

Fizika energijskih virov

I Energijski viri

Izkoriščanje virov, jedrska energija

Semipirična masna enačba opisuje maso jedra z masnim številom A in vrstnim številom Z :

$$M(A, Z)c^2 = Zm_p c^2 + (A - Z)m_n c^2 + W_{vez}$$

$$W_{vez} = -w_0 A + w_1 A^{2/3} + w_2 \frac{Z^2}{A^{1/3}} + w_3 \frac{(A - 2Z)^2}{A} + \frac{w_4}{A^{1/2}} \delta(A, Z)$$

$$w_0 = 15,6 \text{ MeV}$$

$$w_1 = 17,2 \text{ MeV}$$

$$w_2 = 0,7 \text{ MeV}$$

$$w_3 = 23,2 \text{ MeV}$$

$$w_4 = 12 \text{ MeV}$$

$$\delta(A, Z) =$$

$$-1(\text{sodo} - \text{sodo})$$

$$0(\text{sodo} - \text{liha})$$

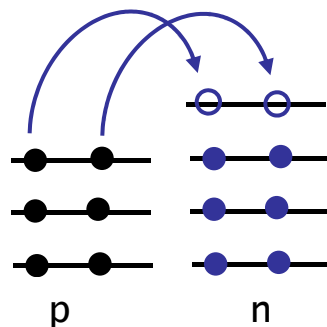
$$+1(\text{liho} - \text{liha})$$

povprečna vez.
energ. na nukleon

prispevek nukleonov
na površini; slabše
vezani;
 $V \propto r^3 \propto A$; $S \propto r^2 \propto A^{2/3}$

elektrostatski odboj
med protoni;
 $\propto Z^2 e^2 / 4\pi\epsilon_0 r^3 \propto Z^2 / A^{1/3}$

jedra z $Z \neq (A - Z)$ slabše
vezana;



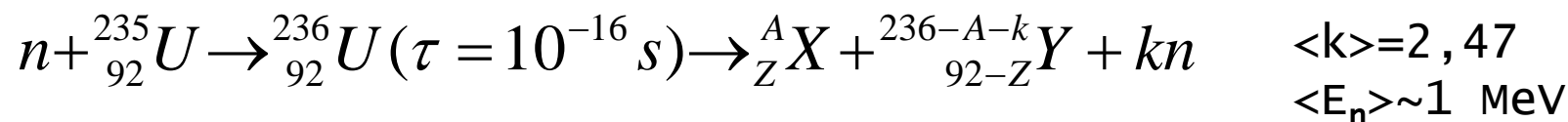
energetsko ugodno,
če se tvorijo pari
enakih nukleonov z
nasprotnim spinom
 $p \uparrow p \downarrow$ $n \uparrow n \downarrow$; $A^{-1/2}$ iz
meritev

Fizika energijskih virov

I Energijski viri

Izkoriščanje virov, jedrska energija

n ne občutijo elektrostatskega odboja → lahko prodrejo v jedro;



$$W_{\text{zač}} = m_n c^2 + W_k^n + M(235, 92) c^2$$

$$W_{\text{kon}} = M(\text{X}) c^2 + M(\text{Y}) c^2 + k m_n c^2 + W_k$$

W_k : skupna kin. energ. končnih jeder in n

št. nukleonov v zač. in kon. stanju enako

W_k^n zanemarljiva

$$W_k = W_{\text{vez}}(235, 92) - W_{\text{vez}}(\text{X}) - W_{\text{vez}}(\text{Y})$$

(primer $A=120, Z=45$)

$$-1794 \text{ MeV} + 993 \text{ MeV} + 993 \text{ MeV} \sim 190 \text{ MeV}$$

Fizika energijskih virov

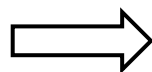
I Energijski viri

Izkoriščanje virov, jedrska energija

naravni uran:

99,3% ^{238}U

0,7% ^{235}U



obogačen U:

~3% ^{235}U , 97% ^{238}U

$M=238 \text{ kg/kmol}$;

$N_A=6 \times 10^{26} \text{ kmol}^{-1}$;

1 kg obogačenega U $\rightarrow 2.5 \times 10^{24}$ jeder, $\sim 7.5 \times 10^{22}$ ^{235}U

