

SYKSY RÄSÄNEN

# Jättiläisten synty



VARHAINEN SUPERMASSIIVINEN MUSTA AUKKO. TAITEILIJAN NÄKEMYS. NASA / JPL-CALTECH

## Tähdestä mustaksi aukoksi

Monien galaksien ytimessä on jättimäinen musta aukko, eli tienoo jonka gravitaatio on niin vahva, että edes valo ei pääse pakoon. Kotigalaksimme keskustan mustan aukon massa on neljä miljoonaa Auringon massaa, ja monien galaksien keskusjättiläiset ovat tuhat kertaa raskaampia. Miten ne ovat syntyneet ja kasvaneet niin isoiksi? Kysymystä on tutkittu vuosikymmeniä, ja uudet havainnot ovat syventäneet arvoitusta.

Vuonna 2021 taivaaseen noussut Yhdysvaltojen avaruusjärjestö NASA:n James Webb Space Telescope on nähnyt yhä useampia ja varhaisempia jättimäisiä mustia aukkoja. Sen havaintojen perusteella kymmenien tai satojen miljoonien Auringon massaisia mustia aukkoja oli olemassa jo maailmankaikkeuden ollessa 500 miljoonan vuoden ikäinen.

Tiedämme varmasti yhden tavan tehdä mustia aukkoja. Ensin kaasupilvessä aine puristuu gravitaation takia niin tiheäksi, että ydinreaktiot käynnistyvät, eli tähti syttyy. Ydinreaktioissa syntyvien fotonien paine estää tähteä puristumasta tiheämmäksi. Kun ydinpolttoaine loppuu, tähti romahtaa. Jos tähti on raskaampi kuin noin kymmenen Auringon massaa, niin tuloksena on musta aukko.

Maailmankaikkeuden alun jälkeen kestää noin sata miljoonaa vuotta, että ensimmäiset tähdet syttyvät. Ne koostuvat vain kevyimmistä alkuaineista, vedystä ja heliumista. Sen takia ne ovat nykyisiä tähtiä raskaampia ja lyhytikäisempiä. Ensimmäisten tähtien massat ovat luultavasti kymmenen Auringon massan ja jokusen sadan Auringon massan väliltä, ja ne elävät vain miljoona vuotta. Niiden kuolinräjähdyksessä osa aineesta paiskautuu pois ja kasautuu hiljaiseen uusiksi tähdiksi, ja osa valahtaa mustaksi aukoksi.

Seuraava askel on vaikeampi: miten kasvatetaan mustan aukon massa miljoonakertaiseksi? Musta aukko ei vedä puoleensa ainetta yhtään sen tehokkaammin kuin samanmassainen tähti. Jos musta aukko istuu paikallaan kaasupilvessä, niin siihen virtaa ainetta. Mutta mitä enemmän ainetta aukon ympärille kertyy, sitä isompi on aineen säteilyn paine, joka työntää ainetta ulospäin. Tämä itsesäätely asettaa mustien aukkojen kasvunopeudelle ylärajan, joka on nimetty fyysikko **Arthur Eddingtonin** mukaan.

Jos tähdestä syntynyt musta aukko syö ainetta niin kiihkeästi kuin Eddingtonin raja sallii, niin se kaksinkertaistaa massansa 35 miljoonassa vuodessa. Tämä on liian hidasta: 400 miljoonassa vuodessa aukko kasvaisi vain korkeintaan

miljoonan Auringon massaiseksi. On mahdollista ylittää Eddingtonin raja eli kasvaa nopeammin: esimerkiksi ainetta voi virrata aukkoon eri suunnasta kuin mihin sen säteily puskee, toisin kuin mitä Eddington oletti. Mustien aukkojen tapauksessa on kuitenkin vaikea päästä edes Eddingtonin kasvunopeuteen asti, koska ne eivät lymyä paikallaan tiheään kaasupilven keskellä, vaan matkaavat halki galaksin, eikä niihin ehdi juurikaan pudota ainetta. Huolelliset simulaatiot osoittavat, että kymmenen tai sadan Auringon massaiset mustat aukot eivät kasva vuosimiljoonien aikana juuri nimeksikään.

