteinin alkuperäinen häiriöteoreettinen lähestymistapa antoi ymmärtää. Pirani sen sijaan ajatteli gravitaatioaaltojen aika-avaruuden kudelmaa värähtelyiksi. Kosminen kumimatto ei ainoastaan painu kuopalle vaan myös aaltoilee.

Tällaisia ajatuspolkuja seurailen gravitaatioaaltojen reaalisuus, liki puoli vuosisataa niiden teoreettisen konstruktion jälkeen, vähitellen konkretisoitui ja tuli yleisesti hyväksytyksi. Pirani tosin jätti fysiikan ja kunnostautui poliittisena aktivistina, tieteen popularisoijana ja lastenkirjojen kirjoittajana.

Ensimmäiset yritykset aaltojen havaitsemiseksi

Chapel Hillin konferenssin osallistujien joukossa oli myös amerikkalaisfyysikko **Joseph Weber**. Vaikka gravitaatioaaltojen teoreettinen perusta oli hädin tuskin valettu eikä gravitaatioaaltojen astrofysikaalisista lähteistä ollut juuri mitään käsitystä, häneltä ei puuttunut rohkeutta yrittää niiden havaitsemista. Sitä varten hän alkoi 1960-luvulla suunnitella laitetta, joka tunnetaan nimellä "Weberin sylinteri". Kyseessä on pohjimmiltaan suuren tynnyrin kokoinen, äärimmäisen herkästi ripustettu alumiinisylinteri, jonka värähtelyiden avulla tulisi pystyä rekisteröimään siihen osuvat gravitaatioaalto.

Koejärjestely oli altis monenlaisille häiriöille. Melkein mikä tahansa saattoi värisyttää sylinteriä lähtien ohi ajavista autoista. Vuonna 1969 Weber kuitenkin ilmoitti havainneensa gravitaatioaaltoja. Hetkellisen alkuinnostuksen jälkeen hänen tuloksensa joutuivat kuitenkin voimakkaan kritiikin kohteeksi. Hänen tieto-

koneohjelmistaan löytyi virheitä. Muut tutkijat rakensivat vastavanzalaisia laitteita eivätkä havainneet mitään. Teoreetikot huomauttivat, että jos Weberin havainnot pitäisivät paikkansa, universumin koko massaenergian olisi pitänyt konvertoitua gravitaatioaaltoiksi 50 miljoonassa vuodessa [6].

Weberin ajatukset matkustivat myös Kuuhun vuona 1972 Apollo 17 astronauttien mukana [7]. Heidän mukanaan oli Lunar Surface Gravimeter -niminen koelaitteisto, jonka tarkoitus oli mitata sekä Kuun painovoiman vaihteluita että Kuun deformaatiota gravitaatioaalton iskeytyessä siihen. Kuun seisminen aktiivisuus on lähes olematonta, joten Kuussa havainnot häiritsevää taustaa on Maata vähemmän. Kuuta oli siis tarkoitus käyttää suunnattomana Weberin sylinterinä.

Tämäkin yritys gravitaatioaaltojen havaitsemiseksi kuivui kasaan. Mittalaitteeseen kuuluva, tasapainopuomiksi kutsuttu vertailutanko oli lähdössä lukittu paikoilleen eikä sitä saatu Kuussa irroitettua vaikka astronautit yrittivät hakata sitä työkaluillaan. Syypää oli puomin suunnittelijan väärä arvio Kuun painovoimasta: sauva ei ollut tarpeeksi painava irrotakseen.

Weber itse ei antanut milloinkaan periksi. Hän oli periaatteessa erinomainen fyysikko mutta ajautui ennen pitkää eräänlaiseksi katkeroituneeksi hylkiöksi. Jopa

koko ajatus gravitaatioaaltojen havaitsemisesta sai epäilyttävän maineen. Muistelen itsekin 1980-luvulta ja nuoruuteni CERNistä sitä pidetyn teoreetikkojen piirissä haihatteluna, jonka saattoi kuitata pelkällä naureskelulla.