190 MeV $\approx 3 \times 10^{-11} \text{ J}$

sproščena energija: $\sim 2 \times 10^{12} \text{ J/kg}$

sežigna toplota premoga: $\sim 3 \times 10^2 \text{ J/kg}$

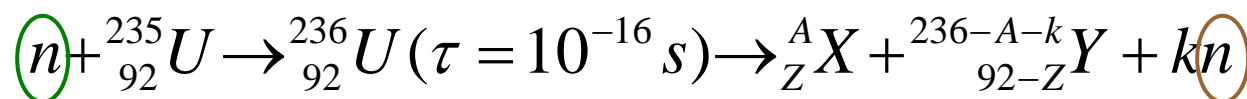
vendar uporaba \rightarrow verižna reakcija, ni enostavna

Fizika energijskih virov

I Energijski viri

Izkoriščanje virov, jedrska energija

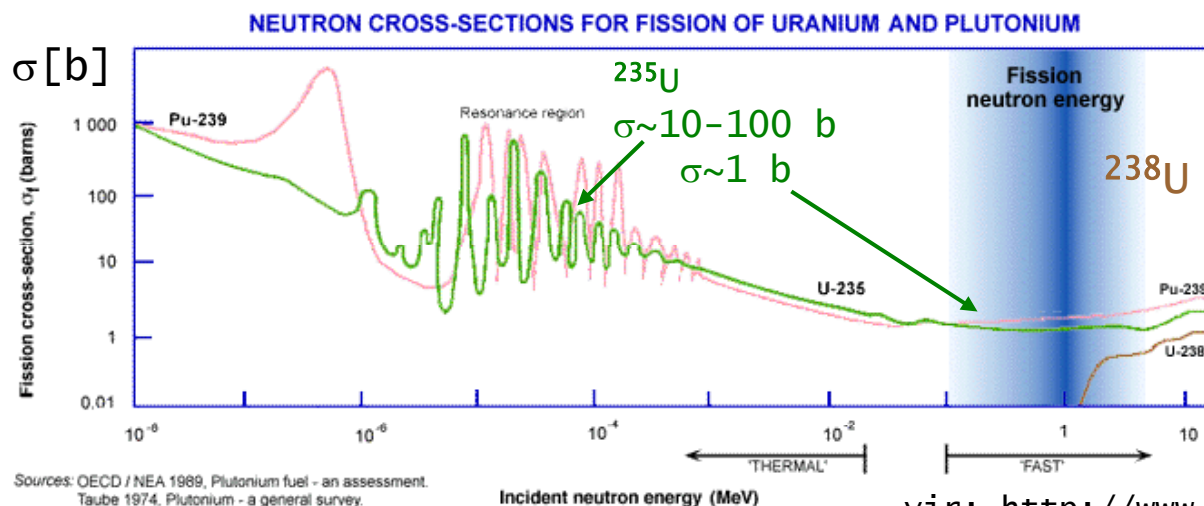
počasen



hitri

$$\langle k \rangle = 2,47$$

$$\langle E_n \rangle \sim 1 \text{ MeV}$$



$$\frac{dN_{reak}}{dt} = \frac{dN_{izs}}{dt} \frac{dN_{tar}}{dS} \sigma$$

dN_{reak}/dt : št. reak. v enoti časa

dN_{izs}/dt : tok izstrelkov

dN_{tar}/dS : ploskovna gostota jeder v tarči

σ : sipalni presek

vir: <http://www.uic.com.au/uicphys.htm>

porebujemo počasne n za cepitev ${}^{235}\text{U}$
 (10-100x večji presek);
 hitri n se absorbirajo na ${}^{238}\text{U}$;

dejstvo, da se pri fisiji sproščajo hitri n,
 ${}^{235}\text{U}$ pa veliko močneje cepijo počasni, je osnova
kontrolirane verižne reakc.

Fizika energijskih virov

I Energijski viri

Izkoriščanje virov, jedrska energija

Fermijevo zlato pravilo:

$$dN/dt \propto |M_{fi}|^2 \rho(E_f)$$

$$\sigma \propto (dN/dt)/j_i \propto |M_{fi}|^2 \rho(E_f)/j_i \propto |M_{fi}|^2 p_f/v_i$$

pri procesih, pri katerih se sprosti večja količina energije (fisija), p_f ni odvisen od hitrosti začetnega projektila, pač pa od drugih faktorjev;

