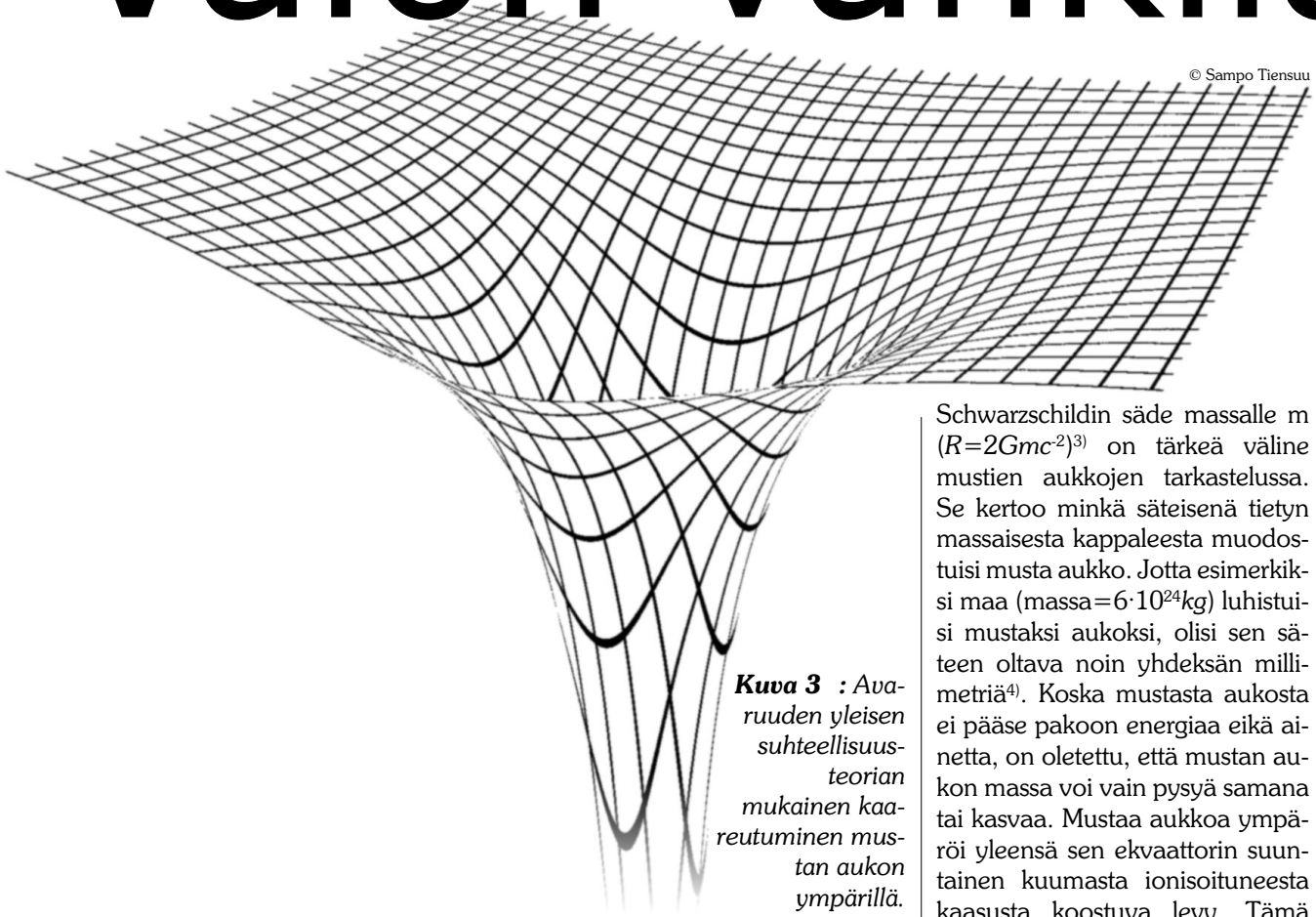


# Valon vankilat



© Sampo Tiensuu

**Kuva 3** : Avaruuden yleisen suhteellisuusteorian mukainen kaareutuminen mustan aukon ympärillä.

Mustaksi aukoksi nimitetään kappaletta, jonka painovoimakenttä on niin voimakas, että se estää kaiken materian ja säteilyn poistumisen aukosta. Gravitatio vaikuttaa valoonkin, mikä on konkreettisesti havaittu mm. eräiden tähtien aseman näennäisenä vääristymisenä kun ne ovat lähellä aurinkoa havaintokentässämme. Valo noudattaa Fermat'n periaatetta<sup>1)</sup>, eli valitsee nopeimman reitin kahden pisteen välillä. Taipuminen johtuu gravitaatiokentän aiheuttamasta aika-

1) R. Sexl, H. Sexl, s. 40  
Hassi, Hatakka, Saarikko, Valjakka, s. 138

avaruuden<sup>2)</sup> kaareutumisesta, jota mm. yleinen suhteellisuusteoria osaltaan selittää. Kaareutuminen vaikuttaa esineiden pituuksiin ja ajan kulumiseen ulkopuolisen tarkkailijan näkökulmasta.

Mustan aukon keskellä on pistemäinen singulariteetti, jonka tiheys on ääretön ja jossa aika-avaruus kaareutuu äärettömästi. Mustan aukon rajana on tapahtumahorisontti. Sen sisäpuolella valo kaartuu kohti singulariteettiä ja ulkopuolella pääsee karkuun gravitaatiokentästä.

