

# Kompaktit tähdet

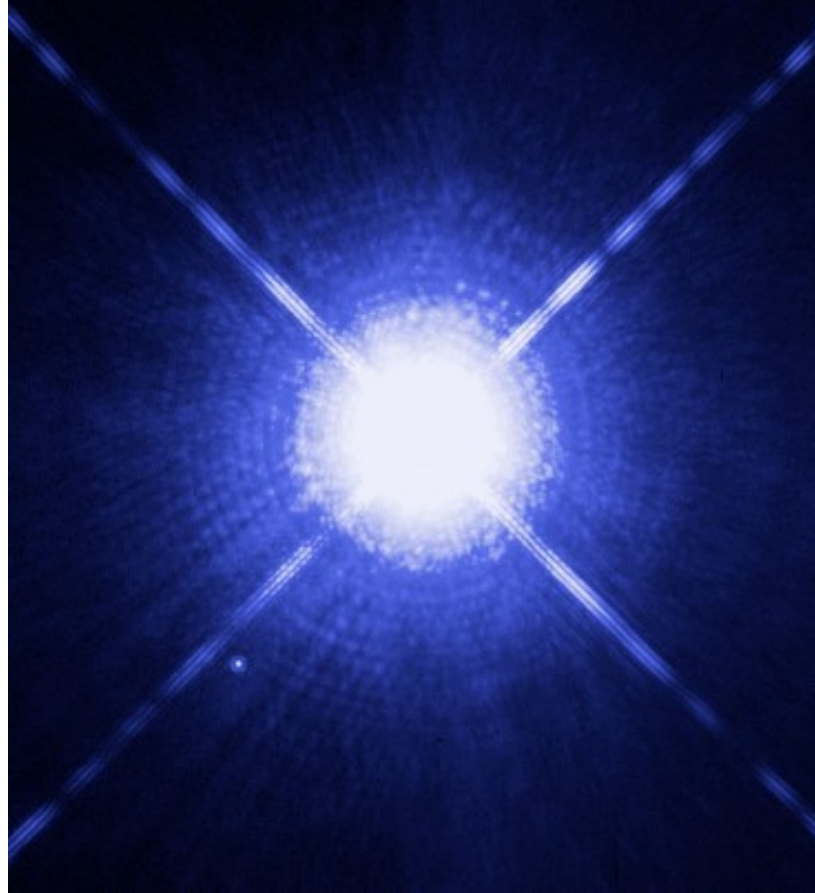
Valkoiset kääpiöt

Neutronitähdet

Mustat aukot

# Valkoiset kääpiöt

- Alkujaan alle noin  $8 M_{\odot}$  massaiset tähdet päätyvät lopulta valkoisiksi kääpiöiksi
  - Auringon lopullinen päätepiste
- Viimeisten ydinreaktioiden loputtua tähden sisällä ei enää synny uutta energiaa => säteilypaineen loputtua gravitaatio luhistaa tähden niin tiiviiksi kuin mahdollista
- Elektronit ja protonit pakkautuvat niin tiiviisti kuin kvanttimekaniikka sallii – aine *degeneroituu*
  - Paulin kieltosääntö estää hiukkasia olemasta samassa kvantttilassa, rajoittaen saavutettavaa tiheyttä
- Massa Auringon luokkaa, noin maapallon kokoinen
  - Teelusikallinen valkoista kääpiötä painaisi tonnin
- Maksimimassa  $1.44 M_{\odot}$  (Chandrasekharin massa) – loput massat hävinneet tähtituulen mukana
  - Jos tämä massa saavutetaan, gravitaatio voittaa degeneraatiopaineen ja valkoinen kääpiö luhistuu
- Ei sisäistä energianlähdettä => jäähtyy jatkuvasti
  - Teoreettinen lopullinen olomuoto musta kääpiö – jäähtyminen tähän asti kestää niin pitkään, ettei sellaisia vielä ole olemassa

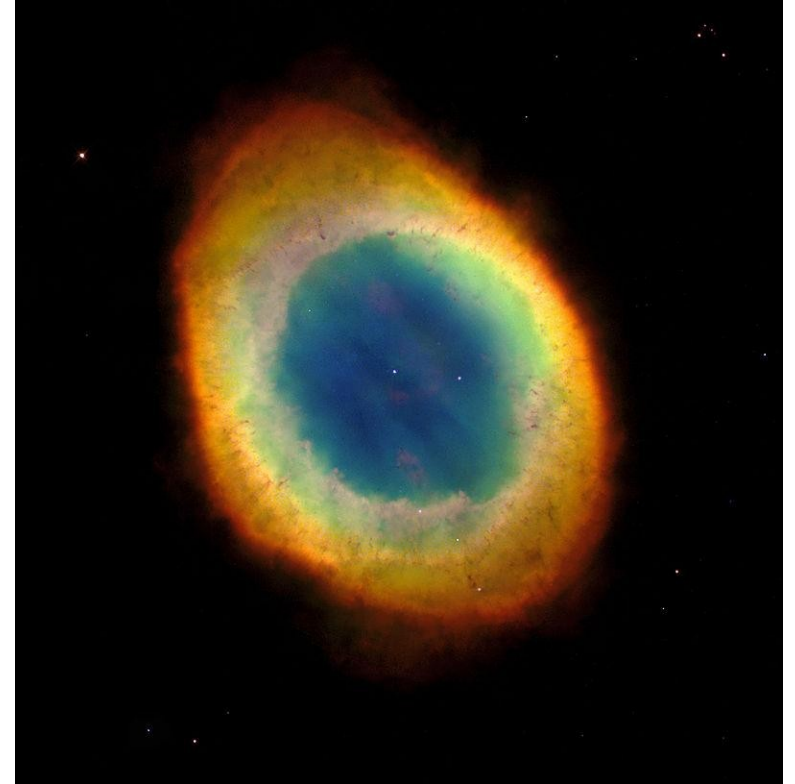


Sirius B on aurinkokuntaa lähin, ja oli myös ensimmäinen löydetty valkoinen kääpiö.  
Kuva Nasa, ESA, H. Bond (STScI), ja M. Barstow (University of Leicester).

Maailmankaikkeus nyt 2026

# Planetaariset sumut

- Pienten tähtien ulko-osat muodostavat valkoisen kääpiön ympärille muutamaksi kymmeneksi tuhanneksi vuodeksi planetaarisen sumun
- Aluksi kirkas sumu hiipuu hiljalleen levitessään ympäröivään avaruuteen, rikastaen sitä fuusioreaktioissa syntyneillä metalleilla
- Pienillä kaukoputkilla muistuttavat hieman planeettoja (pienikokoisia pintakohteita)



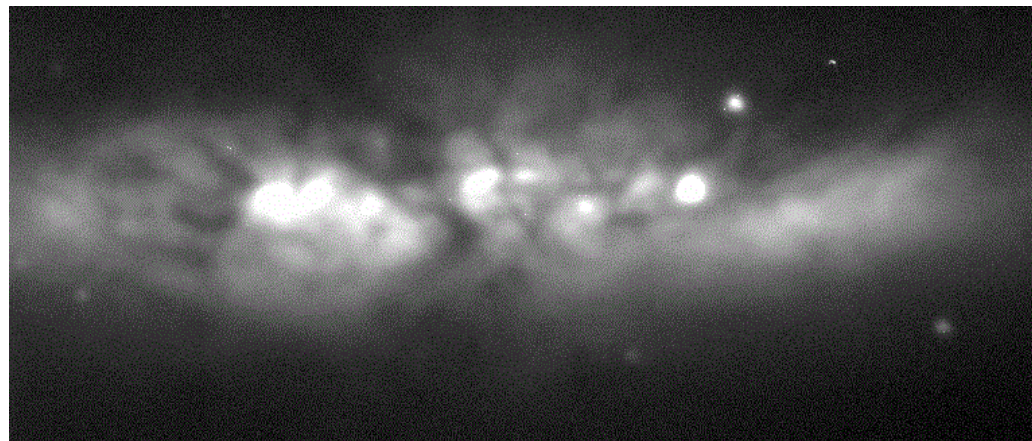
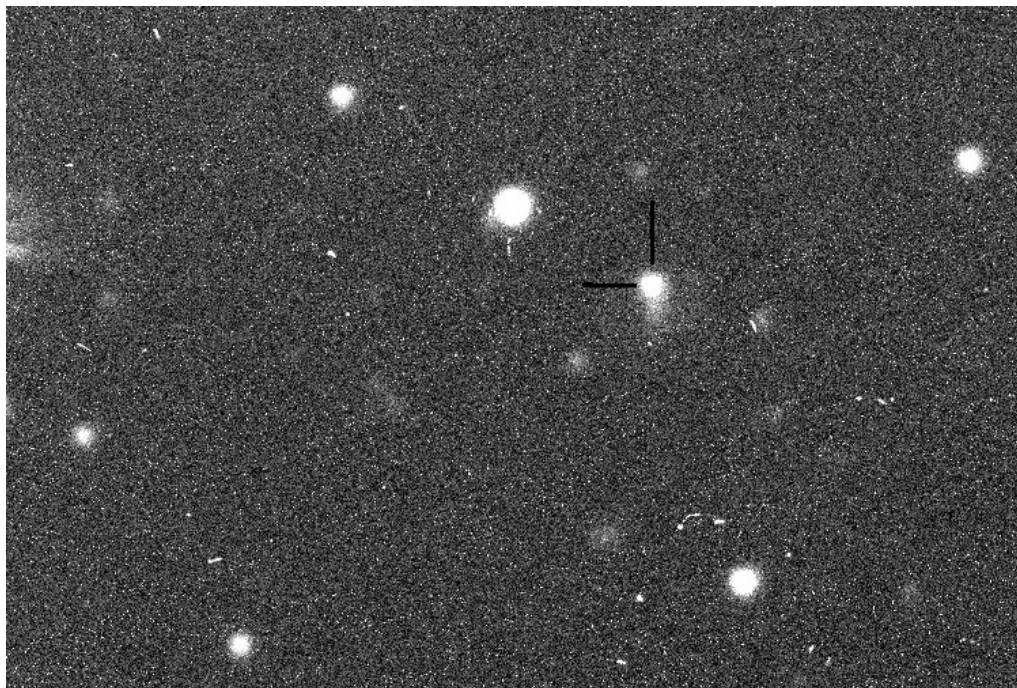
Maailmankaikkeus nyt 2026

M 57 eli Lyyran rengassumu on tunnettu planetaarinen sumu, jonka keskellä erottuu valkoinen kääpiö.  
Kuva NASA/ESA/STScI.

