

RAIMO KESKINEN – HEIKKI OJA

MUSTAA AUKKOA ETSIMÄSSÄ

TÄHTITIEEELLINEN YHDISTYS URSA

MUSTAA
AUKKOA
ETSIMÄSSÄ

Kannen valokuva Kari Kaila.

URSAN JULKAISUJA VIII

RAIMO KESKINEN – HEIKKI OJA

MUSTAA AUKKOA ETSIMÄSSÄ



Helsinki

Tähtitieteellinen Yhdistys Ursa ry

SISÄLTÖ

Lukijalle	7
Yleinen suhteellisuusteoria	9
Ekvivalenssiperiaatetta testataan	14
Yleisen suhteellisuusteorian kukoistuskausi	17
Einsteinin teorian ilmiöt aurinkokunnassa	20
Punasiirtymä	21
Kellot maapallon ympäri	24
Merkuriuksen perihelin liike	27
Valon taipuminen Auringon lähellä	30
Tutkasäteen viivästyminen	33
Gravitaatioaalto	36
Weberin sylinteri	36
Gravitaatioaaltojen lähteet	39
Gravitaatioantennit	42
Onko gravitaatioaaltoja havaittu	47
Gravitaatioastronomia	50
Näkymättömät tähdet	52
Valkoiset kääpiöt	53
Tähtien kehityskulkuja	54
Supernovat	56
Neutronitähdet ja pulsarit	61
Neutronitähden rakenne	66
Mustat aukot	70
Lisää yleistä suhteellisuusteoriaa	71
Schwarzschildin säde on mukana monessa ilmiössä	75
Matkat ajassa ja avaruudessa	77
Valokartio ja sen kaatuminen	80
Mustan aukon ominaisuudet turistikohteena	82
Pyörivän aukon pyörivä horisontti	87
Miten mustia aukkoja voisi muodostua ja miten niitä etsitään	96
Onko Linnunradan keskustassa musta aukko	108
Mustat miniaukot	111
Kiehuvat mustat aukot ja maailman rakenne	112
Mustan aukon perusominaisuudet	121
Kirjallisuutta	128
Sanastoa	129
Hakemisto	136
Tähtitieteellinen yhdistys URSA	138

Tätä kirjaa varten on saatu
Tiedonjulkistamisen neuvottelukunnan
apuraha

meder-offset espoo 1977

ISBN 951-9269-04-5

Lukijalle

Mustat aukot ovat tähtitieteen tämän hetken kuumiin aihe. Ne edustavat uudenlaisia avaruuden kappaleita, joiden olemassaoloon ei kymmenisen vuotta sitten juuri kukaan uskonut. Nyt niitä kuitenkin pidetään aivan asiallisina tutkimuskohteina, ja "tavallisten" tähdessä muodostuneiden mustien aukkojen ohella puhutaan jo "supermassiivisista" tuhansien tai miljoonien tähtien mustista aukoista sekä pienten alkeishiukkasten kokoisista "miniaukoista". Mustien aukkojen tutkimus on myös tuomassa koko fysiikkaan uudenlaisia periaatteita ja näkökulmia.

Pari vuotta sitten ilmestynyt John Taylorin kohukirja Mustat aukot (Weilin + Göös 1975) käsitteli aihetta sen verran lennokkaasti, että Tähtitieteellisen yhdistyksen Ursan piirissä syntyi toive asiallisen kirjan julkaisemisesta samasta aiheesta. Ehkäpä käsillä oleva kirjanen edes pieneltä osalta tyydyttää tähtitieteen ystävien toiveita. Emme ole tässä kirjassa rajoittuneet vain mustiin aukkoihin, vaan alkuosassa kerromme lukijoille myös yleisen suhteellisuusteorian uusimmista koikeista sekä gravitaatioaalloista ja tähtien kehityksestä.

Luvut 1–4 ovat HO:n ja luku 5 RK:n kirjoittamia. Olemme kuitenkin käyneet läpi myös toistemme osuudet ja tehneet niihin pieniä lisäyksiä.

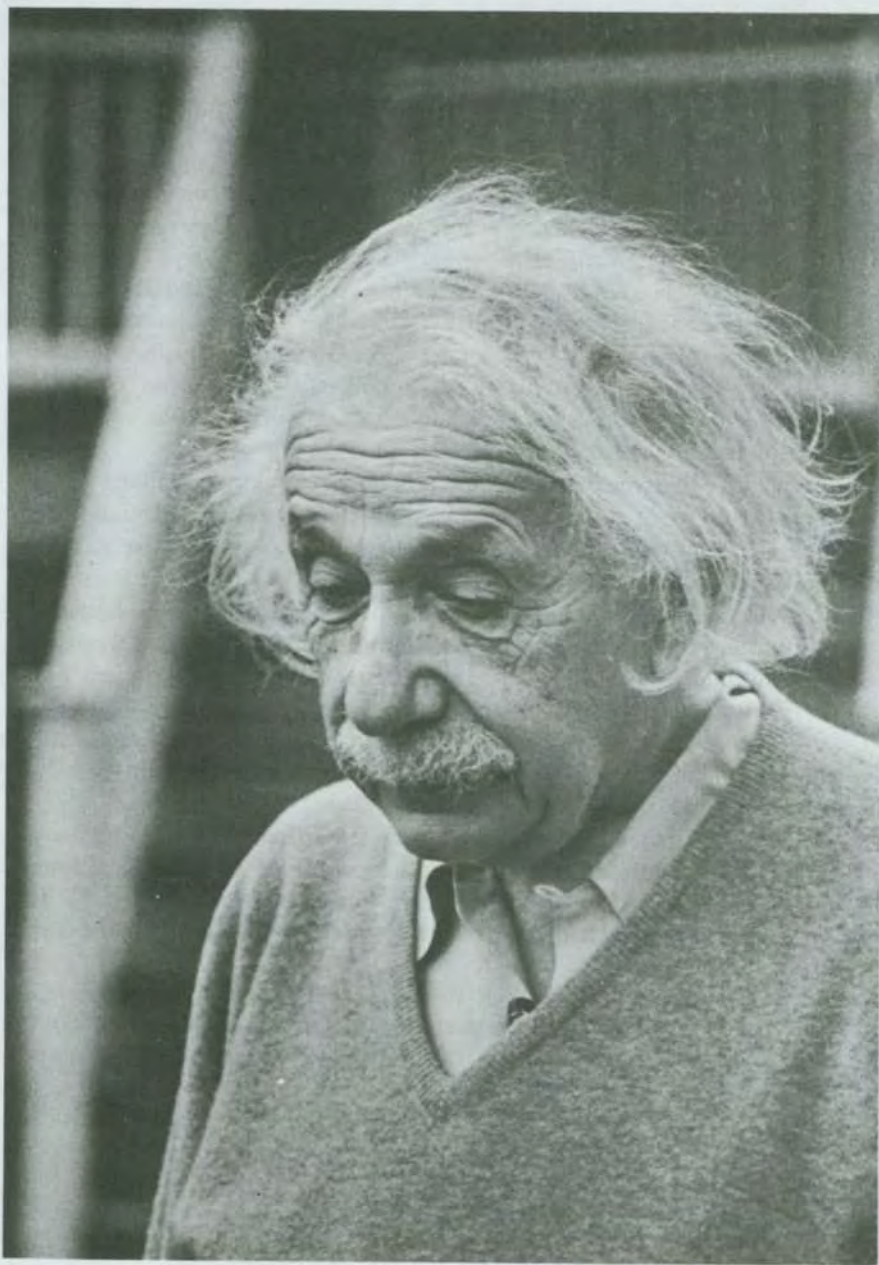
Tekijät haluavat kiittää monia työtovereitaan ja muita henkilöitä, jotka olivat apuna kirjan valmistumisessa. Erityisesti haluamme mainita hum.kand. Leena Keskinen, LuK Seppo Linnaluodon, FT Tapio Markkasen, tekn.yo Leena Määttäsen ja dos Osmi Vilhun asiantuntevat neuvot.

Lausumme kiitokset myös Tiedonjulkistamisen neuvottelukunnalle, jonka myöntämä apuraha osaltaan auttoi kirjan valmistumista.

Helsingissä elokuussa 1977

Raimo Keskinen

Heikki Oja



Albert Einstein. (Kuva Suomen Kuvapalvelu).

YLEINEN SUHTEELLISUUSTEORIA

Tämän vuosisadan-tunnetuin tiedemies **Albert Einstein** (1879–1955) julkaisi 1905 **suppeamman eli erikoisen suhteellisuusteoria**nsa, joka yhdellä iskulla selvitti monia mekaniikan ja sähkömagnetismin arvoituksia. Suppeampi suhteellisuusteoria käsittelee tasaista liikettä ja ennustaa mm. suurilla, valon vakioarvoa lähenevillä nopeuksilla uudenlaisia ilmiöitä. Nämä ilmiöt, mm. massan kasvaminen ja ajan hidastuminen, sekä aineen ja energian yhtäpitävyys ovat kaikki saaneet moninkertaisen kokeellisen vahvistuksen.

Einstein kuitenkin ymmärsi ettei suppeampi suhteellisuusteoria ole aina pätevä: kiihtyvässä liikkeessä tapahtuu ilmiöitä, jotka jäävät sen ulkopuolelle. **Yleisen suhteellisuusteorian** periaatteita voidaan kuvailla Einsteinin tunnetulla hissiajutuksella: vapaaseen avaruuteen si-joitetaan suljettu hissi ja sen sisään matkustaja, vaikkapa itse herra E. Hissi pannaan kiihtyvään liikkeeseen ylöspäin niin että sen nopeus jokaisena sekuntina lisääntyy 9,8 m/s. Herra E seisoo hissillä pohjalla eikä tiedä mikä voima häntä pitää paikoillaan. Hän tulkitsee sen painovoimaksi.

Herra E päästää kädessään olevan pallon putoamaan. Se iskeytyy lattiaan ja E arvelee, että painovoima veti sen alas. Me ulkopuolella seisovat näemme kuitenkin ”todellisen” tilanteen: pallo jatkaa irti-päästämisen jälkeen kulkuaan tasaisella nopeudella, mutta hissillä nousee kiihtyvällä nopeudella ja iskee palloon.

Herra E tekee kokeita erilaisilla ja eri aineista valmistetuilla palloilla ja saa yllättävän tuloksen, että ne putoavat täsmälleen yhtä nopeasti. Hän raapii vähän päätään ja tuijottaa mietiskellen palloja. Newtonin mekaniikan taitajana hän tietää, että pallo jonkin voiman F vallitessa saa kiihtyvyyden a jonka voi laskea kaavasta

$$F = m_1 a.$$

Tässä olevaa massaa m_1 voidaan nimittää vaikkapa **hitaaksi massaksi** (inertiamassaksi), koska se kuvaa kappaleen hitautta tai vastustusta liikkeen muutosta kohtaan. Toisaalta herra E on oppinut, että New-

tonin mukaan painovoima on verrannollinen kappaleen massaan. Sanotaan tätä painovoimalaissa

$$F = -G \frac{m_g M}{r^2}$$

olevaa massaa m_g vaikkapa **painavaksi massaksi** (gravitaatiomassaksi). (Kaavassa F tarkoittaa voimaa, G on painovoimavakio, M on keskuskappaleen massa ja r kappaleiden välinen etäisyys). Koska nyt kaikki kappaleet putoavat samalla nopeudella, täytyy hitaan massan olla suoraan verrannollinen painavaan massaan. Jos verrannollisuuskerroin valitaan ykköseksi, herra E:n kokeet osoittavat, että

$$m_i = m_g$$

eli hidas massa on yhtä suuri kuin painava massa.

Tämä saa E:n ihmettelemään. Painovoimalaki on siis sellainen, että mitä suurempi kappaleen vastustus liiketilan muutosta kohtaan on, sitä enemmän painovoima sitä vetää, ja itse asiassa tämä lisääntynyt veto on täsmälleen tarpeeksi suuri voittaakseen lisääntyneen vastustuksen ja aiheuttaakseen saman kiihtyvyyden kaikille kappaleille.

Me ulkopuolella olijat näemme kuitenkin "todellisen" tilanteen ja hymyilemme E:lle, joka monimutkaisin kokein todistelee itsestään selvää asiaa. Me tiedämme, että kaikki kappaleet tietysti kohtaavat lattian yhtä nopeasti, koska tämä kohtaaminen johtuu lattian kiihtyvistä liikkeistä ylöspäin.

Herra E tekee muitakin kokeita. Hän lähettää valonsäteen vaakasuoraan hissien poikki. Tarkoilla kokeilla hän ihmeekseen huomaa, että se ei kulje täsmälleen suoraan vaan kaartuu vähän alaspäin. Hän pääättelee, että painovoima vetää myös valoa puoleensa ja saa sen radan kaartumaan. Hän lähettää valonsäteen hissien pohjalta kattoon ja havaitsee aallonpituuden vähän muuttuvan. Hän pääättelee, että tämä on taas painovoiman aiheuttamaa. Me ulkopuolella olijat selitämme ilmiöt kuitenkin yksinkertaisesti hissien kiihtyvällä liikkeellä (ja valon äärellisellä nopeudella).

Edelläolevat ajatukset sisältävät ns. **ekvivalenssiperiaatteen**, jonka mukaan on samanarvoista (ekvivalenttia) kumman havaitsijan kannalta tilannetta tarkastelee; molempien täytyy kuitenkin antaa samat ilmiöt. Tämä ilmaistaan usein "heikkona" ekvivalenssiperiaatteena:

hidas massa = painava massa,

ja "vahvana" ekvivalenssiperiaatteena:

Kokeellisesti ei ole mahdollista havaita eroa painovoimakentän ja tasaisesti kiihtyvän liikkeen välillä.

Jälkimmäinen periaate pitää paikkansa vain pienille alueille. Esim. Maan pinnalla kaukana toisistaan olevissa kohdissa painovoiman vaikutus on eri suuntainen (kummassakin kohti maapallon keskipistettä), ja tämä aiheuttaa erilaisia ilmiöitä kuin pienessä kiihtyvässä hississä.

Ei olla varmoja onko oikein erottaa toisistaan "heikko" ekvivalenssiperiaate, joka koskee vain massoja, ja "vahva", joka koskee kaikkia fysiikan lakeja. Monet tutkijat ovat sitä mieltä, että jokainen teoria joka sisältää heikon periaatteen sisältää myös vahvan.

Einsteinin yleinen suhteellisuusteoria sisältää joka tapauksessa sekä heikon että vahvan periaatteen. Sen mukaan eri kappaleet putoavat ilman muuta samalla nopeudella ja sen mukaan kaikki fysiikan lait pätevät myös kiihtyvässä liikkeessä oleville havaitsijoille.

Einsteinin teoria antaa hitaan massan ja painavan massan yhtäsuuruuden aivan yhtä luonnollisesti kuin äskeisessä hissikokeessa ulkopuolinen tarkkailija: painovoima ei ole mikään voima vaan liikkeet ovat heijastuksia **aika-avaruuden** muodosta, sen kaarevuudesta. Kaikki kappaleet, joihin ei vaikuta ulkopuolisia voimia, liikkuvat aika-avaruudessa pitkin lyhimpiä reittejä, ns. **geodeettisia viivoja** (kts. kuva s. 12).

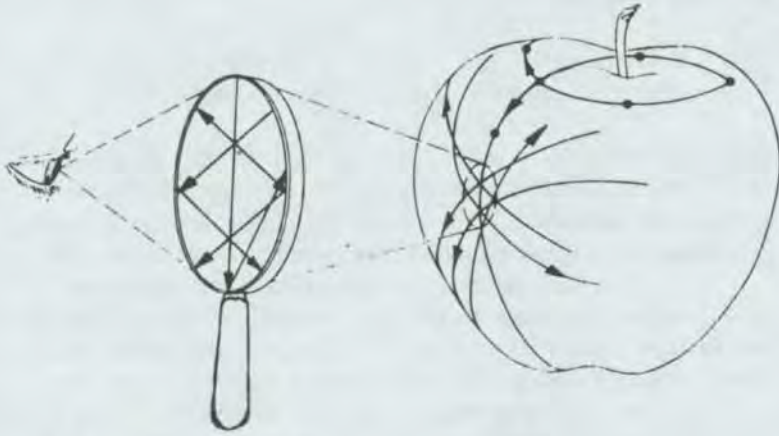
Mikä on aika-avaruus? Tämä käsite on tuttu jo suppeammasta suhteellisuusteoriasta, jossa aika otettiin neljänneksi ulottuvuudeksi kolmen avaruussuunnan lisäksi. Suppeamman suhteellisuusteorian ns. **Minkowskin** aika-avaruudessa kahden tapahtuman välimatkalla ds on lauseke

$$ds^2 = c^2 dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2,$$

missä c on valon nopeus, dt aikaväli ja dx , dy , dz etäisyysvälit kolmessa suunnassa. Neliulotteista avaruutta, jossa välimatkalla on näin yksinkertainen lauseke, sanotaan **laakeaksi**. Sen kaksiulotteinen vastine on taso, jolla ei siis ole minkäänlaista kaarevuutta.

Koska neliulotteisten avaruuksien ja niissä olevien kappaleiden kuvittelu on ihmiselle mahdotonta, käytetään vertailukohtana usein kaksiulotteisia malleja, koska tilanne niissä on oleellisesti sama.

Suppeamman suhteellisuusteorian aika-avaruus on siis laakea. Mutta kun Einstein tutki yleisen suhteellisuusteoriaansa geometriaa, hän huomasi, että neliulotteinen avaruus täytyy olettaa **kaarevaksi**.

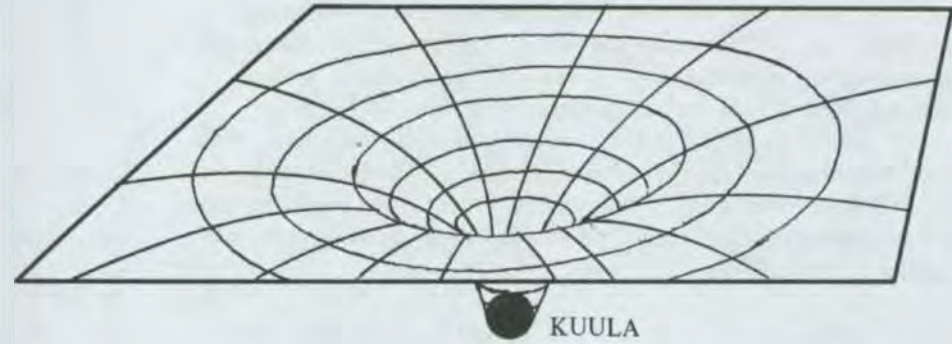


Hauskana esimerkkinä geodeettisista viivoista Misner, Thorne ja Wheeler esittävät Gravitation-kirjassaan muurahaisten polut omenan kuorella. Pienellä alueella, jota silmä tarkkailee suurennuslasin läpi, polut ovat suorita. Laajemmassa mittakaavassa omenan pinnan kaarevuus tulee näkyviin. Muurahaisten polut eivät suinkaan enää näytä suorilta, mutta ne ovat kuitenkin lyhimpiä reittejä paikasta toiseen, geodeettisia viivoja.

Kaikkien massapisteiden lähellä aika-avaruus on kaartunut, ja kaarevuus on sitä suurempi mitä suurempi massa on. Kaksiulotteisessa avaruudessa havainnollinen vastine on pingotettu kumikalvo. Jos sen päällä ei ole kappaleita, se on suora taso, siis "laakea". Mutta kun kalvolle pannaan vaikkapa metallikuula, kalvo taipuu kuulan painosta. Se on sitä enemmän kuopalla (eli kaareva), mitä painavampi kuula on.

Katsotaanpa miten käy pienten pyöreiden herneiden joita pannaan vierimään tasolle kuulan lähelle. Jos ne heitetään sopivalla nopeudella liikkumaan pitkin kuopan reunaa, ne kiertävät siinä samalla korkeudella ellei kitka saa niitä hiljakseen vajoamaan syvemmälle. (Aurinkoa kiertävillä radoillakin väliaineen vastus saa hiukkaset hidastumaan spiraalimaiselle radalle). Jos taas herne heitetään tason reunalta suurella nopeudella niin, että se ohittaa kuulan, sen rata kuopan reunalla taipuu vähän niin, että ylhäältä päin katsottuna rata ei ole suora.

Sekä kuopan reunalla kiertävä ympyrä että ohikiitäessä taipuva rata ovat kuitenkin eräissä mielessä luonnollisimpia, suorimpia ratoja. Ne ovat ns. geodeettisia viivoja eli lyhimpiä reittejä paikasta



Kumikalvolle asetettu metallikuula saa kalvon taipumaan kuopalle. Samalla tavalla tähti tai muu massapiste saa ympäröivän neliulotteisen avaruuden kaareutumaan.

toiseen.

Yleistetään nyt äskeinen mielikuva neliulotteiseen avaruuteen. Massiivinen kappale aiheuttaa avaruuden kaareutumisen ympärillään. Tässä kaarevassa aika-avaruudessa kappaleet liikkuvat pitkin geodeettisia viivoja (lyhimpiä reittejä) ellei niihin vaikuta mikään voima.

Kappaleiden liike on geodeettista kuitenkin vain juuri neliulotteisessa aika-avaruudessa. Me havaitsemme nämä liikkeet kaarevina ja vaihtelevanopeuksisina.

Näin Einstein syrjäytti painovoiman "voima"-selityksen ja otti tilalle ajatuksen, että massojen liikkeet johtuvat vain aika-avaruuden kaareutumisesta. Hitaan massan ja painavan massan yhtäsuuruus on itsestään selvää, koska kaikki kappaleet massasta ja koostumuksesta riippumatta liikkuvat pitkin samoja luonnollisia ratoja.

Einsteinin ajatus tuntuu hyvin luonnolliselta myös verrattaessa kahta liiketilaa: tyhjässä avaruudessa tasaisella suoraviivaisella liikkeellä etenevää avaruusaluusta ja Maata kiertävää alusta. Kumpikin on yleisen suhteellisuusteorian mukaan luonnollisimmalla radallaan, vapaassa putoamisliikkeessä pitkin geodeettista viivaa, ja siksi niissä pitäisi havaita samat ilmiöt. Ja näinhän onkin: avaruuslentäjä kelluu molemmissa aluksissa painottomana aluksessaan, vaikka Maata kiertävällä radalla on lähellä suuri painovoiman aiheuttaja, maapallo.

Edellä on esitetty yleisen suhteellisuusteorian periaatteet. Ne ovat loppujen lopuksi hyvin yksinkertaiset, mutta toista on se mate-

matiikka, jota näiden ajatusten tarkempaan erittelyyn ja soveltamiseen tarvitaan. Neliulotteisen kaarevan avaruuden geometria, ns. **Riemannin geometria**, on monimutkaista ja vaatii pitkälle meneviä apukeinoja, kuten differentiaaligeometriaa ja tensorilaskentaa.

Kerrataan vielä ”yleinen suhteellisuusteoria pähkinänkuoressa”. Amerikkalaiset tutkijat **Misner, Thorne ja Wheeler** esittävät sen suhteellisuusteorian tämänhetkisessä raamatussa, parin tiiliskiven suuruudessa kirjassaan **Gravitation** (jota myös kansiansa värin vuoksi mustaksi aukoksi kutsutaan), seuraavasti:

Aine vaikuttaa avaruuteen ja sanoo sille, miten pitää kaareutua. Avaruus vaikuttaa puolestaan aineeseen ja sanoo sille, miten pitää liikkua.

Siinä on Einsteinin teoria kahdessa lauseessa!

Ekvivalenssiperiaatetta testataan

Koska ekvivalenssipariaate, nimenomaan hitaan massan ja painavan massan yhtäsuuruus, on yleisen suhteellisuusteorian perusta, on sen kokeellinen varmistaminen erittäin tärkeää. Galileihan sitä jo kokeili 1600-luvulla laskemalla eripainoisia kuulia pyörimään kaltevalta tasolla ja mittaamalla niiden kiihtyvyyksiä. Newton käytti kokeeseen heiluria, jossa oli eripainoisia palloja varren päässä. Molemmat totesivat senaikaisella tarkkuudella, että painovoima vaikuttaa samalla tavalla kaikkiin massoihin. Tarkkuus ei kuitenkaan ollut kovin hyvä, ehkä yhden promillen luokkaa.

Huima hyppäys tarkkuudessa saavutettiin 1889, kun unkarilainen paroni Lorand von **Eötvös** suunnitteli ja toteutti mittauksen aivan uudella periaatteella. Hän asetti 40 cm pitkän vaakasuoran tangon päihin riippumaan puusta ja platinasta tehdyt painot, ja tanko ripustettiin keskikohdaltaan ohueen lankaan niin, että se oli tasapainossa. Nyt painoihin vaikutti maapallon vetovoima, joka on verrannollinen painavaan massaan, ja maapallon pyörimisestä johtuva keskipakovoima, jonka suuruus taas riippuu hitaasta massasta. Jos näissä massoissa on jotain eroa, tanko pyrkii kiertymään langan ympäri. Jos taas painava massa on täsmälleen yhtä suuri kuin hidas massa, ei kiertymää esiinny.

Eötvös-koe on ns. nollakoe, jollaiset ovat fysiikassa tavattoman tarkkoja. Niinpä Eötvös pystyi päättelemään, että koska kierty-



Eötvös-Dicken-Braginskin kokeen periaate. Tangon päihin on asetettu massaltaan yhtä suuri paino kultaa ja alumiinia. Tanko on keskikohdaltaan ripustettu ohuen langan varaan. Jos aurinko vetää molempia painoja yhtä suurella voimalla, tanko ei käännä. Jos kuitenkin kultaan kohdistuu suurempi vetovoima, tanko pyrkii kiertymään langan varassa. – Todellinen koejärjestely oli huomattavasti mutkikkaampi erilaisten virhemahdollisuuksien poistamiseksi. Tulokseksi kokeista saatiin, että eri aineisiin kohdistuu 10^{-12} tarkkuudella sama vetovoima, ts. vapaasti päästettyinä kaikki kappaleet putoavat yhtä nopeasti.

mää ei hänen kokeessaan havaittu, massat ovat 10^{-9} tarkkuudella samat. Tämä merkitsee, että painovoimakentässä erilaiset kappaleet putoavat nopeuksilla, jotka eroavat korkeintaan yhden miljardiosan toisistaan.

Eötvös-koe tehtiin Yhdysvalloissa uudelleen 1960-luvulla, mutta nyt verrattiin Auringon vetovoimaa ja maapallon vuotuisesta kiertoliikkeestä johtuvaa keskipakovoimaa. Uudenaikaisella tekniikalla **Dicke** sai tarkkuuden nousemaan arvoon 10^{-11} . Vielä kerran koe on toistettu Neuvostoliitossa 1970-luvun alussa, jolloin **Braginski** totesi hitaan massan ja painavan massan samaksi tarkkuudella 10^{-12} , siis jo tuhat kertaa paremmin kuin Eötvös.

Eötvös-Dicken-Braginskin koe on yksi fysiikan tarkimmista kokeista, mutta se myös mittaa yhtä fysiikan tärkeimmistä periaatteista. Sen tuloksena on osoitettu painovoiman vaikuttavan eri kappaleisiin hyvin täsmälleen samalla tavalla.

Edellä on käsitelty vain heikkoa ekvivalenssiperiaatetta, painavan massan ja hitaan massan yhtäsuuruutta. Tätä periaatetta on sanottu myös ”vapaan putoamisen ainutlaatuisuuden” periaatteeksi,

koska sen mukaan testikappaleet putoavat samalla nopeudella riippumatta koostumuksesta ja rakenteesta. Testikappaleet ovat kuitenkin kaikissa kokeissa olleet hyvin pieniä niin, että niiden oma gravitaatiovaikutus voidaan jättää laskuista pois.

Miten käy jos tutkitaan hyvin massiivista kappaletta, joka aiheuttaa avaruuden huomattavan kaareutumisen ympärillään? Liikkuuko tällainenkin kappale pitkin geodeettista viivaa ulkopuolisten massojen kaartamassa avaruudessa vai vaikuttaako sen itsensä aiheuttama kaarevuus myös liikkeeseen? Tässä otetaan jo askel kohti ”vahvempaa” ekvivalenssiperiaatetta. Yleisen suhteellisuusteorian mukaan kappaleen oma massa ei vaikuta liikkeeseen, vaan se kulkee geodeettisesti kuten pieni testikappale. Useimpien muiden painovoimateorioiden kohdalla tilanne on kuitenkin toinen. Vaikka ne ennustavat heikon ekvivalenssiperiaatteen samalla tavoin kuin Einsteinin teoria, ne tästä poikkeavasti ennustavat suurimassaisten kappaleiden liikkeeseen häiriöitä kappalten oman massan takia.

Näitä kappaleen oman massan aiheuttamia häiriöitä kutsutaan Nordtvedtin ilmiöksi amerikkalaisen tutkijan mukaan, joka ensimmäisenä laski niiden olemassaolon 1968. Voimakkaimmin Nordtvedtin ilmiö tulee esille Maa-Kuu-systeemissä. Jos Maan ja Kuun oma painovoima vaikuttaa niiden liikkeeseen, niiden välimatkassa tapahtuu vajaan metrin suuruisia säännöllisiä heilahduksia.

Alle metrin pituisen eron huomaaminen Maan ja Kuun välisessä liikkeessä olisi vielä kymmenen vuotta sitten ollut täysin mahdotonta. Avaruustekniikka on kuitenkin tullut tässäkin avuksi. Yhdysvaltain Apollo-lennoilla vietiin Kuun pinnalle kolme laserheijastinta, ja Neuvostoliiton Lunohodeissa niitä on vielä kaksi lisää. Nyt Maasta lähetetään kohti heijastinta ohut lasersädekimppu, josta osa palaa heijastuksen jälkeen takaisin Maahan. Matkaan kulutettu aika voidaan mitata, ja kun valon nopeus tunnetaan, saadaan Maan ja Kuun tarkka etäisyys selville.

Laserkokeita on suoritettu nyt säännöllisesti viittisen vuotta. Kun tulokset on yhdistetty, etäisyysmittauksen tarkkuus on saatu jo pariinkymmeneen senttiin. Lähivuosina tarkkuus vielä parantuu niin, että Maan ja Kuun väli, keskimäärin 384000 kilometrin matka, tunnetaan pian parin sentin tarkkuudella!

Tähän mennessä tehdyt kokeet ovat jo kuitenkin ratkaisseet Nordtvedtin ilmiön kohtalon. Vuonna 1976 kaksi toisistaan riippumatonta tutkijaryhmää julkaisi laskujensa tulokset, ja tuomio oli sama: Nordtvedtin ilmiötä ei ole olemassa.

Tämä koetulos oli jälleen merkittävä voitto Einsteinin yleiselle

suhteellisuusteorialle ja toisaalta masentava isku useimmille muille painovoimateorioille. Kun aurinkokunnassamme tehdyt muutkin kokeet, joista kerrotaan luvussa 2, näyttävät nekin tukevan juuri Einsteinin teoriaa, voidaan todeta yleisen suhteellisuusteorian elävän tällä hetkellä, 60-vuotiaana, kukoistavana ja täysissä voimissaan.

Yleisen suhteellisuusteorian kukoistuskausi

Einsteinin teoria ei enää ole se ”teoreetikon paratiisi, kokeilijan helvetti”, joksi sitä yhteen aikaan kutsuttiin. Yleisellä suhteellisuusteorialla ei aluksi näyttänyt olevan juuri mitään kosketuskohtia todelliseen maailmaan. Se ennusti vain kolme juuri ja juuri havaittavaa poikkeamaa Newtonin laeista aurinkokunnassamme: Merkuriuksen perihelin kiertymisen, valon taipumisen auringon lähellä ja valon punasiirtymän. Muuten se oli vain uuteen geometriseen oivallukseen perustuva nerokas matemaattinen rakennelma.

Tilanne on nykyään kokonaan muuttunut niin, että sekä teoreetikot että havaitsijat voivat iloita yleisen suhteellisuusteorian rikkaudesta. Jo aurinkokuntamme piirissä ovat koemahdollisuudet suuresti lisääntyneet, kuten seuraavassa luvussa näemme. Mutta suunnattomasti paljon suurempia ilmiöitä tapahtuu kauempana. Jo neutronitähdissä, joista osa nähdään pulsareina, on aine niin tiheää (10 000 tonnia kuutiomillimetrissä!) että klassisen fysiikan sijasta täytyy käyttää suhteellisuusteoriaa, jotta ilmiöitä voidaan oikein käsitellä. Neutronitähtiä paljon suurimassaisemmat kappaleet eivät kehityksensä eräessä vaiheessa pysy enää koossa, vaan valtavan painovoimansa takia ne luhistuvat sisäänpäin. Tätä luhistumista ei Newtonin teoria tunne; vain yleinen suhteellisuusteoria kertoo mitä tapahtuu. Luhistuminen ei pysähdy neutronitähden tiheyteen, vaan jatkuu vastustamattomasti. Lopulta avaruuden kaareutuminen tähden ympärillä on niin suuri, että edes valon säteily ei pääse tähdestä ulos. Tähti on romahtanut mustaksi aukoksi.

Kaksiulotteisessa mallissamme tätä neliulotteisen aika-avaruuden mustaa aukkoa vastaa tilanne, jossa tavattoman painava kuula venyttää kalvon yhä syvemmälle kuopalle niin, että lopulta kalvossa on vain äärettömän syväle ulottuva reikä josta ei mikään pääse ylös.

Yleinen suhteellisuusteoria ennustaa myös uusia ilmiöitä tyhjässä avaruudessa. Aika-avaruuden kaareutumisen muutokset voivat kuljettaa mukanaan energiaa, gravitaatioaaltoja. Viime vuosina maapallolla on rakennettu useita havaintolaitteita, joilla yritetään

tavoittaa tätä äärimmäisen heikkoa painovoimasäteilyä. Gravitaatio-aallot merkitsevät jälleen uuden ikkunan avautumista maailmankaikkeuteen, ikkunan josta mahdollisesti voidaan tulevaisuudessa havaita ennennäkemättömiä taivaan ilmiöitä.

Einsteinin teorian suurin sovellutus on kuitenkin itse **maailmankaikkeus**. Yleinen suhteellisuusteoria on pohjana lähes kaikissa tämänhetkissä kosmologisissa malleissa. Teoria ennusti maailmankaikkeuden laajenemisen jo ennen kuin se havaittiin. Tällä hetkellä Einsteinin teoria antaa aihetta otaksua, että aineen tiheys maailmankaikkeudessa on suurempi kuin toistaiseksi havaitaan. Löydetäänkö "puuttuvaa massaa" galaksien välistä tai ytimistä tai kaikkialta luke-mattomina mustina aukkoina?

Yleinen suhteellisuusteoria myös kertoo mitä tapahtui heti maailmankaikkeuden synnyn, suuren alkuräjähdyksen jälkeen. Teoria ennusti räjähdyksestä jääneen säteilyn edelleen risteilevän avaruudessa, kuten viime vuosikymmenellä havaittiin. Ja Einsteinin teoriaa varmasti tarvitaan **kvasaarien** selittämiseen, näiden suunnattoman kaukaisten ja voimakkaiden säteilijöiden, jotka tuovat viestejä ajalta, jolloin maailmankaikkeus oli vielä nuori.

Kuten kaikesta nähdään, yleinen suhteellisuusteoria elää voimakasta kukoistuskautta ja tarjoaa havaitsijoille yhä uusia tutkimuskohteita. Toisaalta myös itse teorian perusteita ja matemaattisia apuneuvoja tutkitaan yhä enemmän siinä toivossa, että ne antaisivat vielä lisää vihjeitä tähtitaivaan ja maailmankaikkeuden arvoitusten ratkaisemiseksi.

Onko yleinen suhteellisuusteoria "lopullinen", kaiken sanova painovoimateoria? Varmastikaan ei. Tieteen historiassa kehitys on tuonut aina esille tarpeen uudesta täsmällisemmästä teoriasta. Yleistä suhteellisuusteoriaa on arvosteltu nimenomaan siksi, että sillä ei näytä olevan suoraa yhteyksiä fysiikan muihin osiin, esim. kvanttimekaniikkaan. Näitä yhteyksiä on yritetty eri tavoin kehitellä, mutta viime vuosiin asti menestys on ollut heikko. Tunnettu suomalainen painovoimatutkija, prof. **Paul Kustaanheimo**, sanoo vastikään ilmestyneessä artikkelissaan näin:

"Nykyfysiikan kolme osaa: kaksi suhteellisuusteoriaa ja kvanttifysiikka, ovat olemassa, ne toimivat, ne on todennettu yhä laajemmissa ilmiöpiireissä. Mutta ne eivät sovi tietoteoreettisesti tyydyttävällä tavalla yhteen. Jostain on fysiikkaan tultava jälleen kokonaan uusi, suhteellisuusteorioihin ja kvanttiteoriaan verrattava ajatus.

Einsteinin teorioiden suunnaton ansio on siinä, että ne ovat ennustaneet suuren joukon aikaisemmin aavistamattomia ilmiöitä ja

ennustaneet ne kaikki oikein. Tästä ei kuitenkaan seuraa, että Einsteinin teorian olisi siis kokeellisesti todennettu oikeiksi, vaan ai-noastaan, että tulevan hedelmällisemmän teorian on annettava kaikille näille ennusteille suunnilleen samat arvot kuin Einstein."

EINSTEININ TEORIAN ILMIÖT AURINKOKUNNASSA

Einsteinin yleinen suhteellisuusteoria ei ole ainoa teoria, joka kuvaa painovoiman ilmiöitä, vaan monenlaisia muitakin teorioita on kehitetty. Tällä alalla Suomessa on perinteitä, sillä 1910-luvulla teknillisen korkeakoulun professorina myöhemmin toiminut Gunnar Nordström esitti painovoimateorioita, joita mm. Einstein suuresti arvosti niiden kauneuden takia. 60-luvulla on professori Paul Kustaanheimo rakentanut useita erilaisia gravitaatioteorioita. Ulkomaisista ovat mm. amerikkalaiset tutkijat kunnostautuneet tällä alalla, ja eniten ääntä on viime vuosina pidetty ns. Brans-Dicken teoriasta.

Ainoa mahdollisuus "oikean" painovoimateorian löytämiseksi on tietysti verrata teorioiden ennustuksia havaintoihin. Einsteinin teoria saavutti tässä suhteessa heti julkaisemisensa (1916) jälkeen suurta menestystä, mikä oli ratkaiseva tekijä sen nopeassa tunnetuksi-tulossa 1920-luvulla.

Einstein laski, että Merkuriuksen radan perihelin (Aurinkoa lähinnä olevan pisteen) tulisi kiertyä vuosisadassa 43 kaarisekuntia eteenpäin. Ja todellakin, jo 1800-luvun lopulla olivat tähtitieteilijät olleet ihmeissään, kun Merkuriuksen periheli oli liukunut väärään paikkaan juuri 43" vuosisadassa.

Einstein laski, että tähdistä tuleva valo kaartuu Auringon reunan lähellä niin, että tähdet näyttäivät olevan noin 1,75 kaarisekuntia väärässä paikassa. Vuosina 1919 ja 1922 nähtyjen täydellisten auriongonpimennysten aikana etsittiin tätä ilmiötä. Ja jälleen se löydettiin: tähdet Auringon lähellä olivat poikenneet paikoistaan pieniä määriä, arviolta 1,4 . . . 2,2 kaarisekuntia. Mittaukset olivat hyvin vaikeita tehdä, mutta Einsteinin arvo näytti sopivan havaintoihin.

Kolmanneksi Einstein ennusti, että Auringon tai jonkin muun tähden pinnalta lähtevät valohiukkaset, fotonit, menettäisivät vähän energiaansa noustessaan ylös voimakkaasta vetovoimakentästä ja niiden aallonpituus näyttäisi siirtyvän punaiseen päin. Tämän ilmiön havaitseminen on vielä paljon vaikeampaa kuin edellisen, ja siksi siinä onnistuttiin vasta 20-luvun lopulla. Saadut melko epämääräiset tulokset näyttivät kuitenkin tukevan Einsteinin teoriaa.

Edellä mainitut kolme koetta ovat niinsanotut **suhteellisuusteorian klassiset testit**. Ne olivat 1960-luvulle saakka ainoat testit, joilla yleinen suhteellisuusteoria voitiin yhdistää havaintoihin. Viimeisen viidentoista vuoden aikana on kuitenkin suoritettu myös useita muita testejä. Punasiirtymä on voitu mitata laboratoriossa, valon taipumisen sijaan tutkitaan radioaaltojen taipumista ja kokonaan uutena ilmiönä on tutkittu ns. tutkasäteiden viivästymistä sen kulkiessa Auringon ohi.

Kaikki nämä kokeet on tehty aurinkokunnassamme. Einsteinin teoria ennustaa paljon suurempia poikkeuksia Newtonin laeista äärimmäisissä oloissa, esim. neutronitähdistä, tähtien luhistumisessa, supernovissa. Näitä **relativistisia** (suhteellisuusteoriaan liittyviä) ilmiöitä on kuitenkin erittäin vaikea tutkia, koska ne peittyvät niin monen erilaisen, suhteellisuusteoriasta riippumattoman ilmiön alle. Siksi muualla avaruudessa suhteellisuusteoria otetaan laskuihin mukaan yhtenä lisätekijänä, mutta varsinaisiin testeihin sitä ei voida toistaiseksi käyttää. Sitten kun ollaan varmoja yhdenkin mustan aukon tai gravitaatioaaltojen havaitsemisesta, tilanne toki tältä kohdalta muuttuu.

Mitä sitten viimeaikaiset kokeet ovat suhteellisuusteoriasta sanoneet? Käsittelemme kaikki testit alla tarkemmin, mutta jo tässä voidaan todeta, että "vanha maestro" Einstein näyttää hyvin pitävän pintansa. Mitä tarkempia tuloksia saadaan, sitä useampi kilpaileva teoria putoaa pois kuvasta annettuaan väriä ennustuksia. Tällä hetkellä (vuoden 1977 puolivälissä) usko yleiseen suhteellisuusteorian paremmuuteen kaikkiin muihin tähänastisiin teorioihin verrattuna on tiedemiesten keskuudessa yhä varmempaa ja luottavaisempaa.

Punasiirtymä

Valon punasiirtymä tarkoittaa sitä, että Auringon spektrissä näkyvät ohuet tummat viivat ovat hieman väärällä kohdalla; niiden aallonpituus on vähän lähempänä spektrin punaista päätä kuin samojen alkuaineiden viivat Maan päällä tehdyissä kokeissa.

Spektriviivojen punasiirtymä on Einsteinin kolmesta testistä "heikoin". Se testaa vain pientä osaa suhteellisuusteorian ekvivalenssiperiaatteesta, jonka mukaan painovoiman aiheuttamat ilmiöt ovat täsmälleen samanlaiset kuin kiihtyvässä liikkeessä olevassa hississä (tai raketissa) havaittavat ilmiöt.

Katsotaanpa mitä valohiukkaselle tapahtuu kiihtyvässä his-

sissä. Oletetaan, että alkuhetkellä hissi on paikoillaan. Lähetetään lattiasta foton liikkeelle kohti hissien kattoa ja pannaan samanaikaisesti hissi nousemaan ylöspäin tasaisella kiihtyvyydellä. Kun foton ehtii kattoon, katossa keikkuva havaintsija on jo saanut tietyn nopeuden ja dopplerilmiön takia näkee valohiuksasen taajuuden ja siis aallonpituuden hieman toisenlaisena kuin se lähtiessä oli. Valon aallonpituus on siirtynyt hitusen verran kohti spektrin punaista päätä.

Ekvivalenssiperiaatteen mukaan sama ilmiö täytyisi havaita myös painovoimakentässä: korkeammalle nousevan fotonin aallonpituus siirtyy punaiseen päin.

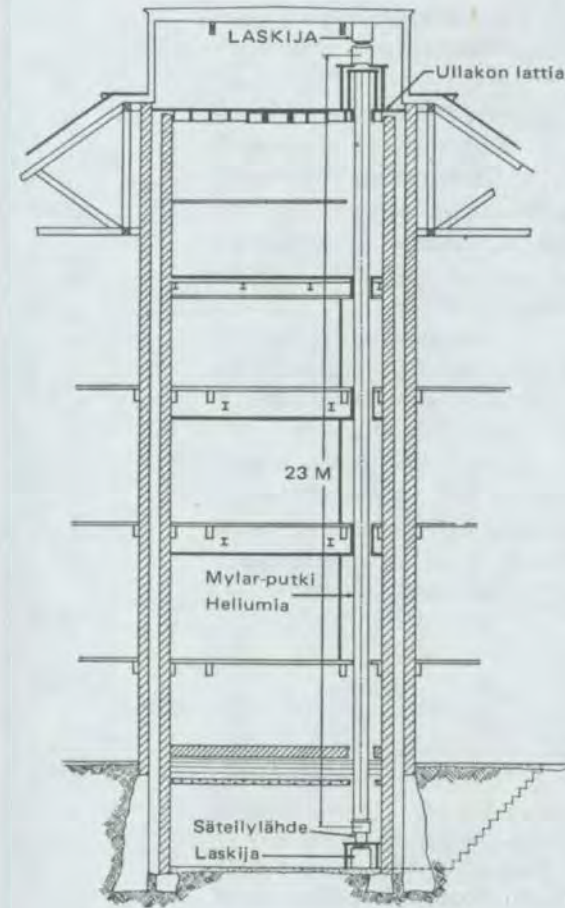
Punasiirtymä voidaan selittää myös energian säilymisellä: siirtyessään painovoimakentässä ylöspäin foton saa lisää potentiaalienergiaa eli kappaleen asemaan liittyvää energiaa. Koska sen kokonaisenergia ei voi muuttua, sen oman energian täytyy pienentyä. Tämä nähdään punasiirtymänä.

Lähes kaikki painovoimateoriat ennustavat punasiirtymälle saman arvon kuin Einstein. Poikkeuksiakin on. Eräät Kustaanheimon teoriat ennustavat, että jos fotonit lähetetään vinosti ylöspäin, niillä on tietyllä korkeuserolla erilainen punasiirtymä kuin kohtisuoraan ylöspäin lähetettäessä. Tällaista ilmiötä ei tarkoissa kokeissa ole koetettu testata. Kaikki kokeet on tähän mennessä tehty vain painovoimakentässä suoraan ylöspäin liikkuvilla fotoneilla. Näille fotoneille Kustaanheimokin antaa saman arvon kuin Einstein.

