



UNIVERSITY OF HELSINKI

Mustien aukkojen astrofysiikka

Peter Johansson

Fysiikan laitos, Helsingin yliopisto

Kumpula nyt
Helsinki 19.2.2016

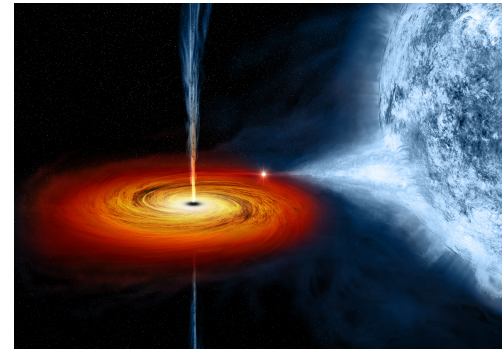
Mustien aukkojen demografia

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.

Olemassaolo?: Täysin varmaa.

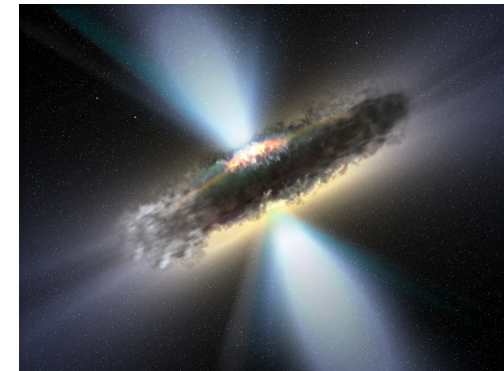


2. Supermassiiviset mustat aukot:

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.

Olemassaolo?: Täysin varmaa.

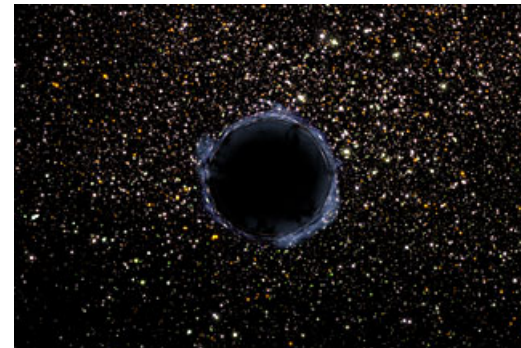


3. Keskikokoiset mustat aukot:

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

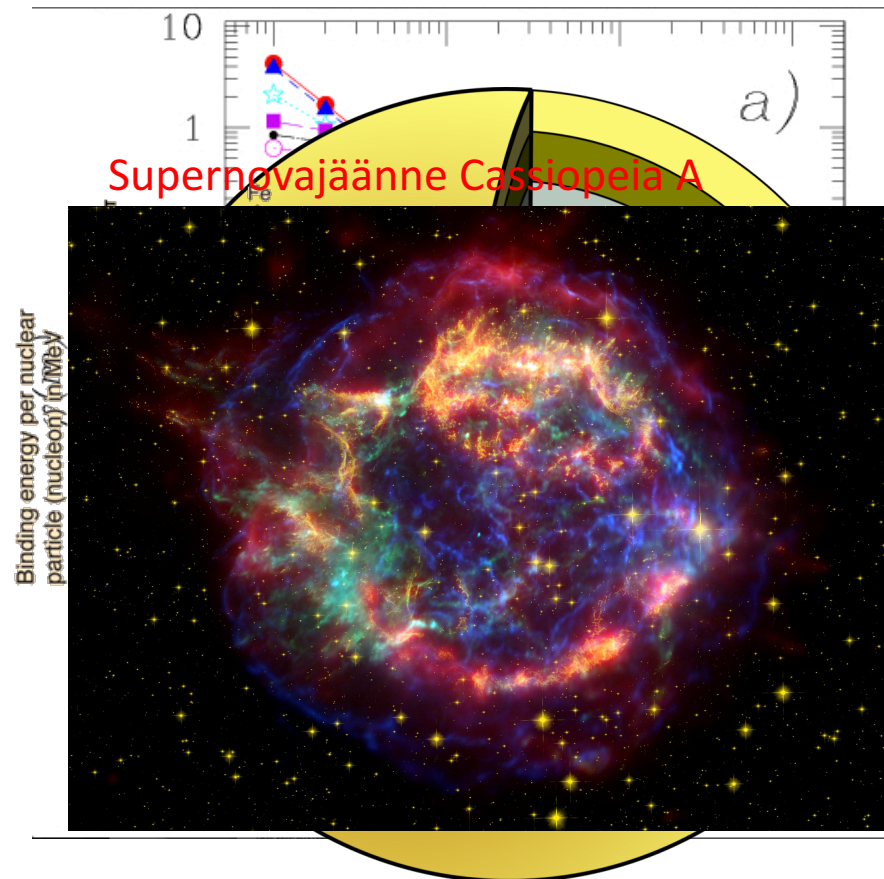
Missä?: Tiiviiden tähtijoukkojen ytimissä.