# Supernovat



Maailmankaikkeus nyt 2026

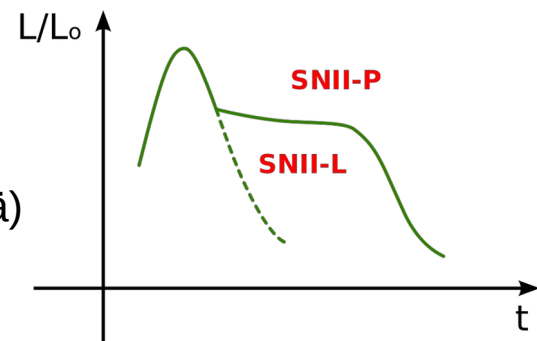


AT 2018we sekä SN 2014J supernovat Kirkkonummen Metsähovista kuvattuna.

Maailmankaikkeus nyt 2026

# Supernovien luokittelu

- Tyypin I: ei sisällä vedyn spektriviivoja
  - Ia: räjähtävä valkoinen kääpiö
  - Ib: erittäin massiivisia räjähtäviä tähtiä, menettäneet vetykuorensa tähtituuleksessa (Wolf-Rayet-tähti)
  - Ic: kaikista massiivisimpia tähtiä, menettäneet myös heliumkuorensa
- Tyypin II: sisältää vedyn spektriviivoja (kaikki räjähtäviä massiivisia tähtiä)
  - II-P: kirkkaus pysyy pitkään tasaisena (*plateau*) – yleisin tyypin II luokka
  - II-L: kirkkaus himmenee tasaisesti (*linear*)
  - IIn: kapeat spektriviivat (*narrow*) – ympäristössä tiheää tähtienvälistä ainetta, joka hidastaa supernovan laajenemista
  - IIb: alkaa tyypin II supernovana, mutta myöhemmin vedyn viivat häviävät spektristä

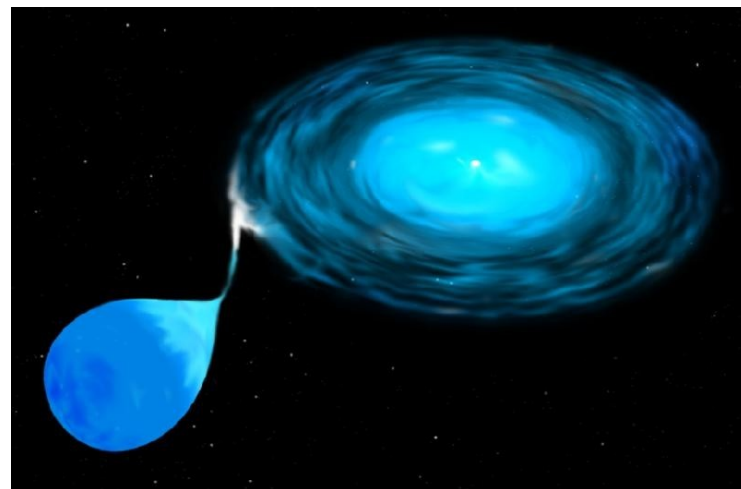


# Luhistumissupernovat

- Massiiviset tähdet (alunperin yli  $8 M_{\odot}$ ), päättävät päivänsä äärimmäisen kirkkaassa supernovaräjähdyksessä
  - Supernova saattaa olla kirkkaampi kuin koko muu galaksi yhteensä
  - Luhistuvasta ytimeistä jää mahdollisesti jäljelle neutronitähti tai musta aukko
- Tähtien ytimien luhistumisen saattaa käynnistää:
  - $8-10 M_{\odot}$ : magnesiumydinten elektronisieppaukset O/Ne/Mg ytimessä vähentävät painetta => luhistuminen aikaansaa räjähdysmäisen hapen fuusion, mikä nostaa lämpötilaa, mikä edelleen tehostaa fuusiota rajatta, mistä vapautuva energia tuhoaa koko tähden sekunneissa (ytimestä ei jää kompaktia kohdetta)
  - $10-140 M_{\odot}$ : fuusioreaktiot jatkuvat kunnes ydin on rautaa => rauta ei fuusoidu pitemmälle, jolloin Chandrasekharin massan ylittävä rautaydin ei pysy enää koossa vaan luhistuu neutronitähdeksi tai mustaksi aukoksi
  - Yli  $140 M_{\odot}$  (matala metallisuus): korkeaenergiset gammafotonit muodostavat elektroni-positronipareja => säteilypainetta vähenee ja ydin luhistuu, käynnistäen räjähdysmäisen hapen fuusion – räjähdys tuhoaa koko tähden, eikä ytimeistä jää jäljelle kompaktia tähteä
  - Yli  $250 M_{\odot}$  (matala metallisuus): fotodisintegraatio (gamma-säteet irrottavat atomiytimistä protoneita/neutroneita) => säteilypainetta vähenee ja ydin luhistuu, luultavasti suoraan mustaksi aukoksi ilman kummoista räjähdystä
- Ytimien luhistuminen kestää vain sekunteja, raskaat alkuaineet hajoavat, elektronit ja protonit yhdistyvät neutroneiksi, samalla syntyy myös neutriinoja
- Ytimien pinnalle putoava aine kimpoaa ulospäin valtavana sokkiaaltona, joka syntyvien neutriinojen kanssa räjäyttää tähden ulko-osat
- Kuumassa ja neutronirikkaassa ympäristössä muodostuu rautaa raskaampia alkuaineita neutronisieppausten kautta

# Ia-supernovat

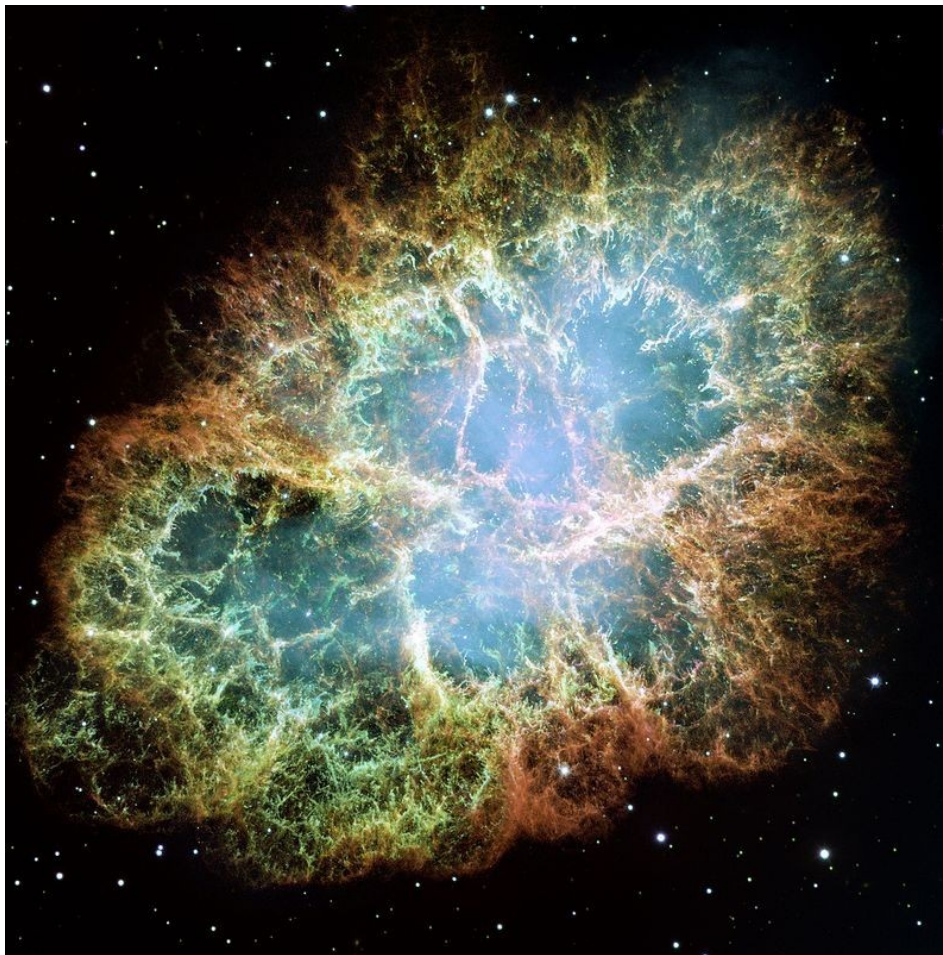
- Kun valkoisen kääpiön massa kasvaa yli Chandrasekharin massan ( $1.44 M_{\odot}$ ), gravitaatio ylittää degeneroituneen aineen paineen, ja kääpiö luhistuu
  - Nykykäsityksen mukaan tosin tätä rajaa ei saavuteta, vaan hiilen ja hapen fuusiot käynnistyvät juuri ennen sitä, mikä nostaa lämpötilaa, mikä taas tehostaa fuusiota rajatta => vapautuva energia räjäyttää valkoisen kääpiön sekunneissa
- Tunnetaan teoreettisesti hyvin – kaikki Ia supernovat suunnilleen yhtä kirkkaita (noin 5 miljardia  $L_{\odot}$ )
  - ”Kosmologiset standardikynttilät” – mutta kuinka standardi oikeasti?
- Valkoisen kääpiön massa kasvaa kun läheinen kaksoistähti paisuu jättiläiseksi ja materiaa alkaa virrata kaasukehän ulko-osista valkoisen kääpiön pinnalle
  - Toistuvissa novapurkauksissa vedyn fuusioreaktiot käynnistyvät vähäksi aikaa valkoisen kääpiön pinnalla
  - Nykytiedon perusteella tosin iso osa Ia supernovista syntyy kahden valkoisen kääpiön törmätessä – kaikki eivät olekaan niin samanlaisia



