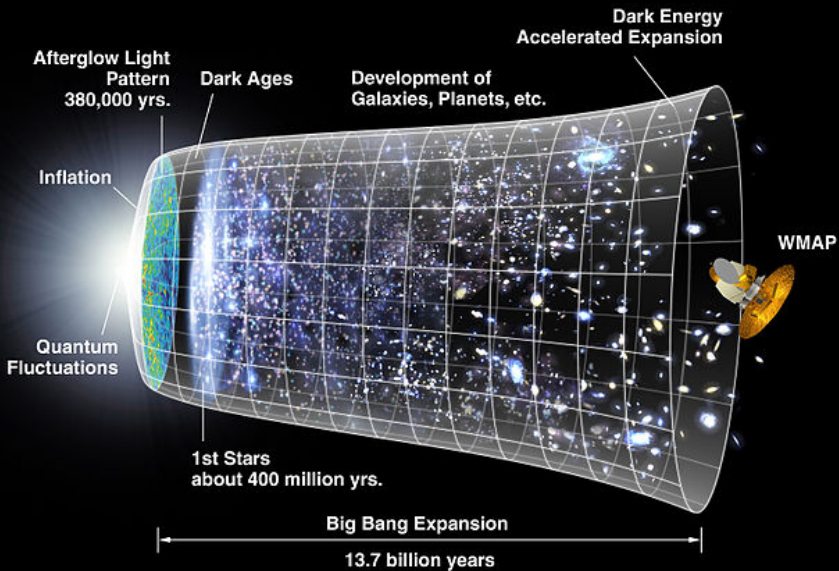


FY7 Kosmologia ja alkuaineiden synty

Tapio Hansson



Alkuräjähdyks n. 13,8 mrd vuotta sitten

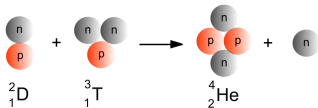
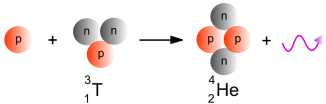
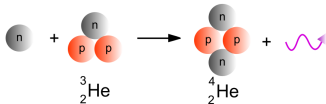
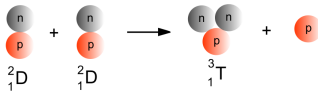
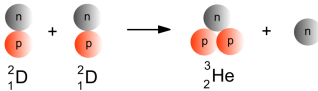
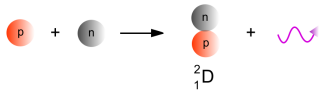
- ▶ Alussa kaikkeus oli pistemäinen
- ▶ Räjähdyksen omainen laajeneminen
- ▶ Alkuolosuhteet ovat hankalia selittää
- ▶ Inflaatioteorian mukaan maailmankaikkeus laajeni ylivalonnopeudella ensimmäisten sekunnin murto-osien aikana (luokkaa 10^{-36} s).
- ▶ Inflaatioteoria antaa selityksen sille, miksi maailmankaikkeus näyttää isossa mittakaavassa hyvin tasaiselta.
- ▶ Inflaatioteoria on malli, jonka avulla havaintoja voidaan kuvata tarkasti.

Alkuräjähdyksen jälkeen

- ▶ Ensimmäisen sekunnin aikana lämpötila oli niin korkea, että kaikki energia oli säteilyä.
- ▶ Rajun laajenemisen johdosta lämpötila laski nopeasti → säteilystä syntyi hiukkasia.
- ▶ Noin sekunnin ikäinen maailmankaikkeus sisälsi jo kaikki alkeishiukkasensa.
- ▶ Minuutin kohdalla alkaa vety- ja heliumydinten muodostuminen.
- ▶ Kestää kuitenkin lähes 400 000 vuotta, ennen kuin lämpötila laskee n. 2700 asteeseen ja vety- ja heliumatomeja voi syntyä.

Ydinsynteesi

- ▶ Ytimien synty ei ole täysin suoraviivaista. Ensimmäisessä ydinsynteesissä vety fuusioituu muodostaen heliumia.
- ▶ Prosessissa kuitenkin muodostuu välissä deuteronia, ja tritiumia, joiden fuusio muodostaa heliumin ja ylimääräisen neutronin.
- ▶ Ydinsynteesin jälkeen aineesta n. 25% oli heliumia ja loput vetyä.
- ▶ Maailmankaikkeus koostui aluksi vain vedystä ja heliumista, eikä raskaampia ytimiä syntynyt ennen tähtiä.
- ▶ Tähdet toimivat alkuainetehtaina ja ensimmäiset syttyivät n. 500 miljoonaa vuotta alkuräjähdyksen jälkeen.



