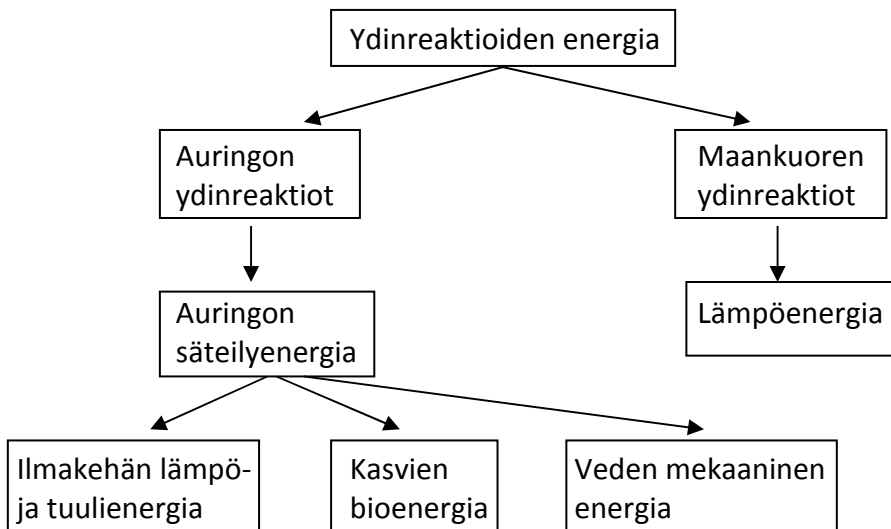


ENERGIAN TUOTTAMISEN FYSIKAALINEN PERUSTA

Energia on kyky tehdä työtä

ENERGIAN ALKUPERÄ



ENERGIAVAROJEN LUOKITTELU:

1) UUSIUTUVAT ENERGIAVARAT

- **aurinkoenergia** (aurinkosähkö ja –lämpö)
- **tuulienergia**
- **vesienergia** (veden potentiaalienergia ja vuorovesienergia)
- **bioenergia** (biomassa)
- **geoterminen energia** (maankuoren lämpöenergia, ydinreaktioista)
- **maa- ja ilmalämpö** (maahan varastoitunutta Auringon energiaa)
- **vetyenergia**

2) UUSITUMATTOMAT ENERGIAVARAT

- **fossiiliset polttoaineet** (kivihiili, öljy, maakaasu)
- **turve** (hitaasti uusiutuva)
- **ydinenergia: fissio** (uraani), **fuusio** (suunnitteilla)

Energian yksiköitä:

- **joule (J)**
- **kilowattitunti (kWh):** **1kWh = 3,6 MJ** (MAOL s. 69 (70))
- **elektronivoltti (eV):** **1 eV = 1,6021773·10⁻¹⁹ J**
(MAOL s. 67, 69 (68, 70))
- **ekvivalentti öljytonni (toe):** **1 toe = 11,28 MWh**

VOIMALAT

1) VESIVOIMALA

- toiminnan fysikaalinen perusta on veden potentiaali- ja liike-energian muuttaminen turbiinin pyörimisenergiaksi ja edelleen generaattorin avulla sähköenergiaksi ($mgh \Rightarrow \frac{1}{2}mv^2 \Rightarrow$ sähköenergia $\Rightarrow \dots$)
- hyötysuhde η : 80% - 90%

Jos potentiaalienergian nollassoksi valitaan veden pinta alhaalla turbiinin tasolla, niin vesivoimalan antoteho saadaan yhtälöstä:

$$P = \frac{W}{t} = \frac{\eta E_p}{t} = \frac{\eta mgh}{t} = \frac{\eta \rho Vgh}{t} \quad (E_p = mgh, \quad \rho = mV)$$

$$P = \frac{\eta \rho Vgh}{t}$$

missä P = teho (W)

$$\eta = \text{hyötysuhde}, \quad \eta = \frac{P_{\text{anto}}}{P_{\text{otto}}}$$

$$\rho = \text{veden tiheys}, \quad \rho = 1000 \text{ kg/m}^3$$

$$g = \text{putoamiskiihtyvyyys}, \quad g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

$$h = \text{pudotuskorkeus (m)}$$

$$\frac{V}{t} = \text{virtaama eli tilavuusvirta (m}^3\text{/s)}$$

- Suomessa on noin 250 vesivoimalaitosta, joiden yhteenlaskettu teho on lähes 3000 MW
- Suomen suurin vesivoimalaitos on vuonna 1929 sähkön tuotantoon valjastettu *Imatrankosken vesivoimalaitos* Imatralla: teho 185 MW, virtaama suurimmillaan $940 \text{ m}^3/\text{s}$, pudotuskorkeus 25 m, sähköenergian vuotuinen tuotto on noin 1000 GWh
- Petäskosken vesivoimalaitos Kemijoella on toiseksi suurin vesivoimalaitos, teho 182 MW, pudotuskorkeus 20,5 m ja vuotuinen energiantuotto 638 GWh
- Suomessa tuotetaan vesivoimalla noin 19 % sähköenergiasta.
- maailman suurin vesivoimalaitos on Kiinassa sijaitseva ”Kolmen rotkon pato”, jonka pudotuskorkeus on 181 m, teho 24 500 MW ja vuotuinen sähköntuotanto 84,7 TWh.

