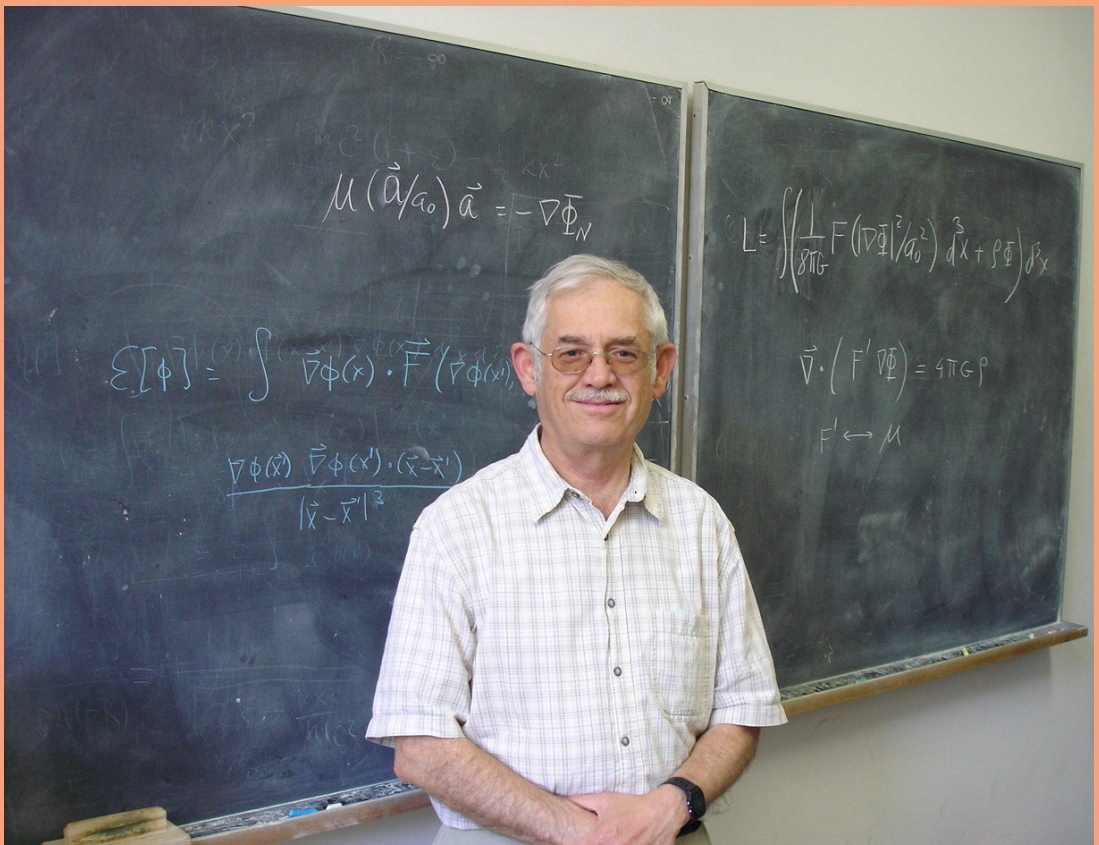


TUNTEMATON BEKENSTEIN

OSMO PEKONEN

Elokuun 16. päivänä 2015 kuoli Helsingissä muuan israelilainen tiedemies nimeltä Jacob Bekenstein. Miksi hänet pitäisi muistaa?



Jacob Bekenstein (1947–2015).

Kuva: The Hebrew University, Jerusalem.

Termodynamiikan keskeinen käsite on entropia, joka ilmaisee epäjärjestyksen määrää systeemissä. Termodynamiikan toisen pääsäännön mukaan eristetyin systeemin entropia (S) voi kasvaa, mutta ei koskaan vähetä. Niin kuin monessa muussa asiassa on termodynamiikan uusimassa historiassa ollut kaksi isoa keskenään kilpailevaa koulukuntaa: amerikkalainen (Princeton) ja englantilainen (Cambridge). Molemmilla koulukunnilla on kunniakkaat sukupuut, mutta amerikkalaisen koulukunnan juuret ovat itse asiassa saksankielisessä tieteessä.