Ensimmäisiä havaintoja punasiirtymästä yritettiin tehdä **Auringosta** lähtevälle valolle. Yleinen suhteellisuusteoria ennustaa, että spektriviivojen punasiirtymän ($\Delta\lambda/\lambda$, kun λ on aallonpituus) pitäisi olla noin kaksi miljoonasosaa. Näin pieni ilmiö on kuitenkin piilossa monen suuremman tekijän alla. Jo atomien lämpöliike vastaa noin kolme kertaa näin suurta siirtymää. Lämpöliike pyrkii kuitenkin vain leventämään spektriviivaa, ei siirtämään sitä paikoiltaan, ja siksi tämä vaikeus voidaan voittaa. Hankalampia ovat Auringossa tapahtuvat kaasujen virtaukset, joiden vaikutuksesta spektriviivat havaitaan siirtyneinä milloin punaiseen, milloin siniseen päin. Tästä vaikeudesta päästään osittain eroon tutkimalla Auringon reunan läheltä lähtevää valoa, koska kaasuvirtaukset tapahtuvat yleensä pystysuoraan.

Mittauksia on tehty ahkerasti ja lopputulokseksi Auringosta lähtevien fotonien punasiirtymälle on saatu ehkä viiden prosentin tarkkuudella suhteellisuusteoriaa tukevia arvoja.

Punasiirtymä olisi paljon suurempi, kymmen- tai satakertainen, tiheissä valkoisissa kääpiötähdissä, joiden pinnalla vallitsee mahtava



Tarkimpia kokeita punasiirtymän mittaamiseksi on tehty laboratoriossa maan päällä. Kuvassa näkyy poikkeileikkaus Jefferson Physical Laboratoryn tornista, jossa 23 metrin korkeudessa putkessa tutkittiin gammasäteiden aallonpituuden muutosta. Kellarissa on säteilylähde ja ullakolla laskijalaite. Putki on täytetty heliumilla. (Kuva Pound ja Snider, Physical Review 140, B792).

painovoima. Havaintoja on yritetty tehdä mm. **Siriuksen B-tähdestä**, jonka tiedetään olevan valkoinen kääpiö. Se muodostaa itsensä Siriuksen kanssa paljon tutkitun kaksoistähdän. Punasiirtymän mittaamisessa on nyt suurimpana vaikeutena Sirius A:n voimakas valo, joka peittää lähes kokonaan pienemmän seuralaisen heikon heikun niin, että siitä on vaikea tehdä mitään havaintoja. 1960-luvulla Sirius A ja B olivat maasta katsottuna kauimpana toisistaan ja tällöin Mount Palomin 5-metrisellä kaukoputkella onnistuttiin tekemään kohtalaisia mittauksia. Niiden avulla saatiin määrättyksi entistä tarkemmin Sirius B:n säde (5400 km eli pienempi kuin maapallon), lämpötila

(32000 K) ja tiheys (3000 kg/cm^3). Näistä arvoista voidaan punasiirtymä ennustaa, ja havainnot sopivat ennustukseen noin 20 % tarkkuudella.

Kuten edellä nähtiin, sekä Auringossa että Sirkuksen seuralaisessa punasiirtymän havaintotarkkuus on aika heikko. Nytemmin on tarkempia punasiirtymäkokeita tehty laboratoriossa maan päällä. Niistä lähetetään gammakvantti (gammäsäteilyhiukkanen) 23-metrin tornin pohjalta huipulle ja mitataan matkalla tapahtunut siirtymä. Sen suuruus on vain 10^{-15} luokkaa eli miljardisosa Auringon pinnalla tapahtuvasta siirtymästä! Aikaisemmin nämä kokeet olisivat olleet mahdottomia, mutta ns. Mössbauerin ilmiön pohjalta kehitetty nerokas koetekniikka on tehnyt tarvittavan tarkkuuden mahdolliseksi.

Ensimmäisinä punasiirtymää mittaivat laboratoriossa amerikkalaiset Pound ja Rebka vuonna 1959. He saivat tulokseksi $(2,57 \pm 0,26) \cdot 10^{-15}$, kun ennustettu arvo on $2,46 \cdot 10^{-15}$. Viisi vuotta myöhemmin Pound ja Snider toistivat kokeen vielä paremmalla laitteistolla ja saivat täsmälleen yleisen suhteellisuusteorian ennustaman tuloksen. Virheraja oli alle yhden prosentin. Näin on suhteellisuusteorian punasiirtymä todettu kokeellisesti jo aika suurella tarkkuudella.

Kellot maapallon ympäri

Suhteellisuusteorian ennustama punasiirtymä ei koskea ainoastaan fotoneja ja muita mikromaailman ilmiöitä, vaan myös makroskooppisia värähtelyjä ja itse asiassa ajan kulumista. Tämä on tunnettu ns. kelloparadoksi tai kaksosten paradoksi, joka ei itse asiassa ole mikään paradoksi vaan aikaisemmista käsityksistä poikkeava, mutta kokeellisesti todistettu luonnonilmiö.

Kelloparadoksi käsittelee sekä suppeamman että yleisen suhteellisuusteorian ilmiöitä. Yleisen suhteellisuusteorian mukaan painovoimakentässä eri korkeuksilla olevat atomit värähtelevät hieman eri taajuuksilla. Tämä merkitsee, että atomikellot käyvät eri korkeuksilla vähän eri tahtiin: aika rientää heikossa painovoimakentässä jonkin verran nopeammin kuin voimakkaassa.

Kahta kelloa on kuitenkin mahdoton asettaa paikoilleen painovoimakenttään tämän ilmiön testaamiseksi, vaan kellot ovat aina liikkeessä joko maapallon mukana pyörien tai satelliitissa maapalloa kiertäen. Siksi laskuihin on otettava mukaan suppeamman suhteellisuusteorian ennustus, jonka mukaan liikkeessä olevassa kellossa aika käy aina hitaammin kuin paikallaan olevassa.

Kun eri suhteellisuusteorioiden ilmiöt yhdistetään, saadaan seuraavanlaisia ennustuksia. Lähetetäänpä vaikka identtistä kaksosta toinen pitkälle raketimatkalle, jonka kuluessa saavutetaan lähelle valon nopeuksia ulottuvia nopeuksia, ja jätetään toinen Maahan. Kun rakettiliikkeen palaa takaisin Maahan, hän on suhteellisuusteorian mukaan vanhentunut hitaammin kuin toinen veli. Aikaisempien identtisten kaksosten sijalla on nyt nuorempi veli ja vanhempi veli.

Halvempi ja käyttökelpoisempi keino kelloparadoksin tutki-

Atomikellot lähdössä lennolle maapallon ympäri lokakuussa 1971. Richard Keating (oikealla) Yhdysvaltain Naval Observatorysta ja Joseph Hafele Washingtonin yliopistosta testasivat lennon aikana suhteellisuusteorian ns. kelloparadoksia. Kellot lennätettiin tavallisissa vuorokoneissa maapallon ympäri kerran länteen päin ja kerran itään päin. Lentojen jälkeen kellot olivat käyneet 0,2 mikrosekuntia kauemmin kuin maan päälle jätetyt vertailukellot. Samoin tutkijat olivat vanhentuneet 0,2 mikrosekuntia enemmän kuin virkaveljensä maan päällä. (Kuva Pressfoto/Wide World Photos).



miseen on käyttää avaruusraketin sijaan tavallisia suihkukoneita ja kaksosten sijaan tarkkuuskelloja. Kun kello lennätetään kertaalleen maapallon ympäri, se kulkee erilaisella nopeudella ja liikkuu pienemmässä painovoimakentässä (useita kilometrejä korkeammalla) kuin maan päälle jätetty vertailukello. Siksi se maailmanympärimatkan jälkeen näyttää eri aikaa.

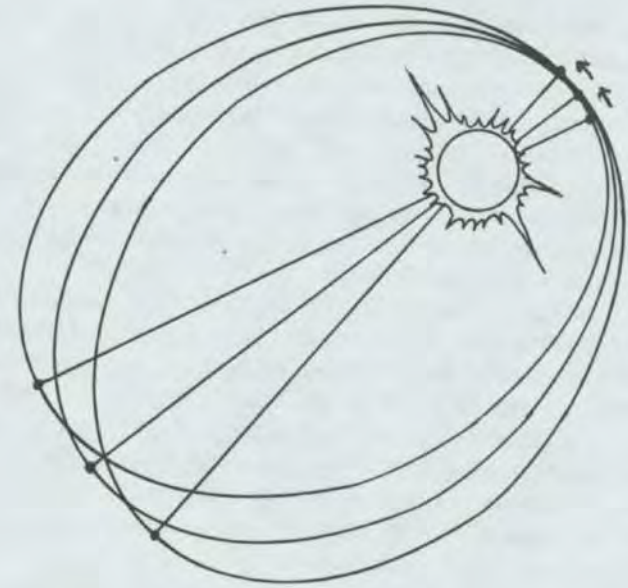
Juuri tällaisen kokeen suorittivat lokakuussa 1971 amerikkalaiset tutkijat **Hafele** ja **Keating**. Kontrollin vuoksi heillä oli mukana neljä cesiumatomikelloa, jotka lennätettiin normaaleilla vuorokoneilla maapallon ympäri kerran itäsuuntaan ja kerran länsisuuntaan. Ottamalla huomioon tarkka reitti, lentokorkeudet ja lentonopeudet voidaan laskea, että lentävät kellot jättävät itään päin kierrettäessä 40 ± 20 nanosekuntia (nanosekunti on miljardisosa sekuntia) ja edistävät länteen päin kierrettäessä 275 ± 20 ns. (Ennustuksen suuret virherajat johtuvat sekä laskujen että lentoreitin epätarkkuudesta).

Kumpikin lento kesti välilaskuineen kolmisen vuorokautta, jonka jälkeen voitiin suorittaa jännittävä vertaus. Neljä itäsuuntaan lennätettyä kelloa olivat todella jättäneet vajaat 60 ns ja länsisuuntaan lennätetyt edistäneet 270 ns. Samoin tietysti kellojen mukana lentäneet tutkijat olivat vanhentuneet kokeensa aikana yli 0,2 sekunnin miljoonasosaa enemmän kuin maan päällä pysyneet virkaveljensä.

Kosmonauteilla ja astronauteilla, jotka lentävät viikkokausia avaruusasemillaan, ero on jo tuntuvampi. Esimerkiksi Kuussa käyneet Apollo-astronautit vanhenivat lennoillaan lähes millisekunnin enemmän kuin maan päälle jääneet toverinsa, koska he olivat koko ajan heikommassa painovoimakentässä.

Kelloja on lennätetty myös satelliiteissa. Neuvostoliitto on tehnyt tällaisen kokeen Kosmos-sarjassa, ja kesällä 1976 Yhdysvallat laukaisi pienen Gravity Probe A -tekokuun 10 000 km korkeuteen. Lennon aikana tutkittiin tekokuuhun asennetun erikoiskellon kulkua ja verrattiin sitä maassa olevaan identtiseen kelloon. Yleisen suhteellisuusteorian mukaan tekokuun kellon olisi pitänyt käydä yhä nopeammin mitä ylemmäs eli heikompaan painovoimakenttään se kiiptesi. Lakikorkeudella kellojen käymisnopeuden eron olisi pitänyt olla noin yksi miljardisosa. Tätä kirjoitettaessa kokeen tulokset eivät vielä ole selvillä.

Kellojen lennätys on kuitenkin jo osoittanut ajan käsitteen suhteelliseksi. Aika kulkee ja ihminen vanhenee eri tahtiin erilaisissa liiketiloissa ja erilaisissa painovoimakentissä. Tämä on kokeellinen totuus johon jokaisen on syytä ajatuksensa totuttaa.



Merkuriuksen radan periheli (Aurinkoa lähinnä oleva piste) ei pysy Newtonin teorian mukaisessa paikassa, vaan kiertyy eteenpäin 43 kaarisekuntia vuosisadassa. Tämä kiertymä on yleisen suhteellisuusteorian vahvimpia todisteita.

Merkuriuksen perihelin liike

Merkuriuksen perihelin liikkeen ennustamista on kauan pidetty yleisen suhteellisuusteorian parhaana todisteena, koska tämä ilmiö testaa sellaista osaa teoriasta, johon muilla kokeilla ei päästä käsiksi.

Merkuriuksen rata on ellipsin muotoinen. Ellipsin isoakseli, joka yhdistää **perihelin** (Aurinkoa lähinnä olevan pisteen) ja **aphelin** (kaukaisimman pisteen), ei pysy täsmälleen paikallaan avaruudessa. Se kiertää tehtyjen havaintojen mukaan runsaan asteen verran vuosisadassa samaan suuntaan kuin Merkurius kulkee radallaan. Tästä liikkeestä valtaosa johtuu Maan rataa sidotun koordinaattijärjestelmän kiertymisestä, mutta noin 575'' vuosisadassa on todellista liikettä. Tämä liike taas johtuu pääasiassa muiden planeettojen, lähinnä Venuksen, Maan ja Jupiterin, häiriöstä. Kun lasketaan toisten planeettojen vaikutus perihelin kiertymiseen, saadaan arvo 532 kaari-

sekuntia. Nähdään, että kiertymä on havaintojen mukaan $43''$ suurempi kuin Newtonin gravitaatiolain perusteella laskettu arvo.

Tämä perihelin omituinen liike havaittiin jo 1800-luvun lopulla ja sille yritettiin esittää kahdenlaisia selityksiä. Ensimmäisen mukaan Aurinko on jonkin verran litistynyt, jolloin päiväntasaajaseudulle keskittynyt ylimääräinen massa aiheuttaisi häiriöitä Merkuriuksen liikkeessä. Toisen selityksen mukaan Auringon ja Merkuriuksen välissä on toistaiseksi tuntemattomia pikkuplaneettoja tai tiheää pölyä, jotka voisivat aiheuttaa perihelin kiertymisen.

Ylimääräistä planeettaa Merkuriuksen radan sisäpuolella on jo kauan yritetty etsiä. Havaintojen teko on kuitenkin äärimmäisen vaikeaa Auringon kirkkaan loisteen takia. Kuvauksia on tehty auringonpimennysten aikaan ja viime vuosina jopa Maata kiertäviltä avaruusasemilta. Silloin tällöin kuvissa on näkynyt omituisia valopisteitä, mutta mitään suurempaa planeettaa (jolle on jo nimikin annettu: Vulkanus) ei ole löytynyt. Myöskään pölyä tai meteoroidoja ei Auringon lähellä voi olla niin paljon, että ne aiheuttaisivat muutoksia Merkuriuksen liikkeessä.

Auringon litistyneisyyden kohdalla tilanne on vähän epäselvempi. Ensimmäiset tarkat kokeet, jotka viime vuosisadan vaihteessa tehtiin Göttingenissä Auringon muodon määrittämiseksi, totesivat sen aivan pyöreäksi. Uuteen kokeeseen ryhdyttiin 1960-luvun puolivälissä. Asialla oli amerikkalainen professori Dicke, joka edellä on mainittu jo mm. Brans-Dicken gravitaatioteorian toisena kehittäjänä. Tämä teoria poikkeaa suhteellisuusteoriasta siinä, että se ennustaa Merkuriuksen perihelin kiertymälle vain vajaan 40 kaarisekunnin suuruisia arvoja. Dicke päätti tarkistaa voisiko Aurinko olla pikkuisen litistynyt niin, että litistymä selittäisi $3-4''$ havaitusta kiertymästä.

Dicke ja Goldenberg kehittivät laitteen, jossa Auringon kuva heijastettiin suunnilleen samankokoisen pyöreän levyn päälle ja mitattiin reunoilta eri kohdista ylituleva valo. Jos Aurinko on litistynyt, päiväntasaajalta pitäisi tulla enemmän valoa kuin navoilta. Dicke ja Goldenberg totesivat pitkän havaintosarjan jälkeen, että Aurinko on todella litistynyt. Päiväntasaajaläpimitta on noin $5/100\ 000$ pitempi kuin napaläpimitta. Ja mikä ihmeellisintä: tämä litistyneisyys selittää $3,4$ kaarisekuntia Merkuriuksen perihelin liikkeestä eli juuri Brans-Dicken teorian vaatiman määrän!

Dicken mukaan Auringon litistyneisyyden täytyy johtua siitä, että Auringon sisus pyörii paljon nopeammin kuin näkyvä pinta, kerran parissa päivässä. Havainnoistahan on saatu Auringon pinta-

osan pyörähdysajaksi sen päiväntasaajalla 25 vuorokautta, mikä ei voi aiheuttaa noin suurta litistymistä. Sisuksen nopea pyöriminen ei kuitenkaan ole ollut tähtien rakenteen tutkijoille mieleen, sillä useimpien tähtimallien mukaan sisus pyörii suunnilleen yhtä nopeasti kuin pinta. Siksi Dicken löytöön suhtauduttiin hyvin varoen.

Koska kyseessä on hyvin tärkeä koe, toinen amerikkalainen tutkijaryhmä päätti Hillin johdolla suorittaa mittauksen uudelleen toisenlaisilla laitteilla. He kehittivät ennen kaikkea menetelmän Auringon reunan paremmalle määrittämiselle. Auringollahan ei ole terävää reunaa samaan tapaan kuin pennin rahalla, vaan sen kirkkaus vähitellen pienenee näkymättömiin.

Hill otti huomioon myös sen mahdollisuuden, että reunan lähellä Auringolla on eri paikoissa eri kirkkaus. Hän suoritti vuosina 1972–73 kolme eri havaintojaksoa. Niiden perusteella hän laski, että litistyneisyys on paljon pienempi kuin Dicken tulos. Hill arveli, että Dickeä oli johtanut harhaan se, että Aurinko näyttää päiväntasaajalla toisinaan olevan kirkkaampi kuin navoilla, vaikka läpimitat ovatkin samat.

Kumpaa nyt uskoa, Dickeä vai Hilliä? Tiedemiehet tuntuvat tällä hetkellä kallistuvan siihen suuntaan, että Hillin tulokset ovat paremmat ja siis Aurinko pyöreä. Tämä merkitsee edelleen, että havaittu Merkuriuksen perihelin kiertymä $43''$ on todella kokonaan relativistista alkuperää.

Einsteinin suhteellisuusteoria ennustaa siis Merkuriuksen perihelin kiertymälle juuri arvon $43''/100$ v. Ulommilla planeetoilla esiintyy sama ilmiö, mutta pienempänä. Venuksen, Maan ja Marsin radat ovat lisäksi lähempänä ympyrää kuin Merkuriuksen niin, että kiertymä on epätarkempi havaita. Sen sijaan pikkuplaneetta Ikarus on otollinen kohde ilmiön tutkimiselle, koska se käy hyvin lähellä Aurinkoa ja Maata ja liikkuu hyvin soikealla radalla. Allaolevassa taulukossa on annettu suhteellisuusteorian arvo ja havaittu arvo eri planeettojen perihelien liikkeelle. Nähdään, että yhteensopivuus on aika hyvä. (Taulukko seuraavalla sivulla).

Suomalaiset tutkijat **Kustaanheimo** ja **Lehti** laskivat vuonna 1963 toisenkin, perihelikiertymästä riippumattoman testin suhteellisuusteorialle. Heidän mukaansa hyvin eksentrisillä (soikeilla ja kauas ulottuvilla) komeettaradoilla **kiertoaika** Einsteinin teoriassa ja Newtonin teoriassa poikkeaa toisistaan. Esimerkiksi Halley'n kuuluisan komeetan kiertoaika on suhteellisuusteorian mukaan $0,2$ vuorokautta pitempi kuin Newtonin teorian. Tätä ilmiötä ei ole löydetty havainnoista, koska se peittyi komeettaradoissa esiintyvien kaikkien muiden

Taulukko 2.1. Laskettuja ja havaittuja arvoja eräiden planeettojen perihelin kiertymälle.

Planeetta	Perihelin kiertymä (kaarisekuntia vuosisadassa)	
	Teoria	Havainto
Merkurius	43,0	43,1 ± 0,5
Venus	8,6	8,4 ± 4,8
Maa	3,8	5,0 ± 1,2
Mars	1,4	—
Ikarus	10,3	9,8 ± 0,8

häiriöiden alle ja sen erottaminen niistä on lähes mahdotonta. Helppommin ilmiö olisi havaittavissa Maata kiertävillä satelliiteilla, mutta koetta tämän toteamiseksi ei ole vielä suoritettu.

Valon taipuminen Auringon lähellä

Valokvantit eli fotonit, vaikkakaan eivät sisällä ns. lepomassaa (niitähän ei voida asettaa "puntariin"), sisältävät kuitenkin energiaa, joka jo suppeamman suhteellisuusteorian mukaan on ekvivalenttia massan kanssa. Tämän energia-massan kautta painovoima vaikuttaa valonsäteisiin samalla tavalla kuin tavallisiin massallisiin hiukkasiin. Niinpä esimerkiksi Aurinko vetää puoleensa ohikulkevia fotoneja niin, että ne poikkeavat suoraviivaiselta radalta.

Kuten ensimmäisessä luvussa puhuttiin, tämä suoralta radalta poikkeaminen on vain näennäinen ilmiö. Neliulotteisessa aika-avaruudessa valo kulkee pitkin geodeettista viivaa eli lyhintä tietä paikasta toiseen, ja Auringon aiheuttama avaruuden kaarevuus saa tähden valon meidän kaukoputkissamme siirtymään hieman "väärään" paikkaan.

Tämä probleema on itseasiassa hyvin vanha. Jo v. 1801 Soldner julkaisi Newtonin gravitaatioteorian pohjalta laskelmat valonsäteen taipumisesta sen kulkiessa Auringon ohi. Vuonna 1911 esitti Einstein, tuntematta Soldnerin vanhaa tulosta, olennaisesti samalla periaatteella arviot kokeellisesti varmennettaviksi. Vuonna 1914 Venäjälle lähetettiin retkikunta suorittamaan havaintoja auringonpimennyksen yhteydessä, mutta puhjennut 1. maailmansota esti retkikunnan työn ja tutkijat jäivät instrumentteineen sotavankeuteen. Vuonna



Auringon reunan ohi kulkevat valonsäteet tai radioaallot taipuvat 1,75 kaarisekuntia. Kauempana Auringosta taipuma on pienempi.

1916 esitetty "lopullinen" versio yleisestä suhteellisuusteoriasta antoi sitten aikaisempiin verrattuna kaksi kertaa suuremman efektin. Ilmiön testaamiseksi maapallolla tutkitaan Auringon reunan läheltä kulkeutta säteilyä. Tähtien valo tai kvaasarin radiosäteily kaartuu Auringon lähellä niin, että kohde näyttää sijaitsevan kauempana Auringosta kuin se todellisuudessa on. Säteen taipuminen on tosin hyvin pieni. Auringon reunaa hipova säde näyttää suhteellisuusteorian mukaan tulevan 1,75 kaarisekunnin päästä oikeasta paikasta. Tämä vastaa 100 metrin päästä katsotun tulitikun paksuutta. Nykyisellä valokuvaustekniikalla voidaan tällainen ero havainta, ja uusimpien kokeiden tarkkuus on noin 10 %. Radiotekniikka on jo ajanut optisen ohi ja pystyy tutkimaan ilmiötä alle 1 prosentin tarkkuudella.

Vuodesta 1919 lähtien taipuman tutkimiseksi valonsäteiden aallonpituudella on tehty kymmenkunta koetta. Kokeiden vähäisyys selittyy sillä, että se on mahdollista vain täydellisen auringonpimennyksen aikaan. Tällöin kuvataan Auringon ympärillä näkyvät tähdet ja verrataan kuvaa samasta paikasta puoli vuotta myöhemmin otettuun kuvaan.

Uusin valokuvauskoe taipuman havaitsemiseksi tehtiin kesäkuun 30. päivänä 1973. Tällöin sattui yksi vuosisadan pisimmistä auringonpimennyksistä. Mauritaniassa Afrikan länsiosassa, jonne yhdysvaltalaisen Texasin yliopiston tiedemiehet laitteensa pystyttivät, täydellinen pimennys kesti 6 min 18 s.

Täydellisillä auringonpimennyksillä on se ikävä ominaisuus, että ne sattuvat yleensä erämaissa, viidakoissa tai aavoilla valtamerillä. Kesäkuun 1973 pimennys ei ollut poikkeus. Tiedemiehet katsoivat parhaaksi paikaksi taipumakokeelle Chinguettin keitaan keskellä Länsi-Saharan autiomaata, jossa haittana oli "vain" kuumuus, pölymyrskyt ja muut pienemmät pahat. Styroksilla vuorattuun koppiin pystytettiin kaukoputki, jonka aukko oli 16,5 cm ja polttoväli 2,1 m.

Kuuden kuumeisen minuutin aikana kesäkuun 30. päivänä ehdittiin huolellisesti ottaa kolme erikoislevyä. Taivas ei ilmassa leijuvan pölyn takia tullut pimennyksen aikana kovinkaan tummaksi niin, että heikkoja tähtiä ei saatu kuviin mukaan. Marraskuussa 1973 otettiin vertailukuvat samoilla välineillä, joita eräs mauritanialainen mies oli autiomaassa puoli vuotta uskollisesti vartioinut.

Huonosta näkyvyydestä johtuen kokeen tarkkuus ei ollut aivan niin hyvä kuin oli odotettu. Vuonna 1976 julkaistut mittaukset antoivat taipumalle arvon $1,66 \pm 0,18$ kaarisekuntia, siis lähellä Einsteinin arvoa.

Valokuvaustekniikalla ei monista häiriötekijöistä johtuen päästä ilmeisesti paljontaan tätä suurempaan tarkkuuteen. Sen sijaan



Vuimeisin koe valon taipuman mittaamiseksi tehtiin kesäkuussa 1973 sattuneen auringonpimennyksen aikaan. Texasin yliopiston tiedemiehet pystyttivät kuvassa näkyvän styrox-majan eräälle Saharan keitaalle, jossa pimennys kesti yli 6 min. Jäähdytetyn kopin sisällä oli erikoisvalmisteinen kaukoputki, jolla ehdittiin ottaa kolme valokuvauslevyä pimentynyttä Aurinkoa ympäröivästä tähtikentästä. (Kuva Department of Astronomy and Center for Relativity, University of Texas).

viime vuosikymmeninä jättiläisaskelin edennyt radiotekniikka tarjoaa jo paremman vaihtoehdon.

Joka vuosi lokakuun alussa kvasaari 3C 279 peittyy maasta katsottuna Auringon taakse. Vuodesta 1969 lähtien radioteleskoopilla on mitattu tämän ja kymmenen asteen päässä sijaitsevan toisen kvasaarin 3C 273:n välistä kulmaetäisyyttä. Kun 3C 279 on Auringon reunan kohdalla, sen lähettämä radiosäteily tulee taipuman takia hieman väärästä suunnasta.

Tarkkoja kulmaetäisyyksiä voidaan mitata käyttämällä useita kaukana toisistaan olevia radioteleskooppeja ja ns. interferometri-menettelmää. Auringon koronan häiriöt saadaan poistetuksi tekemällä mittaukset kahdella eri aallonpituudella.

Radioaaltojen taipumaa ovat tutkineet mm. amerikkalaiset ja hollantilaiset tiedemiesryhmät. He ovat saaneet mainittujen kvasaarien avulla ilmiölle $0,9 \dots 1,1$ kertaa niin suuria arvoja kuin suhteellisuusteoria antaa, ja tarkkuus on ollut 5–10 prosentin luokkaa.

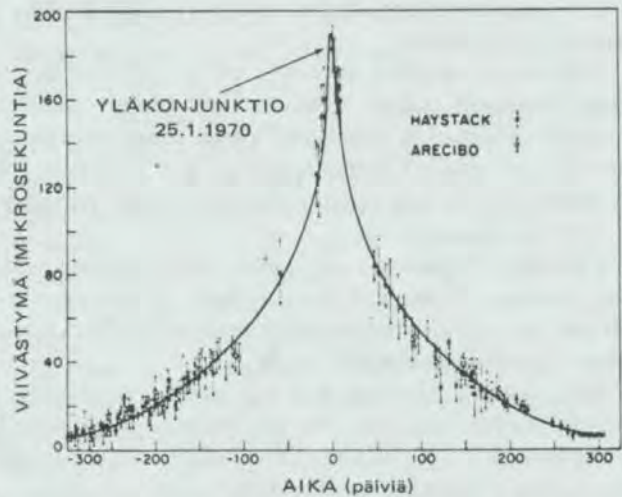
Parina viime vuonna Fomalont ja Sramek Yhdysvaltain kansallisesta radioastronomian observatoriosta (NRAO) ovat vieneet tekniikkaa vielä pitemmälle. He käyttävät neljää paraboloidiantennia, halkaisijoiltaan 14–26 m ja etäisyyksiltään muutamia kymmeniä kilometrejä. Kahden kvasaarin sijasta käytetään kolmea samalla suoralla sijaitsevaa pistemäistä radiolähdettä.

Viimeisimpien tulosten mukaan Fomalont ja Sramek ovat saaneet taipumalle arvoksi $1,77 \pm 0,02$ kaarisekuntia eli hyvin lähellä Einsteinia olevan arvon.

Säteilyn taipuminen Auringon lähellä on tällä hetkellä tarkin testi suhteellisuusteorialle, ja sen tulokset, niin valon kuin radiosäteilyn alueella, tukevat täysin yleistä suhteellisuusteoriaa. Sen sijaan muut teoriat, mm. aikaisemmin mainittu Brans-Dicken teoria, ovat vaikeuksissa. Jos niissä olevat tietyt vapaat kertoimet valitaan taipumatestellille sopiviksi, teoriat käytännössä sulautuvat samaksi kuin suhteellisuusteoria.

Tutkasäteen viivästyminen

Suhteellisuusteorian ”neljäs testi” kehitettiin 1960-luvulla, jolloin myös sen havaitseminen tuli mahdolliseksi. Tämä testi perustuu siihen, että voimakas painovoimakenttä hidastaa hieman ohikiihtävän valon nopeutta. Suppeamman suhteellisuusteorian mukaan valon nopeus on vakio, mutta yleisessä suhteellisuusteoriassa havait-



Yleisen suhteellisuusteorian ns. neljas testi kehitettiin 1960-luvulla. Sen mukaan tutkasäde hidastuu kulkiessaan Auringon ohi. Kuvassa tuloksia, joita saatiin 1970 lähettämällä signaaleja Venukseen ja mittaamalla edestakaiseen matkaan kulunut aika. Nollahetki on yläkonjunktio, jolloin Venus on Maasta katsottuna Auringon takana ja jolloin säteet kulkevat aivan Auringon reunan läheltä. Pystyasteikolla on viivästymän suuruus mikrosekunteina. Pystyviivat edustavat kahdella tutkalla, Haystackissa ja Arecibossa, tehtyjä mittauksia. Yhtenäinen viiva on Einsteinin teorian ennustus. (Kuva I.I.Shapiro ym., *Physical Review Letters* 26, 1133).

sijat näkevät sen nopeuden vähän vaihtelevan.

Ilmiötä tutkitaan lähettämällä tutkasäde kohti Venusta, Merkuriusta tai Aurinkoa kiertävällä radalla olevaa avaruusluotainta. Takaisinheijastunut kaiku myöhästyy Auringon läheltä kulkiessaan noin 250 mikrosekuntia (1/4000 sekuntia), mikä viive on hyvin mittattavissa. Käytännössä ei havaintoja voida aivan Auringon lähellä tehdä, koska sen korona aiheuttaa voittamattomia häiriöitä. Sen sijaan tutkaluotausta suoritetaan useiden kuukausien ajan ennen kuin planeetta tai luotain joutuu Auringon taakse ja taas kuukausia sen jälkeen. Yhdistämällä kaikki tulokset voidaan arvioida se viivästys joka tulisi Auringon reunan kohdalla.

Ensimmäiset viivästyskokeet tehtiin **Shapiron** johdolla Yhdysvalloissa 1967. Tällöin lähetettiin signaaleja Merkuriukseen ja otettiin vastaan heijastunut kaiku. Tulokset olivat lähellä suhteellisuusteorian

arvoja. Planeetat ovat kuitenkin huonoja heijastajia epätasaisuutensa ja pintansa karkeuden takia, ja siksi viime vuosina parhaat tulokset on saatu avaruusluotaimien avulla. Luotaimet ottavat tällöin vastaan signaalin ja lähettävät sen heti vahvistettuna takaisin.

Ensimmäiset avaruusalukset, joilla tutkasäteen viivästymistä tutkittiin, olivat Marsin ohi lentäneet Mariner 6 ja 7, jotka vuoden 1970 keväällä olivat yläkonjunktiossa (Maasta katsottuna Auringon takana). Niiden mukaan havaittu viivästymä on $1,00 \pm 0,03$, kun yleisen suhteellisuusteorian ennustusta merkitään ykkösellä. Siis kolmen prosentin tarkkuudella oikea tulos.

Kokeen tarkkuus vielä paranee, kun ei käytetä vapaasti Aurinkoa kiertävää luotainta, vaan johonkin planeettaan ankkuroitua alusta, joka on joko kiertoradalla tai pinnalla. Niinpä Mariner 9, Marsin kiertolainen joka toimi 1971–72, on jo antanut viivästymän 2 % tarkkuudella. Uusia mittauksia on tehty Viking-aluksilla. Vikingejä on kaksi Marsin kiertoradalla ja kaksi pinnalla, ja ne joutuivat marraskuun 25. päivänä 1976 Marsin mukana Auringon taakse. Niiden avulla tarkkuus paranee muutamaankymmensosaan prosenttia.

Edellä on esitetty koko joukko yleisen suhteellisuusteorian testaamiseksi tehtyjä kokeita. Ne ovat kaikki tukeneet virherajojensa puitteissa Einsteinia. Muitakin testejä aiotaan lähivuosina tutkia. Eräs uudentyypinen koe on maapalloa kiertävään satelliittin sijoitettu gyroskooppi. Painovoimakenttä aiheuttaa sen akselin suunnassa tiettyjä muutoksia, jotka poikkeavat Newtonin teorian ilmiöistä. Tämä koe vaatii kuitenkin erittäin tarkat laitteet, joiden kehittäminen voi osoittautua vaikeaksi.

GRAVITAATIOAALLOT

Kiihtyvässä liikkeessä olevat sähkövaraukset synnyttävät sähkömagneettista säteilyä, joka etenee avaruudessa valon nopeudella. Niinpä maapallolla voidaan esim. radioteleskoopeilla havaita säteilyä, joka on syntynyt magneettikentissä spiraaliradoilla liikkuvista elektroneista.

Vastaavasti kiihtyvässä liikkeessä olevat massat synnyttävät gravitaatioaaltoja, jotka etenevät valon nopeudella ja kuljettavat mukanaan energiaa. Tämä on suora seuraus yleisestä suhteellisuusteoriasta. Gravitaatiovälityksen esiintymistä epäiltiin vielä 1950-luvulla, kunnes useat teoreettiset laskelmat varmistivat sen olemassaolon. Gravitaatioaaltojen havaitseminen on kuitenkin hyvin vaikeaa, koska niiden kuljettama energia on suunnattoman paljon pienempi kuin sähkömagneettisten aaltojen. Itse Einstein arveli, että gravitaatioaaltojen vaikutus on niin pieni, ettei niillä ole mitään käytännön merkitystä. Mutta vuonna 1916 ei vielä tunnettu valkoisia kääpiöitä eikä neutronitähtiä, mustista aukoista puhumattakaan. Vasta tällaisissa mahtavissa lähteissä voi syntyä havaittavan suuruista gravitaatiovälitystä.

Gravitaatioaaltojen kokeellisen tutkimisen aloitti 1960-luvun alussa amerikkalainen tutkija Joseph Weber. Hän sai työskennellä kymmenisen vuotta melkein yksinään muiden tiedemiesten pitäessä aaltojen havaitsemista ”äärimmäisen epätodennäköisenä”. Weberin ponnistelujen ansiosta gravitaatiovälityksen etsimisestä on kuitenkin nyt tullut kunniallinen tähtitieteen ala, ja tällä hetkellä eri puolilla maapalloa toimii jo toistakymmentä gravitaatioantennia.

Weberin sylinteri

Weber julkaisi 1959 kirjoituksen, jossa hän tutki gravitaatioaaltojen syntyä ja havaitsemista. Hän alkoi kehittää gravitaatioantennia, joka pystyisi ilmaisemaan nämä tavattoman heikot aallot. 60-luvun alussa antennin prototyyppi oli valmis.

Weberin gravitaatioantenni on 1,5 tonnin painoinen alumiini-



Joseph Weber gravitaatioantenninsa ääressä. Tämä antenni on 150 cm pitkä, 95 cm läpimittainen alumiinisylinteri. Se ottaa vastaan gravitaatioaaltoja 1660 Hz taajuudella. Käytön aikana sylinteri on ripustettu häiriöttömään kammioon. (Kuva J.Weber).

sylinteri, jonka halkaisija on 95 cm ja pituus 150 cm. Sylinteri on ripustettu tyhjiökammioon ja eristetty mahdollisimman hyvin ympäristössä esiintyvistä häiriöistä. Kun sylinteriin isketään vasaralla tai kun siihen osuu gravitaatioaalto, se alkaa värähdellä ominaistaajuudellaan 1660 kertaa sekunnissa. Tässä värähtelyssä sylinterin päiden välinen matka muuttuu jaksollisesti 10^{-15} cm verran. Tämä on niin lyhyt matka, että jopa atomiytimen "säde" on sata kertaa suurempi! Väli-
matkan muutoksia Weber ei suoraan pysty havaitsemaan, mutta näiden muutosten aiheuttamat järmitykset sylinterissä voidaan herkillä laitteilla mitata.

60-luvun alkuvuosina Weberin laite oli koekäytössä. Hänellä oli jännittäviä hetkiä, kun yön hiljaisuudessa sylinteri alkoi yhtäkkiä tuntemattomasta syystä värähdellä niin, että mittarin neulat siirtyivät pois asteikolta. Mitkään muut laitteet, järjestysmittarit, sähkömagneettiset mittarit, gravimetrit, eivät häiriöitä havainneet. Oliko sylinteriin osunut jossain kosmisessa katastrofissa syntynyt gravitaatiopulssi?

Weber jatkoi kokeitaan, kunnes 1967 hän ensimmäisen kerran rohkeni julkaista selostuksen kymmenestä havainnosta. "Se mahdollisuus, että joitain gravitaatiosignaaleja on havaittu, ei ole täysin pois suljettua", sanoi Weber varovaisesti.

Marylandin yliopistoon sijoitetun sylinterin seuraksi rakennettiin toinen samanlainen 1000 km päähän, Chicagon lähellä sijaitsevaan Argonnen laboratorioon. Tutkimalla kahteen antenniin yhtäaikaan satuvia värähtelyjä voidaan paikallisten häiriöiden vaikutus poistaa. Molemmat sylinterit on sijoitettu itä-länsi-suuntaan niin, että niiden akselit ovat suunnilleen samansuuntaiset.

Marylandin ja Argonnen antennilla havaittiin yhä lisää värähtelypulseja. Niiden kaikkien voimakkuus on kuitenkin aivan mittaustarkkuuden rajalla niin, että sylinterin satunnaiset häiriöt ovat suunnilleen yhtä suuria, ja niiden esillesaamiseen tarvitaan monimutkaista tietokonekäsitelyä. Samanaikaisia pulseja on kuitenkin niin paljon, etteivät ne Weberin mielestä voi olla satunnaisia. Ainakin osan niistä täytyy johtua gravitaatioaalloista.

Havaintojen määrän kasvaessa voitiin ruveta tekemään tilastoja niiden esiintymisajankohdista. Vuorokaudenajoilla ei näytä olevan mitään yhteyttä havaintoihin, niitä sattuu yhtä todennäköisesti yöllä kuin päivällä. Sen sijaan huomattiin merkillinen säännöllisyys: kun sylinterin kylki oli suoraan kohti Linnunradan keskustaa, havaintoja tehtiin selvästi enemmän kuin muina aikoina. Koska sylinteri reagoi parhaiten juuri sivulta tuleviin häiriöihin, Weber päätteli, että

gravitaatioaaltojen lähde sijaitsee Linnunradan keskuksessa.

Minkälaisissa lähteissä aaltoja syntyy? Onko Weber havainnut gravitaatioaaltoja? Minkälaisia tuloksia ovat muut havaintajat saaneet? Näitä kysymyksiä tarkastellaan seuraavaksi.

Gravitaatioaaltojen lähteet

Einsteinin painovoimateoria ennustaa yksiselitteisesti, että kaikki kiihtyvässä liikkeessä olevat epäsymmetriset massasysteemit säteilevät gravitaatioaaltoja. (Tässä suhteessa gravitaatiosäteily hieman poikkeaa sähkömagneettisesta säteilystä: symmetrinen pyörivä massa ei lähetä painovoima-aaltoja, vaikka pyörivä varattu kappale aina lähettää sähkömagneettisia aaltoja).

Yleinen suhteellisuusteoria ennustaa edelleen, että painovoima-säteily kuljettaa mukanaan energiaa ja että säteilevä systeemi menettää energiaa juuri saman verran kuin aallot vievät pois. Gravitaatioaaltojen energia voi myös sitoutua uudelleen aineeseen, toisin sanoen aallot voidaan havaita.

Einsteinin teoria ei ole ainoa teoria, joka ennustaa gravitaatioaaltojen esiintymisen. Saman tekevät lähes kaikki mahdolliset painovoimateoriat. Ennustuksissa on kuitenkin eroja yksityiskohdissa, joten gravitaatioaaltojen mittaamista voidaan myöhemmin käyttää myös eri teorioiden testinä.

Missä sitten esiintyy "kiihtyvässä liikkeessä olevia epäsymmetrisiä massasysteemejä"? Tällainen on jo esimerkiksi oma aurinkokuntamme. Aurinko-Jupiter-järjestelmä säteilee gravitaatiosäteilynä energiaa noin 5000 joulea sekunnissa. Tämä on kuitenkin niin mitättömän pieni määrä, että sen havaitseminen on mahdotonta. Aurinkohan säteilee valona yli 10^{27} J/s eli 100 000 000 000 000 000 000 000 kertaa niin paljon.

Havaittavissa olevien gravitaatioaaltojen lähteitä täytyy etsiä maailmankaikkeuden järjestelmistä, jotka ovat hyvin nopeassa liikkeessä ja joilla on hyvin suuri massa tai joissa on mahtavia energiatiivisyyksiä. Nopeimpia liikkeitä syntyy kaikenlaisissa räjähdyksissä ja luhistumisissa, ja suurimassaisia ovat ainakin galaksitytimet ja ilmeisesti myös kvasaarit. Myös neutronitähdissä ja valkoisissa kääpiöissä on hyvin tiheää ainetta. Mustissa aukoissa taas on pienellä alueella valtavasti energiaa.

Mahdollisia gravitaatioaaltojen lähteitä on lueteltu taulukossa 3.1 ja niitä käsitellään alla tarkemmin. Täytyy kuitenkin pitää mie-

Taulukko 3.1. Gravitaatioaaltojen lähteitä. Oikeanpuoleisessa sarakkeessa on gravitaatiovälityksen arvioitu suurin mahdollinen voimakkuus maapallolla. Voimakkuus kuvaa avaruuden kaareutumista, yksikkönä 10^{-20} . Tämänhetkisinillä antennilla pystytään havaitsemaan ehkä voimakkuudeltaan luokkaa 100 olevat pulssit. Parin vuoden päästä herkkyys kasvaa ykkösen luokkaa oleviin lähteisiin asti. Viisi ensimmäistä kohdetta ovat olemassaolevia, jo tunnettuja lähteitä, kun taas kaksi viimeistä ovat yhtä paljon mielikuvituksen kuin todellisten laskelmien tuotetta. (Taulukko mukailtu Physics Todayn tammikuussa 1974 ilmestyneestä numerosta).

Lähde	Suhteellinen voimakkuus (max)
Lähekkäiset kaksoistähdet	1
Pulsarin ”järjestys”	0,1
Vastasyntynyt neutronitähti	0,01
Supernova Linnunradassa	1000
Supernova Virgon galaksijoukossa	1
Kaukaisten kvasaarien tai galaksiytimien räjähtäminen	0,1
Linnunradan keskustassa oleva valtava musta aukko nieläisee Auringon kokoisen tähden	10

lessä, että kaikki tässä esitettävät käsitykset ovat lähinnä arvailua. Kun havaintoja ei mistään kohteista ole tehty, ei voida olla varmoja, että ne säteilevät gravitaatioaaltoja lasketulla tavalla. Meillä on vain hyvin hämärä aavistus siitä, miltä taivas näyttää gravitaatiovälityksen valossa. Vasta lähivuosina ja vuosikymmeninä alammme nähdä välähdyksiä tästä uudesta maailmasta. (Ellei Weber ole nähnyt niitä jo nyt.)

Kaksoistähdet säteilevät gravitaatioenergiaa, vaikkakin ne yleensä ovat hyvin heikkoja lähteitä. Säteily on sitä voimakkaampaa, mitä lyhempi kiertoaika on (eli mitä suuremmalla nopeudella tähdet liikkuvat). Taulukkoon 3.1 valittu voimakkuusarvo kuvaa nopeimpia tällä hetkellä tunnettuja kaksoistähtiä. Niiden kiertoaika toistensa ympäri on tunnin luokkaa.

Kaksi neutronitähteä tai mustaa aukkoa, jotka kiertävät lähellä toisiaan, voisivat muodostaa paljon voimakkaamman säteilijän. Jos niiden välimatka olisi vain tuhansia kilometrejä (ja kiertoaika

muutamia sekunteja), ne lähettäisivät gravitaatioaaltoja miljardeja kertoja voimakkaammin kuin tunnetut kaksoistähdet. Aaltojen säteileminen samalla vähentäisi järjestelmän omaa energiaa niin, että neutronitähdet tai mustat aukot lähenisivät nopeasti toisiaan ja törmäisivät parin tunnin kuluttua yhteen. Tämä olisi sellainen ryssäys, että siitä syntyvä gravitaatiopulssi voitaisiin helposti maapallolla havaita jo nykyisillä laitteilla. Weber on päätellyt, että hänen havaintojensa aikana tällaista katastrofia ei ole tapahtunut ainakaan 10 000 valovuoden etäisyydellä Auringosta.

Neutronitähdet voivat olla voimakkaita gravitaatioaaltojen lähteitä muutenkin kuin kaksoistähtijärjestelmissä. Neutronitähdistä tehdään nykyään maapallolla havaintoja niiden pyöriessään lähettämien säännöllisten radiosäteilypulssien avulla. Näitä neutronitähtiä sanotaan **pulsareiksi**. Pulsarien pyörähdysajassa on havaittu äkillisiä muutoksia, joiden arvellaan syntyvän tähden muodon vähän muuttuessa, ”pulsarinjärityksessä”. Tällaisessa järityksessä syntyy luultavasti myös voimakas pulssi gravitaatioaaltoja.

Toinen mahdollisuus neutronitähden gravitaatiovälitykseen on niiden ensimmäisten elinpäivien aikana, kun ne luhistumisen jälkeen eivät ole vielä saavuttaneet symmetristä pyöreää muotoa. Tällöin tähti voi pari vuorokautta olla voimakas gravitaatioaaltojen lähde.