Ehkä jotkut ensimmäisistä tähdistä ovat luultua raskaampia? Mitä isompi on tähden massa, sitä tehokkaammin se vetää ainetta puoleensa, ja sitä vähemmän sen tarvitsee kasvaa saavuttaakseen kymmenen tai sadan miljoonan Auringon massan. Isomman massan voi saada aikaan siten, että tähdeksi puristuva kaasupilvessä on enemmän ainetta. Ongelmana on se, että kuten mustan aukon kasvu, myös tähtien muodostuminen on itseään säätelevä tapahtuma. Jos kaasupilvi on iso, sen tiheimmät kohdat helposti romahtavat useaksi pienemmäksi tähdeksi, ja tähtien säteily estää kaasua jäähtymästä ja puristumasta yhdeksi isoksi tähdeksi.

Teoreettisten fyysikoiden työnä on keksiä ratkaisuja ongelmiin, ja on ehdotettu erilaisia keinoja tehdä isoja tähtiä. Mutta havainnot ovat tehneet pulmasta yhä vaikeamman. James Webb Space Telescope on nähnyt varhaisessa maailmankaikkeudessa hyvin kirkkaita pieniä punaisia täpliä, joilla on annettu tekninen nimi ”pienet punaiset täplät”. Ei olla varmoja siitä mitä ne ovat, mutta kyseessä voi olla mustien aukkojen ympärillä kiertävän aineen lähettämä säteily. Jos tämä pitää paikkansa, mikään toistaiseksi esitetty tapa muodostaa mustia aukkoja tähtien romahduksessa ei pysty tuottamaan tarpeeksi varhaisia ja isoja mustia aukkoja. Tämänkin vaihtoehdon varalle on kuitenkin jo selitys.

## Tähtien tuolla puolen

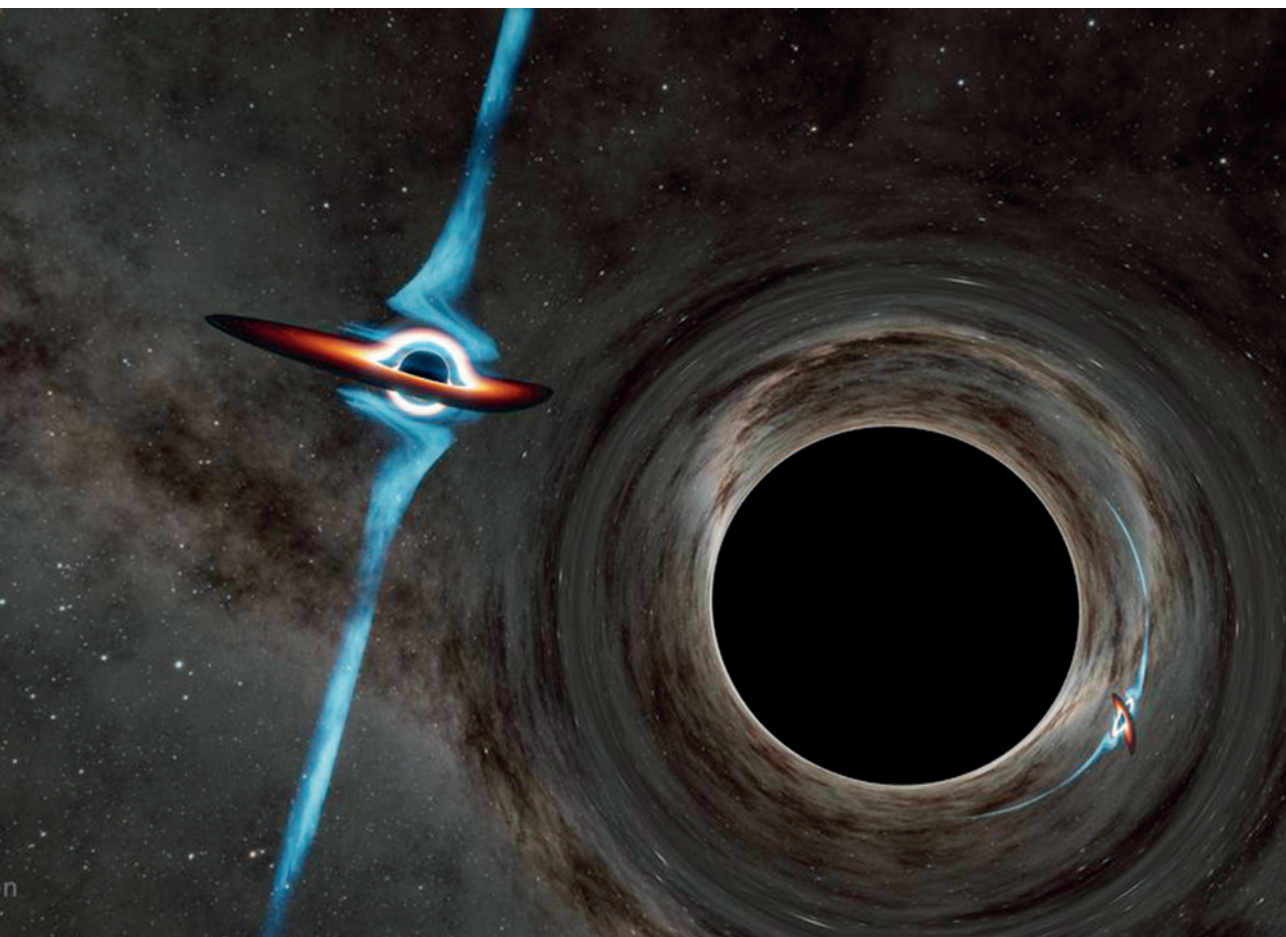
Jos tarpeeksi raskaita mustia aukkoja ei voi synnyttää tähtien kautta, niitä pitää tuottaa käymättä tähtien kautta. Mustan aukon saa aikaan, kunhan pakkaa tietyn säteen sisälle tarpeeksi massaa. Auringon massalle tämä **Karl Schwarzschildin** mukaan nimetty säde on on kolme kilometriä, ja se on suoraan verrannollinen massaan. Jos haluaa tehdä tuhannen Auringon massan massaisen mustan aukon, pitää puristaa tuo massa 3 000 kilometrin sisälle, hieman Maata pienemmäksi.

