

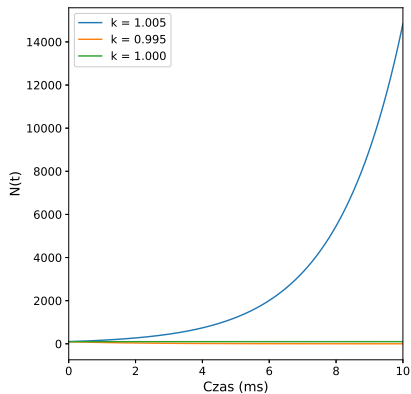
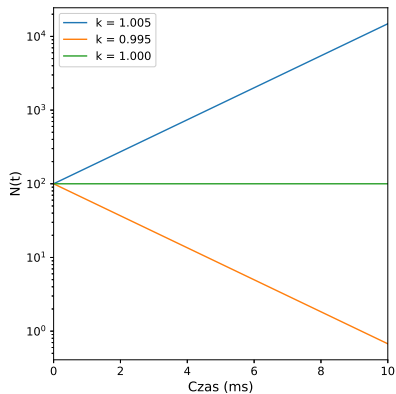
Neutronika

semestr letni 2023/24

Krzysztof Miernik

Wykład 4

Liczba neutronów w czasie



Mnożenie podkrytyczne

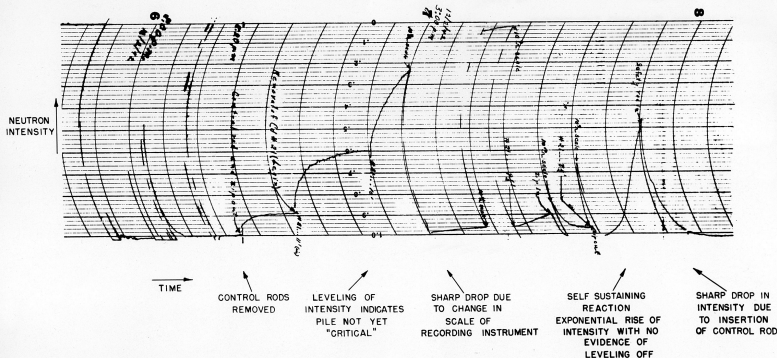
- Nawet jeżeli reaktor jest wyłączony, neutrony są wciąż w nim obecne.
- W reaktorze w stanie podkrytycznym ($k_{eff} < 1$), nadal zachodzą reakcje rozszczepienia.
- Wyobraźmy sobie układ o współczynniku $k_{eff} = 0.5$, w którym na sekundę powstaje 100 neutronów, wtedy

Czas	0	1	2	3	4	5	6	7	8
	100	50	25	12.5	6.25	3.125	1.562	0.781	0.391
		100	50	25	12.5	6.25	3.125	1.562	0.781
			100	50	25	12.5	6.25	3.125	1.562
				100	50	25	12.5	6.25	3.125
					100	50	25	12.5	6.25
						100	50	25	12.5
							100	50	25
								100	50
									100
Suma	100	150	175	187.5	193.75	196.9	198.4	199.2	199.6

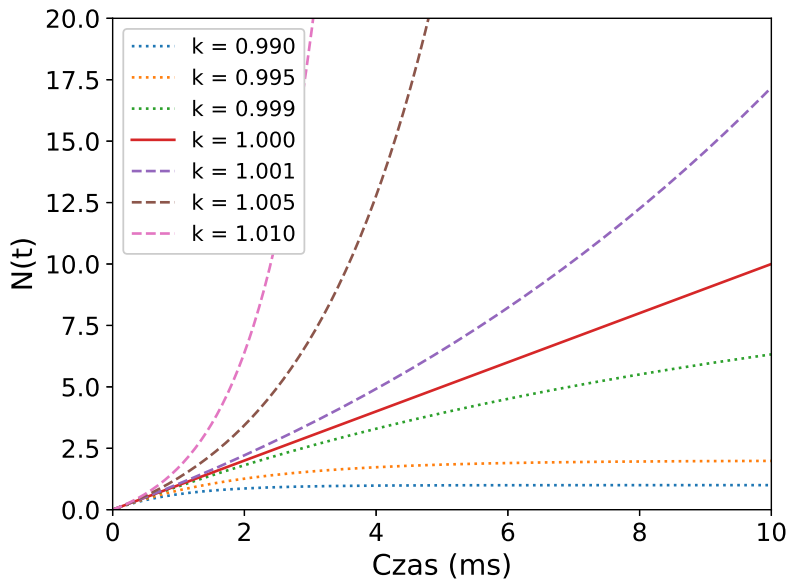
- Każdy krok czasu to nowa generacja (około 0.09 s), liczba neutronów szybko ustala się na pewnym poziomie (w przykładzie około 200)