Kuva: NASA

# Historiallisia supernovia

- SN 1006
  - Todennäköisesti la, luultavasti kirkkain tunnettu tähtitaivaan tapahtuma (arvioitu magnitudi -7.5)
- SN 1054
  - Rapusumu, sisältä löydetty neutronitähti
- SN 1181
  - Todennäköisesti kahden valkoisen kääpiön törmäys, josta on muodostunut uusi (zombi)tähti
- SN 1572
  - la, Brahe teki tarkkoja havaintoja
- SN 1604
  - la, Kepler teki tarkkoja havaintoja
- Kassiopeia A
  - Supernovajäännös löydetty, arvioitu räjähtäneen 1600-luvun lopulla, mutta ei suoria havaintoja (peittyneet tähtienvälisen pölyn taakse), jäänteen sisällä myös todennäköinen neutronitähti
- SN 1987a
  - Suuressa Magellanin pilvessä, parhaiten tutkittu moderni supernova, räjähtänyt tähti löydetty arkistodatasta ennen räjähdystä, jäänteen sisällä todennäköisesti myös neutronitähti
- Nykyään supernovia löydetään muista galakseista käytännössä päivittäin



Rapusumu on tunnettu supernovajääne, jonka sisältä löytyy neutronitähti. Kuva: NASA

Maailmankaikkeus nyt 2026

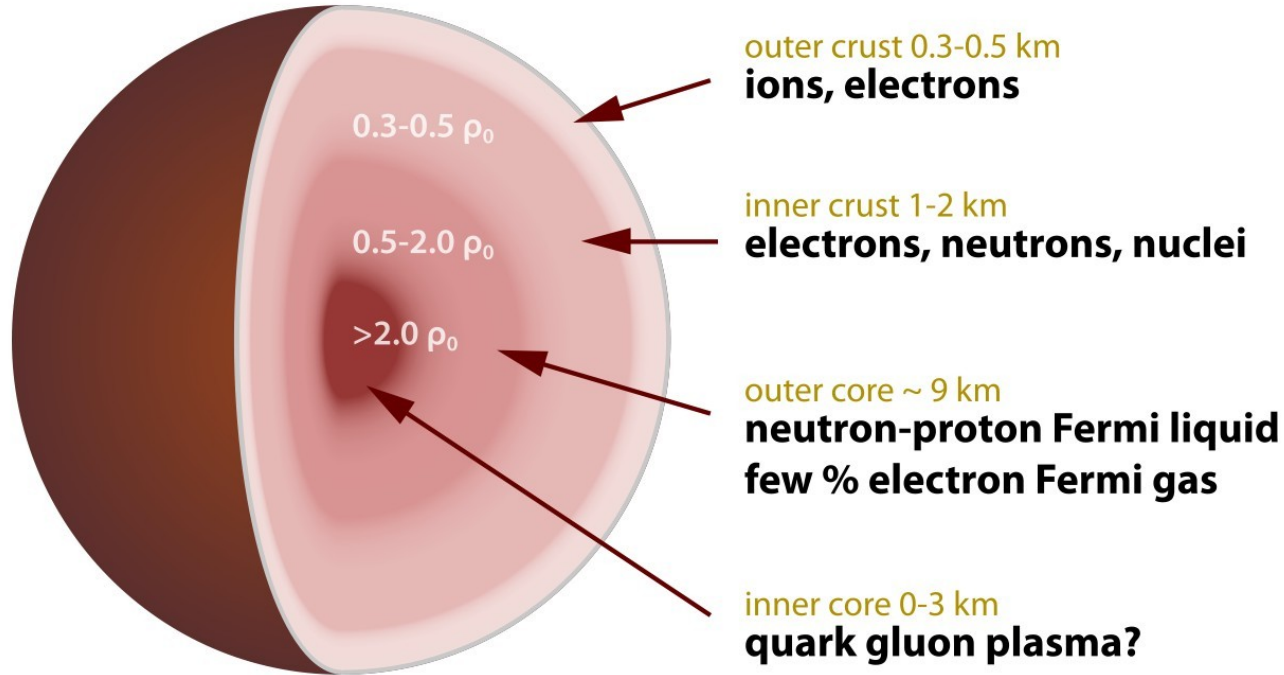
# Neutronitähdet

- Jos tähden alkuperäinen massa on noin  $10\text{-}25 M_{\odot}$ , jää tähden ytimestä lopulta jäljelle neutronitähti
- Lohistuvassa ytimessä elektronit ja protonit muodostavat neutroneita => neutronilla ei sähkövarausta, jolloin sähköinen voima ei vastusta gravitaatiota
- Neutronitähti lohistuu noin 10 km kokoiseksi
  - Teelusikallinen neutronitähteä painaisi noin 5 miljardia tonnia
- Paulin kieltosääntö pätee silti neutroneihin: neutronien degeneraatiopaine (vahva vuorovaikutus neutronien välillä) pitää neutronitähden kasassa
- Nuoren neutronitähden pintalämpötila jopa kymmeniä miljoonia asteita – jäähtyvät ajan myötä
- Ulko-osissa vielä ioneja ja elektroneja, syvemmällä sisällä yhä enemmän pelkkiä neutroneja
  - Ytimessä neutronitkin hajoavat kvarkki-gluoniplasmaksi?
- Vastaavanlainen massayläraja kuin valkoisilla kääpiöillä (Tolmanin-Oppenheimerin-Volkoffin raja), mutta huonommin tunnettu koska aineen käyttäytymistä äärimmäisissä energioissa ei tunneta tarkasti – noin  $2.1 M_{\odot}$



Rapusumun ydinalueet. Keskikohdan kahdesta kirkkaasta tähdestä oikeanpuoleinen on neutronitähti. Kuva: ESA/Hubble.