Mustien aukkojen tuottamiseen siis riittää se, että varhaisina aikoina on jossain paikoissa paljon ainetta pienessä alueessa. Kätevin selitys tällaisille vahvoille (kosmologisesti katsottuna) pienen mittakaavan tihentymille on se, että ne syntyvät samalla kun ison mittakaavan heikot tiheyntymät, jotka johtavat galaksien ja muun rakenteen muodostumiseen.

Onnistunein selitys ison mittakaavan rakenteen siemenille on kosminen inflaatio, lyhyt aikakausi maailmankaikkeuden ensimmäisen sekunnin perukoilla, jolloin avaruuden laajeneminen kiihtyi. Avain galaksien, ja ehkä mustien aukkojen, siementen syntyyn on kvanttivärähtelyt. Kvanttivärähtelyjä on aina ja kaikkialla: kvanttifysiikan mukaan aineen tila on epämääräinen. Ne ovat niin pieniä, että niillä ei arkisessa mittakaavassa ole merkitystä. Mutta avaruuden laajeneminen venyttää aineen ja avaruuden kvanttivärähtelyt hiukkasfysiikan mittakaavasta isoihin mittoihin, ja ne jäätyvät paikalleen aineen tihentymiksi ja harventumiksi.

Ei tiedetä miten inflaatio on yksityiskohtaisesti tapahtunut, mutta tyypilliset inflaatiomallit tuottavat heikkoja tuhansien valovuosien mittaisia epätasaisuuksia, jotka romahtavat hitaasti galakseiksi ja muiksi rakenteiksi. Inflaatio on kuitenkin voinut olla sellaista, että se lisäksi synnyttää vahvoja pienen mittakaavan epätasaisuuksia, jotka romahtavat nopeasti mustiksi aukkoiksi.

Koska ei tarvitse huolehtia tähtien valmis-



TAITEILIJAN NÄKEMYS KAHDESTA VALTAVASTA MUSTASTA AUKOSTA KIERTÄMÄSSÄ TOISIAAN.  
KUVA CALTECH / R. HURT (IPAC)

tamisen ongelmista, inflaation avulla voi muodostaa kuinka raskaita mustia aukkoja tahansa. Muinaisten mustien aukkojen massa voi olla vaikkapa kymmentuhatta Auringon massaa, josta ne helposti ehtivät kasvaa sataan miljoonaan Auringon massaan ja selittää havainnot.