Pierwszy reaktor

DEC. 2 1942 START-UP
OF
FIRST SELF-SUSTAINING CHAIN REACTION
NEUTRON INTENSITY IN THE PILE AS RECORDED BY A GALVANOMETER



Liczba neutronów w czasie (ze źródłem)



Mnożenie podkrytyczne

- Dość łatwo wyprowadzić ogólny wzór i otrzymać podkrytyczny współczynnik mnożenia M

$$M = \frac{1}{1 - k_{eff}}$$

- Np. dla $k_{eff} = 0.95$

$$M = \frac{1}{1 - 0.95} = 20$$

- W reaktorze podkrytycznym liczba neutronów jest powiązana z intensywnością źródła S i współczynnikiem mnożenia podkrytycznego M

$$N = S \times M$$

- W rzeczywistości intensywność źródła (albo wydajność detektora neutronów) jest trudna do dokładnego określenia. Ale jeżeli zmierzmy liczbę neutronów dla dwóch stanów podkrytycznych k_1 i k_2

$$N_1 = S \frac{1}{1 - k_1} \quad N_2 = S \frac{1}{1 - k_2}$$

to patrząc na stosunek tych dwóch wielkości, możemy wyrzucić z równania intensywność źródła

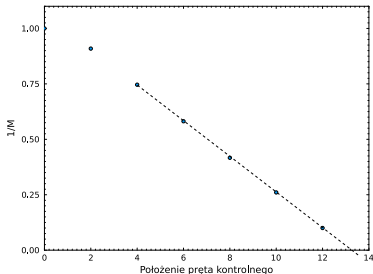
$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{1 - k_2}{1 - k_1}$$

Mnożenie podkrytyczne

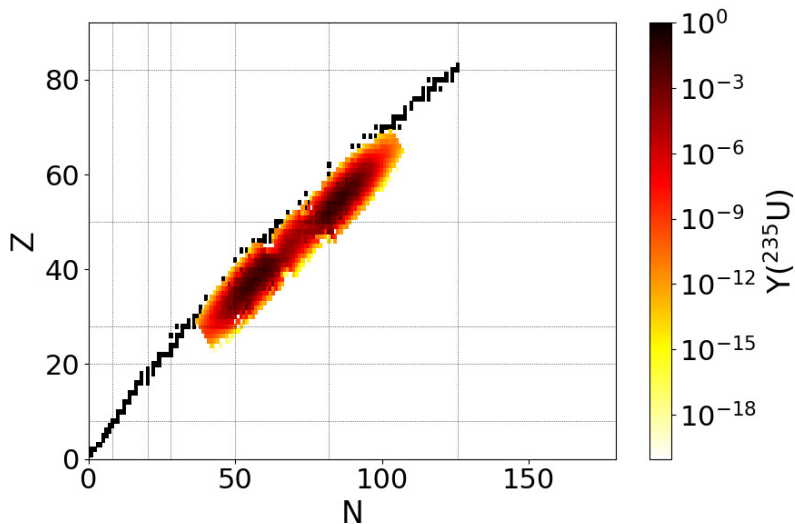
- Liczba zliczeń w monitorze neutronów jest proporcjonalna (przez nieznaną wydajność detektora) do rzeczywistej liczby neutronów.
- Ta informacja jest bardzo ważna do ustalenia ile reaktywności należy dodać do reaktora, aby go z powrotem uruchomić (osiągnąć krytyczność), na podstawie odczytu z detektorów neutronów.
- Definicję współczynnika mnożenia możemy przekształcić na

