

## RATKAISUT: 6. Ydinreaktiot

- Ydinten yhteenliittymistä kutsutaan fuusioksi.
  - Ytimien spontaania hajoamista kutsutaan fissioksi.
- Silloin vapautuu energiaa.
- Ketjureaktiossa fissioituvista ytimistä vapautuvat neutronit laukaisevat uusia fissioita. Fissioituvaa materiaa tulee olla riittävän paljon, yli ns. kriittisen massan.

- Ydinreaktion massan muutos on lähtöhiukkasten ja syntyvien hiukkasten massojen erotus. Ydinreaktiossa vapautuva tai sitoutuva energia, reaktioenergia, saadaan selville, kun lasketaan reaktion massan muutosta vastaava energia lausekkeen  $E = mc^2$  avulla.

Reaktion  $X + a \rightarrow b + Y$  reaktioenergia on

$Q = (m_X + m_a - m_b - m_Y)c^2$ , jossa  $m_X$  on ytimen X massa,  $m_a$  on hiukkasen a massa,  $m_b$  on hiukkasen b massa,  $m_Y$  on ytimen Y massa ja  $c$  on valonnopeus.

- Esimerkin 3 mukaan deuteriumin ja tritiumin ytimien fuusioreaktiossa vapautuu energiaa  $E = 17,6$  MeV.

Koivuhalkojen polttoarvo on  $18 \cdot 10^6 \frac{\text{J}}{\text{kg}}$ .

Koivua tarvitaan

$$\frac{17,6 \cdot 10^6 \text{ MeV}}{18 \cdot 10^6 \frac{\text{J}}{\text{kg}}} = \frac{17,6 \cdot 10^6 \cdot 0,16021773 \cdot 10^{-18} \text{ J}}{18 \cdot 10^6 \frac{\text{J}}{\text{kg}}} = 1,56657336 \cdot 10^{-19} \text{ kg.}$$

**Vastaus:** Koivua tarvitaan  $1,57 \cdot 10^{-19}$  kg.

- ${}_{92}^{235}\text{U} + {}_0^1\text{n} \rightarrow {}_{38}^{92}\text{Sr} + {}_{54}^{140}\text{X} + 3{}_0^1\text{n}$ , fissio
  - ${}_0^1\text{n} + {}_1^1\text{p} \rightarrow {}_1^2\text{He} + \gamma$ , fuusio

- Reaktioenergia on

$$\begin{aligned} Q &= (238,050784 \text{ u} - 144,921643 \text{ u} - 89,931015 \text{ u} - 3 \cdot 1,0086650 \text{ u})c^2 \\ &= 0,172131 \cdot 931,5 \text{ MeV} \\ &= 160,3400265 \text{ MeV} \approx 160 \text{ MeV.} \end{aligned}$$

**Vastaus:** Reaktioenergia on 160 MeV.

9. a) Polttoaine-elementtien välissä on hidastinainetta, joka hidastaa fissioreaktiossa syntyvät nopeat neutronit riittävän hitaiksi. Hitaat neutronit reagoivat uraaniydinten kanssa todennäköisemmin kuin nopeat.
- b) Fissioreaktoreissa uraani-235 on uraanidioksiditabletteina polttoainesauvoissa. Nämä sauvat on koottu 60–100 sauvan nippuihin polttoaine-elementeiksi, jotka asetetaan reaktoriin. Yhteensä sauvoja on muutamia kymmeniä tuhansia.
- c) Polttoaine-elementtien välissä on lämpöenergiaa kuljettavaa jäähdytettä. Kevyt- ja raskasvesireaktoreissa vesi toimii sekä hidastimena että jäähdyttimenä.
10. Painevesireaktorin reaktorisydämen läpi kulkeva vesi ja turpiinille menevä höyry muodostavat omat suljetut piirinsä.
11. Yhden uraaniytimen massa on  $m_U = 235 \text{ u} = 235 \cdot 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ . Jos uraanin massa on  $m$  ja siinä on  $n$  kappaletta ytimiä, on  $m = nm_U$ . Siten  $n = \frac{m}{m_U}$ .  $n$  kappaleesta fissioita vapautuu energiaa  $E = nE_U$ , jossa  $E_U$  on yhdestä fissiosta vapautuva energia.

$$E = nE_U = \frac{m}{m_U} E_U$$

Yhdestä kilogrammasta vapautuu silloin energiaa

$$W = \frac{1 \text{ kg}}{235 \cdot 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}} \cdot 200 \cdot 10^6 \cdot 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 8,203 \cdot 10^{13} \text{ J}.$$

Kilogrammasta poltettua kivihiiltä vapautuu taulukkokirjan mukaan energiaa  $32 \cdot 10^6 \text{ J}$ .