Supernovan ajatellaan syntyvän tähden luhistumisen yhteydessä. Tähden ydin romahtaa sisäänpäin valkoiseksi kääpiöksi, neutronitähdeksi tai mustaksi aukoksi ja kuoriosa räjähtää. Tässä syntyy hirvittävän voimakas gravitaatioaaltojen pulssi, joka kestää ehkä vajaan sekunnin. Supernovia sattuu omissa Linnunradassamme muutaman sadan vuoden välein (viimeinen on ollut 1667, ja seuraava voi tulla vaikka jo huomenna). Linnunradan ympäristössä Virgon mahtavaan galaksijoukkoon asti sattuu supernovia ehkä kerran kuukaudessa.

Auringon lähellä räjähtävä supernova aiheuttaisi luultavasti voimakkaamman gravitaatiopulssin kuin mikään muu ilmiö (neutronitähden ja mustien aukkojen törmäyksiä lukuunottamatta, mutta nehan ovat toistaiseksi vain mielikuvituksen leikkiä). Vielä Virgon galaksijoukossa sattuva supernova havaittaisiin maapallolla yhtä voimakkaana kuin tehokkaimmat Auringon läheiset kaksoistähtijärjestelmät.

Yllämainitut gravitaatiovälitykset, kaksoistähdet, neutronitähdet ja supernovat, ovat tähtitieteilijälle muista havainnoista tuttuja kohteita, joiden ilmiöt ainakin pääpiirteissään tunnetaan. Sen sijaan taulukon kaksi viimeistä arvioitua lähettäjä ovat vähintään yhtä paljon mielikuvituksen kuin laskujen tuotetta.

Kvasaareissa ja kaukaisten galaksien ytimissä on havaittu voimakkaita muutoksia, niin voimakkaita, että niitä ei nykyään tunnetuilla mekanismeilla osata selittää. Jos näihin salaperäisiin purkauksiin liittyy gravitaatioaaltoja, ne voivat olla hyvinkin havaittavissa vielä kosmisten etäisyyksien päässä.

Musta aukko Linnunradan keskustassa voisi aiheuttaa Weberin havaitsemat pulssit, jos aukon massa olisi miljoonia kertoja Auringon suuruinen ja jos se vuosittain nielaisi tuhansia tähtiä. Mitään todisteita tällaisen hirviön olemassaolosta ei (Weberin havaintoja lukuunottamatta) ole, mutta toisaalta kyseiset havainnot eivät tätä mahdollisuutta pysty myöskään täysin kumoamaan.

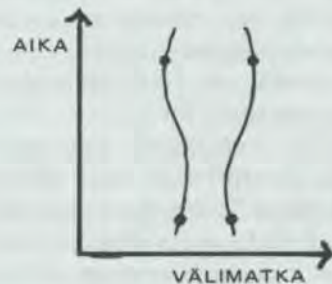
Gravitaatioantennit

Kerran synnyttyään gravitaatioaalto etenevät vastustamattomasti, ikuisesti yhä kauemmaksi. Niitä on vielä vaikeampi pysäyttää kuin neutriinoja (massattomia ja varauksettomia alkeishiukkasia). Ne kulkevat maapallon läpi yhtä helposti kuin vapaassa avaruudessa. Niiden voimakkuus tietysti vähenee samaan tapaan kuin sähkömagneettisen säteilyn, verrannollisesti etäisyyden neliön käänteislukuun, ja niillä on punasiirtymiä (kosmologista, painovoiman ja doppler-ilmion aiheuttamaa) aivan samoin kuin sähkömagneettisilla aalloilla.

Gravitaatioaaltojen havaitseminen perustuu siihen, että aallot ovat tavallaan valon nopeudella eteneviä jännityskenttiä. Ne aiheuttavat avaruuden paikallista pientä kaareutumista, joka taas aiheuttaa mekaanisissa havaintovälineissä jännityksiä.

Kuvassa on esitetty miten käyttäytyy kaksi vapaassa putoamisliikkeessä olevaa kappaletta, joihin osuu gravitaatioaalto. Kappaleiden välimatka rytmillisesti kasvaa ja pienenee gravitaatioaalton taajuudella. Muutoksen suuruus riippuu aaltoliikkeen voimakkuudesta, mutta tyypillisissä tapauksissa se on alkeishiukkasten läpimittaa pienempi (luokkaa 10^{-15} cm).

Kun gravitaatioaalto osuu kahteen vierekkäiseen vapaasti putoavaan kappaleeseen, niiden välimatka rytmisesti muuttuu.



Kaikki gravitaatioantennit eivät ole samanlaisia sylintereitä. Kuvassa näkyy levyantennia Weber käytti ns. skalaariaaltojen etsimiseen, joita Einsteinin teorian mukaan ei pitäisi löytyä, mutta joita eräät muut teoriat ennustavat. Skalaariaaltoja ei löytynyt. Sen sijaan koe antoi heikon vahvistuksen Linnunradan keskustassa mahdollisesti piilevän gravitaatiolähteen olemassaololle. – Antennin läpimitta on 210 cm ja paksuus 15 cm. Se toimii 1000 Hz taajuudella. (Kuva J. Weber).

desta, mutta tyypillisissä tapauksissa se on alkeishiukkasten läpimittaa pienempi (luokkaa 10^{-15} cm).

Samalla tavoin kuin vapaasti putoavien kappaleiden välimatka, pyrkii myös kiinteiden kappaleiden osien välimatka muuttumaan. Esimerkiksi sylinterin muotoisen antennin kylkeen osuva aalto aiheuttaa sylinterin päiden välimatkan muuttumista, mikä voidaan havaita jännityksinä sylinterissä. (Painovoimasäteily etenee poikittaisena aaltoliikkeenä kuten sähkömagneettinenkin säteily, joten se ei aiheuta pitkittäisiä jännityksiä kulkusuunnassaan).

Ylläolevaan periaatteeseen perustuvat myös useimmat suunnitellut (ja kaikki rakennetut) gravitaatioantennit. Misner, Thorne ja



Suurimmat tähän mennessä käytetyt gravitaatioantennit ovat Maa ja Kuu. Maassa tapahtuu kuitenkin niin paljon muita häiriöitä (maanjärjestyksiä ym.), että gravitaatioosignaalien erottaminen on mahdotonta. Kuu on hiljaisempi taivaan-kappale, Siksi Apollo 17-lennolla Kuuhun vietiin Joseph Weberin suunnittelema gravimetri, joka näkyy kuvassa. Se mittasi Kuun kuoren pieniä heilahteluja noin 1 Hz taajuudella. Mittaustarkkuus oli noin 0,3 nanometriä. Gravimetri lähetti lukemiaan vuoden ajan, mutta tulosten käsittelyä ei ole vielä saatu valmiiksi. (Kuva J. Weber).

Wheeler mainitsevat Gravitation-kirjassaan kymmenkunta eri mahdollisuutta antennikonstruktioksi, ja näistä vain muutama tulee käytännössä kyseeseen.

Tärkein antennimuoto tällä hetkellä on jo useaan kertaan mainittu **Weberin sylinteri**. Se tehdään tavallisesti alumiinista ja sen pituuden muutoksia tutkitaan joko jännitysmittareilla, kuten Weber ja useimmat muut tekevät, tai suoraan pieniä välimatkoja mittaamalla, kuten on tehnyt neuvostoliittolainen painovoimatutkija Vladimir Braginski. Braginskin sylinterin päistä lähtevät "sarvet", jotka melkein yhtyvät sylinterin päällä. Sarvien päiden pientä välimatkaa mitataan erikoisin elektronisin laittein. Näin päästään suunnilleen samaan tarkkuuteen kuin jännitysmittareilla eli noin $5 \cdot 10^{-15}$ cm oleviin etäisyydenmuutoksiin.

Kahden vapaasti putoavan kappaleen välistä etäisyyttä on laboratoriossa tietysti vaikea mitata. Tällainen luonnollinen systeemi on Maa-Kuu-pari, jonka välimatka voidaan laserilla saada muutaman kymmenen sentin tarkkuudella. Gravitaatioaaltojen aiheuttamat poikkeamat ovat kuitenkin paljon tätä pienempiä, joten Maa-Kuu ei tule antennina kyseeseen. Ainoa käyttökelpoinen mahdollisuus on kaksi maapallon kiertoradalla olevaa satelliittia, jotka erikoisjärjestelyin eristetään muista häiriöistä (lähinnä ilmanvastuksesta) ja joiden välimatkaa mitataan laserinterferometrillä. Tällainen antenni voi olla toiminnassa ensi vuosikymmenellä.

Muutama tällä hetkellä rakennettu antenni mittaa yksinkertaisesti **kahden huoneeseen sijoitetun peilin** välimatkaa ns. Michelsonin interferometrillä kehitetyllä laseriin perustuvalla laitteella. Tällainen antenni on tavallaan välimuoto vapaasti putoavien kappaleiden ja kiinteän sylinterin välillä.

Myös **muunmuotoiset kappaleet** kuin sylinterit alkavat gravitaatioosäteilyn vaikutuksesta värähdellä. Itse **maapallo** imee pitkäaaltoisesta gravitaatioosäteilystä osan itseensä ja alkaa värähdellä 54 minuutin jaksossa. Tällaista värähtelyä on maanjärjestyksiä mittaavilla seismometreillä yritetty etsiä, mutta tuloksetta. Siitä voidaan päätellä, että pitkäaaltoista gravitaatioosäteilyä ei maailmankaikkeudessa esiinny tiettyä ylärajaa enemmän.

Braginski on ehdottanut myös gravitaatioantennia, joka perustuu aaltojen polaroitumiseen. Gravitaatioaalloilla on tietty polarisaatio kuten sähkömagneettisellakin säteilyllä, vaikka kentän tensoriluonteesta johtuen se on mutkikkaampi mekanismi kuin valolla. Braginskin laite muodostuu **kahdesta ristissä olevasta sauvasta**, jotka pannaan pyörimään. Gravitaatioaalto pyrkii laitteeseen osues-

Taulukko 3.2. Toimivia tai koekäytössä olevia gravitaatioantenneja. Oikeanpuoleisimmassa sarakkeessa on arvio siitä onko laitteella aaltoja havaittu.

Sijainti	Tyyppi	Massa (kg)	Aaltoja havaittu
Maryland, USA	Weberin sylinteri	1500	on?
Argonne, USA	– ” –	1500	on?
Glasgow, Skotlanti	– ” –	500	ei
New Jersey, USA	– ” –	3500	ei
Rochester, USA	– ” –	3500	ei
Moskova, NL	– ” –	1500	ei
Malibu, USA	laser interferometri	–	ei
Frascati, Italia	Weberin sylinteri	1500	ehkä?
München, L-Saksa	– ” –	1500	ehkä?
Pariisi, Ranska	– ” –	1500	ei
Kalifornia, USA	jäähdytetty Weberin sylinteri	4500	
Louisiana, USA	– ” –	4500	
Rooma, Italia	– ” –	4500	

saan vääntämään sauvoja eri suuntiin niin, että sauvojen välinen kulma pyrkii poikkeamaan 90 asteesta. Jos laite asetetaan tekokuuhun Maan kiertoradalle, ulkoiset häiriöt saadaan miltei kokonaan poistetuksi.

Taulukossa 3.2 on lueteltu tärkeimmät tällä hetkellä toimivat tai koekäytössä olevat gravitaatioantennit. Ensimmäisinä luettelossa ovat itsensä Weberin kaksi sylinteriä Washingtonin ja Chicagon lähellä. Melkein kaikki muut laitteet on rakennettu saman periaatteen mukaan.

Eniten mielenkiintoa on luettelon kolmella viimeisellä sylinterillä. Ne ovat ensinnäkin painavimmat kuin yhdetkään aikaisemmat, mutta ennen kaikkea ne jäähdytetään lähelle absoluuttista nollapistettä. Näin saadaan lämpöliikkeestä aiheutuvat häiriöt, ”kohina”, pienenevästi huomattavasti, ja tämä parantaa herkkyyttä ainakin tuhansia kertoja paremmaksi.

Jäähdytettyjä Weberin sylintereitä on rakennettu kolme, kaksi Yhdysvaltoihin ja yksi Italiaan. Päämääränä on itse asiassa saada kuhunkin paikkaan kolme sylinteriä niin, että ympäri vuorokauden voidaan kolmella paikkakunnalla tarkkailla taivaalta tulevia gravitaatioaaltoja.

Sylinterit jäähdytetään alimpaan saavutettavaan lämpötilaan, joka on ehkä vain kolme tuhannesosa astetta absoluuttisen nollapisteen yläpuolella. Laitteiden rakentajien oman arvion mukaan niiden herkkyyks on jopa miljoona kertaa parempi kuin huoneenlämmössä pidettävien nykyisten antennien. Jäähdytetyillä sylintereillä pystytään havaitsemaan tunnetuista lähteistä, esim. kaksoistähdistä tulevaa gravitaatiohäilyä. Yhdessä toimiessaan kolme antennia pystyy myös määrittämään sen suunnan, josta gravitaatiopulssi saapuu niin, että gravitaatiohavainnot voidaan yhdistää sähkömagneettisen spektrin eri aallonpituuksilla mahdollisesti tehtyihin havaintoihin. Tämä merkitsee jo uuden tähtitieteen alan, gravitaatioastronomian, alkua.

Tällä hetkellä, vuoden 1977 puolivälissä, uusien laitteiden havainnoista ei ole vielä tullut tietoja. Ainoat väitteet aaltojen havaitsemisesta tulevat edelleen Weberiltä.

Onko gravitaatioaaltoja havaittu?

Kuten edellä on jo todettu, Weber arvelee havainneensa Linnunradan keskustassa syntyviä gravitaatioaaltoja. Hänen kaksi sylinteriään Washingtonin ja Chicagon lähellä rekisteröivät jatkuvasti päivittäin noin kolme samanaikaista häiriötä, jotka Weberin mukaan voivat johtua ainoastaan gravitaatiopulseista.

Kun tunnetaan Weberin laitteen herkkyyks, voidaan laskea miten voimakas lähteen täytyy olla. Ja tässä tullaan pulman eteen. Jokainen Weberin pulssi vastaa voimakasta Linnunradan keskustassa tapahtunutta supernovaräjähdyttä tai tähden luhistumista. Tähtitieteilijöiden on vaikea uskoa, että vuosittain Galaksimme keskustassa vapautuu tuhansia Auringon massoja gravitaatiohäilyinä. Muutamat laskut puhuvat jopa miljoonien tähtien räjähtämisestä vuosittain.

Jos Weberin havaitsemat pulssit ovat todellisia, ne ovat ilmeisesti merkkejä aivan uusista astrofysikaalisista ilmiöistä, joiden selvittäminen voi muuttaa koko käsityksemme galaksien ja maailman-kaikkeuden rakenteesta.

Toinen syy miksi kaikki eivät pidä Weberin havaintoja gravitaatioaaltoina on se, että mitkään muut tutkimusryhmät eivät ole niitä havainneet.

Viitisen vuotta sitten aloittivat ensimmäiset taulukossa 3.2 mainituista muista gravitaatioantenneista toimintansa. Sen jälkeen ne ovat koettaneet kuukausia ja vuosia rekisteröidä avaruudesta tulevia painovoimapulsseja, mutta yksi toisensa jälkeen tutkimusryhmät ovat

ilmoittaneet: "Emme ole havainneet gravitaatioaaltoja".

Mitkään muut antennit eivät kylläkään ole täsmälleen samanlaisia kuin Weberin. Niissä on eroa sylinterien massassa, ilmaisulaitteissa ja tietokonekäsittelyssä. Lähimpänä Weberin järjestelmää on Münchenin ja Frascatin sylinteripari, ja se on myös muutamissa kokeissa saanut tilastollisesti merkittäviä määriä yhteensattuvia häiriöitä. Ne voivat olla samoja signaaleja kuin Weberillä.

Muidenkin tutkijoiden laitteissa tapahtuu toisinaan aivan ylittäen odottamattomia hyppäyksiä. He eivät kuitenkaan tulkitse näitä gravitaatioaaltoiksi, joskaan eivät niiden aiheuttajaa pysty yleensä ilmoittamaan.

Muut tutkijat ovat myös käsitelleet Weberin heille antamia tietokonenuhoja, joihin on rekisteröity kaikki hänen sylinteriensä häiriöt. Eräät ovat sitä mieltä, että he eivät pysty näistä nauhoista näkemään mitään aaltoja, mutta useimmat sentään saavat saman tuloksen kuin Weber: nauhoilla todella on samanaikaisia häiriöitä enemmän kuin sattuma edellyttäisi (ks. oheinen piirros).

Olisi tietysti hauskaa antaa lukijoille selvä vastaus kysymyksen, onko gravitaatioaaltoja havaittu vai ei, mutta valitettavasti se on tällä hetkellä mahdotonta. Weberin havaitsemat signaalit voivat johtua muistakin seikoista kuin painovoimapulsseista, mutta ne voivat toisaalta olla myös juuri sitä mitä etsitäänkin, painovoima-aaltoja.

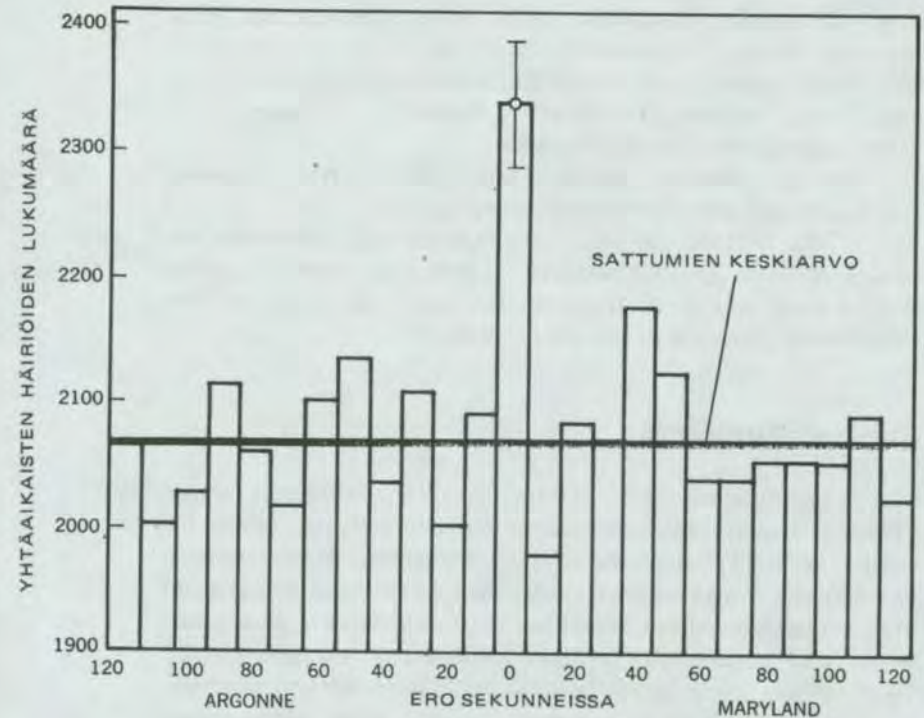
Lähettyessään tätä kirjaa varten pari valokuvaa talvella 1977 Weber kommentoi itse tämänhetkistä tilannetta seuraavasti:

"Vuosina 1969 ja 1970 julkaisin havaintotuloksia yhteensattuvista pulsseista Marylandin yliopiston ja Argonnen kansallisen laboratorion gravitaatioantennien välillä. Joukko muita fyysikoita on suorittanut samanlaisia kokeita tehtyään ensin laitteisiin ja tulostenkäsittelyyn muutoksia, joiden tarkoituksena on ollut herkkyyden parantaminen. Muut tutkijaryhmät eivät ole havainneet pulsseja, ja näin on syntynyt ristiriita.

Inhimilliset tekijät voivat vaikuttaa tulosten käsittelyyn. Siksi vuoden 1972 jälkeen en ole suoraan ottanut siihen osaa. . . .

Suuri ponnistus on tehty kaikkien laskuvirheiden löytämiseksi. Magneettinauhojemme kopioita ja yhteensattuvien signaalien luetteloita on lähetetty muihin laboratorioihin. Merkittäviä virheitä löytyi ja ohjelmat korjattiin huolellisesti.

[Hyvin seikkaperäisten] tarkistusten jälkeen voidaan päätellä, että uusimmissa tuloksissamme ei ole laskuvirheitä eikä inhimillisten tekijöiden virhevaikutusta. Olemme jatkuvasti havainneet Argonnen ja Marylandin gravitaatioantennien välillä tiettyinä jat-



Joseph Weberin mittaustulokset eräältä neljän päivän jaksolta. Vaaka-asteikolla on Marylandin ja Argonnen antenneilla havaittujen häiriöiden aikaero, pystyakselilla häiriöiden määrä. Jos häiriöt olisivat satunnaisia, niitä olisi kaikilla aikaeroilla yhtä paljon (vaakasuora viiva). Kuvassa on kuitenkin selvä huippu niiden signaalien kohdalla, jotka ovat sattuneet molemmissa antenneissa yhtä aikaa. Weber vetää tästä sen johtopäätöksen, että antenneihin on osunut gravitaatiopulsseja. (Kuva *Physics Today*, marraskuu 1975, s. 15.)

kuvina aikaväleinä vuosina 1973 ja 1974 yhteensattumia enemmän kuin pitäisi. . . .

Olen käynyt muissa laboratorioissa, jotka ovat rakentaneet gravitaatioantenneja, ja olen saanut hyvän kuvan monista uusista ja nerokkaista piirteistä.

Kauniilla rakenteella voi kuitenkin olla huono herkkyys elektroniikan ja tulostenkäsittelyn liiallisen kohinan ja lämpötilansäätöongelmien takia. Marylandissa käytetään nykyisin kahta tietojenkäsittelymenetelmää. Kaikki muut ryhmät käyttävät pääasiassa vain yhtä menetelmää. . . .

Esimerkiksi käydessäni 1973 Bellin laboratoriossa [New Jerseyssä] totesin, että etuvahvistimien kohina oli paljon suurempi kuin Marylandissa ja että Rochesterin antennissa ei ole mitään tehokasta lämpötilansäätöä ja riittämätön äänieristys. . . . Münchenissä käynti paljasti heikon lämpötilansäädön. . . .

Nämä [huomiot] selittävät miksi jotkut havaitsijat saavat gravitaatio-asteilykokeistaan negatiivisia tuloksia.

Tällä hetkellä me ja muut tutkimusryhmät kehitämme entistä herkempiä gravitaatio-asteilyn havaitsijoita. Niissä käytetään alhaista lämpötilaa ja sylinteriantenneja, jotka ovat suuria, melkein virheettömiä yhtenäisiä pii- tai safiirikristalleja.”

Gravitaatioastronomia

Radioinsinööri Karl Jansky kirjoitti 1930-luvun alussa: ”Tuntemattomasta lähteestä tulevia sähkömagneettisia aaltoja havaittiin korkeilla taajuuksilla tehdyssä koesarjassa. Näiden aaltojen tulosuuntaa on tarkkailtu yli vuoden ajan. Se ajanhetki, jolloin aallot ovat voimakkaimmillaan, muuttuu hiljaksen vuoden aikana sillä tavoin, että muutos selittyy Maan kiertämisestä Auringon ympäri. Tästä voidaan tehdä se johtopäätös, että näiden aaltojen saapumissuunta avaruudessa on muuttumaton, so. että aallot tulevat jostain lähteestä aurinkokunnan ulkopuolelta”.

Jansky arvasi aivan oikein, että radioaallot tulevat Linnunradan keskustasta. Näillä havainnoilla, joista ensimmäiset tehtiin 1932, avautui ensimmäinen tähtitieteen uusista ikkunoista, radioastronomia. Siihen asti oli voitu tehdä vain optisia havaintoja valon aallonpituuksilla.

Janskyn ensimmäisten havaintojen jälkeen suoritettiin laskelmia, mitä hyötyä radiotähtitieteestä voi olla. Laskut antoivat tulokseksi, että taivaalla on hyvin vähän sellaisia kohteita, joista tulee havaittavaa radiosäteilyä.

Tuohon aikaan optiset havainnot eivät olleet paljastaneet kaikkia niitä voimakkaita radiolähteitä, jotka tänään tunnetaan. Vasta 1940-luvun lopulla radioastronomia alkoi saavuttaa merkitystä ja samalla löytää yhä uusia taivaan kohteita, jotka näkyvät parhaiten radiosäteilyn alueella. Tänään ei voisi kuvitellakaan tähtitiedettä ilman radioteleskooppia.

Gravitaatioantennien suunnittelijoita on verrattu sokeisiin, joilla on hyvin hämärä käsitys siitä, mitä ympärillä voi näkyä. Tai ehkä

vielä parempi vertaus ovat Venuksen pinnan asukkaat, jotka pilvi-peatteen läpi koettavat selvittää maailmankaikkeuden rakenteen. Heidän on tehtävä ensimmäiset laitteensa lähes summan mutikassa, eikä niiden voi tietenkään kuvitella antavan hyviä tuloksia.

Olipa Weber todella havainnut aaltoja tai ei, gravitaatiotähtitieteen tulevaisuus näyttää kirkkaalta. Seuraavan kymmenen vuoden kuluessa voimme arvella saavamme gravitaatioaaltojen avulla tietoja sellaisista kohteista, joita on muuten vaikea tarkkailla: painovoimaluhihistoriasta, supernovien sisuksista, mustista aukoista, lähekkäisistä kaksoistähdistä, ehkä pulsareista. Gravitaatioastronomia voi esittää tuttuja ilmiöitä aivan tuntemattomassa valepuvussa, ja mikä jännittäväintä, se voi paljastaa kokonaan uusia maailmankaikkeuden ilmiöitä.

Gravitaatioantennien herkkyyttä ja erotuskykyä voidaan jo nykyisellä tekniikalla huomattavasti parantaa. Weberin alkuperäisen mallin mukaan rakennettu, hyvin alhaiseen lämpötilaan jäähdytetty ja uusien havaintolaitteiden varustettu sylinteri voi olla miljoonia kertoja tavallista herkempi. Ensimmäiset tällaiset laitteet (taulukon 3.2 kolme alinta sylinteriä) voivat aloittaa toimintansa aivan lähiaikoina, ja tällöin voimme jo odottaa jonkin tunnetun lähteen havaitsemista gravitaatioaalloilla – erittäin merkittävä saavutus.

Seuraavana askeleena eteenpäin on laajojen kansainvälisten antenniverkkojen rakentaminen, jotka tarkkailevat jatkuvasti taivasta kaikilla suunnilla. (Maapallohan ei tässä ole onneksi esteenä, koska säteily kulkee heikentymättä suoraan sen läpi. Näin jo yksi antenni tarkkailee itse asiassa koko avaruutta.) Laajat antenniverkot pystyvät yhä tarkemmin määrittämään myös tulevan säteilyn suunnan.

Merkittävä hyppäys saavutetaan kun havaintolaitteet, esim. suuri Weberin sylinteri, nostetaan avaruuteen maapallon kiertoradalle. Ympäristön häiriöt ovat täällä paljon vähäisemmät kuin epävakaa maankuoren päällä, ja niinpä avaruudessa antenni voi odottaa aivan hiljaisena rekisteröidäkseen sitten gravitaatiopulssin heikon iskun.

Ihminen tarkkailee jo taivasta kaikilla sähkömagneettisen säteilyn aallonpituuksilla: näkyvässä valossa, radio- ja infrapunasäteilyssä maan päällä ja ultravioletti-, röntgen- ja gammasäteissä kiertoradalla. Toinen, yhä enemmän merkitystä saava havaintoalue on avaruudesta tuleva hiukkassäteily (kosmiset säteet), jonka tutkimisessa uusimpana vaiheena **neutriinoastronomia** on ottamassa ensimmäisiä askeleita. Neutriinon avulla voidaan saada ensimmäiset vilaukset tähtien ytimistä, ja nyt kolmas avautumassa oleva ikkuna, **gravitaatioastronomia**, auttaa meitä tunkeutumaan yhä syvemmälle näkyvien pintojen alle, yhä mielikuvituksellisempiin tähtitaivaan ilmiöihin.

NÄKYMÄTTÖMÄT TÄHDET

Taivaalla tuikkivat tähdet näyttävät pysyvän aina samanlaisina. Kuitenkin tähdet syntyvät, elävät ja kuolevat kuten kaikki muukin täällä maailmankaikkeudessa. Tässä luvussa käsitellään tähtien elämän viimeisiä, jännittävimpiä aikoja, mutta ensin palautetaan lyhyesti mieliin niiden varhaisemmat elämänvaiheet.

Nykyisen käsityksen mukaan tähdet syntyvät tiivistymällä tähtienvälisistä kaasu- ja pölypilvistä. Alkuvaiheissa tähti saa ainoan energiansa siitä, että se kutistuu painovoiman vaikutuksesta pienemmäksi. Tämä tiivistymisvaihe kestää pilven massasta riippuen kymmeniätuhansia - satoja miljardeja vuosia. Kutistumisen aikana tähden sisuksen lämpötila nousee, kunnes lopulta se on tarpeeksi suuri ydinreaktioiden alkamiselle.

Tähden keskustassa vetyatomit alkavat yhtyä heliumiksi ja vapauttaa samalla energiaa. Kun ydinreaktiot ovat päässeet täyteen vauhtiin, tähti on saavuttanut hyvin vakaan, rauhallisen vaiheen: siitä on tullut ns. pääsarjan tähti. Tämä vaihe on tähden elämän keskikä, joka kestää miljoonia tai miljardeja vuosia. Esimerkiksi oma Aurinkomme on tällä hetkellä vakaassa pääsarjavaiheessa. Sen aikana keskusosien vety muuttuu vähitellen heliumiksi. Pääsarjavaiheen pituus ja tähden myöhempi kohtalo riippuvat tähden massasta ja kemiallisesta koostumuksesta, jonkin verran myös pyörimisnopeudesta (impulssimomentista) ja magneettikentästä. Mitä suurempi massa tähdellä on, sitä nopeammin se kehittyy. Kaksoistähdissä kehitykseen voi suuresti vaikuttaa myös toinen, lähelläoleva tähti.

Sitten kun vetyvarasto alkaa huveta, tähden rakenne muuttuu: ulko-osat laajenevat ja keskusta tiivistyy. Jos tähden massa on suurempi kuin Auringon, sisuksen lämpötila nousee tarpeeksi korkealle seuraavan ydinreaktioketjun alkamiseksi. Siinä heliumytimet vuorostaan yhtyvät, muodostavat hiiliatomeja ja vapauttavat energiaa. Lämpötilan edelleen kohotessa siirrytään seuraavaan ydinreaktioon, ja niin edelleen.

Kaikissa tähdissä tulee kuitenkin lopulta eteen se tilanne, jossa polttoaine rupeaa loppumaan. Tällöin alkaa tähden elämässä



Planetaarinen sumu NGC 7293 Vesimiehen tähdistössä. Sumun keskellä näkyy tähti, joka eräissä kehityksensä vaiheissa on puhaltanut kuorensa ulko-osat avaruuteen. Kaasupilvi laajenee jatkuvasti parinkymmenen kilometrin sekuntinopeudella.

voimakkaimpien muutosten vaihe, jonka tarkkaa kulkua ei kaikille tähdille vielä ole onnistuttu selvittämään. Kehityksen lopputulos on kuitenkin tiedossa: tähti päättyy valkoiseksi kääpiöksi, neutronitähdiksi tai mustaksi aukoksi, ellei se sitä ennen ole kokonaan räjähtänyt hajalle.

Valkoiset kääpiöt

Tähdet, joiden massa on pienempi kuin suunnilleen 1,2 Auringon massaa ja jotka eivät ole kaksoistähtiä, kehittyvät nykyisten teorioitten mukaan melko rauhallisesti valkoisiksi kääpiöiksi. Vety- ja heliumvaraston hupertessa tähden keskusta on tiivistynyt ja kuumentunut ja ulko-osat ovat taas laajentuneet ja jäähtyneet. Tähdestä on tullut punainen jättiläinen. Vähitellen tähden kuumen sisuksen säteily puhaltaa ulkokerroksen kokonaan pois, ja niistä tulee planetaarinen sumu, samanlainen kuin Lyyran tunnettu rengassumu.

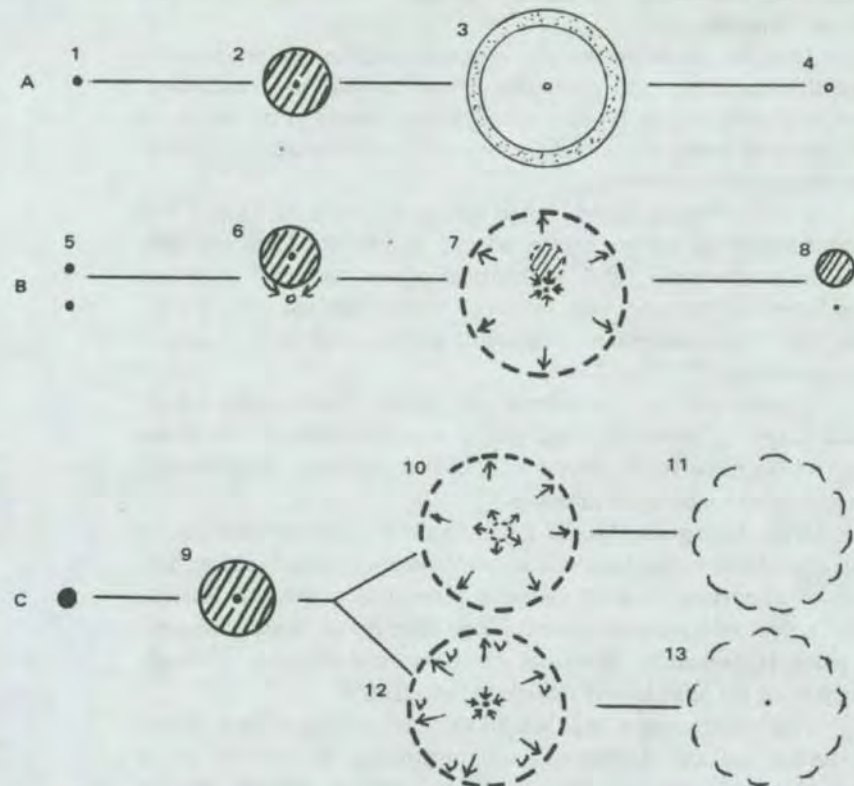
Tähden jäljelle jäänyt sisus yhä kutistuu polttoaineen loputtua

Tähtien kehityskulkuja

A. Yksinäinen suunnilleen Auringon massainen tähti (1) kuluttaa loppuun suurimman osan ydinenergiastaan, jolloin sen sisus kutistuu ja ulkokuori laajenee: tähdestä tulee punainen jättiläinen (2). Ulkokuoret pyyhkiytyvät hiljakseen avaruuteen muodostaen planetaarisen sumun (3) ja jättäen jälkeensä valkoisen kääpiön (4).

B. Kaksoistähtijärjestelmässä kehitys on aluksi samanlainen. Toinen tähdistä ehtii kuvan tapauksessa valkoiseksi kääpiöksi toisen ollessa vielä punainen jättiläinen (5). Nyt jättiläistähddestä kuitenkin siirtyy nopeasti ainetta kääpiöön (6), jonka massa ylittää kriittisen rajan, ja seurauksena on supernova (7): tähden sisäosa luhistuu ja ulko-osa räjähtää pois. Jäljelle jää tavallinen jättiläistähti ja pieni, massiivinen kappale, joka voi olla neutronitähti tai musta aukko (8).

C. Hyvin massiivinen tähti kehittyy myös aluksi punaiseksi jättiläiseksi (9), jolla on tiheä keskusta. Nyt keskustan lämpötila voi kasvaa lopulta niin suureksi, että hiili alkaa "palaa". Hiilen äkillinen palaminen voi aiheuttaa supernovaräjähdyksen (10), jossa koko tähti hajoaa eikä jäljelle jää muuta kuin laajeneva kaasupilvi (11). Toinen mahdollisuus on, että hiilen palaminen vapauttaa niin paljon neutriinoja, että ne räjäyttävät ulkokerrokset hajalle supernovana (12) mutta jättävät jäljelle tähden luhistuvan ytimen. Siitä tulee joko pulsari (neutronitähti) tai musta aukko, jota ympäröi laajeneva kaasupilvi (13).



ja sen ytimen lämpötila aluksi kasvaa. Lämpötila saavuttaa tietyn maksimin (noin miljardi astetta) ja alkaa sitten pudota samalla kun kutistuminen pysähtyy. Aineen tiheys tähden keskustassa on noussut kymmeniintuhansiin kiloihin kuutiosenttimetrissä. Tähti koostuu pääasiassa vapaista elektroneista ja protoneista. Mahtava painovoima ja elektronikaasun paine pitävät tähden tasapainossa. Tähden säde on supistunut noin 10 000 kilometriin: siitä on tullut valkoinen kääpiötähti.

Valkoinen kääpiö on saanut nimensä siitä, että sen säteilemä valo on hyvin valkoista, usein sinertävää, normaalitähtiin verrattuna. Tämä johtuu siitä, että sen pintalämpötila on kymmeniätuhansia asteita, kun esimerkiksi Aurinkomme pinnalla on "vain" kuutisentuhatta astetta.

Valkoinen kääpiö on siis maapallon kokoinen, mutta tavallisen

tähden massainen kappale, tavattoman tiheä ja kuuma. Ydinreaktiot ovat muuttaneet sen koostumusta niin, että alkuaan suunnilleen Auringon kokoiset tähdet ovat muuttuneet melkein puhtaaksi magnesiumiksi, kun taas pienemmät tähdet ovat jääneet lähes kokonaan heliumiksi.

Valkoiset kääpiöt ovat hyvin tavallisia tähtiä. Esimerkiksi Auringon lähiympäristössä tällaisia on ainakin joka kymmenes tähti.

Vaikka tähti on valkoiseksi kääpiöksi tullessaan käyttänyt jo kaiken polttoaineensa, sen taru ei suinkaan ole vielä lopussa. Sillä on edessään hyvin pitkä, rauhallinen vanhuus.

Valkoisen kääpiön sisällä piilee valtava määrä lämpöenergiaa, jonka poissäteileminen voi kestää yhtä kauan kuin pääsarjajaihe: miljardeja vuosia. Tänä aikana lämpö siirtyy hiljakseen tähden sisuksesta pinnalle ja katoaa siitä avaruuteen. Tähti muuttuu valkoisesta kää-

piöstä keltaiseksi kääpiöksi ja edelleen punaiseksi kääpiöksi sitä mukaa kuin sen lämpötila laskee.

Tähti käy vanhetessaan yhä vaikeammaksi havaita. Sen säteilyn maksimikohta siirtyy yhä pitempiin aallonpituuksiin ja samalla heikkenee. Jäähtyminen on lopulta edennyt niin pitkälle, että tähteä on kaukoputkella mahdoton nähdä: se on muuttunut mustaksi kääpiöksi, näkymättömäksi tähdeksi.

Tässä vaiheessa tähteä voi jo ruveta pitämään kuolleena. Viimeiset hivenet sisuksessa kerran olleista mahtavista lämpömääristä haihtuvat avaruuteen. Tähti muistuttaa planeettaa paitsi kooltaan myös lämpötilaltaan. Se vain heijastaa muiden tähtien valoa pystymättä enää itse säteilemään. Vain suuri painovoimakenttä ja valtava tiheys erottavat sen planeetoista.

Kuinka paljon avaruudessa on piilossa sammuneita tähtiä, mustia kääpiöitä? Niiden lukumäärää on vaikea arvioida, koska ainutakaan ei ole havaittu. Ne voivat kuitenkin muodostaa huomattavan osan kaikesta Linnunradan massasta.

Jopa Auringolla voi olla tällainen pieni pimeä seuralainen. Se ei voi massaltaan kuitenkaan olla aivan Auringon suuruusluokkaa, sillä silloin se aiheuttaisi jo selviä häiriöitä planeettojen radoissa. Kääpiötähdet voivat olla pienimassaisempiakin. Alin massa, jossa ydinreaktiot pääsevät sisukseen alkamaan, on sadasosa Auringosta. (Planeetta Jupiter on siis ollut lähellä tähdeksi ylenemistä!)

Pari vuotta sitten eräs amerikkalainen tutkija julkaisi laskelmia, joiden mukaan Auringolla voisi olla pimeä seuralainen, jonka massa olisi noin sadasosa Auringosta ja etäisyys tuhansia kertoja niin suuri kuin maapallon. (Uloimman tunnetun planeetan Pluton keskietäisyys on noin 39 kertaa maapallon etäisyys.) Näin kaukana toisistaan olevia kaksoistähtijärjestelmiä tunnetaan muitakin, joten ajatus ei ole aivan mahdoton. Tutkija antoi tähdelle jo nimenkin: Lucifer. Mitään havaintoja tällaisesta tähdestä ei kuitenkaan vielä ole.

Supernovat

Kaikki tähdet eivät vanhene yhtä arvokkaasti kuin valkoiset kääpiöt. Muutamilla tähdillä ”vaihdevuodet” merkitsevät hyvin äkillistä ja raivokasta muutosta. Tällaisia tähtiä ovat ennen kaikkea raskaat tähdet, joiden massa on huomattavasti Auringon massaa suurempi, sekä useat kaksoistähdet. Ne voivat eräissä vaiheissa leimahtaa supernoviksi.

Supernovien räjähdykset ovat harvinaisia, mutta sattuessaan ne ovat ehkä näyttävimpiä tähtitaivaan ilmiöitä. Tavallisten tähtien valossa havaitaan monenlaisia muutoksia. Jotkut ovat pimennysmuuttujia, toiset purkautuvia tai sykkiviä tähtiä. Voimakkaampaa muutosta edustavat novat, joiden valovoima nousee ehkä 10 000 kertaa niin suureksi kuin aikaisemmin. Novat selitetään räjähdyksillä, joita sattuu massavirtausten seurauksina lähekkäisissä kaksoistähtijärjestelmissä ja jotka sinkoavat avaruuteen pienen määrän ainetta tähden pinnalta.

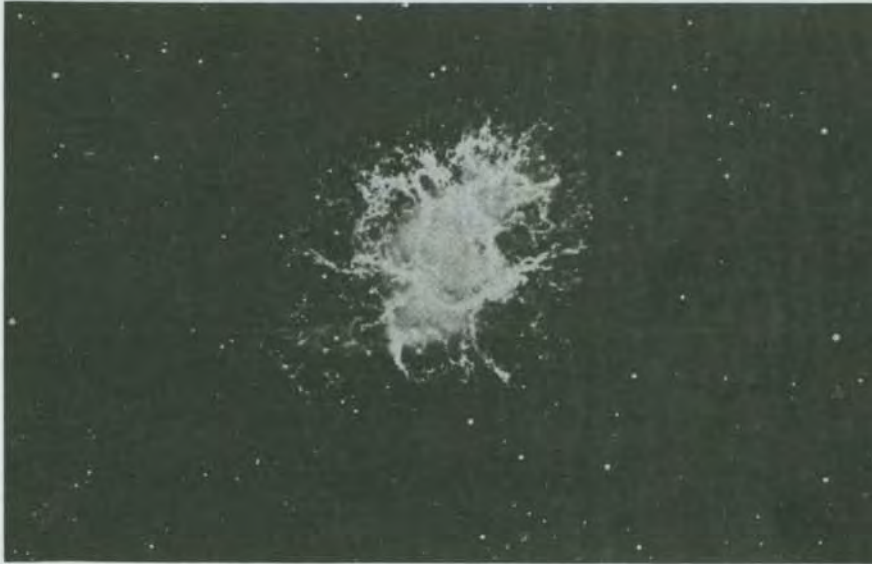
Nämä kaikki ilmiöt ovat kuitenkin hyvin vaatimattomia verrattuna supernovaan. Supernova merkitsee yleensä kokonaisen tähden räjähtämistä, jonka aikana sen valovoima voi kasvaa jopa 10 miljardia kertaa niin suureksi kuin aikaisemmin. Paikalla missä suurimpien kaukoputkien valokuvauslevyillä ei aikaisemmin ehkä näy jälkeäkään tähdestä, syttyy uusi silminnäkyvä valopiste.

Jos supernova räjähtää lähellä Aurinkoa, se loistaa niin voimakkaalla valolla, että se on päiväsaikaankin helposti nähtävissä. Tällaisia ilmiöitä tapahtuu kuitenkin harvoin: viimeisen tuhannen vuoden aikana maapallolta on nähty vain neljän supernovan leimahdus Linnunradassa.

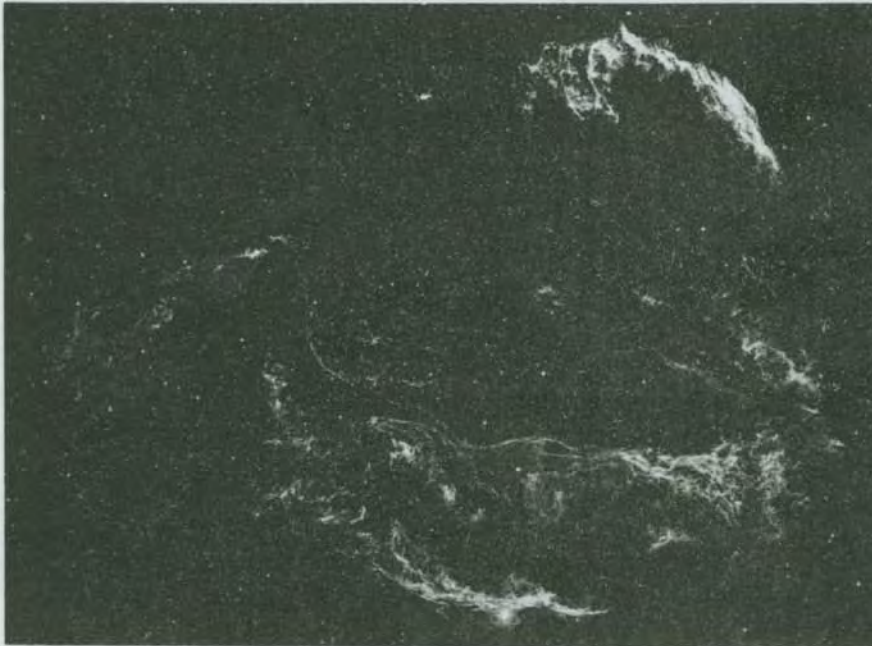
Tunnetuin näistä neljästä on ehkä se ”vierastähti”, jonka kiihkeitä näkivät Härän tähdistössä vuonna 1054. Tämän räjähdysten jäännökset voidaan nykyään kaukoputkella nähdä Äyriäissumuna. Vuoden 1572 supernovalla saattoi olla suuri vaikutus tähtitieteen kehittämiseen. Kertomuksen mukaan se sai tanskalaisen Tycho Brahen innostumaan tähtitieteestä ja aloittamaan havaintotyöt joiden vertaisia ei aikaisemmin ollut tehty. Vuoden 1572 supernovaa sanotaankin Tychon tähdeksi. Viimeisin havaittu supernova omassa Linnunradassamme sattui vuonna 1604 ja sai nimen Keplerin tähti. (Neljäs, varhaisin supernova sattui vuonna 1006 Jäniksen tähdistössä.)