$$M = \frac{1}{1 - k_{eff}} \rightarrow \frac{1}{M} = 1 - k_{eff}$$

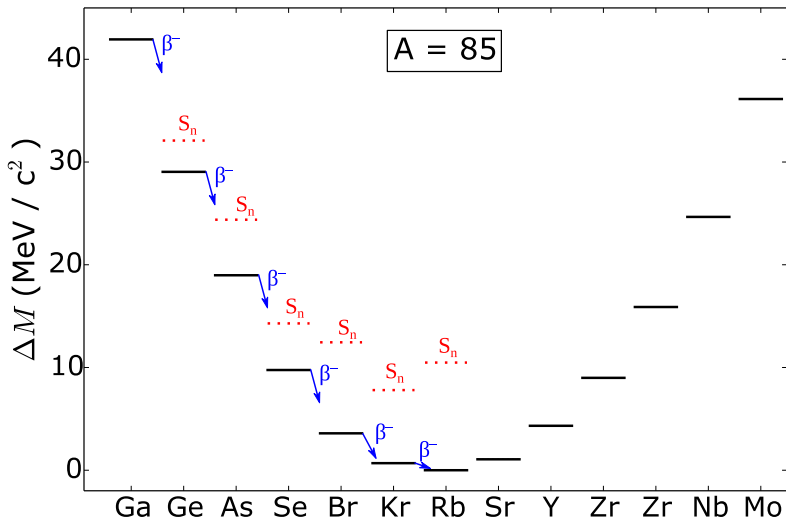
- Mierząc liczbę neutronów dla pewnego wyjściowego stanu k_0 i sprawdzając zmianę wartości $\frac{1}{M}$ w zależności od położenia elementu sterującego (np. pręta kontrolnego) można określić, kiedy reaktor osiągnie krytyczność ($\frac{1}{M} = 0$)



