

# Jedrska tehnika in energetika

Reaktorska fizika

Reaktorska kinetika

Prenos toplote

Procesi in sistemi v jedrskih elektrarnah

Regulacije in instrumentacija

Jedrska in sevalna varnost

Gorivni krog

Odpadki in razgradnja

Nove tehnologije

literatura:

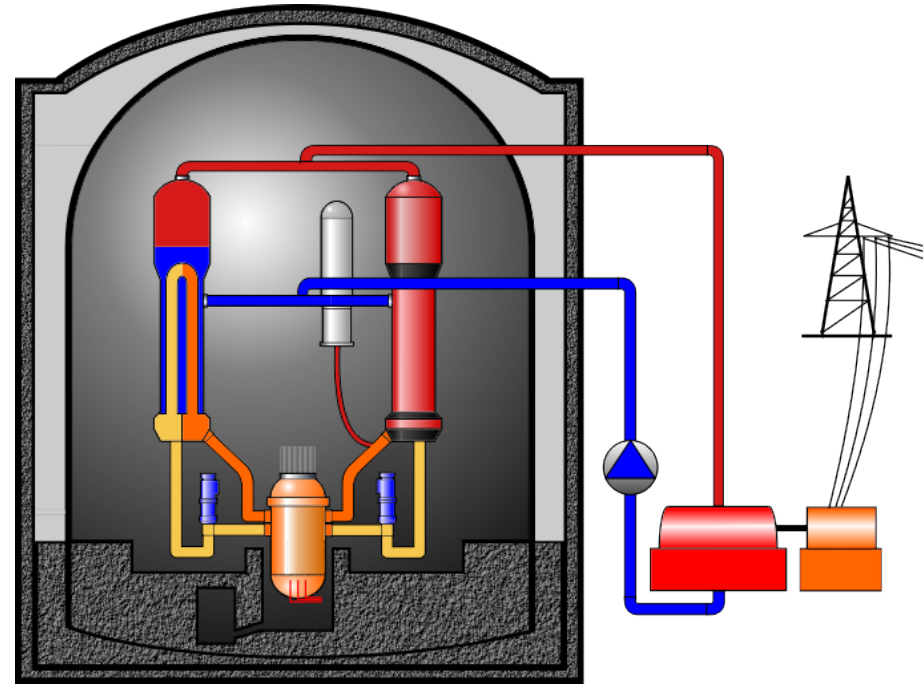
**Knief, Nuclear Engineering: : Theory and Practice of Commercial Nuclear Power, 1992 (2008 - 2nd Edition) – Poglavja 1-8.**

**Lamarsh, *Introduction to Nuclear Engineering*, 1975, 3rd edition - 2001**

Poglavja 1-3 - znana iz Moderne fizike (**Strnad, Fizika IV**)

Brez pogl. 5 in 6 - Reaktorska in radiacijska fizika - izbirni predmet letnega semestra  
3. I. fizika

**Kuščer, Žumer, Toplota - Poglavje Termodinamika**



# Znani pojmi

gostota nevtronov	N
gostota jeder	n
hitrost nevtronov	v
mikroskopski presek za sipanje, absorbcijo, fisijo...	$\sigma$
makroskopski presek	$\Sigma = \sigma n$ ( $m^{-1}$ )
nevtronski fluks	$\Phi = N v$ (nevtronov/ $m^2/s$ )
povprečna prosta pot nevtrona	$1/\Sigma$

hitrost reakcije (št. reakcij na enoto časa) =  $(N v dS) (n \sigma dx)$      $dS$  presek tarče,  $dx$  - debelina tarče  
 =  $(N v) (n \sigma) dV$     jedra se v tarči ne prekrivajo  
 =  $\Phi \Sigma dV$

## radioaktivni razpadi

razpadna konstanta	$\lambda (s^{-1})$
aktivnost	$A = \lambda n(t)$ (razpadi/s= Becquerel [Bq]) 1 Curie [Ci] = $3.7 \times 10^{10}$ Bq $dn/dt = -\lambda n$ ; $n(t) = n_0 \exp(-\lambda t)$
razpolovni čas	$T_{1/2} = \ln 2 / \lambda$

		$T_{1/2}$
U	232	70 let
	233	160 000 let
	<b>234</b>	<b>250 000 let</b>
	<b>235</b>	<b>700 000 000 let</b>
	236	23 000 000 let
	<b>238</b>	<b>4 500 000 000 let</b>
PROBLEMATIČNI FISIJSKI PRODUKTI		
	Stroncij-90	29 let
	Cezij-137	30 let

# Jedrska fizika - osvežitev

Semi-empirična masna enačba opisuje maso jedra z masnim številom  $A$  in vrstnim številom  $Z$ :

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

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

$W_{vez}$  - vezavna energija - se sprosti pri nastanku jedra

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

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

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

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

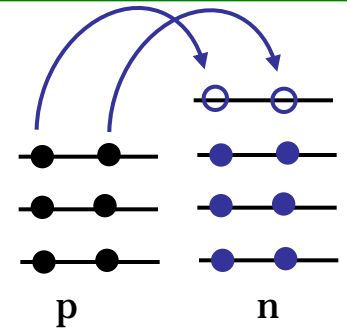
$$w_4 = 12 \text{ MeV}$$

povprečna vez. energ. na nukleon \* št. nukleonov

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

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

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

$$\delta(A, Z) = \begin{cases} -1 & \text{sodo - sodo} \\ 0 & \text{sodo - liha} \\ +1 & \text{liho - liha} \end{cases}$$

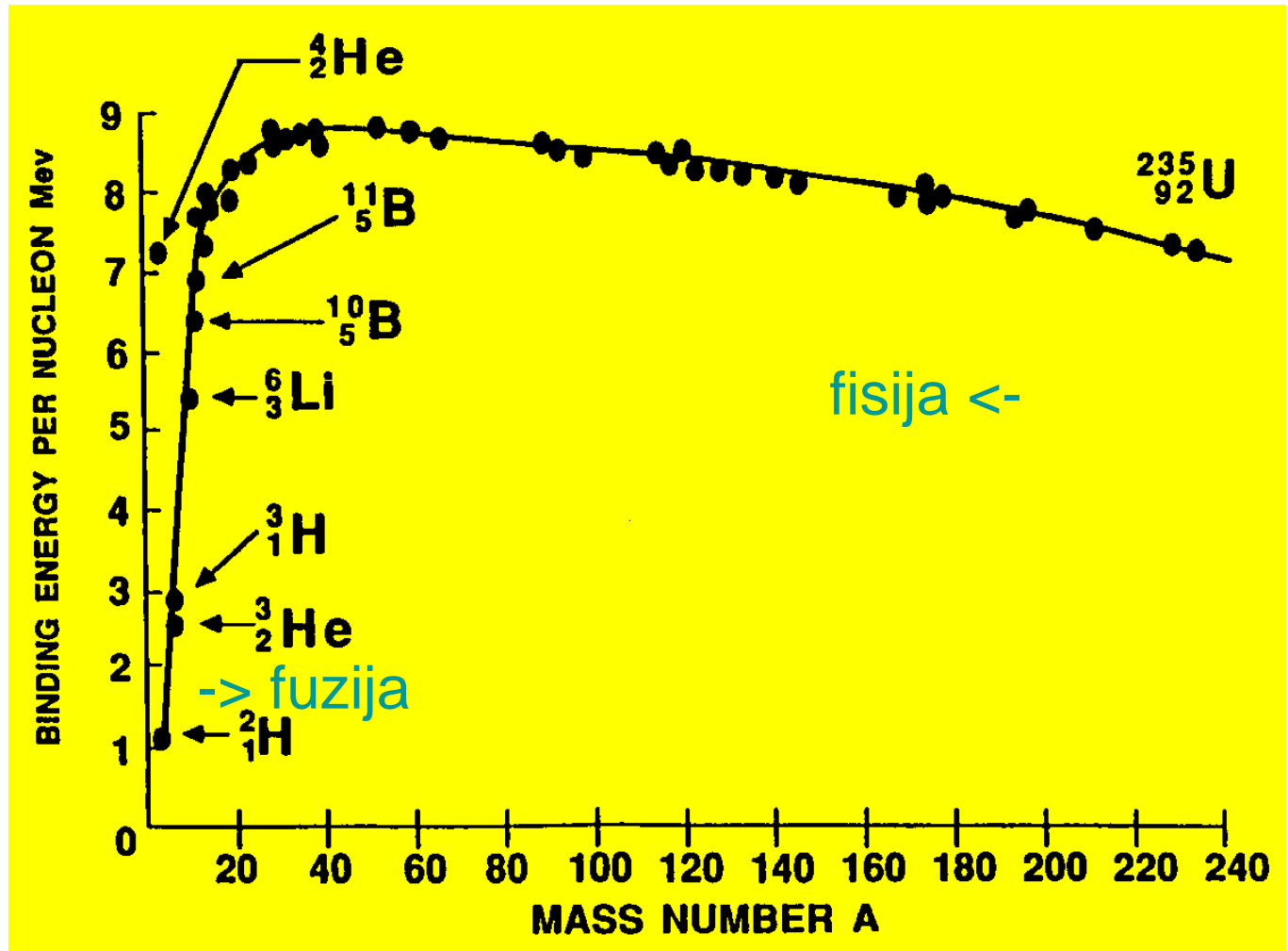
# Vezavna energija/nukleon

Kandidati za fisijo z nizko energijskimi nevtroni:

$^{235}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  
 $^{241}\text{Pu}$ ,  $^{233}\text{U}$  -  
umetni

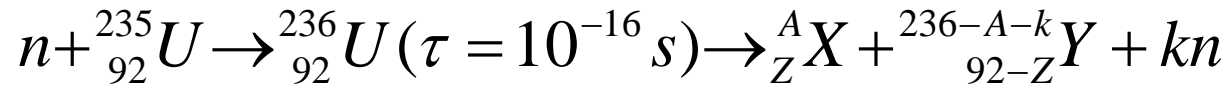
Pri zajetju nevtrona z zanemarljivo  $W_k$  se sprosti energija parjenja ( $\sim w_4 \delta / A^{1/2}$ )

Ostala težka jedra zahtevajo večjo energijo.



# fisija - nevtroni - energija

nevtroni ne občutijo elektrostatskega odboja → lahko prodrejo v jedro



$\langle k \rangle = 2,47$   
 $\langle E_n \rangle \sim 2 \text{ MeV}$   
 hitri nevtroni

$\langle E_n \rangle \sim 0.025 \text{ eV}$

počasen (termični) nevtron  $\sim 2.2 \text{ km/s}$

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

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

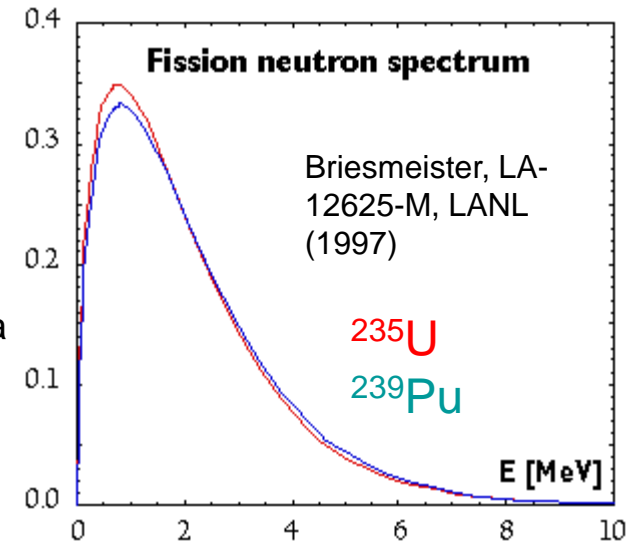
$W_k$ : skupna kinetična energija  
 končnih jeder in n

št. nukleonov v začetnem in končnem stanju je enako

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

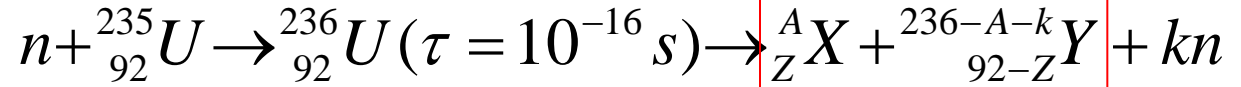
(primer  $A=120, Z=45$ )

$$-1794 \text{ MeV} + 993 \text{ MeV} + 993 \text{ MeV} \sim 200 \text{ MeV}$$



Porazdelitev sproščene energije:	
razcepki	165 MeV
nevtroni	5 MeV
$\gamma$ (fisija+zajetje)	12 MeV
zaostali $\beta, \gamma$	15 MeV
antinevtrini	(10 MeV)

# Razcepki fisije



razcepki v JT:

- sproščanje zaostale toplote zaradi nestabilnosti

razcepkov:

$$P(t) \approx P_0 \cdot 0.066 [t^{-0.2} - (t + t_0)^{-0.2}]$$

$P_0$  - topl. moč reaktorja med delovanjem

$t$  - čas od zaustavitve reaktorja (s)

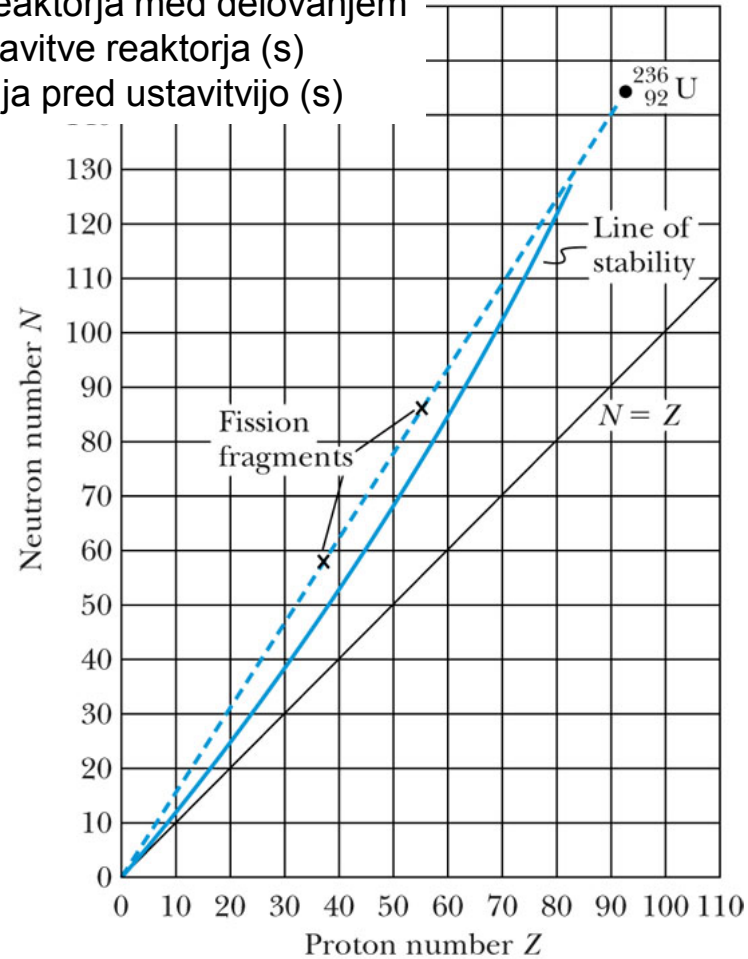
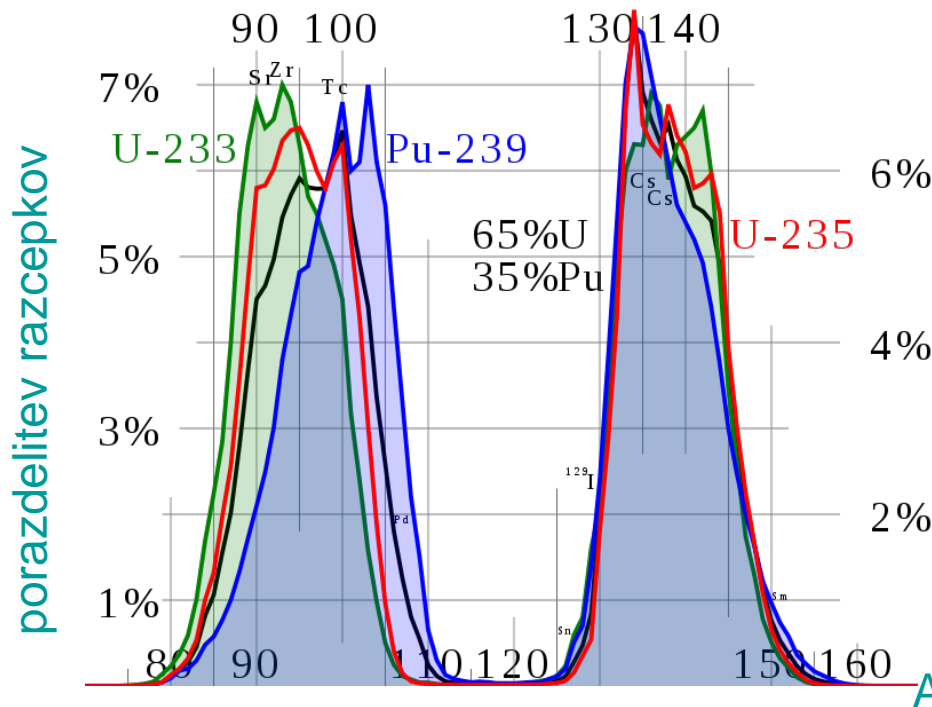
$t_0$  - čas delovanja pred ustavitvijo (s)

