



Mustien aukkojen synty, elämä ja kuolema

Peter Johansson, Astrofysiikan professori
Fysiikan laitos, Helsingin yliopisto

Skepsis ry. Luento
Helsinki 6.2.2019



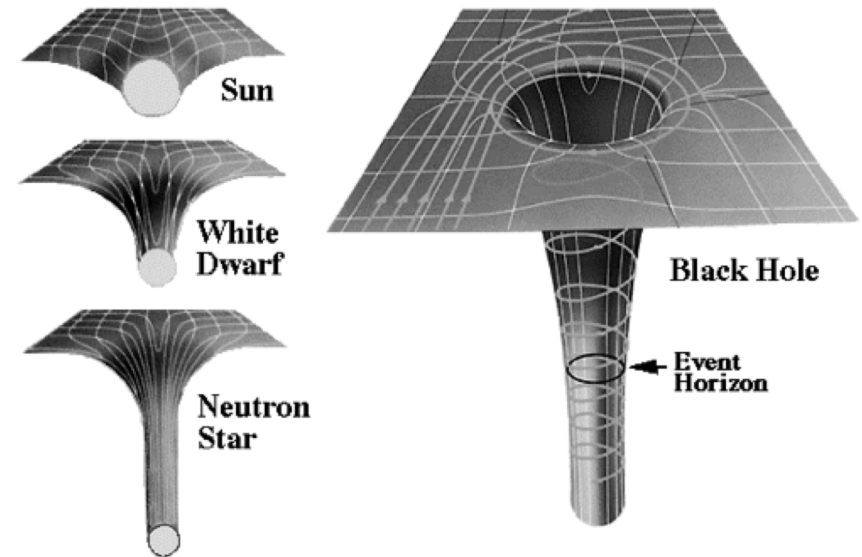
Tällä luennolla käsitellään

1. Mitä mustat aukot ovat?
 2. Minkälaisia mustia aukkoja on olemassa ja miten ne ovat syntyneet?
 3. Miten mustia aukkoja voidaan havaita?
 4. Miten mustat aukot kehittyvät ja mikä on niiden vaikutus ympäröivään avaruuteen?
 5. Mikä on mustien aukkojen tulevaisuus ja miten ne kuolevat?
 6. Mitä opimme?
- Värikoodi kertoo missä aiheessa mennään. **Luennon oppimistavoitteena on luoda yleisnäkemys siitä mitä mustat aukot ovat, miten ne syntyvät ja kehittyvät, ja miksi ne ovat tärkeitä.**



1. Mitä mustat aukot ovat?

- Ensimmäisen ajatuksen mustista aukoista esitti vuonna 1784 geologi John Michell, joka Newtonin painovoimateorian avulla spekuloi, että on olemassa ”taivaankappale, jonka vetovoima voisi olla niin suuri, että valo ei voi virrata siitä ulos”.
- **Einsteinin (1915) yleisen suhteellisuusteorian** mukaan kahden kappaleen välillä havaittu painovoima johtuu siitä, että kappaleiden massat kaareuttavat aika-avaruutta.

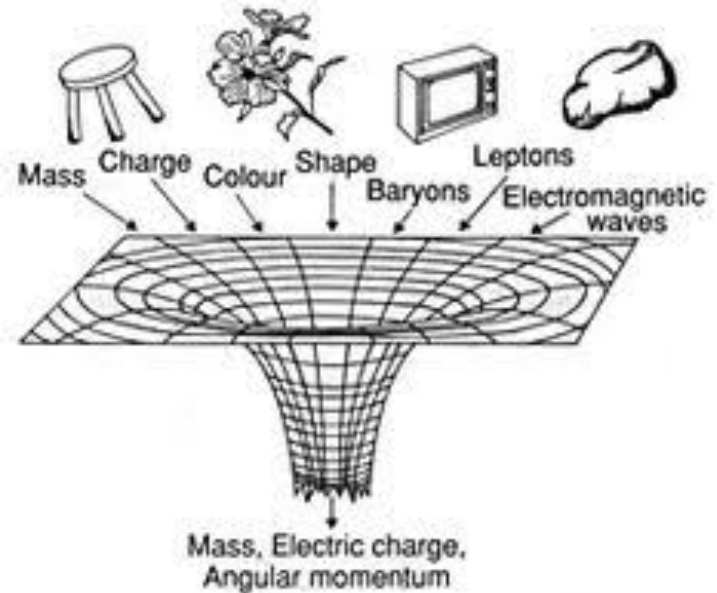


- **Musta aukko** on äärimmäisen tiheä aika-avaruuden massakeskittymä. Siellä painovoima on niin voimakasta, ettei yksikään hiukkanen tai edes säteily pysty pakenemaan alueelta.



Mustien aukkojen ominaisuudet

- Mustat aukot olivat pitkään matemaattisia kuriositeetteja, mutta 1960-luvulla ymmärrettiin, että mustia aukkoja on oikeasti olemassa.
- Fyysikko Robert Dicke keksi nimen musta aukko (black hole). Hän vertasi mustia aukkoja Calcuttassa olevaan vankilaan "Black hole of Calcutta", josta kukaan ei tullut hengissä ulos.
- Mustat aukot ovat äärimmäisen yksinkertaisia. Niillä voi olla vain kolme ominaisuutta: "No hair theorem"



Massa: $M > 0$

Pyörimismäärä: $L > 0$

Sähkövaraus: $Q \sim 0$

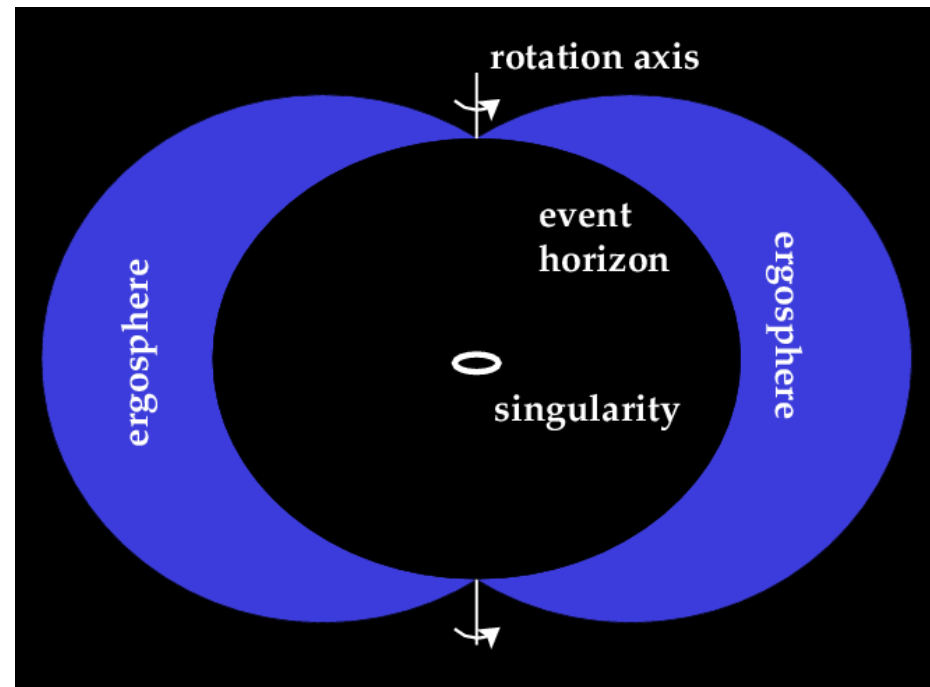


Mustien aukkojen rakenne

- **Tapahtumahorisontti:** Mustaa aukkoa ympäröivää rajaa, jonka takaa pakeneminen on mahdotonta. Pyörimättömälle mustalle aukolle, Schwarzschildin säde:

$$R_{\text{Sch}} = \frac{2GM}{c^2} = 2.95 \text{ km} \times \frac{M}{M_{\odot}}$$