2) Tässä yhteydessä neliulotteinen avaruus, jossa normaalien koordinaattien lisäksi aika on sijoitettu omalle koordinaattiakselilleen.

Schwarzschildin säde massalle  $m$  ( $R=2Gmc^{-2}$ )<sup>3)</sup> on tärkeä väline mustien aukkojen tarkastelussa. Se kertoo minkä säteisenä tietyn massaisesta kappaleesta muodostuisi musta aukko. Jotta esimerkiksi maa (massa= $6 \cdot 10^{24}$ kg) luhistuisi mustaksi aukoksi, olisi sen säteen oltava noin yhdeksän millimetriä<sup>4)</sup>. Koska mustasta aukosta ei pääse pakoon energiaa eikä ainetta, on oletettu, että mustan aukon massa voi vain pysyä samana tai kasvaa. Mustaa aukkoa ympäröi yleensä sen ekvaattorin suuntainen kuumasta ionisoituneesta kaasusta koostuva levy. Tämä kiihtyvässä liikkeessä oleva levy mm. emittoi röntgensäteilyä, mikä onkin yksi mustien aukkojen tuntomerkkeistä.

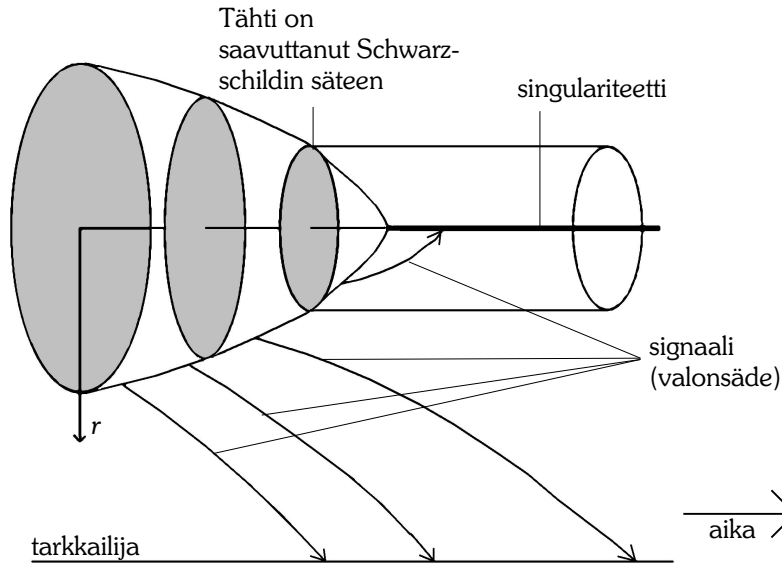
## Synty

Mustat aukot syntyvät nykykäsityksen mukaan useimmiten supernovien seurauksena. Kun suuri tähti on käyttänyt vedyn loppuun, nousevat lämpötila ja paine

3) Missä  $G$  on gravitaatiovakio,  $m$  massa ja  $c$  valon nopeus tyhjiössä.