Aloittakaamme tarinamme Wienin Keskushautuumaalta. Siellä seisoo kuuluisa hautakivi, jonka muistokirjoitus toteaa lakonisesti:

$$S = k \log W$$

Fyysikko tunnistaa tässä entropian (S) peruskaavan, missä k on Boltzmannin vakio ja W tarkoittaa ideaalikaasun makrotilan todennäköisyyttä (*Wahrscheinlichkeit*). Haudassa lepää termodynamiikan yksi isä, itävaltalainen fyysikko Ludwig Boltzmann (1844–1906). Hänellä oli mielenterveyden ongelmia, ja hän kuoli hirttäytymällä hotellihuoneensa ikkunaan 5. syyskuuta 1906 Duinossa ”Itävallan Rivieralla” Adrianmeren rannalla.

Hautakiven kaavan tulkinnan yksityiskohtiin on turha tässä mennä. Todettakoon vain, että on varsin tyylikästä – ja harvinaista – jos tiedemiehen elämäntyön voi kuitata yhdellä kaavalla, joka on kyllin lyhyt mahtuakseen hautakiveen. Toinen kuuluisa esimerkki on matemaatikko Roger Apéryn (1916–94) hautakivi Pariisiin Père Lachaisen hautuumaalla, jossa on yhtä lakonisesti yhteen riviin ikuistettu se hänen todistamansa seikka, että zeta-funktion arvo luvulla 3 on irrationaalinen.

Boltzmannista alkaneen termodynamiikan koulukunnan jatkajia suoraan alenevassa polvessa olivat itävaltalaiset Friedrich Hasenöhr (1874–1915) ja Karl Herzfeld (1892–1978), joista Herzfeld siirtyi vuonna 1926 Yhdysvaltoihin, sekä viimeksi mainitun amerikkalainen oppilas, sittemmin Princetonin yliopiston fysiikan professori John Archibald Wheeler (1911–2008). Wheeler oli monessa mukana: hän osallistui sekä fissio- että fuusio-oppommin kehittämiseen, ja hän keksi nimityksen ”musta aukko”. Wheeleristä olisi paljon kerrotta-

vaa (enkä malta olla mainitsematta, että olin länänä hänen 90-vuotispäivillään Princetonissa), mutta tässä tarinassa riittää mainita hänen roolinsa Jacob Bekensteinin (1947–2015) Doktorvaterina.

Toinen fysiikan koulukunta, josta tässä on puhe, voidaan aloittaa Bristolissa syntyneestä suuresta kvanttimekaanikosta Paul Adrien Maurice Diracista (1902–84). Yksi hänen oppilaistaan oli Dennis W. Sciama (1926–99), jonka oppilas taas oli meidän aikamme suurelle yleisölle epäilemättä kaikkein tunnetuin fyysikko, Cambridgen yliopiston Lucasin oppituolin haltija Stephen Hawking (1942–2018). Sciamalla oli suuri merkitys paitsi Hawkingin mentorina myös hänen rohkaisijanaan ALS-taudin tuottamien vaikeuksien voittamisessa.

Mustan aukon säteily

Näkymättömistä tähdistä, joiden painovoima on niin suuri, ettei valokaan pääse niistä karkaamaan, spekuloivat jo 1700-luvulla englantilainen John Michell (1724–93) ja ranskalainen Pierre-Simon Laplace (1749–1827). Saksalainen Karl Schwarzschild (1873–1916) löysi Albert Einsteinin vuonna 1915 esittämien kenttäyhtälöiden ratkaisun, joka kuvaa tällaista tilannetta. Gravitaation luhistamalla tähdellä on pallonmuotoinen tapahtumahorisontti, jolta paluuta ei enää ole ja jonka sisälle emme voi kurkistaa. Wheeler käytti tällaisesta objektista nimitystä ”black hole” ensimmäisen kerran eräällä luennollaan vuonna 1967.