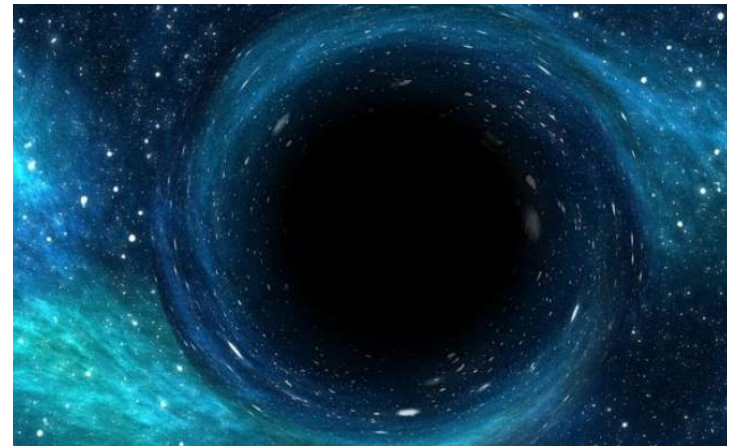
- **Singulariteetti:** Pistemäinen kohde, jonka tilavuus on nolla. Singulariteettiin on keskittynyt kaikki mustan aukon massa, ääretön tiheys.
- Pyörivällä mustalla aukolla on myös **stationaarisuusraja**. Sen rajan sisäpuolella mikään kappale ei voi pysyä levossa, Stationaarisuusrajan ja tapahtumahorisontin välistä aluetta kutsutaan **ergosfääriksi**.





Mitä tapahtuisi Maapallolle jos Auringosta tulisi yhtäkkiä Musta aukko?

- Mikäli Auringon kaikki aine puristettaisiin 3 kilometrin säteen sisäpuolelle, Auringosta tulisi musta aukko (tämä on vain teoriassa mahdollista).
- Mitä tapahtuisi Maapalolle?
 - A. Ei mitään, kaikki jatkuisi ennallaan.
 - B. Maapallo ja kaikki muut planeetat putoaisivat mustaan aukkoon.
 - C. Lähimmät planeetat putoaisivat mustaan aukkoon, mutta Maapallo säilyisi ennallaan.
 - D. Tulisi pimeää, mutta Maapallo ja muut planeetat jatkaisivat radoillaan mustan aukon ympäri.



Vastaus D on oikein, mutta miksi?

Mustat aukot eivät ole "kosmisia pölyimureita".

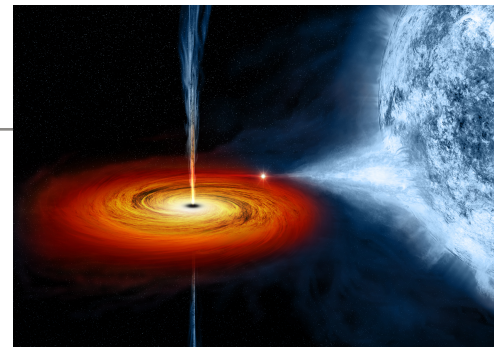


2. Minkälaisia mustia aukkoja on olemassa?

1. Tähtienmassaiset mustat aukot:

Kuinka isoja?: noin 3-100 kertaa Auringon massa, tapahtumahorisontin säde noin 9-300 km.

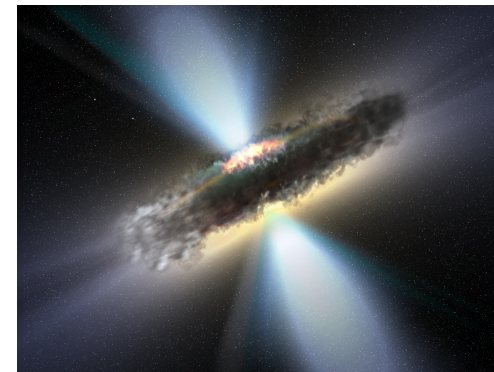
Missä?: Ympäri galaksia ja maailmankaikkeutta, kaikkialla missä massiivisia tähtiä syntyy.



2. Supermassiiviset mustat aukot:

Kuinka isoja?: noin 10^5 - 10^{10} kertaa Auringon massa, tapahtumahorisontin säde karkeasti Aurinkokunnan kokoluokkaa.

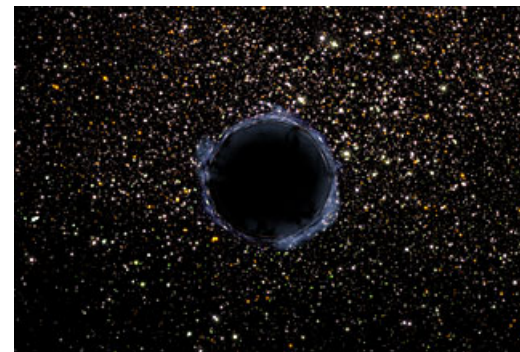
Missä?: Galaksien keskustoissa, esim. Linnunradassa 4 miljoonan Auringon massainen musta aukko.



3. Keskikokoiset mustat aukot:

Kuinka isoja?: noin 10^3 - 10^4 kertaa Auringon massa, tapahtumahorisontin säde tuhansia kilometrejä.

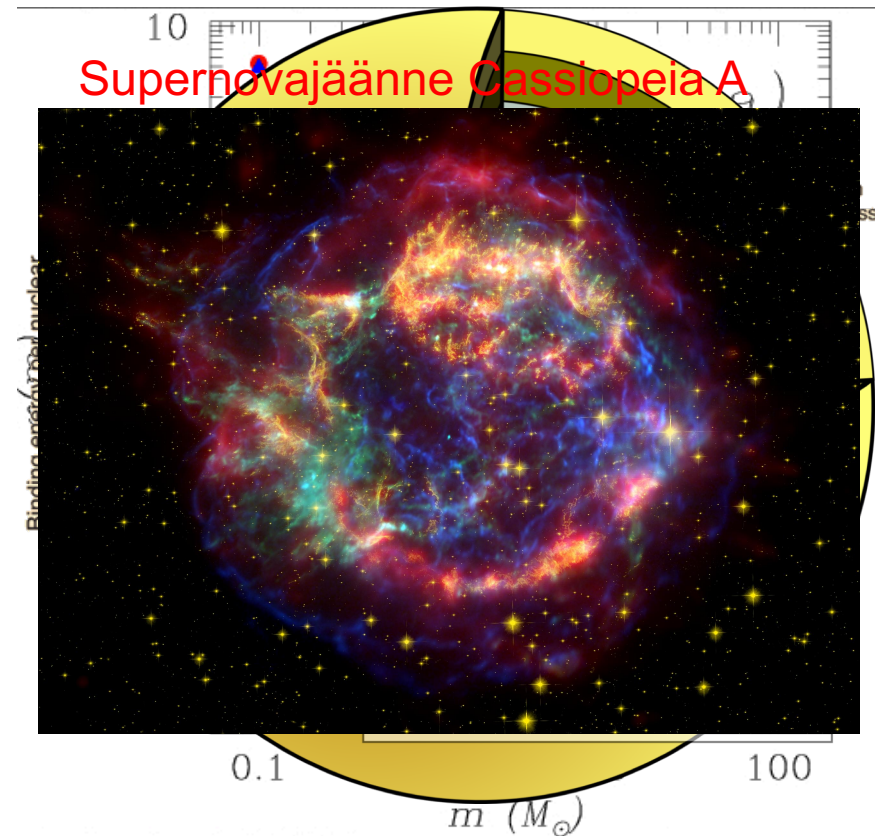
Missä?: Tiiviiden tähtijoukkojen ytimissä.