4)

$$0,009m \approx \frac{2 \cdot 6 \cdot 10^{24} \text{ kg} \cdot 6,67259 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Nm}^2}{\text{kg}^2}}{\left(2,99792458 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}$$



**Kuva 33a:** Tähtien luhistuminen mustaksi aukoksi. Litteät kiekot esittävät tähteä eri hetkinä. Aika kulkee vasemmalta oikealle. Huomaa, että tarkkailijan aika kulkee eri nopeudella kuin luhistuvan tähden.

sen sisuksissa niin suuriksi, että helium alkaa fuusioitua edelleen. Jos tähden massa on hyvin suuri (yli  $8M_{\odot}$ ), muodostuu siinä raskaita alkuaineita. Tähtien toiminta kiihtyy ja sille syntyy sipulimainen rakenne, sisempien kerrosten sisältyessä yhä raskaampia alkuaineita. Punaiseksi jättiläiseksi muuttunut tähti laajenee nopeasti. Tähtien ytimeen muodostuu rautaa, joka ei enää rakenteensa vuoksi fuusoidu. Jäähtyvä rautaydin ei kuitenkaan kestä siihen kohdistuvaa painetta vaan luhistuu. Luhistuminen saattaa pysähtyä, kun Paulin kieltoääntö pakottaa elektronit tietyille radoille. Jos näin syntyneen ytimen massa on alle  $1.44M_{\odot}$ , riittää elektronien paine pysäyttämään luhistumisen ja syntyy valkoinen kääpiö. Jos ytimen massa taas on tätä Chandrasekharin<sup>6)</sup> rajaa suurempi, luhistuu ydin nopeasti lämpötilan noustessa viiteen miljardiin<sup>7)</sup> asteeseen. Tällöin vapautuva gammasäteily on niin voimakasta, että se hajottaa rauta-atomit heliumiksi<sup>8)</sup>. Tämä reaktio kuitenkin kuluttaa energiaa

5) J-P Luminet, s. 80,  $M_{\odot}$  = auringon massa

6) Raychaudhuri, Banerji, s. 128

7) hieman epävarma, Luminet mt.

8) Eli tapahtuu fotodisintegraatio:  
 $26Fe^{56} + \gamma \rightarrow 13_2He^4 + 4n$   
 (Raychaudhuri, Banerji, s. 140)

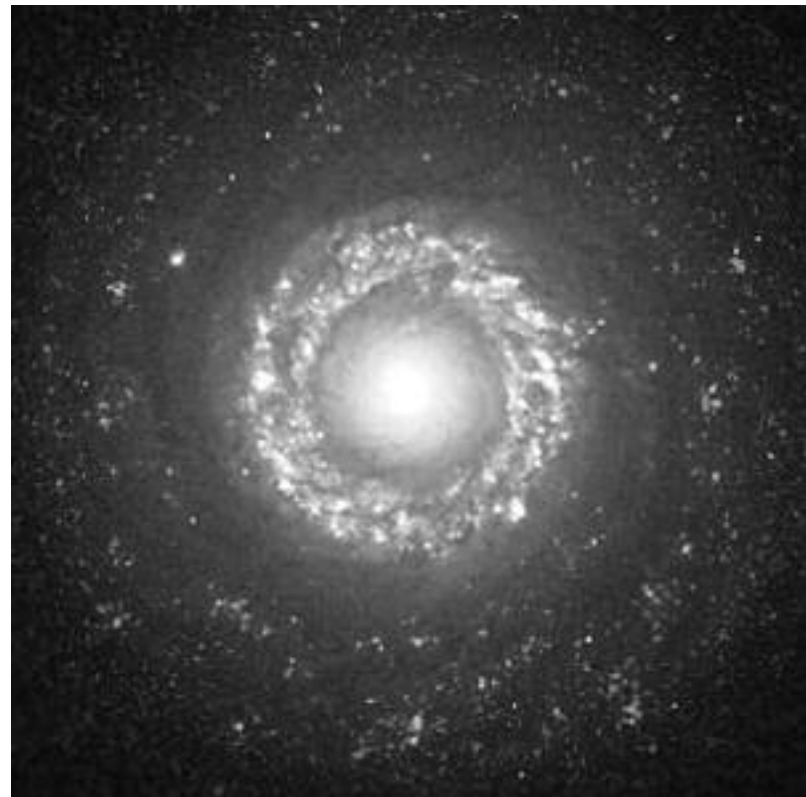
kiihdyttään luhistumista entisestään. Syntyneet heliumatomit hajoavat nopeahkosti protoneiksi, neutroneiksi ja elektroneiksi. Elektronit ja protonit muuttuvat<sup>9)</sup>

