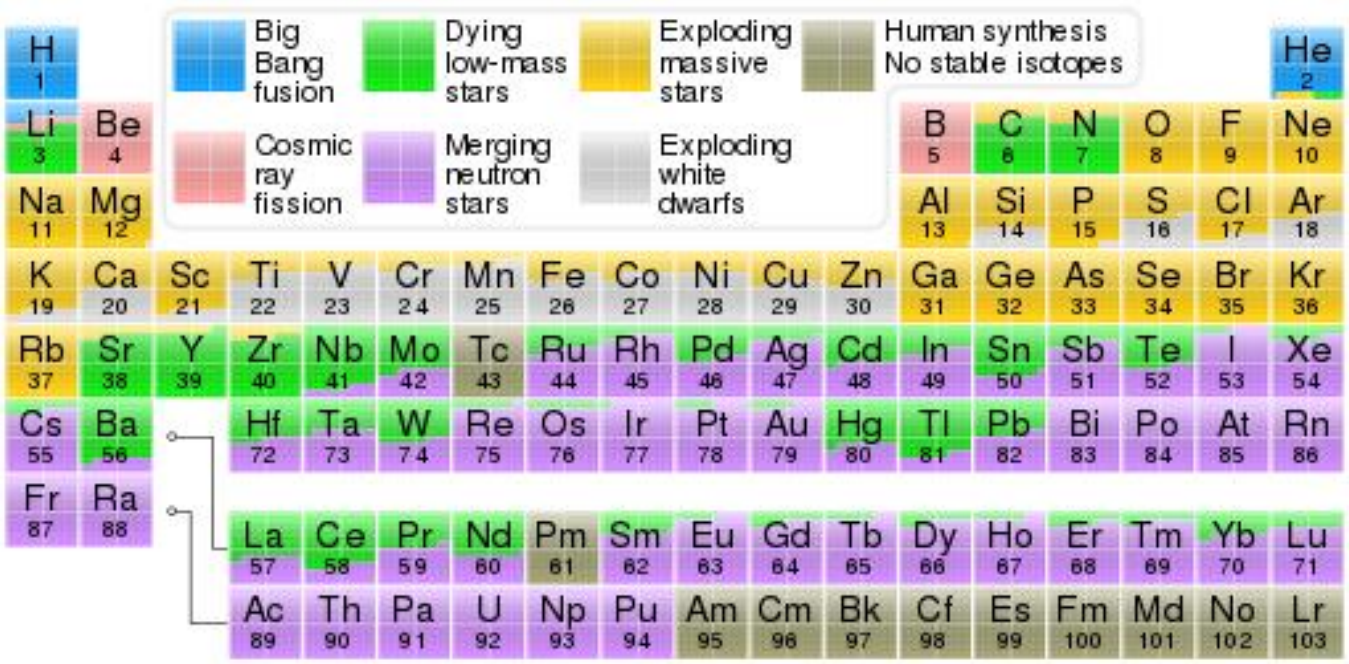
Alkuaineiden alkuperä

- Luonnossa esiintyy 94 eri alkuainetta vedystä plutoniumiin.
- Lisäksi raskaampia ja hyvin lyhytikäisiä muita alkuaineita on kyetty valmistamaan keinotekoisesti.
- Noin minuutin kuluttua alkuräjähdyksestä maailmankaikkeuden lämpötila oli laskenut riittävästi, jotta protonit ja neutronit saattoivat muodostaa keveimpien alkuaineiden ytimiä.
- Tätä protonien ja neutronien liittymistä yhteen kutsutaan *ydinsynteesiksi*.
- Varhaisessa maailmankaikkeudessa syntyneestä aineesta n. 75 % oli vetyä, n. 25 % heliumia. Tämän lisäksi syntyi hyvin pieniä määriä litiumia, mutta ei käytännössä ollenkaan sitä raskaampia alkuaineita.
- Kevyiden alkuaineiden (ja niiden isotooppien) havaitut suhteen noudattavat hyvin alkuräjähdysteorian mukaista ennustetta. Tämä on yksi tärkeä todiste alkuräjähdyksen puolesta.

- Käytännössä kaikki raskaammat alkuaineet ovat syntyneet tähdissä.
- Kevyet tähdet fuusioivat alkuaineita hiileen asti.
- Raskaammat alkuaineet ovat syntyneet joko tähtien supernovaräjähdyksissä tai neutronitähtien törmäyksissä
  - Tyypin Ia supernova: Valkoinen kääpiö kerää kaksoistähdeltään massaa ja räjähtää
  - Tyypin II supernova: Massiivinen (yli 10 Auringon massaa) tähti räjähtää.