če $|M_{fi}|^2 \sim \text{konst.} \Rightarrow \sigma \propto 1/v_i$

$$|M_{fi}|^2$$

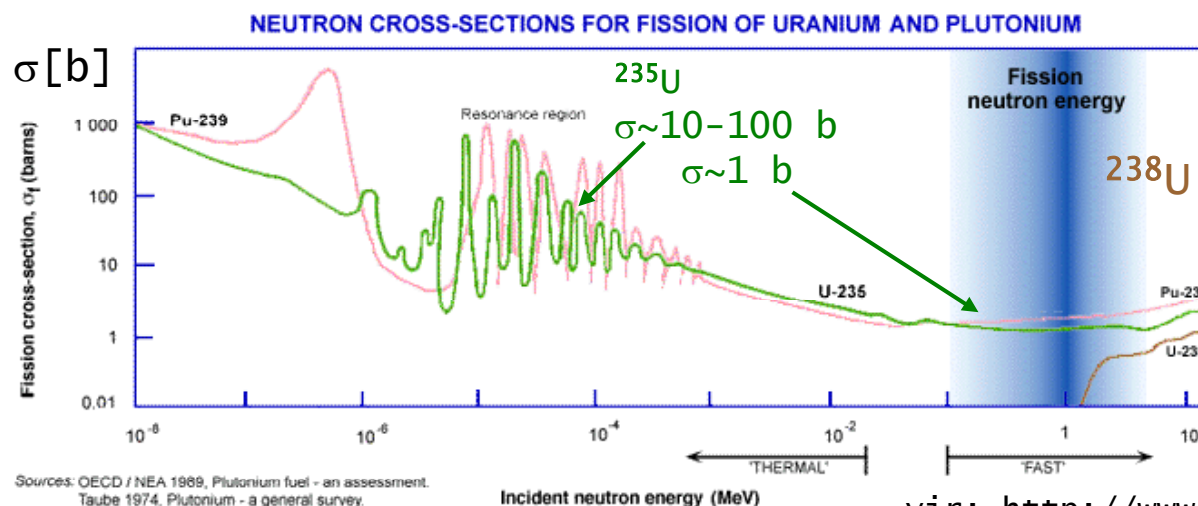
matrični element za $i \rightarrow f$

$$\rho(E_f) \propto d^3p_f/dE_f \propto p_f$$

gostota končnih stanj

$$j_i \propto v_i$$

gostota toka vpadnih delcev

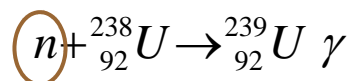


vir: <http://www.uic.com.au/uicphys.htm>

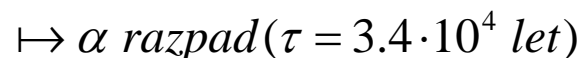
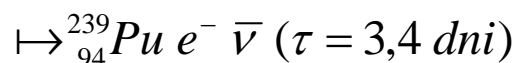
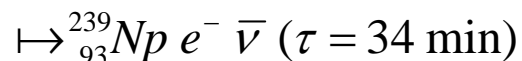
Fizika energijskih virov

I Energijski viri

Izkoriščanje virov, jedrska energija



hitri



če naj se reakcija sama vzdržuje
(v gorivu, ki vsebuje znaten ali
večinski delež ${}^{238}\text{U}$)

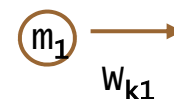
→ nastale n pri cepitvi ${}^{235}\text{U}$
je potrebno upočasniti



moderatorji:

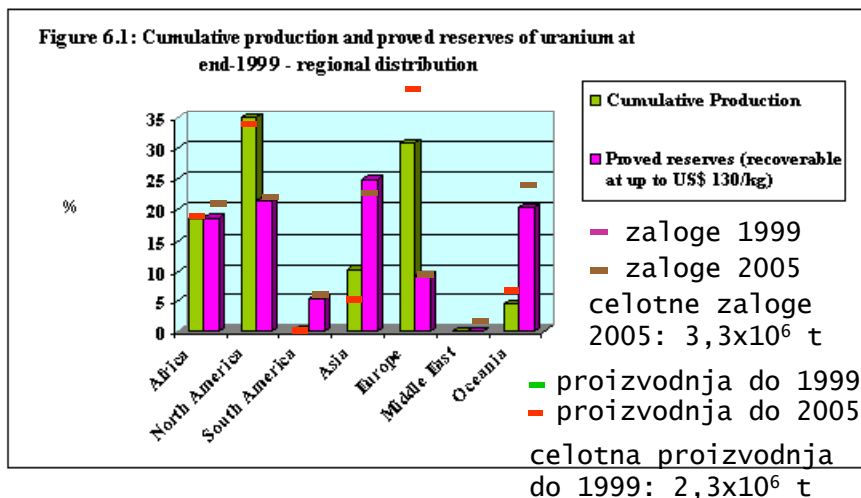
lažja jedra - n ne sprožijo cepitve
in se z elastičnimi trki najhitreje
upočasni
voda, grafit, težka voda....