- radioaktivnost goriva

- zakasneli nevtroni

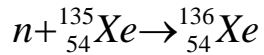
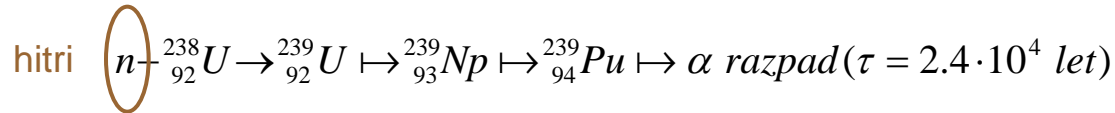
- nekateri razcepki močno absorbirajo nevtrone

( ${}^{135}\text{Xe}$ ,  ${}^{145}\text{Sm}$ )

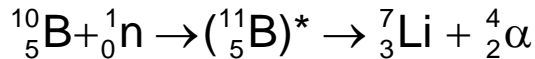


# Ostale jedrske reakcije nevtronov

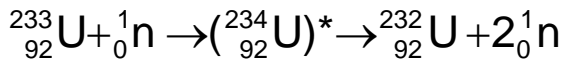
zajetje:



presek za zajetje term. nevtrona  $\sim 2\text{-}3 \cdot 10^6$  barn



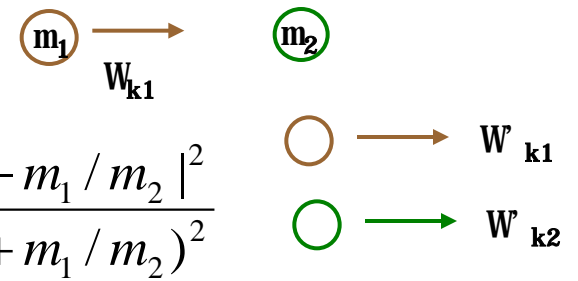
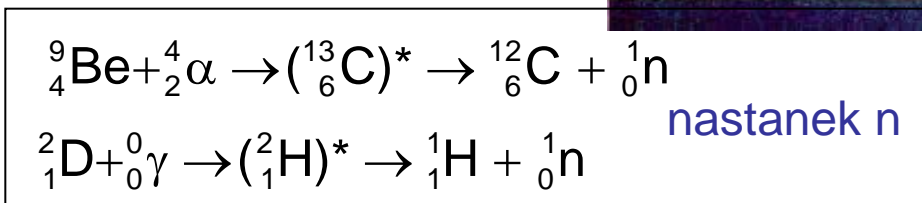
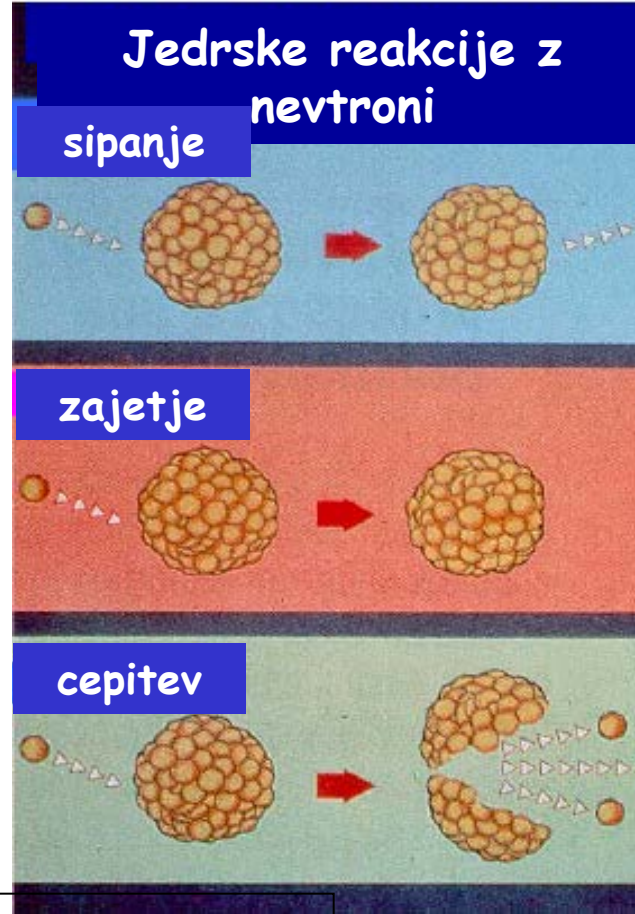
presek za zajetje term. nevtrona  $\sim 4000$  barn



sipanje:

moderatorji:

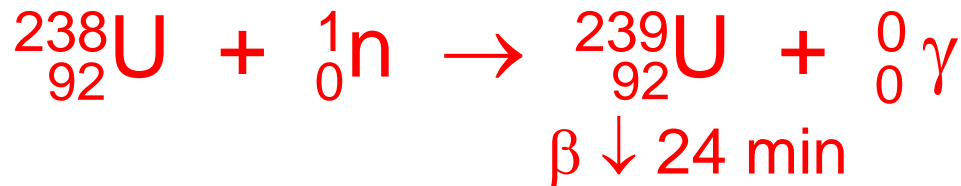
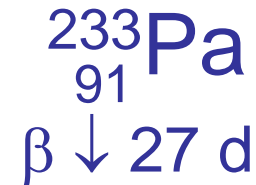
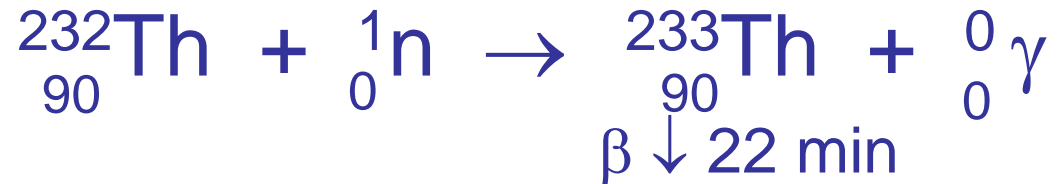
lažja jedra – n ne sprožijo cepitve in se z elastičnimi trki najhitreje upočasnijo  
voda, grafit, težka voda....