Musta aukko kuulostaa äärimmäisen vaikealta käsitteeltä, mutta ainakin ulkoapäin – turvallisen matkan päässä tapahtumahorisontista – tarkasteltuna se päinvastoin oli maailmankaikkeuden yksinkertaisin objekti, jolla ajateltiin olevan vain kolme parametriä: massa, sähkövaraus ja spin. Termodynamiikalla sen sijaan ei pitänyt olla mustien aukkojen kanssa mitään tekemistä – tai näin ainakin ajateltiin, kunnes näyttämölle astui Jacob Bekenstein.

Jacob David Bekenstein syntyi 1. toukokuuta 1947 Mexico Cityssä. Hänen vanhempansa olivat puolalaisia ortodoksisjuutalaisia, jotka olivat emigroituneet Meksikoon. Hän sai Yhdysvaltain kansalaisuuden vuonna 1968 ja suoritti alemman korkeakoulututkintonsa New Yorkissa. Vuonna 1972 hän väitteli Wheelerin oppilaana tohtoriksi Princetonissa.

Wheeler muistelee (Wheeler 1998) esittäen-
sä oppilaalleen seuraavanlaisen ajatuskokeen: Ote-
taan kaksi mukia, joista toisessa on kuumaa teetä
ja toisessa jääteetä. Jos ne asetetaan rinnakkain,
niin lämpö alkaa virrata, kunnes molemmat mukit
ovat yhtä haaleita. Tällöin systeemin – nimittäin
koko maailmankaikkeuden – energia säilyy, mutta
entropia kasvaa. Mutta entäpä jos paikalle sattuisi
purjehtimaan musta aukko, joka nielaisisi molem-
mat haalenneet mukit? Silloin universumin entropia
ei olisikaan kasvanut, mikä on paradoksi.

Hawking oli saavuttanut gravitaatiofysiikas-
sa useita merkittäviä tuloksia, joista yhden hän
julkaisi vuonna 1970: mustan aukon pallonmuo-
toinen tapahtumahorisontti voi pinta-alaltaan
kasvaa, mutta ei koskaan vähetä. Tuo kuulostaa
hiukan samalta kuin edellä mainittu termodyna-
miikan toinen pääsääntö, mutta Hawking tai ku-
kaan muukaan ei ollut kiinnittänyt siihen seikkaan
sen enempiä huomiota. Bekensteinin suuri oival-
lus (Bekenstein 1972) oli, että mustan aukon ent-
ropian (S) ja tapahtumahorisontin pinta-alan (A)
täytyy olla sama asia – tiettyä verrannollisuusker-
rointa vaille.

Bekensteinin idea tuomittiin aluksi pähkähul-
luna – eihän mustilla aukoilla pitänyt olla entropia-
lankaan. Mutta sitten Hawking ryhtyi laske-
maan ja ajattelemaan. Hän keksi uuden ajatuksen,
jonka mukaan mustat aukot eivät sittenkään ole
kokonaan mustia. Ne voivat säteillä, joten niillä voi
olla lämpötila. Kyllin kauan säteilyään musta auk-
ko voi ”höyrystyä” kokonaan pois.

Mustan aukon säteily syntyy seuraavalla ta-
valla: Tapahtumahorisontin läheisyydessä – kuten
kaikkialla universumissa – syntyy tyhjiöstä spon-
taanisti virtuaalisia hiukkas-antihukkaspareja,
jotka yleensä saman tien annihiloituvat mitään
luonnonlakeja rikkomatta. Lähellä mustaa aukkoa
toinen hiukkasparin hiukkasista voi kuitenkin pu-
dota mustan aukon nieluun, jolloin parin toinen
hiukkanen saa ”energiapotkun” ja singahtaa pois
mustan aukon ulottuvilta virtuaalisesta reaalisesti
hiukkaseksi muuttuneena. Ulkopuolisesta tarkkai-
lijasta näyttää, että musta aukko säteilee.