Energioiden suhde on

$$\frac{8,2 \cdot 10^{13} \text{ J}}{32 \cdot 10^6 \text{ J}} \approx 2,6 \cdot 10^6 \text{ eli hiiltä pitää polttaa } 2,6 \cdot 10^6 \text{ kg}.$$

**Vastaus:**  $2,6 \cdot 10^6 \text{ kg}$

12. Veden luovuttama lämpömäärä on  $Q = cm\Delta\theta$ .

Teho

$$P = \frac{Q}{t} = \frac{cm\Delta\theta}{t}.$$

Ratkaistaan massa  $m$

$$m = \frac{Pt}{c\Delta\theta} = \frac{5,6 \cdot 10^9 \text{ W} \cdot 1 \text{ s}}{4420 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot (287 - 216) ^\circ\text{C}} = 17,8446 \cdot 10^3 \text{ kg}$$

**Vastaus:**  $17,8 \cdot 10^3 \text{ kg}$

13. Jos ytimiä hajoaa  $n$  kappaletta, energiaa vapautuu  $E = nE_U$ , jossa  $E_U$  on yhdestä ytimen hajoamisesta vapautuva energia.

$$\text{Vapautuva teho on } P = \frac{E}{t}.$$

$$\text{Hyötyteho on } P_h = \eta P = \eta \frac{E}{t} = \eta \frac{nE_U}{t}.$$

Ratkaistaan  $n$

$$n = \frac{P_h t}{\eta E_U} = \frac{8,0 \cdot 10^8 \text{ W} \cdot 1 \text{ a}}{0,25 \cdot 2,0 \cdot 10^2 \text{ MeV}} = \frac{8,0 \cdot 10^8 \text{ W} \cdot 365 \cdot 24 \cdot 3600 \text{ s}}{0,25 \cdot 2,0 \cdot 10^2 \cdot 10^6 \cdot 1,6021773 \cdot 10^{-19} \text{ J}} = 3,1493 \cdot 10^{27}.$$

$$\text{Uraani-235 ytimen massa on } m_U = 235 \cdot 1,6605 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

Kokonaismassa on

$$m = n m_U = 3,1493 \cdot 10^{27} \cdot 235 \cdot 1,6605 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 1228,9120 \text{ kg} \approx 1200 \text{ kg}.$$

**Vastaus:** Uraania kuluu vuodessa 1200 kg

14. Ydinreaktion teho on

$$P_U = \frac{E}{t} = \frac{nE_U}{t}, \text{ jossa } n \text{ on hajoavien ydinten lukumäärä ja } E_U \text{ yhdestä ydin fissiosta}$$

$$\text{vapautuva energia. Voimalan hyötyteho } P_h = \eta P_U = \eta \frac{nE_U}{t}.$$

Ratkaistaan  $n$

$$n = \frac{P_h t}{\eta E_U} = \frac{400 \cdot 10^6 \text{ W} \cdot 1 \text{ d}}{0,30 \cdot 200 \text{ MeV}} = \frac{400 \cdot 10^6 \text{ W} \cdot 24 \cdot 3600 \text{ s}}{0,30 \cdot 200 \cdot 10^6 \cdot 1,6021773 \cdot 10^{-19} \text{ J}} = 3,5951 \cdot 10^{24} \approx 3,6 \cdot 10^{24}.$$

**Vastaus:** Uraania kuluu  $1,3 \cdot 10^{27}$  ydintä.

16. Energian ja massa välillä on yhteys  $E = mc^2$ . Teho  $P = \frac{E}{t} = \frac{mc^2}{t}$ .

Sijoitetaan lukuarvot

$$P = \frac{4 \cdot 10^9 \text{ kg} \cdot (3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2}{1 \text{ s}} = 3,6 \cdot 10^{26} \text{ W}.$$

17. Auringon kokonaisteho on  $3,6 \cdot 10^{26} \text{ W}$ , joten vuodessa se tuottaa energiaa  $3,6 \cdot 10^{26} \text{ W} \cdot 1 \text{ a}$ .