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

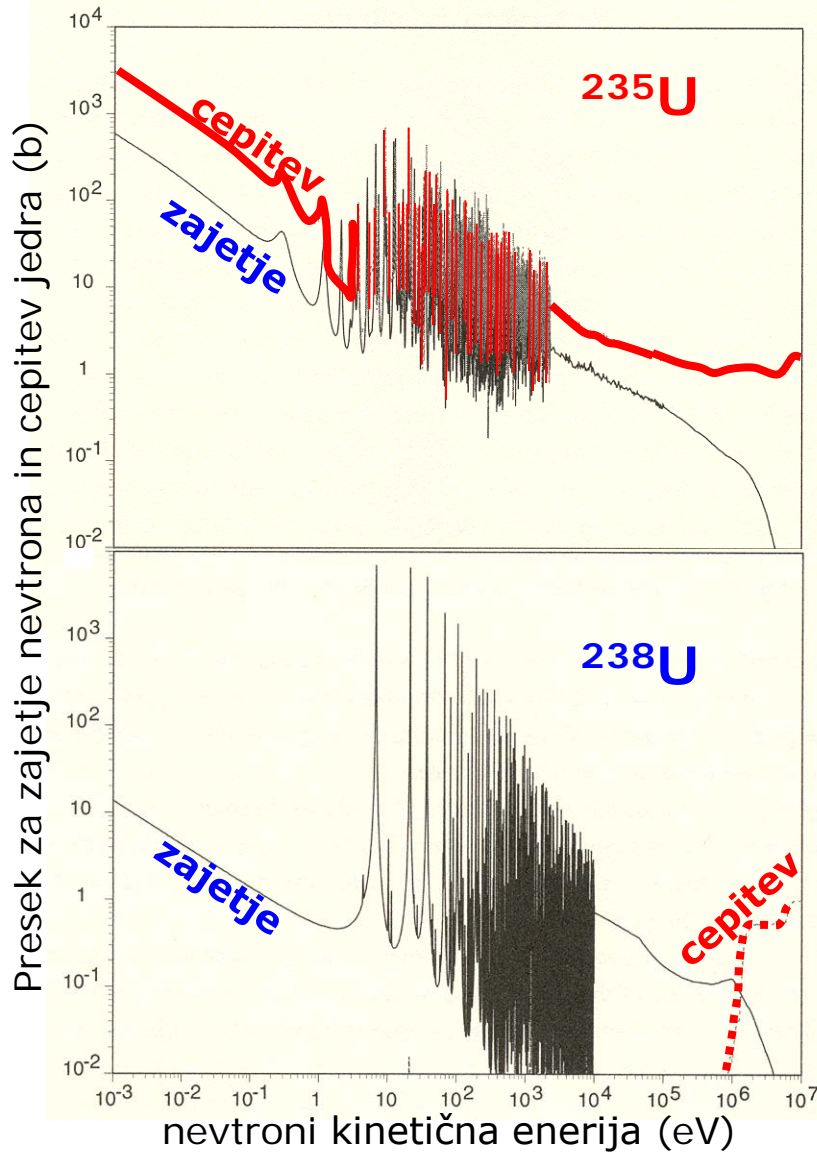
# Zajetje => gorivo (oplodni reaktor)

$^{232}\text{Th}$     $^{238}\text{U}$     $^{240}\text{Pu}$





# Presek za zajetje n in cepitev

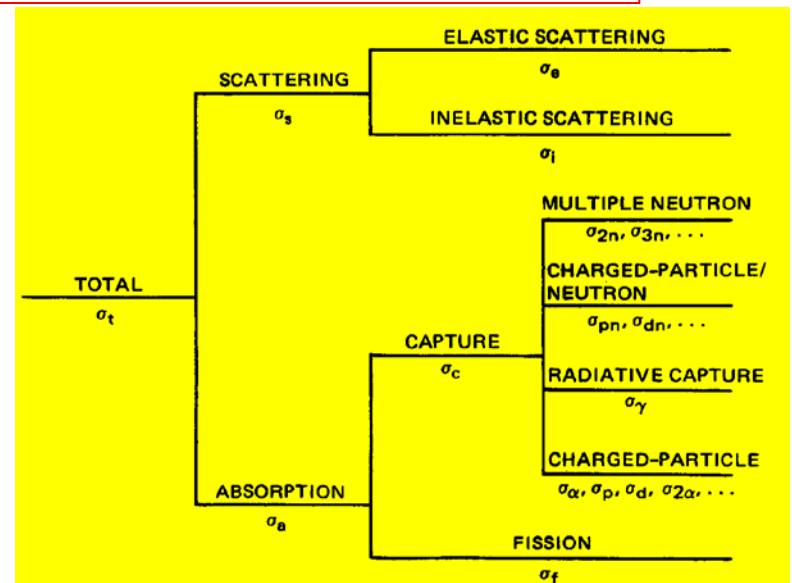


Naravni U: 99.3%  $^{238}\text{U}$ , 0.7%  $^{235}\text{U}$

Presek za cepitev

$^{238}\text{U}$ :  $\sigma_f \sim 1 \text{ b}$  za  $E_n > 1 \text{ MeV}$   
 $\approx 0 \text{ b}$  za  $E_n < 1 \text{ eV}$   
 pretežno: sipanje ( $\sim 8\text{b}$ ) + zajetje

$^{235}\text{U}$ :  $\sigma_f \sim 1 \text{ b}$  za  $E_n > 1 \text{ MeV}$   
 $\sim 1000 \text{ b}$  za  $E_n < 1 \text{ eV}$



# Kontrolirana verižna reakcija

December 1942 - Fermi, Chicago Pile CP-1

- 37 ton  $\text{UO}_2$ , 6 ton kovinskega urana,
- 350 ton grafita,
- 8m premer, 6 m višina,
- 0.5 W moč,
- kadmijeve regulacijske palice,
- detektor sevanja,
- 2 "varnostna sistema"

<https://netfiles.uiuc.edu/mragheb/www/NPRE%20402%20ME%20405%20Nuclear%20Power%20Engineering/First%20Human%20Made%20Reactor%20and%20Birth%20of%20Nuclear%20Age.pdf>



kladivo

# Kontrolirana verižna reakcija - pred Fermijem

## Oklo - Gabon (danes rudnik urana)

16 "reaktorjev"

Pred 2 milijardama let - delovali so več stotisoč let

Moč ~100 kW

1972 - Francozi ugotovijo "premajhen" delež  $^{235}\text{U}$  v rudi.

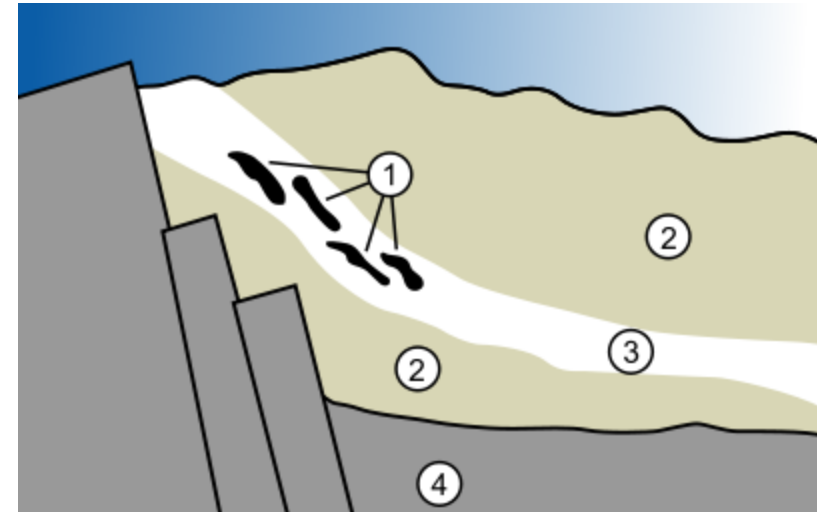
(do min 0.44% namesto 0.72%, kot v drugih rudah na planetu)

**Razcepki** - so ostali nekaj cm od "reaktorjev"

### Delovanje:

Moderator - podtalnica - reaktor deluje ~30 minut - reaktor se segreje, voda izhlapi, moderator izgine in reaktor se ustavi. Po ~2 urah in pol se reaktor dovolj ohladi, da se cikel začne znova.

Kolikšen je bil delež  $^{235}\text{U}$  v naravnem uranu pred 2 milijardama let? (razpolovni čas  $^{235}\text{U}$ :  $7 \cdot 10^8$  let,  $^{238}\text{U}$ :  $4.5 \cdot 10^9$  let)



1. reaktorji, 2. peščenjak, 3. uranova ruda  
4. Granite

vir: Wikipedia



Gorivo za fisijo - težka sodo-liha jedra:



za fisijo zadošča nevtron z zelo majhno energijo.

Prednost nizko energijskih nevtronov ( $\sim\text{eV}$ ) v primerjavi z nevtroni, ki nastanejo pri fisiji (energija  $\sim\text{MeV}$ ):

$\sim 1000$  krat večji presek za fisijo.