2) TUULIVOIMALA

- toiminnan fysikaalinen perusta on ilmaan liike-energian muuntaminen tuulivoimalan siipien pyörimisenergiaksi ja edelleen generaattorin avulla sähköenergiaksi ($\frac{1}{2}mv^2 \Rightarrow$ sähköenergia $\Rightarrow \dots$)
- hyötysuhde η : 30 – 50 %.

Johdetaan seuraavaksi tuulivoimalan tehon lauseke. Tarkastellaan suoran ympyrälieriön muotoista ilmamassaa, joka kohtaa tuulivoimalan siivet

(ks. kuvio). Olkoon pohjaympyrän säde r , joka on yhtä suuri kuin tuulivoimalaan siiven pituus. Ilmamäärä kulkee nopeudella v ajassa Δt matkan h , joten

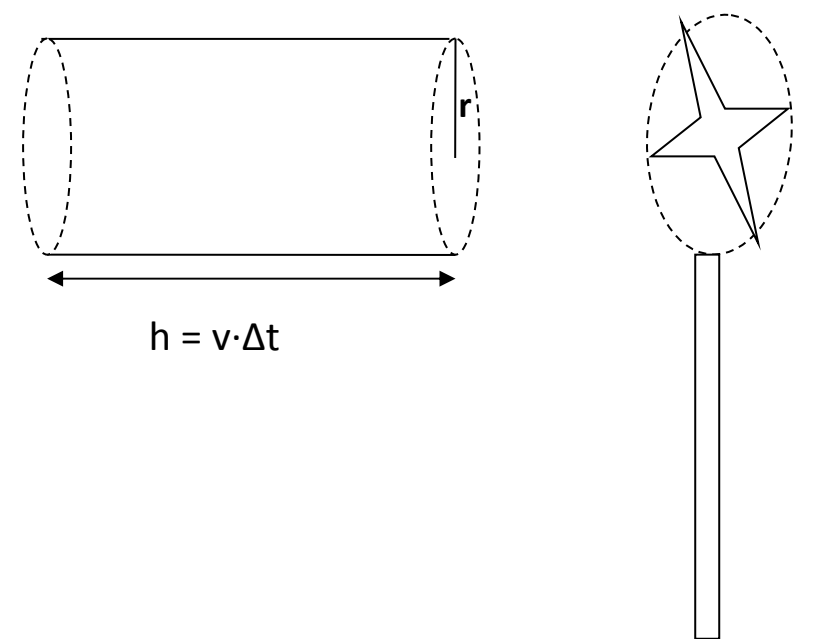
lieriön pituus on $h = v \cdot \Delta t$. Ilmalieriön liike-energia on $E_k = \frac{1}{2} m v^2$.

Kun otetaan lisäksi huomioon, että massa $m = \rho V$, tilavuus $V = Ah$, niin $m = \rho V = \rho Ah = \rho A v \cdot \Delta t$, ja liike-energian lauseke saa muodon

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot \rho A v \Delta t \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot \rho A v^3 \Delta t.$$

Koska $A = \pi r^2$, niin liike-energia on

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot \rho \pi r^2 v^3 \Delta t.$$



Teho on energiantuotto aikayksikössä eli $P = \frac{E}{t}$,

joten tuulivoimalan hyötäteho on

$$P = \frac{\eta E}{\Delta t} = \frac{\eta \cdot \frac{1}{2} \rho \pi r^2 v^3 \Delta t}{\Delta t}$$

missä η on hyötysuhde. Tuulivoimalan hyötäteho on siis

$$P = \eta \cdot \frac{1}{2} \rho \pi r^2 v^3$$

missä $\eta = \text{hyötysuhde}, \eta = \frac{P_{\text{anto}}}{P_{\text{otto}}}$

ρ = ilman tiheys, $\rho \approx 1,29 \text{ kg/m}^3$

r = tuulivoimalan siipien pituus (m)

v = tuulen nopeus (m/s)

On huomattava, että *tuulivoimalan teho P on siis suoraan verrannollinen siiven pituuden neliöön ja tuulen nopeuden kuutioon eli $P \sim r^2 v^3$.*

Vuoden 2013 lopussa Suomessa oli 211 tuulivoimalaa, joiden yhteenlaskettu kapasiteetti oli 448 MW. Tuulivoimalla tuotettiin noin 1 % Suomen sähkönkulutuksesta (noin 771 GWh) vuonna 2013.

Suomessa on tuulivoimaloille soveltuvia alueita erityisesti rannikolla, merialueilla ja Lapin tuntureilla. Usein rakennetaan tuulivoimapuistoja, joissa on useita tuulivoimalaitoksia. Tuulivoimalaitokset ovat nimellisteholtaan noin 2–3 MW:n suuruisia, mutta suurempia, jopa 5 MW:n, tuulivoimaloita on rakenteilla.