# Neutronitähden sisällä

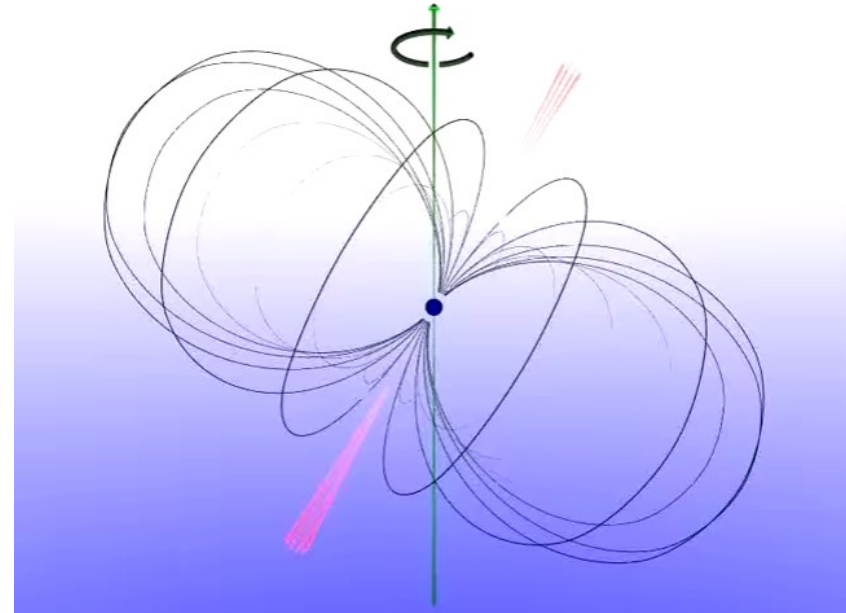


Kuva: Robert Schulze

Maailmankaikkeus nyt 2026

# Eri tyyppisiä neutronitähtiä

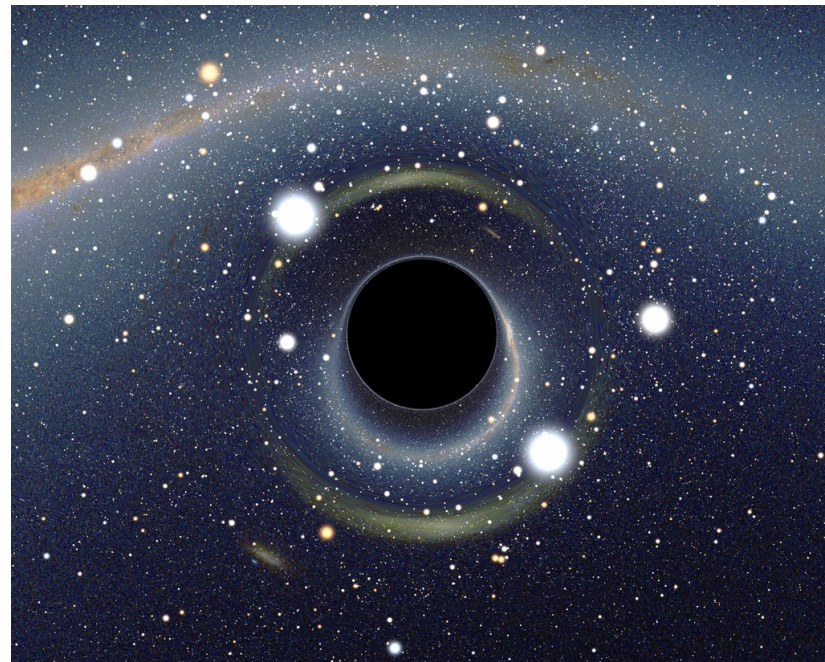
- Pulsarit
  - Pyörivät nopeasti ja tasaisesti, säteilevät tiiviissä pyörimisakselin ympäri magneettikentän mukana kieppuvassa keilassa – havaitaan tasaisena radiopulssina
  - Säteiltävä energia peräisin pyörimisestä, joka hidastuu ajan myötä
  - Ensimmäiset löydetyt neutronitähdet 1960-luvun lopulla
  - Nopein mitattu pyörii 716 kierrosta sekunnissa
- Magnetarit
  - Säteiltävä energia peräisin erityisen voimakkaasta magneettikentästä – voimakkaimmat koko maailmankaikkeudessa
- Röntgenkaksoistähdet – neutronitähti tai musta aukko, jonka kumppanista virtaa ainetta kompaktin tähden pinnalle
- Yksinäiset, vanhat, jäähtyneet ja hitaasti pyörivät neutronitähdet säteilevät hyvin vähän, joten niiden havaitseminen on vaikeaa
- Hypoteettisia mm.
  - Kvarkkitähdet
  - Oudot tähdet



Pulsari säteilee kapeissa kiiloissa magneettisilta navoiltaan, jotka ovat vinossa suhteessa pyörimisakseliin. Animaatio: Jm smits

# Mustat aukot

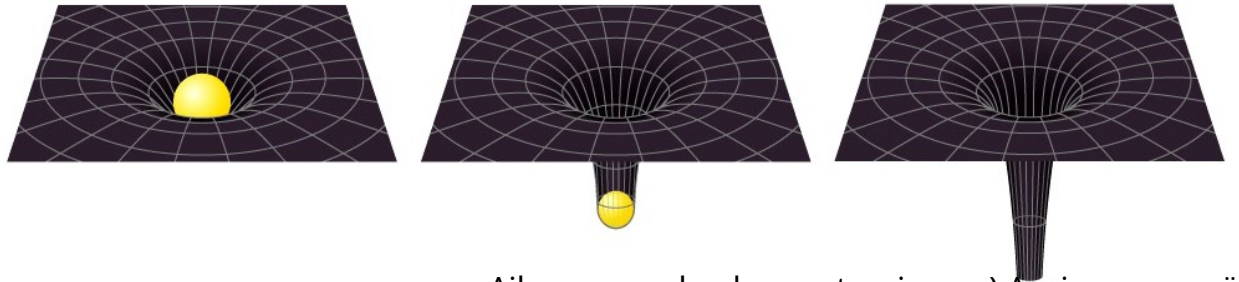
- Jos luhistuvan tähden ytimen massa ylittää noin  $2.1 M_{\odot}$ , ei mikään tunnettu voima estä täydellistä luhistumista
- Nykyteoria: kaikki mustan aukon massa luhistuu *singulariteetiksi*
  - Nykyfysiikka ei pysty käsittelemään singulariteettia, vaatisi teorian kvanttigravitaatiosta
  - Musta aukko on periaatteessa todella yksinkertainen kappale, sillä sillä ei ole minkäänlaista sisärakennetta – mustien aukkojen ainoat toisistaan eroavat ominaisuudet ovat:
    - Massa
    - Pyörimismäärä
    - (Sähkövaraus)
- Singulariteetin ympärillä *tapahtumahorisontti*: pakonopeus ylittää valonnopeuden, eikä mikään voi päästä ulos
- Tapahtumahorisontin koko (*Schwarzschildin säde*) riippuu massasta: pyörimättömälle mustalle aukolle
  - Maan massaiselle 9 mm
  - Auringon massaiselle 3 km
  - $4\,000\,000 M_{\odot}$  (Sagittarius A\*): 0.1 AU
  - $6\,500\,000\,000 M_{\odot}$  (M87\*): 120 AU



Kuva: Alain Riazuelo

# Pohjattoman syvä kuoppa aika-avaruudessa

- Yleisen suhteellisuusteorian mukaan gravitaatio on aika-avaruuden kaarevuutta
  - Myös aika hidastuu voimakkaassa kaarevuudessa
- Mustan aukon tapahtumahorisontin kohdalla aika-avaruuden kaarevuus käy äärettömän suureksi – kuin pohjaton kuoppa



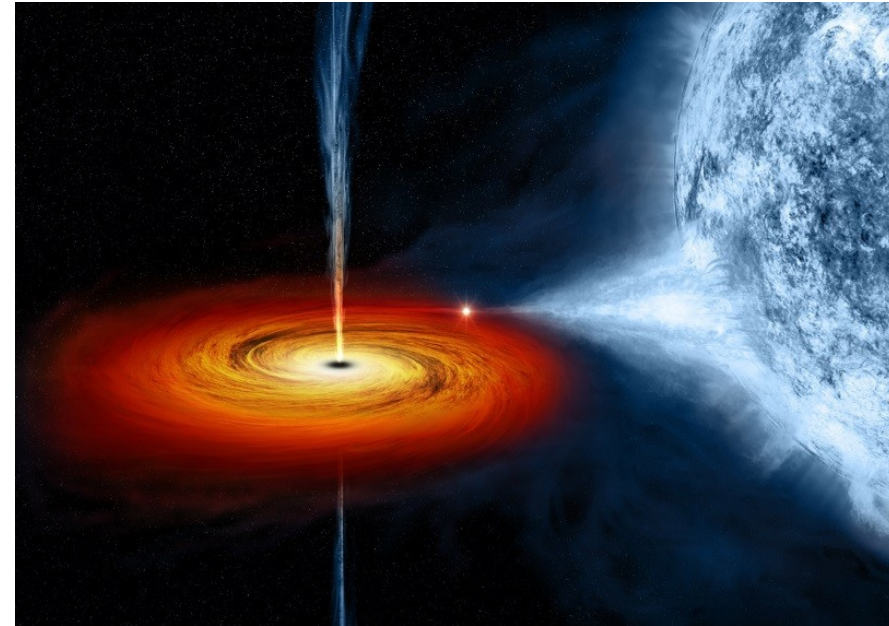
Maailmankaikkeus nyt 2026

Aika-avaruuden kaareutuminen a) Auringon ympärillä, b) jos Aurinko puristettaisiin neutronitähdeksi, c) jos Aurinko puristettaisiin mustaksi aukoksi.