Fisija z nevtroni z energijo MeV: potrebna visoka obogatitev goriva ( $\sim 15\text{-}35\%$ ):

potreben velik delež  $^{235}\text{U}$  in  $^{239}\text{Pu}$  v primerjavi z  $^{238}\text{U}$

Fisija s termični nevtroni - možna uporaba naravnega ali nizko obogatenega urana:

Kako upočasniti 2 MeV nevtrone, ki nastanejo pri fisiji na  $\sim 0.025\text{ eV}$ ?

# Moderatorji - upočasnjevanje nevtronov

velik sipalni, majhen absorpcijski presek: H<sub>2</sub>O, D<sub>2</sub>O, C, BeO

Moderator	agreg. stanje	$\alpha$	št. trkov od E=2 MeV do 0.025 eV	$\Sigma_a$ (m <sup>-1</sup> )	$\Sigma_s$ (m <sup>-1</sup> )	fisija naravnega U
H <sub>2</sub> O	tekoče	0 (H)	20	2.2	344.	NE
D <sub>2</sub> O	tekoče	0.111 (D)	35	0.0044	45,2	DA
C (grafit)	trdno	0.716	114	0.027	38.1	DA
BeO	trdno	0.64 (Be)	86 (Be)	0.11	75.9	DA

$$\alpha = \frac{W_{kn-PO}}{W_{kn-PRED}} = \frac{|1 - m_n / m_{jedro}|^2}{(1 + m_n / m_{jedro})^2}$$

vir: Lamarsh, Baratta

Naravni uran:	Prospevek k aktivnosti 1g naravnega U	
<sup>238</sup> U	99.275%	12000 Bq
<sup>235</sup> U	0.72%	600 Bq
<sup>234</sup> U	0.0054%	12000 Bq

Nevtroni v reaktorju - enostavna slika:

Pomnoževalni faktor- razmerje med številom nevtronov v n-ti in n+1 generaciji.  $k = 1$

V neskončnem reaktorju:

$$k_{\infty} = \epsilon p f \eta$$

V realnem reaktorju:

$$k = k_{\infty} P_f P_t$$

(št. hitrih n, nastalih pri cepitvi z nevtroni vseh energij)  
 $\epsilon = \frac{\text{št. hitrih n, nastalih pri cepitvah s termičnimi n}}{\text{št. hitrih n, nastalih pri cepitvi z nevtroni vseh energij}}$

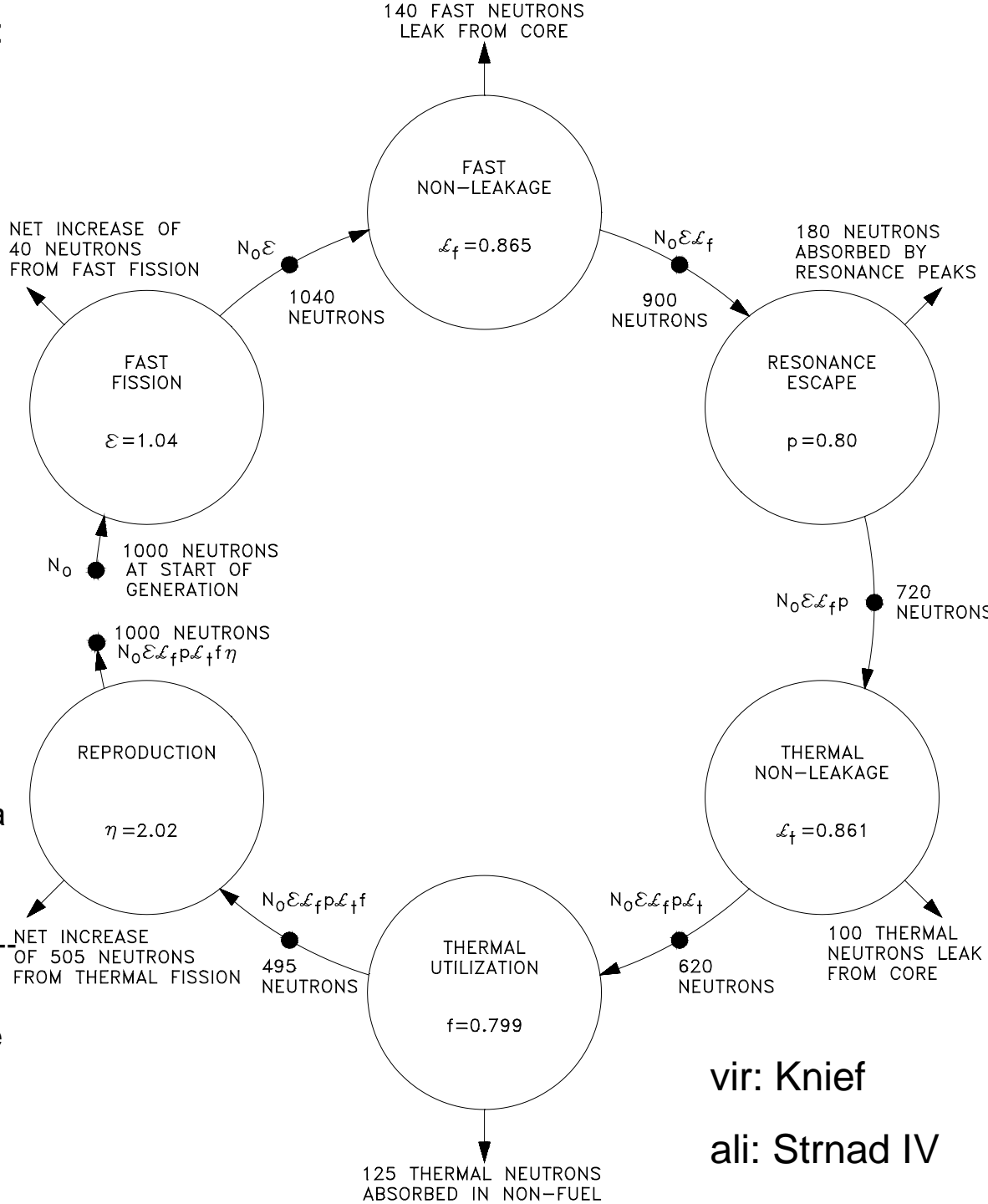
$p$  - verjetnost za pobeg resonančni absorpciji pri zaviranju nevtronov

$f$  - verjetnost, da se termični n NE absorbira v jedrih, moderatorju, strukturah sredice

(št. hitrih n, nastalih pri cepitvi s term. n)  
 $\eta = \frac{\text{št. hitrih n, nastalih pri cepitvi s term. n}}{\text{št. term. n, ki se absorbirajo v gorivu}}$

$P_f$  - verjetnost, da hiter nevtron ne pobegne iz reaktorja

$P_t$  - verjetnost, da termičen nevtron ne pobegne iz reaktorja



vir: Knief  
 ali: Strnad IV

# Časovne spremembe v reaktorju (reaktorska kinetika)

življenski čas nevtronov:

termični nevtroni:  $l_p \sim 10^{-5} - 10^{-3} \text{ s}$

hitri:  $\sim 10^{-7} \text{ s}$  ("fast reactor" - oplodni reaktor na hitre nevtrone)

$$\frac{dN(t)}{dt} = \frac{\rho}{l_p} N(t)$$

$$\rho = \frac{k-1}{k}$$

reaktivnost: relativni prirastek št. nevtronov v eni generaciji

Pri majhni spremembi pomnoževalnega faktorja  $k=1 \rightarrow k=1.001$ , ter povprečnem življenjskem času nevtronov  $l_p=10^{-4} \text{ s}$ , se število nevtronov in moč reaktorja v 1 sekundi poveča za

$N(t=1\text{s}) = N_0 e^{\frac{\rho}{l_p} t} = N_0 e^{10} \approx 22000$  krat... Takšnega reaktorja ni mogoče nadzorovati...

**Reaktivnost** - brezdimenzijska količina - "enote"

$$\frac{\Delta k}{k} \quad \% \frac{\Delta k}{k} \quad 1 \text{ pcm} = 10^{-5} \frac{\Delta k}{k} \quad \rho[\$] = \frac{\Delta k}{k} / \beta_{\text{eff}}$$

$\beta_{\text{eff}}$  definiran 2 prosojnici naprej

tipične spremembe reaktivnosti med delovanjem reaktorja:  $10^{-3}$

Regulacijske palice padejo v reaktor  $-0.08$  ( $\Delta k/k$ ), boriranje primarne vode od 0 na 2000 ppm Bora  $\sim -0.2$ , gorljivi strupi v novem gorivu  $-0.06$ . Sveže gorivo  $+0.24$ ...