3) POLTTOVOIMALAT

- **polttoprosessit:** kemiallista energiaa muutetaan lämpöenergiaksi ja edelleen sähköenergiaksi
- *palamisreaktiossa* vapautuva kemiallinen energia on sitoutunut poltettavaan aineeseen kasvin käyttäessä Auringon säteilyenergiaa yhteyttämisreaktiossa
- polttoprosesseissa hyötysuhde η : 35 - 85 %
- erilaiset polttoprosessit ovat tärkeimpiä lämpöenergian lähteitä maapallolla Auringon lämpösäteilyn ohella
- polttoaineiden **lämpöarvo** eli **palamislämpö H** ilmoittaa, kuinka paljon palamisreaktiossa vapautuu *energiaa* polttoaineen *massayksikköä kohti*;

$$H = \frac{Q}{m}$$

Tästä saadaan **palamisreaktiossa vapautuvan lämpöenergian** määrälle lauseke

$$Q = Hm$$

missä Q = palamisreaktiossa vapautuva energia (MJ)

m = poltettavan aineen massa (kg)

H = polttoaineen lämpöarvo (MJ/kg), (ks. MAOL s. 85 (85)).

Esim. Poltettaessa 2,0 kg koksia saadaan energiaa

$$Q = Hm = 28 \text{ MJ/kg} \cdot 2,0 \text{ kg} = 56 \text{ MJ}.$$

Polttovoimalan lämmitysteho on polttoprosessissa vapautuva energia aikayksikköä kohti; $P = \frac{E}{t} = \frac{\eta Q}{t}$. Kun huomioidaan hyötysuhde η ja

energia $E = \eta Q = \eta Hm$, niin **polttovoimalan antoteholle** saadaan lauseke

$$P = \frac{\eta Hm}{t}$$

missä P = lämmitysteho eli hyötysteho, antoteho (W)

$$\eta = \text{hyötysuhde}, \eta = \frac{P_{\text{anto}}}{P_{\text{otto}}}$$

H = polttoaineen lämpöarvo (MJ/kg), (MAOL s. 85 (85))

m = polttoaineen massa (kg), t = aika (s).

ESIM.

- Inkoossa on neljä kappaletta hiililauhdevoimaloita; $4 \times 250 \text{ MW} = 1000 \text{ MW}$
- Meri-Porin kivihiltä käyttävän lauhdevoimalan sähköteho on 565 MW ja hyötysuhde 44 %
- Pietarsaaressa (Alholmens Kraft 2) on biovoimalaitos, jonka sähköteho on 240 W ja mustalipeää käyttävä soodakattilavoimalaitos teholtaan 140 MW
- Kotkassa (Mussalo 2) on maakaasukombivoimalaitos, jonka sähköteho on 238 MW
- Kristiinankaupungissa on öljyvoimalaitos, jonka sähköteho on 210 MW
- Seinäjoella on turve- ja hakevoimalaitos, jonka sähköteho on 125 MW.

Taulukossa (MAOL s. 85 (85)) on polttoaineiden lämpöarvoja (MJ/kg):

○ ammoniakki	17,2
○ asetyleeni	48,6
○ bensiini	43,5
○ etanoli	26,9
○ kaupunkikaasu	34
○ kivihiili,	26...32
○ antrasiitti	32...34
○ koksi	28
○ ruskohiili	20
○ maakaasu	46
○ metaani	49,8
○ metanoli	19,5
○ nestekaasu	42...43
○ petroli	43
○ kuiva halko	18...19
○ polttoöljy,	
▪ kevyt	43
▪ raskas	41
○ turve	11
○ vety	119

4) YDINVOIMALA

= suurikokoinen vedenkeitin, lämpövoimakone, joka synnyttämällä vesihöyryllä pyöritetään turbiinia ja turbiinin pyörimisenergia muutetaan generaattorissa sähköksi (sähkömagneettinen induktio)

- ydinvoimalan energia on pääasiassa uraaniytimien halkeamistuotteiden liike-energiaa

- vapautuvaa energiaa käytetään, kuten lämpövoimaloissa, veden kuumentamiseen ja höyryttämiseen ja höyryturbiinien sekä sähkögeneraattorin välityksellä sähköenergian tuottamiseen

Uraani-isotoopin ^{235}U -fisiossa syntyy keskimäärin 2,4 neutronia, yli 60 halkeamistuotetta ja kaikkiaan eri nuklideja eli atomiytimiä yli 200. Fisiossa syntyneet neutronit liikkuvat nopeasti ja ne hidastetaan raskaalla vedellä D_2O , kevyellä vedellä H_2O tai grafiitilla C. Neutronien lukumäärä pidetään vakiona polttoainesauvojen välissä olevilla säätösauvoilla (sis. B tai Cd), jotka absorboivat (imevät) pois ylimääräiset neutronit. Jäljellejääneet neutronit halkaisevat uusia uraaniytimiä, jolloin tapahtuu hallittu ketjureaktio. Hidastinaineena toimiva vesi lämpenee ja lämpö kuljetetaan veden mukana lämmönvaihtimeen, jossa syntyvä höyry pyörittää turbiineja. Turbiini on akselilla yhdistetty generaattoriin, joka tuottaa vaihtovirtaa mekaanisesta pyörimisliikkeestä. Yleisin toimintatapa on pyörittää sähköjohtimesta muodostettua silmukkaa magneettikentässä, mikä synnyttää johtimeen jännitteen ja sähkövirran (sähkömagneettinen induktio).