$$\frac{W'_{k1}}{W_{k1}} = \frac{|1 - m_1 / m_2|^2}{(1 + m_1 / m_2)^2}$$

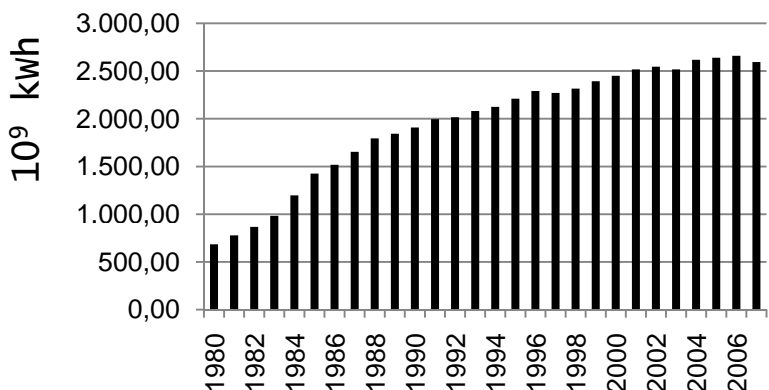


Fizika energijskih virov

I Energijski viri

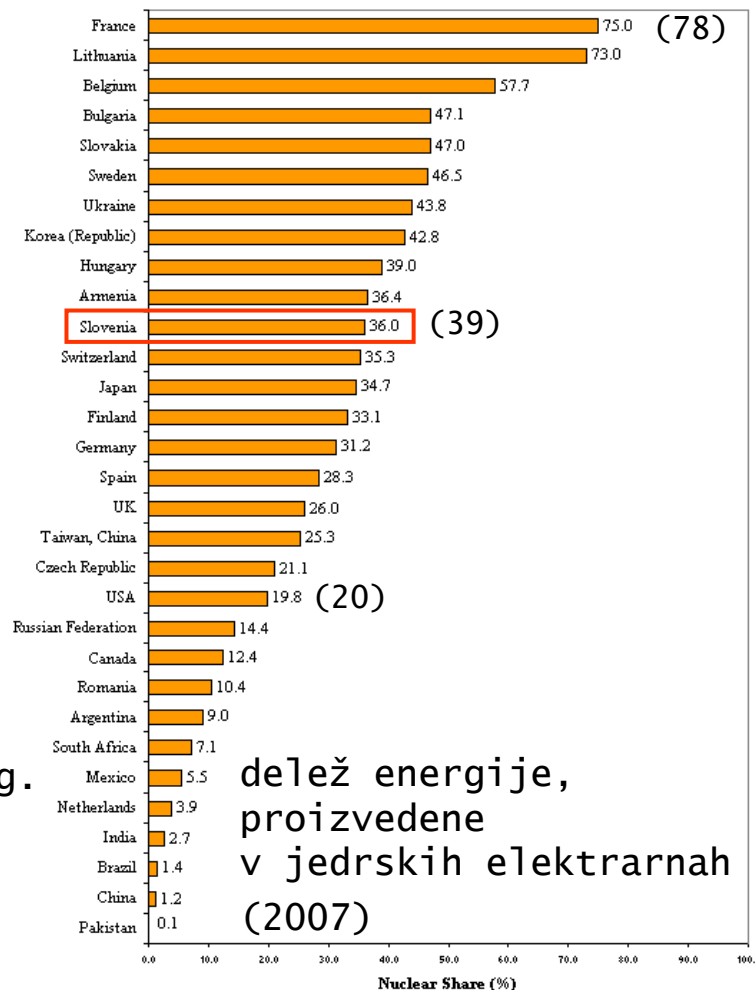


delež proizvodnje in preverjenih zalog u (stroški < 130 USD/kg)



svetovna proizvodna elek. energ. iz jedrske

Figure 6.2: Nuclear Share of Electricity during 1999



delež energije, proizvedene v jedrskih elektrarnah 1999 (2007)

vir: Energy Information Administration, <http://eia.doe.gov/>

in world Energy Council, <http://www.worldenergy.org/wec-geis/publications/reports/ser/overview.asp>