Hawking julkaisi tuloksensa vuonna 1974. Hän
esitti mustan aukon lämpötilalle (T) täsmällisen
kaavan, johon hänen tieteellinen jälkimaineensa
suurelta osin perustuu:

$$T = \frac{\hbar c^3}{8\pi G M k} \quad (1)$$

Tässä \hbar on Planckin vakio, c on valon nopeus, G
on gravitaatiovakio, M on mustan aukon massa, ja
 k on Boltzmannin vakio. Tästä tuloksesta voidaan
johtaa täsmällinen lauseke myös Bekensteinin pos-
tulaatista puuttuneelle verrannollisuuskertoimel-
le, jolloin mustan aukon entropialle saadaan kaava:

$$S = \frac{\pi A k c^3}{2 h G} \quad (2)$$

Merkinnät ovat tässä muuten samat kuin edel-
lä, paitsi että Planckin vakio on tällä kertaa muo-
dossa $\hbar = 2\pi\hbar$. Edellä kerrotun perusteella voidaan
kaavaa (1) nimittää Hawkingin kaavaksi, kun taas
kaavaa (2) on syytä kutsua Bekensteinin–Hawkin-
gin kaavaksi. Yksinkertaistettuna kaava (1) siis sa-
noo, että mustan aukon lämpötila on kääntäen
verrannollinen sen massaansa, kun taas kaavan (2)
mukaan mustan aukon entropia on suoraan ver-
rannollinen sen tapahtumahorisontin pinta-alaan.
Ilman Bekensteinin vuoden 1972 oivallusta meil-
lä ei välttämättä olisi kumpakaan näistä kaavois-
ta! Niinpä mustan aukon säteilyä voidaan hyvällä
syyllä nimittää Bekensteinin–Hawkingin säteilyksi.
Sitä ei kuitenkaan ole voitu kokeellisesti havaita.

Kaavat (1) ja (2) ovat tieteenhistoriallisesti
käänteentekeviä myös siitä syystä, että niissä yh-
distyvät kvanttimekaniikan ja gravitaation aivan
eri kokoluokkaan kuuluvat ilmiöt ainutlaatuisella
tavalla. Näiden fysiikan perusilmiöiden mahdolli-
nen laajempi yhdistäminen ”kvanttigravitaatioksi”
on nykyfysiikan suurimpia haasteita.

Koska entropian kasvu merkitsee informaati-
on hukkaamista, merkitsee kaava (2) myös sitä,
että avaruuden tietyn alueen sisältämä informaati-
o on verrannollinen sen pinta-alaan – eikä tila-
vuuteen, kuten arkijärjen mukaan tuntuisi uskot-
tavalta. Näin ollen musta aukko – tai yhtä hyvin
koko universumi – on Bekensteinin mukaan ikään
kuin hologrammi (Bekenstein 2003). Ei ole ollen-
kaan selvää, mitä tämä koko maailmankaikkeuden
kannalta oikeastaan merkitsee.

Bekenstein pohdiskeli myös informaatiopara-
doksia: höyrystyneen mustan aukon sisältämän in-
formaation näköjään täydellistä katoamista, johon
ei ole löytynyt selitystä. Hän myös esitti teoreetti-

sen ylärajan informaation määrälle, jonka avaruuden tietty alue voi sisältää. Nämäkin ovat suuria avoimia ongelmia.

Miten Bekenstein unohdettiin?

Bekenstein muutti vuonna 1974 Israeliin ja teki merkittävän fyysikon uran siellä, ensin Ben-Gurionin yliopistossa Beersheba, sitten Heprealaisessa yliopistossa Jerusalemissa. Hän menehtyi sydänkohtaukseen 16. elokuuta 2015 yllättävässä paikassa, nimittäin konferenssimatkalla Helsingissä.