edelleen neutroneiksi synnyttäen samalla suuria määriä neutriinoja<sup>10)</sup>. Tähtien ulkokuori absorboi osan neutriinoista, loput sinkoutuvat ulos (lähes) valonnopeudella. Neutronit luhistuvat erittäin tiheäksi massaksi (noin  $10^{14} \frac{g}{cm^3}$ ), asettuen noin  $10^{-15}m$  päähän toisistaan. Ne tähden sisäosat, jotka eivät ole muuttuneet neutroneiksi, luhistuvat tässä vaiheessa neutroniyttimeen valtavalta

9) Lähes sama reaktio kuin elektroninsieppauksessa, paitsi että elektronit ovat vapaita ja niillä on suurempi energia.

10) (Lähes) massaton hiukkanen, joka reagoi hyvin vähän muun aineen kanssa. ks. MAOL taulukot.

11) Tyypin I supernovien uskotaan johtuvan valkoisten kääpiöiden tai helium tähtien räjähdyksistä, joista ei jää jäljelle mitään. Tyypin I supernovat kestävät noin vuoden ja osan niiden valosta ajatellaan syntyvän radioaktiivisen hajoamisen seurauksena. Tyypin II supernovien taas ajatellaan olevan suurten tähtien räjähdysisiä. Ne säilyvät aktiivisina kymmeniä tuhansia vuosia ja niistä jäänee jäljelle neutronitähti tai musta aukko.



**Kuva 33b:** Seyfret 2 -tyyppinen ellipsigalaksi NGC 7742. Tämän tyyppisten galaksien arvellaan saavan energiansa keskellä olevasta mustasta aukosta. Kirkkaan keskustan ympärillä olevalla kuhmuraisella näköisellä alueella syntyy jatkuvasti uusia tähtiä. Tämä alue on noin 3000 valovuoden päässä galaksin keskustasta.

NASA - Hubble-teleskooppi

nopeudella. Sitten ne pysähtyvät ja kimpoavat pois tiheästä neutroniytimeistä, törmäävät tähden ulkokuoreen ja aiheuttavat tyypin II<sup>11)</sup> supernovaräjähdyksen. Jos jäljelle jääneen neutroniytimen massa on alle  $3.2M_{\odot}$ <sup>12)</sup>, syntyy nopeasti pyörivä neutronitähti, eli pulsari. Jos massa on suurempi, ei neutronien paine riitä pysäyttämään luhistumista, vaan syntyy musta aukko.

Luhistumisen loppuvaihetta ei ulkopuolinen tarkkailija voi havaita, sillä ajan kulku hidastuu gravitaation vaikutuksesta ja valonsäteet taipuvat. Kuvasta 33a nähdään, kuinka säännöllisin väliajoin ytimen pinnalta lähteviltä signaaleilta kuluu yhä pidempi aika tarkkailijan saavuttamiseen. Tähtien valo näyttää himmenevän voimakkaasti johtuen kasvavasta punasiirtymästä ja signaalien kulun hidastumisesta. Lopulta tähden luhistuminen näyttää pysähtyvän juuri ennen kuin sen säde saavuttaa Schwarzschildin säteen. Schwarzschildin säteen kohdalla lähetetty signaali on matkalla tarkkailijaa kohti äärettömän kauan.