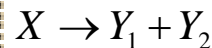
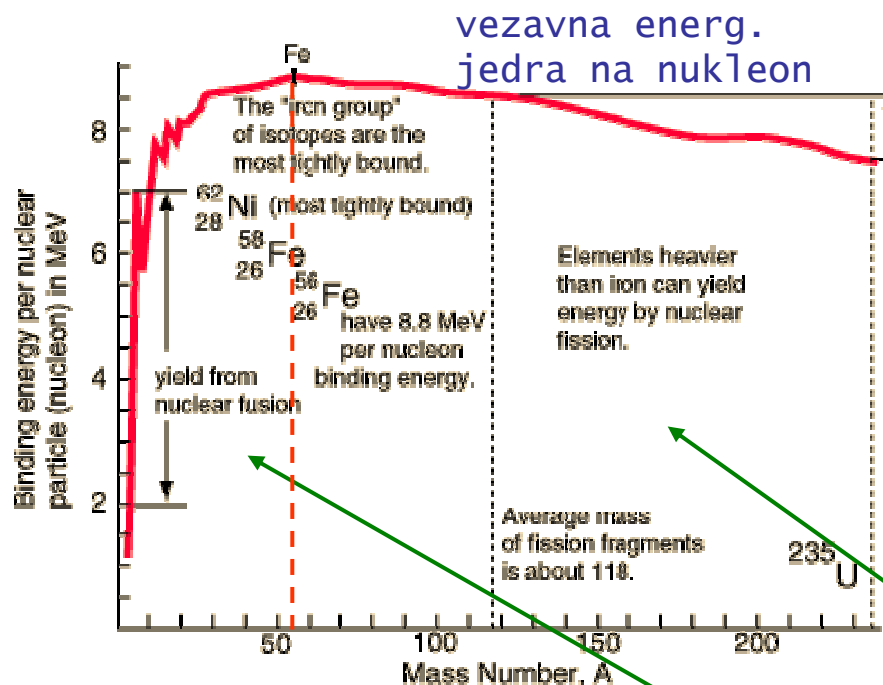
Fizika energijskih virov 2005/06

B. Golob

Fizika energijskih virov

I Energijski viri

Izkoriščanje virov, zlivanje jeder (fuzija)



$$\Delta W = W(Y_1) + W(Y_2) - W(X)$$

$$A(X) \equiv A = A(Y_1) + A(Y_2) \equiv A_1 + A_2$$

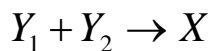
$$\Delta W = (A_1 m_n + A_2 m_n - A m_n) c^2 - W_{vez}(A_1) - W_{vez}(A_2) + W_{vez}(A)$$

$$\Delta W = -W_{vez}(A_1) - W_{vez}(A_2) + W_{vez}(A) = -A_1 \bar{w}_{A1} - A_2 \bar{w}_{A2} + A \bar{w}_A$$

$$\bar{w}_{A1} \approx \bar{w}_{A2} \Rightarrow \Delta W = -(A_1 + A_2) \bar{w}_{A2} + A \bar{w}_A = A(\bar{w}_A - \bar{w}_{A2})$$

$$\bar{w}_A < \bar{w}_{A2} \Rightarrow \Delta W < 0 \text{ energ. se sprosti}$$

$$\Delta W \sim 235 \times (7,5 \text{ MeV} - 8,5 \text{ MeV}) \sim -200 \text{ MeV}$$



$$\Delta W = -W(Y_1) - W(Y_2) + W(X)$$

$$\Delta W = (A_1 + A_2) \bar{w}_{A2} - A \bar{w}_A = A(\bar{w}_{A2} - \bar{w}_A)$$

$$\bar{w}_A > \bar{w}_{A2} \Rightarrow \Delta W < 0 \text{ energ. se sprosti}$$

$$\Delta W \sim 5 \times (2 \text{ MeV} - 5 \text{ MeV}) \sim -15 \text{ MeV}$$

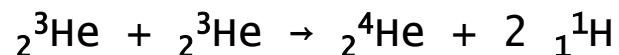
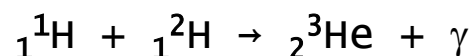
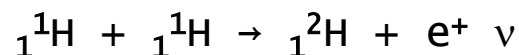
Fizika energijskih virov

I Energijski viri

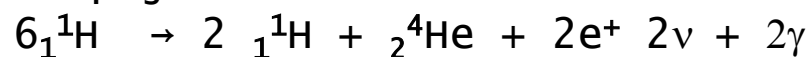
Izkoriščanje virov, zlivanje jeder (fuzija)

energija zvezd

- vodikova veriga:



skupaj:



OZ.