Äskettäin uutisoitiin eräästä koejärjestelystä (Bianchi ym. 2019), joka näyttäisi antavan tukea Bekensteinin–Hawkingin säteilyn mahdolliselle olemassaololle, vaikka sen suorasta mittaamisesta ollaan vielä kaukana. *Helsingin Sanomat* otsikoi 29. tammikuuta 2020 näin (nettiversio): ”Fyysikot väittävät löytäneensä gravitaatioaallon kaiun, josta paljastuu mustan aukon säteily. Jos tutkimus pitää paikkansa, se olisi ensimmäinen havainto edesmenneen fyysikon Stephen Hawkingin keksimästä ilmiöstä.” Tässä siis unohdettiin tykkänään, että keksijöitä oli kaksi: Bekenstein ja Hawking. Samanlainen unohdus tapahtui monessa muussakin maailman mediassa, mutta ei kuitenkaan kyseisten tutkijoiden alkuperäisessä artikkelissa (Bianchi ym. 2019).

Bekensteinin ja Hawkingin keskinäiset välit eivät nähtävästi olleet parhaat mahdolliset. Mahtoiivatko he koskaan edes keskustella? Nettiä selailemalla en ainakaan ole löytänyt heistä yhteiskuvaa. Molemmille kuitenkin kuuluu kunnia Bekensteinin–Hawkingin säteilyn keksimisestä. Molemmat myös saivat vastaanottaa fysiikan Wolfen palkinnon, joka usein on enteillyt Nobelin palkintoa.

Einsteinin nimeä kantavien palkintojen suhteen asia on monimutkaisempi, sillä niitä on useita. Hawking sai palkinnon nimeltä ”Albert Einstein Award” ja ”Albert Einstein Medal”, kun taas Bekenstein sai palkinnon nimeltä ”Einstein Prize”. Wheeler, joka eli 96-vuotiaaksi, puolestaan ehti saada kaikki kolme Einstein-palkintoa. Nobelin palkintoa ei mainituista tutkijoista saanut kukaan, koska mustien aukkojen säteilyä ei ole voitu havaita ja koska fysiikan Nobel edellyttää myös vahvaa kokeellista näyttöä.

Hawking tunnetusti ei ollut liialla vaatimattomuudella pilattu. Media rakasti häntä, ja hän ra-

kasti mediaa. Hawkingin tarinassa oli dramatiikkaa yllin kyllin, kun taas Bekenstein oli tavallista päivätyötä puurtava fyysikko, jolla oli vaimo ja kolme lasta ja jonka elämänvaiheista ei koskaan ollut sen kummempaa kerrottavaa. Bekenstein ei esiintynyt *Simpsonissa* eikä *Star Trekissä*, eikä hänen elämästään ole tehty elokuvia.

Hawking itse sivuuttaa Bekensteinin populaarikirjoissaan aika tylästi muutamalla lauseella. Esimerkiksi *Ajan lyhyessä historiassa* (Hawking 1997) Bekensteinin nimi mainitaan vain kolme kertaa:

Tämä johti ajatukseen, että tapahtumahorisontin on laajennuttava aina kun mustaan aukkoon tulee lisää ainetta. Princetoniassa väitöskirjaansa valmisteleva Jacob Bekenstein sai siitä aiheen ehdottaa, että tapahtumahorisontin pinta-ala ilmaisee mustan aukon entropian... (s. 132)

Minun on myönnettävä, että yksi syy tutkimuksen julkaisemiseen oli kiukku, koska Bekenstein oli mielestäni tulkinnut väärin teoriaini tapahtumahorisontin laajenemisesta. Ennen pitkää kävi kuitenkin ilmi, että Bekenstein oli sittenkin ollut oikeassa – tosin tavalla, jota hän ei varmaan osannut aavistaa. (s. 133)