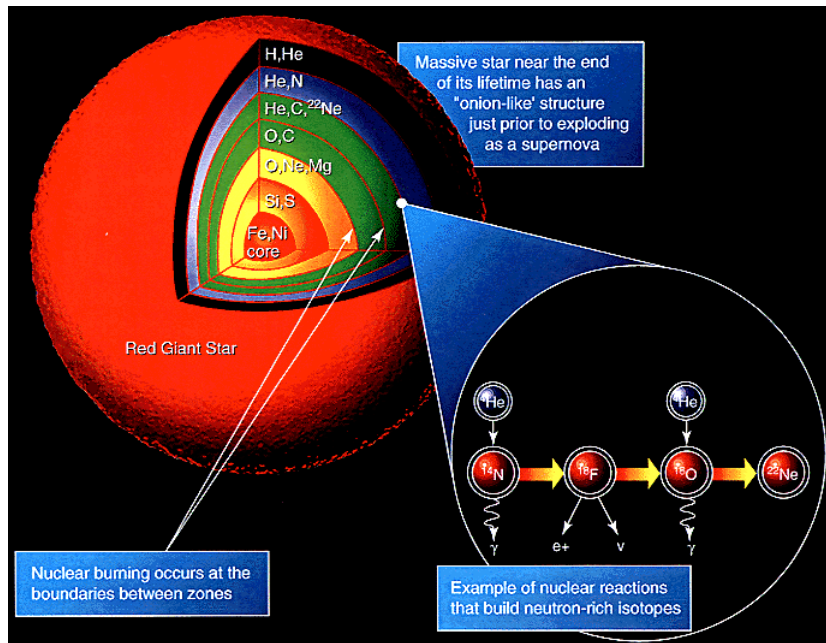
Kevyet tähdet

- ▶ Keveissä tähdissä (n. Auringon massainen) raskain muodostuva alkuaine on hiili.
- ▶ Heliumia muodostuu kahdessa reaktiosarjassa:
protoni-protoni-ketjussa ja *hiilisyklissä*.
- ▶ Protoni-protoni-ketju
 1. ${}^1_1\text{H} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^2_1\text{H} + e^+ + \nu$
 2. ${}^1_1\text{H} + {}^2_1\text{H} \rightarrow {}^3_2\text{He}$
 3. ${}^3_2\text{He} + {}^3_2\text{He} \rightarrow {}^4_2\text{He} + 2{}^1_1\text{H}$ (myös muita mahdollisia reaktioita)
- ▶ Kun hiiltä on muodostunut tähteen, voi hiili katalysoida vedyn fuusion välireaktiolla ${}^{15}_7\text{N} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^{12}_6\text{C} + {}^4_2\text{He}$
- ▶ Itse hiiltä syntyy kolmois-alfa-prosessissa
 1. ${}^4_2\text{He} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^8_4\text{Be}$
 2. ${}^8_4\text{Be} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{12}_6\text{C}$

Raskaat tähdet

- ▶ Raskaissa tähdissä käynnistyy vedyn loputtua raskaampien alkuaineiden tuotto.
- ▶ Säteilypaine vähenee, minkä vuoksi gravitaatio rusentaa tähteä kasaan ja olosuhteet lämpenevät entisestään.
- ▶ Fuusioitumiset jatkuvat kunnes tähden ydin on muodostunut vain raudasta ja nikkelistä.
- ▶ Tällöin tähden on muodostunut sipulimainen kerrosrakenne, jossa eri kerroksissa muodostuu eri alkuaineita.
- ▶ Säteilypaine lakkaa ja tähti räjähtää supernovana.
- ▶ Tällöin muodostuneet alkuaineet leviävät avaruuteen ja jäljelle jää joko neutronitähti tai musta-aukko.