## Erilaisia mustia aukkoja

Yksinkertainen musta aukko on Schwarzschildin musta aukko, joka on pallomainen eikä pyöri. Sen ainoa merkitsevä ominaisuus on sen massa. Vaikka teoria

Schwarzschildin mustista aukoista kehitettiin ensimmäiseksi, nykyään niiden uskotaan olevan enemmän poikkeus kuin sääntö. Jotta syntyvä musta aukko olisi tällainen, pitäisi tähden lakata pyörimästä kokonaan ennen luhistumistaan ja olla muodoltaan täysin symmetrinen.

Uusiseelantilainen fyysikko Roy Kerr esitti vuonna 1962 mallin mustista aukoista, jotka pyörivät. Kerrin mustilla aukoilla on kaksi merkityksellistä ominaisuutta: massa ja pyörimismäärä. Mustan aukon pyöriessä sen kaikki pisteet liikkuvat liikkuvat yhtä nopeasti aika-avaruuden vääristymisestä johtuen. Tämän nopeuden yläraja on valon nopeus. Valonopeudella pyörivää mustaa aukkoa kutsutaan 'maksimaaliseksi'. Sen tapahtumahorisontin kohdalla painovoiman suuruus olisi nolla suuren 'keskipakoisvoiman' takia. Tähtien huimiin pyörimisnopeuksiin perustuen, suurimman osan Kerrin mustista aukoista oletetaan pyörivän hyvin nopeasti. Pyörimisen merkitystä lisää se fakta, että Kerrin mustan aukon mukana koko sitä ympäröivä aika-avaruus pyörii<sup>13)</sup> aiheuttaen eräänlaisen pyörteen. Magneettikenttää mustalla aukolla ei ole, vaikka aukkoa kiertävä kaasu sellaisen synnyttääkin. Tästä huolimatta mustalla aukolla on sähkövaraus<sup>14)</sup>. Kerrin mustille aukoille on tyypillistä että niiden tapahtumahorisontti on lä-

hempänä singulariteettia kuin Schwarzschildin mustilla aukoilla. Tästä johtuen arvellaan myös Kerrin mustiin aukkoihin putoavan materian saavuttavan suurempia nopeuksia.

Tämän lisäksi on esitetty galaksien ytimien sisältävän massiivisia Kerrin mustia aukkoja, joilla pyritään selittämään AGN:t<sup>15)</sup> ja kvasaarit<sup>16)</sup>. Tätä tukee lisäksi AGN:den kirkkauden nopeahko vaihtelu, joka asettaa ylärajan niiden koolle. Mustat aukot ovat ainoa tunnettu ilmiö, joka voi tuottaa kvasaarien ja AGN:den lähettämiä energiamääriä. Lisäksi oletetaan, että universumin alkuvaiheissa saattoi muodostua pieniä mustia aukkoja nopeiden tiheyden muutosten seurauksena.

12) Oppenheimer-Volkhoff-rajaa, tarkka arvo riippuu käytetystä mallista, osa uusista laskelmista esittää rajan oleva  $2-3M_{\odot}$ .