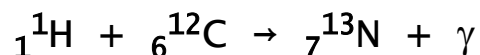


$$\Delta W = -26,7 \text{ MeV}$$

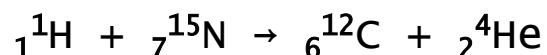
energija zvezd

- ogljikova veriga:

z zlivanjem He in Be nastane ${}_6^{12}\text{C}$,
v gostejših zvezdah ta omogoči



preko nekaj drugih procesov
dobimo ${}_7^{15}\text{N}$ in končno



Fizika energijskih virov

I Energijski viri

Izkoriščanje virov, zlivanje jeder (fuzija)

termična fuzija:

za razliko od fizije nimamo projektilov (n), pač pa imajo jedra termodinamsko porazdelitev kinetične energ.; ta mora zadoščati, da premagajo Coulombov odbojni potencial in se zlijejo

$$\frac{dN}{dv} = \frac{4}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{m}{2kT} \right)^{3/2} v^2 \exp\left(-\frac{mv^2}{2kT} \right)$$

$$\Rightarrow \frac{1}{2} m \langle v^2 \rangle = \frac{3}{2} kT$$

elektrostatska pot. energija dveh p na razdalji 1 fm (tipična dimenzija jeder)

$$e^2/4\pi\epsilon_0 r \sim 1,5 \text{ MeV}$$

\Rightarrow za tako energijo bi morala biti $T \sim 10^{10} \text{ K}$

vendar je pogoj v resnici milejši

Fizika energijskih virov

I Energijski viri

Izkoriščanje virov, zlivanje jeder (fuzija)

povprečje ob
upoštevanju
Maxwellove
porazdelitve

Lawsonov pogoj

zadosten čas moramo
vzdrževati plazmo
(prosti pozitivni ioni
in elektroni) določene
gostote, da pride do
izdatne fuzije jeder

$$\frac{dN_{reak}}{dVdt} = \frac{1}{4} n_1 n_2 \langle v_{12} \sigma \rangle$$

$$\frac{dW_{spro}}{dV} = \frac{1}{4} n_1 n_2 \langle v_{12} \sigma \rangle |\Delta W| \tau$$

$$\frac{dW_{term}}{dV} = (n_1 + n_2) \langle W_k \rangle$$

$$n_1 = n_2 \Rightarrow 2n \langle W_k \rangle = 2n \frac{3}{2} kT$$

$$\frac{dW_{term}}{dV} < \frac{dW_{spro}}{dV}$$

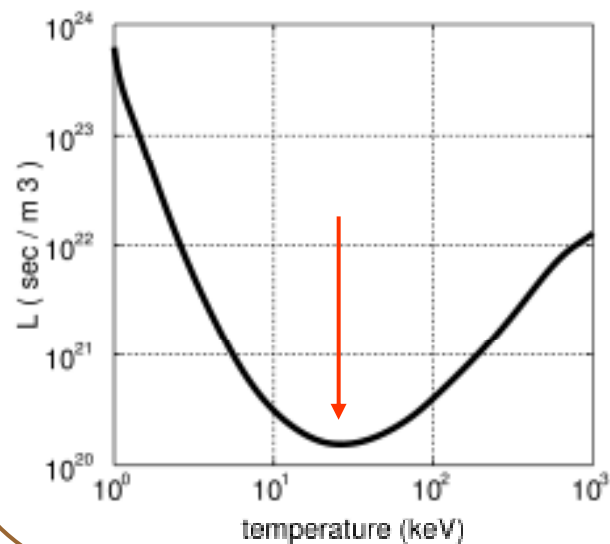
$$3nkT < \frac{1}{4} n^2 \langle v_{12} \sigma \rangle |\Delta W| \tau$$

$$n\tau \geq \frac{12kT}{\langle v_{12} \sigma \rangle |\Delta W|}$$

Fizika energijskih virov

I Energijski viri

Izkoriščanje virov, zlivanje jeder (fuzija)