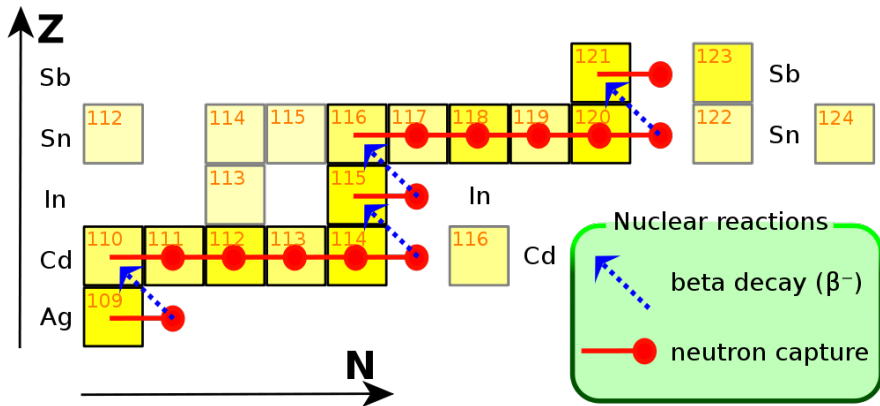
Sipulirakenne



Rautaa raskaammat alkuaineet

- ▶ Rautaa raskaampia alkuaineita ei synny tähden sisällä, sillä raskaiden alkuaineiden fuusioituminen vaatii energiaa, eikä luovuta sitä.
- ▶ Raskaita alkuaineita syntyy supernovissa *neutronisieppauksen* myötä, missä ydin sieppaa vapaan neutronin.
- ▶ Supernovassa syntyy runsaasti vapaita neutroneja, ja tämän myötä myös paljon neutronisieppausta.
- ▶ Vaikka neutronien sieppaaminen ei kasvata järjestyslukua, voi raskaampia aineita muodostua β -hajoamisen kautta.
- ▶ Nykykäsityksen mukaan kaikkein raskaimpia aineita kuten kultaa, platinaa ja uraania syntyy neutronitähtien törmäyksissä.
- ▶ Transuraaneja tuotetaan hiukkaskiihdyttimillä.

Neutronisieppaus



kuva: CC BY-SA 3.0, Wikimedia Commons

Kaikkeuden laajeneminen

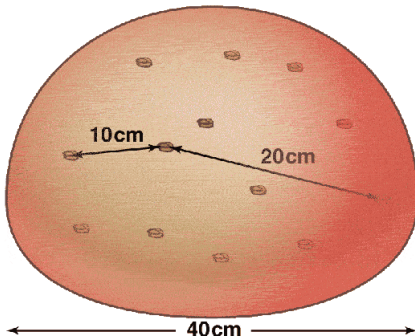
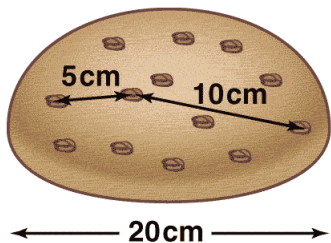
- ▶ Universumin laajeneminen on hankala käsittää, ja siihen liittyy hyvin paljon virheellisiä käsityksiä niin amatöörien kuin ammattifysikoiden keskuudessa.
- ▶ Gravitaatio vetää ainetta puoleensa, mutta silti maailmankaikkeuden havaitaan laajenevan.
- ▶ Selityksenä pidetään pimeää energiaa.
- ▶ Laajenemisen seurauksena aineen tiheys pienenee.
- ▶ Pimeän energian tiheys pysyy kuitenkin vakiona.
- ▶ Huom! Pimeä aine $\neq$ pimeä energia (Gravitaatio vaikuttaa aineeseen, mutta pimeällä energialla on gravitaatioita kumoava ominaisuus.)
- ▶ Laajenemisnopeus riippuu etäisyydestä

$$v \approx H_0 \cdot d = 22 \frac{\text{km/s}}{\text{Mly}} \cdot d$$

Kaikkeuden laajeneminen

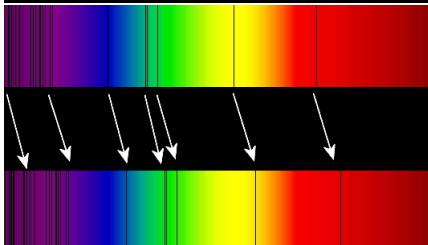
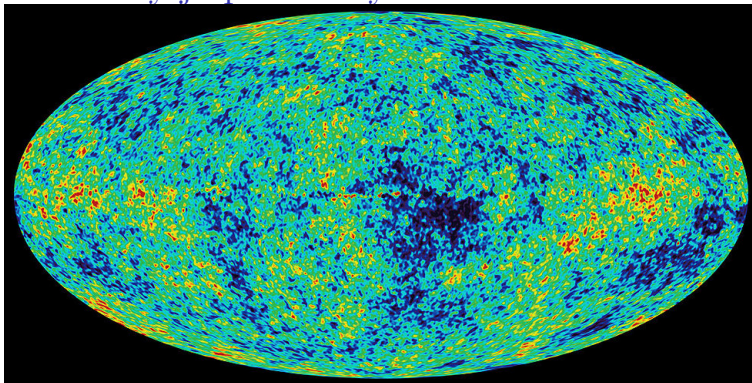
- ▶ Maailmankaikkeuden laajenemisen vuoksi kaukaiset galaksit näyttävät etääntyvän.
- ▶ Tämä havaitaan niiden lähettämän valon punasiirtymänä.
- ▶ Punasiirtymä on Dopplerin ilmiöstä johtuva valon aallonpituuden venyminen lähettävän kappaleen etääntyessä.
- ▶ Laajeneminen vaikuttaa nykyisin olevan kiihtyvää.
- ▶ Jossain vaiheessa saavutetaan tilanne, jolloin maailmankaikkeus voi laajeta ylivalonnopeudella, mikä tarkoittaa sitä, että kaukaisesta galaksista lähtevä valo ei koskaan saavuta meidän galaksiamme, koska väliin tulee liian nopeasti lisää avaruutta.
- ▶ Laajeneminen havaitaan esimerkiksi tähtien valon *punasiirtymänä*.