Kuva Brian Woodahl <http://woodahl.physics.iupui.edu>

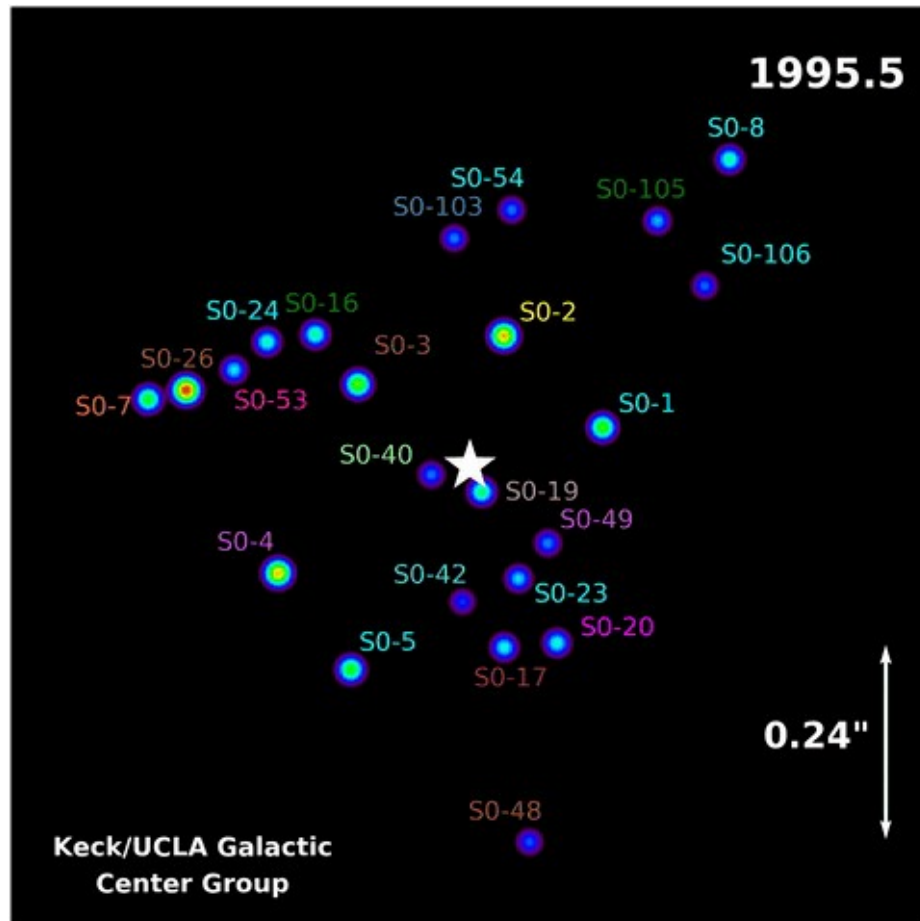
# Mustan aukon havaitseminen

- Mustan aukon tapahtumahorisontin takaa ei tule mitään säteilyä
  - Paitsi äärimmäisen heikkoa Hawkingin säteilyä: kvanttimekaniikasta seuraava ilmiö, missä tapahtumahorisontin kohdalle muodostuvasta hiukkasparista toinen saattaa päästä pakoon
- Eristetty musta aukko käytännössä mahdoton havaita
  - Mikrolinssi-ilmiön kautta mahdollista, jos musta aukko sattuu kulkemaan suoraan taustatähden edestä ja gravitaatiollaan vaikuttaa taustakohteen säteilyyn
- Epäsuorasti voidaan havaita
  - Kertymäkiekkoa aukon ympärillä
    - Säteilee usein voimakasta röntgensäteilyä
    - Event Horizon Telescope
  - Gravitaation vaikutusta läheisten kohteiden liikkeeseen
  - Gravitaatioaaltoja



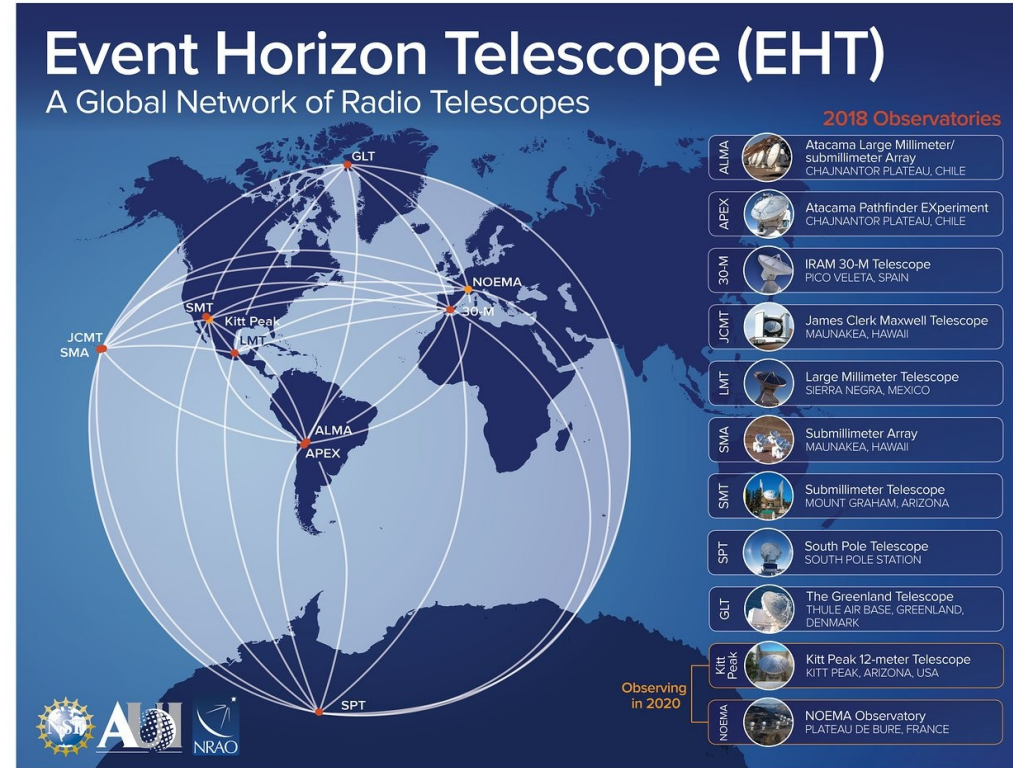
Taiteilijan näkemys Cygnus-X1 röntgenkaksoistähdessä.  
Nasa/CXC/M.Weiss.

# Sagittarius A\*



# Event Horizon Telescope

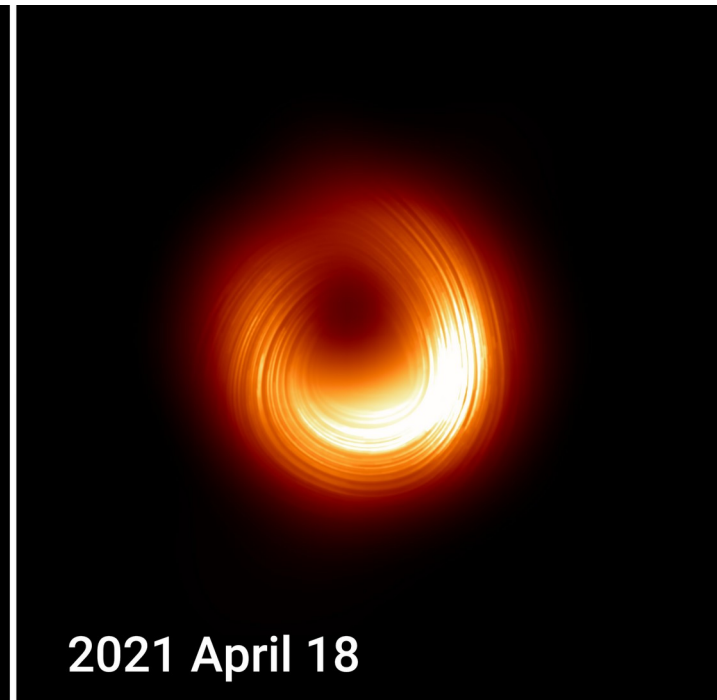
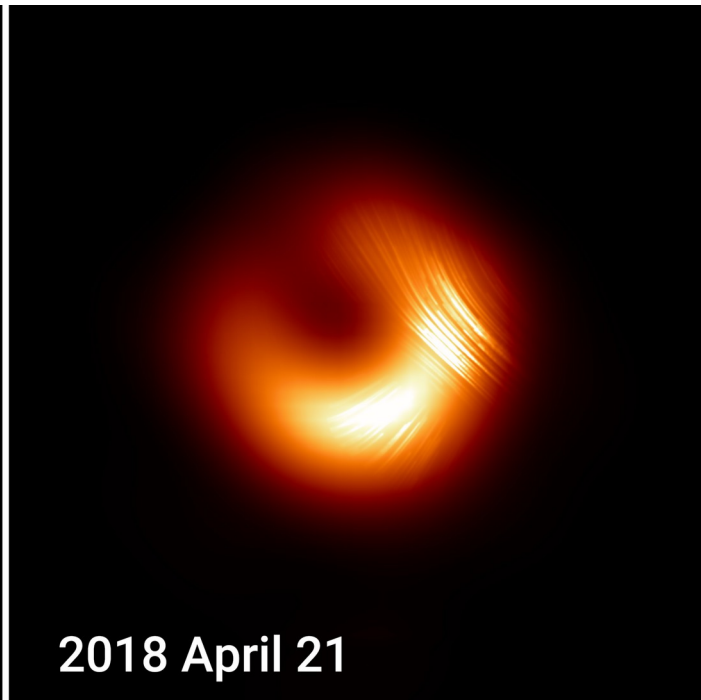
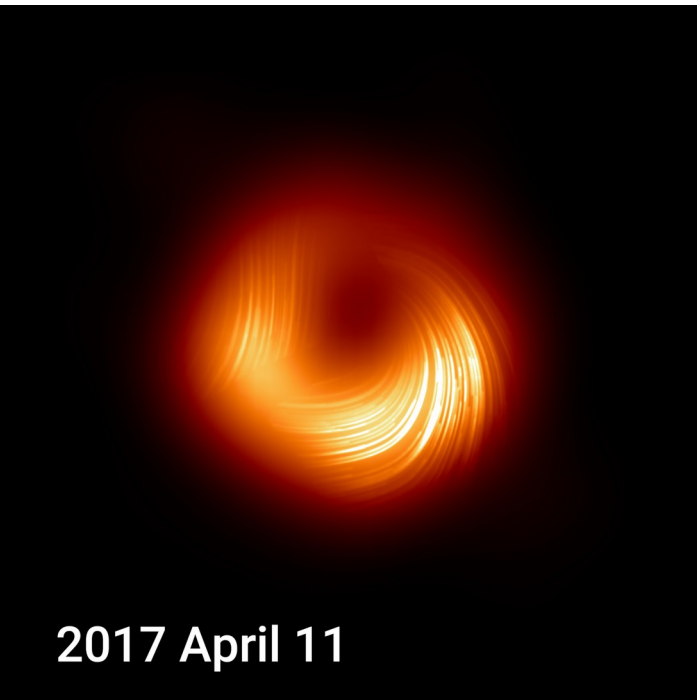
- Maailmanlaajuinen radioteleskooppien verkosto, jota voidaan käyttää maapallon kokoisena interferometrina
- Saavutetaan riittävä erotuskyky kahden taivaalla kulmaläpimitaltaan suurimman mustan aukon suoraan havaitsemiseen
  - Erotuskyky vastaa kolikon erottamista Kuun pinnalta
- Kuva M87-galaksin supermassiivisesta mustasta aukosta julkaistiin 2019, Linnunradan vastaavasta 2022
  - Kuvat kertymäkiekkojen polarisaatiosta julkaistiin 2021 & 2024, kertovat mm. kiekon magneettikentästä