Alkuräjähdyksen ydinsynteesi

- Vakaita heliumytimiä ${}^{4}_{2}He$ syntyi seuraavien ydinreaktioiden kautta:

$$ {}^{1}_{0}n + {}^{1}_{1}p \longrightarrow {}^{2}_{1}H + \gamma $$

$$ {}^{2}_{1}H + {}^{2}_{1}H \longrightarrow {}^{3}_{1}H + {}^{1}_{1}p $$

$$ {}^{3}_{1}H + {}^{2}_{1}H \longrightarrow {}^{4}_{2}He + {}^{1}_{0}n $$

$$ {}^{1}_{1}p + {}^{2}_{1}H \longrightarrow {}^{3}_{2}He + \gamma $$

$$ {}^{2}_{1}H + {}^{2}_{1}H \longrightarrow {}^{3}_{2}He + {}^{1}_{0}n $$

$$ {}^{3}_{2}He + {}^{2}_{1}H \longrightarrow {}^{4}_{2}He + {}^{1}_{1}p $$

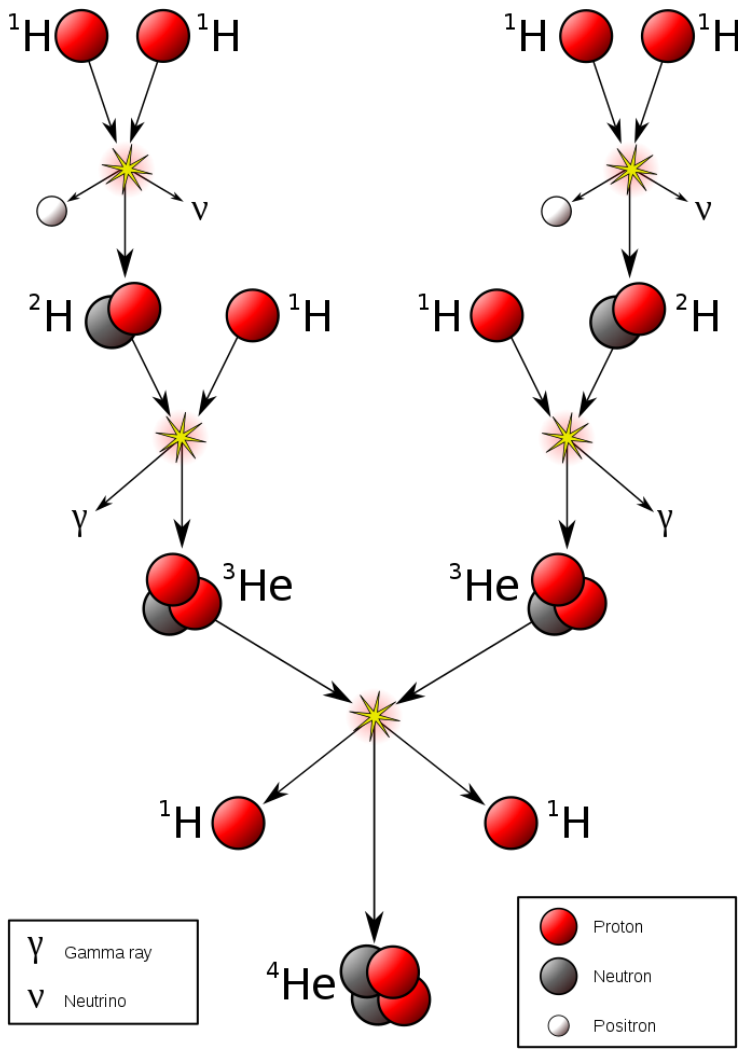
- Osa neutroneista oli ehtinyt hajota beeta-hajoamisella: ${}^{1}_{0}n \longrightarrow {}^{1}_{1}p + {}^{0}_{-1}e + \bar{\nu}$
- Neutroneja oli siis jäljellä vähemmän kuin protoneja.
- Ne protonit, jotka eivät sitoutuneet heliumytimiin, toimivat vetyatomien ytiminä.

Auringon fuusioreaktio

- Helium-isotooppia ${}^{4}_{2}He$ syntyy Auringon fuusioreaktioissa useimmin ns. protoni-protoni ketjureaktion (pp-ketju) kautta:
- Pp I-ketju:

$$ {}^{1}_{1}p + {}^{1}_{1}p \longrightarrow {}^{2}_{1}H + {}^{0}_{1}e + \nu $$

$$ {}^{2}_{1}H + {}^{1}_{1}p \longrightarrow {}^{3}_{2}He + \gamma $$

$$ {}^{3}_{2}He + {}^{3}_{2}He \longrightarrow {}^{4}_{2}He + 2\,{}^{1}_{1}p $$

- Kyseinen reaktio on yleisin (86 %) kaikista pp-ketjuista, joita on kolmea eri lajia.
- Ketjun reaktioissa vapautuu yhteensä n. 26,7 $\mathrm{M}e\mathrm{V}$ energiaa.