Tähtienmassaisten mustien aukkojen synty

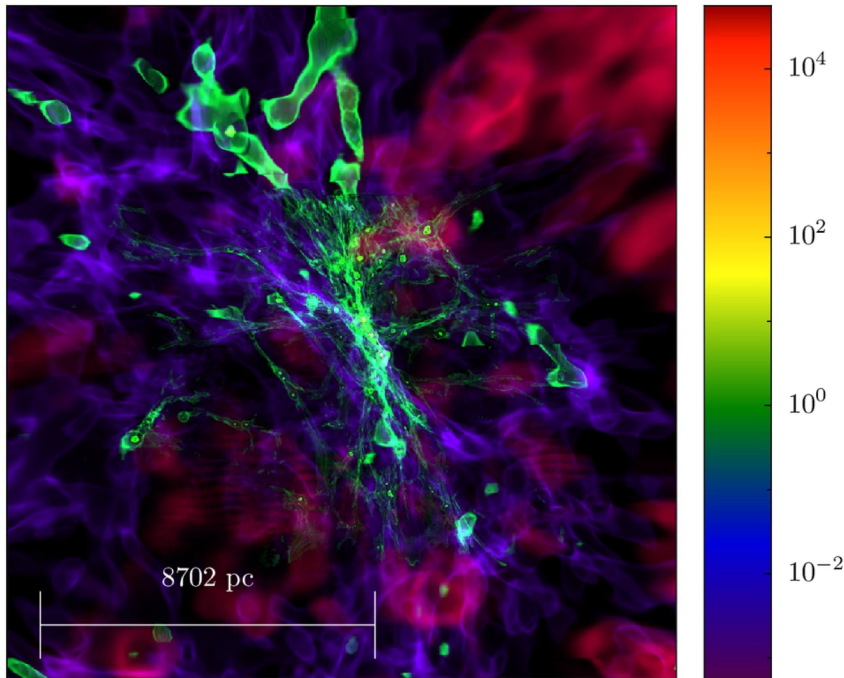
- **Aukkojen lukumäärä:** Vain hyvin massiiviset tähdet ($M \geq 15\text{--}20 M_{\odot}$) jättävät jälkeensä mustia aukkoja kuollessaan. Valtaosa tähdistä kevyitä, vain noin joka tuhannes tähti on riittävän massiivinen.
- **Tähden rakenne:** Elämänsä loppuvaiheella massiivisen tähden rakenne on "sipulimainen" ja fuusiota tapahtuu eri kerroksissa.
- **Fuusion loppu:** Lopulta ydin on fuusioitunut raudaksi ja raudan fuusioiminen vaatii enemmän energiaa kuin prosessista saa ulos.
- **Supernova:** Tähti muuttuu epästabiiliksi ja ulko-osat räjähtävät supernovana. Ydin voi romahtaa mustaksi aukoksi, mikäli sen massa on yli 3 Auringon massaa.





Supermassiivisten mustien aukkojen synty

Tutkimusryhmämme ajama simulaatio, joka kuvaa supermassiivisen mustan aukon syntyä varhaisessa maailmankaikkeudessa.



- **Ei metalleja:** Hyvin varhaisessa maailmankaikkeudessa ei ollut vielä vetyä ja heliumia raskaampia alkuaineita.

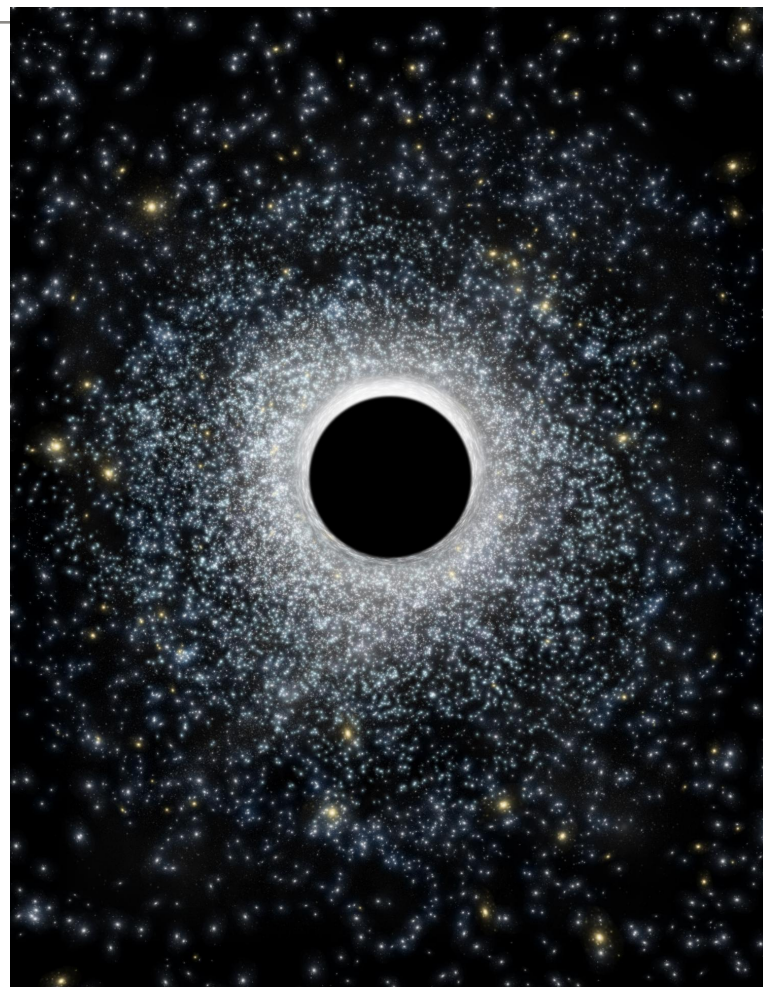
1. **Ensimmäisiä tähtiä:** Mikäli kaasussa oli → molekulaarista vetyä (H_2) kaasu pystyi jäähtymään synnyttäen raskaita tähtiä, joista kehittyi myöhemmin mustia aukkoja.

2. **Suoria mustia aukkoja:** Mikäli → molekulaarista vetyä ei ollut kaasun jäähtyminen oli tehotonta ja tällöin on mahdollista että isot kaasupilvet romahtivat suoraan mustiksi aukoiksi: $M_{BH} \sim 10^4 - 10^5 M_{\odot}$.



Keskikokoisten mustien aukkojen synty

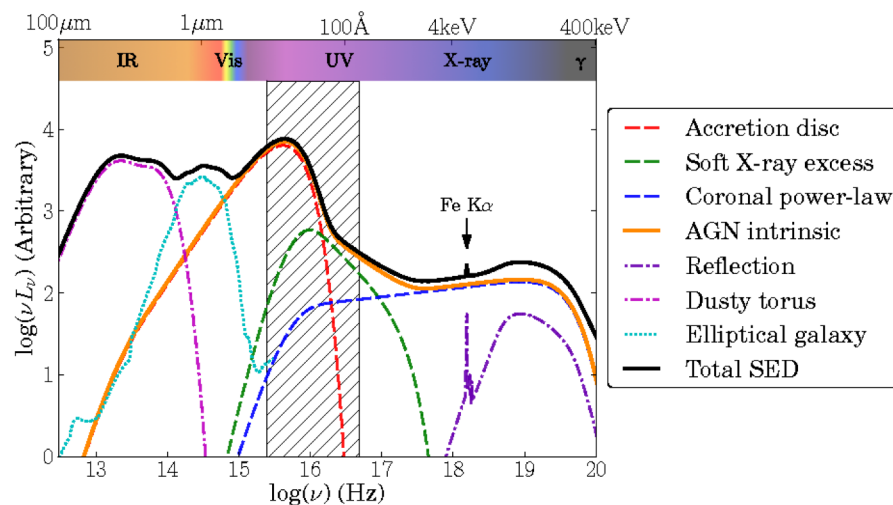
- Keskikokoiset mustat aukot ovat liian massiivisia syntyäkseen yksittäisen tähden romahduksessa.
- Keskikokoiset mustat aukot voivat syntyä:
 1. Tähtienmassaisten mustien aukkojen törmäyksissä tiheissä tähtiympäristöissä.
 2. Massiivisten tähtien välisissä törmäyksissä (runaway collision) tiheissä tähtiympäristöissä, kuten esimerkiksi pallomaisten tähtijoukkojen ytimissä.
- Varmistettuja havaintoja keskikokoisista mustista aukoista ei ole juurikaan.