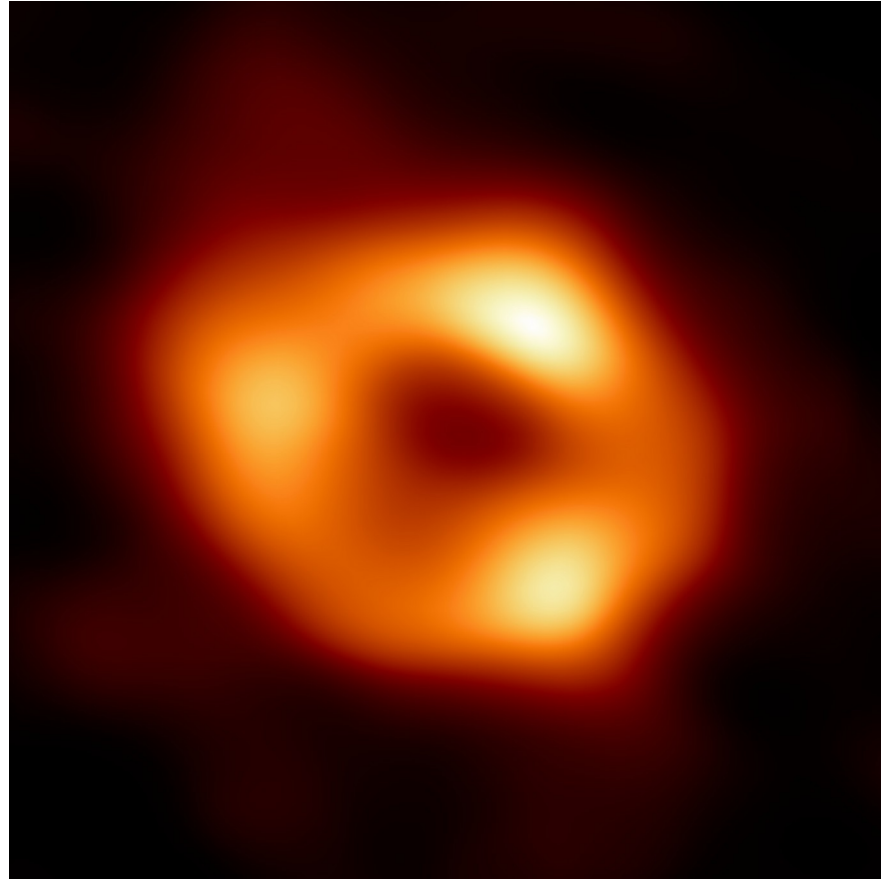
M87\*



# M87\* polarisaatio



# Sagittarius A\*



# Sagittarius A\* polarisaatio

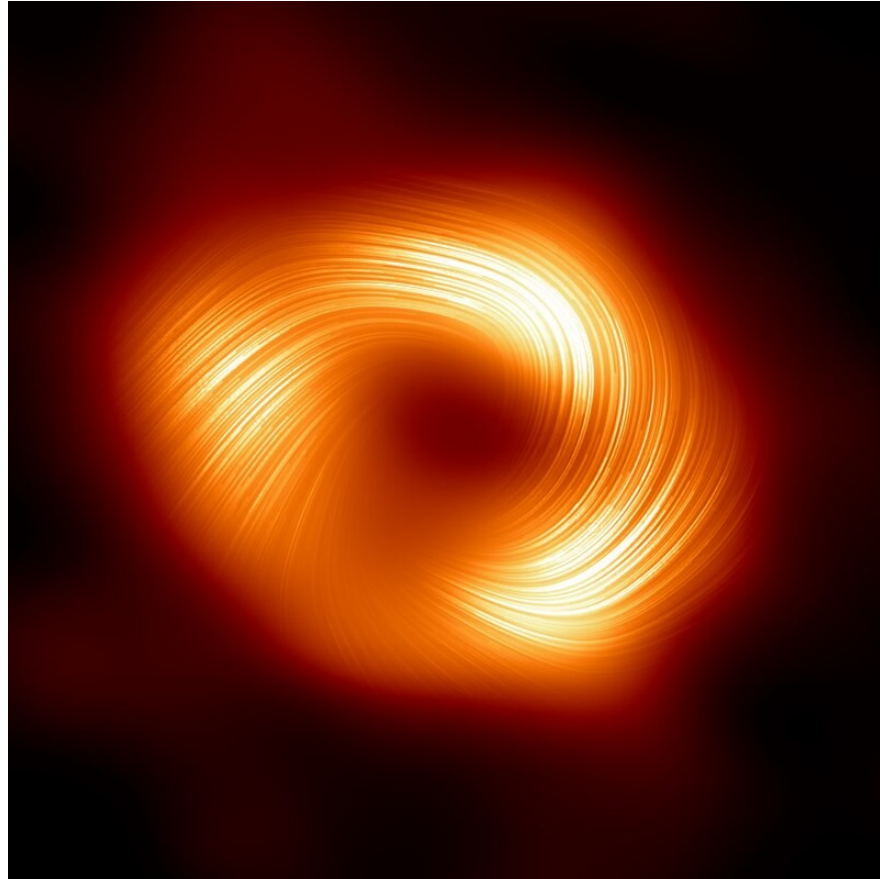
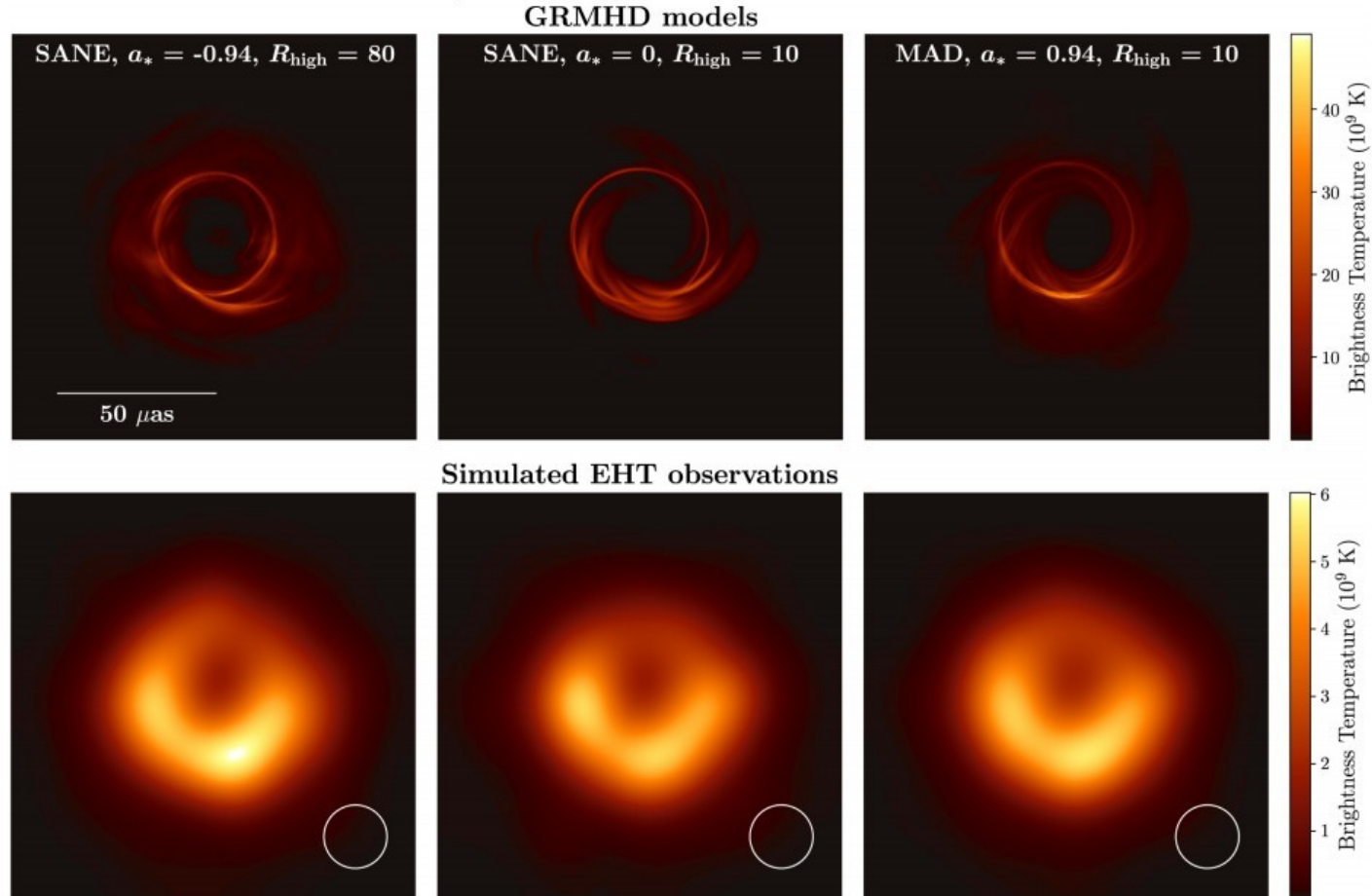
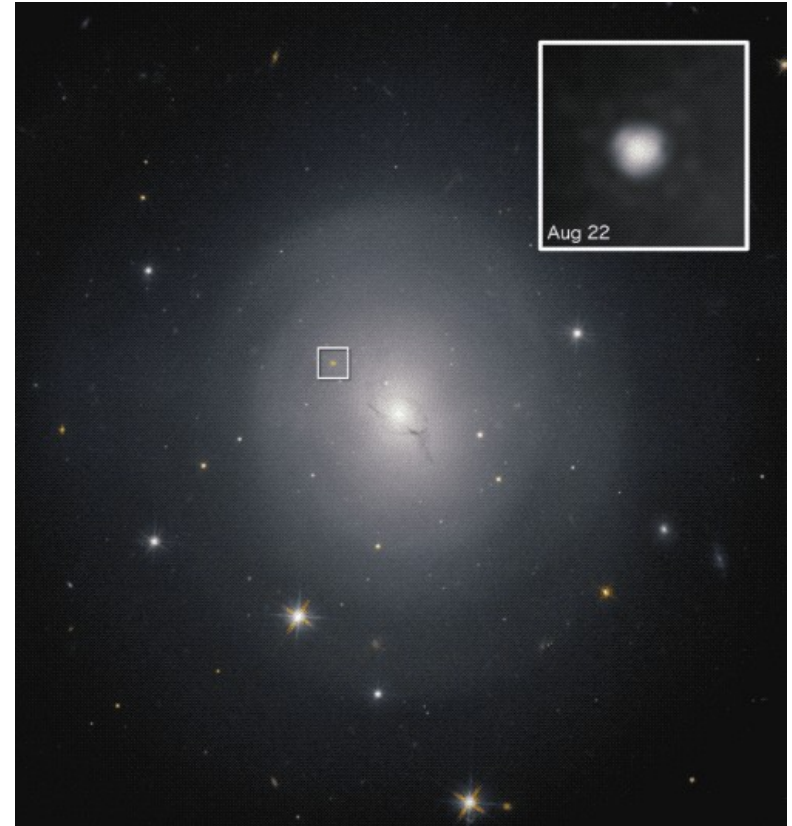