Vielä yksi supernova sattui 1600-luvulla, mutta siitä ei ole säilynyt havaintoja. Cassiopeia A-nimisen radiolähteen kohdalta on löytynyt muodostelmia, joiden on päätelty syntyneen vuoden 1667 paikkeilla supernovaräjähdyksessä. Tämä oli ehkä tavallista himmeämpi supernova ja sattui jonkin tähtienvälisen pölypilven takana. – Viimeisen 300 vuoden aikana Linnunradassamme ei ilmeisesti ole räjähtänyt supernovaa.

Supernovien keskimääräisestä esiintymistiheydestä saadaan tietoja tutkimalla muissa galakseissa räjähtäviä tähtiä. Tällaisia on viimeisen sadan vuoden aikana havaittu nelisensataa, ja niitä etsitään systemaattisesti koko ajan. Niistä on voitu laskea, että supernovia



Kahden supernovan jäännökset. Ylemmässä kuvassa on Äyriäissumu, joka sai alkunsa vuoden 1054 supernovassa. Sumun keskeltä on löydetty nopea pulsari. Alempana näkyvät paljon vanhemmat, noin 160 000 vuotta sitten räjähtäneen tähden jäännökset (NGC 6990 ja 6992/95).



sattuu jokaisessa galaksissa keskimäärin 50 vuoden välein.

Oma Linnunratamme on siten ollut oudon hiljainen viime vuosisatoina. Seuraava supernova voi kuitenkin räjähtää milloin tahansa. Nykyisellä tähtitieteilijäskupolvella on paremmat kuin 50 prosentin mahdollisuudet havaita läheinen supernova.

Ei ole kuitenkaan sanottua, että Linnunradassa sattuva supernova olisi kovin komea. Kanadalainen astronomi van den Bergh laski pari vuotta sitten, että vain kymmenisen prosenttia supernovista näyttäisi yhtä kirkkailta kuin planeetta Jupiter ja vain 40 % niistä yleensä näkyisi paljain silmin. Yli puolet vaatisivat siten havaitsemista varten kaukoputken.

Parhaimmillaan supernova on kuitenkin mahtava ilmentys. Erään supernovan hajonneita jäännöksiä tutkimalla tähtitieteilijät ovat laskeneet, että 5000–10 000 vuotta sitten maapallolla näkyi supernova, joka loisti täysikuuta kirkkaampana. Se tapahtui eteläisellä pallonpuoliskolla Velan tähdistössä. Supernova on ollut alkuvaiheissaan väriltään tulipunainen ja se on loistanut yötaivaalla kuu-kausia. Velan supernova on ollut voimakkaimpia tähtitaivaan ilmiöitä mitä ihmissilmä on nähnyt. Se on varmasti ollut muistamisen arvoinen sukupolvien ajan. Vahinko, että kirjoitustaito keksittiin vasta juuri näiden aikojen jälkeen.

Miksi tässä puhutaan supernovista, vaikka tämän luvun otsikkona on ”näkyvät tähdet”? Syynä on se, että supernoväräjähdyksessä saattaa samalla merkityksellä uudentyyppisen, valkoista kääpiötä paljon tiheimmän ja pienikokoisemman tähden syntyä.

Supernovat jaetaan käyttäytymisensä perusteella kahteen ryhmään, tyyppiin I ja tyyppiin II supernoviin. Niiden syntymekanismien ajatellaan myös olevan erilainen.

Tyyppiin I supernova on tämänhetkisten käsitysten mukaan kaksoistähtijärjestelmään kuuluva tähti, joka on kehittynyt normaaliin tapaan valkoiseksi kääpiöksi. Jos sen seuralainen on hyvin lähellä, voi seuralaisesta kuitenkin ruveta virtaamaan valkoiseen kääpiöön ainetta. Kääpiön massa kasvaa ja ylittää lopulta sen rajan, jossa elektromagneettisen paineen jaksaa pitää lisääntyneen painovoiman kurissa. Tähti luhistuu äkillisesti sisäänpäin. Tässä vapautuu suuret määrät energiaa, joka räjäyttää tähden ulkokuoret pois. Jäljelle jää vain tavattoman tiheä neutronitähti. Sen olemassaolo voidaan havaita röntgensäteilystä, joka aiheutuu seuralaisesta neutronitähteen putoavasta ainevirtauksesta.

Tyyppiin II supernova on yksinäinen tähti, jonka massa on useita kertoja niin suuri kuin Auringon. Sen keskustassa tiheys ja

lämpötila nousevat niin suureksi, että heliumin palamisen jälkeen hiili alkaa palaa. Hiilen palaminen vapauttaa energiaa, joka edelleen kuumentaa tähden ydintä. Kuumeneminen puolestaan nopeuttaa hiilen ydinreaktioita. Seurauksena voi olla katastrofi, jossa koko hiilivarasto ”palaa” äkillisessä leimahduksessa ja räjäyttää tähden hajalle kuin valtava dynamiittilataus.

Hiilen äkillinen palaminen todella useimmiten hajottaa koko tähden aineen tähtienväliseen avaruuteen, eikä jäljelle jää muuta kuin nopeasti leviävä kaasukuori. Joissain oloissa hiilen palaminen voi kuitenkin sujua rauhallisemmin. Tällaisella tähdellä on tavattoman kuuma ydin, joka tuottaa suuria määriä neutriinoja. Neutriinot ovat massattomia ja varauksettomia alkeishiukkasia, jotka pääsevät ytimestä pakenemaan suoraan tähden ulkopuolelle vieden mukanaan energiaa.

Hiilen palaminen ja neutriinon pakeneminen nostavat tähden lämpötilaa, mikä edelleen nopeuttaa neutriinon tuottamista. Lopulta neutriinot ovat kuljettaneet tähdestä pois niin paljon energiaa, että se ei enää jaksaa pysyä ehjänä, vaan valtavan painovoimansa alla luhistuu kasaan. Keskustan luhistuminen sekunnin tuhannesosassa valkoisesta kääpiöstä paljon tiheämmäksi kappaleeksi vapauttaa niin paljon neutriinoja, että ne ulos syöksyessään räjäyttävät tähden ulkokuoret hajalle. Räjähdys nähdään maapallolla jälleen supernovana.

Tyyppin II supernova jättää siis jälkeensä joko pelkkää tuhkaa tai tavattoman tiheän kappaleen, joka laskujen mukaan on neutronitähti tai musta aukko.

Supernovan laajenevat ulko-osat säteilevät sen valon, joka maapallolla nähdään. Kun supernova joitakin päiviä räjähdys jälkeä on kirkkaimmillaan, sen laajeneva kuori on niin suuri, että sen sisään mahtuisi suunnilleen koko aurinkokunta. Maapallolla tehdyt mittaukset ovat osoittaneet, että kuori laajenee noin 5000 km/s nopeudella. Laajetessa lämpötila vähitellen pienenee ja maapallolla nähdään supernovan hiljaksen himmenevän. Lopulta kuoren lämpötila on laskenut muutamiin tuhansiin asteisiin, jolloin se alkaa heiketä nopeasti.

Vielä satojen tai tuhansien vuosien kuluttua kuoren jäännökset näkyvät taivaalla ohuina kaasuhaituvina, joista nykyajan tähtitieteilijät voivat lukea kertomuksia menneiden aikojen katastrofeista.

Neutronitähdet ja pulsarit

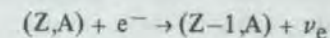
Jotta voitaisiin seurata mitä tapahtuu supernovan ydinosalet tähden luhistuessa, tulee meidän tietää ainakin aineen käyttäytymisen perusilmiöt suurissa tiheyksissä ja paineissa.

Alkeishiukkaset, aineen pienimmät rakenneosat, jaetaan kahteen luokkaan, fermioneihin ja bosoneihin, niiden sisäisen impulsimomentin l spinin mukaan. Fermionit (protonit, neutronit, elektronit jne), jotka ovat materian rakennelmien varsinaisia ”tiiliskiviä”, ovat luonteeltaan ”suomalais-ugrilaisia individualisteja”, jotka vaativat avaruudessa ja impulssijakautumassa määrätyn tilan viihtyäkseen. Tämä ns. Paulin kieltoääntö näkyy jo esim. valkoisten kääpiötähtien sisäisessä rakenteessa tiiviin degeneroituneen (tiivein mahdollinen tila) elektronikaasun paineen kompensoidessa painovoiman puristuksen.

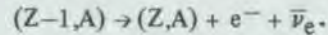
Toinen alkeishiukkasluokka ovat bosonit, jotka, vaikkakin voivat esiintyä myös vapaina, ovat varsinaista ”laastia” joiden avulla ”tiiliskivi-fermionien” väliset vuorovaikutukset nykyisten mallien mukaan tapahtuvat. Nämä bosonit, joihin kuuluvat mm. fotonit (sähkömagneettisen vuorovaikutuksen agentti) ja mesonit (ydinvoimien agentit), ovat huomattavasti sosiaalisemmin käyttäytyviä, sillä niitä ei Paulin kieltoääntö koske.

Paulin kieltoääntö tulee ratkaisevasti esiin, kun tiheän tähtimaterian ominaisuuksia tarkastellaan esim. neutronien β -hajoamisen $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$ tai käänteisen prosessin $e^- + p \rightarrow n + \nu_e$ kannalta. Näissä prosesseissa tapahtuu neutronien (n) ja protonien (p) ”mutaatioita” toisikseen, elektronien (e^-), ja massattomien neutriinon (ν_e), ja antineutriinon ($\bar{\nu}_e$) toimiessa energian ym. fysikaalisten suureiden säilymisilmit voimassa pitävinä ”apuhiukkasina”.

Erikoisesti ns. URCA-prosessilla on merkitystä tähtien energiatasapainoon. Tämä prosessi on sykli, jossa tähtimaterian atomityimet eivät muutu. Jos tähden sisuksen ytimet ovat esim. tyyppiä (Z, A), jossa Z on protonien lukumäärä ytimessä ja A protonien ja neutronien lukumäärien summa, on seuraava sykli mahdollinen:



Tässä ns. elektronisieppauksessa ytimen protoni menettää varauksensa muuttuen neutroniksi, ts. tähtimateria neutronisoituu. Syklin toinen vaihe syntyy ytimen (Z-1, A) yhden neutronin hajotessa



Kuten huomataan materian ytimet ("kemiallinen koostumus") eivät tässä ns. URCA-prosessissa muutu, syntyy ainoastaan neutriinon (ν_e) ja antineutriinon ($\bar{\nu}_e$) pareja, jotka kulkeutuvat vaivattomasti tähden sisuksista ulos vieden mukanaan energiaa neutriinosäteilyn muodossa. Tämän URCA-prosessin keksivät vuoden 1940 tienoilla Schönberg ja Gamow viimeksimainitun ollessa vierailevana tutkijana Schönbergin luona Rio de Janeirossa. Tieteellisissä piireissä ihmeteltiin kovin nimeä, jonka keksijät antoivat ilmiölle. Tiukan painostuksen jälkeen tutkijat suostuivat paljastamaan nimen alkuperän seuraavaksi: Riassa oli pelikasino nimeltään URCA, jossa tutkijat kävivät rentoutumassa, ja tässä kasinossa kävi useimmiten siten, että herrat poistui-
vat iltamyöhäisellä melkein samassa kunnossa kuin sisään mennessäänkin, ainoastaan rahat olivat hävinneet, kuten energia neutriinon mukana; lisättäköön, että huhujen mukaan Brasilian huumorintajuttomat viranomaiset sulki-
vat kasinon prosessin nimen selityksen tullessa julkisuuteen.

Tiheissä tähtien sisuksissa, esim. supernovien jäämistöissä tilanne on hieman toinen: URCA-prosessin jälkimmäinen osa jää pois, sillä tässä syntyvä elektroni ei todennäköisesti löydä paikkaansa jo muutenkin äärimmilleen tihentyneessä elektronikaasussa, ja näin ollen tähtimateria pysyvästi neutronisoituu.

Edellä selostettu ilmiö tapahtuu supernovan sisuksen romah-
taessa suurella nopeudella sisäänpäin. Sekunnin murto-osissa tähti-
materia neutronisoituu edellä kuvatulla tavalla ja lopulta aine on suurim-
massa mahdollisessa tiheydessään, joka vielä on kuviteltavissa, yhtenäisenä degeneroituneena neutronipuurona, jolloin tähden keski-
tiheys on atomiytimen tiheyden luokkaa, $10^{14} - 10^{15} \text{ g/cm}^3$.

Jos tähden massa ei ylitä kriittistä rajaa, joka on pari kertaa Auringon massa, luhistuminen pysähtyy tähän. Miljardien asteiden lämpöisen ydinpuuron, neutronikaasun, paine on niin valtava, että se pystyy vastustamaan painovoiman mahtavaa puristusta.

Jos tähden massa on tuota kriittistä rajaa suurempi, mikään voima ei pysty pitämään painovoimaa kurissa. Luhistuminen jatkuu hetkessä mustaksi aukoksi. Mutta siitä puhutaan vähän myöhemmin.

Supernovaräjähdyksestä jäljellejäänyt neutronitähti on ensimmäisten elinsekuntiansa aikana villisti kieppuva epäsäännöllinen möykky. Se pyörii ympäri kymmeniä tai satoja kertoja sekunnissa. Keskipakoisvoimat voivat tällöin olla niin suuria, että tähti niiden vaikutuksesta hajoaa moneen pienempään osaan.

Jokainen pieni neutronitähti jatkaa hurjaa kieppumistaan, mutta säteilee samalla valtavia määriä energiaa gravitaatioaaltoina. Tähten muoto asettuu nopeasti säännölliseksi pyörähdykspaleeksi. Toistensa ympäri pyörivät neutronitähtöset lähestyvät toisiaan ja törmäävät kohta yhteen taas isommaksi tähdeksi. Nyt järjestelmä on menettänyt jo niin paljon energiaansa, että keskipakoisvoimat pysyvät kohtuullisina ja tähti ehjänä. Siitä on tullut säännöllisen-
muotoinen, mutta edelleen vinhasti pyörivä neutronitähti.

Joissain tapauksissa hajonneen neutronitähden osat joutuvat niin kauaksi toisistaan, että ne eivät enää sulaudukaan yhteen. Näin muodostuu kaksoistähti, jonka molemmat osapuolet voivat olla neutronitähtiä.

Vastasyntynyt neutronitähti on sanoinkuvaamattoman kuuma pallo. Ensimmäisen elintuntinsa aikana se säteilee sisuksestaan neutriinoja ja antineutriinoja ja jäähtyy nopeasti noin 10^{10} kelviniin eli 10 miljardiin asteeseen. Samalla tähden sula ulkokuori jäähmettyy.

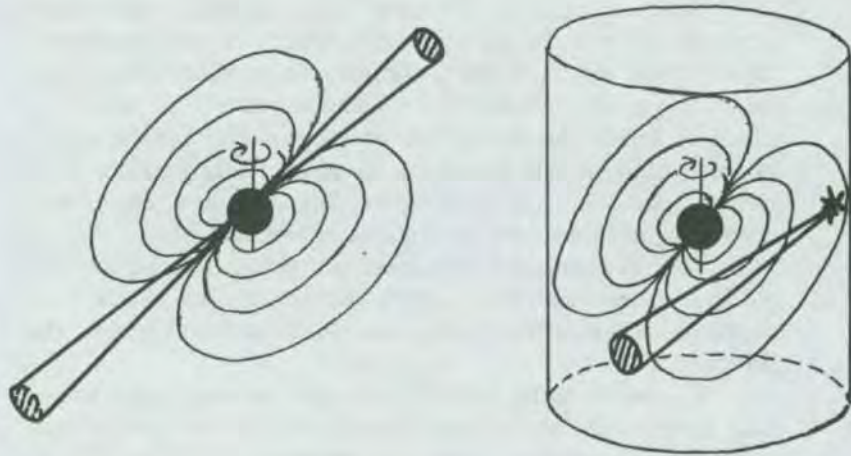
Pari tuntia syntymisensä jälkeen neutronitähti on saavuttanut melko vakaan tilan. Sen säde on muutama kymmenen kilometriä. Lämpötila pinnalla on noin miljoona astetta ja sisuksessa miljardin asteen luokkaa. Tähti pyörähtää akselinsa ympäri noin 0,01 sekunnissa.

Mihin meidän tietomme neutronitähdistä perustuvat? Suuri osa on saatu selville teoreettisista laskuista, sillä neutronitähden ole-
massaolo ennustettiin jo 1930-luvulla. Varsinaiseen vauhtiin neutronitäh-
tien tutkiminen pääsi kuitenkin vasta 1960-luvun lopulla. Tällöin näet taivaalta löydettiin nopeasti sykkivät radiotähdet eli pulsarit ja todettiin, että pulsarit eivät voi olla muuta kuin nimenomaan neut-
ronitähtiä.

Radioalueella näkyviä pulsareita tunnetaan nykyään satakun-
ta kappaletta. Ne säteilevät radiosäteilyä pulseina, joiden väliaika on sama kuin neutronitähden pyörimisaika. Tunnetuilla pulsareilla tämä vaihtelee 0,3 sekunnista muutamaan sekuntiin.

Säteily on sykkivää siksi, että tähti lähettää sitä vain pienen kartiomaisen kimpun yhteen (tai kahteen) suuntaan avaruudessa (samaa tapa-
aan kuin majakat rannikoillamme säteilevät valoa). Tähten pyöriessä sädekimppu pyyhkii säännöllisin väliajoin maapallon yli, jolloin pulssi havaitaan. Tämä outo käyttäytyminen selitetään sillä, että neutronitähdellä on voimakas magneettikenttä, jonka akseli poikkeaa pyörimisakselista. Radiosäteily pääsee lähtemään tähdestä vain magneettisten napojen kohdalta.

Miksi neutronitähdissä olisi voimakas magneettikenttä? Syy on



Pulsari on huimaa vauhtia pyörivä neutronitähti, jolla on voimakas magneettikenttä. Kentän akseli voi olla 45–90 astetta kallellaan tähden pyörimisakselia vastaan. Pulsari on "kosminen majakka", joka lähettää säännöllistä sykkivää radiosäteilyä. Säteilypulssien synnystä on esitetty kaksi teoriaa. Toisen mukaan säteily syntyy magneettisten napojen kohdalla (vasemmanpuoleinen kuva) ja suuntautuu kapeaan kartioon ylöspäin. Tähden pyöriminen saa kartion pyyhkimään nopeasti ympäri taivasta. Toisen, tällä hetkellä ehkä parempana pidetyn selityksen mukaan (oikealla) säteily syntyy relativistisista hiukkaskimpuista, jotka ovat "jäätäneet" kiinni tähden magneettikenttään. Kenttä pyörii tähden mukana, ja siksi tietyllä etäisyydellä tähdestä pyörimisnopeus kasvaa lähelle valon nopeutta ja hiukkaset alkavat voimakkaasti säteillä yhteen suuntaan.

sama kuin nopeassa pyörimisessä. Impulssimomentin säilymlaki sanoo, että mitä pienemmäksi kappale kutistuu sitä nopeammin se pyörii. Esimerkiksi Aurinko pyörähtää nykyisellään ympäri kerran vajaan kuukaudessa, mutta jos se luhistuisi neutronitähden kokoiseksi, se pyörisi ympäri kymmeniä kertoja sekunnissa.

Samoin käy magneettikentän. Useimmilla tähdillä on jonkinlainen magneettikenttä, ja tähden luhistuessa kentän voimakkuus suuresti kasvaa johtuen siitä, että magneettikenttä "kiinnijäätäneenä" hyvin sähköä johtavaan, pyörivään tähtimateriaan, plasmaan, kiertyy yhä pienenevän pallon ympärille tiukaksi "keräksi".

Neutronitähden magneettikenttä on jo niin mahtava, että siinä tapahtuu monenlaisia tavallisuudesta poikkeavia ilmiöitä. Nämä ilmiöt ovat itse asiassa niin omituisia, että tälläkään hetkellä ei osata täysin selittää millä tavoin magneettikenttä pystyy havaitunlaisia radiopulsseja aikaansaamaan.

Joka tapauksessa pulsari säteilee koko ajan energiaa radioaaltoina. Vielä enemmän se kuitenkin menettää energiaa kosmisina säteineä (elektroneina ja atomiytiminä), joita se suihkuttaa nopeana virtana tähtienväliseen avaruuteen.

Kaiken energiakadon seurauksena pulsarin pyöriminen hidastuu. Tällaista hidastumista havaitaan kaikilla tunnetuilla pulsareilla. Niinpä nopein (ja nuorin) pulsari, NP 0532 Äyriäissumussa, hidastuu puoleen noin 2000 vuodessa. Muilla luonteenomainen hidastumisaika on suurempi.

Koska kaikki pulsarit syntyvät suunnilleen yhtä nopeina, merkitsee jollekin pulsarille havaittu esim. yli sekunnin pyörähdysaika jo pitkää ikää. "Hidas pulsari on vanha pulsari".

Hidastuminen merkitsee myös neutronitähden muodon muuttumista. Litistynyt pyörähdysellipsoidi muuttuu yhä enemmän kohti pyöreää palloa. Muodonmuutos voi aiheuttaa tähden kiinteässä kuoressa "tähtenjärjestyksiä", jotka voivat näkyä radiopulssien epäsäännällisyyksinä.

Tunnetut pulsarit eivät hidastu tasaisesti vaan usein hyppäykseenomaisesti. Syyksi kiertoajassa havaittuihin hyppäyksiin on ajateltu joko yllämainittuja tähtenjärjestyksiä tai ehkä todennäköisemmin magnetosfäärissä tapahtuvia ilmiöitä. Jos magneettikenttä pystyisi varastoimaan itseensä ainetta, jonka se sitten äkkiä sylkäisisi pois, tämä havaittaisiin hyppäyksenä radiopulssien tuloajassa.

Mielenkiintoinen yksityiskohta näissä "tähtenjärjestyksissä" on niiden mittauksissa esiintyvä suuruusluokkien suunnaton ero: instrumentteina ovat radioteleskoopit, joiden koko on kymmenien metrien suuruusluokkaa, ja niillä havaitaan kymmenien, vieläpä satojen valovuosien päästä siirroksia, joiden suuruusluokka on muutamia senttimetrejä.

Pulsarin hidastuessa myös sen radiosäteily heikkenee. Neutronitähdellä on yhä vähemmän energiaa uloslähetettäväksi. Kun sen pyörähdysaika kasvaa useisiin sekunteihin, myös radiosäteily heikkenee sen rajan alapuolelle, joka maapallolla voidaan havaita.

Vanhemmiten yksinäinen neutronitähti käy yhä huomattomammaksi. Joidenkin satojen miljoonien vuosien kuluttua se ei enää säteile juuri lainkaan, ja sen lämpötila edelleen laskee. Lopputuloksena on jälleen kylmä, kuollut tähti, joka eroaa mustista kääpiöistä vain suuremman tiheydensä ja pienemmän kokonsa takia.

Kaksoistähtijärjestelmissä neutronitähden kehityskulku on erilainen. Siihen vaikuttaa voimakkaasti naapuritähden läsnäolo.

Jos naapuri on myös neutronitähti, niin kuin joissakin super-

novaräjähdyksissä voi syntyä, ei eroa yksinäiseen neutronitähteen ole paljokaan. Tällaisessa kaksoistähtijärjestelmässä on kuitenkin muutamia mielenkiintoisia piirteitä. Ensimmäinen tämänkaltainen järjestelmä löydettiin taivaalta v. 1974. Kyseinen pulsari, PSR 1913+16, kiertää vajaassa kahdeksassa tunnissa toista neutronitähteä soikeaa rataa pitkin. Tähtien painovoimakenttä on niin suuri, että järjestelmästä voidaan luultavasti havaita monia luvussa 2 mainittuja suhteellisuusteorian ilmiöitä, mutta nyt paljon vahvempina: radan periastronin kiertymistä, radiosäteilyn hidastumista sen kulkiessa toisen tähden reunan ohi, säteilyn taipumista, pyörähdyksien suunnan muuttumista. Havaintoaika on kuitenkin toistaiseksi ollut niin lyhyt, että tuloksia ei ole vielä saatu.

Neutronitähtien rakenne

A. Toisin kuin tähdillä yleensä neutronitähdillä on tarkkarajainen pinta kuten maanpäällisillä metalleilla tai nesteillä. Uloin pintakerros on ehkä muutaman metrin paksuinen ja koostuu $10\text{--}100\text{ kg/cm}^3$ tiheyteen pakkautuneista atomeista. Sitä voi pitää kiinteänä metallina. Pinnan yläpuolella neutronitähdellä voi olla rautaytimistä muodostunut kaasukehä.

B. Ylempi kuori on normaalin kiinteän aineen kaltainen, ytimistä koostunut rakennelma. Se on biljoona kertaa jäykempää kuin teräs ja sen sähkönjohtokyky on miljoona kertaa parempi kuin kuparilla.

C. Sisempi kuori on myös kiinteää, vielä edellistä paljon jäykempää ainetta. Sen ominaisuuksia ei juuri voi enää millään vertauksella havainnollistaa. Ytimien välissä on jo paljon neutroneja, jotka muodostavat vapaasti virtaavan supranesteen. Neste pystyy virtaamaan ytimien lomassa samaan tapaan kuin maanpäällinen helium-supraneste puuterissa koskettamatta sitä millään lailla. Kuoren alaosassa erilliset ytimet sulautuvat toisiinsa yhtenäiseksi massaksi.

D. Neutroniydin koostuu suurimmaksi osaksi neutroneista, jotka ovat yhtenäisenä supranesteenä. Joukossa on vähän protoneja ja elektroneja.

E. Hyperoniydin koostuu neutronien lisäksi neutroneja raskaamista hyperoneista: lambda-, sigma- ja delta-hiukkasista. Tämän ytimen fysikaalinen rakenne on tuntematon.

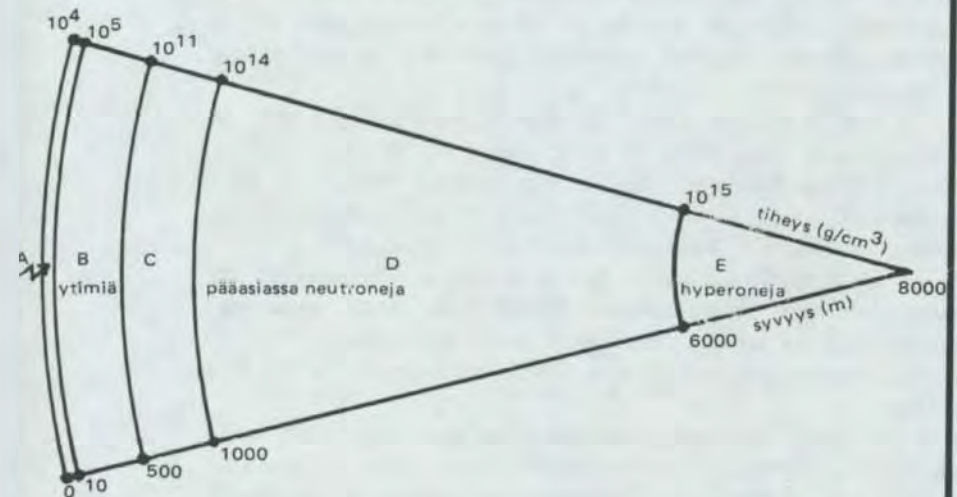
Neutronitähtien kuoren ja ytimen välillä on hyvin heikko vuorovaikutus. Jos kuori äkkiä pysäytettäisiin, ydin pyörisi edelleen

Mutta palataanpa sellaiseen järjestelmään, jossa toinen osapuoli on neutronitähti ja toinen tavallinen tähti. Tällainen järjestelmä ei aina säily supernovaräjähdyksessä koossa, vaan sen osapuolet sinkoutuvat joskus suurella nopeudella eri suuntiin. Yksinäisten pulsarien nopeudet muiden tähtien suhteen onkin havaittu keskimäärin paljon tavallista suuremmiksi. Niistä ovat siten monet olleet räjähdysten aikaan kaksoistähtijärjestelmän osia.

Monet kaksoistähdet kuitenkin säilyvät ehjinä. Tästä saatiin ensimmäiset todisteet tämän vuosikymmenen alkupuolella, kun kaksoistähtijärjestelmistä löytyi pulsareita. Nämä neutronitähdet eivät kuitenkaan säteile radioaalloilla, vaan ne lähettävät röntgensäteilyä. Siksi niitä sanotaan **röntgenpulsareiksi** erotuksena "tavallisista"

jopa vuoden ajan.

Kuoriosan fysikaalisista ominaisuuksista on esitetty erilaisia käsityksiä. Jotkut arvelevat, että muodonmuutokset tapahtuvat kuorena jatkuvana hitaana virtauksena. Toisten mielestä kuorena voi tapahtua äkillisiä murtumia ja siirroksia, tähdenjärjestyksiä. Amerikkalainen tutkija Dyson on jopa esittänyt ajatuksen, että murtumassa kuoreen voisi avautua väylä, jota pitkin sisuksen kuumempi, tiheämpi neste pääsisi purkautumaan pinnalle. Tämä ilmiö vastaisi maanpäällisiä tulivuoria!



radiopulsareista.

Kaksoistähteen syntynyt pulsari käyttäytyy aluksi samalla tavoin kuin yksinäinenkin neutronitähti: säteilee radioaaltoja ja sinkoa kosmisia säteitä voimakkaasti avaruuteen. Neutronitähdestä ulospäin kiitävä virta on niin nopea, että se tempaa mukaansa myös naapuritähdestä ulosvirtaavan aineen ("tähtituulen"). Toisessa kehitysvaiheessa alkaa naapuritähti vaikuttaa asioihin. Siitä irtoava aine kulkeutuu neutronitähden lähelle ja joutuu kuin potkurin ajamana voimakkaaseen liikkeeseen. Vinhasti pyörivän neutronitähden magneettikenttä synnyttää ympärille mahtavan pyörteen ja sinkoa tähtien ainetta ympäriinsä avaruuteen.

Neutronitähden energia koko ajan pienenee ja pyöriminen hidastuu. Tähän asti naapuritähdestä tuleva aine on pyörinyt pulsarin ympärillä, mutta nyt se pääsee joissakin kohdissa iskeytymään sen pintaan. On alkanut kehityksen kolmas vaihe, jota sanotaan kerääntymisvaiheeksi. Juuri tässä vaiheessa neutronitähti nähdään röntgenpulsarina.

Röntgensäteily syntyy hiukkasten iskeytyessä toisiinsa tai tähden pintaan. Neutronitähden painovoima on niin valtava, että tähti vetää lähelle tulleen hiukkasen puoleensa huimalla nopeudella. Kun ns. pakonopeus tavallisten tähtien pinnalla on joitakin satoja kilometrejä sekunnissa, neutronitähden pinnalla se on 100 000 km/s. Hiukkaset osuvat siis pintaan nopeudella, joka on kolmasosa valon nopeudesta. Niiden liike-energia on tällöin niin suuri, että kun se pintaan osuessa muuttuu lämmöksi, pinta säteilee voimakkaasti röntgensäteiden aallonpituudella.

Neutronitähden magneettikenttä on kuitenkin vielä niin voimakas, että se estää aineen osumisen pintaan muualla kuin magneettisten napojen kohdalla. Niinpä röntgensäteilyä lähtee vain aivan rajoitetuista pinnan kohdista, jotka tähden nopeasti pyöriessä synnyttävät sykkimisilmion: maan päällä havaitaan röntgenpulsari.

Röntgenpulsarin pyörähdysaika ei enää aina hidastukaan niin kuin yksinäisten neutronitähkien. Ulkoatulevan aineen aiheuttama massanlisäys saa tähden jopa nopeuttamaan pyörimistään. Näin on tapahtunut mm. kahdella paljon tutkitulla röntgenpulsarilla Her X-1 ja Cen X-3.

Kaksoistähtijärjestelmässä olevan neutronitähden kehityskulku on niin monimutkainen, että sen kaikkia vaiheita ei ole vielä onnistuttu selvittämään. Yksi mahdollisuus kuitenkin on tiedossa. Jos neutronitähden massa keräytymisen vaikutuksesta ylittää kriittisen ylärajan, joka on 2-4 Auringon massan suuruinen, se kokee viimeisen hurjan

katastrofin ja syöksyy kuolemaan: suunnaton painovoima murtaa neutronikaasun paineen ja tähti luhistuu sekunnin murto-osassa kokoon vetäen aika-avaruuden käärinliinaksi ympärilleen. Neutronitähti on muuttunut mustaksi aukoksi.

MUSTAT AUKOT

Edellä on seurattu tähtien kehityskulkua mahdollisen superno-
varäjähdyksen tuloksena syntyneeseen neutronitähteen saakka. Ute-
liaalla ihmisellä on kuitenkin jatkuva pyrkimys tunkeutua yhä kau-
emmaksi näistä totutuista ”maallisista” ympyröistä ja olosuhteista, ja
neutronitähtien materian eksoottisen tilan takana on kai lupa kuvitella
olevan alue, jossa Paulin kieltosäännön antaman tasapainottavan paineen
ylittää painovoiman murskaava puristus. Tällä aineen olomuodon
alueella on Einsteinin painovoimateorian, yleisen suhteellisuusteorian,
tehtävä kertoa, mitä tapahtuu jatkuvasti luhistuvan aineen ympäristös-
sä avaruudelle ja ajalle ja millaisia ilmiöitä näin syntyneen uuden
objektin, mustan aukon, vaikutuspiirissä saattaisi esiintyä.

Ernen kuin lähdemme ajatusretkelle mustan aukon läheisyyteen,
lienee muutama varoituksen sana paikallaan. Vaikka yleinen suhteellisuusteoria
onkin melko tyydyttävästi testattu Auringon suhteellisen heikossa
painovoimakentässä, sen ulottaminen läpi kaikkien tasapainotilojen romahtavan
tähtien painovoimakentän malliksi on melkoisen uhkarohkea yritys. Meidän
tulee vakavasti ottaa huomioon se mahdollisuus, että Einsteinin painovoimateoria
on mittaustarkkuuden rajoissa pätevä ainoastaan heikkojen kenttien tapauksessa.
Tällaisessa tilanteessa ovat mahdolliset tähtitieteelliset havainnot mustien
aukkojen olemassaolosta ja niihin liittyvistä ilmiöistä kultaakin kalliimpia
testejä painovoimateorioille.

Monien fysikaalisten ajatusmaailmaamme järkyttäneiden ilmiöiden
keksimisen yhteydessä pätee ”ei mitään uutta Auringon alla”. Vuonna 1834
Hamiltonin tutkiessa klassisen mekaniikan ja geometrisen optiikan välistä
analogiaa päätyi hän melkein sata vuotta ennen mikromaailman kvanttimekaanisen
mallin keksimistä ärsyttävän lähelle materian aaltoluonnetta. Samoin tällä
klassisen mekaniikan ”kulta-ajalla” jo vuonna 1798 oli ranskalainen Pierre
Simon de Laplace päätenyt mustan aukon keksimiseen. Hän tutki Newtonin
painovoimateoriaa käyttäen lähtönopeuksia, joilla kappale voidaan lähettää
äärettömän kauaksi pallosymmetrisen massajakautuman pinnalta. Newtonin
”omenapuuteorian” mukaan ammuksen on voitettava po-

tentiaalienergia

$$V = \frac{GmM}{R},$$

jossa G on Newtonin gravitaatiovakio, m on ammuksen massa, M on ”tähtien”
massa ja R ”tähtien” säde. Tämän painovoimapotentiaalinn voittamiseksi on
ammuksella käytettävissään liike-energia

$$T = \frac{1}{2}mv^2,$$

jossa v on lähtönopeus. Potentiaalienergian ja liike-energian ollessa yhtä
suuret ammuksen voi lentää äärettömyyteen, ts. $GM/R = v^2/2$. Saadusta
yhtälöstä huomataan, että jos M on tarpeeksi suuri tai R tarpeeksi pieni,
eteen tulee tilanne, jossa lähtönopeuden on oltava suurempi kuin valon
nopeus c . Saamastamme tuloksesta voimme vetää saman johtopäätöksen
kuin Laplace: jos M massaisen tähden säde R on pienempi kuin eräs nykyisin
Schwarzschildin säteeksi $R = 2GM/c^2$ kutsuttu mitta, on tähti pimeä,
koska ei edes valo pysty voittamaan sen painovoimakenttää. Eli Laplacen
omia sanoja käyttäen: ”Maapallon tiheyden omaava säteilevä tähti,
jonka läpimitta on 250 kertaa niin suuri kuin Auringon läpimitta,
ei painovoimansa takia lähetä ulospäin ainoakaan valonsädettä; siksi on
mahdollista, että maailman-kaikkeuden voimakkaimmin säteilevät
taivaankappaleet ovat tästä syystä näkymättömiä.”

Esimerkiksi Auringon Schwarzschildin säteen voi laskea helposti
sijoittamalla ylläolevaan kaavaan G :n arvon $6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$,
Auringon massan $M = 2 \cdot 10^{30} \text{ kg}$ ja valon nopeuden $3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$.
Nähdään, että jos Auringon säde pienenee 3 kilometriin (nykyisestä
700 000 kilometristä), se muuttuu mustaksi aukoksi. Vastaavasti
maapallon Schwarzschildin säde on 1 cm ja kymmenen kertaa Auringon
massaisen jättiläistähtien 30 km.

Lisää yleistä suhteellisuusteoriaa

Edellä esitetty klassisen mekaniikan avulla laskettu esimerkki ei ole
aivan rehellinen, sillä Newtonin mekaniikan pätevyysalue koskee
valon nopeutta paljon pienempiä nopeuksia. Jotta saisimme oikeamman
kuvan tilanteesta, lienee tarpeellista tarkastella hieman lähemmin
avaruuden ja ajan muodostaman neljulotteisen avaruuden geometriaa

massa-energiajakautumien ympärillä.

Jo aiemmin 1. luvun alussa oli esitys Minkowskin neliulotteisesta aika-avaruudesta, jolloin kahden tapahtuman etäisyys- ja aikavälillä avulla määriteltiin neliulotteinen tapahtumien välimatka ds lausekkeella

$$ds^2 = c^2 dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2.$$

Tämä määritelmä muistuttaa mitä suurimmassa määrin euklidisen avaruuden tuttua Pythagoraan teoreemaa, joka sanoo, että suorakulmaisessa kolmiossa kateettien neliöiden summa on hypotenuusan neliö. Oikeastaan ainoa "kauneusvirhe" ovat avaruusetäisyyksien (3:ssa koordinaattisuunnassa) neliöiden edessä olevat miinusmerkit. Usein tällaista avaruutta kutsutaan pseudo (vale) -euklidiseksi. Neliulotteiselle tapahtumien välimatkalle voidaan antaa myös fysikaalinen tulkinta. Jos ajatellaan, että ne kaksi tapahtumaa, joiden "etäisyydestä" on kyse, liittyvät jonkin määrätyn kappaleen historiaan ja kappaleen mukana kulkee havaitsija kelloineen, niin ds/c antaa aikavälin, jonka kappaleen mukana liikkuva kello mittaa tapahtumille. Tämän perusteella suuretta ds/c kutsutaan usein ominaisaikaväliksi.

Olennaista edellä kuvatussa Minkowskin avaruudessa on se, että etäisyys- ja aikavälillä neliöiden edessä olevat kertoimet ovat vakioita (+1, -1, -1, -1). Avaruutta kutsutaan laakeaksi, jos voidaan valita koko avaruuden kattava koordinaattisysteemi (esim. ct, x, y, z) siten, että koordinaattierotusten neliöiden kertoimet "etäisyyden" neliön lausekkeessa ovat vakioita. Matemaattisesti seuraava yleistys ovat ns. kaarevat Riemannin avaruudet, joissa kertoimet voivat vaihdella paikan (ja ajan) funktiona ilman, että löydetään koko avaruuden kartoitettava koordinaattisysteemiä, jossa kertoimet tulevat vakioiksi. Tällöin etäisyyden neliö, ns. viivaelementin neliö, kirjoitetaan neliulotteisessa avaruudessa kaksinkertaisena summana

$$ds^2 = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 g_{ij} dx^i dx^j,$$

jossa esim. avaruus-aika-systeemin tapauksessa dx^i (ja dx^j) ovat pieniä (infinitesimaalisia) paikka- ja aikaeroja valitussa koordinaatistossa ja kertoimet g_{ij} ovat ns. metrisen perustensorin komponentteja, jotka Minkowskin avaruuden tapauksessa ovat vakioita, mutta kaarevan avaruuden tapauksessa riippuvat ajasta ja paikasta. Paljon käytettynä

esimerkkinä tällaisista kaarevista avaruuksista esitetään usein pallon pinta, joka on kaksiulotteinen kaareva avaruus. Tämä kaarevuus ilmenee mm. siinä, että esim. maapalloa kartoitettaessa on tehtävä erilaisia kompromisseja, kun koko pallo on kuvattava tasokartaksi. Pallon pintaahan ei voida levittää tasoon "väkivaltaa" käyttämättä.

Vuonna 1916, vain muutamia kuukausia sen jälkeen kun Einstein oli esittänyt yleisen suhteellisuusteorian perusideat ja niiden matemaattisen esityksen ns. kenttäyhtälöiden ja testihiukkasten liikeyhtälöiden muodossa, julkaisi saksalainen Karl Schwarzschild ensimmäisen matemaattisesti "vedenpitävän" ratkaisun kenttäyhtälöille. Tämä kuuluisa ja paljon tutkittu ns. Schwarzschildin ratkaisu koski sitä, miten avaruus-aika käyristyy täysin pallosymmetrisen pyörimättömän massajakautuman ulkopuolella.

Pallosymmetrisen tapauksen kuvaamiseen soveltuvat parhaiten ns. pallokoordinaatit. Origoksi valitaan pallon keskipiste, ja tieto paikasta tämän vertailupisteen suhteen ilmoitetaan antamalla etäisyys r origosta sekä kaksi kulmaa, jotka vastaavat maapallollakin käytettyjä leveys- ja pituusasteita. Koska seuraavassa rajoitumme eräisiin yksinkertaisiin tapauksiin, jätämme kulmariippuvuudet huomioonottamatta. Schwarzschildin esittämä viivaelementti pallosymmetrisen massajakautuman ympärillä on tällöin muotoa

$$ds^2 = \gamma c^2 dt^2 - (1/\gamma) dr^2,$$

jossa γ on etäisyydestä riippuva suure, joka on muotoa

$$\gamma = 1 - \frac{2GM}{c^2 r}.$$

Kuten huomataan, metrisen perustensorin komponentit eivät enää ole vakioita vaan etäisyydestä r ja keskuskappaleen massasta M riippuvia. Edellä esitetystä yksinkertaistetusta muodosta havaitaan helposti ratkaisun fysikaalinen mielekkäisyys. Etäisyyden r tullessa suureksi lähestyy aika-avaruuden kaarevuutta luonnehtiva kerroin arvoa 1, jolloin viivaelementti lähestyy Minkowski-avaruuden vastaavaa esitystä

$$ds^2 = c^2 dt^2 - dr^2.$$

Näin tulee myöskin aikakoordinaatin t merkitys esiin: se esittää massajakautumasta äärettömän kaukana sijaitsevien standardikellojen aikaa. Toisaalta Schwarzschildin viivaelementistä voidaan laskea vastaava omi-

naisaikaväli ds/c etäisyydellä r paikallaan ($dr = 0$) painovoimakentässä olevalle standardikellolle.

$$\frac{ds}{c} = d\tau = \sqrt{1 - \frac{2GM}{c^2 r}} dt.$$

Saadusta tuloksesta todetaan, että kello käy hitaammin massan M läheisyydessä kuin kauempana, onhan neliöjuurilauseke pienempi kuin 1.

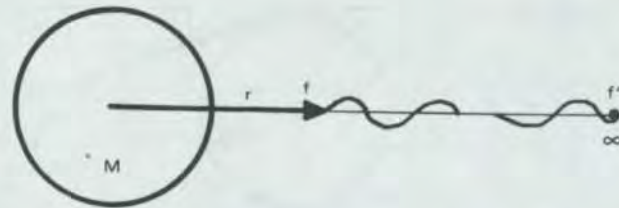
Juuri ylläolevaa kaavaa käytetään luvussa 2 esitetyn ”kelloparadoksin” laskemiseen. Kellojen käyntinopeudet heikoissa painovoimakentissä poikkeavat vain hyvin vähän toisistaan. Vahvoissa kentissä ero on jo tuntuvampi. Otetaanpa esimerkiksi neutronitähti, jonka massa on sama kuin Auringon ja säde 10 km. Tällaisen tähden pinnalla neliöjuurilauseke saa arvon 0,84. Jos siis kaukaisen havaitsijan mielestä aikaa on kulunut 10 minuuttia, tähden pinnalla oleva kello on käynyt vasta runsaan 8 minuutin ajan.

Mustan aukon reunalla neliöjuurilauseke menee nolnaan, joten ulkopuolisen havaitsijan mielestä aika käy siellä äärettömän hitaasti.

Edellä saatu tulos kellojen käynnille antaa välittömästi myös lausekkeen valon ja muiden sähkömagneettisten aaltojen värähdysluvun (värin) muutokselle niiden kulkiessa massapallon säteen suunnassa. Värähdysluku on yhteen värähdykseen käytetyn ajan, värähdysajan, käänteisluku, jolloin ajankulkua koskevasta tuloksesta saadaan etäisyydeltä r pyörimättömästä pallosymmetrisestä massajakautumasta M värähdysluvulla f lähteneelle valolle tulokseksi, että se ”punastuu” pienempään värähdyslukuun f' kuljettuaan äärettömän kauaksi massan vaikutuspiiristä. Tämä värähdysluvun muutos saadaan yhtälöstä

$$f' = f \sqrt{1 - \frac{2GM}{c^2 r}}.$$

Saatu tulos sisältää myös jo tämän luvun johdannossa esitetyn suurimassaisen (tai tarpeeksi pienisäteisen) kappaleen pimentymisen mustaksi aukoksi. Jos värähdysluvun f' lausekkeessa suureen $2GM/c^2$ arvo on sama kuin säteilyn lähtöetäisyys r , tulee neliöjuurilauseke nolllaksi ja sitä kautta myös f' nolllaksi. Tämä voidaan tulkita siten, että koska äärettömän kaukana oleva havaitsija näkee nollavärähdyslukuista säteilyä, ei hän todellisuudessa näe yhtään mitään. Kun muistetaan, että suure $2GM/c^2$ on juuri Schwarzschildin säde,



Etäisyydeltä r massajakautumasta M alunperin värähdysluvulla f lähtenyt valo havaitaan äärettömän kaukana ”punastuneena” värähdyslukuun f' .

voidaan taajuuden muutosyhtälö kirjoittaa helpommin muistettavaan muotoon

$$f' = f \sqrt{1 - \frac{R}{r}}.$$

Swarzschildin säde on mukana monessa ilmiössä

Edellä moneen kertaan esilletutut Schwarzschildin säde R on mukana useissa tähtien rakennetta koskevissa yleisen suhteellisuusteorian ja klassisen painovoimateorian pohjalta rakennetuissa malleissa. Tarkastellaan seuraavassa aivan luettelomaisesti muutamia ilmiöitä, joissa M -massaisen tähden Schwarzschildin säteen R ja tähden todellisen säteen R suhde R/R esiintyy.