- Ydinvoimalan rakenne ja toimintaperiaate (ks. YO-SYKSY-1997-3)

fissio (fuusio) \rightarrow Q \rightarrow turbiinin mekaaninen energia \rightarrow generaattori \rightarrow sähkö

- ydinvoimalan hyötysuhde $\eta \approx 30\%$

SIDOSENERGIA E_B

= energia, joka tarvitaan hajottamaan ydin protoneiksi ja neutroneiksi

- kun nukleonit (protonit ja neutronit) liittyvät yhteen osa nukleonien massasta muuttuu sidosenergiaksi E_B . Tätä massan muutosta sanotaan **massavajeeksi** eli **massakadoksi Δm** . Sidosenergia E_B vapautuu sidoksen muodostuessa



$$m_{\text{ydin}} < m_{\text{nukleonit}} \quad \rightarrow \quad \Delta m = m_{\text{nukleonit}} - m_{\text{ydin}} > 0$$

- massa pienenee nukleonien liittyessä yhteen \rightarrow massavaje Δm
- massavajetta Δm vastaava energia on sidosenergia:

$$E_B = \Delta m \cdot c^2$$

- E_B = sidosenergia (MeV), Δm = massavaje (u), c = valon nopeus (m/s), (MAOL s. 70 (71))

SIDOSOSUUS b

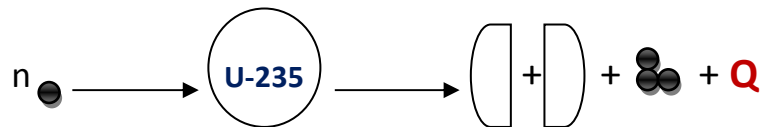
= sidosenergia nukleonia kohti (MeV/nukleoni)

- keskimääräinen energia, jolla yksi nukleoni on sitoutunut ytimeen
- ytimen pysyvyyden mitta
- \rightarrow mitä suurempi on sidososuus sitä pysyvämpi on atomiydin

$$b = \frac{E_B}{A}$$

- b = sidososuus (MeV/nukleoni)
- E_B = sidosenergia (MeV)
- A = massaluku eli nukleoniluku ($A = Z + N$)

FISSIO

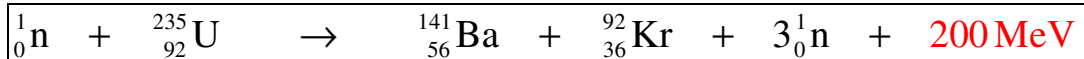


- *fissiossa raskas ydin halkeaa kahdeksi keskiraskaaksi ytimeksi ja samalla vapautuu 2-3 neutronia ja energiaa*
- ytimen halkeamisen saa aikaan hitaan neutronin törmäys

Ydinreaktorissa hidastetut neutronit törmäävät uraani-ytimeen ${}^{235}_{92}\text{U}$, jolloin tapahtuu **fissio** eli raskas uraani-235 –ydin *halkeaa kahdeksi keskiraskaaksi ytimeksi* ja samalla vapautuu 2 – 3 neutronia ja energiaa.

Vapautunut energia on pääosaltaan hajoamistuotteiden liike-energiaa (~90 %), joka ilmenee lämpöenergiana.

Esim. Eräs mahdollinen uraani-235 halkeamisreaktio on seuraava:

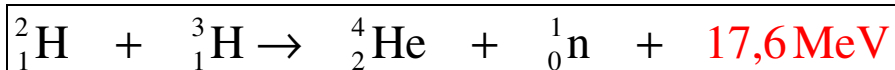
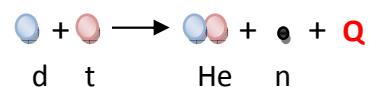


Reaktiossa vapautuneet 2 – 3 neutronia absorboidaan säätösauvoihin, niin että vapautuvien neutronien määrä on vakio ja näin syntyneet neutronit halkaisevat yhä uusia uraaniytimiä ja näin **ketjureaktio** jatkuu hallittuna. (vrt. YO-K95-7).