Energioiden suhde on

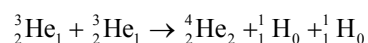
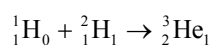
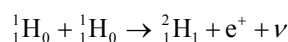
$$\frac{E_A}{E_O} = \frac{3,6 \cdot 10^{26} \text{ W} \cdot 365 \cdot 24 \cdot 3600 \text{ s}}{13 \cdot 10^{12} \text{ W} \cdot 3600 \text{ s}} = 2,4258 \cdot 10^{17}.$$

**Vastaus:** Auringon energian tuotanto  $2,4 \cdot 10^{17}$  kertaa Olkiluodon energian tuotanto.

**18.** Maapallolla esiintyy lähes sata erilaista alkuainetta, jotka kaikki ovat peräisin tähtien avaruuteen sirottelemasta aineesta. Tähdet toimivat alkuaineiden tuottajina ja niiden avaruuteen jakajina.

Energian tuottamisen ohella fuusiolla on tärkeä merkitys vetyä raskaampien alkuaineiden tuottajana. Rautaa kevyemmät alkuaineet syntyvät fuusiossa Auringon kaltaisissa tähdissä. Helium syntyy vety-ydinten fuusiossa ja heliumin fuusioreaktiot synnyttävät edelleen raskaampia alkuaineita.

Aurinko tuottaa energiansa fuusioimalla vetyä heliumiksi. Vedyn muuttuminen heliumiksi voi tapahtua useita reittejä, joista tärkein on Auringossa tapahtuva niin sanottu protoni–protoniketju:



Auringossa vetyä riittää noin kymmeneksi miljardiksi vuodeksi, vaikka Auringossa fuusioituu 600 miljoonaa tonnia vetyä sekunnissa 596 miljoonaksi tonniksi heliumia. Massasta neljä miljoonaa tonnia sekunnissa muuttuu energiaksi, joten yhtälön  $E = mc^2$  mukaan Auringon kokonaisteho on noin  $3,9 \cdot 10^{26}$  W.

Heliumia raskaammat alkuaineet aina rautaan saakka syntyvät erilaisten fuusioreaktioiden kautta.

Lämpötila tähtien ytimessä kasvaa tähden kehityksen myötä. (Tähtien kehitystä on kuvattu lyhyesti kirjassa Physica 1.) Jotta tähti kävisi läpi kaikki fuusioprosessit, tähden massan on oltava yli 15 kertaa Auringon massa. Kevyemmissä tähdissä lämpötila ei nouse riittävän korkeaksi, jotta piin Si fuusio onnistuisi.

Lämpötila tähden keskellä (MK)	Prosessi	Fuusiotuote
10–20	vedyn fuusio	helium
100–200	heliumin fuusio	hiili, happi
500	hiilen fuusio	neon, natrium, magnesium
1000	hapen fuusio	pii, rikki, fosfori
2000–4000	piin fuusio	rauta, nikkeli

Koska rautaa raskaampien alkuaineiden fuusio ei voi tapahtua spontaanisti, niiden syntyyn tarvitaan ulkopuolista energiaa. Riittävän korkeassa lämpötilassa neutroneilla on riittävästi liike-energiaa, jotta ne voivat yhtyä ytimiin. Rautaa raskaammat alkuaineet syntyvätkin supernovissa, joissa on sopivat olosuhteet raskaampien ytimien muodostumiseen.

**19.** Tokamak-laitteissa plasma muodostaa suljetun renkaan sylinterimäisessä magneetikammiossa. Fuusioreaktoreissa plasma pidetäänkin koossa magneettikentän avulla.

**20.** <http://www.iter.org/>