## Zakasneli nevtroni pri cepitvi $^{235}\text{U}$

6 glavnih skupin:

$T_{1/2}$  - razpolovni čas prednika

$\lambda_i$  - razpadna konstanta prednika

$\beta_i$  - delež zakasnelih nevtronov

skupine  $i$  v celotnem št. nastalih

nevtronov na cepitev

$T_{1/2}$ (s)	$\lambda_i$ (s <sup>-1</sup> )	$\beta_i$	E( keV)
55.72	0.0124	0.000215	250
22.72	0.0305	0.001424	560
6.22	0.111	0.001274	405
2.30	0.301	0.002568	450
0.61	1.14	0.000748	-
0.23	3.01	0.000273	



# Časovne spremembe v reaktorju z zakasnelimi nevtroni

življenski čas nevtronov:

termični  $l_p \sim 10^{-5} - 10^{-3} \text{ s}$

zakasneli

$$l_d = \frac{1}{\lambda_{eff}} = \frac{\sum_{i=1,6} \beta / \lambda_i}{\sum_{i=1,6} \beta} \approx 13 \text{ s}$$

$$\frac{dN(t)}{dt} = \frac{\rho - \beta}{l_p} N(t) + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i(t)$$

$$\frac{dC_i(t)}{dt} = -\lambda_i C_i(t) + \frac{\beta_i}{l_p} N(t)$$

enačba za število nevtronov z upoštevanjem zakasnelih nevtronov

$C_i(t)$  - koncentracija razcepkov, ki ob razpadu oddajo zakasneli nevtron

Kako se pri spremembi pomnoževalnega faktorja  $k=1 \rightarrow k=1.001$ , ter povprečnem življenjskem času takojšnjih nevtronov tlačnovodnega reaktorja  $l_p=2.5 \cdot 10^{-5} \text{ s}$  spreminja število nevtronov in moč reaktorja, če vseh 6 skupin zakasnelih nevtronov aproksimiramo kot eno samo skupino z  $\beta_{eff}=0.0068$  in  $\lambda_{eff}=0.088/\text{s}$ ?

Kakšna je sprememba pri  $k=1 \rightarrow k=1.01$ ?

# Boltzmannova - transportna enačba

splošna enačba za opis transporta nevtronov

$$\frac{1}{v} \frac{d\phi(\vec{r}, E, \vec{\Omega}, t)}{dt} + \vec{\nabla} \cdot \vec{\Omega} \phi(\vec{r}, E, \vec{\Omega}, t) + \Sigma_T(\vec{r}, E) \phi$$
$$= S(\vec{r}, E, \vec{\Omega}, t) + \int dE' \int \Sigma_S(\vec{r}, E' \rightarrow E, \vec{\Omega}' \rightarrow \vec{\Omega}) \phi(\vec{r}, E', \vec{\Omega}', t) d\vec{\Omega}'$$

$$\phi(\vec{r}, E, \vec{\Omega}, t)$$

kotni fluks nevtronov z energijo med  $E$  in  $E+dE$  in smerjo med  $\vec{\Omega}$  in  $\vec{\Omega}+d\vec{\Omega}$

$\Sigma_T(\vec{r}, E)$  makroskopski totalni presek

$$\Sigma_S(\vec{r}, E' \rightarrow E, \vec{\Omega}' \rightarrow \vec{\Omega})$$

makroskopski diferencialni sipalni presek, ki popisuje sipanje nevtronov od energije  $E'$  k  $E$  in od kota  $\vec{\Omega}'$  v kot  $\vec{\Omega}$ .

V praksi se rešuje poenostavljene oblike te enačbe, npr.:

- stacionaren reaktor (porazdelitev nevtronov v sredici reaktorja)
- časovne spremembe v neskončnem izotropnem in homogenem reaktorju...
- zanemaritev porazdelitve fluksa po energijah ali delitev nevtronov po energijah v nekaj energijskih grup

Presega okvir JTE, podrobnosti pri predmetu Radiacijska in reaktorska fizika

# Kaj še vpliva na nevtronski fluks v reaktorju?

Oblika reaktorja - pobeg nevtronov

predpostavimo, da imajo vsi nevtroni enako energijo:

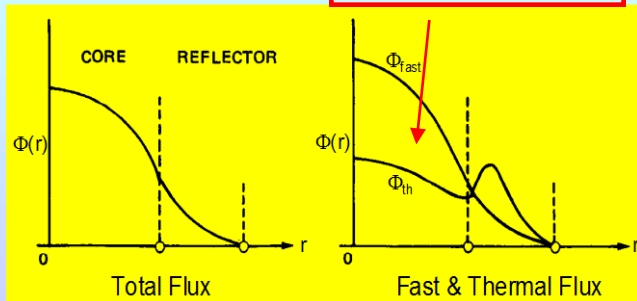
$$\frac{1}{v} \frac{d\Phi}{dt} = \nu \Sigma_f \Phi - \Sigma_a \Phi - D \nabla^2 \Phi$$

↑  
produkcija

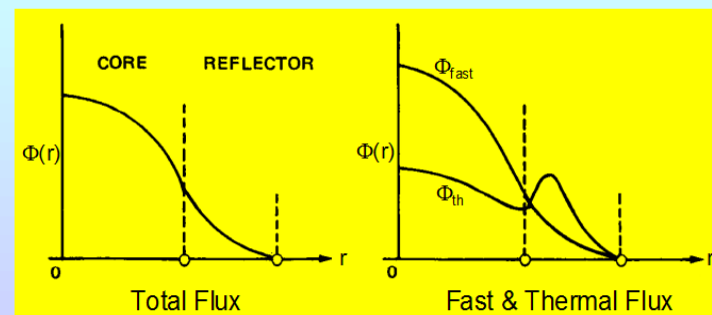
↑  
absorbicija

↑  
difuzija nevtronov -pobeg

## Water Reflector Effect on Neutron Flux



## Water Reflector Effect on Neutron Flux



# Kaj še vpliva na nevtronski fluks?

Spremembe temperature ter gostote goriva in moderatorja

$$\alpha(T_i) = \frac{\partial \rho}{\partial T_i} \quad (\rho = \Delta k/k - \text{reaktivnost})$$

$T_i \rightarrow T_f$  koeficient temperature goriva (Dopplerjev koef.- širjenje resonančnih vrhov z višanjem T) - negativen, če je v gorivu do ~20%  $^{235}\text{U}$ , drugače lahko pozitiven (NEK  $\sim 10^{-4}/\%$  moči reaktorja)

$T_m$  koef. temperature moderatorja - največkrat negativen - večja  $T_m$  pomeni slabšo moderacijo (omejuje količino bora v hladilu tlačnovodnih reaktorjev - preveč bora, ki absorbira nevtrone, ob povečanju T vode pomeni manj bora in manj absorbcije) ( $\sim 1-7 \cdot 10^{-4}/\text{K}$ )

$f_v$  koef. volumskega deleža pare - negativen (BWR)

koef. moči reaktorja - upošteva vsoto vseh zgornjih prispevkov:

$$\alpha_P = \frac{\partial \rho}{\partial P} = \sum \frac{\partial \rho}{\partial T_i} \frac{dT_i}{dP} = \sum \alpha_i \frac{dT_i}{dP}$$

**Naj bo VEDNO negativen!**

**(Černobil - v določenih pogojih je koef. moči RBMK reaktorja pozitiven - pred nezgodo je reaktor deloval v takšnem "prepovedanem" območju)**

Kaj še vpliva na nevtronski fluks?