Edellä on jo esitelty valon punasiirtymä. Saatua yhtälöä voidaan käyttää värähdysluvun muutoksen $\Delta f = f - f'$ laskemiseen valon lähtiessä M -massaisen R -säteisen tähden pinnalta äärettömän kauaksi. Likimääräistulos on

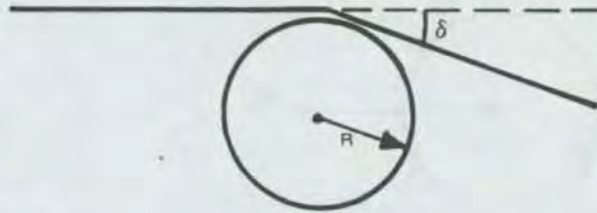
$$\Delta f/f \approx R/R.$$

Vastaavasti valonsäteen taipumiskulmalle δ (δ radiaaneina) saadaan likiarvo (kuva seur. sivulla)

$$\delta \approx R/R.$$

Todellinen yleisen suhteellisuusteorian tulos on $\delta = 2R/R$, mutta suuruusluokka on kuitenkin alueella R/R . Tästä ilmiöstä kerrottiin jo luvussa 2.

Sama suhde R/R esiintyy sen massakadon ΔM lausekkeessa,



Valon taipuminen sen ohittaessa R -säteisen tähden.

joka saadaan edustamaan tähden painovoiman aiheuttamaa sidosenergiaa E_s , yhtälön $E_s = c^2 \Delta M$ mukaisesti. Tämä sidosenergia on aivan vastaava kuin atomiydinten sidosenergia, joka vapautuu keveiden ydinten yhdistyessä tai raskaiden, esim. uraaniydinten, hajoessa. Asia voidaan ilmaista myös sanomalla, että hajoitettaessa M -massainen tähti yli koko avaruuden äärettömän ohueksi kaasuksi on käytettävä masakatoa ΔM vastaava energia siten, että massakadon ja massan suhde on

$$\Delta M/M \approx R/R.$$

Tarkempi lasku antaa tähdelle, jonka materia on täysin homogeenisesti (tiheys kaikkialla sama) jakautunut, yhtälön oikealle puolelle lisäkertoimeksi 0,6, mutta suuruusluokka-arviona esitetty kaava on käyttökelpoinen useimmille tähtimalleille.

Erikoisinta kuitenkin lienee, että suhde R/R esiintyy myös tähtien sisäisen dynaamisen rakenteen kannalta olennaisen tärkeän "äänennopeuden" yhteydessä. Painehäiriöiden eli äänen etenemisnopeus määritellään fysiikassa usein tarkastelemalla, paljonko paine p muuttuu (muutos Δp) materia tiheyden ρ muuttuessa määrällä $\Delta \rho$. Äänennopeuden v_s neliö on tällöin

$$v_s^2 = \Delta p / \Delta \rho.$$

Yksinkertaisimmat tähden paineen ja painovoiman tasapainoa koskevat yhtälöt antavat äänennopeuden ja valonnopeuden suhteen neliölle suuruusluokka-arvioksi

$$\left(\frac{v_s}{c}\right)^2 \approx \frac{R}{R}.$$

Painehäiriöiden etenemisnopeudesta v_s saadaan myös sykkivän tähden "pulssille" luonteenomainen aika

$$T_s \approx \frac{R}{v_s} \approx \frac{R}{c} \sqrt{\frac{R}{R}},$$

kun lausutaan v_s valonnopeuden, tähden säteen ja Schwarzschildin säteen avulla.

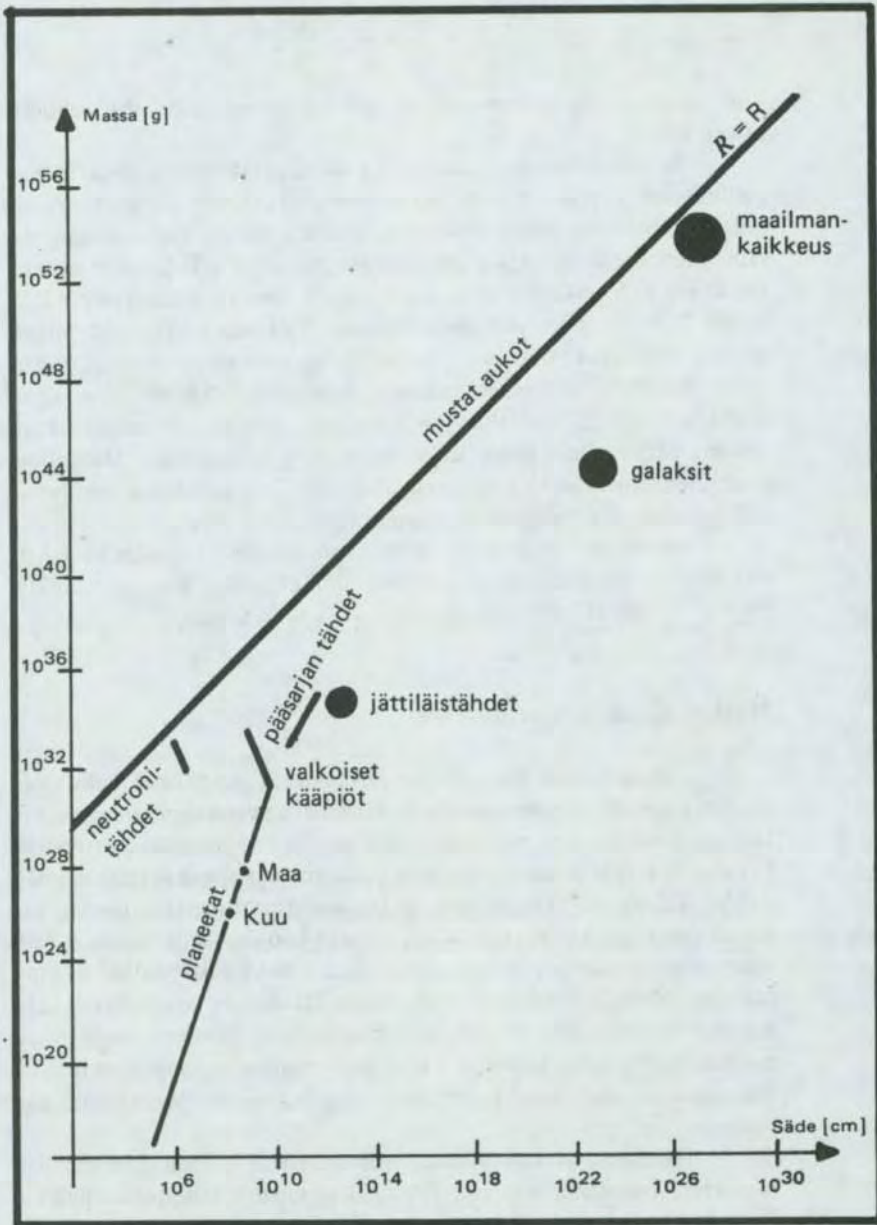
Jo tämän luvun johdannossa todettiin, että jos pyörimättömän pallomaisen kappaleen säde on pienempi kuin sen Schwarzschildin säde, kappale on pimeä. Pääsarjan tähdillä kuten esim. Auringolla tämä merkitsee sitä, että muuttuakseen mustaksi aukoksi olisi sen kutistuttava niin, että sen säde olisi vain 3 km. T_s pääsarjan tähdillä suhde R/R on noin yksi miljoonasosa. Valkoisilla kääpiöillä pitäisi tähden läpimitan kutistua yhteen kymmenestuhannesosaan, jotta tähti muuttuisi mustaksi aukoksi. Neutronitähdet sensijaan ovat melkoisen lähellä täydellistä luhistumista, onhan neutronisoitunut materia äärimmäisin tunnettu materia pysyvä olomuoto. Maapallon massainen musta aukko sensijaan mahtuisi "vaivattomasti" taskuun, sillä sen säde olisi vain pari senttimetriä.

Oheisessa kuviossa on esitetty muutamien tyypillisten tähtitieteellisten objektien massa-säde-diagrammat ja siitä ilmenee myöskin niiden "läheisyys" mustasta aukosta (kuva seur. sivulla).

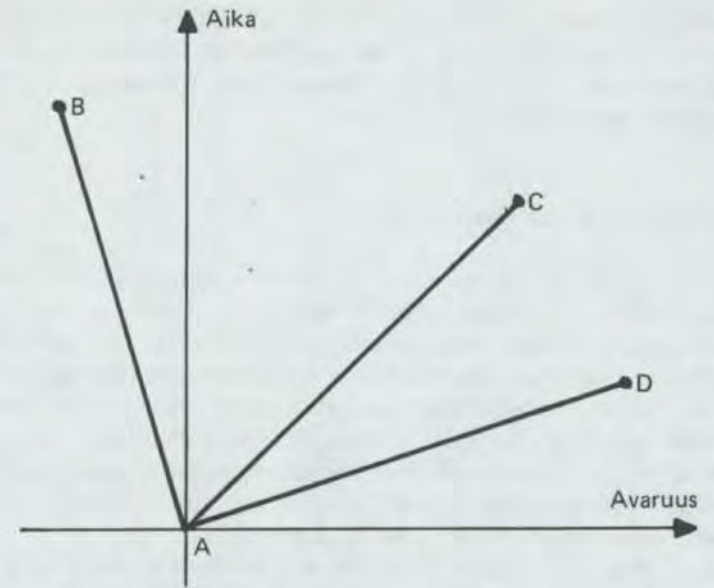
Matkat ajassa ja avaruudessa.

Neliulotteisen avaruus-ajan kuvaaminen piirtämällä kaksiulotteiselle paperille ei oikein onnistu. Jättämällä avaruuden kolmen ulottuvuuden edustajaksi ainoastaan yksi ulottuvuus voidaan piirtämällä havainnollistaa useimmat neliulotteisessa avaruus-ajassa tyypillisimmät ilmiöt. Tällöin käytetään esim. jo koulumatematiikasta tutun (x, y) -koordinaatiston kaltaista esitystä, jossa x -koordinaattia vastaa (yksi) avaruusulottuvuus ja y -koordinaattia aika. Jotta koordinaatiston kummallakin akselilla olisi sama fyysikaalinen "laatu" on aika t syytä kertoa valon nopeudella c , jolloin aikakoordinaattikin saa laadukseen matkan (esim. valosekunnin). Tämä matemaattinen temppu ei muuta koordinaatin sisältämää informaatiota siitä, milloin jokin ilmiö tapahtuu.

Tällaisessa avaruus-aika-koordinaatistossa voidaan jokainen piste asettaa edustamaan jotain fyysikaalista tapahtumaa, jonka paikka on esitetty avaruusakselilla ja tapahtuman ajanhetki aikakoordinaatilla ct (t laskettuna jostain valitusta ajanlaskun nollakohtasta). Oheisessa kuvassa on esitetty eräitä graafisia aikatauluja. Oletetaan, että



Tyyppillisten tähtitieteellisten objektien massa-säde diagramma.



Matkustus ajassa ja avaruudessa. Matka AB on ajanlaatuinen, AC valonlaatuinen ja AD paikanlaatuinen.

tapahtuma A on erään matkailijan syntymä. Tällöin tasaisella nopeudella liikkuneen matkailijan taipaleen graafista aikataulua esittää jana AB, jossa tapahtuma B on tulo perille määränpäähen. Kuten diagrammasta nähdään, vaeltajalla on ollut käytettävissään matkaan verrattuna "ruhtinaallisesti" aikaa eikä hänen ole tarvinnut liikkua lähellekään valon nopeutta. Edellä kuvatun kaltaista tapahtumien A ja B etäisyyttä (4-ulott.) kutsutaan **ajanlaatuiseksi**. Ennättääkseen todistajaksi tapahtumalle C olisi matkailijan kuljettava valon nopeudella, mikä on mahdotonta matkailijalle, jonka lepomassa ei ole nolla. Tapahtumien A ja C väliä kutsutaan **valonlaatuiseksi**. A:ssa syntyneen kulkijan, oli hän vaikka lepomassatonta valoa, on mahdotonta antaa todistajalausuntoa tapahtumasta D, sillä tapahtumien avaruusetäisyys on valosekunneissa mitattuna pitempi kuin aikaero sekunneissa. Tällaisia avaruus-aika-matkoja kutsutaan **paikanlaatuiseksi**, eikä niihin voi nykyisten koetulosten valossa osallistua mikään fyysikaalinen objekti.

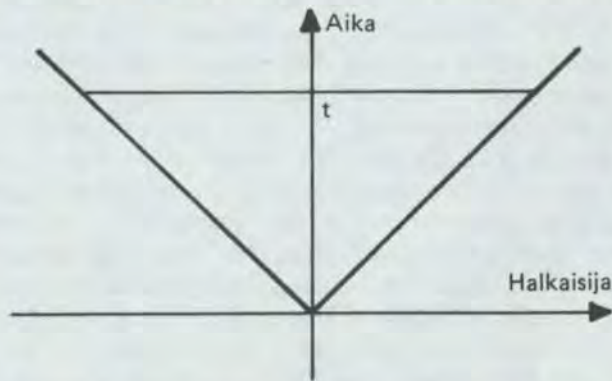
Viime aikoina on jonkin verran spekuloitu mahdollisuudella, että olisi olemassa hiukkasia, joiden pienin mahdollinen nopeus on valon nopeus. Näiden ns. **takionien** mahdollisia fyysikaalisia ominaisuuksia ja erikoisesti niihin liittyvää syy-seuraussuhteen logiikkaa on

tutkittu lähinnä Einsteinin suppeamman suhteellisuusteorian valossa, mutta ainakin tällä hetkellä niiden olemassaoloon uskomisen on vielä vallattomampaa mielikuvituksen lentoa kuin konsanaan mustien aukkojen olemassaoloon luottaminen.

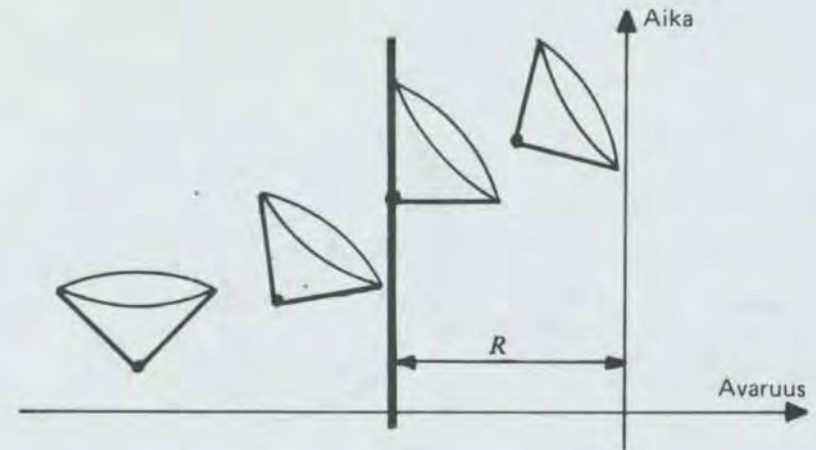
Valokartio ja sen kaatuminen

Vaikka edellä esitetystä avaruusajan graafisessa kuvailussa rajoituttiin suppeamman suhteellisuusteorian mukaiseen laakeaan geometriaan, voidaan tämänkaltainen esitys yleistää myös Einsteinin painovoimateorian vaatimaan kaarevaan avaruus-aika-geometriaan. Luonteenomaisimmin kaarevuus tulee ilmi tarkasteltaessa jostain pisteestä määrätyllä hetkellä lähtevää pallomaisesti leviävää valoaltoa. Laakeassa avaruudessa kaukana massoista origosta lähtevän valoaltopallon halkaisijan leviäminen voidaan esittää kaksiulotteisena ns. **valokartiona** oheisen kuvan mukaisesti.

Myös kaarevassa avaruudessa on mahdollista kuvata tilannetta valokartiolla. Kuten jo aikaisemmissa luvuissa todettiin, voidaan ainakin paikallisesti poistaa painovoima sallimalla vapaa putoamisliike. Tämä merkitsee myös sitä, että paikallisesti vapaasti putoavassa tarpeeksi pienessä laboratoriossa mitataan avaruus laakeaksi, mutta suuremmissa mittakaavassa meidän on, esim. lähestyttäessä suurimassaista kappaletta, jatkuvasti muutettava vapaasti putoavan laboratorion laakean ns. inertiaalikoordinaatiston asentoa. Parhaiten tilannetta voidaan kuvata vapaasti putoavien tutkijoiden lähettämien va-



Pallona etenevän valonvälähdyksen halkaisijaa kuvaa kunakin hetkenä (t) valokartion reunakäyrien väliin jäävän janan pituus.



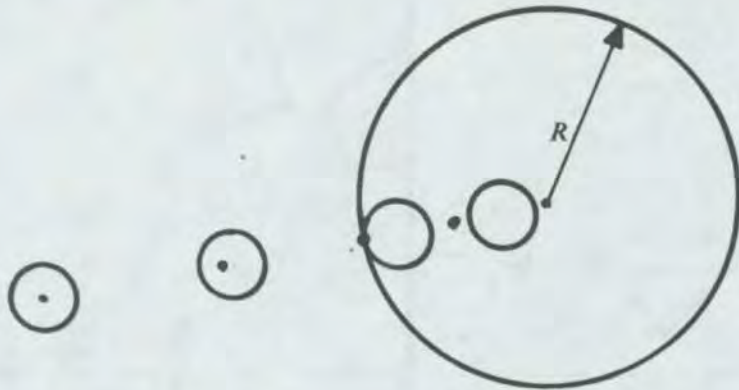
Valokartion suu kääntyy kohti mustaa aukkoa ja aukon sisäpuolella kartio osoittaa kokonaan sisäänpäin.

lonvälähdyksen valokartioiden asennolla. Oheisessa kuviossa on piirretty Schwarzschildin säteensä sisäpuolelle luhistunutta pyörimätöntä massapalloa kohti putoavien tutkijoiden lähettämien valoaltojen valokartioiden asento.

Kuvan tulkitseminen on ensi silmäyksellä ehkä hieman vaikeaa, mutta tällainen valokartion suuntautuminen kohti painovoimakeskusta merkitsee yksinkertaisesti sitä, että mitä lähempänä keskusta ollaan sitä suurempi osa valosta suuntautuu sitä kohti. Erikoisesti siinä tapauksessa, että massa on tarpeeksi suuri tai että sen säde on tarpeeksi pieni muodostaakseen mustan aukon, kaatuu R n sisäpuolelta lähtevä valokartio siten, että koko valoalto suuntautuu kohti painovoiman keskusta. Tällöin ulkopuolisen tarkkailijan havaittavaksi ei tule lainkaan valoa, vaan musta aukko "imee" kaiken.

Edellä esitetyn valokartion kaatumisen voimme esittää myöskin pelkästään avaruuskuviona käyttämättä lainkaan avaruus-aika-koordinaatistoa. Piirretään eri etäisyyksiltä mustasta aukosta lähtevien valon valoaltojen sijainti lähetyspisteeseen nähden (seur. s.).

Kuten kuviosta voidaan todeta, jää massanomaava, alunperin syntyneen palloallonkeskuksessa sijainnut valolähde sitä enemmän jälkeen leviävän valorintamapallon keskipisteestä mitä lähempänä lähetyspiste on painovoimakeskuksesta. Schwarzschildin säteen sisäpuolella on koko valoalto jo lähettimen ulkopuolella menossa kohti aukon keskipistettä.



Mitä lähempänä painovoimakeskusta valosignaalin lähettäminen tapahtuu, sitä enemmän pallomainen valorintama suuntautuu kohti keskusta.

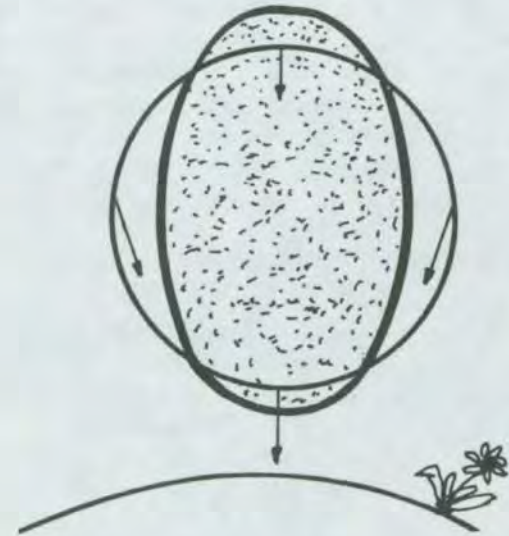
Mustan aukon ominaisuudet turistikohteena

Edellä on jo pitkään puhuttu mustasta aukosta lähinnä sen kannalta, miten valoaltojen rintamat käyttäytyvät valolähteen pudotessa kohti massajakautumaa, joka jostakin syystä on romahtanut Schwarzschildin säteensä sisäpuolelle. Vaikka dramaattisin ilmiö mustan aukon yhteydessä onkin se, että valokartiot "kaatavat" sisältönsä kohti painovoimakeskusta, jos valolähde sijaitsee R :n eli niinkutsutun **tapahtumahorisontin** sisäpuolella, on kuitenkin mielenkiintoista seurata, mikä on alkuperäisen romahtaneen objektin historia ja lopullinen kohtalo tässä prosessissa.

Tarkastellaan vaikkapa tarpeeksi suurimassaista, pyörimätöntä tähteä, joka "elon myrskyissä" on käyttänyt loppuun kaikki sisäistä painetta synnyttävät energialähteensä. Kappaleen luhistuessa avaruusaikana kaarevuus kasvaa koko ajan Einsteinin yleisen suhteellisuusteorian mukaisesti. Tämä avaruusaikana kaarevuuden matemaattinen kuvaaminen vaatisi suhteellisen pitkälle menevää differentiaaligeometrisia koneistoja, jollaisen esittämiseen ei tämän esityksen puitteissa ole mahdollisuuksia. Havainnollisimman kuvan kaarevuudesta saanee, kun tarkastellaan niinkutsuttua **geodeettista deviaatiota**, joka kertoo,

kuinka paljon läheisistä pisteistä lähteneet geodeettiset viivat (ks. luku 1.) eroavat toisistaan. Nämä viivathan edustavat yleisessä suhteellisuusteoriassa vapaasti painovoimakentässä liikkuvien kappaleiden rajoja. Esimerkiksi yksinkertaisimmassa kaarevassa avaruudessa, pallon pinnalla, geodeettisia viivoja ovat isoympyrät. Jos ajatellaan esimerkiksi, että lähdemme ystävämme kanssa pohjoisnavalta taivaltamaan kohti etelää pitkin isoympyrää siten, että viiden metrin päässä navasta etäisyytemme on n. seitsemän metriä, ovat tiemme eronneet päivän-tasaajalle tullessamme jo n. kymmentuhatta kilometriä. Painovoiman yhteydessä tämä kaarevuudesta johtuva deviaatio ilmenee selvimmän **vuorovesivoimina**, lähempänä painovoimakeskusta sijaitsevien kappaleiden pudotessa suuremmalla kiihtyvyydellä kuin samalla hetkellä etäämpänä olevien.

Jo Einstein osoitti, että kappaleeseen vaikuttava painovoima voidaan "kumota" jokaisessa avaruus-aika-pisteessä valitsemalla vertailusysteemi, joka putoaa vapaasti vallitsevassa kentässä. Paras esimerkki tästä painovoiman katoavaisuudesta lienee itsensä Einsteinin esittämä "Putoavan hissin tapaus", joka nykyisenä avaruusmatkailun aikakautena on television kautta tullut jokaiseen kotiin, kun maapallon lähiavaruudessa matkaavat astro- ja kosmonautit ovat uutislähe-



Sumupallo muuttaa muotoaan pudotessaan vapaasti kohti pallomaista painovoimakeskusta.

tysten katsauksissa leijailleet hammasharjoineen ja jakoavaimineen painottomina kapsleissaan. Toisin on tilanne painovoiman epähomogeenisuudesta johtuvien vuorovesivoimien (nimihirviö, jota parempaa ei ole käytössä) osalta, niitä ei voida eliminoida millään putoamistempulla. Ajatellaan esimerkiksi vapaasti kohti maapalloa putoavaa tutkijaa, jota ympäröi alunperin pallomainen sumu. Sumussa olevan suhteellisuusteoreetikon lähestyessä maan pintaa hän toteaa sumupallonsa muuttavan muotonsa ellipsoidiksi, koska kiihtyvyys lähempänä maata olevilla sumuhiukkasilla on jatkuvasti suurempi kuin pallon yläosassa. Asiantilan voisi todeta myöskin sanomalla, että avaruus-ajassa maapallon massan läheisyydessä liikkuvien sumupisaroiden geodeettisten viivojen avaruusprojektiot muodostavat suppenevan viuhkan (kuva). Maan pinnalla Kuun painovoimakentän epähomogeenisuus aiheuttaa valtamerien vuorovesivaihtelut.

Aurinkokunnassamme vuorovesivoimat ja niistä johtuvat ilmiöt ovat suhteellisen pieniä, suurimmat itseasiassa esiintyvät Maan pinnalla, ja ne nimenomaan aiheutuvat Maan omasta gravitaatiokentästä. Näiden ”maallisten” vuorovesivoimien aikaansaamia ilmiöitä ei kuitenkaan havaita laboratoriomittakaavassa, vaikka Kuun huomattavasti heikompi vaikutus voidaankin rekisteröidä valtamerien laajassa massiivisessa detektorissa. Tämä vuorovesivoimien pienuus merkitsee sitä, että neliulotteisen avaruus-ajan kaarevuus Maan pinnalla ei laboratoriomittakaavassa ole merkittävä eikä edes mitattavissa. Avaruus-ajan kaarevuuden mittana voidaan käyttää **kaarevuussädettä**. Aivan samoin kuin pallon pinta on sitä kaarevampi mitä pienempi on pallon säde, on avaruus-aika sitä kaarevampi, mitä pienempi kaarevuussäde on tarkasteltavassa kohdassa (kyseisellä hetkellä).

Maan pinnalla sen massan aiheuttama avaruus-ajan kaarevuussäde on samaa suuruusluokkaa kuin etäisyytemme Auringosta – tällä tosiseikalla ei ole mitään tekemistä itse Auringon kanssa. Auringon pinnalla painovoimakentän epähomogeenisuus ja siitä johtuva kaarevuus ovat paljon pienemmät kuin Maan vastaavat arvot, vaikka Auringon massa onkin monta kertalukua suurempi kuin Maan massa. Auringon aiheuttaman kaarevuuden säde on pienemmästä tiheydestä johtuen noin kaksi kertaa pitempi Maan vastaavaa sädettä.

Valkoisten kääpiötähtien pinnalla on avaruus-ajan kaarevuus jo huomattavasti suurempaa luokkaa: kaarevuussäde on Auringon säteen suuruusluokkaa, n. 700 000 km. Jos astronautti joutusi kääpiötähden läheisyyteen, tuntisi hän vuorovesivoimien vaikutuksen selvästi. Häntä venyttäisi voima, joka on noin yksi neljäsosa hänen painostaan Maan pinnalla. Seuramatkailu neutronitähden läheisyyteen

olisi jo huomattavasti vaarallisempaa, onhan neutronitähden säde vain tuhannesosa valkoisen kääpiön säteestä, ja vuorovesivoimat tämän mukaisesti noin miljoonakertaiset. Tällaisessa repivässä voimakentässä ei matkailijalla ole mitään mahdollisuuksia selviytyä, vaikka hän yrittäisi kääpetyä kuinka pieneksi palloksi tahansa.

Koska vuorovesivoimat ovat verrannollisia kappaleen mittoihin, voitaisiin mittalaitteet rakentaa erittäin pieniksi ja tukevatekoisiksi ja lähettää näin suunnitellut luotaimet tutkimaan niitä ilmiöitä, joita esiintyy tarpeeksi suurimassaisen (2–4 kertaa Auringon massa) tähden luhistuessa ohi neutronitähden stabiilin tilan. Luhistuvan pinnan mukana kulkeva luotain lähettää kaukaiselle tutkijalle tiedon yhä kasvavista vuorovesivoimista. Eräällä hetkellä tietojen virta kuitenkin tyrehtyy, ulkopuolinen havaitsija toteaa ainoastaan luotaimen lähettämien radioaaltojen aallonpituuden kasvavan muutamassa kymmenes-tuhannesosa sekunnissa yli kaikkien rajojen. Tämän sammumisen aiheuttaa tähden romahtaminen oman Schwarzschildin säteensä sisäpuolelle. Ulkopuolinen havaitsija toteaa tähdestä tulevan valon sammuvan ajassa, joka on suoraan verrannollinen tähden massaan. Hän ei kuitenkaan näe pinnan luhistumista R n sisäpuolelle, sillä ulkopuolisen tarkkailijan kellojen mukaan kaikki liikkeet voimakkaassa painovoimakentässä näyttävät hidastuvan ja tähden pinta ikäänkuin nopeasti himmetessään jähmettyy – tästä johtuen mustia aukkoja joskus kutsutaankin ”jäätäneiksi tähdiksi”.

Mittauslaite itse ei rekisteröi millään tavoin hetkeä, jolloin se tähden pinnan mukana siirtyy Schwarzschildin säteen sisäpuolelle. Etäisyydelle R jää avaruuteen ainoastaan tapahtumahorisontti. Tapahtumahorisontin sisäpuolella ei enää mikään voi pysyä paikallaan, oli käytettävissä kuinka voimakkaat raketit tahansa, vaan sekä tähtimateria että mukana kulkeva kuvittelemamme luotain kulkevat vastustamattomasti kohti romahtavan tähden keskipistettä.

Joskus avaruus-ajan esittämiseen tapahtumahorisontin sisäpuolella käytetään niinkutsuttuja **Kruskalin koordinaatteja**, joissa karkeasti sanoen avaruus ja aika ovat vaihtaneet osia. Tässä normaalissa maailmassamme emme millään keinolla pysty estämään aikakoordinaattimme kasvamista – mustan aukon horisontin sisäpuolella emme millään pystyisi vastustamaan etäisyyskoordinaattimme pienenemistä.

Tapahtumahorisontin sisäpuolella, sen välittömässä läheisyydessä, luotaimen vaikuttavat vuorovesivoimat ovat noin satakertaiset verrattuina neutronitähden aiheuttamiin voimiin. Nämä voimat kuitenkin kasvavat muutamissa tuhannesosa sekunneissa niin suuriksi, ettei mikään materiaali niitä kestä, vaan syöksyessään kohti keskipistettä

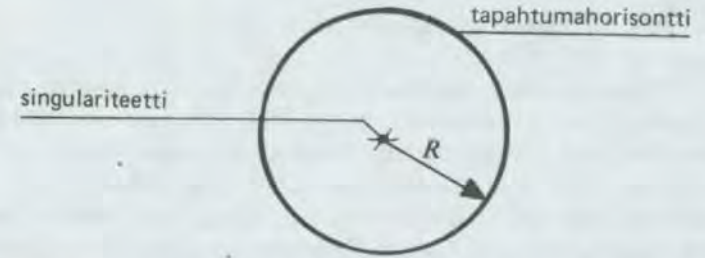
ensin hajoaa aineen molekyyli rakenne, sitten atomit murskautuvat elektroneiksi ja ytimiksi. Tämä prosessi jatkuu edelleen, kun vuorovesivoimat ylittävät atomiytimiä koossapitävät ydinvoimat. Ytimet murtuvat ja protonit ja neutronit puristuvat tilaan, josta nykyinen fysiikan tietämuksemme ei kerro mitään. Aine on saavuttanut päätepisteensä, josta hyvällä syyllä voidaan käyttää nimitystä **singulariteetti**. Parhain tapa kuvata tällaista singulariteettiä lienee vertaus matemaattiseen pisteeseen, jossa tiheys ja avaruus-ajan kaarevuus tulevat äärettömiksi. Edellä esitetty tapahtumien kulku on kuitenkin melkoista spekulatiota, sillä koetulosten saanti pyörimättömän mustan aukon tapahtumahorisontin takaa on mahdotonta, emmekä nykyisen tietämuksemme valossa pysty arvioimaan avaruus-ajan geometrian mahdollisesta kvanttisoitumisesta aiheutuvia vaikutuksia.

Siitä, että mustan aukon muodostuessa materia sinänsä kokonaan luhistuu, seuraa mielenkiintoisena seikkana se, että myöskin kaikki materian hieman eksoottisemmat ominaisuudet häviävät.

Esimerkiksi magneettikenttä, joka neutronitähden syntyessä kietoutuu tähden ympärille erittäin voimakkaaksi kentäksi, romahtaa oman energiansa sisältämän painavan massan vuoksi tapahtumahorisontin sisäpuolelle, joten aukolla ei voi olla magneettikenttää. Edelleen on samantekevää, onko aukko muodostunut tavallisesta materiasta vai antimateriasta. Ainoastaan kolme ominaisuutta ovat merkitseviä siinä mielessä, että ne voidaan turvallisesti aukon ulkopuolelta havaita: sen aine- ja energijakautuman massa, josta aukko on luhistumalla muodostunut, aukon sähkövarauksen aiheuttama staattinen sähkökenttä ja romahtaneen massan alkuperäisestä pyörimisliikkeestä johtuva, aina säilyvä impulssimomentti. Usein sanotaankin, ettei mustalla aukolla ole hiuksia, on vain kolme "haiventa": massa, varaus ja impulssimomentti.

Edellä on toistuvasti oletettu, että massa, josta aukko syntyy, on pallosymmetrinen ja ettei se pyöri. Jos aukko muodostuu epäsymmetrisestä massapallojen joukosta, on systeemin matemaattinen käsittely hyvin vaikeaa. On kuitenkin voitu käyttämällä erilaisia häiriöteoreettisia menetelmiä osoittaa, että kaikissa ajateltavissa olevissa alkutilannetapauksissa luhistumisen aikana poikkeamat pallosymmetriasta häviävät lähinnä gravitaatiovälityksen kautta. Näin ollen gravitaatioluhistuminen kätkee horisonttinsa taakse myös tiedot alkuperäisen systeemin geometrisesta muodosta. Mahdolliseen pyörimisliikkeeseen ja sen vaikutukseen avaruus-aika-geometriaan palaamme myöhemmin.

Pyörimättömän mustan aukon luo tekemämme lyhyen vierailun loppukommunikeaksi voimme hahmotella avaruuskuvan valmiista



Pyörimättömän mustan aukon muodostaa keskipisteessä sijaitseva singulariteetti ja massan määrämällä Schwarzschildin säteen etäisyydellä tapahtumahorisontti.

aukosta: Schwarzschildin säteen päässä keskipisteestä on täysin pallomainen tapahtumahorisontti ja keskipisteessä fyysikot enemmän tai vähemmän onnettomiksi tekevä singulariteetti. Näin ollen aukko ei tarjoa mitään valtavaa muotojen rikkautta, vaan on yksinkertaisuudessaan vaikuttava puhtaaksi geometriaksi muuttuneen aineen muistomerkki.

Pyörivän aukon pyörivä horisontti

Schwarzschildin ratkaisusta seuraava staattinen, puhtaan massan aikaansaama musta aukko ei ole ainoa tunnettu singulariteettiin johtava Einsteinin kenttäyhtälöiden ratkaisu. Musta aukko voi syntyä myös esimerkiksi **sähköisesti varatusta** materiasta. Muutamia vuosia Einsteinin yleisen suhteellisuusteorian synnyn jälkeen esitti jo aiemmin mainittu suomalainen tutkija Gunnar Nordström geometrian, joka sopii kuvaamaan sähkövarausta sisältävän materian aiheuttamaa vääristymistä avaruus-aikarakenteessa. Koska samanmerkkiset varaukset pyrkivät eroon toisistaan, vastustaa varaus poistovoimallaan aukon syntyä. Nordströmin ratkaisu on sekä matemaattisesti että fysikaalisesti mielenkiintoinen. Sen yhteydessä syntyy mm. kaksi sisäkkäistä horisonttia. Emme kuitenkaan tässä yhteydessä käsittele tätä ratkaisua tämän pitempään, koska on ilmeistä, että tähtitieteellisissä objekteissa ei yleensä esiinny tarpeeksi suuria neutraaloimattomia sähkövarauksia.

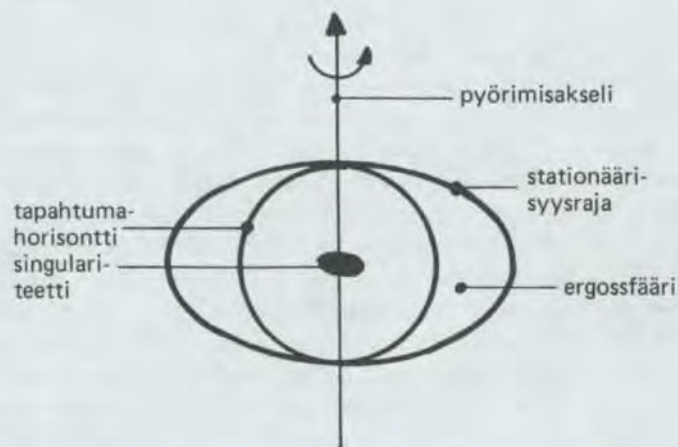
Varattua aukkoa huomattavasti mielenkiintoisempi tapaus tähtitieteelliseltä kannalta on **pyörivän** massan mahdollinen luhistuminen. Onhan tunnettua, että melkein kaikki tähtitaivaan kappaleet planeetoista galakseihin ja vielä suurempiinkin yksikköihin saakka pyörivät. Kun vielä tiedetään, että pyörimisliikkeeseen liittyvä impulssimomentti on kaikissa luhistumisissakin säilyvä fysikaalinen suure, on

huomattavasti todennäköisempää löytää pyörivä kuin pyörimätön aukko.

Tästä impulssimomentin säilymisestä on hyvä esimerkki taitoluistelija, joka tekee piruettia jäällä. Kädet ulospäin ojennettuina hän pyörii melko hitaasti, mutta kun hän vetää kätet kiinni vartalonsa, pyörimisnopeus suuresti kasvaa. Tähdissä nähdään sama ilmiö. Esimerkiksi oma Aurinkomme pyörähtää kerran ympäri noin 25 vuorokaudessa. Jos Aurinko luhistuisi neutronitähdeksi, jonka säde on 20 km, sen pyörähdysaika pieneneisi 0,002 sekuntiin.

Millainen on sitten avaruus-ajan rakenne pyörivän massan ympärillä? Matemaattisesti probleeman ratkaisi vuonna 1963 R.P.Kerr. Tämä Kerrin ratkaisu sisältää vielä enemmän yllättäviä piirteitä kuin Schwarzschildin tulos. Käydään ensin aivan luettelonomaisesti läpi Kerrin aukon luonteenomaiset piirteet. Ensinnäkin pyörivän aukon ympärille muodostuu kaksi horisonttia. Itseasiassa heti, kun Schwarzschildin ratkaisuun lisätään pyörimisliike, hajoaa tapahtumahorisontti kahdeksi, joista sisempi on pallomainen ja ulompi litistyneen pallon muotoinen. Tämä ulompi horisontti, ns. **stationäärisyysraja**, koskettaa sisempää tapahtumahorisonttia navoilla, jotka määrää pyörimisakseli (kuva).

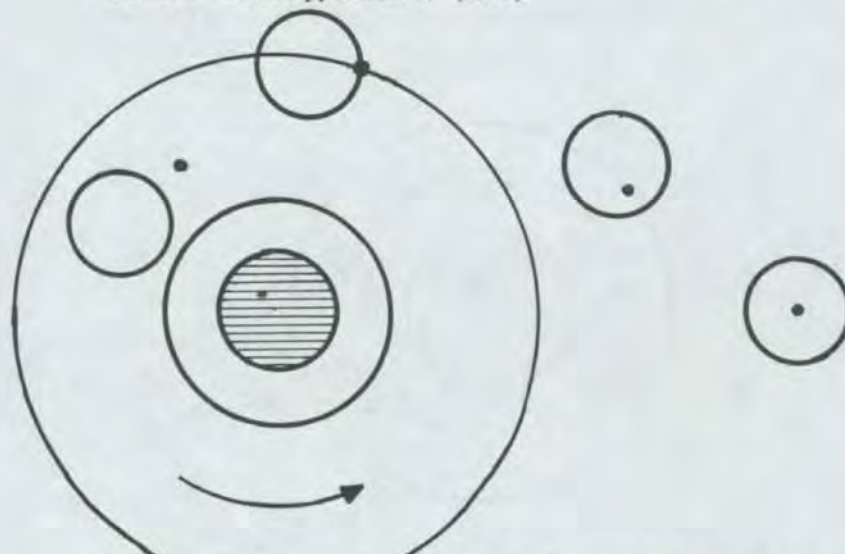
Toiseksi, pyörimisliike muuttaa radikaalisti keskustan singula-



Pyörivän mustan aukon pääosat muodostuvat uloimmasta stationäärisyysrajasta, sisemmästä tapahtumahorisontista ja keskustassa sijaitsevasta singulariteetista. Kahden horisontin väliin jäävää tilaa kutsutaan ergossfääriksi.

riteetin luonnetta. Schwarzschildin singulariteetti on kolmiulotteinen ja avaruudenlaatuinen. Tämä tarkoittaa sitä, että se on määrättyssä kolmiulotteisessa "laatikossa" sijaitseva piste, jossa koordinaatistojen kulku on pysähtynyt äärettömän voimakkaassa painovoimakenkässä. Kerrin singulariteetti taas on kaksiulotteinen ja ajanlaatuinen. Tähän ominaisuuteen palataan hetken kuluttua, kun spekuloidaan tieteisromaanien tarinoiden hyperavaruusmatkojen toteutumismahdollisuuksilla pyörivissä mustissa aukoissa. Muilta ominaisuuksiltaan on pyörivä aukko yksinkertaisemman veljensä kaltainen. Sen vetovoima jonkin matkan päässä on aivan Newtonin lain mukainen: suoraan verrannollinen sen massaan ja kääntäen verrannollinen etäisyyden neliöön. Tapahtumahorisontti on tässäkin tapauksessa raja, jonka takaa ei ole paluuta, ei ainakaan meidän avaruuteemme.

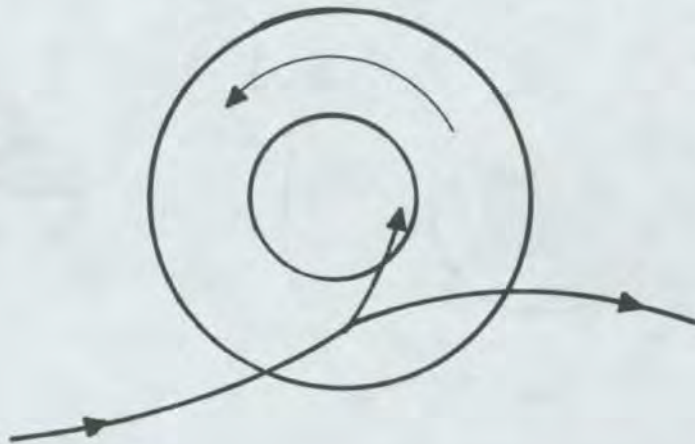
Tarkastellaan sitten lähemmin pyörivää aukkoa ja niitä ilmiöitä, joita tällaisen objektin läheisyydessä nykyisten tietojemme mukaan saattaisi esiintyä. Ulkoapäin aukkoa lähestyttäessä ensimmäinen esiintuleva poikkeava ilmiö on se, että **inertiaalisysteemit** (vapaasti putoavat havaitsijat) ja sen mukaisesti myös kaikki liikkuvat kappaleet valonvälähdyksen palloaaltorintamia myöten tuntuvat joutuvan jonkinlaiseen "avaruuspyörteeseen" (kuva).



Pyörivä musta aukko poikkileikkauksena. Pyörimisakseli paperin tasosta kohtisuoraan ylöspäin. Inertiaalisysteemit (vapaasti putoavat havaitsijat) tempautuvat mukaan aukon pyörimisliikkeeseen, ja valolähteet jäävät kokonaan syntyvän palloaallon ulkopuolelle.

Kun putoamisliikkeessä läpäistään stationäärisyysraja, tullaan **ergossfääriin**, joka ominaisuuksiltaan on mitä kummallisinkin. Inertiaalisysteemit jatkavat edelleen putoamistaan kohti sisempänä sijaitsevaa tapahtumahorisonttia, mutta kiertävät samalla aukon pyörimissuuntaan. Ergossfääri on siinä mielessä outo alue, ettei siellä voi olla paikallaan ulkopuoliseen kiintopisteeseen nähden, oli käytettävissä kuinka voimakkaat raketit tahansa. Tästä ominaisuudesta stationäärisyysraja onkin saanut nimensä: sen sisällä ei mikään voi olla stationäärisessä tilassa.

Ergossfäärin kovin tieteellisen tuntuinen nimi johtuu taas Roger Penrosen keksimästä ilmiöstä. Tästä alueesta voi nimittäin karata osa siellä säteilystä valosta ja myöskin osa siellä valon nopeutta hitaaminkin liikkuvasta kappaleesta. Erikoisinta tässä ilmiössä on se, että jos tähän alueeseen pudonnut kappale hajoaa siten, että toinen puolisko putoaa tapahtumahorisontin sisäpuolelle alueeseen, josta ei ole paluuta, voi toinen osa tulla stationäärisyysrajan ulkopuolelle. Tällä ulostulevalla osalla voi sopivissa olosuhteissa olla **enemmän energiaa** kuin alkuperäisellä kokonaisella kappaleella. Toisin sanoen, jos heitämme pyörivään aukkoon sopivassa suunnassa kumiteräsaappaat, voimme saada takaisin paljon suuremmalla nopeudella liikkuvat kumiterät. Tämän vuoksi kutsutaan aluetta ergossfääriksi, merkitsehän kreikan sana ergos juuri työtä eli energiaa. Periaatteessa on mahdol-



Ergossfääriin putoavan kappaleen osa voi tulla ulos suuremmalla energialla varustettuna kuin mitä alkuperäisellä kappaleella oli.

lista, että ulostuleva osa saa mukaansa koko aukkoon putoavaa massaa vastaavan energian. Pyörivä musta aukko voisi näin toimia hyötysuhteeltaan parhaana mahdollisena energiantuottajana. Hyötysuhde olisi parhaimmillaan 100 %, kun se esim. vedyn fuusioreaktiota hyväksikäyttäen on vain noin 1 %.