Figure 4. from First M87 Event Horizon Telescope Results. I. The Shadow of the Supermassive Black Hole  
null 2019 APJL 875 L1 doi:10.3847/2041-8213/ab0ec7  
<http://dx.doi.org/10.3847/2041-8213/ab0ec7>  
© 2019. The American Astronomical Society.



# Gravitaatioaaltohavainnot

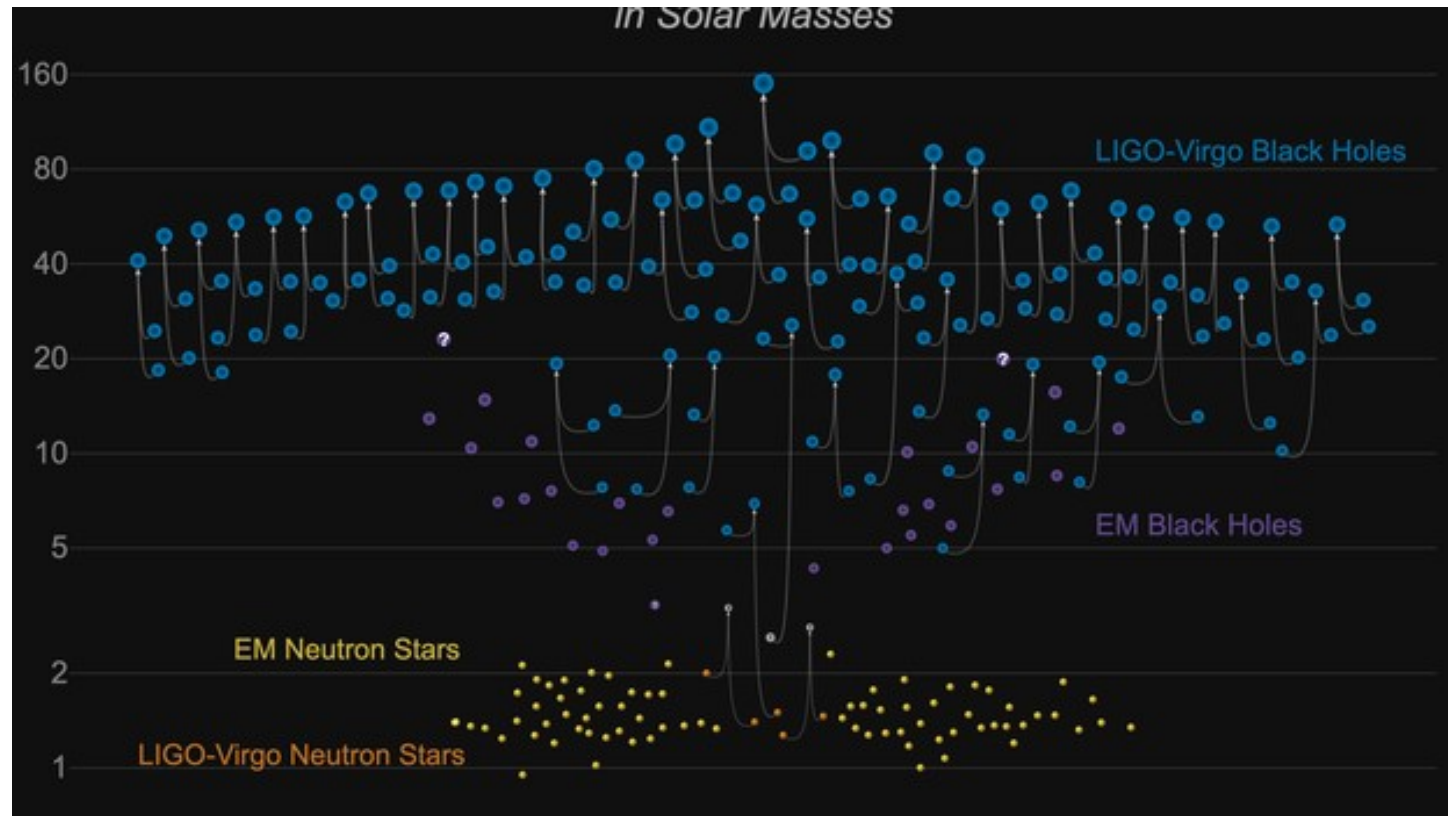
- 2016 julkaistiin ensimmäiset gravitaatioaaltohavainnot (havainto jo 2015)
  - Nyt jo yli 100 vahvistettua havaintoa, sekä paljon epävarmoja
  - Suurin osa mustien aukkojen yhteensulautumisia, mutta myös joitain neutronitähtiä/rajatapauksia
- GW 170817: ensimmäistä kertaa yhdistetty myös sähkömagneettisen säteilyn kautta havaittuun gammapurkaukseen sekä kilonovaan (neutronitähtien törmäystä seuraava lyhyt gammasäteilyn välähdys sekä sen optinen jälkihehku)
  - Neutronitähtien törmäyksessä syntyy myös suuria määriä kaikista raskaimpia alkuaineita
- Nykyisillä laitteilla havaitaan vain tähdenmassaisten mustien aukkojen törmäyksiä
  - Tulevaisuudessa luultavasti myös supermassiivisten mustien aukkojen törmäyksiä (LISA)
  - 2023 raportoitu epäsuora havainto (millisekuntipulsarien ajoituksen kautta) gravitaatioaaltoaustasta, joka olisi mahdollisesti peräisin supermassiivisten mustien aukkojen törmäyksistä



Maailmankaikkeus nyt 2026

GW 170817 pystyttiin yhdistämään galaksissa NGC 4993 havaittuun gammapurkaukseen GRB 170817A. Kuva NASA/ESA.