Gravitaatioaalto oli kuitenkin hyväksytty yleisesti viimeistään 1970-luvulla. Vuonna 1974 amerikkalaiset **Russell Hulse** ja **Joseph Taylor** olivat havainneet kaksoispulsari PSR 1913+16:n rataparametrien muuttuvan tavalla, joka voitiin selittää systeemin lähettämien gravitaatioaaltojen avulla. Siitä hyvästä heille myönnettiin vuonna 1993 Nobelin palkinto. Kyseessä oli ensimmäinen havaittu kaksoispulsari, ja palkinto annettiin "uuden tyyppisen pulsarin löytämisestä, joka on avannut uusia mahdollisuuksia gravitation tutkimukseen".

PSR 1913+16:n neutronitähdet lähestyvät toisiaan, koska systeemistä vuotaa energiaa gravitaatioaaltojen muodossa. Radan käyttäytymistä on seurattu neljänkymmenen vuoden ajan, ja se noudattaa edelleen täsmällisesti Einsteinin yleisen suhteellisuusteorian ennusteita [8].

Gravitaatioaaltojen tarinan ensimmäisen osan loppunäytös esitettiin 100 vuotta, 2 kuukautta ja 17 päivää yleisen suhteellisuusteorian syntymästä. Tuolloin LIGO-kollaboraatio ilmoitti kahden mustan aukon törmäyksessä syntyneiden gravitaatioaaltojen

rekisteröityneen havainto-
laitteisiin. Vaikka varsinainen
tapahtuma oli edelliseltä vuo-
delta, signaalin reaalisuus oli
toki pitänyt varmentaa; siksi
vuoden 2016 helmikuun 11. voi
pitää gravitaatioaaltojen suoran
havaitsemisen juhlapäivänä.

Uusi ikkuna universumiin
on siis nyt avautunut. Kiitos
kuuluu pitkäjänteiselle pe-
rustutkimukselle, johon sekä
teoreetikot että havaitsijat
toivat omat panoksensa. Saa-
vutus alleviivaa tosiseikkaa,
joka päättäjien on joskus vaikea
ymmärtää: tieteen perspektiivi
ei pysähdy kvartaaleihin vaan
ulottuu vuosikymmenien yli.
Ja vaikka gravitaatioaaltojen
avulla Suomi ei lähde nousuun
eikä tuottavuusloikkaa nähdä
muuallakaan, niiden havaitse-
misen myötä ihmiskunta on silti
ottanut jättiläisharppauksen.

Viitteet

- [1] Näistä askelista kts. Abraham Pais: 'Subtle is the Lord...' The Science and the Life of Albert Einstein. Oxford University Press, 1982.
- [2] Indekseistä kiinnostuneet voivat katsoa ne Googlesta.
- [3] Kts. Charles W. Misner, Kip S. Thorne, John Archibald Wheeler: Gravitation. W.H. Freeman and Company, 1973.
- [4] Hyvä historiallinen katsaus gravitaatioaaltojen ympärillä käytyyn keskusteluun on Daniel Kennefick: Controversies in the History of the Radiation Reaction problem in General Relativity, arXiv: gr-qc/9704002v1
- [5] The Role of Gravitation in Physics: Report from the 1957 Chapel Hill Conference, Eds. Cécile M. DeWitt, Dean Rickles, www.edition-open-access.de/sources/5/3/
- [6] Viihdyttävä kirjoitelma Weberin noususta ja tuhosta on Janna Levin: Gravitational wave blues. aeon.co/essays/how-joe-weber-s-gravity-ripples-turned-out-to-be-all-noise. Laajempi teos on Janna Levin: Mustan aukon blues (URSA 2016).
- [7] Apollo 17 Lunar Surface Journal: Mission Summary, www.hq.nasa.gov/alsj/a17; Mission science planning document Apollo Mission J-3 (Apollo 17), www.lpi.usra.edu/lunar/AL-SEP/pdf/31111000674125.pdf
- [8] Kts. Joel M. Weisberg, David J. Nice, Joseph H. Taylor: Timing Measurements of the Relativistic Binary Pulsar PSR B1913+16. *Astrophys. J.* 722:1030-1034, 2010. arXiv:1011.0718v1 [astro-ph.GA]

Kirjoittaja Kari Enqvist on kosmologian professori Helsingin yliopistossa.