Lawsonov produkt za
 ${}_1^2\text{H} + {}_1^3\text{H} \rightarrow {}_2^4\text{He} + \text{n}$ $\Delta W = -17,6 \text{ MeV}$

$$n\tau \geq \frac{12kT}{\langle v_{12}\sigma \rangle |\Delta W|}$$

vir: <http://en.wikipedia.org/>

minimum pri T , ki ustreza 25 keV
 $\Rightarrow T \sim 2 \times 10^8 \text{ K}$

$$n\tau > 1,5 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}\text{s}$$

Fizika energijskih virov

I Energijski viri

Izkoriščanje virov, zlivanje jeder (fuzija)

v zanimivem temperaturnem območju
je $\langle v_{12} \sigma \rangle = \kappa T^2$;

sledi modificiran Lawsonov
pogoj (trojni produkt)

$T^2 / \langle v_{12} \sigma \rangle$ ima maksimum nekoliko
višje kot $T / \langle v_{12} \sigma \rangle$

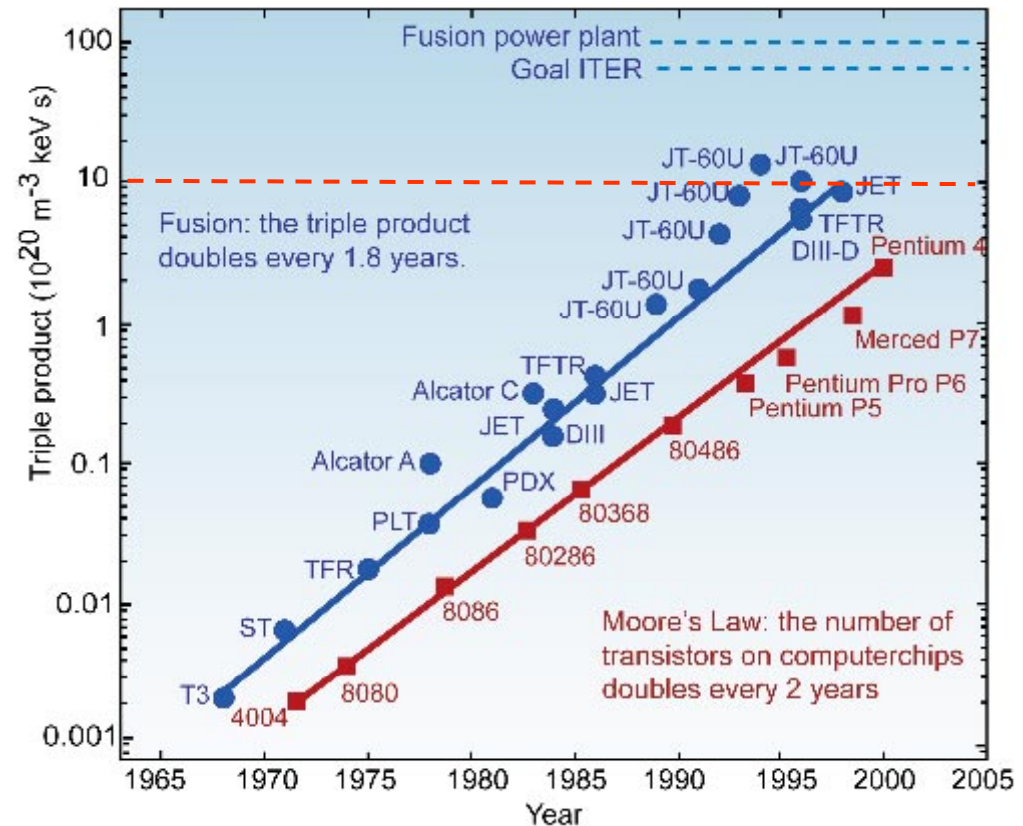
$nT\tau > 10^{21} \text{ keV m}^{-3}\text{s}$

$$\frac{dN_{reak}}{dVdt} = \frac{1}{4} n_1 n_2 \langle v_{12} \sigma \rangle$$
$$\frac{dW_{spro}}{dV} = \frac{1}{4} n^2 \kappa T^2 |\Delta W| \tau$$
$$nT\tau \geq \frac{12kT^2}{\langle v_{12} \sigma \rangle |\Delta W|}$$

Fizika energijskih virov

I Energijski viri

Izkoriščanje virov, zlivanje jeder (fuzija)



vir: EFDA, http://www.efda.org/fusion_energy/fusion_research_today.htm