Pelkäsin että jos Bekenstein huomaisi sen, hän saisi lisää vettä myllynsä mustien aukkojen entropian puolesta, ja sitähän minä en halunnut. (s. 133)

Hawkingin tunteita Bekensteinia kohtaan olivat siis ”kiukku” ja ”pelko”, mikä tietenkään ei ole tavatonta akateemisten kilpailijoiden kesken. Pyörätuolissa liikkuva ja puhesyntetisaattorilla kommunikoiva Hawking otti kuitenkin vaivattomasti haltuunsa koko maailman median. Hänen populaarikirjojensa kuvituksessa Bekensteinia ei näy missään, eikä Hawking myöskään kiittele häntä teostensa esipuheissa.

Hawkingin tarinasta tehdyssä elokuvassa *The Theory of Everything* (2014) Bekenstein on pyyhitty täydellisesti jäljettämiin. Draaman kaareen ei näet sovi ajatus, että Hawking olisikin vain täydentänyt aikaisemman tutkijan oivallusta, vaan suuren neron kuuluu keksiä kaikki itse ja yksin. Mainitun elokuvan kohtauksessa, jossa Hawking keksii mustan aukon säteilyn, hän saa ratkaisevan oivalluksensa istuessaan yksikseen tuijottamassa takkatulen hiipuvaa hiillosta.

Kun tiedeyhteisö kuitenkin alkoi puhua Bekensteinin–Hawkingin säteilystä, Hawking lyhensi sen muotoon ”BH-säteily” antaen ymmärtää, että BH on lyhenne sanoista Black Hole. Eräänlainen itsekokeskisyden huippu oli esitelmä, jonka Hawking piti Cambridgessa omassa 60-vuotissyntymäpäivä-

juhlakolokviossaan omasta elämäntyöstään (Hawking 2002). Bekensteinia hän ei maininnut enää sanallakaan, mutta ehdotti – varmaankin Boltzmannin kuuluisan esikuvan mukaan – että hänen hautakiveensä kaiverrettaisiin kaava (2), toisin sanoen se kaava, josta hän nimenomaan saa kiittää Bekensteinia! Hawking varmaankin ennakoii jo tuolloin, että hänet haudattaisiin Westminster Abbeyn kansallispyhäkköön Charles Darwinin ja Isaac Newtonin rinnalle. Niin tapahtui Hawkingin kuoltua 76 vuoden iässä vuonna 2018. Kaikeksi onneksi hänen haudalleen ei kuitenkaan kaiverrettu hänen toivomaansa kaavaa (2), vaan kaava (1), joka tosiaan on hänen omansa.

Miksi Bekenstein unohdettiin?

Hirtehisesti on sanottu, että Bekenstein putosi tiedejournalismin mustaan aukkoon ja joutui informaatioparadoksin uhriksi. Hän ei juuri antanut haastatteluja, ja lieneekö niitä kukaan pyytänytkään? Ei hän myöskään kirjoittanut minkäänlaista omaelämäkertaa, vaikka aihetta olisi ollut. Niinpä hänestä on vaikea löytää informaatiota. Muuan tiedonmurunen kertoo, että vapaa-ajallaan hän mielellisesti luki Islannin muinaissaagoja, kun taas Hawking intoili Wagnerin oopperoista, joten tässäkin suhteessa miehet muistuttivat toisiaan.