Edellä kuvattu energiantuotto-prosessi perustuu siihen, että



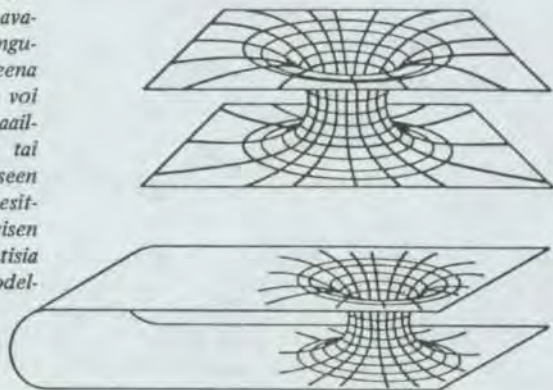
Korkealle kehittyneen sivilisaation menetelmä energiapulman ja jäteongelman yhtäaikaiseksi ratkaisuksi. Kaupunki on rakennettu pyörivän mustan aukon ympärille. Jätteet pudotetaan aukkoon, ja aukon ergossfääri lähettää kuljetusastiat kovalla vauhdilla takaisin ylös. Ne siepataan talteen, ja sieppauksessa ne käyttävät sähkögeneraattoreita. (Kuva Misner-Thorne-Wheeler, Gravitation, s. 908).

tällä tavoin hidastetaan aukon pyörimisliikettä. Penrosen prosessin energiantuottomahdollisuus on kuitenkin rajoitettu. Ainoastaan noin 30 % pyörivän aukon kokonaisenergiasta voi olla käytettävissä olevaa pyörimisenergiaa. Avaruudessa tämäntyyppinen prosessi aiheuttaa sen, että siellä mahdollisesti olevaan pyörivään aukkoon kaikista suunnista putoava pöly hidastaa pyörimisliikettä ja samalla lisää aukon massaa.

Penrosen prosessiin liitetään usein tieteiskirjallisuuden piiriin kuuluva lyhyt novelli, joka kertoo tulevaisuuden sivilisaatiosta, joka on ratkaissut samalla kertaa saaste- ja energiakriisinsä. Superihmiset ovat perustaneet siirtokuntansa avaruudessa leijuvan onton pallon pinnalle. Pallon sisälle he ovat vanginneet pyörivän Kerrin aukon. Jokapäiväiset talous- ja teollisuusjätteensä he sijoittavat tukeviin itsestään avautuviin laatikoihin, jotka he ampuvat pitkin tarkoin laskeutuja ratoja aukon ergossfääriin. Täällä laatikot aukeavat, jätteet putoavat läpi tapahtumahorisontin ja tyhjät laatikot palaavat suurella nopeudella pallon pinnalle. Täällä tyhjien laatikoiden virta ohjataan turbiineihin, joiden avulla pyöritetään sähköenergiaa tuottavia generaattoreita. Kehittämällään menetelmällä he pääsevät kertaikkiaan eroon turhista jätteistä muuttamalla niiden massan energiaksi.

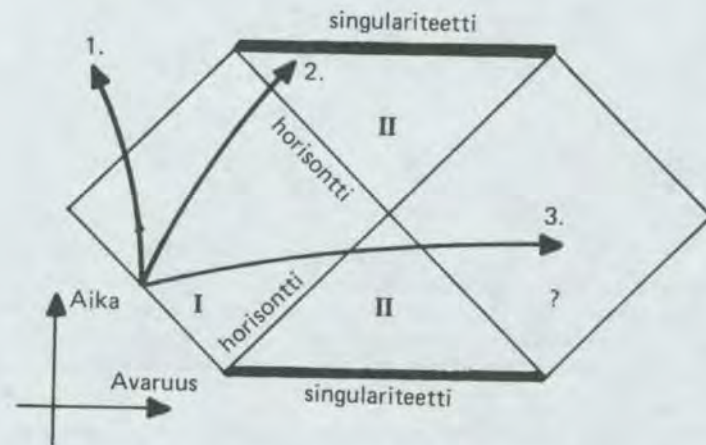
Jos jatkamme ajatusmatkailuamme ergossfääristä läpi täysin pallomaisen tapahtumahorisontin, tulemme tilaan, jonka ominaisuudet ovat osin samat kuin Schwarzschildin aukonkin tapauksessa. Pudotessamme tunnemme kasvavien vuorovesivoimien lisäksi yhä voimistuvan "avaruus-aika-pyörteen" vaikutuksen. Pyörimättömän aukon tapauksessa kohtalomme on jauhautuminen kvarkeiksi ja kvark-

Schwarzschildin ratkaisun symmetrisyydestä johtuu, että meidän avaruutemme mustalla aukolla on singulariteetin toisella puolella vastineena avautuva "valkoinen aukko". Se voi avautua joko johonkin toiseen maailmankaikkeuteen (ylempi kuva) tai oman universumimme kaukaiseen pisteeseen (alempana). Kuvien esittämät "madonkolot" ovat yleisen suhteellisuusteorian matemaattisia seurauksia, joiden yhteydestä todelliseen maailman ei ole tietoa.

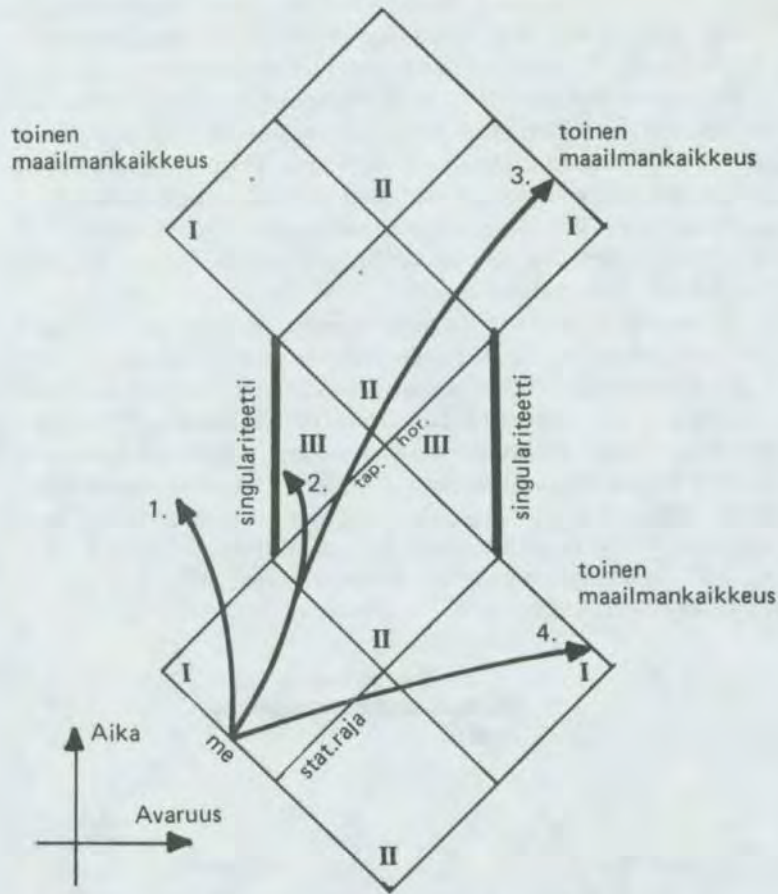


kien osiksi, mitä ne sitten lienevätkin, ennen muuttumistamme puhtaaksi geometriaksi. Eräs pieni toivon kipinä meillä matkailijoilla kuitenkin on. Voi nimittäin olla niin, että aikaisemmin antamamme kuva tapahtumahorisontin takaisesta maailmasta onkin hieman virheellinen. Eräs toinen malli esimerkiksi antaa topologisesti toisenlaisen kuvan tilanteesta: Musta aukko voi madonkolan kaltaisesti johtaa pitkin Einsteinin-Rosenin sillan nimellä tunnettua käytävää toiseen paikkaan ja aikaan omissa maailmankaikkeudessaamme. Luultavaa kuitenkin on, että vaikka siltä muodostuu, sen keskellä sijaitsee singulariteetiksi luokiteltava ahtautuma.

Ennen kuin suuntaamme matkamme viimeisen osuuden kohti pyörivää singulariteettiä, tutustumme aivan pintapuolisesti ns. Kruskalin diagrammaan. Tämä avaruus-ajan esitys vaatisi perusteellisesti esitettäessä tutustumisen matemaattisesti suhteellisen vaativaan Kruskalin koordinaatistoon. Joudumme tässä yhteydessä vetoamaan lähinnä lukijan avaruus-ajalliseen intuitioon. Käytetyt koordinaatit, joilla tapahtumien paikka ja aika esitetään, jakautuvat kuten vanha tuttu (x, y, z, ct)-koordinaatistokin paikanlaatuksiin ja ajanlaatuksiin. Kuten aikaisemminkin valonsäteet kulkevat pitkin graafisen aikataulun suoria, jotka ovat 45° :n kulmassa kaikkiin koordinaatteihin



Pyörimättömän aukon Kruskalin diagramma. Alue I kuvaa aikaa ja avaruutta kotiavaruudessaamme. Alue II esittää tapahtumia, jotka sattuvat horisontin ja singulariteetin välissä. Diagrammaan piirretyistä matkoista matka 1. on sallittu ja suuntautuu turvallisille alueille. Matka 2. johtaa tuhoon. Matka 3. on paikanlaatuksena mahdoton.



Kerrin aukkoon liittyvä Kruskalin diagramma. Alue I sijaitsee stationäärisyyserojen ulkopuolella. Alue II esittää ergosfäärejä. Alue III kuvaa aikaa ja avaruutta tapahtumahorisontin ja singulariteetin välissä. Aika-avaruusmatkailureitit 1., 2., ja 3. ovat sallittuja, reitti 4. ei paikanlaatusena ole sallittu.

nähdän. Kaikki mahdolliset matkat muodostavat yli 45° kulman avaruudenlaatuisten koordinaattien suhteen.

Edellisen sivun kuvassa on esitetty pyörimättömän mustan aukon Kruskalin diagramma. Kuten huomataan, oma maailmankaikkeutemme rajoittuu kuvion vasempaan laitaan. Aaltoviivalla esitetty singulariteetti rajoittaa kuviota ylhäältä ja alhaalta. Kuvioon piirretyistä erilaatuisista matkoista todetaan, että tie, joka kerran on kulkenut

läpi tapahtumahorisontin, törmää väistämättä singulariteettiin.

Pyörivän aukon Kruskalin diagramma on vielä monimutkaisempi kuin edellä esitetty pyörimättömän avaruus-aika-syöverin kuva. Oheisessa kuvassa on piirretty Kerrin ratkaisua esittävä diagramma. Kuviossa näkyy aaltoviivalla kuvattuna pystysuorassa (ajankäytisena) aukon keskustassa sijaitseva singulariteetti. Tämä singulariteetti on pyörimisakselia vastaan kohtisuorassa tasossa oleva äärettömän ohut levy, eikä piste kuten pyörimättömän aukon tapauksessa.

Kuten mielikuvituksen avulla hieman jatkettuun diagrammaan piirretyistä erityyppisistä matkoista huomataan, voidaan sopivasti luovimalla mahdollisesti päästä turvallisille alueille toiseen maailmankaikkeuteen, vaikka reitti kulkeekin tapahtumahorisontin läpi. Tätä topologiaan perustuvaa ajatusleikkiä on joskus pyritty tarjoamaan vakavasti otettavana tieteellisenä mahdollisuutena matkustaa toisiin maailmankaikkeuksiin. On kuitenkin muistettava, että koko idea perustuu siihen, että Einsteinin yleinen suhteellisuusteoria pätee myös vahvojen gravitaatiokenttien tapauksessa. Vaikka kukapa tietää, jos todellisuus on vielä tätäkin tarua ihmeellisempi.

Joskus tähän Kerrin ratkaisujen topologiaan liitetään mahdollisuus niinkutsuttujen valkoisten aukkojen olemassaolosta. Tällöin on kyse siitä, että jossain toisessa universumissa tapahtuva romahdus pyöriväksi aukoksi purkautuu kotiavaruuteemme aikakehitykseltään käännettynä aukkona. Tämänkaltaisen ilmiön esittäminen eräänä selitysmahdollisuutena räjähtävien ja muiden erikoisten galaksien keskuksissa tapahtuville ilmiöille.

Matemaattisissa malleissa esiintyvät singulariteetit tekevät usein fyysikot onnettomiksi, koska tällainen matemaattinen, patologinen käyttäytyminen on merkinä mallin epäonnistumisesta, ainakin kyseisellä alueella. Joskus kuitenkin erikoispisteitä käytetään määrättyjen asioiden päteväänkin kuvailuun, kuten esim. alkeishiukkasfysiikassa. Mustien aukkojen singulariteetit ovat määrättyssä mielessä ainutlaatuisia. Ne koskevat avaruuden ja ajan rakennetta ja saattavat samalla materian tilaan, josta meillä ei ole mitään laboratorioissamme varmistettua tietoa. Pyörimättömän aukon singulariteetti on kuitenkin aina kätkeytyä tapahtumahorisontin taakse, eikä se pysty vaikuttamaan avaruuteemme jokapäiväisiin tapahtumiin.

Pyörivien aukkojen tutkimuksen yhteydessä on paljastunut ns. **alastomien singulariteettien** olemassaolon mahdollisuus. Alaston singulariteetti merkitsee sitä, että tarpeeksi nopeasti pyörivän aukon ekvaattorilla keskipakovoima voittaa painovoiman. Tällöin tapahtu-

mahorisonetti repeää auki ja paljastaa keskustassa olevan levymäisen singulariteetin. Sen arvaamattomat vaikutukset pääsevät osallistumaan ulkopuolella olevan maailman ilmiöihin.

Mustan aukon sisällä aine on todella niin tuntemattomassa tilassa, että fyysikot eivät osaa sanoa siitä yhtään mitään. Siksi ei myöskään tiedetä, mitä säteilyä tms. singulariteetti voisi lähettää ulkopuolella olevaan avaruuteen. Tästä saadaan tietoa vasta sitten, kun voidaan tehdä havaintoja alastomasta singulariteetista (jos sellaista nyt sitten koskaan löydetään).

Jotkut erittäin rohkealla mielikuvituksella varustetut tutkijat ovat vakavassa mielessä esittäneet oletuksen, että meidänkin Galaksimme keskustassa sijaitsisi ehkä miljardien yhteenromahtaneiden tähtien muodostama alaston singulariteetti. Galaksimme alaston singulariteetti lähettäisi vaikutuksensa juuri Linnunratamme tasoon, ja mekin olisimme sen vaikutussektorissa. Toisaalta on kuitenkin mahdollista, että gravitaatiromahduksissa syntyvät singulariteetit aina pysyvät kätkeytyinä tapahtumahorisonittien takana. Tähän oppiritaan on usein singulariteettien piilottajien taholta manattu mukaan ns. "kosminen sensori", joka toimittaa alastomina epämieluisat singulariteetit piiloon horisonitin taa.

Miten mustia aukkoja voisi muodostua ja miten niitä etsitään

Parilla kymmenellä edellisellä sivulla olemme ajatuskokeiden avulla pyrkineet lyhyesti, yksityiskohtiin menemättä, johdattamaan lukijat mustien aukkojen maailmaan. Tämä maailma on ehkä aika-ajoin tuntunut suoraan tieteiskirjallisuuden sivuilta poimitulta fantasiaa, mutta kaikki modernin fysiikan ja tähtitieteen tulokset viittaavat siihen, että niitä on todella olemassa. Yleensä jos jokin on luonnon lakien mukaan mahdollista tapahtua, niin kyllä se joskus jossain tapahtuu. Näinollen yksinomaan meidänkin kotigalaksissamme aukkoja saattaa olla miljoonia.

Viimeiset kymmenen vuotta ovat olleet tiivistä aukkojen etsimisen aikaa. Tämän haravoinnin tuloksena on luetteloihin saatu useita kymmeniä lupaavia ehdokkaita. Tutkimuksen alkuvuosina tuntui ehdokkaiden jako "vuohiin ja aukkoihin" melkoisen toivottomalta yritykseltä. Vuoden 1972 jälkeen tutkimus on edistynyt ripeää vauhtia, kun röntgensäteilyä havaitsevat satelliitit on saatu Maata kiertävälle radalle. Näiden röntgensäteilyn alueella tehtyjen havaintojen valossa, yhdistettynä erittäin tarkkoihin näkyvän valon alueella teh-

tyihin dopplersiirtymän mittauksiin, on melkoisella varmuudella (98 %) vahvistettu, että Joutsenen tähdistön Cygnus X-1 sisältää mustan aukon. Suurin osa tätä kappaletta käsitteleeikin tätä objektiä, sen havaittuja ominaisuuksia ja niiden tulkintaa.

Edellisissä luvuissa olemme seuranneet "tavallisen tähden tarinaa" aina neutronitähden muodostumiseen saakka. Tämän jälkeen tilanne on melko suoraviivainen. Jos tähti on kehityksensä viime vaiheissa, esim. supernovaräjähdyksessä, menettänyt niin paljon massaansa, että elektroni- tai neutronikaasun Paulin kieltoäännöstä johtuva paine pystyy voittamaan painovoiman kokoonpuristavan vaikutuksen, niin tähti rauhoittuu valkoiseksi kääpiöksi tai neutronitähdeksi. Jos massaa on jäljellä liikaa, ei tiedetä mitään mekanismeja, mikä estäisi tähden jäännöksiä luhistumasta mustaksi aukoksi. Tämä kriittinen massa on Ruffinin laskelmien perusteella korkeintaan noin kolme Auringon massaa. Tämä raja saattaa olla alempikin; tällä hetkellä ei vielä oikein tunneta kaikkia materian ominaisuuksia tiheyksissä, jotka ylittävät ydinaineen tiheyden ($2 \cdot 10^{14} \text{g/cm}^3$). Toisin sanoen mikään noin maapallon kokoinen valkoinen kääpiö tai halkaisijaltaan parinkymmenen kilometrin suuruinen neutronitähti ei voi olla massaltaan suurempi kuin kaksi-kolme Auringon massaa. Tämä kriittinen massa on juuri tärkein syy, jonka perusteella esim. Cygnus X-1 on luokiteltu mustaksi aukoksi.

Aina 1960-luvun alkuvuosiin saakka pidettiin yleisen suhteellisuusteorian perusteella saatuja mustia aukkoja lähinnä hupaisina "tiikereinä" paperilla. Siihen saakka uskottiin yleisesti, että on olemassa jonkinlainen "kosminen liikunnonohjaaja", joka huolehtii siitä, että tähti menettää liian kilonsa ennen lopullista luhistumistaan valkoiseksi kääpiöksi. Tämän vuoksi ei mitään laajamittaista aukkojen etsintäoperaatiotaakaan ollut käynnistetty.

1960-luvun puolivälin tienoilla alkoi mielikuva rauhallisesta, hitaasti muuttuvasta maailmankaikkeudesta nopeasti muuttua. Löydettiin kvasaarit, räjähtävät galaksit, suuren alkuräjähdyksen jälkeensä jättämä 3 K:n kosminen lämpösäteily ja viimein 1967 pulsarit, jotka jo seuraavana vuonna melko kiistatta tulkittiin neutronitähdeksi. Koska neutronitähtiä oli olemassa, ei ollut enää suurtakaan henkistä muuria estämässä uskoa mustien aukkojen olemassaoloon.

Havaitsevan tähtitieteilijän kannalta tärkein kysymys on, mitä havaittavia fysikaalisia prosesseja aukon ympäristössä voi tapahtua. Jos musta aukko muodostuu yksinäisestä massiivisesta kuolevasta tähdestä, sen havaitseminen on erittäin vaikeaa. Vaikka lopulliseen romahdukseen saakka tähti pystyisi pitämään melkein maksimaaliset

50 Auringon massaa, sen halkaisija olisi vain noin 300 km, joka aivan 10 valovuoden lähietäisyydelläkin merkitsee vain yhden miljoonasosa kaarisekunnin kulmaa. On selvää, ettei meillä ole mitään mahdollisuutta havaita näin pienen objektin liikettä mustana läiskänä tähtitaivasta vasten. Jokainen tähtitieteen harrastaja tietää, miten vaikeaa on edes havaita Merkuriuksen kulkua Auringon kirkkaan pinnan editse, vaikka Merkurius on melkein käden ulottuvilla ja läpimitaltaan 6000 km.

Toinen melkein yhtä toivoton tapa etsiä yksinäisiä mustia aukkoja perustuu ns. linssi-ilmiöön: aukon takana sijaitsevan tähden valoon vaikuttaa aukon painovoimakehtä kokoavasti linssin tavoin. Näin aukon kulkiessa Maan ja tähden välistä tähti näyttää jonkin aikaa kirkkaammalta. Tällaisen ilmiön etsiminen on kuitenkin sen äärimmäisen harvinaisuuden vuoksi pelkkää ajan hukkaa.

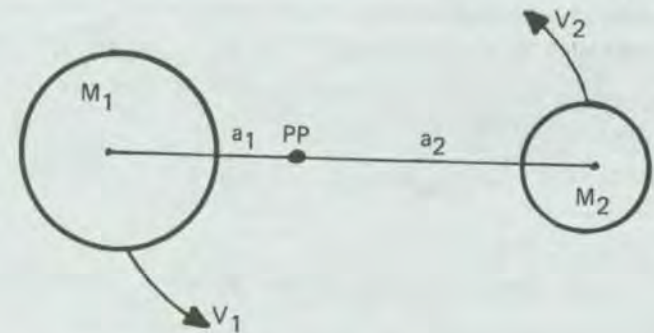
Hieman realistisempi menetelmä yksinäisen aukon löytämiseksi perustuu ns. "pölynimuri-ilmiöön". Jos aukko kulkee tähtien välisessä pölypilvessä, se imee ympäristöstä gravitaatiokentällään ionisoitunutta kaasua, joka kiihtyvässä liikkeessä kohti aukon keskustaa säteilee sähkömagneettista säteilyä melko laajalla spektrillä. Aivan karkeisiin suuruusluokkaskelmiin perustuen on arvioitu, että H II-alueella (ionisoituneen vedyn pilviä) kulkiessaan säteilisi aukko, jonka massa on 10 Auringon massaa, yhtä voimakkaasti kuin Aurinko. Pölypilvi, joka ilmiön synnyttämiseen tarvitaan, haittaa kuitenkin ratkaisevassa määrin havaintojen tekoa niin, ettei tällaista aukkoa luultavasti voitaisi havaita. Vuonna 1971 Schwarzmanna esitti "pölynimuri"-ilmiöön liittyvän mielenkiintoisen lisäpiirteen. Galaktisella heikolla magneettikentällä ($B \approx 10^{-6}$ gaussia) saattaa olla ratkaiseva merkitys syntyvän säteilyn spektrin luonteeseen. Normaalisti aukko kyllä hieman imee magneettisia voimaviivoja puoleensa, mutta varattujen hiukkasten virran pudotessa kohti aukkoa "jäätävät" voimaviivat tähän virtaan kiinni, ja aukon läheisyydessä kenttä huomattavasti vahvistuu. Ilmiö on aivan sama kuin Maan magneettikentän venymisen varjon puolella aurinkotuulen vaikutuksesta. Ionisoidun kaasun liikkeessä näin voimistuneessa magneettikentässä on syntyvä säteily ns. synkrotronisäteilyä noin 10^{15} Hz:n taajuudella. Kymmenen Auringon massaa sisältävä aukko säteilisi tätä säteilyä voimakkuudella, joka on noin 2,5 % Auringon säteilyenergiasta. Tämä vastaa ns. DC-kääpiöiden (valkoisia kääpiöitä, joiden spektrissä ei havaita selviä spektriviivoja) kirkkautta. Tämän perusteella on arveltu, että ainakin jotkut näistä objekteista saattaisivat olla mustia aukkoja.

Huomattavasti helpompaa mustan aukon havaitseminen on,

jos aukko on komponenttina kaksoistähtisysteemissä, joka voidaan selvästi havaita. Vuonna 1964 esitti neuvostoliittolainen astrofyysikko B.Zeldovich mahdollisuuden, että näkyvää tähteä kiertävä musta aukko voitaisiin havaita näkyvän tähden spektriviivojen dopplersiirtymän avulla. Tällaisia spektroskooppisia kaksoistähtiä, joissa optisesti havaitaan ainoastaan yksi tähti ja toisen tähden olemassaolo todetaan jaksottain vaihtelevasta dopplersiirtymästä näkyvän komponentin spektrissä, on tutkittu jo kauan. Zeldovichin tutkimusryhmä kävi läpi satoja systeemejä sisältävät spektroskooppisten kaksoistähtien luettelot ja laski näkymättömien komponenttien massat löytääkseen tarpeeksi massiivisia pimeitä tähtiä. Tähdessä muodostuneen mustan aukon ensimmäinen kriteeri, massa vähintään kolminkertainen Auringon massa verrattuna, täytyisi olla mahdollisella kandidaatilla toteutettu. He löysivät kaikkiaan viisi sopivaa ehdokasta mustaksi aukoksi.

Vuoden 1968 tienoilla amerikkalaisen Kip Thornen ryhmä laati täydennetyt ja parannetun painoksen ehdokaslistasta. Tarkempi tutkimus osoitti kuitenkin että jokainen kandidaatti voitiin sittenkin selittää muunlaisiksi objekteiksi. Joissakin tapauksissa saattoi näkymättömän osa itse olla vielä kaksoistähti, jolloin massat putosivat alle kriittisen rajan. Eräissä systeemeissä näkyvän tähden spektri oli niin monimutkainen, että siihen saattoi hukkua heikkovaloisen seuralaisen lähettämä informaatio.

Koska edellämainittu dopplersiirtymään perustuva massan määrittäminen on avainasemassa ehdokkaan massaa määrätessä, lienee syytä käydä läpi ainakin sen tärkeimmät fysikaaliset periaatteet. Rajoitetaan tarkastelu klassisen mekaniikan tasolle, joka jo an-



Kaksoistähtisysteemin massojen laskemisessa tarvittavat suureet.

taa varsin luotettavia tuloksia ainakin tapauksissa, joissa komponenttien etäisyys on tarpeeksi suuri. Erittäin suurimassaisilla ja lähikäin olevilla pareilla pitäisi jo käyttää yleistä suhteellisuusteoriaa, jolloin laskut muodostuvat huomattavasti vaikeammiksi.

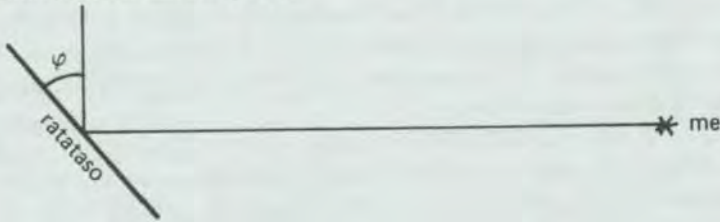
Tarkastellaan kuvan esittämää systeemiä. Tällaisessa systeemissä vallitsee tasapainotila, jossa systeemin osat kiertävät yhteistä painopistettä (PP) etäisyyksillä a_1 ja a_2 . Massojen, etäisyyksien ja ratanopeuksien välillä vallitsevat suhteet

$$M_1/M_2 = a_2/a_1 = v_2/v_1.$$

Näkyvän tähden dopplersiirtymästä havaittu ratanopeus riippuu a_1 stä yhtälön

$$v_1 = 2\pi a_1 \sin\varphi/T$$

mukaisesti, jossa T on kiertoaika, joka havaitaan dopplersiirtymän jaksosta. Yhtälössä esiintyvä kulma φ on ratatason kallistumiskulma näkösuuntaan nähden (kuva).



Kulma φ kuvaa ratatason kallistumista havaintajan ja systeemin yhdistysajan suhteen.

Keplerin kolmannesta laista, joka sitoo planeettaliikkeessäkin ratojen säteet (oikeammin isoakseliin puolikkaat) kiertoaikoihin, saadaan kiertoajalle yhtälö

$$T = 2\pi a^{3/2} (GM_1 + GM_2)^{-1/2},$$

jossa a on osien etäisyys toisistaan eli $a = a_1 + a_2$.

Ensimmäisestä massojen suhteen yhtälöstä saadaan helposti yhtälö

$$a_1 = a \frac{M_2}{M_1 + M_2}.$$

Sijoittamalla näin saatu a_1 n lauseke v_1 n antavaan toiseen yhtälöön saadaan

$$v_1 = \frac{2\pi a}{T} \cdot \frac{M_1}{M_1 + M_2} \sin\varphi.$$

Ratkaisemalla tästä yhtälöstä a ja sijoittamalla saatu tulos Keplerin yhtälöön saadaan pienellä algebrallisella akrobatialla aikaan ns. massafunktioyhtälö

$$\frac{M_2^3}{(M_1 + M_2)^2} \sin^3\varphi = \frac{v_1^3 T}{2\pi G}$$

Tästä yhtälöstä voidaan esimerkiksi ratkaista vaikkapa näkyvämmän tähden massa M_2 , jos v_1 ja T on mitattu dopplersiirtymällä, M_1 määrätty vaikkapa spektriluokkansa perusteella ja kulma φ arvattu tai arvioitu jollakin tapaa. Heikoin kohta tässä menetelmässä on juuri kulman φ määrittäminen. Pimennysmuuttujissa eli kaksoistähtisysteemeissä, joissa suurempi komponentti aika-ajoin katkaisee pienemmästä tulevan säteilyn, voidaan kulman päätellä olevan lähellä 90° ta.

Kaksoistähtisysteemeihin perustuva menetelmä näytti johtavan tulokseen vaikeuksiin. Vuonna 1964 oli kuitenkin esitetty ilmiö, joka ainakin hyvin lähekkäisten tähtien kaksoisysteemeissä antaisi tarpeelliset kriteerit pimeään ehdokkaan luokittamiseksi. Kooltaan hyvin pieni ja tiheä tähti saattaa nimittäin imeä kaasua näkyvästä komponentista. Tämä spiraalirataa pitkin putoava kaasu lämpiää ja lähettää röntgensäteilyä. 1960-luvun alussa ei vielä kuitenkaan ollut käytettävissä instrumentteja täystehoiseen röntgenastronomiaan. Maanpinnallahan ei avaruudesta tulevaa röntgensäteilyä havaita, koska se imeytyy kokonaan ilmakehään. Siihen aikaan saatettiin lähettää säteilyä havaitsevia mittareita raketeilla ilmakehän yläosiin. Tällaiset raketteihin kiinnitetty havaintovälineet saivat kuitenkin ainoastaan vilauksen avaruudesta röntgensäteilyn valossa. Vasta röntgenteleskoopeilla varustetut Maata kiertävät satelliitit aloittivat todella laajamittaisen avaruuden röntgenkartoituksen.

Ensimmäinen röntgenteleskooppi rakennettiin Yhdysvaltojen ja Italian yhteistyönä ja ammuttiin joulukuussa 1970 Uhuru-satelliitissa Maata kiertävälle radalle. Keväällä 1972 Uhurun kokoamat tiedot kerättiin luetteloon, joka sisälsi 125 röntgenlähdettä. Saadut tulokset hämmästyttivät tutkijoita, jotka aiemmin olivat etsineet sopivia aukkokandidaatteja kaksoistähtiluetteloista. Mikään löydettyistä

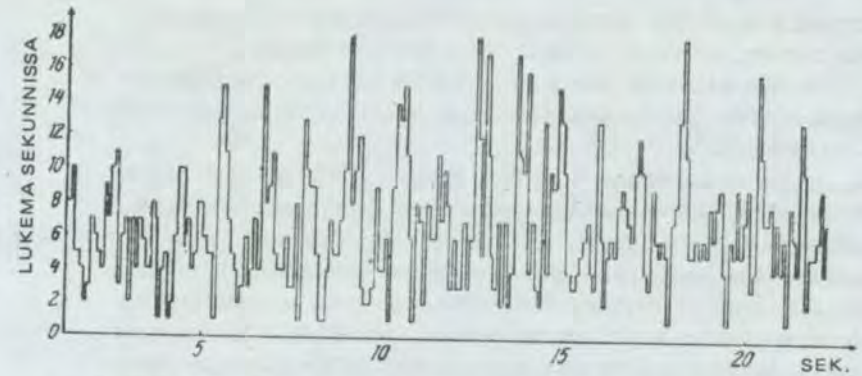
röntgenlähteistä ei ollut aikaisempien ehdokkaiden joukossa. Uusi toivo kuitenkin virisi, kun huomattiin, että kuusi löydetystä röntgenlähteistä oli kaksoistähtisysteemeissä, jotka aikaisemmissa seulonnoissa oli jätetty pois ehdokaslistoilta.

Kahdesta lähteestä havaittiin röntgensäteilyä, joka saapui täsmällisesti katkottuina pulsseina. Toisesta, Centaurus X-3:sta 4,8 sekunnin, ja toisesta, Hercules X-1:stä 1,2 sekunnin välein. Tämänkaltaiset vilkkumajakat eivät voi olla mustia aukkoja. Mikään aukkoihin liittyvä ilmiö ei voi aiheuttaa niin pitkäaikaista jaksotaisuutta. Niinpä näissä lähteissä pimeä seuralainen tulkittiinkin neutronitähdiksi, jotka nimenomaan tunnistetaan pulsareina. Mustan aukon ympärillä ei ole magneettikenttää, joka on oletettu syy pulsareiden majakkailmiöön.

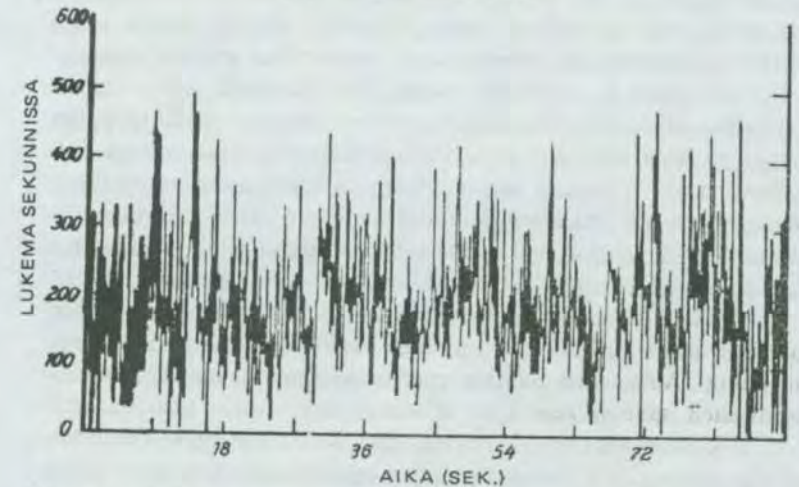
Neljä muuta röntgenlähteinä toimivaa kaksoistähtisysteemiä olivat 2U 1700-37, 2U 0900-40, SMC X-1 ja Cygnus X-1. Lyhenteistä 2U tarkoittaa järjestysnumeroltaan toista Uhuru-luetteloa ja SMC Pientä Magellanin pilveä. Tutkittaessa systeemejä optisilla teleskoopeilla havaittiin kaikissa neljässä jättiläistähti, jonka spektreissä oli selvät jaksottaiset dopplersiirtymät. Lisäksi jokaisessa havaittiin valoa, jollaista voi syntyä vain kuumen kaasun virratessa näkyvästä komponentista näkymättömään. Kolmen ensiksi mainitun objektin röntgenlähteen todettiin säännöllisesti peittyvän näkyvän tähden taakse. Tästä pääteltiin, että pimeä osapuoli oli röntgensäteilyn varsinainen lähde. Oli ilmeistä, että röntgensäteily syntyi kaasun virratessa näkyvästä tähdessä kohti pimeää seuralaista ja kuumen tuessa sisäisestä kitkastaan.

Tällaisen kaasuvirran lämmittäminen lämpötiloihin, joissa röntgensäteilyn syntyminen on mahdollista, vaatii erittäin suuria energioita. Ainoa mahdollinen energialähde on painovoimakenttä. Normaalien tähtien kenttä ei tällaiseen riitä. Ainoa mahdollisuus ovat tähden tiheet lopputilat, valkeat kääpiöt, neutronitähdet tai mustat aukot. Tällöin röntgenlähteen luokan ratkaisee sen massa. Jos se on suurempi kuin 1,4 Auringon massaa, se ei voi olla valkea kääpiö. Jos massa on yli 3 Auringon massaa, lähde on musta aukko.

Aikaisemmin käytiin lyhyesti läpi menetelmä, jolla massa määritetään. Tämänkaltaisilla doppler- ja spektriluokkamittauksilla saatiin objektin 2U 1700-37 näkymättömän osan massaksi 2,5 Auringon massaa. Röntgenlähde 2U 0900-40 antoi vastaavaksi tulokseksi 3 Auringon massaa. Pienen Magellanin pilven kohteen SMC X-1 pimeä seuralainen oli massaltaan kahden Auringon massan suuruinen. Nämä kappaleet voivat siten olla joko mustia aukkoja



Kahden erityyppisen röntgensäteilijän spektri. Hercules X-1:n säteily (yllä) osoittaa selvän 1,24 sekunnin jakson. Tämä tulkitaan neutronitähden pyörähdyksiksi. Cygnus X-1:n spektri (alla) on sen sijaan jaksoton ja osoittaa hyvin lyhytaikaisiakin muutoksia. Säteilyn oletetaan tulevan mustaa aukkoa kiertävästä kaasulevystä. (Kuvat *Astrophysical Journal*-lehdestä).



tai neutronitähtiä.

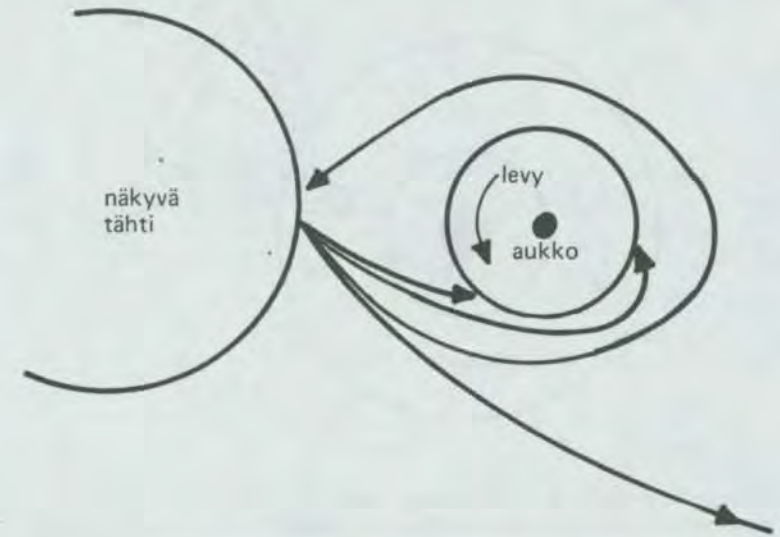
Cygnus X-1:n massa on sen sijaan niin suuri, että se on melko varmasti musta aukko. Ensimmäiset tulokset antoivat Cygnus X-1:n massaksi noin kahdeksan Auringon massaa. Systeemin näkyvä osa tunnistettiin tähdiksi HDE 226868. Dopplersiirtymämittauksilla todettiin näkyvän tähden ratanopeudeksi $v_1 = 75$ km/h, ja periodiksi 5,6 päivää. Päätähden spektriluokan perusteella määritettiin se jättiläistähdiksi, jonka massa on noin 20–25 Auringon massaa. Tällöin massafunktiosta saadaan pimeälle osalle minimimassaksi 5,5 Auringon

massaa, kun valitaan ratatason kaltevuuskulma pienimmän mahdollisen massan antavaksi 90° :ksi. Todellisuudessa kulma φ on noin 27° . Kohteen etäisyys maasta on noin 6000 valovuotta, ja se säteilee röntgenalueella yli kaksituhatta kertaa kirkkaammin kuin Aurinko koko spektrillään.

Viimeaikaisimmat H.Abtin, P.Hintzen ja S.Levyn Kitt Peakissa tekemät havainnot, jotka perustuvat noin sadan spektrin analyysiin, osoittavat, että Cygnus X-1:n pimeän osan massa on 8,5 Auringon massaa. Tämä massa pienenee kuitenkin, jos kandidaatti itse on kaksoistähti. Edellämainittujen tutkijoiden laskelmien mukaan mukana olevan kolmannen komponentin massa on kuitenkin alle 1,5 Auringon massaa. Vieläpä tässäkin tapauksessa ylittää aukkoehdokkaan massa kirkkaasti neutronitähdän massan ylärajan. Näin ollen voidaan Cygnus X-1:tä pitää ensimmäisenä huippuehdokkaana mustaksi aukoksi meidän Linnunradassamme.

On selvää, että tämänkaltaiset tulokset tieteellisessä maailmassa saavat epäilijöiden sankat joukot liikkeelle. Joutsenen tähdistön röntgenlähteelle on esitetty useita kilpailevia malleja. Mikään näistä muista ehdokkaista ei kuitenkaan ole saavuttanut sellaista todennäköisyyden tasoa kuin tulkinta aukoksi. Nyt vaaditaan tutkijoilta yhä tarkempia mittaustuloksia ja mieluummin vielä aivan uudentyyppistä tietoa, jonka avulla voidaan karsia keskenään kilpailevia malleja. Erikoisesti tässä yhteydessä avainasemassa on röntgensäteilyn syntymekanismi ja syntyneen säteilyn ominaisuudet. Jo ennen Uhuru-satelliitin lentoa oli alkanut vilkas teoreettinen tutkimustyö lähekkäisten tähtien muodostamien kaksoistähtisysteemien dynamiikan selvittämiseksi. Sekä Newtonin mekaniikan että yleisen suhteellisuusteorian pohjalta luotiin mallit kaasusuihkun käyttäytymiselle sen irrotessa suuremman päätähden pinnalta ja syöksyessä pitkin spiraalimaista rataa kohti mustaa aukkoa.

Kaasukielekkeiden päätyessä tarpeeksi lähelle aukkoa muodostuu gravitaatio- ja keskipakovoimien vaikutuksesta laaja noin neljän miljoonan kilometrin läpimittainen ja sadantuhannen kilometrin paksuinen levy. Ellei kaasuvirrassa esiintyisi sisäistä kitkaa, viskositeettia, kiertyisi kaasu stabiilina levynä aukkoa kuten renkaat Saturnusta ja Uranusta. Kaasun viskositeetti aiheuttaa kuitenkin sen, että yksityiset kaasualkiot kiertyvät hiljalleen kohti levyn keskustaa. Tämän kitkamekanismin syistä ei olla aivan selvillä. Aiheuttaako sen voimakas pyörteisyys, ionisoituneen plasman mukaansa tempaaman magneettikentän jäykkyys vai näiden syiden yhteisvaikutus? Vielä tällä hetkellä tietomme relativistisesta magnetohydrodynamikasta ovat riittämät-

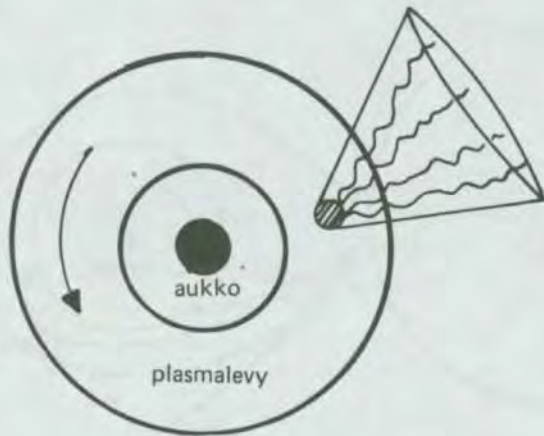


Kaasun virtausviivoja kaksoistähtisysteemissä. Osa virrasta palaa takaisin lähtötähdelle. Pienehkö virta suuntautuu ulos avaruuteen. Pääosa kaasusta kiertyy toisen komponentin ympärille ohueksi levyksi.

tömät. Nykyiset tietomme perustuvat pääosiltaan fysiikan perusperiaatteihin, energian ja impulssimomentin säilymlakeihin. Näitä periaatteita käyttäen voimme arvioida, kuinka paljon energiaa kussakin levyn alueessa muuttuu säteilyksi. On todettu, että tärkein röntgensäteilyn syntyalue sijaitsee aukon keskustan ympärillä. Tämän alueen läpimitta on noin viisisataa kilometriä ja paksuus vain viitisen kilometriä. Suuren, miljoonien kilometrien läpimittaisen levyn laidalle tullessaan kaasun lämpötila on suurinpiirtein sama kuin tähden pintalämpötila eli 25 000 K. Viskositeetti lämmittää kaasun sen kiertyessä kohti aukkoa. Viimeisellä sadalla kilometrillä plasma lämpiää kymmenen miljoonaan asteeseen. Näiltä alueilta syntyy röntgensäteily ja suurin osa kokonaissäteilystäkin.

Aivan viimeisillä kymmenillä kilometreillä ennen kaasun lopullista syöksymistä aukon horisonttien taa sen lämpötila saattaa nousta aina viiteensataan miljoonaan asteeseen.

Erikoisinta saapuvassa röntgensäteilyssä on se, ettei se tule tasaisena virtana. Säteilystä havaitaan heilahteluja, joissa sen voimak-



Mustaa aukkoa ympäröivän plasmalevyn sisäosiin muodostunut ympäristöään kuumemman plasman alue kiertää aukkoa, ja siitä lähtevän säteilyn keila pyörii kuin majakan valo. Tämä havaittaisiin Maassa tuhannesosasekuntien aikavälein tapahtuvana heilahteluna.

kuus vaihtelee melko laajoissa puitteissa. Tämän heilahtelun aika-skaalakin vaihtelee vuorokausista tuhannesosasekuntein. Vaihtelujen laajoista intensiteetti- ja aikarajoista on päätelty pyörteisyyden olevan pääasiallinen syy plasman lämpenemiseen.

Neuvostoliittolainen Sunjajev on esittänyt yksinkertaisen mallin hyvin lyhytaikaisen pulssirakenteen syntymiselle. Voimakkaat röntgensädesuihkut saattaisi aiheuttaa paikallisen pyörteen synnyttämä ympäristöään huomattavasti kuumempi plasma "läiskä". Kerran synnyttyään alue saattaa pysyä yhtenäisenä usean kierroksen ajan mustan aukon ympäri. Kuumasta alueesta lähtevä säteily saattaa pulssittua useastakin syystä. Alueen pyöräminen aukon ympäri aiheuttaa "majakka"-ilmiön (kuva).

Lisärakennetta röntgensuihkuun voi aiheuttaa voimakkaan gravitaatiokentän aikaansaama linssi-ilmiö. Dopplerilmiö antaa oman osuutensa säteilyn punastuessa tai sinistyessä riippuen siitä, onko kuuma alue tulossa meitä kohti vai etäännytyssä.