Olemassaolo?: Todennäköistä, mutta ei täysin varmaa.



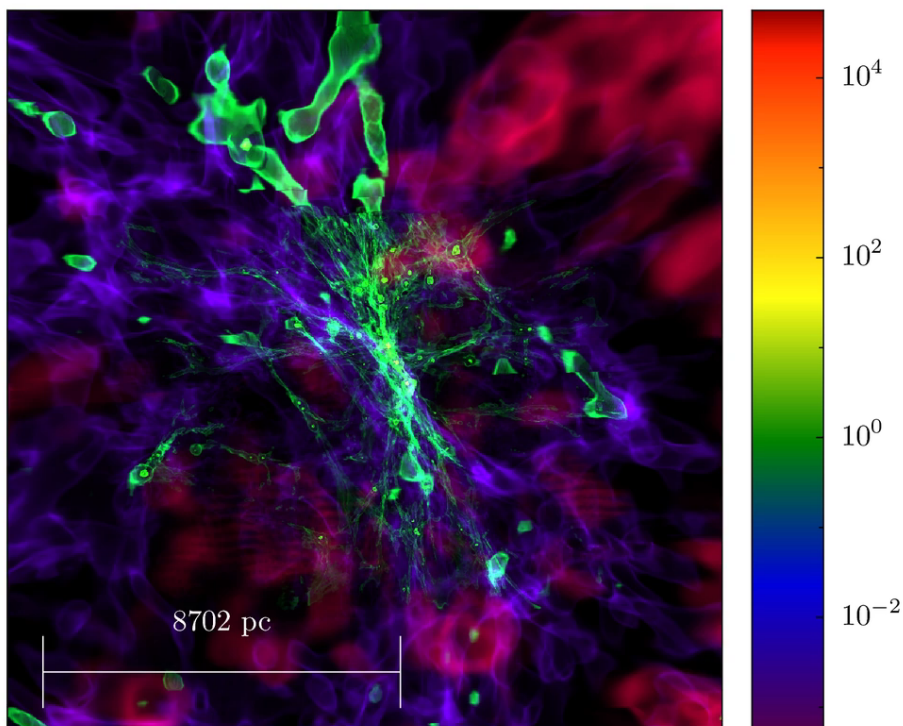
Tähtienmassaisten mustien aukkojen synty

- **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.
- **Fusion 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.