3. Mustien aukkojen havaitseminen

- Tähtien lämpötilat ovat tyypillisesti välillä $T=3000 - 50000$ K. Tämä tarkoittaa myös, että **tähdet säteilevät kapealla aallonpituuskaistalla**, joka on keskittynyt lähelle näkyvän valon aluetta: $\lambda=400-700$ nm.
- Uusien havaintojen myötä löytyi joukko kohteita, jotka olivat hyvin **kirkkaita röntgen ja radio-alueella**. Lisäksi näillä kohteilla on **usein erittäin nopeita valonvaihteluita** (sekunneista – minuutteihin ja päiviin).

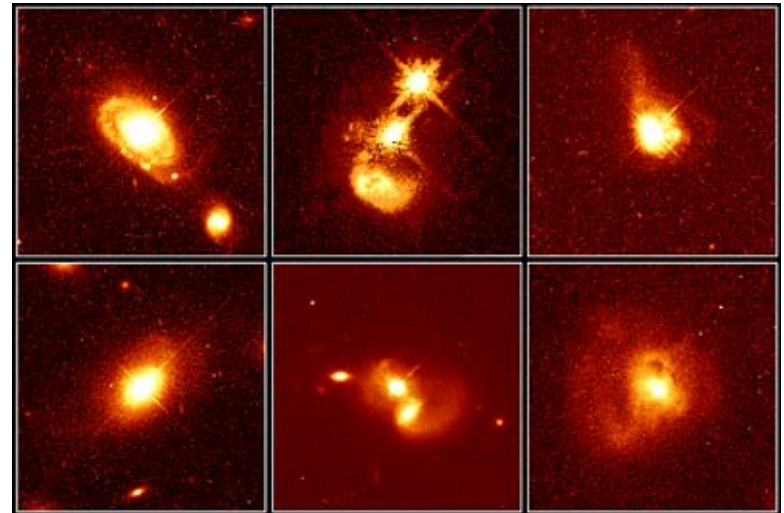
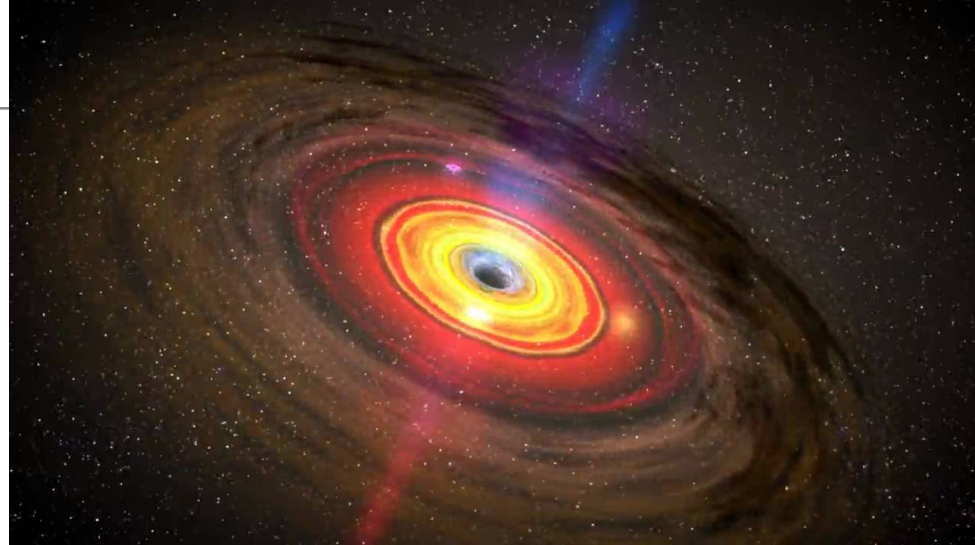


- Säteilyä lähettävän alueen täytyy olla pieni ja energian syntymekanismin hyvin tehokas.



Kertymäkiekot ja energiantuotto

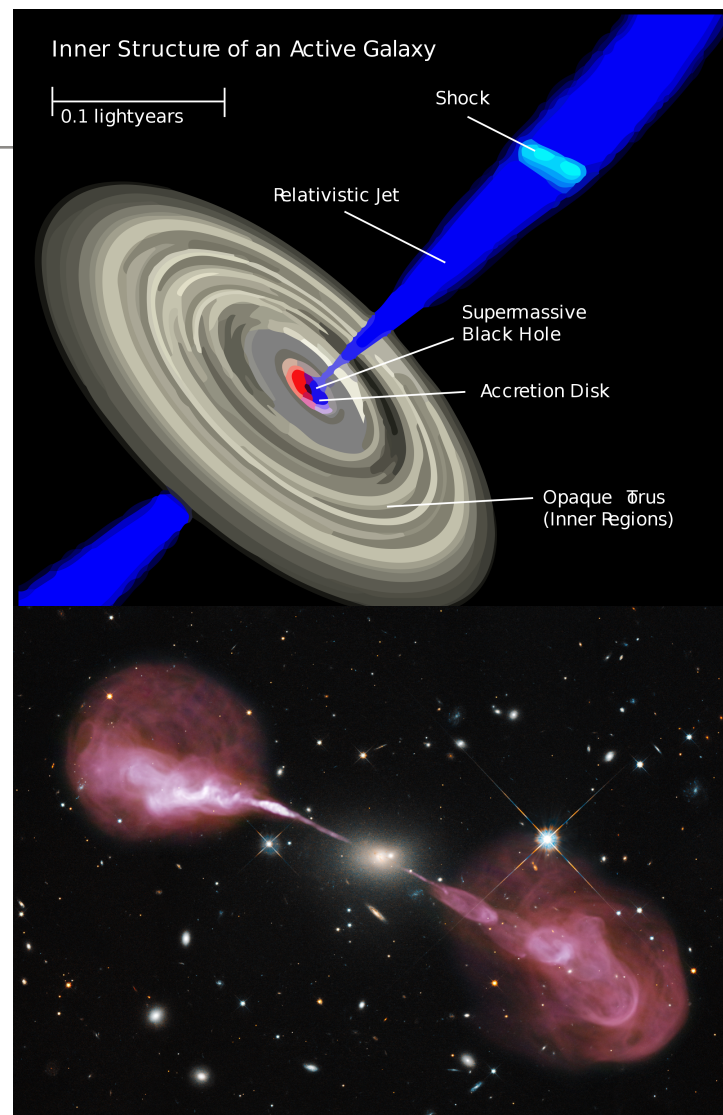
- Kaasun jäähtyessä sen impulssimomentti säilyy ja seurauksena on **kertymäkiekko mustan aukon ympärille**.
- Suuren painovoiman takia kaasu liikkuu erittäin suurella nopeudella ja toisiinsa törmäävät kaasuelementit kertymäkiekossa aiheuttavat kitkaa.
- Tyypillisesti noin $\sim 10\%$ (max 42%) aineen lepomassasta muuttuu **sähkömagneettiseksi säteilyksi** (lähinnä röntgenalueella). Vetyfuusion hyötysuhde tähdissä on vain 0.7% !