Jos tämänkaltaista tuhannesosasekuntien pulssirakennetta havaittaisiin, voitaisiin aikamittausten avulla laskea "läiskän" radan säteen kehitystä ja kiertoaikoja aukon ympäri. Tämä antaisi meille tietoa myös aukon mahdollisesta pyörimisestä. On arvioitu, että

kahdeksan kertaa Auringon massaisen pyörimättömän aukon satelliittikielen lyhin mahdollinen pulssien väliaika olisi noin 3,6 tuhannesosa sekuntia. Suurimmalla mahdollisella nopeudella pyörivälle aukolle vastaavaksi ajaksi on laskettu 0,6 tuhannesosa sekuntia.

Aivan äskettäin on esitetty toinen levystä lähtevään säteilyyn perustuva keino, jolla plasmalevyn rakennetta ja liikettä voitaisiin tutkia. Englantilaiset tutkijat Stark ja Connors ovat teoreettisten laskelmien perusteella osoittaneet, että röntgensäteilyn polarisaatiotaso – taso, jossa sähkömagneettinen kenttä värähtelee – saattaa olla painovoimakentästä johtuen aivan toinen mustan aukon läheisyydessä kuin esim. neutronitähtien tapauksessa. Siinä osassa levyä, joka on vielä kaukana aukosta, määräytyy polarisaatiotaso elektronisironnasta pyörivässä levyssä. Tämä taso on sama suurella osalla levyä, ja sama myös kaikilla röntgenkvanttien energioilla. Tutkijat totesivat kuitenkin, että levyn sisäosissa, joissa yleisen suhteellisuusteorian mukaiset korjaukset on otettava huomioon merkittävänä tekijänä, polarisaatiotason suunta riippuu voimakkaasti säteilyn lähtöpaikasta levyllä ja tätä kautta myös energiasta, vaihtelee säteilykvanttien energia kasvaen kohti keskustaa. Vielä niillä alueilla, joista lähtee 1 keV:n kvantteja*, on painovoiman vaikutus mitätön, ja polarisaatiotason suunta on sama klassisessa ja relativistisessä tapauksessa. Mutta jo 10 keV:n alueella pitäisi relativististen ilmiöiden tulla näkyviin. Vielä suuremmilla energioilla tason kääntymiskulma saattaisi nousta aina sataan asteeseen saakka.

Sekä Sunjajevin että Starkin ja Connorsin esittämien ilmiöiden havaitsemiseen tarvittaisiin röntgenilmaisimia, joiden pinta-ala on 1 m^2 suuruusluokkaa. Näin suuria pinta-aloja tarvitaan, jotta millisekuntien leimahduksista voitaisiin koota tarpeeksi röntgenkvantteja luotettavien tilastojen kokoamiseksi. Vuoden 1973 teleskoopin pinta-ala oli 1360 cm^2 , ja tällä ilmaisimella saatiin aikaerotuskyky n. 0,1 s. Vuoden 1977 lopulla lähetetyssä HEAO-1-tekkokuussa on jo $1,3 \text{ m}^2$ suuruinen röntgenhavaintaja. Näin ollen ainakin Cygnus X-1:n osalta pallo näyttää olevan kokeilijoilla, joiden havaintotulosten toivotaan ratkaisevan kiistan, onko tämä objekti musta aukko vai jokin muu systeemi.

Tähden tai tähtijoukon luhistuessa mustaksi aukoksi vapautuu systeemin materiajakautuman epähomogeenisuus **gravitaatioaaltoina**.

* Elektronivoltti (eV) on energiayksikkö, joka määritellään sinä liike-energiassa, jonka elektroni saa kiihtyessään 1 V:n jännite-erossa. Esimerkiksi säteilylaitteissa käytetään muutamien kymmenien kiloelektronivolttien (keV) röntgenkvantteja.

Havaitsemalla näitä jaksottaisesti värähteleviä avaruus-ajan kaarevuuksia voitaisiin havaita mustan aukon syntyminen. Nykyiset antennit ovat kyllin herkkiä ilmaisemaan gravitaatio säteilyn purkauksia, joiden lähtökohta on omassa Linnunradassamme. Seuraavien vuosikymmenten antennit ovat toivon mukaan niin herkkiä, että ne kannattaa suunnata Neitsyen tähdistön suunnassa sijaitsevaa 2500 galaksin joukkoa kohti. Teoreetikot ovat arvioineet, että tässä joukossa syntyy useita, mahdollisesti kymmeniä, mustia aukkoja vuodessa. Tällaiset havainnot antaisivat tähtitieteilijöille ja fyysikoille mielenkiintoista tietoa vastasyntyneen aukon tapahtumista.

Onko Linnunradan keskustassa musta aukko?

Tähän saakka olemme tarkastelleet sitä mahdollisuutta, että musta aukko voisi muodostua tähden viimeisessä vaiheessa. Tällöin vastasyntyneen aukon massa on kolmesta kuuteenkymmeneen Auringon massaa. On kuitenkin arveltu, että galaksien keskuksissa voisi sijaita jopa satojen miljoonien tähtien supermassiivinen musta aukko. Meidänkin Linnunratamme ytimessä on epäilty olevan kätkeytyneenä tällainen valtava nielu, joka on muodostanut ympärilleen suuren plasmakiekon. Lynden-Bellin ja Reesin laskelmien mukaan näin muodostunut jättikiekko säteilisi radiotaajuuksilla ja infrapuna-alueella, mutta ei röntgensäteilyä. Tämä johtuu siitä, että näin suuren aukon tapahtumahorisontti on niin kaukana, etteivät kiihtyvyydet ole tarpeeksi suuria röntgensäteilyä synnyttämään. Linnunratamme ytimen tienoilla on havaittu useista kohdin lähtevän sekä radio- että infrapunasäteilyä, jonka on tulkittu olevan peräisin satojen miljoonien tähtien haudasta.

Viime aikoina lehdistössä on esiintynyt tietoja, joita jotkut kommentaattorit ovat kutsuneet dramaattisiksi. Näiden uutisten varsinainen lähde ovat olleet ne havaintotulokset, joita USA:n kansallisen radioastronomisen observatorion (NRAO:n) tutkijat, Kellermann, Schaffer, Clark ja Geldzahler ovat saaneet yli koko Yhdysvaltojen levitetyllä radioteleskooppiverkostolla. Tätä verkostoa he käyttivät radiointerferometrinä, jonka peruslinjan pituus oli yli 4000 km eli 100 miljoonaa aallonpituutta. He havaitsivat Linnunratamme keskustaa 4 cm aallonpituudella. Yhdistämällä tuloksensa aikaisempiin pienemmällä verkostoilla saatuihin tuloksiin laativat tutkijat aikaisempia tarkemman radiokartan Galaksimme ytimestä.

Muutamia vuosia sitten osoitettiin, että Linnunratamme kes-

kus on kooltaan pienempi kuin 0.02 kaarisekuntia. Nyt NRAO:n työryhmä on todennut, että radioaaltoja voimakkaasti säteilevä alue on suuruudeltaan 0,01–0.02 kaarisekuntia, mutta he havaitsivat myös, että noin neljäsosa kokonaissäteilystä lähti alueesta, jonka koko on vain 0,001 kaarisekuntia. Tämä merkitsee sitä, että tämän säteilykeskuksen halkaisija on vain noin 1500 miljoonaa kilometriä, ts. tila on pienempi kuin oma aurinkokuntamme. Puolen vuoden seuranta-aikana ei alueessa havaittu mitään muutoksia. Havaintotarkkuuden rajoissa tämä merkitsee sitä, että jos keskuskappale laajenee, täytyy laajenemisnopeuden olla pienempi kuin muutama

Linnunratamme keskusta on piilossa lukemattomien tähtien ja pöly- ja kaasupilvien takana. Kuvassa noin 5 x 5 asteen suuruinen alue taivasta Jousimiehen tähdistössä.



Huomattavin mustien aukkojen tutkija maailmassa on nykyään englantilainen Stephen Hawking (s. 1942). Hawkingista on sanottu, että hän on edistänyt yleistä suhteellisuusteoriaa enemmän kuin kukaan muu Einsteinin jälkeen. Tämä on tapahtunut Hawkingin vaikeasta sairaudesta huolimatta. 70-luvun alusta lähtien hän on kärsinyt yhä pahenevasta hermostollisesta vammautuneisuudesta, joka on sitonut hänet rullatuoliin. Koska hän ei voi kirjoittaa, hän suorittaa laskut päässään. Lähdekirjojen lukeminen käy ystävien avulla, jotka kääntävät sivua. (Kuva Suomen Kuvapalvelu).



kymmenen kilometriä sekunnissa. Keskuksen radiokirkkaus on paljon alle kvasaarien kirkkauden, mutta kirkkautta vastaava lämpötila $5 \cdot 10^9$ K on kuitenkin välttämättä muuta kuin termistä alkuperää. Oletetaan, että sen synnyttävät suurella nopeudella magneettikentässä liikkuvat hiukkaset. Tästä johtuen energian tuotto tilavuusyksikköä kohti on jopa suurempi kuin kvasaareilla.

Kommentoidessaan tulostaan *Astrophysical Journal*issa toteavat tutkijat: ”Tuhannesosa kaarisekunnin suuruisen radiolähteen löytämisestä on ehdotettu mahdollisen mustan aukon olemassaolon testiksi”. Heidän saamansa tulos merkitsee juuri tätä, ja saatu koko vastaa suuruusluokaltaan 100-miljoonaisen tähtijoukon jälkeensä jättämää mustaa aukkoa. Onko sitten tällaiselle pienikokoiselle, tiiviille objektille muuta selitystä, jäänee nyt mustien aukkojen vas-

tustajien ja miksei muidenkin lopullista totuutta etsivien tutkijoiden selvittäväksi.

Mustat miniaukot

Tähdennmassaisten ja supermassiivisten aukkojen lisäksi on spekuloitu myös ns. **miniaukkojen** olemassaololla. Tällaisten miniaukkojen, joiden massa on $10^{-5} - 10^{15}$ g, mahdollisuuden toi ensin englantilainen **Stephen W. Hawking**, joka esitti, että niitä saattaisi olla jäännöksenä maailmankaikkeutemme suuresta alkuräjähdyksestä. Näihin aukkoihin liittyy fysiikan perusteiden kannalta erittäin mielenkiintoisia piirteitä. Ne saattavat nykyisten tietojemme mukaan jopa räjähdysmäisesti kiehua vapautuvaksi hiukkaspilveksi. Tästä kvantti-ilmiöihin perustuvasta tapahtumasta kerromme tarkemmin vähän myöhemmin.

Vuonna 1976 yhdysvaltalaiset Jacobs ja Seitzer esittivät, että miniaukkoja saattaa syntyä tälläkin hetkellä tähtien sisuksissa. He esittivät kolme erilaista mekanismia, joiden kautta neutronitähden sisälle voisi muodostua pieni musta aukko. Ensimmäinen heidän ehdottamistaan mahdollisuuksista perustuu siihen, että neutronitähden ytimeen voi muodostua ”tiheyspiikki”, jossa keskusalueen tiheys on niin suuri, että määrätyn säteen sisäpuolella oleva massa kääriytyy muodostamansa tapahtumahorisontin sisäpuolelle jättäen kuoren ulkopuolelle. Toinen hieman eksoottisempi mahdollisuus on se, että degeneroituneen (alimmassa mahdollisessa energiatilassa olevan) neutronikaasun neutronien suurimmat energiat, ns. Fermi-pinta, ovat pionien lepoenergian luokkaa. Tällöin neutronien sekaan alkaa muodostua pioneja, jotka bosoneina saattavat tiivistyä ytimeen helpommin kuin neutronit, koska niitä ei Paulin kieltoääntö koske. Ruffini ja Bonazzola ovat laskeneet, että 10^{40} degeneroitunutta pionia voivat muodostaa kriittisen massan, joka voi luhistua mustaksi aukoksi. Sen massa on pienempi kuin 10^{15} g joka vastaa 1 km^3 ä vettä. Kaikkein spekulatiivisin ehdotetuista mekanismeista perustuu kvanttimekaniikasta tunnettuun tunneli-ilmiöön. Tähdessä on luonnollinen paineen muodostama valli romahdusta vastaan. Normaalisissa klassisissa kehityskaavioissa tätä vallia ei läpäistä millään alueella liian aikaisin. Neutronitähden keskustaan syntyvä tiheyspiikki voi kuitenkin toimia sillanpääasemana, jota tukenaan käyttäen pieni piikin alueeseen kuuluva materia-alkio saattaa kvanttimekaanisten todennäköisyyslakien mukaisesti ”tun-

neloitua" vallin läpi muodostaen todellisen mikroaukon.

Näiden spekulatiivisten prosessien astrofysikaaliset seuraukset olisivat hyvin moninaiset. Jacobs ja Seitzer esittävät neljä ilmiötä, jotka ovat suoranaisia seurauksia neutronitähden sisälle muodostuneesta miniaukosta. Se saattaa esimerkiksi estää kokonaan mustan aukon muodostumisen, vaikka massaa olisikin tarpeeksi käytettävissä. Tähtien sisälle syntynyt miniaukko voi "kiehuessaan" **Hawkingin prosessissa** synnyttää niin suuren lisäpaineen, että se estää pintakerrosten luhistumisen ja jopa saattaa ne laajenemisvaiheeseen. Samankaltainen, mutta mielikuvituksellisempi, tapahtumasarja voisi olla myös mahdollinen. Jos miniaukon massa on tarpeeksi pieni, se säteilee kvanttiprosesseissa niin voimakkaasti, että ympärillä olevan neutronikaasun lämpötila nousee niin korkeaksi, että neutronien hajoaminen on mahdollista protoneiksi, elektroneiksi ja neutriinoiksi. Tämä merkitsee sitä, että hyvällä alulla ollut neutronitähti muuttuu kuumaksi valkoiseksi kääpiöksi. Tutkijat esittävät myös mahdollisuuden, että miniaukko saattaisi toimia myös liipaisimena, joka laukaasee supernovaräjähdyksen. Jos sisäinen miniaukko höyrystyy kovin nopeasti, tämä voi laukaista pintakerroksissa voimakkaat ydinreaktiot, joista on seurauksena supernovailmiö. Miniaukkoja Jacobs ja Seitzer tarjoavat lisäksi selitykseksi jo havaituille gammasäteiden purkauksille. Neutronitähden keskustaan muodostuneen pienen aukon neutriinosäteily lämmittää pintakerroksen 10^{10} kelviniin. Näin kuumaa pintaa säteilee jo gammakvantteja. Huikkeimmalta näytelmältä, ainakin paperilla, tuntuu kuitenkin miniaukkoihin liitetty prosessi, jossa neutronitähden kuori putoaa vapaasti sekunnin murto-osassa keskustansa aukkoon. Putoava aine säteilee hetkessä valtavan energiamäärän, 10^{48} J, sähkömagneettisena säteilynä.

Kiehuvat mustat aukot ja maailman rakenne

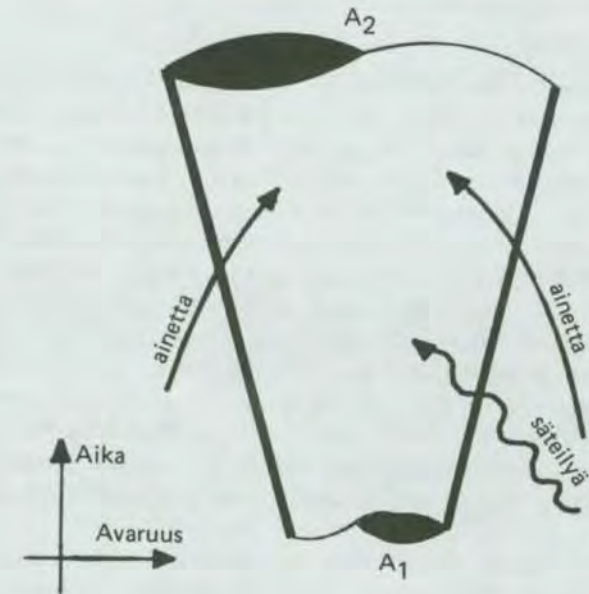
Edellisessä kappaleessa käsitelimme lyhyesti miniaukkoja ja erikoisesti niihin liittyviä astrofysikaalisia ilmiöitä. Näihin objekteihin liittyy kuitenkin fysiikan ja kosmologian kannalta perustavaa laatua olevia kysymyksiä. Nämä probleemmat ovat tieteemme nykyisiä polttopisteasioita, sillä ne liittyvät kvanttimekaniikan ja yleisen suhteellisuusteorian perusteiden yhteisen pohjan etsimiseen.

Kun Hawking sai ajatuksensa miniaukkojen olemassaolosta, hän arveli niiden saaneen alkunsa universon syntymisprosessissa esiintyneissä voimakkaissa pyörteissä ja aineen tiheyden paikallisissa

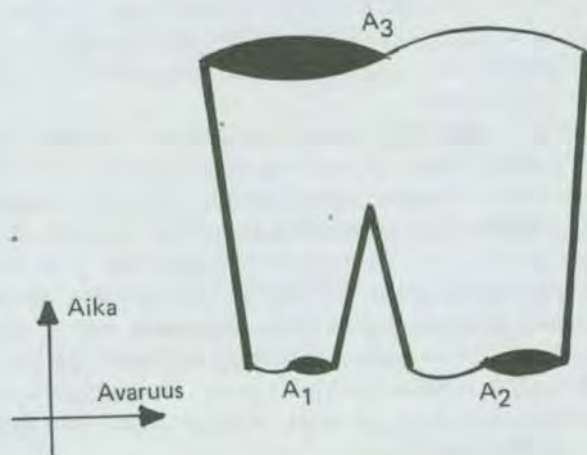
häiriöissä. Näitä alkuperäisiä aukkoja saattaisi esiintyä ympäri maailmankaikkeutta, kuten kolmen asteen lämpösäteilyä. Miniaukkoja, jotka massaltaan ovat kuutiokilometrin kokoinen pikku vuoren luokkaa ja kooltaan protonin suuruisia (10^{-13} cm), voisi vaikkapa kiertää Aurinkoa tai jotain planeettaa.

Miniaukkojen mahdolliseen merkitykseen kvanttimekaniikalle ja alkeishiukkasfysiikalle päädyttiin melkein samankaltaista tietä kuin Max Planck päätyi vuosisatamme alussa kvanttifysiikkaan – lämpöopin eli termodynamiikan kautta kulkevaa kiertotietä. Vuoden 1970 tienoilla huomattiin ensi kerran yhteys mustien aukkojen ja termodynamiikan välillä. Matemaattisesti todettiin, että mustan aukon **tapahtumahorisontin pinta-ala ei voi koskaan pienentyä**, vaan se aina kasvaa, kun aukkoon putoaa ainetta ja säteilyä. Edelleen, jos kaksi aukkoa törmää toisiinsa muodostaen yhden aukon, on syntyneen uuden aukon tapahtumahorisontin pinta-ala suurempi kuin törmänneiden aukkojen pintojen summa (kuva).

Tämä pinta-alojen epätavallinen yhteenlasku on analoginen ter-



Mustan aukon pinta-ala kasvaa aineen ja säteilyn pudotessa siihen. Tapahtumahorisonttien pinta-aloille pätee $A_2 > A_1$.



Kahden aukon törmätessä syntyvä aukko on pinta-alaltaan suurempi kuin törmänneiden aukkojen pinta-alojen summa, ts. $A_1 + A_2 < A_3$.

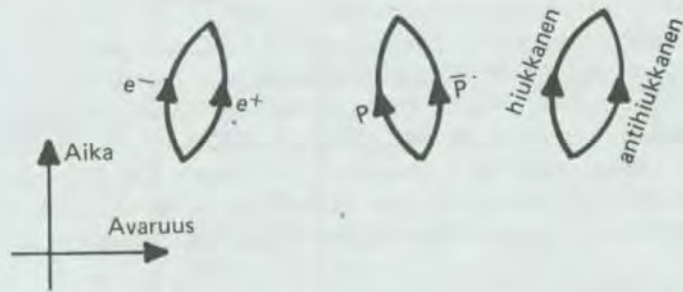
modynamiikan **entropia**-käsitteen käyttäytymisen kanssa. Termodynaamisista entropiaa voimme kuvata vaikkapa mitaksi systeemin epäjärjestykselle. Mitä sekaisempi systeemi on, sitä suurempi on myös entropia. Tämän perusteella liitetään negatiivinen entropia informaatioon. Ajatellaan vaikka kirjasmien muodostamaa systeemiä, joka alussa on täydessä sekasorrossa. Jos sitten pienennämme kirjaskasan entropiaa (lisäämme negatiivista entropiaa) latomalla kirjasmia vaikka tämän virkkeen kaltaiseen järjestykseen, olemme sisällyttäneet kirjasinjoukkoon ainakin hitusen informaatiota. Termodynamiikan hyvin toimiva toinen peruslaki esitetään usein muodossa "entropia kasvaa aina" – mitä nyt sitten pieniä paikallisia poikkeuksia esiintyy, mutta nämä poikkeuksetkin vaativat jossain muualla entropian kasvua. (Tämän kirjasmien kirjoittajien työtoverit ehdottivat sopivaksi esimerkiksi tekijöiden työhuoneiden järjestyksen seuraamista esim. kuukauden ajan.)

Rakenteellinen samankaltaisuus mustien aukkojen fysiikan ja termodynamiikan välillä voidaan viedä pitemmällekin. Termodynamiikan ensimmäisen peruslain mukaan systeemissä tapahtuva entropian pieni muutos aiheuttaa aina pienen muutoksen myös systeemin energiassa. Muutosten välisenä verrannollisuuskertoimena on kaikille

tuttu **lämpötila**. Hawking ja hänen työtoverinsa havaitsivat, että mustan aukon massan muutoksesta seuraa välttämättä myös muutos tapahtumahorisontin pinta-alassa. Lämpötilaa vastaava verrannollisuuskerroin on tässä tapauksessa **pintagravitaatio**, joka ilmoittaa painovoimakentän voimakkuuden tapahtumahorisontin pinnalla. Pintagravitaation ja lämpötilan välistä analogiaa tukee vielä sekin, että kappaleen ollessa termodynaamisessa tasapainossa on lämpötila kautta koko kappaleen vakio, samoin valmiissa rauhoittuneessa mustassa aukossa on painovoimakentän voimakkuus sama yli koko tapahtumahorisontin pinnan.

Matemaattinen samankaltaisuus termodynamiikan perussuureiden ja mustan aukon mekaanisten suureiden välillä ärsytti parin vuoden ajan tutkijoita. Oliko samankaltaisuus enemmänkin kuin matemaattinen kuriositeetti? Erikoisen probleeman muodosti pari entropia – pinta-ala. Fysikaalisesti yksinkertaisen ja kauniin ratkaisun tälle kysymykselle antoi vuonna 1972 silloinen fysiikan opiskelija **Jacob Bekenstein**. Hän käytti lähtökohtanaan mustien aukkojen perusteoremaa: aukolla on vain kolme hiusta, massa, varaus ja impulsimomentti. Tämä merkitsee sitä, että aukon muodostuessa häviää suuri määrä informaatiota. Missään ei enää näy jälkeäkään siitä, oliko aukon muodostanut systeemi rakentunut materiasta vai antimateriasta, sammakoista vai ruusunpuista. Jos kvanttiliikettä jätetään tarkastelun ulkopuolelle, voi niiden erilaisten lähtösystemien, joista määrätty kolme hiusta omaava aukko muodostuu, lukumäärä olla ääretön. Tämä johtuu siitä, että aukko voi olla muodostunut vaikka äärettömän keveistä alkeishiukkasista, joita tällöin tietysti tarvitaan ääretön määrä. Toisaalta yksi ainoa valtavamassainen alkeishiukkanen saattaisi yksinään jostain syystä romahtaa aukoksi.

Kvanttiteorian peruseräkkeiden mukaan m -massainen hiukanen voidaan myös kuvata aaltona, jonka aallonpituus on h/mc , missä h on kvanttimekaniikasta tuttu pieni Planckin vakio, ja c valon nopeus. Jos nyt hyväksytään kvanttimekaniikan mukaanotto mustan aukon fysiikkaan, on ilmeistä, että mustaan aukkoon sortuvan hiukkasen aallonpituuden tulisi olla pienempi kuin aukon koko. Tämän yksinkertaisen ajatuksen pohjalta Bekenstein päätteli, ettei määrätyn aukon muodostavien lähtösystemien määrä ollutkaan ääretön, vaan rajoitettu. Hän tulkitsee, että tämän luvun logaritmi edustaa sitä informaation määrää, joka menetetään aukon muodostuessa. Bekenstein jatkoi johtopäätöstensä kehittelyä vielä edelleen. Jos kerran aukon entropia on äärellinen ja suoraan verrannollinen aukon tapahtumahorisontin pinta-alaan, voimmekin olettaa, että myös pinta-

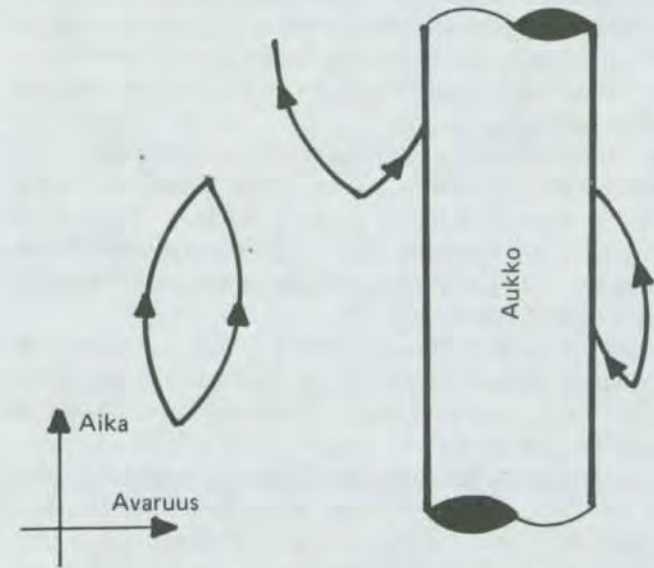


Kvanttifysiikan tyhjiö on dynaaminen, täynnä erilaisia hiukkas-antihiiukkaspareja, jotka syntyvät tyhjiöstä ja kuolevat havaitsemattomina sen kummempaa jälkeä jättämättä.

gravitaatioon verrannollinen lämpötila on äärellinen, tai oikeammin eri suuri kuin absoluuttinen nollapistelämpötila. Klassisessa mustassa aukossa tämä ei olisi mahdollista, imeehän aukko kaiken siihen osuneen säteilyn lähettämättä mitään takaisin. Tästä paradoksisista menettivät tutkijat jälleen rauhalliset yöunensa.

Vuonna 1974 Hawking keksi ratkaisun tutkiessaan kvanttimekaniikkaa käyttäen kappaleiden käyttäytymistä mustan aukon läheisyydessä. Suureksi hämmästykseseen, kuten hän itse toteaa, hän tuli laskelmissaan siihen johtopäätökseen, että musta aukko säteilee hiukkasia! Tämä tulos on todella hämmästyttävä, klassisestihan aukko vaikuttaa ylikoulutetulta veroviranomaiselta: kaikki ylimääräinen mikä lähelle tulee, otetaan pois kuljeskelemasta. Aluksi tutkijat kieltäytyivät uskomasta tulosta, mutta kun useat muutkin pääsivät samaan tulokseen käyttäen hieman toisia lähtökohtia kuin Hawking, oli tulokset otettava vakavasti. Hawking-prosessissa syntyvien hiukkasten energiat vastaavat juuri sitä spektriä, mikä normaalilla lämpösäteilylläkin on. Säteilijän lämpötila on verrannollinen pintagravitaatioon ja kääntäen verrannollinen aukon massa. Saatu tulos oli myös sopusoinnussa Bekensteinin äärellistä lämpötilaa koskevien ajatusten kanssa, olihan musta aukko hiukkas- ja säteilyvaihdon kautta lämpötasapainossa muussakin lämpötilassa kuin absoluuttisessa nolapisteesä.

Tälle hiukkasten säteilemiselle voidaan antaa konkreettinen selitys kvanttielektrodynamiikan (sähkömagneettisten ilmiöiden kvanttiteoria) mukaan. Tämä kvanttikenttäteoria antaa eräänä tärkeä-



Mustan aukon tapahtumahorisontin läheisyydessä syntyvällä virtuaalisella parilla on useita vaihtoehtoisia mahdollisuuksia. Mielenkiintoisin on tapaus, jossa toinen hiukkasista karkaa toisen pudotessa aukkoon. Tällöin on aukko synnyttänyt uuden hiukkasen.

nä tuloksena sen, että koko avaruus on täynnä hiukkasten ja niiden antihiiukkasten muodostamia ns. **virtuaalisia pareja**. Sana virtuaalinen merkitsee tässä yhteydessä sitä, että nämä parit eivät voi suoraan näkyä hiukkasina ilmaisimissa. Virtuaalisen hiukkas-antihiikkasparin synty tapahtuu spontaanisti, jonka jälkeen hiukkasten voidaan ajatella kulkevan pienen hetken erillään ja sitten lopuksi hävittävän toisensa siihen tyhjiöön, josta ne olivat syntyneetkin (kuva).

Vaikka virtuaalisia pareja ei suoraan havaitakaan, niillä on kuitenkin vaikutuksensa esim. atomien lähettämien spektriviivojen aallonpituuksiin. Tämä parien mukanaolo todetaan mm. erittäin pienestä ns. Lamb-siirtymästä vedyn spektrissä.

Mustasta aukosta höyrystyvän hiukkaskaasun syntyyn nämä virtuaaliset parit vaikuttavat seuraavalla yksinkertaisella mekanismilla. Virtuaalisen parin syntyessä lähellä mustan aukon tapahtumahorisonttia toinen parin hiukkasista voi pudota horisontin taa toisen jäädessä yksin ilman kumppania, jonka kanssa hävitä, kuten kunnollisen virtuaalisen hiukkasen tulisi. Orvoksi jäänyt hiukkanen

(tai antihiukkanen) havaittaisiin nyt tapahtumahorisontin tällä puolen ikään kuin horisontin pinnasta höyrystyneenä. Näin syntynyt hiukkanen saattaisi sitten karata syntymälahjanaan saadun liike-energian turvin pois aukon välittömästä läheisyydestä tai sitten seurata kaksoisveljeään horisontin läpi (kuva).

Kvanttikenttäteorian mukaan näin ollen on mahdollista, että hiukkanen voi ikään kuin karata mustan aukon sisäpuolelta, vaikka klassinen teoria ei tämänkaltaista prosessia sallikaan. Tämä ei ole kuitenkaan mitään ainutlaatuaista, sillä ydin- ja atomifysiikassa tunnetaan useita ilmiöitä, jotka ovat siinä mielessä kvanttimekaanisia, että klassisesti ne ovat kiellettyjä.

Kuvatun kaltaisissa tunneli-ilmiöissä esiintyvän potentiaalivallin paksuudesta ja korkeudesta riippuu läpäisyn todennäköisyys. Mustan aukon ympärivallin paksuus on verrannollinen aukon massa. Esimerkiksi "lemmikkimme" Cygnus X-1:n valli on niin paksu, ettei ole mitään reaalista todennäköisyyttä sille, että sen horisontista höyrystyisi hiukkasia, vaan virtuaalisten parien molemmat osapuolet putoavat aukkoon. Voimme sanoa, että tämänkokoisen aukon säteilylämpötila on käytännöllisesti katsoen nolla. Auringon kokoisien aukon lämpötila olisi sekin vain yhden sadastuhannesosa asteen absoluuttisen nollapisteen yläpuolella. Tämä lämpötila nousee kuitenkin nopeasti aukon massan pienetessä. Edellisessä kappaleessa mainittujen vuorenmassaisten miniaukkojen lämpötila on jo huikea 100 miljardia astetta. Näin korkeissa lämpötiloissa aukko säteilee jo elektroneja ja positroneja massattomien neutriinoiden ja fotonien lisäksi. Tällaisen aukon teho on 6000 MW:n luokkaa, mikä vastaa kuuden suuren voimalaitoksen tehoa, joka syntyy protonin suuruisessa tilassa.

Aukon säteilläsi hiukkasia se jatkuvasti menettää massaansa. Samalla massan pienetessä hiukkasten tuotto koko ajan kasvaa, kunnes aukko säteilee itsensä olemattomiin. Suurilla aukoilla aika, jonka kuluessa ne kiehuvat kuiviin, on kymmeniä kertalukua pitempi kuin maailmankaikkeuden ikä. Miniaukoilla, joiden massa on ollut syntymähetkellä 10^{15} g, kiehumisaika on parinkymmenen miljardin vuoden luokkaa, mikä on arvioitu maailmankaikkeuden ikä. Jos tämänkokoisia aukkoja syntyi "suurella pamauksessa", niiden aika on nyt kulumassa loppuun, ja meillä saattaa olla mahdollisuuksia havaita niistä lähtevää gammasäteilyä. Hawking on satelliittihavaintojen perusteella arvioinut, että näitä kuolevia miniaukkoja on korkeintaan 200 kappaletta kuutiovalovuodessa. Paikallisesti, esim. galaksien läheisyydessä, saattaa esiintymistiheys olla huomattavasti suurempikin.

tavasti suurempikin.

Höyrystymisvaiheensa lopussa aukko säteilee niin suurella voimalla, että prosessin päätöksenä on valtaisa räjähdys. Erikoisinta tässä loppuhuipentumassa on se, että sen voimakkuus on nykyisten tietojemme valossa sitä suurempi mitä useampia alkeishiukkasia on olemassa tuntemamme aineen pienimpinä rakenneosasina. On arvioitu, että jos hiukkasia on alle kymmenen, kuten nykyiset kvarkkimallit olettavat, vastaisi loppuräjähdys voimakkuudeltaan noin kymmentä miljoonaa megatonnin vetypommia. Jos perushiukkasten määrä on ääretön (mihin niitä kaikkia sitten tarvittaisiinkaan) olisi ihailtavanamme ilotulitus, joka on vielä ehkä satatuhatta kertaa mahtavampi. Näiden loppuräjähdyksen havaitseminen olisi eräs mahdollinen keino saada olennaista tietoa hiukkasfysiikan erästä peruskysymyksestä. Koska suurin osa näissä räjähdyksissä purkautuvasta energiasta on gammasäteilyä, pitäisi näiden havaitsemiseksi saada pysyviä gammateleskooppeja ilmakehän ulkopuolelle. Vaikka havainnot räjähtävistä miniaukoista olisivatkin negatiivisia, olisi tälläkin merkitystä maailmankuvamme muotoutumisessa – voisimme ainakin päätellä, että maailmankaikkeutemme alku ei ollut tarpeeksi sekasortoinen synnyttääkseen mustia aukkoja.

Eräs nykyfysiikan peruskysymyksistä on, onko olemassa avaruudessa lyhintä mahdollista etäisyyttä ja ajassa pienintä mielekästä aikaväliä, vai ovatko aika ja avaruus pilkottavissa kuinka pieniin osiin tahansa. Neuvostoliittolaiset fyysikot Ginzburg ja Frolov ovat esittäneet, että miniaukkojen löytyminen siirtäisi nykyisiä tietomme rajoja useita suuruusluokkia kohti pienempiä ajallisia ja paikallisia etäisyyksiä. Nykyiset tietomme olemme saaneet suurienenergeettisillä alkeishiukkaskokeilla. On todettu, että kvanttielektrodynamiikka, joka on rakennettu sille pohjalle, että aika ja avaruus ovat jatkuvina jaettavissa kuinka pieniin osiin tahansa, on koetuloksia vastaavana voimassa ainakin etäisyyksiin 10^{-15} cm saakka. Samoin lyhin kokeellisesti todettava aikaväli saadaan ajasta, joka valolta menee tämän matkan kulkuun, eli pienin aikaväli on lyhempi kuin 10^{-25} s. Nämä tulokset on saatu kokeissa, jotka on tehty Yhdysvalloissa Fermi-laboratorion muutamien satojen gigaelektronivolttien myoni-suihkulla. Neuvostoliittolaiset tutkijat arvioivat, että 10^{15} g:n miniaukon löytö veisi pienimmän etäisyyden ylärajan aina 10^{-23} cm:iin asti. Näin lyhyiden etäisyyksien tutkimiseen vaadittaisiin hiukkas-suihkuja, joiden energia on yli 10^{10} gigaelektronivolttia, ts. tämän luokan laboratoriokokeet ovat täysin meidän ulottumattomissamme.

Ginzburg ja Frolov. päätyivät ajatukseensa "dimensioanalyyt-

tistä tietä. He päättelivät, että pienimpään mahdolliseen pituuteen L liittyy sille luonteenomainen materian tiheys ρ , joka saadaan ainoastaan luonnonvakioita sisältävästä lausekkeesta

$$\rho = h/cL^4,$$

jossa h on Planckin vakio ja c valon nopeus. Tekijät uskovat, että näin laskettu tiheys olisi myös suurin mahdollinen aineen tiheys. Toisaalta klassisen mustan aukon "tiheys" saadaan yhtälöstä

$$\rho = c^6/G^3m^2.$$

Mustan aukon tiheys kasvaa tämän mukaisesti massan pienetessä. Asettamalla suurin mahdollinen tiheys pienimmän mahdollisen aukon tiheydeksi, saadaan tulokseksi, että jos pienin mahdollinen pituus on 10^{-23} cm, on pienimmän mahdollisen mustan aukon massa juuri Hawkingin esittämä 10^{15} g. Esitetyn kaltaisella ajatuskululla Ginzburg ja Frolov päättelivät, että monistakin syistä etsittyjen miniaukkojen löytyminen laajentaisi käsitystämme myös avaruus-aikamaailman rakenteesta sen mikrotasolla.

Mustan aukon perusominaisuudet: yhteenveto

Seuraavilla sivuilla käydään kertauksenomaisesti läpi mustien aukkojen tärkeimmät ominaisuudet. Luettelo perustuu suureksi osaksi Misnerin, Thornen ja Wheelerin Gravitation-kirjan vastaavaan kohtaan. Luettelo voi osin pianikin vanhentua, sillä monia mustien aukkojen ominaisuuksia on saatu selville aivan viime vuosina ja tulevat vuodet voivat tuoda mukanaan taas uusia piirteitä mustien aukkojen maailmasta.

1. Mustan aukon synty

Tähti, jonka massa on suurempi kuin noin kolme Auringon massaa, luhistuu sisäänpäin kulutettuaan loppuun kaiken ydinenergiansa. Mikään paine ei pysty vastustamaan painovoimaa, ja yleisen suhteellisuusteorian mukaan tähti romahtaa yhdeksi ainoaksi pisteeksi, singulariteetiksi. Romahtaminen kestää vain sekunnin murto-osan.

Tiheiden tähtijoukkojen tai galaksien keskustaan voi syntyä **supermassiivisia** mustia aukkoja, kun tähtien törmäykset ja kaasun kerääntyminen muodostavat kyllin tiheän ja suurimassaisen kappaleen. Tällainen jättiläisaukko voi jatkuvasti kasvaa imiessään sisäänsä uusia tähtiä ja pölyä. Kaikki aine syöksyy aukon keskustassa olevaan pistemäiseen singulariteettiin.

Maailmankaikkeuden alkuräjähdyksessä saattoi paikallisiin tihentymiin syntyä mustia **miniaukkoja**, jotka ovat massaltaan maanpäällisen vuoren luokkaa ja kooltaan alkeishiukkasen suuruisia. Miniaukkoja voi nykyäänkin syntyä esim. neutronitähtien keskustassa.

Tähdenmassaisten mustien aukkojen olemassaolo on lähes varmaa, sen sijaan kahden muun aukkoluokan olemassaolo on toistaiseksi ajatusleikkiä.

2. Mustan aukon rakenne

Pyörimätön musta aukko muodostuu keskustassa olevasta singulariteetista ja tätä ympäröivästä pallomaisesta tapahtumahori-

sontista. Tapahtumahorisontti on raja, jonka alapuolelta signaalit (valo, hiukkaset yms.) eivät pääse karkaamaan takaisin. Sen läpi voi kulkea vain yhteen suuntaan, sisäänpäin. Tapahtumahorisonttia voi sanoa mustan aukon pinnaksi. Horisontin etäisyys singulariteetista on 3 km kerrottuna tähden massalla, joka on ilmaistu Auringon massoilla. (Auringon massaa voi merkitä vaikkapa M_a . Esim. 10 M_a -massaisen mustan aukon säde on 30 km ja 1000 M_a -massaisen 3000 km.)

Pyörivän mustan aukon ympärille muodostuu toinenkin horisontti, ns. stationäärisyyssraja, joka sivuaa tapahtumahorisonttia aukon navoilla, mutta on päiväntasaajalla jonkin verran tapahtumahorisontin ulkopuolella. Näiden kahden horisontin välillä sijaitsee ns. ergossfääri, jossa mikään ei voi pysyä paikallaan, vaan kaikki kiertää aukkoa sen omaan pyörimissuuntaan. Toisin kuin tapahtumahorisontin sisältä, ergossfääristä voi päästä takaisin aukon ulkopuoliseen avaruuteen.

3. Mustan aukon ulkonäkö

Jos ulkopuolinen havaitsija katsoo **luhistuvaa** mustaa aukkoa, hän näkee tähden valon nopeasti himmenevän. Romahtavalta pinnalta lähtevän valon aallonpituus kasvaa hetkessä kohti ääretöntä, niin että valo silmänräpäyksessä punertuu. Putoavan pinnan nopeus näyttää aluksi kasvavan, mutta sitten alkaa hidastua kohti nollaa. Havaitsija ei koskaan näe aineen saavuttavan tapahtumahorisonttia, ainoastaan lähestyvän sitä. Havaintoaika ei kuitenkaan jää pitkäksi, sillä muutama tuhannesosa sekuntia sen jälkeen, kun havaitsija näki luhistumisen alkavan, viimeinen foton (valohiukkanen), joka aukosta koskaan pääsee karkuun, saavuttaa ulkopuolisen havaitsijan. Sen jälkeen aukosta ei enää tule mitään.

Luhistunut musta aukko on muutamankymmenen kilometrin läpimittainen, täysin musta alue. Siihen osuvasta valosta tai hiukkasista ei mikään heijastu takaisin, vaan kaikki putoaa aukon sisään.

Poikkeuksen ylläolevasta kuvasta voivat muodostaa miniaukot, jotka säteilevät ulospäin hiukkasia lämpösäteilyn kaltaisesti ja voivat räjähtäen höyrystyä.

4. Paljonko Linnunradassa on mustia aukkoja

Tähtien kehityskulusta tiedetään jo niin paljon, että voidaan arvioida, kuinka monta massiivista (yli 3 M_a) tähteä on kuluttanut ydinenergiansa loppuun Linnunradan elinaikana, noin 10 miljardina vuotena. Tulokseksi on saatu, että Linnunradassa pitäisi tällä hetkellä olla noin miljardi tähdestä muodostunutta mustaa aukkoa. Suunnilleen joka kymmenes vuosi pitäisi yhden uuden tähden luhistua mustaksi aukoksi.

5. Ovatko mustat aukot kuolleita taivaankappaleita

Pyörimättömät mustat aukot ovat kuolleita kappaleita, joiden sisältämää energiaa ei voi saada käytettäväksi aukon ulkopuolelle. (Niiden mahtavien gravitaatiokenttien energiaa voi kuitenkin käyttää hyväksi, kuten esim. seuraavasta ajatuskokeesta nähdään: lähetetään kaksi mustaa aukkoa putoamaan suoraan toisiaan kohti. Yhteentörmätessään ne vapauttavat voimakkaan pulsin gravitaatioenergiaa, joka voidaan ottaa vastaan gravitaatioantenneilla ja muuttaa muiksi energiamuodoiksi.)

Pyörivää mustaa aukkoa voidaan sen sijaan käyttää tehokkaana energialähteenä. Tällöin vähennetään aukon pyörimisenergiaa. Samoin voidaan **varattua** mustaa aukkoa käyttää energiantuottamiseen, jos sellaisia maailmankaikkeudesta löytyy.

Koska tähdet yleensä pyörivät, myös niistä muodostuneet mustat aukot ovat nopeassa pyörimisliikkeessä ja siksi hyvin "eläviä". Niistä saa energiaa ulos esim. lähettämällä kappaleen sopivaa rataa aukon ergossfääriin, jolloin se voi tulla ulos suuremmalla nopeudella kuin se sinne meni. Samoin sopivan taajuuden omaava säteily voi vahvistua ergossfääriin läpi kulkiessaan.

6. Miten musta aukko vaikuttaa ympäristöönsä

"Mustalla aukolla ei ole hiuksia". Luhistumisessa katoavat tähden kaikki muut ominaisuudet (esim. lämpötila, magneettikenttä) ja jäljelle jää vain kolme seikkaa, jotka vaikuttavat ympäristöön: paino-

voimakenttä, sähkövaraus ja pyöriminen (impulssimomentti).

Mustan aukon ympärillä on siis **painovoimakenttä**, joka kaukana aukosta on aivan samanlainen kuin samanmassaisen tähden kenttä.

Musta aukko vetää puoleensa ympäröivässä avaruudessa olevaa kaasua ja pölyä. Ne saavuttavat ennen tapahtumahorisonttiin osumistaan huimia nopeuksia, muodostavat tiivistymiä ja säteilevät **röntgen-** ja jopa **gammasäteitä**. Siksi musta aukko on todella musta vain tyhjässä avaruudessa, muualla sitä ympäröi putoavan aineen hehkuva kehä.

Suuremmat ainehiukkaset (planeetat, komeetat, tähdet), jotka putoavat mustaan aukkoon, säteilevät viimeisillä kilometreillään huomattavan osan massastaan **gravitaatioaaltoina**.

Lisäksi pyörivä musta aukko muodostaa ympärilleen pyörteen, ergosfäärin, josta voi suihkuta ulos kappaleita ja säteilyä suuremmalla energialla kuin ne ovat sinne pudonneet.

7. Mustien aukkojen törmäykset ja hajoamiset

Kaksi mustaa aukkoa voi törmätä toisiinsa ja sulautua yhteen suuremmaksi mustaksi aukoksi. Uuden aukon tapahtumahorisontin pinta-ala on aina suurempi kuin alkuperäisten aukkojen pinta-alojen summa ("mustan aukon dynamiikan toinen laki").

Sen sijaan musta aukko ei voi koskaan hajota kahdeksi erilliseksi mustaksi aukoksi. Ainoa mahdollisuus mustan aukon hajoamiseen on kvanttimekaniikan mukainen hidas höyrystyminen. Tällä ei ole mitään merkitystä tähdenmassaisten tai suurempien aukkojen kohdalla (esim. normaalin tähden massainen musta aukko höyrystyy hajalle 10^{66} vuodessa, kun maailmankaikkeuden ikäkin on vain noin $2 \cdot 10^{10}$ vuotta). Sen sijaan mahdollisten miniaukkojen kohdalla höyrystyminen on tärkeä prosessi.