## regulacijski sistemi

- spreminjanje količine goriva (CANDU)

- absorbcija (večina reaktorjev):

regulacijske palice (Ag, indij, kadmij),

nevtronski strupi v hladilu,

borova kislina v hladilu

tlačnovodnega reaktorja

gorljivi strupi

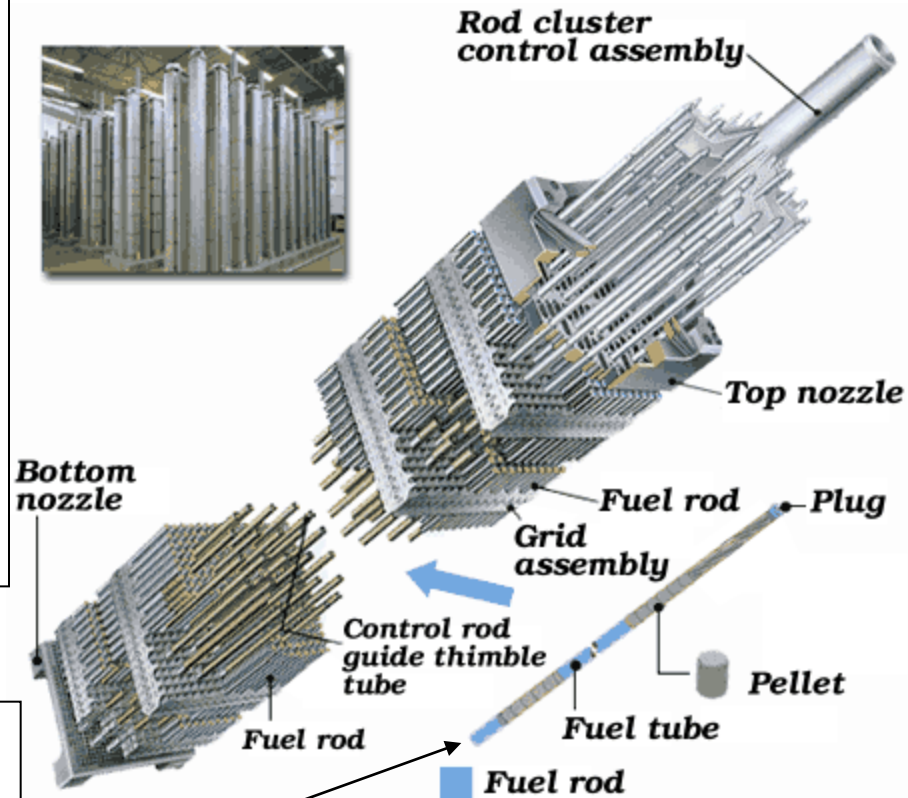
maks. koncentracija bora v hladilu ni dovolj, če je gorivo novo. V gorivo se doda "strupe" (borove spojine)

- sprememba geometrije (načrtovanje sredice)

### Gorivna palica PWR:

~ 4 m dolga cev premera ~1 cm, običajno iz Cirkonija (Zr - podobna trdnost kot Fe, bistveno manjši  $\sigma_a$ ). Napolnjena s tabletkami keramičnega  $UO_2$  in zaprta.

tlačnovodni reaktor (PWR)  
gorivni element in regulacijska  
palica: 4 m x 21 cm x 21 cm



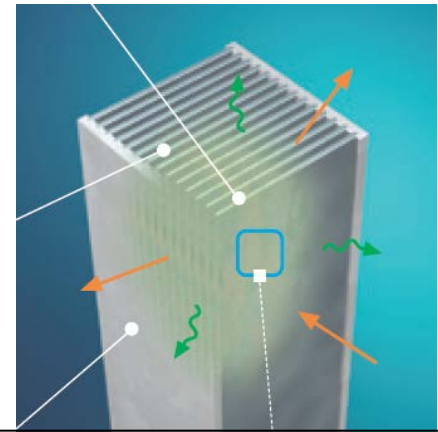
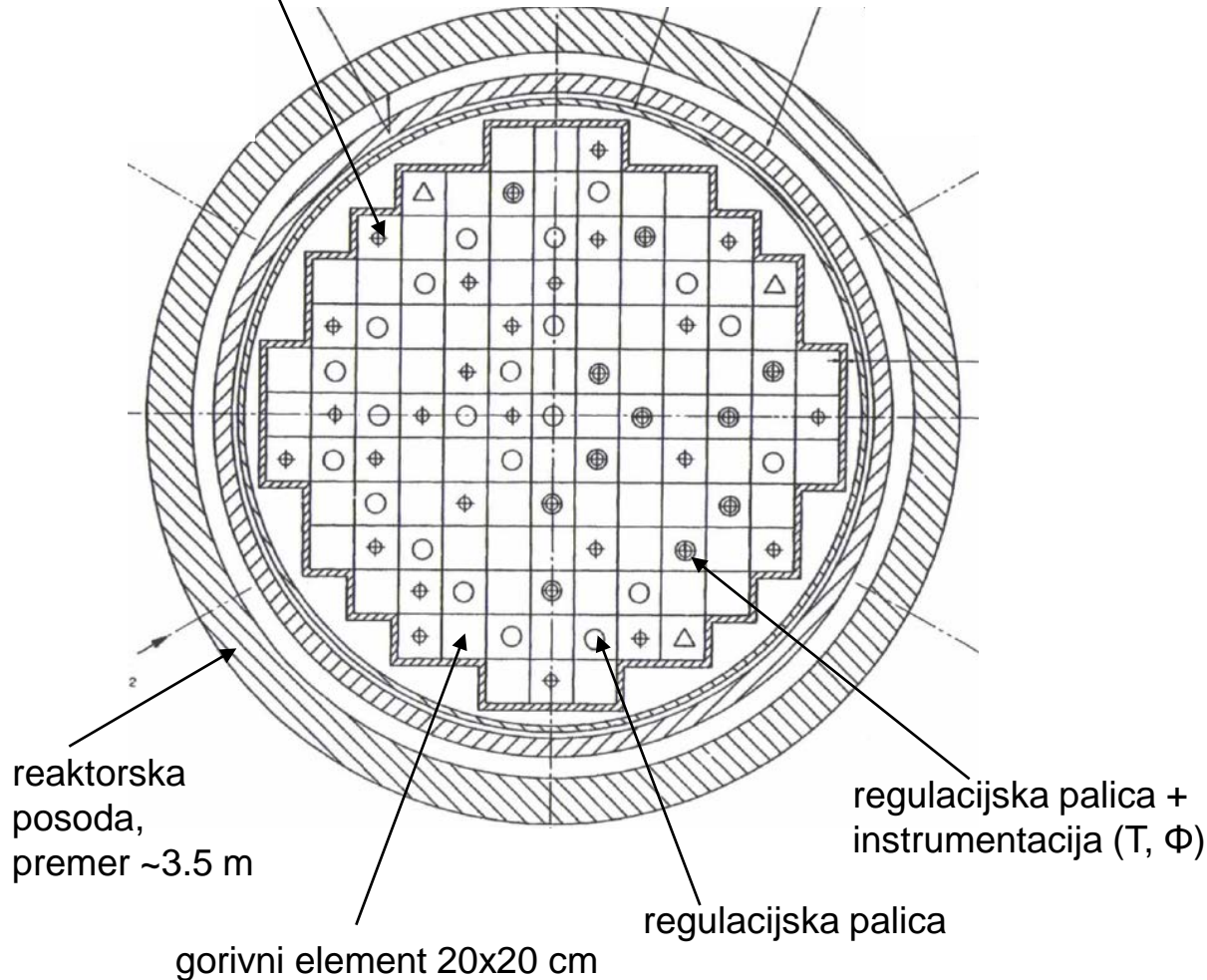
vir: Mitsubishi

# Število nevtronov in izgorevanje goriva

*tloris sredice JE Krško*

$$\Phi \sim 10^{19} \text{ n/m}^2/\text{s}$$

instrumentacija (T,  $\Phi$ )



Gorivni element  
raziskovalnega  
reaktorja OYSTER  
(TU Delft)

8x8x60 cm

9 elementov v sredici

3 MW

NEK:

28435 gorivnih palic

121 gorivnih elementov

235 gorivnih palic/element

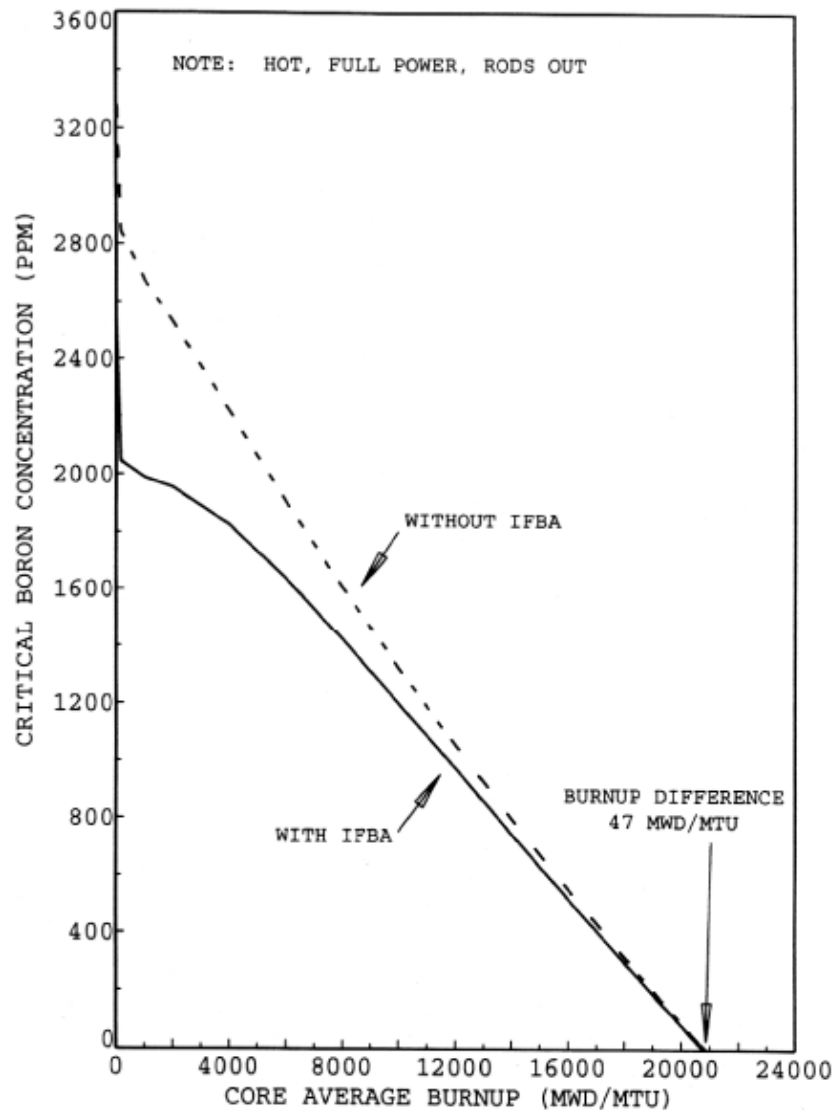
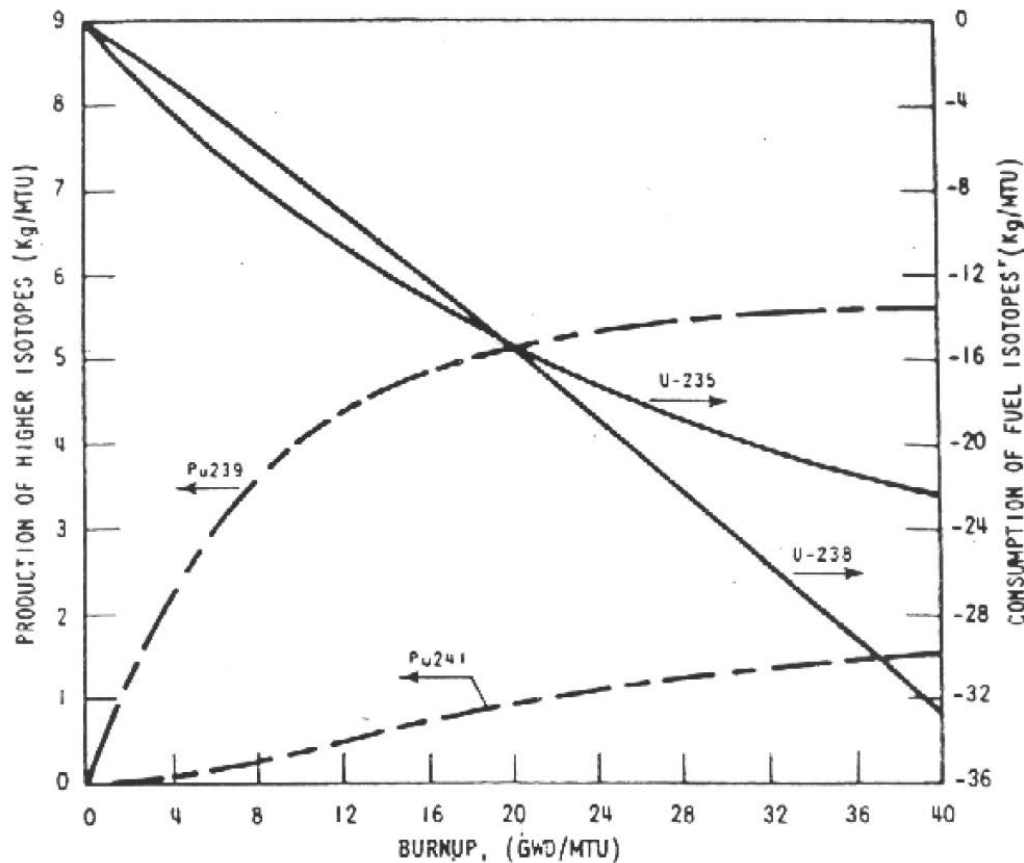
20 vodil regulacijskih palice/element

1 vodilo instrumentacije/element

# Izgorevanje goriva

$^{235}\text{U}$  - od 4%  $\rightarrow$  1.5% ,  $^{239}\text{Pu}$  od 0%  $\rightarrow$  1% ,

bor v hladilu - od 2000 ppm  $\rightarrow$  0 ppm



- MWD/MTU = MWdni/metric-ton-U
- ppm - parts per million
- NEK 50 ton goriva, cikel 18 mesecev, 2000 MW  $\Rightarrow$  cikel  $\sim$  20000 MWD/MTU
- gorivni element je v reaktorju 2-3 cikle

# Izgorevanje goriva

Nd - Neodim

Pm - Prometij

*nekateri razcepki močno absorbirajo nevtrone*

- SAMARIJ-149**

- Absorpcijski presek za termične nevtrone  $\sigma_a = 41,000 \text{ b}$
- Nastanek:  $^{149}\text{Nd} \rightarrow ^{149}\text{Pm} \rightarrow ^{149}\text{Sm}$

(Zanemarjen Nd  $T_{1/2} < 2 \text{ h}$ )

$$\frac{dP}{dt} = \gamma^{\text{Nd}} \Sigma_f \Phi - \lambda^{\text{Pm}} P \quad P = n_{\text{Pm}}$$

$$\frac{dS}{dt} = \lambda^{\text{Pm}} P - S \sigma_a \Phi \quad S = n_{\text{Sm}}$$

$$\lambda^{\text{Pm}} = \ln 2 / (53 \text{ ur})$$

- KSENON-135**

- Absorpcijski presek za termične nevtrone  $\sigma_a = 2,600,000 \text{ b}$
- Nastanek:  $^{135}\text{Te} \rightarrow ^{135}\text{I} \rightarrow ^{135}\text{Xe} \rightarrow ^{135}\text{Cs} \rightarrow ^{135}\text{Ba}$

(Zanemarjen Te  $T_{1/2} < 22 \text{ s}$ )

$$\frac{dI}{dt} = \gamma^{\text{Te}} \Sigma_f \Phi - \lambda^{\text{I}} I \quad I = n_{\text{I}} \quad \lambda^{\text{I}} = \ln 2 / (6.7 \text{ ur})$$

$$\frac{dX}{dt} = \gamma^{\text{Xe}} \Sigma_f \Phi + \lambda^{\text{I}} I - X \sigma_a \Phi - \lambda^{\text{Xe}} X \quad X = n_{\text{Xe}} \quad \lambda^{\text{Xe}} = \ln 2 / (9.2 \text{ ur})$$

~10 ur po zaustavitvi je reaktor zaradi Ksenona zelo težko ponovno zagnati.  
Ksenon omejuje max. nevtronski fluks lahko-vodnih reaktorjev