# Tunnettujen mustien aukkojen ja neutronitähtien koko



LIGO-Virgo/ Northwestern U. / Frank Elavsky & Aaron Geller  
Maailmankaikkeus nyt 2026

# Eri massaisia mustia aukkoja

- Tähtenmassaiset
  - Muutamista Auringon massoista noin sataan
  - Syntyvät supernovaräjähdyksen kautta
- Supermassiiviset
  - (Suurten) galaksien ytimissä
  - Sadoista tuhansista Auringon massoista ylös jopa kymmeneen miljardiin
  - Syntyntapa epävarma, mutta olleet olemassa jo hyvin varhaisessa maailmankaikkeudessa
- Keskisuuret?
  - Tähtenmassaisten ja supermassiivisten välissä
  - Mahdollisesti pienten galaksien ytimissä tai massiivisissa pallomaisissa tähtijoukoissa – kandidaatteja löydetty, mutta ei täyttä varmuutta
  - Joidenkin gravitaatioaaltoilla havaittujen mustien aukkojen massa selvästi yli  $100 M_{\odot}$ , mutta nämä pikemminkin poikkeuksellisen suuria tähtenmassaisia aukkoja kuin varsinaisesti oma luokkansa
  - Välivaihe supermassiivisten muodostumisessa?
- Mikroskooppisen pienet?
  - Syntyneet alkuräjähdyksen yhteydessä? Olemassaolo epävarmaa
  - Marraskuussa 2025 gravitaatioaaltohavainto mustasta aukosta jonka massa todennäköisesti pienempi kuin Auringon
- Periaatteessa minkä massaisia vain, mutta vaaditaan jokin mekanismi millä ainetta saadaan riittävän tiheäksi

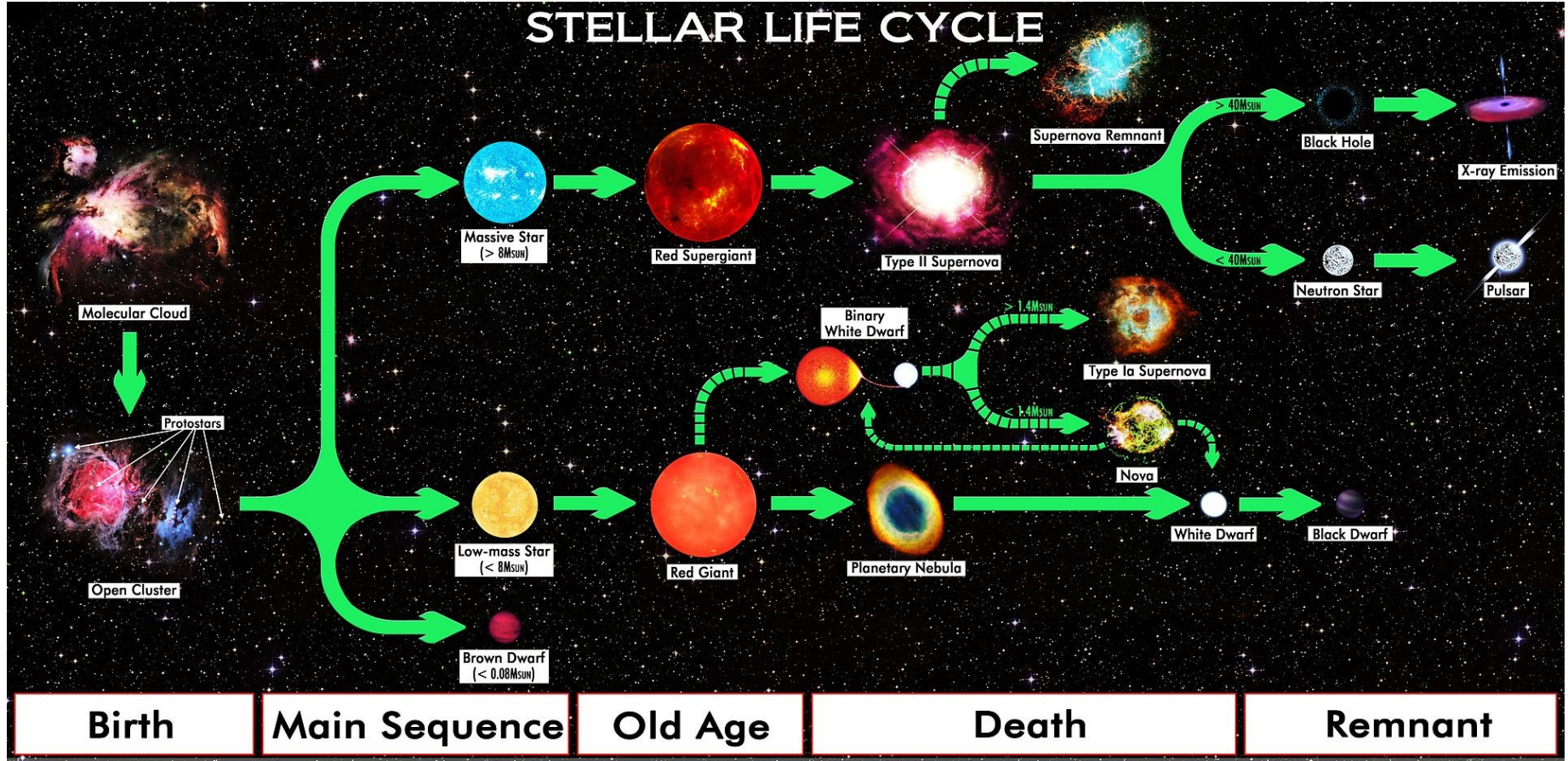
# Matka mustaan aukkoon

- Kuvitellaan rohkea avaruusmatkailija hyppäämään mustaan aukkoon – mitä hän kokisi?
  - Mahdollisesta kertymäkiekosta voimakasta säteilyä
  - Vuorovesivoimat venyttäisivät
  - Pyörivän mustan aukon ympärillä *ergosfääri*: paluu vielä mahdollista, mutta mustan aukon pyöriminen vetää aika-avaruutta mukanaan niin voimakkaasti, ettei mikään voi pysytellä paikallaan (ulkopuolisen tarkkailijan näkökulmasta)
  - Tapahtumahorisontin ylitettyä ei paluuta
  - Ulkopuolelta tilannetta seuraavan tarkkailijan mielestä sisään putoavan aika hidastuu loputtomiin, eikä hän näytä koskaan ylittävän tapahtumahorisonttia: sisään putoava sen sijaan kokee putoavansa normaalisti läpi (jos vielä hengissä)

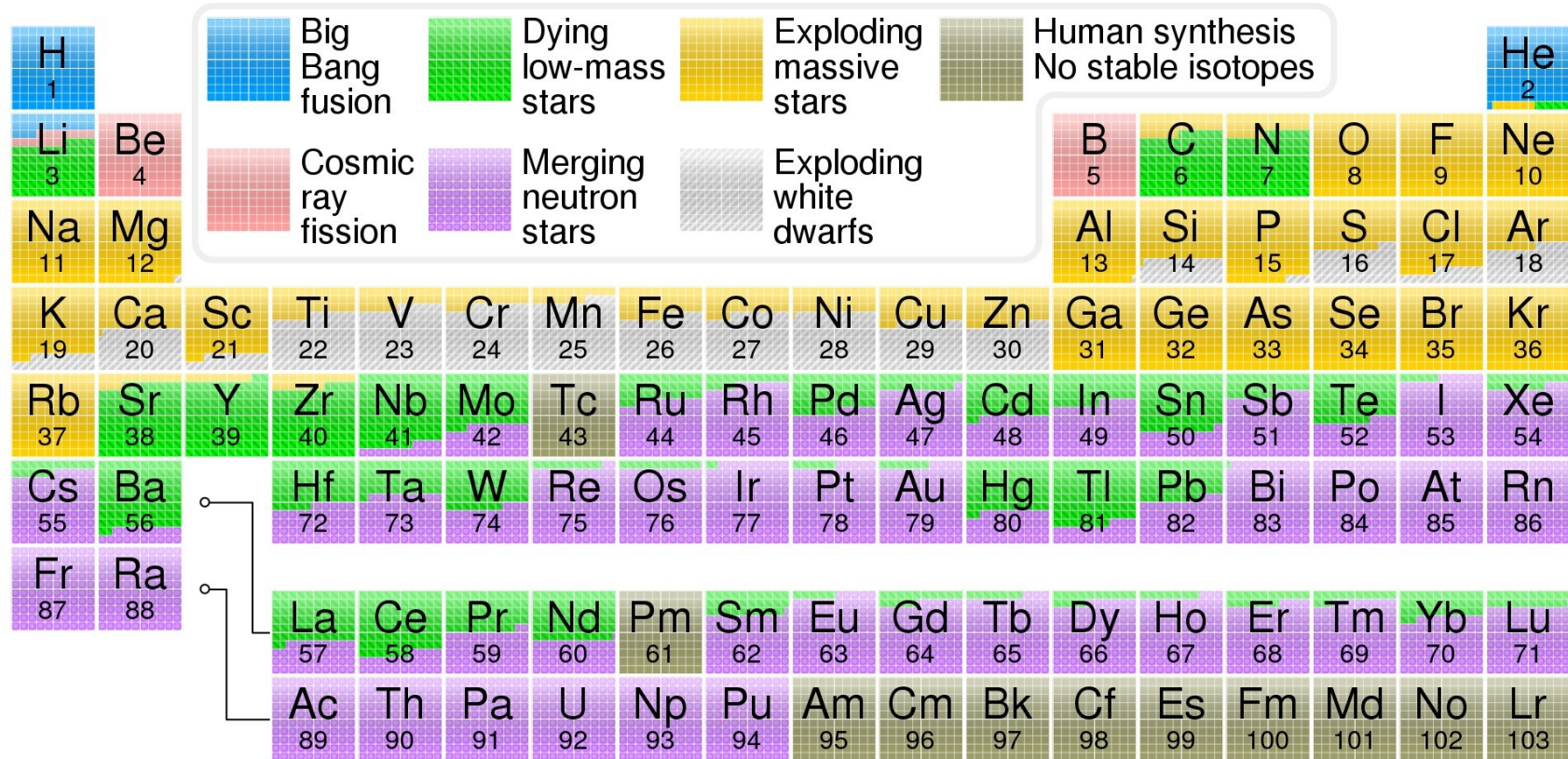


<https://www.astro.utu.fi/zubi/star/xbhole.htm>

# STELLAR LIFE CYCLE



# Alkuaineiden alkuperä



Maailmankaikkeus nyt 2026

Kuva: Cmglee, [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Nucleosynthesis\\_periodic\\_table.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Nucleosynthesis_periodic_table.svg)