13) J. P. Luminet, s. 150

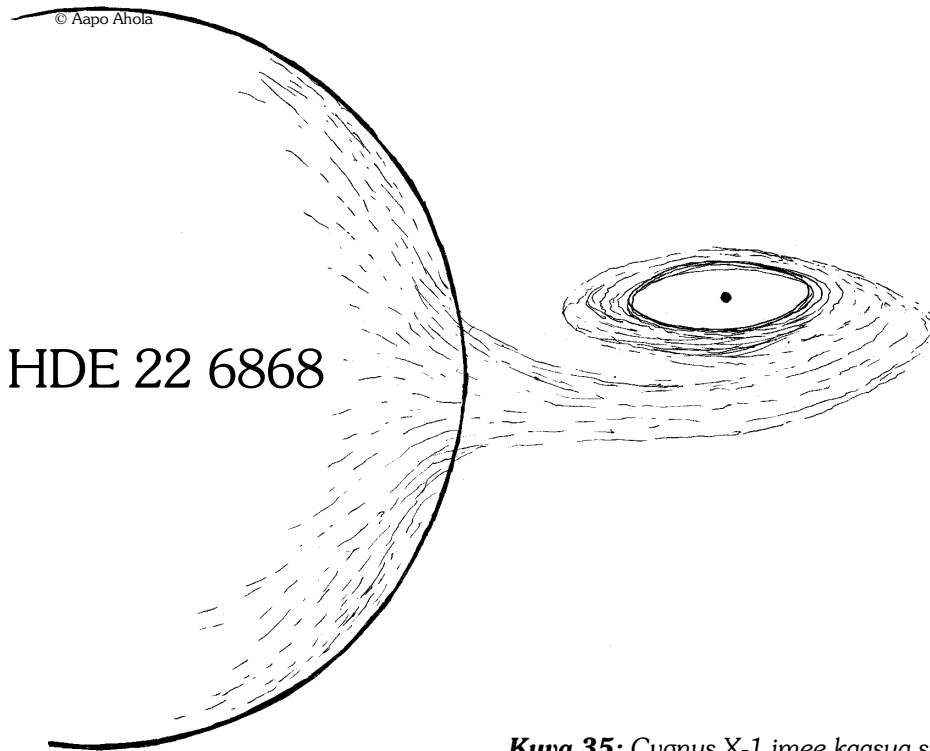
14) R. Sexl, H. Sexl, s. 106

15) Active Galactic Nuclei - Joidenkin galaksien keskustasta lähtee valtavia määriä säteilyä ja hiukkasia. Näiden galaksien ytimiä kutsutaan nimellä AGN. Usein AGN:sta purkautuu ulos kaksi kaasusuihkua valtavilla nopeuksilla. Tyypillisesti AGN:t huomataan näiden kaasusuihkujen aiheuttamista radiaaaloista.

16) 1970-luvulla havaittiin kohteita joilla oli valtava (jopa 4.73) punasiirtymä, pistemäinen lähde ja laaja spektri. Nykyään kvasaareja pidetään hyvin kaukaisina olevina valtavina AGN:na joiden ympärillä ovat galaksit eivät erotu maahan asti. Kvasaarin synnyttävän mustan aukon massa on arvioitu olevan  $106-109M_{\odot}$  välillä. Nykyteorioiden mukaan kvasaareilta loppui kauan sitten kaasu ja ne muuttuivat tavallisiksi AGN:ksi.

# Hawking-efekti

Yleensä mustia aukkoja on tutkittu suhteellisuusteorian keinoin, mutta 1974 Stephen Hawking esitti mustan aukon saattavan menettää massaansa jos tilannetta tarkastellaan kvanttimekaniikan kannalta. Jos mustan aukon tapahtuma horisontin lähellä syntyy<sup>24)</sup> virtuaalinen hiukkas-antihhiukkaspari, joka normaalisti annihiloituisivat heti. Kuitenkin voi käydä niin että toinen hiukkasista joutuu tapahtuma horisontin sisäpuolelle singulariteettiin. Tällöin toisesta hiukkasesta tulee oikea hiukkanen, joka säteilee pois mustan aukon luota. Tämän todellisen hiukkasen syntymisen vaatima energia tulee mustasta aukosta, jonka massa pienee vastaavasti. Käytännössä tällä ei ole vaikutusta kuin hyvin pieniin mustiin aukkoihin. Tämän säteilyn ominaisuudet ovat varsin yksinkertaisia seuraten useita termodynamiikan lakeja. Säteilyn lämpötila on kääntäen verrannollinen mustan aukon massaansa. Pienten mustien aukkojen muodostumista pidetään kuitenkin hyvin epätodennäköisenä, mutta se on saattanut olla hyvinkin todennäköistä alkuräjähdyksestä seuranneina ajanhetkinä.