FUUSIO

- *kevyet ytimet yhtyvät raskaammiksi korkeassa lämpötilassa ja energiaa vapautuu.*
- fuusio vaatii korkean lämpötilan (10^8 K) ytimien välisen poistovoiman takia

Esim. Eräs mahdollinen fuusioreaktio on seuraava:
deuteriumin ja tritiumin fuusio (DT-fuusio):



Massavaje Δm ydinreaktioissa (esim. fissiossa että fuusiossa) lasketaan lausekkeesta:

$$\Delta m = m_{\text{lähtöytimet}} - m_{\text{tulositymet}}$$

Ydinreaktioissa vapautunut energia Q saadaan Einsteinin relaatiolla $Q = \Delta m \cdot c^2$.

Ydinreaktioissa vapautunut energia eli reaktioenergia

$$Q = \Delta m \cdot c^2$$

Q = reaktioenergia eli ydinreaktiossa vapautunut energia (MeV)

Δm = massavaje (u)

c = valon nopeus, $c = 2,99792458 \cdot 10^8$ m/s (MAOL s. 70 (71)).

Yksi atomimassayksikkö 1 u = 1/12-osa hiili-12 –isotoopin massasta

1 u = 1,6605402 · 10⁻²⁷ kg (MAOL s. 70 (71)).

$$1 \text{ eV} = 1,6021773 \cdot 10^{-19} \text{ J} \quad (\text{MAOL s. 67, 69, (68, 70)})$$

.....
KUINKA PALJON ENERGIAA ON 1 u ?

$$E = mc^2 = uc^2 = 1,6605402 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \cdot (2,99792458 \cdot 10^8 \text{ m/s})^2$$

$$E = 1,492419104 \cdot 10^{-10} \text{ J} = \frac{1,492419104 \cdot 10^{-10}}{1,602173 \cdot 10^{-19}} \text{ eV} \approx 931,494 \text{ MeV}$$

$$u = 931,49432 \frac{\text{MeV}}{c^2} \quad (\text{MAOL s. 69 (70)})$$

SIDOSOSUUSKÄYRÄ

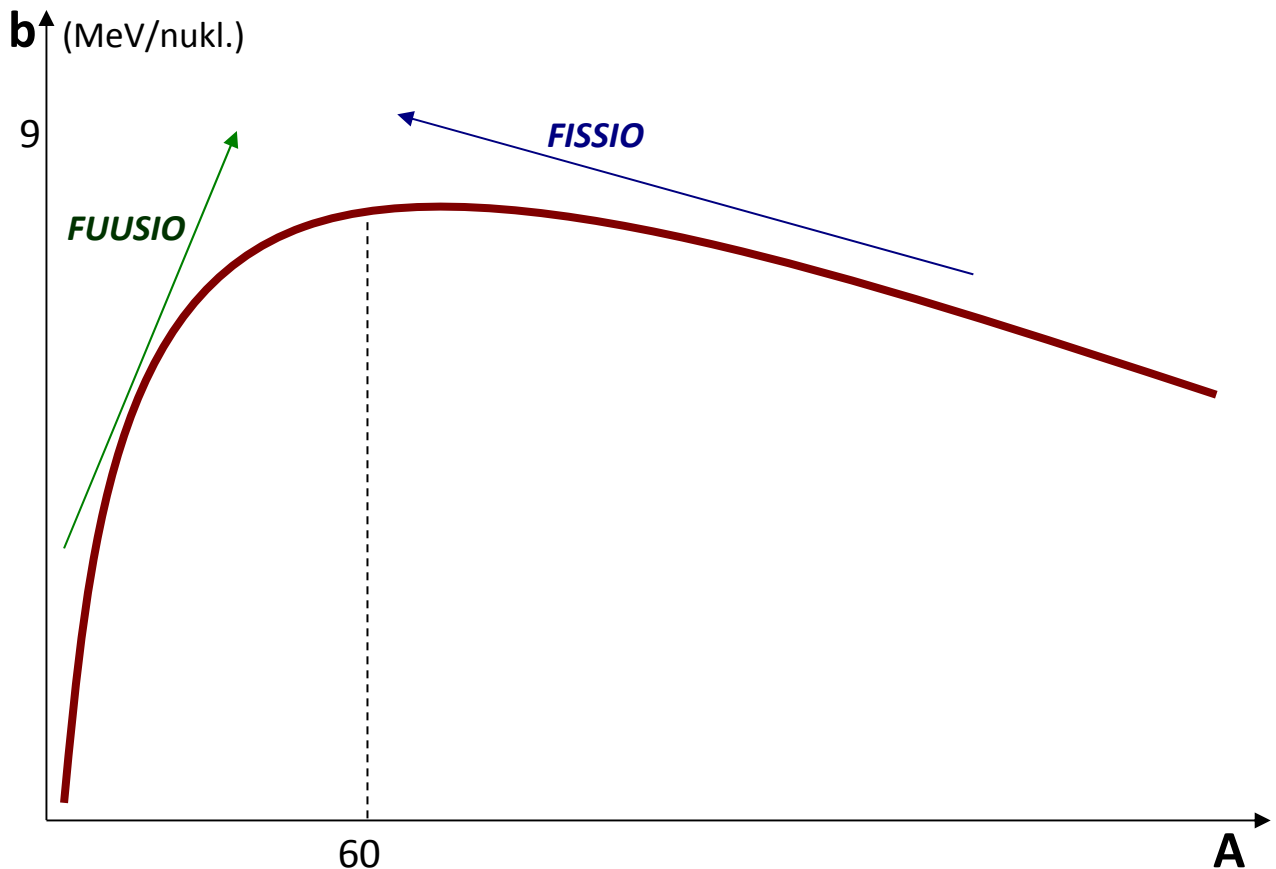
= sidososuus b massaluvun A funktiona; $b = b(A)$