Rusinapullamalli (Vain havainnollistus, ei kunnollinen malli)



Rusinat vastaavat gravitaation kasassa pitämiä alueita (galakseja), joiden väliset etäisyydet kasvavat.

Taustasäteily ja punasiirtymä



ylempi kuva: public domain,

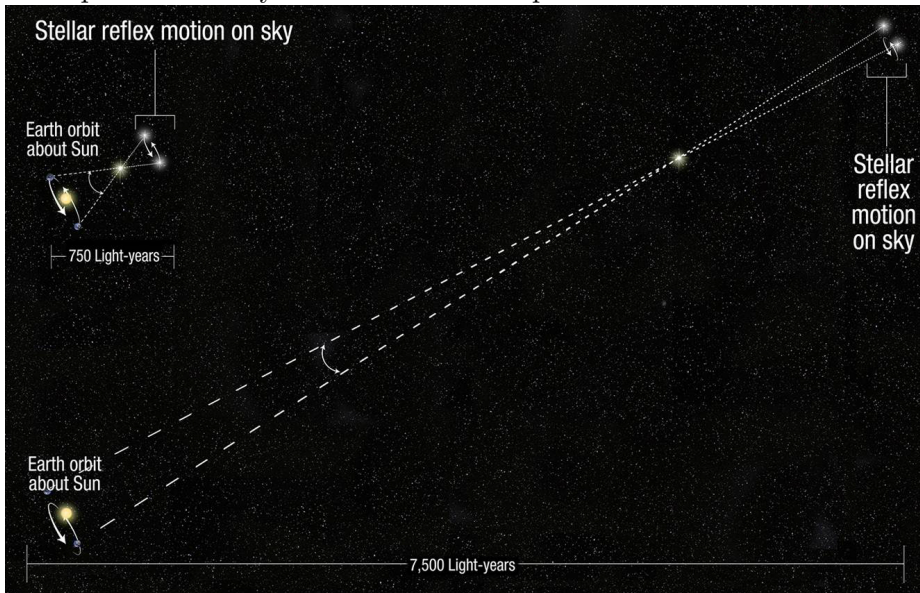
alempi kuva: Bv Georg Wiora (Dr. Schorsch), CC BY-SA 3.0, Wikimedia Commons

Kokoluokkia

- ▶ Maailmankaikkeudessa etäisyydetä vaihtelevat valtavista järjettömiin.
- ▶ Lähiavaruutta mitataan astronomisissa yksiköissä, joka on Maan keskietäisyys Auringosta.
- ▶ $1 \text{ AU} = 149\,597\,871\,000 \text{ km}$
- ▶ Pidempiä matkoja mitataan esim. valovuosissa
- ▶ $1 \text{ ly} = 9\,460\,730\,472\,580\,800 \text{ km}$
- ▶ tai vielä pidempiä parseceissa
- ▶ $1 \text{ pc} = 3,0857 \cdot 10^{16} \text{ m}$
- ▶ Linnunradan halkaisija on n. 200 kly.
- ▶ Nykyhetkellä havaittavan maailmankaikkeuden halkaisija on n. 93 miljardia valovuotta.

Parallaksi

1 parsec vastaa yhden kaarisekunnin parallaksikulmaa.



kuva: NASA/ESA, public domain

Pimeä aine ja energia

- ▶ Tunnetusta maailmankaikkeudesta n. 26 % on pimeää ainetta.
- ▶ Mittaustulosten perusteella havaitaan että tähtien liike galaksissa vaatii suuren määrän massaa, jota ei kyetä havaitsemaan suoraan.
- ▶ Pimeä energia muodostaa noin 69 % maailmankaikkeudesta.
- ▶ Se aiheuttaa jollain tuntemattomalla mekanismilla maailmankaikkeuden laajenemisen.
- ▶ Pimeän energian luonteesta ei ole kovin hyvää tietoa tai käsitystä, mutta monenlaisia malleja on tarjottu ratkaisuksi.
- ▶ Näkyvää ainetta, jonka luonteen ymmärrämme on siis vain n. 5 % maailmankaikkeudesta.