**Kuva 35:** Cygnus X-1 imee kaasua sitä ympäröivään kiekkoon läheisestä HDE 22 6868 -tähdestä.

## Havaitseminen

Mustan aukon havainnointi on helpointa kaksoistähti-järjestelmissä<sup>17)</sup>. Jos toinen järjestelmän tähdistä on aktiivinen vain röntgenalueella<sup>18)</sup> ja sen spektri ja punasiirtymä ovat määrätynlaisia, se on todennäköisesti musta aukko jos sen massa<sup>19)</sup> on suurempi kuin 2-3 $M_{\odot}$ . Jos mustan aukon lähellä

17) Eli järjestelmä, jossa kaksi tähteä kiertää toisiaan. Vain alle puolet tähdistä on yksin kuten aurinko.

ei ole tähtiä, on sen havaitseminen hyvin vaikeaa, koska sen lähetyillä tuskin on riittävästi ainetta kaasulevyn syntymistä varten.

Tällä hetkellä on havaittu useita<sup>20)</sup> todennäköisiä mustia aukkoja, mutta Cygnus X-1 on yksi parhaiten dokumentoiduista.

18) Säteilyn aiheuttaa mustaan aukkoon syöksyvä plasma. Plasma on yleensä peräisin toisen tähden pintakerroksesta, josta mustan aukon painovoima vetää sitä itseään kohti.

19) Massaa voidaan yrittää laskea tähtien liikkeiden mukaan.

Se säteilee aktiivisesti röntgenalueella, ja sillä on havaittu olevan kumppani<sup>21)</sup>. Kumppanin spektrin dopplersiirtymän jaksollisuudesta voidaan päätellä sen kiertoajan olevan 5.6 päivää. Tämän perusteella voidaan laskea sen massa, joka on 9-15 $M_{\odot}$ <sup>22)</sup>. Se on erittäin todennäköisesti musta aukko.

Kuten jo aikaisemmin mainittiin, AGN:t ovat todennäköisesti valtavia mustia aukkoja tai pienempien mustien aukkojen ryhmittymiä. AGN:den tiedetään olleen yleisempiä menneisyydessä<sup>23)</sup>, joten galaksien ajatellaan rauhoittuvan vanhetessaan. Viitteitä tähän antaa mm. vähäinen tähtienvälisen aineen määrä vanhoissa elliptisgalakseissa, joissa ei esiinny AGN:takaan. Tämä tukee musta aukko -hypoteesia, sillä kun kaasun määrä mustan aukon läheisyydessä vähenee, tulee sen havaitsemisesta hankalaa.

**Einar Karttunen**

20) Mm. A0620-00, LMX-X1, V4641 sagittarius, LMC X-3 ...

21) HDE 22 6868

22) Bahcall 1979

23) Kaukana on enemmän AGN:ta kuin lähellä ja koska mitä kauempana kohde on sitä enemmän aikaa valolla kuluu maahan asti Eli kaukaisista tähdistä tuleva valo on lähtenyt miljardeja vuosia sitten.

24) Mahdollista epätarkkuusperiaatteen  $\Delta E \cdot \Delta t \approx \text{hansioista}$  jos  $\Delta t$  on riittävän pieni.

## Anna palautetta!

Anna kullekin artikkelille arvosana yhdestä viiteen

	Kiinnostavuus		Selkeys	
Algebran oikkuja	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Lihansyöjäkasvit	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Raportti Saran ošista	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Euphorbia canariensis	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Metabolian merkit	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Konez, joka voitti napoleonin	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Kromatografiaa	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Tykkien ballistiikkaa	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Matematiikkaa afr. kalaha-pelissä	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Martin Guerren paluu	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Valon vankilat	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Lehden ulkoasu:

Yleisarvosana:

Lomake tai sen kopio palautetaan Seepian palautelaatikkoon Ressun lukion 1. kerrokseen tai koulujen sisäisessä postissa osoitteeseen Ressun lukio / Pekka Piri. Palautetta voi antaa myös sähköpostitse osoitteeseen: [toimitus@seepia.org](mailto:toimitus@seepia.org).

Nimensä ja yhteystietonsa ilmoittaneiden kesken arvotaan Ässä-arpa.

Edellisen numeron arvonnassa Ässä-arvan voitti Linda Aalto. Onnittelut voittajalle!

**Käännä!**