Mustien aukkojen suihkut

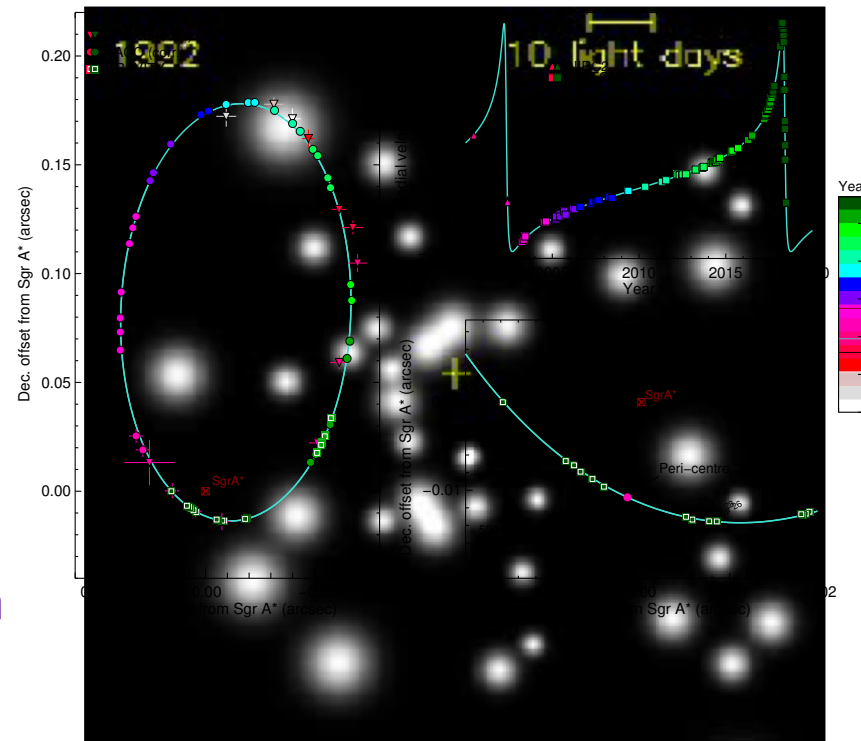
- Monilla supermassiivisilla mustilla aukoilla on myös erittäin energettiset **suihkut**, joiden koko voi olla useita kertaluokkia suurempi kuin itse galaksi.
- Suihkujen tarkka syntymekanismi ei ole vielä tiedossa, mutta suihkujen syntyä edesauttavat **kertymäkiekkojen magneettikentät ja nopea pyöriminen**.
- Suihkut ovat usein erittäin kirkkaita **radio-alueella**. Tämä johtuu lähellä valonnopeutta liikkuvista elektroneista vahvassa magneettikentässä -> **synkrotornisäteily**.





Dynaaminen mallinnus – Sgr A*

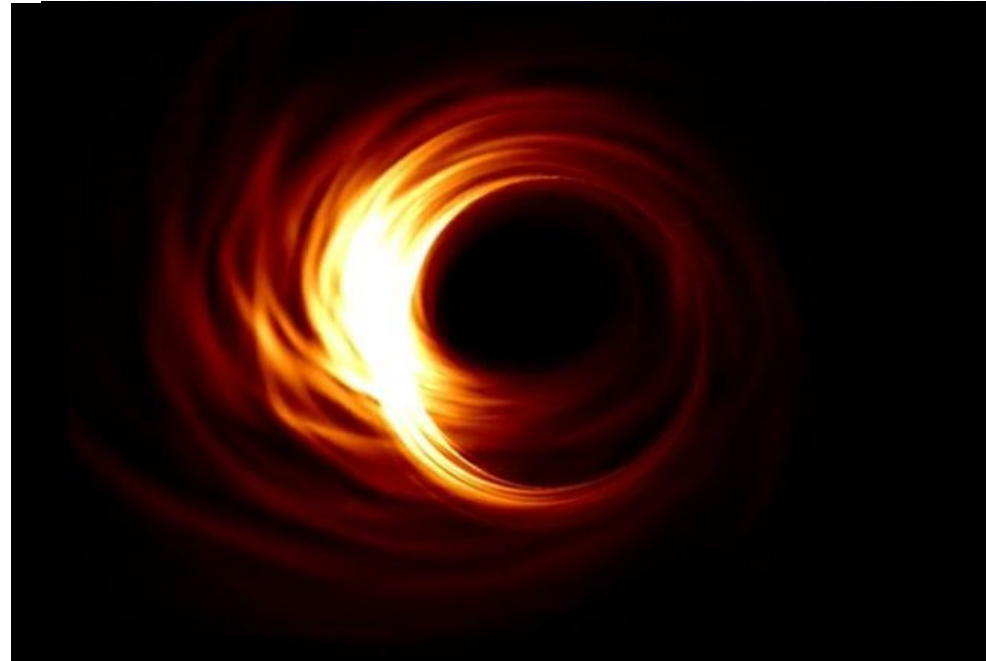
- Joidenkin mustien aukkojen massoja voidaan päätellä muiden kappaleiden liikkeistä niiden ympärillä.
- Paras esimerkki on Linnunradan keskustassa oleva Sgr A* supermassiivinen musta aukko, jonka lähistöllä olevia tähtiratoja on havaittu jo 25 vuoden ajan.
- Yksi tällainen tähti, S2 kiertää Sgr A*-mustaa aukkoa radalla, jonka periodi on $P=16.05$ vuotta ja se käy lähimmillään vain 17 valotunnin etäisyydellä.
- Linnunradan ytimessä olevan mustan aukon massaksi on täten saatu $M_{\text{BH}}=4.3 \times 10^6 M_{\odot}$.





Suorat havainnot – Event Horizon telescope

- Tällä hetkellä on käynnissä myös yritys havaita **Linnunradan keskuksen mustan aukon varjo** suoraan käyttäen Event Horizon Telescope:a, joka on sub-mm alueen interferometri.
- Interferometrissä yhdistetään ympäri maailmaa sijaitsevia radiokaukoputkien havaintoja ja täten saadaan hyvin suuri erotuskyky.
- Havaintojen analysointi on vaativaa ja tuloksia ei ole täten vielä julkaistu.



Fysiikallinen simulatio mustan aukon varjosta.



Gravitaatioaalto-havainnot

- Vuodesta 2015 lähtien on myös havaittu mustien aukkojen välisiä törmäyksiä suoraan gravitaatioaaltojen avulla.
- Toistaiseksi noin puolitusinaa havaintoa on vahvistettu ja ne osoittavat kiistatta, että mustat aukot ovat oikeasti olemassa.
- Havaittavat gravitaatioaallot syntyvät kun suuret massat liikkuvat lähellä valonnopeutta.

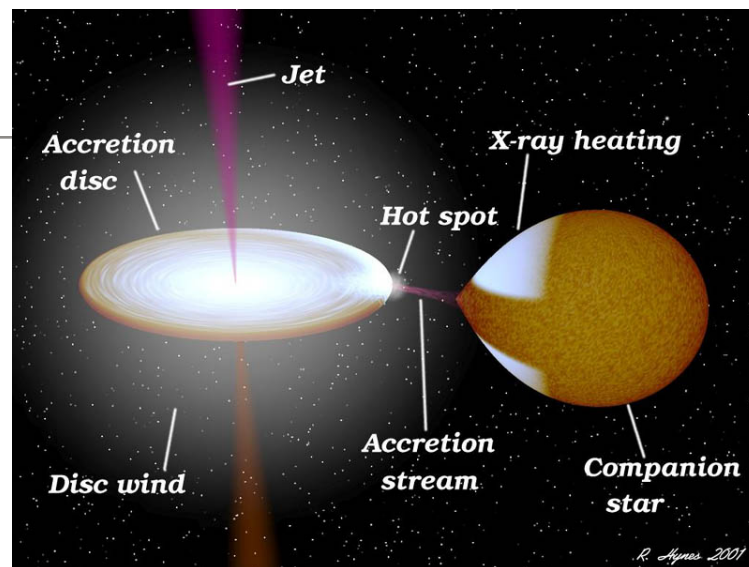


- LIGO Hanford observatorio Washingtonin osavaltiossa.