- sidososuus on suurin keskiraskailla ytimillä ($A \sim 60$) noin 8-9 MeV/nukleoni
- sidososuusikäyrän avulla voidaan selittää ydinenergian vapauttamisen fysikaalinen perusta

$$\text{Sidososuus } b = \frac{E_B}{A} \quad (\text{MeV/nukleoni})$$

Miksi energiaa vapautuu fissiossa ja fuusiossa ? (YO-S09-9)

SIDOSOSUUSKÄYRÄ; Sidososuus b massaluvun A funktiona



SIDOSOSUUSKÄYRÄN AVULLA VOIDAAN SELITTÄÄ

YDINENERGIAN VAPAUTTAMISEN FYSIKAALINEN PERUSTA:

- raskaan ytimen hajotessa (fissio) kahdeksi keskiraskaaksi ytimeksi sidososuus kasvaa → nukleonit ovat siis lujemmin sitoutuneet kuin ennen fissiota → sidosten vahvistuessa vapautuu energiaa
- kahden kevyen ytimen liittyessä yhteen (fuusio) sidososuus kasvaa → yksittäinen nukleoni on myös lujemmin sitoutunut kuin ennen fuusiota → sidokset vahvistuvat → energiaa vapautuu

Miksi energiaa vapautuu fissiossa ja fuusiossa ?

eli *fissiossa ja fuusiossa sidososuus kasvaa → sidokset vahvistuvat
→ energiaa vapautuu*

Ydinvoimalan teho on $P = \frac{W}{t} = \frac{\eta E}{t} = \frac{\eta Q}{t} = \frac{\eta \cdot \Delta m \cdot c^2}{t}$

$$P = \frac{\eta \cdot \Delta m \cdot c^2}{t}$$

missä $\Delta m =$ massakato eli massavaje, $\Delta m = m_{\text{lähötyimet}} - m_{\text{tulositymet}}$

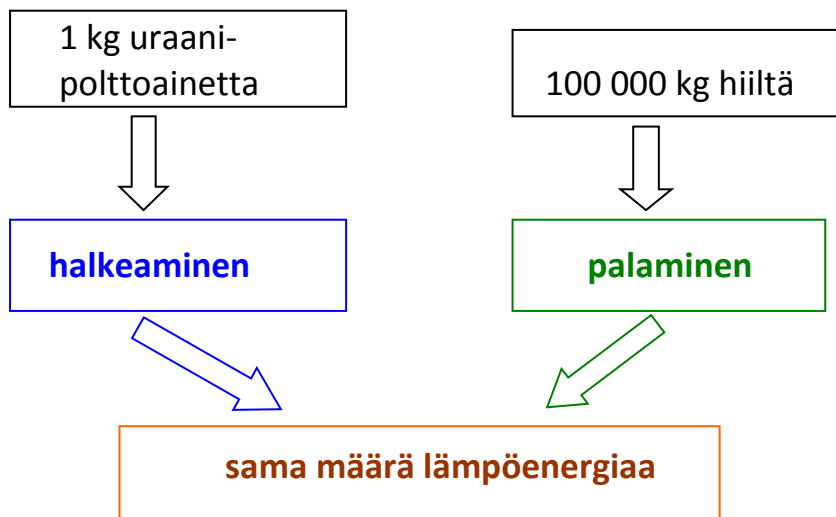
$\eta =$ hyötysuhde, $\eta = \frac{P_{\text{anto}}}{P_{\text{otto}}}$

$c =$ valon nopeus, $c = 3,0 \cdot 10^8$ m/s, $t =$ aika (s)

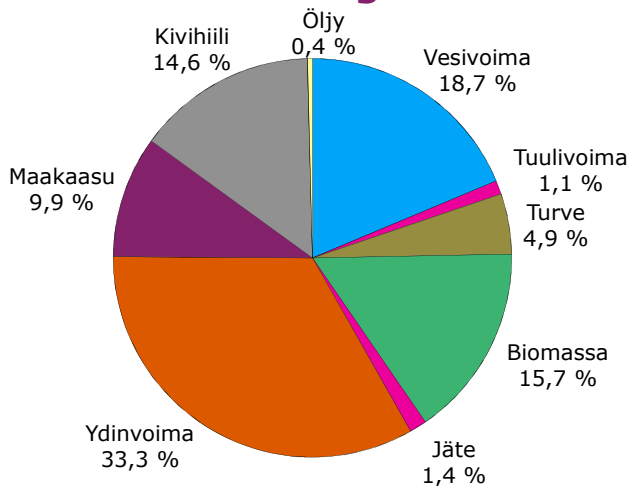
- ydinreaktioissa vapautuva energia (\geq MeV) on suuruusluokaltaan miljoonakertainen (10^6) kemiallisissa reaktioissa vapautuvaan energiaan (\geq eV) verrattuna.