## Isoa ja pientä

Toisaalta muinaiset mustat aukot voivat olla miten kevyitä tahansa: jos niiden massa on Aurinkokunnan asteroidien massan luokkaa, niin ne saattavat olla vastaus pimeään aineen arvoitukseen. Tällaiset mustat aukot olisivat hieman atomeja isompia tai pienempiä. Idea muinaisista mustista aukoista pimeänä aineena ei ole uusi: **Stephen Hawking** esitti ajatuksen jo vuonna 1971. Tuolloin kaikki eivät ottaneet pimeää ainetta tosissaan, mutta nyt on yleisesti hyväksytty, että 84% maailmankaikkeuden aineesta ei koostu atomytimistä ja elektroneista kuten tavallinen aine. Tämä toisenlainen aine on havaittu vain gravitaation kautta, sen ei ole nähty lähettävän tai imevän valoa, mistä tulee nimi pimeä aine.

Pimeä aine on saattanut jäädä näkemättä siksi, että se on näkymätöntä. Tämä on helppo saada aikaan: näemme asioita siksi, että ne vuorovaikuttavat valon kanssa ja ne vuorovaikuttavat valon kanssa siksi, että niillä on sähkövaraus. Jos pimeä aine koostuu hiukkasista, joilla ei ole sähkövarausta niin se on näkymätöntä.

Jos pimeä aine sen sijaan koostuu mustista aukoista, ne eivät ole näkymättömiä. On ehdotettu monia tapoja havaita muinaisia mustia aukkoja, esimerkiksi sen kautta miten niiden gravitaatio taivuttaa valoa tai miten niiden ympärille kertyvä ainekierros lähettää valoa. Se, että mustien aukkojen pitää olla juuri asteroidin massaisia jos niiden halutaan selittävän pimeä aine johtuu vain siitä, että jos ne olisivat kevyempiä tai raskaampia, niin ne olisi jo löydetty.

Muinaisista mustista aukoista on viime vuosina tullut muodikas aihe kosmologiassa.

Osittain tämä johtuu galaksien keskustojen jättiläisiin liittyvistä ongelmista, mutta enimmäkseen siitä, että tähdistä kehittyneiden mustien aukkojen tutkimus on menestynyt niin hyvin. Mustien aukkojen törmätessä syntyneiden gravitaatioaaltojen havaitsemisesta myönnettiin vuonna 2017 Nobelin palkinto. Tämän onnistumisen myötä on nostettu parrasvaloon vanhat ideat muinaisista mustista aukoista, ja ymmärrys niistä on kasvanut nopeasti.