4. Mustien aukkojen kasvu – kaasun kertymä

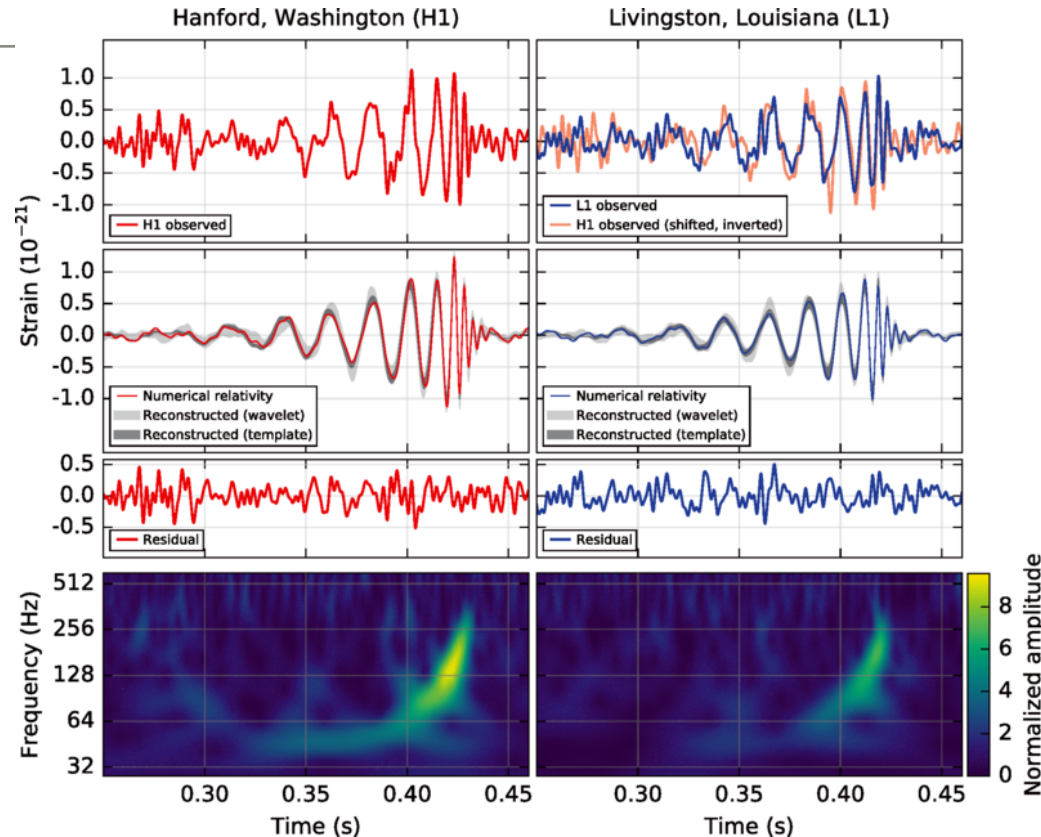
- Mustat aukot kasvattavat massaansa kun ainetta putoaa niihin. Samalla myös yleensä mustan aukon pyörimismäärä kasvaa jos ainetta putoaa kertymäkiekosta.
- Tähtienmassaisilla mustilla aukoilla tärkein materian lähde on yleensä kumppanitähti kaksois-tähtijärjestelmässä.
- Supermassiivisten mustien aukkojen tapauksessa kaasupilvien ja tähtien putoaminen mustan aukon lähiympäristöön voivat herättää yleensä uinuvat mustat aukot eloon.





Tähtienmassaisten mustien aukkojen törmäykset – Gravitaatioaallot

- Vuonna 2015 LIGO havaitsi signaalin 0.2 sekunnin aikana jonka taajuus nousi 35 Hz:stä 150 Hz:iin.
- Kyseessä oli kahden mustan aukon törmäys, joiden massat olivat $M_1=36 M_\odot$ ja $M_2=29 M_\odot$.
- Uuden mustan aukon massa oli $62 M_\odot$, eli $3 M_\odot$ säteili pois gravitaatioaaltoina.
- Hyvin lyhyen hetken ajan tämä kohde säteili 10 kertaa enemmän energiaa kun koko muu maailmankaikkeus.

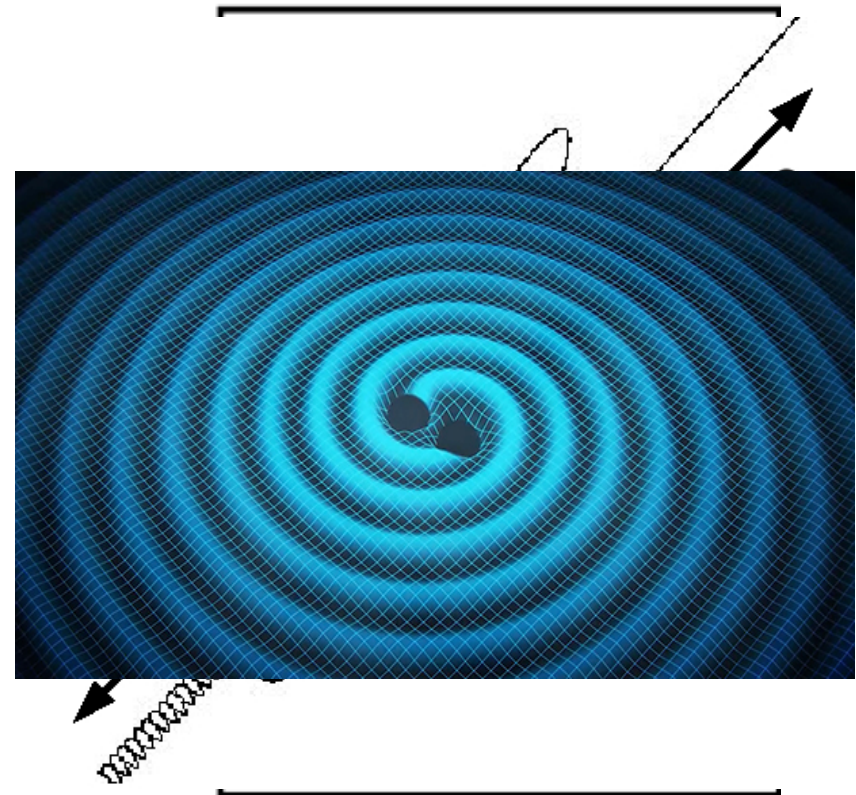


Havainto $h=10^{-21}$ vastaa suhteellista pituudenmuutosta joka on 10 000-osa protonin säteestä.