Kaikesta Suomessa käytetystä sähköstä noin neljännes (26 %) tuotetaan ydinvoimalla (2013).

- Eurajoen Olkiluodossa on kaksi 880 MW kiehumisvesireaktoria (Olkiluoto I, II) BWR, **2 x 880 MW**), joiden yhteenlaskettu nettosähköteho on **1760 MW**.
- Loviisassa on kaksi painevesireaktoria (PWR, **2 x 496 MW**), joiden nettosähköteho yhteensä on **992 MW** (Loviisa I, II).
- Lisäksi Suomeen on rakenteilla viides ydinvoimalaitos (Olkiluoto 3), jonka tehoon **1600 MW**. Uusi voimalaitos on tekniikaltaan ns. kolmannen sukupolven kevytvesireaktori ja malliltaan eurooppalainen painevesireaktori eli EPR. Voimala on teholtaan maailman suurin voimalayksikkö. Sen lienee kaupallisessa käytössä vuona 2018 (?). (vrt. YO-K95-7). Lisäksi Suomeen on suunnitteilla kaksi ydinvoimalaa: Olkiluoto 4; noin 1500 MW (suunniteltu 2013, kaupallinen tuotanto noin 2020), Pyhäjoki; 1200 MW (suunnitteilla, kaupallinen tuotanto noin 2024).



Sähkön tuotanto energialähteittäin 2013 (68,2 TWh)



Uusiutuvat 36 %
(v. 2012 41 %)

Hiilidioksidivapaat 69 %
(v. 2012 73 %)

Kotimaiset: 42 %
(v. 2012 47 %)

<http://energia.fi/energia-ja-ymparisto/sahkontuotanto>

#####

SUOMEN YDINVOIMALAT:

Loviisa 1, 2: 2 x 496 MW = 992 MW (PWR)

Olkiluoto 1, 2: 2 x 880 MW = 1760 MW (BWR)

Olkiluoto 3: 1600 MW 2018? (EPR)

Olkiluoto 4: noin 1500 MW --- suunnitteilla---

Pyhäjoki: 1200 MW ---- suunnitteilla---

#####

Käytössä ja rakenteilla olevat voimalaitokset Suomessa (2014)

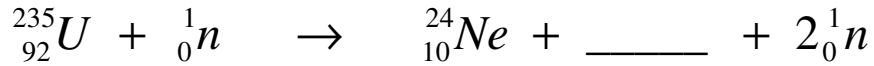
Laitosyksikkö	Toimittaja, Tyyppi	Nettosähköteho	Rakentaminen aloitettu	Kytkeyty verkkoon	Kaupallinen tuotanto
Loviisa-1	Atomenergoexport, VVER-440, PWR	496 MW	1.5.1971	8.2.1977	9.5.1977
Loviisa-2	Atomenergoexport, VVER-440, PWR	496 MW	1.8.1972	4.11.1980	5.1.1981
Olkiluoto-1	ASEA-Atom, BWR	880 MW	1.2.1974	2.9.1978	10.10.1979
Olkiluoto-2	ASEA-Atom, BWR	880 MW	1.8.1975	18.2.1980	10.7.1982
Olkiluoto-3	Areva NP & Siemens AG, EPR	1 600 MW	12.8.2005	Rakenteilla	?
Olkiluoto-4	Suunnitteilla	n. 1 500 MW	Suunniteltu 2013	Suunnitteilla	noin 2020
Pyhäjoki	Rosatom, AES-2006	1 200 MW	Suunnitteilla	Suunnitteilla	noin 2024

http://fi.wikipedia.org/wiki/Ydinvoima_Suomessa

Teht. 1.

Ydinvoimaloissa käytetään polttoaineena uraani-isotooppia ^{235}U .

Eräs mahdollinen ytimen halkeamisreaktio eli fissio on seuraava:



Tässä ydinreaktiossa neutroni halkaisee uraani-235 –ytimen, jolloin syntyy neon-24-isotooppi ja kaksi neutronia sekä energiaa.

a) Päättele taulukon avulla, mikä on toinen syntyvä isotooppi neon-24 lisäksi tässä ydinreaktiossa?

Mikä on tämän kysytyn isotoopin hajoamistapa ja puoliintumisaika?

Mikä uusi ydin muodostuu, kun kysytty ydin hajoaa?

Kirjoita reaktioyhtälö.

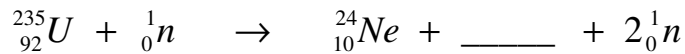
b) Laske tehtävän alussa mainitun uraanifission massavaje.

c) Laske tässä halkeamisreaktiossa vapautuva energia eli reaktioenergia (Q-arvo).