8. Miten mustia aukkoja voi havaita

Mustien aukkojen etsimiseksi on ehdotettu kolmea tapaa, joista viimeksimainittu on tällä hetkellä käyttökelpoisin.

Ensimmäinen tapa perustuu yksinäisen mustan aukon kykyyn

imeä ympäröivästä avaruudesta kaasua itseensä. Putoava kaasua kuumeenee ja alkaa voimakkaasti säteillä.

Toisessa menetelmässä etsitään kaksoistähti, jonka toinen komponentti on näkyvä tähti ja toinen näkymätön. Jos näkymättömän tähden massa on tarpeeksi suuri (noin $3 M_{\odot}$ tai enemmän), se voi olla musta aukko. Vaikeutena tässä menetelmässä on se, että näkymättömän seuralainen voi olla normaalikin tähti, joka jää havaitsematta esim. siksi, että se on hyvin heikkovaloinen, pölypilven kätöksessä tms.

Kolmas menetelmä perustuu, samoin kuin ensimmäinenkin, aineen virtaamiseen mustaan aukkoon. Nyt aukko ei kuitenkaan ole yksin avaruudessa, vaan lähekkäisen kaksoistähden osana. Naapuritähdestä voi virrata kohti mustaa aukkoa suuria määriä kaasua, joka muodostaa aukon ympärille vinosti pyörivän levyn. Levy säteilee voimakasta röntgensäteilyä. Neutronitähdestä, joka voi myös ilmetä röntgensäteilijänä, musta aukko eroaa siinä, että säteilyssä ei ole pulsarille ominaista selvää jaksoa. Säteily on täysin jaksotonta, ja siinä esiintyy voimakkaita hyppäyksiä tuhannesosasekunninkin aikaskaalassa.

Joutsenen tähdistössä on röntgensäteilijä Cyg X-1, joka muodostaa erään näkyvän tähden kanssa lähekkäisen kaksoistähtijärjestelmän. Sekä röntgensäteilyn ominaisuudet että kappaleen suuri massa antavat aiheen olettaa, että Cyg X-1 on erittäin todennäköisesti musta aukko.

9. Mitä poikkeavia ilmiöitä havaitaan mustan aukon lähellä

Mustan aukon pinnan lähellä on niin voimakas painovoimakenttä, että siellä havaitaan hyvin voimakkaina samat relativistiset (suhteellisuusteorian ennustamat) ilmiöt, joita aurinkokunnassammekin on löydetty: kellojen käyntinopeus näyttää tapahtumahorisonttia lähestyttäessä hidastuvan kohti nollaa; mustan aukon pinnan läheltä lähtevän säteilyn aallonpituus siirtyy voimakkaasti punaiseen päin; nopeudet, mm. valon nopeus tai aukkoon putoavan kappaleen nopeus, näyttävät huomattavasti hidastuvan.

Pyörivän aukon lähellä näkyy taas joitakin lisäilmiöitä, joita ei pyörimättömällä aukolla havaita. Esimerkiksi aukon lähellä olevan gyroskoopin akseli voi pyörähtää ympäri useita kertoja sekunnissa.

Tämä on sama ilmiö, jota aiotaan lähiaikoina käyttää maapallon lähellä Einsteinin teorian testaamiseen. Maan pyörimisen takia pitäisi avaruuteen sijoitetun gyroskoopin akselin hieman kallistua pois "oi-keasta" asennostaan.

Valonsäteiden radat ovat mustan aukon lähellä erikoisia. Kun Aurinkomme läheltä kulkeva valo hivenen verran taipuu, mustan aukon lähelle tuleva valonsäde voi jopa kiertää useita kertoja aukon ympäri ennen syöksymistään kohtisuoraan aukkoon tai karkaamistään takaisin avaruuteen.

Myös ainehiukkasten radat poikkeavat aukon reunalla lähellä täysin Newtonin teorian mukaisista kartioleikkauksista. Esimerkiksi aukon pinnan lähellä (1,5 Schwarzschildin säteen etäisyydellä keskipisteestä) on sisin stabiili ympyrärata, jonka sisäpuolelle ajautuneet hiukkaset putoavat väistämättä aukkoon.

10. Mitä tapahtuu mustaan aukkoon putoavalle tähtitieteilijälle

Oletetaan, että luhistuvan (pyörimättömän) tähden pinnalla seisoo tähtitieteilijä, joka alkaa jalat edellä pudota kohti keskustaa. Aukon reunaan lähestyessään hän alkaa tuntea vuorovesivoimien vaikutuksen. Ne venyttävät häntä yhä pitemmäksi ja samalla litistävät häntä yhä laihemmaksi niin, että jo paljon ennen tapahtumahorisontin saavuttamista hän on murskautunut kuoliaaksi.

Jos kuitenkin musta aukko on hyvin massiivinen (yli 1000 M_{\odot}), vuorovesivoimat pinnan lähellä eivät ole vielä liian suuret. Tällöin tähtitieteilijä putoaa tapahtumahorisontin läpi – eikä huomaa siinä mitään erikoista. Putoavalle aineelle tapahtumahorisontti ei muodosta mitään muuta rajaa kuin sen kohdan, jonka jälkeen paluu ulkoavaruuteen on mahdotonta. (Sen sijaan ulkopuolisille tarkkailijoillehan tapahtumahorisontti on viimeinen raja, jonka he pystyvät havaitsemaan. Tämän sisemmäksi joutunut tähtitieteilijä ei koskaan pääse kertomaan havainnoistaan muille.)

Tähtitieteilijämme jatkaa tapahtumahorisontista vastustamatta putoamista alaspäin, sillä mustan aukon sisällä kaikki tiet johtavat keskipisteeseen yhtä varmasti kuin maapallolla aika kuluu eteenpäin. Mikään voima ei voi putoamista edes hidastaa. Itse asiassa kaikki yritykset, esim. rakettimeoottorin käyttö, vain nopeuttavat putoa-

mista, sillä vapaa putoaminen on hitain tie tapahtumahorisontista mustan aukon keskustaan.

Monta hetkeä tähtitieteilijä ei ehdi havaintojaan tehdä, sillä viimeistään mustan aukon sisällä vuorovesivoimat käyvät ylivoimaisen suuriksi. Pitkänä äärettömän ohuena viivana sujahtaa onneton tähtitieteilijämme aukon keskipisteeseen, singulariteettiin.

Mutta sukeltaako hän samanlaisena viivana ylös valkoisesta aukosta jossain toisessa maailmankaikkeudessa tai oman universumimme laidalla – kuka tietää?

11. Täytyykö mustia aukkoja pelätä

Suurelle yleisölle tarkoitetuissa kirjoituksissa, joissa kerrotaan mustista aukoista, korostetaan niiden kauhistuttavuutta. Pelko on kuitenkin aiheetonta. Mustat aukot eivät ole sen hirveämpiä kuin muutkaan taivaankappaleet. Itse asiassa ne ovat **vähemmän** pelottavia kuin tavalliset tähdet, kuten seuraavista esimerkeistä nähdään.

Luhistumisessa katoaa suurin osa tähden alkuperäisistä ominaisuuksista, joten musta aukko vaikuttaa ympäristöönsä vähemmän kuin normaalit tähdet. Sehän ei esimerkiksi itse lähetä mitään säteilyä avaruuteen.

Musta aukko on kooltaan niin pieni (joitain kymmeniä kilometrejä), että se pystyy sieppaamaan esim. avaruuden pölypilvistä ainetta sisäänsä paljon vähemmän kuin tavallinen tähti (jonka läpimitta on satojatuhansia tai miljoonia kilometrejä).

Kun mustaan aukkoon putoava tähtitieteilijä jauhautuu kuoliaaksi ehkä joidenkin satojen kilometrien päässä keskipisteestä, paistuu tavalliseen tähteen putoava tiedemies tuhaksi jo miljoonia kilometrejä kauempana.

Mustien miniaukkojen räjähdysisiä ei ole etsinnöistä huolimatta havaittu, mikä todistaa niiden vähäisestä lukumäärästä (jos niitä yleensä lainkaan esiintyy). Jonkin lähitähden räjähtäminen supernovaksi lienee yhtä todennäköistä kuin musta miniaukon räjähtäminen niin lähellä, että sillä on tuntuva vaikutus.

Ja kun puhutaan alastomasta singulariteetista, täytyy muistaa, että jos tavallinen tähti pantaisiin pyörimään niin nopeasti, että se repeytyisi päiväntasaajan kohdalta, se taatusti syytäisi avaruuteen tuhoisaa ainetta eikä vain "tuntemattomia vaikutuksia".

Kirjallisuutta

Suomenkielistä kirjallisuutta yleisestä suhteellisuusteoriasta ja sen ilmiöistä on melko niukasti saatavilla. Kaksi suhteellisuusteorian klassikkoa ovat Gustaf Järnefeltin ”Johdatus suhteellisuusteoriaan” (Otava 1954) ja Rolf Nevanlinnan ”Suhteellisuusteorian periaatteet” (WSOY 1963), mutta niiden ilmestymisen jälkeen alalla on tapahtunut paljon uutta. Paul Kustaanheimolta ilmestyi Mitä-Missä-Milloin 1977-kirjassa (Otava 1976) kaksi artikkelia, ”Avaruuden mustat aukot” ja ”Suhteellisuusteoria tänään”. John Taylorin ”Mustat aukot” (Weilin + Göös 1975) on tietysti hupaisa ”kauhulukemisto” mustista aukoista.

Yleisen suhteellisuusteorian tämänhetkinen perusteos maailmassa on Charles Misnerin, Kip Thornen ja John Archibald Wheelerin ”Gravitation” (W.H. Freeman and Company 1973). Tähtien kehityksen kannalta asiaa tarkastelee Ya.B.Zeldovichin ja I.D.Novikovin ”Relativistic Astrophysics 1: Stars and Relativity” (The University of Chicago Press 1971). Nämä kaksi ovat melko vaativia kirjoja. Helppomalla tasolla liikkuvat M.Berryn ”Principles of cosmology and gravitation” (Cambridge University Press 1976), W.J.Kaufmannin ”Relativity and Cosmology” (Harper & Row 1973) ja P.C.W.Daviesin ”Space and time in the modern universe” (Cambridge University Press 1977). Käsillä olevaa kirjaa kirjoitettaessa apuna on käytetty myös R.U.Sexlin artikkelia ”Black-Hole Physics” (Acta Physica Austriaca 42; 1975) sekä lukuisia muita eri aikakauslehdissä ilmestyneitä artikkeleita.

Samoja aiheita kuin käsillä olevassa kirjassa on käsitelty Helsingin yliopiston tähtitieteen laitoksen luentomonisteissa ”Relativistisen astrofysiikan perusteita” (koonnut H.Oja, 1977). Siinä on myös katkelmia parhaista englantilaisista lähdeeteoksista.

Kirjamme aiheita sivuavia artikkeleita (maailmankaikkeuden alusta ja tähtien kehityksestä) ilmestyi ”Tähtien ja galaksien maailma”-kirjassa (Tähtitieteellinen yhdistys URSA 1975). Tähtitieteen uusimpia tapahtumia seurataan URSA:n Tähdet ja Avaruus-lehdessä.

Sanastoa

Alla luetellaan lyhyesti tässä kirjassa esiintyvien tähtitieteen ja fysiikan termien selityksiä.

absoluuttinen nolapiste alin mahdollinen lämpötila, noin 273 astetta veden jäätymispisteen alapuolella.

aika-avaruus tai avaruus-aika nelikulotteinen maailma, jossa aika on otettu kolmen paikkakoordinaatin lisäksi neljänneksi ulottuvuudeksi.

apheli Aurinkoa kiertävän kappaleen radalla se piste, joka on kauimpana Auringosta.

avaruus-aika sama kuin aika-avaruus. Termejä käytetään rinnakkain riippuen vähän siitä, kirjoitetaanko kaavoissa aika- vai avaruuskoordinaatit ensiksi.

bosonit alkeishiukkasia, jotka tavallisimmin esiintyvät aineen rakenteen liimana.

dopplerilmiö säteilyn aallonpituuden ja taajuuden muutos, joka johtuu säteilylähteen liikkumisesta.

Einsteinin-Rosenin silta mustan aukon kautta kulkeva kuviteltu yhteys toiseen maailmankaikkeuteen tai oman universumimme kaukaiseen pisteeseen, ”madonkolo”.

Einsteinin teoria yleinen suhteellisuusteoria.

eksentrinen soikea. Sanaa käytetään kun puhutaan taivaankappaleen ellipsiradan soikeudesta.

elektronivoltti säteilyn energiaa mittaava yksikkö.

entropia mitta sille kuinka todennäköinen systeemin jokin tila on.

ergossfääri pyörivää mustaa aukkoa ympäröivä alue.

fermionit alkeishiukkasia, jotka yleensä esiintyvät aineen rakenteen perusosina.

fotoni valohiukkanen eli valokvantti.

galaksi miljardien tähtien muodostama järjestelmä.

gammasäteily kaikkein lyhytaaltoisinta sähkömagneettista säteilyä.

geodeettinen deviaatio geodeettisten viivojen viuhkan hajoaminen.

geodeettinen viiva kaarevassa avaruudessa lyhin reitti paikasta toiseen.

gravimetri painovoimaa mittaava laite.

gravitaatio painovoima.

gravitaatioaalto avaruuden kaarevuuden jaksollinen muutos.

gravitaatioantenni antenni joka ottaa vastaan gravitaatioaaltoja.

gravitaatioastronomia tähtitieteen ala joka tekee havaintoja gravitaatiosäteilyistä.

gravitaatiosäteily kiihtyvässä liikkeessä olevien massojen lähettämä säteily, joka esiintyy avaruuden kaarevuuden pieninä muutoksina.

gravitaatiovakio Newtonin vetovoimalaissa esiintyvä vakio,
 $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$.

gyroskooppi nopeasti pyörivä vauhtipyörä eli hyrrä, jonka akseli pysyy jatkuvasti samassa suunnassa avaruudessa.

Hawkingin prosessi mustan aukon höyrystyminen säteilemällä.

hyperonit protonia ja neutronia raskaampia alkeishiukkasia.

impulssimomentti kappaleen pyörimistä luonnehtiva suure.

inertiaalikoordinaatisto vapaasti putoavan havaitsijan oma koordinaatisto.

infrapunasäteily sähkömagneettista säteilyä, joka on aallonpituudeltaan näkyvän valon ja radiosäteilyn välissä.

interferometria mittaamenetelmä, joka perustuu kahdessa tai useammassa paikassa yhtä aikaa tehtyihin säteilymittauksiin.

isoakseli taivaankappaleen ellipsiradan suurin halkaisija.

kaksoistähti kaksi tähteä, jotka kiertävät järjestelmän yhteistä painopistettä.

Kerrin aukko pyörivä musta aukko.

komponentti kaksoistähtijärjestelmään kuuluvia tähtiä sanotaan järjestelmän komponenteiksi.

korona Auringon näkyvän pinnan yläpuolella oleva harva kaasukehä.

kosmologia maailmankaikkeuden rakennetta, kehitystä ja syntyä käsittelevä tiede.

kvantti fysikaalisen ominaisuuden (massan, energian jne.) pieni ”pakkaus”.

kvasaarit taivaalla näkyviä säteilylähteitä, jotka luultavasti ovat tavattoman kaukana ja tavattoman voimakkaita säteilijöitä.

laser tarkalleen suunnattu samassa tahdissa värähtelevä voimakas sädekimppu.

lepomassa levossa eli paikallaan olevan kappaleen massa.

Linnunrata se galaksi, johon myös Aurinko kuuluu.

meteoroidi avaruudessa kiitävä kivi. Ilmakehään osuessaan meteoroidi aiheuttaa tähdenlennon eli meteorin, ja Maan pinnalle asti ehjänä säilynyttä kiveä sanotaan meteoritiksi.

miniaukko musta aukko, jonka massa on huomattavasti pienempi kuin tähtien massat.

Minkowskin avaruus suppeamman suhteellisuusteorian laakea nelio-
ulotteinen aika-avaruus.

musta aukko tähti tai muu kappale, joka on luhistunut tapahtuma-
horisontin sisäpuolelle.

musta kääpiö valkoinen kääpiö, joka on kuluttanut loppuun kaiken
energiansa ja jäähtynyt näkymättömäksi.

myoni elektronin kaltainen, mutta sitä noin 200 kertaa raskaampi
alkeishiukkanen.

Mössbauerin ilmiö gammakvantin rekyylitön emissio kidehilan si-
dotusta ytimeistä.

neutriino massaton ja varaukseton alkeishiukkanen.

neutriinoastronomia tähtitieteen ala, joka tutkii taivaankappaleita
niistä tulevien neutriinon avulla.

neutronitähti parinkymmenen kilometrin läpimittainen, tähden
massainen kappale, jossa aine on tiiveimmässä tunnetussa
tilassaan.

Newtonin mekaniikka Newtonin lakeihin perustuva klassinen meka-
niikka, joka ei ota huomioon esim. valon äärellistä nopeutta.

nova tähti, jonka pintakerrokset räjähtävät pois.

Nordtvedtin ilmiö teoreettisia häiriöitä taivaankappaleiden liikkeessä,
jotka johtuvat kappaleen omasta painovoimavaikutuksesta.
Nordtvedtin ilmiötä ei ole Maa-Kuu-järjestelmässä havaittu.

painovoimaluhistuminen tähden romahtaminen painovoiman vaiku-
tuksesta. Tuloksena on neutronitähti tai musta aukko.

pakonopeus se nopeus, joka jollekin kappaleelle on annettava, jotta
se pääsee irti taivaankappaleen painovoimakentästä.

paraboloidiantenni radioantenni,, jonka malja on pyörähdyspara-
boloidin muotoinen.

Paulin kieltoääntö samanlaisten fermionien systeemejä koskeva
"rakennusjärjestys".

Penrosen prosessi ilmiö, jossa pyörivästä mustasta aukosta saadaan
ulos energiaa lähettämällä kappaleita sopivilla radoilla aukon
ergossfääriin.

periastroni kaksoistähden radassa se piste, jossa tähti on lähinnä toista
komponenttia.

periheli Aurinkoa kiertävän kappaleen radalla se piste joka on lä-
hinnä Aurinkoa.

pioni alkeishiukkanen, joka toimii atomiytimissä rakenteen liimana,
mutta voi esiintyä myös vapaana.

Planckin vakio mikromaailman ilmiöihin liittyvä luonnonvakio,
 $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$ Js.

planetaarinen sumu kaasupilvi, joka on syntynyt punaisen jättiläisen
ulkokerroksista tähden puhalttaessa kerrokset ulos avaruuteen.

polarisaatio sähkömagneettisen säteilyn värähteleminen tietyssä
suunnassa.

potentiaalienergia energiamuoto, joka liittyy kappaleen asemaan pai-
novoimakentässä.

pulsari neutronitähti, joka säteilee radio- tai röntgensäteilyä majakan
tavoin. Maan päällä pulsarit nähdään nopeasti sykkivinä ra-
dio- tai röntgenlähteinä.

punainen jättiläinen tähti, joka säteilee punaista valoa ja jonka ulko-
kerrokset ovat hyvin harvaa ainetta.

punasiirtymä spektriviivojen siirtyminen pitempiin aallonpituuksiin
eli kohti spektrin punaista päätä.

- pääsarja** tähtien kirkkaus-spektriluokka-diagrammassa se kapea kaista, johon kuuluu eniten tähtiä.
- radioastronomia** tähtitieteen ala, joka tutkii taivasta radiosäteilyn aallonpituuksilla.
- radiosäteily** pitkäaaltoisinta sähkömagneettista säteilyä.
- radioteleskooppi** antenni, joka ottaa vastaan taivaankappalten radio-säteilyä.
- relativistinen** suhteellisuusteoriaan liittyvä, suhteellisuusteorian ennustama.
- rengassumu** kts. planetaarinen sumu.
- röntgenpulsari** pulsari, joka havaitaan parhaiten lähettämänsä röntgensäteilyn perusteella.
- röntgensäteily** sähkömagneettista säteilyä, joka on lyhytaaltoisempaa kuin ultraviolettisäteily, mutta pitempiaaltoisempaa kuin gammasäteily.
- Schwarzschildin säde** se säde, jonka sisäpuolelle kutistunut tähti ei pysty lähettämään säteilyä ulospäin, vaan muuttuu mustaksi aukoksi. Mustan aukon säde.
- singulariteetti** mustan aukon keskipiste.
- sironta** hiukkasen törmäys toiseen hiukkaseen.
- spektri** syntyy kun tähden valo hajotetaan hilalla tai prismalla eri aallonpituuksiksi.
- spin** alkeishiukkasten impulssimomentti.
- supermassiivinen musta aukko** aukko, jonka massa on tuhansia tai miljoonia tähtien massoja.
- supernova** tähti, joka räjähtää kokonaan tai suurimmaksi osaksi hajalle.

- supraneste** neste, jolla ei ole sisäistä kitkaa.
- synkrotronisäteily** kaarevaa rataa liikkuvan varauksen lähettämää sähkömagneettista säteilyä.
- takioni** kuvitelu hiukkanen, joka pystyy liikkumaan vain valoa nopeammin.
- tapahtumahorisontti** mustan aukon pinta; Schwarzschildin säteen etäisyydellä keskipisteestä oleva pallopinta, jonka takaa ulkopuolisen havaitsijan on mahdotonta saada mitään tietoja.
- tensori** eräs matemaattinen suure. Esim. vektori on yksinkertainen tensori.
- termodynamiikka** lämpöoppi.
- ultraviolettisäteily** sähkömagneettista säteilyä, joka on aallonpituudeltaan näkyvän valon ja röntgensäteilyn välissä.
- universumi** maailmankaikkeus.
- valkoinen aukko** mustan aukon kuviteltu vastakohta: singulariteetista ulos räjähtävä tähti.
- valkoinen kääpiö** tähti joka on kuluttanut loppuun melkein kaiken ydinenergiansa ja kutistunut tiiviiksi, kuumaksi kappaleeksi.
- valokartio** valonsäteiden muodostama kartio kaksiulotteisessa (ct,x)-koordinaatistossa.
- valon nopeus** sähkömagneettisen säteilyn etenemisnopeus, $c = 300\,000$ km/s.
- Weberin sylinteri** sylinterinmuotoinen gravitaatioantenni.
- vuorovesivoima** voima joka johtuu erisuuruudesta painovoimasta kappaleen eri osissa.
- yläkonjunktio** se ajanhetki, jolloin planeetta Maasta katsottuna on Auringon takana.

Hakemisto

- Abt 104
aika-avaruus 11–13, 30, 72–73, 77–80, 82–86
alaston singulariteetti 95–96
apheli 27
Apollo 16, 26, 44
avaruus-aika kts. aika-avaruus
Bekenstein, Jacob 115–116
van den Bergh 59
Bonazzola 111
bosonit 61
Braginski, Vladimir 15, 45
Brans-Dicken teoria 20, 28, 33
Clark 108
Connors 107
Cygnus X-1 97, 102–107, 118, 125
Dicke 15, 28
dopplerilmiö 22, 42
Einstein, Albert 8–14, 20–21, 30, 36, 73, 83
Einsteinin teoria kts. suhteellisuusteoria
Einsteinin-Rosenin silta 93
eksenttrinen 29
ekvivalenssiperiaate 10–11, 14–16, 21
entropia 114–115
ergossfääri 88–95, 122–124
Eötvös, Lorand von 14–15
fermionit 61
Fomalont 33
Frolov 119–120
Galilei 14
Gamow 62
Geldzahler 108
geodeettinen deviaatio 82–83
geodeettiset viivat 11–13, 16, 83–84
Ginzburg 119–120
Goldenberg 28
gravitaatioaallot 17, 36–51, 63, 107–108, 124
Gravitation (kirja) 12, 14, 45, 91, 121
Gravity Probe A 26
Hafele, Joseph 25–26
Halley'n komeetta 29
Hamilton 70
Hawking, Stephen 110–120
Hawkingin prosessi 112, 116
HEAO 1 107
Hill 29
Hintze 104
inertiaalisysteemi 89–90
Jacobs 111
Jansky, Karl 50
kaksoistähti 23, 40, 41, 54, 59, 65–68, 99–101, 104, 125
kaareva avaruus 11, 72–73, 84
kaarevuussäde 84
kaksosten paradoksi 24–26
Keating, Richard 25–26
Kellermann 108
Keplerin tähti 24–26, 74
Kerr 88
Kerrin aukko 88, 92
Kosmos 26
kriittinen massa 97
Kruskalin koordinaatit 85, 93–95
Kustaanheimo, Paul 18, 20, 22, 29
kvasaari 18, 31, 33, 39, 42
laakea 11–12, 72
de Laplace, Simon Pierre 70–71
Lehti, Raimo 29
Levy 104
Lucifer 56
Lunohod 16
Lynden-Bell 108
maailmankaikkeus 18, 78
"madonkolo" 92–93
Mariner 6, 7, 9 35
massa
hidas eli inertiamassa 9, 13–15
kriittinen 97
painava eli gravitaatiomassa 10, 13–15
massafunktio 101
Merkuriuksen perihelin kiertymä 20, 27–30
miniaukko 111–124
Minkowskin aika-avaruus 11, 72–73
Misner kts. Gravitation
musta aukko 17–18, 39–42, 53–54, 69–127
musta kääpiö 56
neutriino 51, 54, 60
neutronitähti 17, 39–41, 53–54, 59–70, 74, 84–85, 102–103, 125
Newton 14, 70

- Nordström, Gunnar 20, 87
Nordtvedtin ilmiö 16
nova 57
NRAO 33, 108–109
ominaisaikaväli 72–74
Paulin kiertosääntö 61, 70
Penrose 90
Penrosen prosessi 92
periheli 27
Planck, Max 113
planetaarinen sumu 53–54
Pound 23–24
pulsari 17, 41, 54, 61–69, 102, 103
punainen jättiläinen 53–55
punasiirtymä 20–24, 74–75
pääsarjan tähti 52
Rebka 24
Rees 108
Riemannin geometria 14, 72
Ruffini 97, 111
röntgenpulsari 67–68, 102–103
Schaffer 108
Schwarzschild, Karl 98
Schwarzschildin säde 71–87, 126
Schönberg 62
Seitzer 111
Shapiro, I.I. 34
singulariteetti 86–87, 89, 93, 96, 121, 127
Sirius 23–24
Snider 23–24
Soldner 30
spin 61
Sramek 33
Stark 107
stationäärisyysraja 88–94, 122
suhteellisuusteoria
klassiset testit 21
neljästä testi 33
suppeampi eli erikoinen 9, 11, 24, 30, 33, 80
yleinen 9–36, 39, 70, 75
Sunjajev 106–107
supermassiivinen musta aukko 108, 121
supernova 41, 54, 56–60
takioni 79
tapahtumahorisontti 82, 87–96, 113, 114, 121–127
Thorne, Kip 99
kts. myös Gravitation
tutkasäteen viivästyminen 21, 33–35
Tycho'n tähti 57
Uhuru 102
URCA-prosessi 61–62
valkoinen aukko 92, 95, 127
valkoinen kääpiö 22–23, 39, 53–56, 84
valokartio 80–81
valon taipuminen 20, 30–33, 75–76
vapaan putoamisen ainutlaatuisuus 15
Weber, Joseph 36–51
Weberin sylinteri 36–38, 45–48, 51
Wheeler kts. Gravitation
viivaelementti 72
Viking 35
virtuaalinen pari 117
Vulkanus 28
vuorovesivoima 83–86, 126
Zeldovich 99
Äyriäissumu 57–58, 65

Tähtitieteellinen Yhdistys URSA ry.

1. **Tarkoitus** Ursan tarkoituksena on toimia tähtitieteen harrastajien yhdyssiteenä ja edistää tähtitieteen tuntemusta ja harrastusta maassamme. Yhdistys toimii pääasiassa järjestämällä tähtinäytäntöjä, esitelmätilaisuuksia ja harrastajien yhteistoimintaa, pitämällä yllä kirjastoa sekä harjoittamalla tähtitiedettä käsittelevää julkaisutoimintaa.

2. **Jäsenkunta** Ursan jäsenmäärä oli vuoden 1977 lopussa 1583, josta 904 Uudeltamaalta ja Helsingistä ja loput muualta Suomesta. Jäsenistö koostuu melko tasaisesti eri yhteiskunta- ja ammattiryhmien edustajista, joskin siihen kuuluu erityisen runsaasti nuorisoa. Myös suomalaiset ammattitähtitieteilijät ovat lähes poikkeuksetta Ursan jäseniä.

3. **Tähtinäytännöt** Ursan tähtitorni sijaitsee Kaivopuistossa Ullanlinnanmäellä noin 200 metriä ravintola Kaivuhuoneen eteläpuolella. Tähtitornin kaksi kaukoputkea on tarkoitettu sekä yhdistyksen jäsenten että yleisön käyttöön. Tähtitorni on avoinna yleisölle jokaisena pilvettömänä iltana kaikkina viikonpäivinä yleensä seuraavasti:

15.2.–15.3. avataan tunti auringonlaskun jälkeen ja suljetaan klo 21.

16.3.–30.4. avataan tunti auringonlaskun jälkeen ja suljetaan klo 22.

15.8.–15.10. avataan tunti auringonlaskun jälkeen ja suljetaan klo 22.

16.10.–30.11. avoinna klo 18–21.

Näytännöissä katsellaan kaukoputkilla Kuuta ja näkyvissä olevia planeettoja sekä kaukaisempia taivaankappaleita kuten tähtijoukkoja ja sumuja tornia hoitavan oppaan johdolla. Yleisöltä peritään pääsymaksu. Ursan jäsenet pääsevät näytäntöihin ilmaiseksi. Jäsenet voivat myös käyttää tornia ja sen laitteita tähtivalokuvaukseen ja muuhun havainnointiin tähtinäytäntöjen ulkopuolella. Koululais- ja muut ryhmät voivat sopia käynnistä erikseen. **Huom!** Jos auringonlaskun aikaan on pilvistä, tornia ei avata sinä iltana.

4. **Tähdet ja Avaruus-lehti** kuusi kertaa vuodessa ilmestyvä tähtitieteen harrastajien lehti kertoo ajankohtaisista havaintokohteista, käsittelee harrastajien havaintoja, välineitä ja tekniikkaa sekä välittää perustietoa tähtitaivaan ilmiöistä ja niiden tutkimuksesta. ”Tähdet ja

Avaruus” lähetetään ursalaisille jäsenetuna. Lehteä voi ostaa ja tilata Ursan kirjastosta. Ursan jäsenet saavat lisäksi jäsenetuna Valtionkalerin kalendaarion eripainoksen, joka sisältää tietoja taivaankappaleiden näkymisestä. Tähdet ja Avaruus-lehti ilmestyi vuosina 1971–76 Tähtiaika-nimisenä.

5. **Ursan julkaisut** Urssa on julkaissut tähän mennessä seuraavat teokset:

Ursan julkaisu I	Tähtitiedettä harrastajille	88 s. 1926
Ursan julkaisu II	Tähtitiedettä harrastajille II	123 s. 1938
Ursan julkaisu III	Tähtitieteen harrastajan kirja	208 s. 1947
Ursan julkaisu IV	Tähtitiedettä harrastajille III	132 s. 1954
Ursan julkaisu V	Tähtitiedettä harrastajille IV	140 s. 1965
Ursan julkaisu VI	Heikinheimo: Teemme peilikaukoputken	115 s. 1966
Ursan julkaisu VII	Tähtien ja galaksien maailma	252 s. 1975
Ursan julkaisu VIII	Mustaa aukkoa etsimässä	143 s. 1977

Useimmat julkaisut on loppuunmyyty. Niitä voi lainata Ursan kirjastosta sekä monista yleisistä kirjastoista. Julkaisu VI–VIII on vielä saatavissa. Julkaisu I–V on kustantanut WSOY; viimeiset Urssa on itse kustantanut. Suunnitelmassa on useiden uusien kirjojen julkaiseminen, kuten kokonaan uusittu Tähtitieteen harrastajan kirja ja kaukoputkia käsittelevä kirja.

Urssa julkaisee monisteita julkaisusarjassa b, jossa on ilmestynyt

1. Galaksit (loppuunmyyty) 167 s. 1975.

2. Kyröläinen: Tähtitiedettä oppimaan 1, 68 s. 1976.

Urssa julkaisee vuosittain kirjaseen nimeltä Tähdet 19XX, jossa kerrotaan, miten planeetat, tähdet, meteorit ym. näkyvät kyseisenä vuonna.

6. **Esitelmätilaisuudet** Urssa järjestää kerran kuussa esitelmätilaisuuksia, joissa tähtitieteen tutkijat ja harrastajat kertovat mahdollisimman yleisesti mielenkiintoisista ja ajankohtaisista tähtitieteeseen liittyvistä aiheista. Nämä tilaisuudet onkin tarkoitettu ursalaisten lisäksi luonnontieteistä yleensä kiinnostuneille, ja ne ovat maksuttomia. Ilmoitukset esitelmistä julkaistaan ”Tähdet ja Avaruus”-lehdessä.

7. **Lainakirjasto** Ursan jäsenten käytettävissä on melko laaja ja monipuolinen tähtitieteellinen kirjasto. Alan yleistösten lisäksi se sisältää kirjallisuutta myös useilta erikoisalueilta kuten planeetoista, tähtijärjestelmistä ja maailmankaikkeuden rakenteesta. Harrastajien tarvitsemia havainto-oppaita, tähtikarttoja ja havaintovälineitä käsittelevää kirjallisuutta on runsaasti, joskin suurimmaksi osaksi vieras-kielistä, pääasiassa englanniksi ja saksaksi sekä jonkin verran ruot-

siksi. Kirjastoon tulee myös useita ulkomaisia alan aikakauslehtiä, joita ursalaiset voivat lainata tai lukea kirjastossa. Ursan kirjasto on avoinna maanantaisin ja torstaisin klo 18–20 (tai klo 21:een). Kirjoja ja aikakauslehtiä voi lainata myös postitse tilaamalla puhelimitse tai kirjeitse. Lainausajat ovat kirjoilla 2 kk, äänikaseteilla 2 viikkoa. Täydellisen kirjastoluettelon saa maksutta kirjastosta tai postitse. Kirjastossa on kopiokone. Katso kohtaa "Osoitteet".

8. **Työpaja** Ursalla on työhuone niitä harrastajia varten, jotka valmistavat itse havaintovälineitään. Sen kalustoon kuuluvat peilien hionnassa tarvittavat välineet sekä sorvi ja porakone. Työpajan käytöstä voi sopia käymällä toimistossa (ks. "Osoitteet") tai puhelimitse.

9. Ursalla on seuraavat **harrastusjaostot**:
Muuttuvat tähdet (Mira-tiedotuslehti sekä Report-julkaisu)

Planeetat

Meteorit

Aurinko, revontulet ja komeetat

Tähtenpeitot ja pikkuplaneetat

Kaukoputket

Jaostojen vetäjiltä saa tarkempia tietoja niiden toiminnasta sekä ohjeita havaintojen teossa.

10. **Tähtiharrastuspäivät** Tähtiharrastuspäivät on tähän mennessä järjestetty Turussa 1971, Helsingissä 1972, Tampereella 1974, Oulussa 1975, Lahdessa 1976 ja Jyväskylässä 1977. Tampereen päivät olivat samalla pohjoismaiset. Vuosittain pyritään järjestämään viikonlopun kestävät päivät, joiden ohjelma muodostuu esitelmistä, työryhmien työskentelystä, yhteistoimintaneuvotteluista, harrastajanäyttelyistä, tutustumiskäynneistä alan laitoksiin ja ennenkaikkea kokemusten vaihdosta.

11. **Ursa vastaa tiedusteluihin** Ursa pyrkii tiedottamaan toimintansa asioista ja ajankohtaisista tapahtumista julkisen sanan välityksellä. Lisäksi vastataan mahdollisuuksien mukaan yksityisten henkilöiden esittämiin tähtitiedettä ja taivaan ilmiöitä sekä Seuraa itseään koskeviin kysymyksiin. Tiedustelut voi tehdä puhelimitse tai kirjeitse Ursan toimistoon.

12. **Jäseneksi liittyminen** Ursan jäseneksi voi liittyä jokainen tähtitieteestä ja tähtiharrastuksesta kiinnostunut. Ikäraja ei ole. Jäsenmaksu on 1977 20-vuotiailta ja vanhemmilta 30 mk ja nuoremmilta 20 mk. Jäseneksi ilmoittautuminen käy kirjeitse tai puhelimitse Ursan toimistoon tai henkilökohtaisesti toimistossa, tähtitornissa tai koukussa. Myös yhteisöt kuten koulut ja kirjastot voivat olla Ursan

jäseniä.

13. Osoitteet ja aukioloajat

Ursan toimisto, kirjasto ja työpaja sekä Tähdet ja Avaruus-lehti.

Tähtitieteellinen yhdistys URSA ry.

Pihlajatie 32 A 4

00270 Helsinki 27

Puhelin: (90) 485 621. Puhelimeen vastataan vain kirjaston ja toimiston aukioloaikoina: maanantaina ja torstaina klo 18–20 (21). Muulloin vastaa automaattinen puhelinvastaaja. Yhdistyksen postisiirtotilin numero on 7321–5.

14. **Tähtiharrastusseurat eri paikkakunnilla** Ursan lisäksi monilla maamme paikkakunnilla toimii itsenäisiä yhdistyksiä tai kerhoja. Tärkeimmät toimintamuodot ovat yleensä esitelmätilaisuudet ja muu valitustoiminta paikkakunnalla sekä yleisönäytökset ja havaintotoiminta tähtitornissa. Seuraavassa luettelaa tiedossa olevat seurat sekä kuinka niihin saa yhteyden:

Forssa: Forssan Uranus. Yhteyshenkilö Risto Heikkilä, Pappila, 30100 Forssa 10, puh. 916-10953.

Hyvinkää: Polaris ry. Perustettu –70, 40 jäsentä, jäsenmaksu 5 mk. Yhteyshenkilö Jukka Hongisto, Muncinkatu 4, 05820 Hyvinkää 2, puh. 914-15274.

Imatra: Etelä-Karjalan tähtitieteen harrastajien yhdistys Nova ry. Perustettu –75, n. 45 jäsentä, jäsenmaksu 10 mk. Tähtitorni on suunnitteilla, tähtiharrastusiltoja. Yhteyshenkilö Eero Honkanen, Rajavartiosto 31 B 11.

Joensuu: Tähtitieteen harrastajain yhdistys Seulaset ry. Perustettu –73, n. 50 jäsentä, jäsenmaksu 20 mk, lapset ja eläkeläiset 5 mk. Peilikaukoputki. Yhteyshenkilö Aulis Koivusalo, Salminkatu 15, 80200 Joensuu 20, puh. 973-31228.

Jyväskylä: Jyväskylän tähtitieteellinen yhdistys Sirius ry. Perustettu –59, n. 60 jäsentä, jäsenmaksu 15 mk aikuisilta kaupunkilaisilta, muilta 10 mk. Tähtitorni Rihlaperässä, avoinna yleisölle erikseen sovittavina jaksoina muutaman kerran vuodessa. Yhteyshenkilö Juhani J. Korhonen, Viitanienkatu 7 E, 40720 Jyväskylä 72, puh. 941-211310.

Karjaa: Sällskapet Natura. Tähtitorni vesitornilla. Yhteyshenkilö Thor Portin, Edegatan 2, 10300 Karis, puh. 912-30549.

Kuopio: Kuopion tähtitieteellinen kerho Saturnus. Perustettu –56, n. 50 jäsentä. Tähtitorni Huuhanmäellä, avoinna syyskuusta huhtikuuhun keskiviikkoisin ja sunnuntaisin pimeän tulosta lähtien n. 2 tuntia. Yhteyshenkilö Juhani

- Sarkava, Retkeilijäntie 12 C 14, 70200 Kuopio 20, puh. 971-83511/201 (kotiin 971-22887).
- Lahti:** Lahden Ursa ry. Perustettu -48, n. 120 jäsentä, jäsenmaksu 10 mk. Tähtitorni Pirttiharjun vesitornilla. Avoinna syyskuusta toukokuuhun sunnuntaisin ja tiistaisin klo 19-21 tai pimeään tultua. Tähtinäytösjulkaisu. Yhteyshenkilö Juhani Salmi, Vesijärvenkatu 36 C 34, 15110 Lahti 11, puh. 918-28064 koti, 43811 työ.
- Lohja:** Lohjan Ursa. Perustettu -54, n. 20 jäsentä. Tähtitorni Lohjanharjulla, uimahallin vieressä. Yhteyshenkilö Arvo Tolonen, Kirkniemenkatu 3, 08100 Lohja 10, puh. 912-81204.
- Mikkeli:** Mikkelin Ursa ry. Perustettu -23, n. 50 jäsentä, jäsenmaksu 10 mk, koululaisilta 3 mk. Tähtitorni Uudella vesitornilla. Yhteyshenkilö Urpo Kokki, Otavankatu 10 A, 50100 Mikkeli 10, puh. 955-10974.
- Oulu:** Tähtitieteellinen yhdistys Arktos ry. Perustettu -62, n. 80 jäsentä, jäsenmaksu 20, 10 tai 5 mk. Tähtitorni Puolivälinkankaan vesitornilla. Avoinna sunnuntaisin klo 19-21.30. Yhteyshenkilö Juha Tervaskanto, Ratakatu 14 C 4, 90140 Oulu 14, puh. 981-31898.
- Pori:** Porin Karhunvartijat ry. Perustettu -74, n. 70 jäsentä, jäsenmaksu 10 mk. Yhteyshenkilö Jarl Lund, Valtakatu 5 D 51, 28100 Pori 10, puh. 939-15908.
- Tampere:** Tampereen Ursa ry. 140 jäsentä, perustettu 1950. Jäsenmaksu 15 mk, koululaisilta 10 mk. Tähtitorni Kaupin vesitornilla, avoinna tiistaisin ja perjantaisin pimeään alkamisesta noin kaksi tuntia. 25-vuotisjulkaisua (Tähtiajan erikoisnumero 5/1975) on edelleen saatavissa. Yhteyshenkilö Aarre Kellomäki, 36280 Pikonlinna, puh. 931-772643.
- Turku:** Turun Ursa ry. Perustettu -28, 235 jäsentä. Tähtitorni Iso-Heikkilässä. Avoinna sunnuntaisin ja keskiviikkoisin maaliskuussa. Turun Ursa on julkaissut Tähtitaivas-lehteä. Yhteyshenkilö Pekka Parviainen, Taskulantie 2 E 78, 20300 Turku 30, puh. 921-385051.

Huom! Yhdistysten tähtitornit ovat avoinna vain pilvettöminä tähtikirkkaina iltoina.

Edellämainittujen tähtiharrastusseurojen lisäksi maassamme toimii valtakunnallinen avaruustutkimusta harrastava seura, **Suomen Avaruustutkimusseura ry.** Sen piirissä mm. julkaistaan **Avaruusluotain-**

lehteä, lennätellään pienoisoraketteja ja suoritetaan satelliittien radioseurantaa. Avaruustutkimusseuran osoite on PL 507, 00101 Helsinki 10, ja puhelimella voi soittaa esim. Heikki Ojalle, puh. 90-719977.

TÄHTIEN JA GALAKSIEN MAAILMA

252-sivuinen kirja tähtitieteen kiinnostavimmista aiheista. Runsas kuvitus. 2. painos 1976, hinta 28 mk.

Sisältö: Valtonen: Maailmankaikkeuden varhaisempi historia / Jaakkola: Vakaa vai levoton kosmos / Mattila: Pimeistä sumuista ja tähtienvälisistä hiukkasista, Eteläisestä tähtitaivaasta ja sen tutkimisesta / Vilhu: Tähtien spektrit, Tähtien kehitys / J.Tuominen: Auringon magneettisista kentistä / Nikander: Jupiterin ilmakehän virtauksia / Kääriäinen: Lisiä napapiirien liikkeisiin / Lehti: Galileo Galilein "Tähtimaailman sanansaattaja" / Honkasalo: Yrjö Väisälä, Ursan kunniajäsen / Hirvonen: V.A.Heiskanen, Ursan kunniajäsen / Kääriäinen: Ursan puolivuosisataistaipaleelta / Markkanen: Metsähovin observatorio / Kaila: Tähtivalokuvauksesta / Pirola: Kiertokoneisto harrastajan kaukoputkeen.

TÄHDET 1978

Ursan vuosikirja, 2. vuosikerta, 48 sivua. Välttämätön tähtitieteen harrastajan tietopaketti. Sopii niin aloittelijalle kuin pitemmälle ehtineelle.

Sisältönä mm.: Artikkelit "Planeettojen havaitsemisesta" / Kuusi tähtitaivaskatsausta, joissa kartan lisäksi tiedot planeettojen, tähtien ja meteorien näkymisestä jakson aikana / Taulukot Auringon, planeettojen ja suurimpien pikkuplaneettojen havaitsemiseksi / Kartat Uranuksen ja Pluton liikkeestä 1978 / Graafinen almanakka Helsingille ja Oululle / Jupiterin kuista kaaviot, joiden avulla saadaan kuiden asema haluttuna ajanhetkenä / Tähtienpeitot Helsingille ja Oululle / Ohjeet Merkuriuksen havaitsemisesta (2 kuvaa) / Sanasto, jossa selvitetään tärkeimpiä tähtitieteellisiä käsitteitä.

TÄHDET ja AVARUUS

Tähtitieteen ystävien lehti, sisältönä mm. tähtitieteen ja avaruustutkimuksen uusia tuloksia. Kuusi suurta numeroa vuodessa. Tilaushinta vuodelle 1978 32 mk, Ursan jäsenille jäsenetuna.

Osta kirjakaupasta tai suoraan kustantajalta:
Tähtitieteellinen yhdistys URSA
Pihlajatie 32 A 4, 00270 Hki 27, puh. 485 621
Avoimna ma ja ti klo 18–20.

Mustat aukot ovat tämän hetken tähtitieteen kuumimpia aiheita. Ne ovat kappaleita, jotka ovat luhistuneet kokoon kosmisessa katastrofissa. Mustien aukkojen lähellä ja sisällä tapahtuu monia merkillisiä ilmiöitä, joita ei missään muualla tavata.

Mustista aukoista on kirjoitettu useita sensaatiomaisia pelottelukuvauksia. Niiden vastapainoksi halutaan tässä kirjassa antaa asiallinen kuva, mitä mustat aukot todellisuudessa ovat ja mihin tietomme niiden olemassaolosta ja etsimisestä perustuvat.

Kirjoittajat, tohtorit Raimo Keskinen ja Heikki Oja, ovat työssään Helsingin yliopistossa tutustuneet painovoiman salaisuuksiin. Nyt he kertovat lukijoille yleisestä suhteellisuusteoriasta ja Einsteinin ennustuksista, tähtien kuolemasta ja gravitaatioaalloista. Ja tietysti – mustista aukoista.