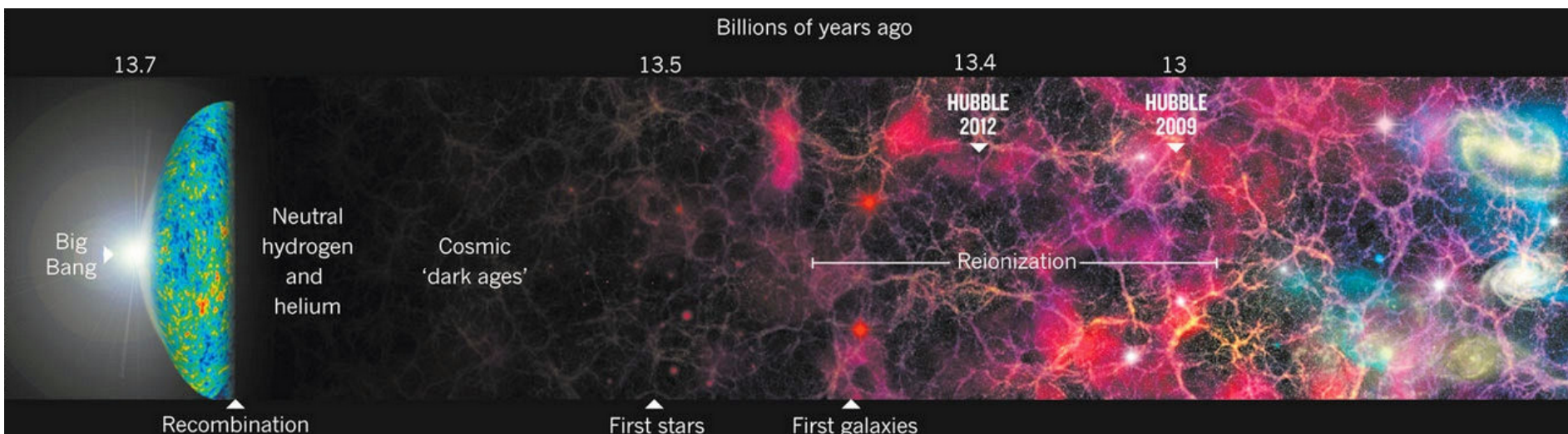
Supermassiivisten mustien aukkojen törmäykset

- Galaksien välissä törmäyksissä myös niiden ytimissä olevat supermassiiviset mustat aukot sulautuvat yhteen. Tämä tapahtuu kolmivaiheisen prosessin kautta.
- Ensin **dynaaminen kitka** tuo mustat aukot noin muutaman kymmenen valovuoden etäisyydelle.
 - Toiseksi **kolmen kappaleen vuorovaikutukset** vievät energiaa kaksoismusta-aukolta.
 - Lopulta hyvin pienillä etäisyyksillä **gravitaatioaaltojen emissio** tuo mustat aukot yhteen.





Mustien aukkojen vaikutus – Maailmankaikkeuden reionisaatio



- Kosminen mikroaaltotaustasäteilyn synnyn jälkeen Maailmankaikkeus oli täynnä neutraalia kaasua ja täten läpinäkymätön säteilylle.
- Mustien aukkojen kertymäkiekkojen energeettinen säteily yhdessä ensimmäisten tähtien säteilyn kanssa re-ionisoi maailmankaikkeuden ja teki siitä läpinäkyvän.



Mustien aukkojen vaikutus galakseihin

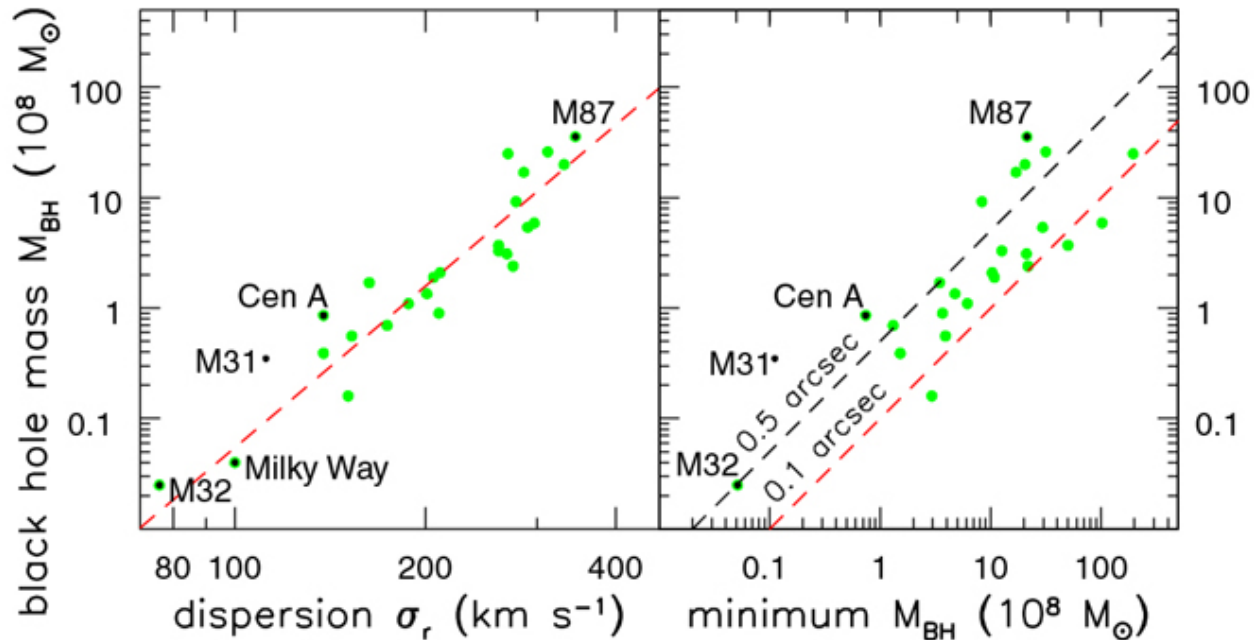
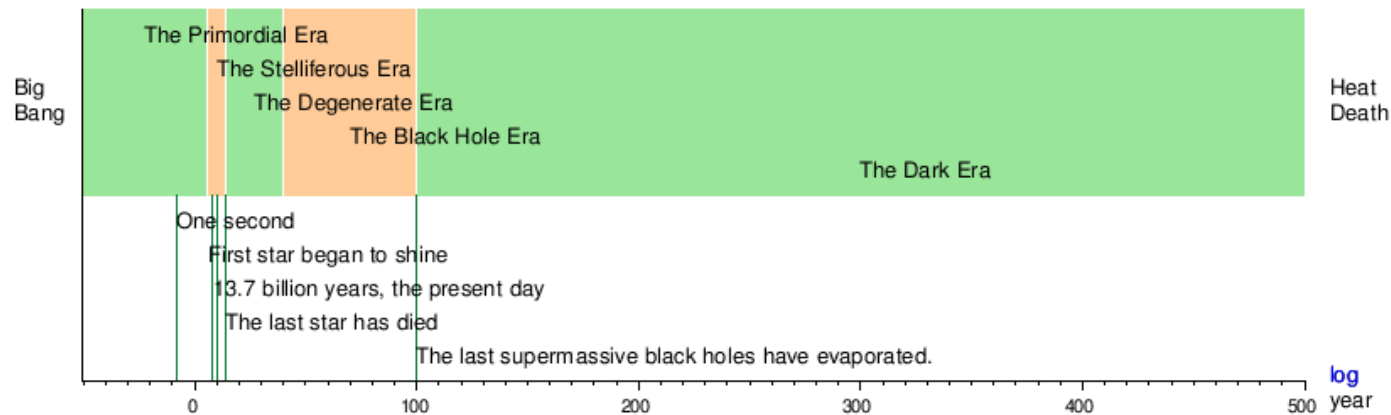


Fig 6.23 (L. Ferrarese) 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007

- Mustan aukon massa on verrannollinen keskuspullistuman massaan, mitä massiivisempi galaksi sitä massiivisempi musta aukko. Tähtimassa korreloi mustan aukon massan kanssa.