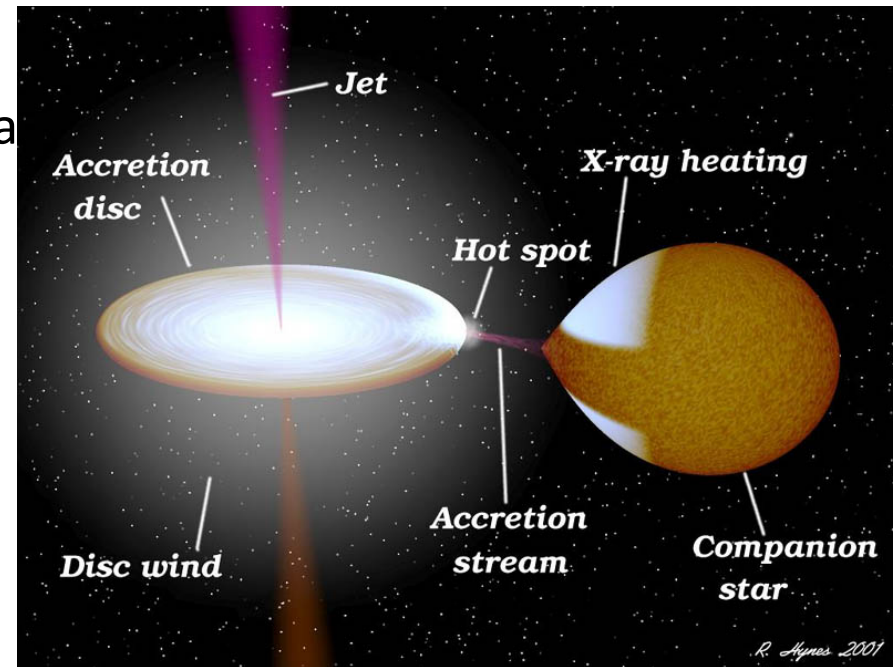


- **Ei metalleja:** Hyvin varhaisessa maailmankaikkeudessa ei ollut vielä vetyä ja heliumia raskaampia alkuaineita.
- **Ensimmäisiä tähtiä:** Mikäli kaasussa oli molekulaarista vetyä (H_2) kaasu pystyi jäähtymään synnyttäen raskaita tähtiä, joista kehittyi myöhemmin mustia aukkoja.
- **Suoria mustia aukkoja:** Mikäli molekulaarista vetyä ei ollut kaasun jäähtyminen oli tehotonta ja tällöin on mahdollista että isot kaasupilvet romahtivat suoraan mustiksi aukoiksi: $M_{BH} \sim 10^4 - 10^5 M_{\odot}$.



Havainnot: Tähtienmassaiset mustat aukot

- **Yksinäinen musta aukko:** Sellaisen havaitseminen käytännössä mahdotonta paitsi hyvin epätodennäköisen gravitaatiolinssi-ilmiön kautta.
- **Musta aukko –tähti järjestelmä:** Musta aukko vetää painovoimallaan ainetta kumppanitähdestä, joka kerääntyy kiertymäkiekkoon sen ympärille ja kuumenee yli miljoonaan asteeseen, jolloin se säteilee voimakkaasti röntgensäteilyä.
- **Tunnettu lukumäärä:** Linnunradassa tunnetaan muutamia kymmeniä musta aukko-tähti kandidaatteja.



Erittäin lyhytaikaiset valovaihtelut kielivät kompaktista säteilykohteesta.

- **Energiantuotto:** Keskimäärin 10% mustaan aukkoon putoavasta aineesta vapautuu säteilynä matkalla aukkoon. Vetyfuusion hyötysuhde tähdissä on vain 0.7%!



Havainnot: Supermassiiviset mustat aukot

- **Dynaamiset havainnot:** Havaitsemalla tähtien rataliikkeitä supermassiivisen mustan aukon lähellä voimme suoraan Newtonin lakeja käyttäen laskea radan sisäpuolelle jäävän massan määrän.
- **Valovaihtelut:** Havainnot kvasaareiden valovaihteluista, jotka voivat olla hyvinkin nopeita todistavat, että säteilevän alueen täytyy olla hyvin pieni (valotunteja tai valopäiviä).
- **Suoria näköhavaintoja:** Lähitulevaisuudessa Event Horizon Telescope, joka on sub-mm alueen interferometri pyrkii suoraan havaitsemaan Linnunradan keskuksen mustan aukon varjon.



aukolle: $M_{\text{BH}} \approx 4.1 \times 10^6 M_{\odot}$.



Gravitaatioaalto-tähtitiede: Uusi aikakausi

- **Suora todiste:** Gravitaatioaalloilla havaittujen 29 ja 36 $M_{\odot}$ mustien aukkojen emotähdet olivat erittäin massiivisia ja todennäköisesti niillä oli alun perin hyvin pieni metallipitoisuus.
- **Netronitähdet:** Gravitaatioaaltojen avulla voimme tutkia neutronitähtien rakenteita ja muotoja.
- **Supernovat:** Miten ja miksi supernovat tarkalleen räjähtävät? Asymmetrinen räjähdys aiheuttaa gravitaatioaaltoja.
- **Mustat aukot ovat nyt kuumempi aihe kun koskaan:** Esim. Crafoord palkinto (tähtitieteen Nobel) myönnettiin juuri tänä vuonna Roy Kerr:ille ja Roger Blandford:ille tästä aiheesta.
- **Tulevaisuus:** Mustien aukkojen tutkimus on hyvin kiehtovaa. Tarvetta uusille opiskelijoille ja tutkijoille!