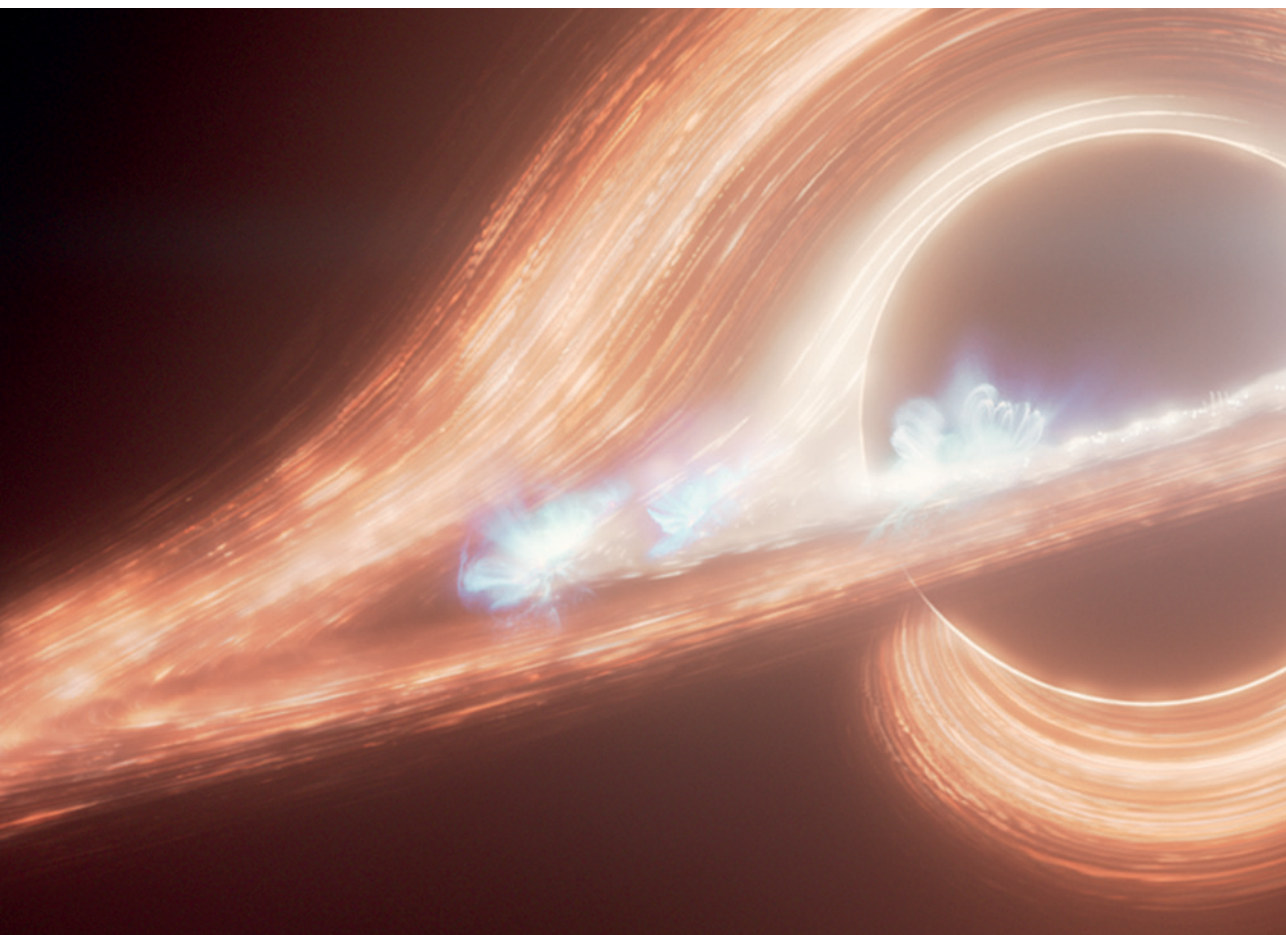
Kosmisen inflaation malleja voi säätää siten, että ne tuottavat minkä tahansa massaisia mustia aukkoja miten paljon tai vähän tahansa, vaikka yksityiskohdat ovatkin monimutkaisia eikä niitä vielä täysin ymmärretä. Toisin sanoen mallit eivät ole kovin ennustusvoimaisia, koska niistä voi saada ulos mitä haluaa, mikä korostaa havaintojen tärkeyttä.

Kosmologit odottavat suurella mielenkiinnolla James Webb Space Telescopen uusia havaintoja, jotka saattavat paljastaa vielä enemmän vielä vanhempia ja massiivisempia mustia aukkoja. Euroopan avaruusjärjestö ESA:n Gaia-satelliitti lopetti toimintansa maaliskuussa 2025, mutta sen datassa on yhä paljon perattavaa asteroidin massaisten mustien aukkojen havaitsemiseksi. Lähivuosina uudet kosmista mikroaaltotaustaa mittaavat kokeet kuten kansainvälinen Simons Observatory ja japanilainen LiteBIRD-satelliitti pistävät rajoja sille, miten isoja muinaisia mustia aukkoja voi olla – tai näkevät niiden jälkiä. Mustien aukkojen tutkimus on terveellä pohjalla, koska se nojaa nopeasti eteneviin havaintoihin, jotka karsivat teoreettisia ideoita ja nostavat esille uusia kysymyksiä.

KIRJOITTAJA

**SYKSY RÄSÄNEN** ON KOSMOLOGI HELSINGIN

YLIOPISTOLLA. HÄN KIRJOITTAU HIUKKASFYSIIKAN JA KOSMOLOGIAN TIIMOILTA URSAN SIVUILLA BLOGISSA KOSMOKSEEN KIRJOITETTUA.



SAGITTARIUS A\*, LINNUNRADAN YTIMESSÄ VÄLKEHTIVÄ SUPERMASSIIVINEN MUSTA AUKKO  
TAITEILIJAN NÄKEMYS, NASA, ESA, CSA, RALF CRAWFORD (STSCI)