5. Mustien aukkojen tulevaisuus – Mustien aukkojen epookki

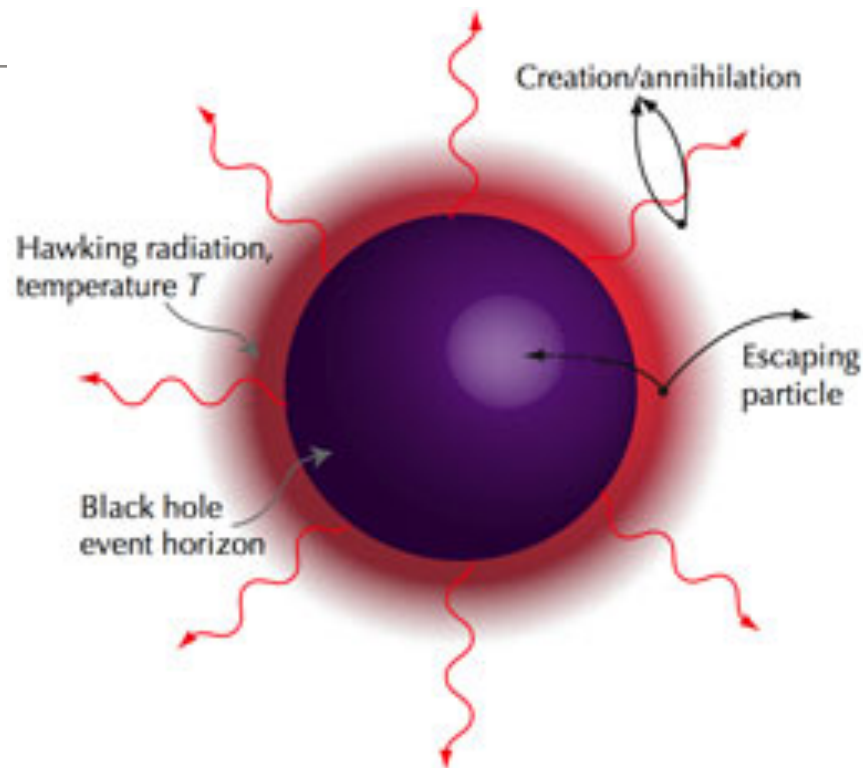


- Hyvin kaukaisessa tulevaisuudessa kun Maailmankaikkeus on noin 10^{40} - 10^{100} vuotta (nykyinen ikä $\sim 10^{10}$ vuotta) kaikki tähdet ovat jo aikaa sitten sammuneet ja maailmankaikkeudessa on enää jäljellä mustia aukkoja.
- Tarkan ennusteen laatiminen on hankalaa, koska emme vielä tiedä mitä maailmankaikkeuden kiihtyvän laajenemisen kanssa tapahtuu.



Hawkingin säteily ja mustien aukkojen kuolema

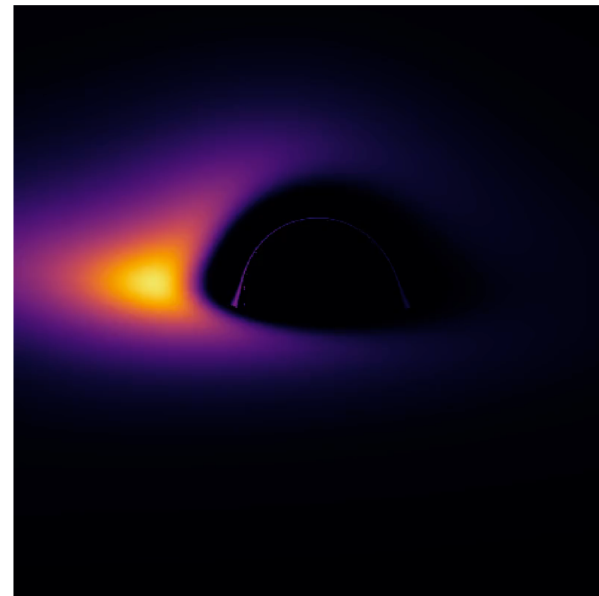
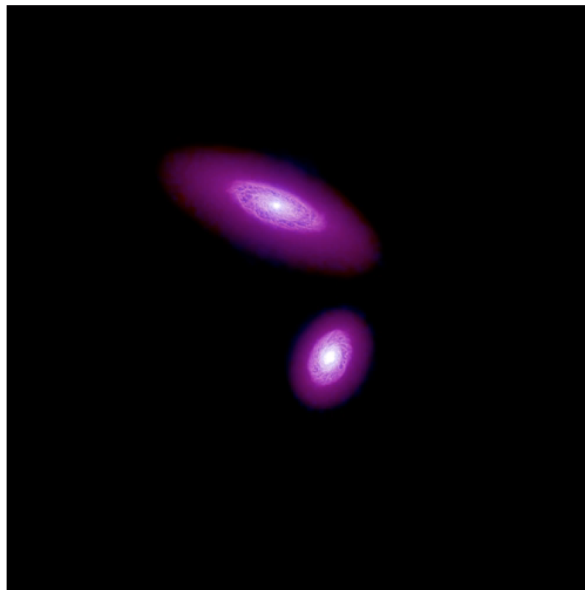
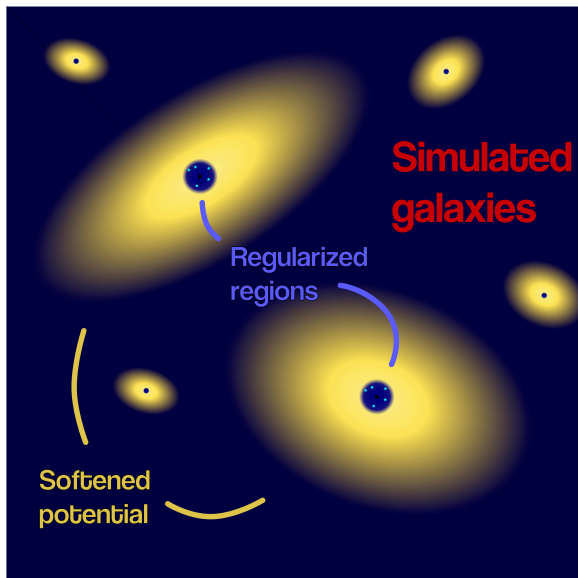
- Mustat aukot eivät ole ikuisia. Stephen Hawking osoitti 1974, että myös mustat aukot säteilevät johtuen kvanttimekaanista efekteistä tapahtumahorisontin lähellä.
- Säteilyä ei ole suoraan havaittu ja se on äärimmäisen heikkoa. Muutaman Auringon massaisen mustan aukon lämpötila on vain asteen miljoonasosan päässä absoluuttisesta nollapisteestä.



- Yhden auringon massaisella mustalla aukolla kuluisi noin 10^{64} vuotta höyrystymiseen säteilemällä Hawking-säteilyä.



Mustien aukkojen tutkimus Helsingissä



- Helsingissä olemme keskittyneet tutkimaan supermassiivisten mustien aukkojen syntyä ja kehitystä, eritoten mustien aukkojen törmäyksiä ja niissä syntyviä gravitaatioaaltoja. Lisätietoja tutkimuksestamme löytyy täältä: <http://www.helsinki.fi/~phjohans/>



Mitä opimme?

1. Mustat aukot ovat äärimmäisen tiheitä aika-avaruuden massakeskittymiä ja niiden ominaisuuksia voidaan kuvata vain kolmella suureella: massa, pyörimismäärä ja varaus.
2. Maailmankaikkeudessa on tähtienmassaisia, supermassiivisia ja keskikoisia mustia aukkoja. Mustat aukot syntyvät kun ainetta puristetaan äärimmäisen pieneen kokoon.
3. Mustia aukkoja ympäröivät kertymäkiekot tuottavat valtavan paljon energiaa. Lisäksi mustia aukkoja voidaan havaita niitä ympäröivien tähtien liikkeistä ja suoraan gravitaatioaalloilla.
4. Mustat aukot kasvattavat massaansa kun ainetta putoaa niihin ja törmäysten kautta, jotka ovat varsin yleisiä. Mustilla aukoilla on tärkeä rooli galaksien synnyssä ja kehityksessä.
5. Edes mustat aukot eivät ikuisesti, vaan lopulta ne höyrystyvät säteilemällä Hawkingin säteilyn kun Maailmankaikkeus on lähes ikuisuuden ikäinen.