Tiedemiehen tieteellinen maine syntyy korkeatasoisista referoiduista tieteellisistä artikkeleista, joita sekä Bekensteinilla että Hawkingilla on paljon. Muunlainen maine, jota esimerkiksi media ja viihdemaailma tarjoavat, on tieteen kannalta merkityksentöntä. Tiedeyhteisö ei kokonaan unohtanut Bekensteinia, mutta media – tiedetoimittajat mukaan lukien – ja suuri yleisö tekivät niin. Näin on syntynyt jopa väärä mielikuva, että Hawking olisi yksinään keksinyt lähes kaiken, mitä mustista aukoista nykyisin tiedämme. Vähättelemättä vaikeasti sairaan tutkijan saavutuksia hän oli todellisuudessa vain yksi monista gravitaatiofysiikan huippututkijoista. Ei ole perusteltua väittää hänen olleen ”suurin fyysikko Einsteinin jälkeen”, kuten populaaritieteellisissä esityksissä usein toistellaan. Epäilemättä Bekenstein ja Hawking kuitenkin olisivat molemmat saaneet fysiikan Nobelin palkinnon, jos tekniikka olisi kehittynyt niin pitkälle, että mustien aukkojen säteily olisi voitu havaita. Ehkä sekin päivä vielä joskus koittaa, kuten gravitaatio-

aaltojen onnistunut havaitseminen ja siitä jaettu vuoden 2017 fysiikan Nobelin palkinto ennakoivat.

Akateemisen kateuden lisäksi politiikka ja uskonto ovat aiheita, jotka voivat saada järkevienkin ihmisten sukset pysyvästi ristiin. Bekenstein ja Hawking olivat tällaisissa asioissa suorastaan toistensa vastakohtia. Bekenstein, joka oli ortodoksijuutalainen, oli myös puhdasverinen sionisti, joka pian tohtoriksi valmistuttuaan muutti Israeliin ja antoi lahjakkuutensa juutalaisvaltion käyttöön. Hawking sen sijaan touhusi mukana kampanjoissa, joissa vaadittiin Israelin boikotoimista.

Kaiken lisäksi Bekenstein uskoi Jumalaan, kun taas Hawking oli tunnettu ateisti. Ei Bekenstein jumaluskoaan tosin sen kummemmin toittanut, mutta eräässä israelilaisen *Haaretz*-lehden haastattelussa (Shtull-Trauring 2012) hän sanoi: ”Katselen maailmaa Jumalan luomuksena. Hän asetti hyvin spesifiset luonnonlait, ja me koemme iloa selvittäessämme niitä tieteellisen tutkimuksen kautta.” Hawkingille tällainen lausunto olisi epäilemättä ollut myrkyä.

Hawkingista tuli meidän aikamme ateismin tärkeimpiä symbolihahmoja. Hänen kirjojensa kautta kaikkialle levisi ajatusmalli, jonka mukaan kosmologia ja tähtitiede edellyttävät tutkijoiltaan ateismia. Bekenstein huomioon ottaen voidaan hyvällä syyllä kysyä: miksi oikeastaan?

Lähteet

- Bekenstein, J. D. 1972. Black holes and the second law. *Lettere al Nuovo Cimento* 4, 737–740.
- Bekenstein, J. D. 2003. Information in the Holographic Universe. *Scientific American* 289(2): 58–65.
- Bianchi, E., Gupta, A., Haggard, H. M., Sathyaprakash, B. S. 2019. Quantum gravity and black hole spin in gravitational wave observations: a test of the Bekenstein-Hawking entropy. *arXiv:1812.05127*
- Hawking, S. 1997. *Ajan lyhyt historia*. Kuvitettu laitos. Suom. R. Var-teva. WSOY.
- Hawking, S. 2002. Sixty years in a nutshell. Kirjassa: G. W. Gibbons, E. P. S. Shellard, S. J. Rankin (toim.), *The future of theoretical physics and cosmology. Celebrating Stephen Hawking's contributions to physics*. 2002. Cambridge University Press, 105–118.
- Shtull-Trauring, A. 2012. What happens if you pour a cup of tea into a black hole? Jacob Bekensteinin haastattelu *Haaretz*-lehdessä 28.11.
- Wheeler, J. A. 1998. *Geons, black holes and quantum foam. A life in physics*. W.W. Norton & Co. New York.

Kirjoittaja on matematiikan dosentti Helsingin ja Jyväskylän yliopistoissa, tietehistorian dosentti Oulun yliopistossa ja sivistyshistorian dosentti Lapin yliopistossa.