Teht. 1.

Ydinvoimaloissa käytetään polttoaineena uraani-isotooppia ^{235}U .

Eräs mahdollinen ytimen halkeamisreaktio eli fissio on seuraava:



Tässä ydinreaktiossa neutroni halkaisee uraani-235 –ytimen, jolloin syntyy neon-24-isotooppi ja kaksi neutronia sekä energiaa.

a) Päätele taulukon avulla, mikä on toinen syntyvä isotooppi neon-24 lisäksi tässä ydinreaktiossa?

Mikä on tämän kysytyn isotoopin hajoamistapa ja puoliintumisaika?

Mikä uusi ydin muodostuu, kun kysytty ydin hajoaa? Kirjoita reaktioyhtälö.

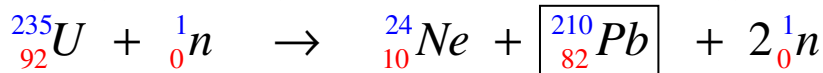
b) Laske tehtävän alussa mainitun uraanifission massavaje.

c) Laske tässä halkeamisreaktiossa vapautuva energia eli reaktioenergia (Q-arvo).

RATKAISU:

a) Lyijy-210 eli $^{210}_{82}\text{Pb}$.

- ydinreaktioyhtälöitä kirjoitettaessa massaluku A säilyy ja järjestysluku Z säilyy:



$$\text{A säilyy: } 235 + 1 = 24 + 210 + 2 \cdot 1 \rightarrow 236 = 236$$

$$\text{Z säilyy: } 92 + 0 = 10 + 82 + 2 \cdot 0 \rightarrow 92 = 92$$

β^- -hajoaminen. Puoliintumisaika $T_{1/2} = 22,3 \text{ a}$.

Lyijy-210 –isotoopin beetahajoamisessa syntyy Vismutti-210.

Reaktioyhtälö on $^{210}_{82}\text{Pb} \rightarrow ^{210}_{83}\text{Bi} + e^- + \bar{\nu}$.

b) Massavaje eli massakato $\Delta m = m_{\text{lähtöytimet}} - m_{\text{tulositytimet}}$

$$\Delta m = m(^{235}_{92}\text{U}) + m({}^1_0\text{n}) - m(^{24}_{10}\text{Ne}) - m(^{210}_{82}\text{Pb}) - 2m({}^1_0\text{n})$$

$$\Delta m = 235,043925u + 1,0086650u \\ - 23,993613 - 209,984163u - 2 \cdot 1,0086650u$$

$$\Delta m = 0,057484u \approx 0,0575u.$$

$$\text{Vastaus: } \Delta m = \underline{0,0575u}.$$

c) Reaktioenergia $Q = \Delta m \cdot c^2$

$$Q = 0,057484 \cdot 931,49432 \text{ MeV}$$

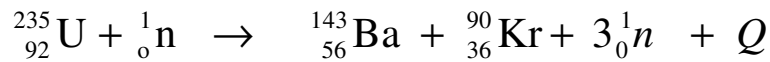
$$Q \approx 53,546 \text{ MeV}$$

$$\text{Vastaus: } Q \approx \underline{53,5 \text{ MeV}}.$$

Huom! Yksi atomimassayksikkö $1 \text{ u} = 931,49432 \text{ MeV}/c^2$ (MAOL s. 69 (70)).

Teht. 2.

Eräs mahdollinen ydinreaktorissa tapahtuva ^{235}U -ytimen halkeamisreaktio eli **fissioreaktio** on seuraava:



Laske tämän ytimen halkeamisreaktion

a) massavaje $\Delta m = m_{\text{lähtöytime t}} - m_{\text{tulositytime t}}$ ja

b) halkeamisreaktiossa vapautuva energia Q.

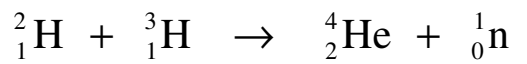
$m({}^{143}\text{Ba}) = 142,9084 \text{ u}$, $m({}^{90}\text{Kr}) = 89,919528 \text{ u}$.

[V: a) $\Delta m \approx 0,199 \text{ u}$, b) $Q \approx 185 \text{ MeV}$].

Teht. 3.

Ranskaan valmistunee vuonna 2020 teholtaan 500 MW:n koefuusiovoimala (ITER) ja teolliseen tuotantoon fuusiovoimalat saattavat tulla 2050-luvulla.

Käyttökelpoisimpia **fuusioreaktioita** on deuteriumin ja tritiumin välinen ydinreaktio eli ns. DT-fuusio:



Laske tämän ydinreaktion

a) massavaje $\Delta m = m_{\text{lähtöytime t}} - m_{\text{tulositytime t}}$ ja

b) tätä massavajetta vastaava vapautuva energia eli reaktioenergia Q.

[V: a) $\Delta m \approx 0,0189 \text{ u}$, b) $Q \approx 17,6 \text{ MeV}$].