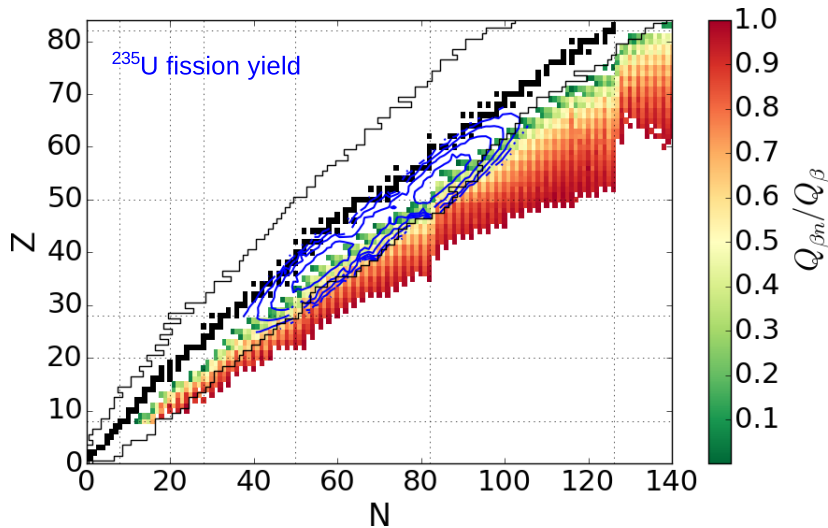
Fragmenty rozszczepienia



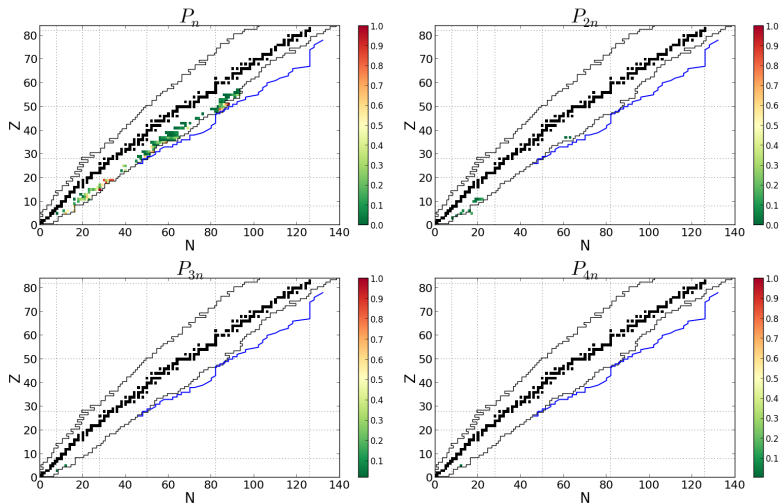
Jądra A = 85



Neutrony opóźnione

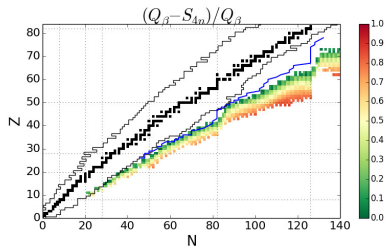
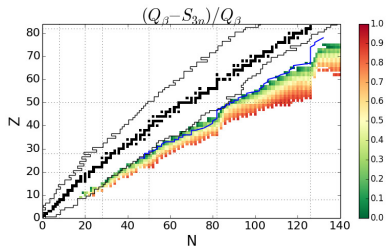
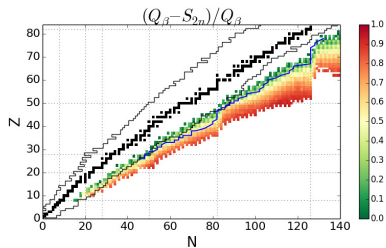
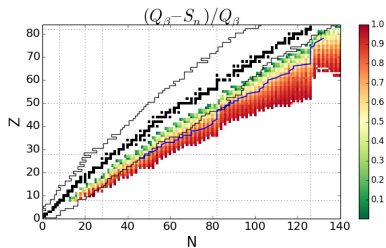


Aktualny stan badań eksperymentalnych



Eksperymentalnie dobrze znane wartości:
około 200 β_n , 14 β_{2n} , 2 β_{3n} , 1 β_{4n}

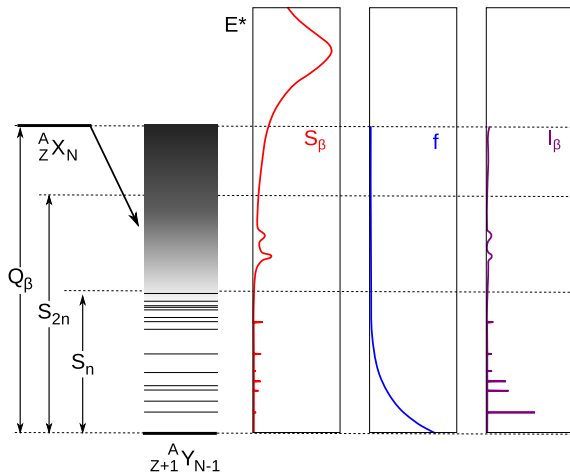
Rozmiar okna emisji neutronów



Model masy HFB-21 S. Goriely et al., PRC82 (2010)

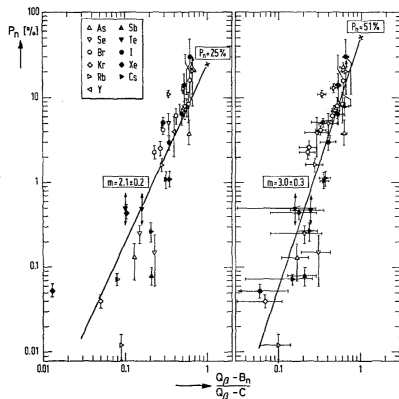
8387 związanych jąder: 4392 β_n , 3667 β_{2n} , 3123 β_{3n} , 2708 β_{4n}

Prawdopodobieństwo emisji neutronu



$$P_n = \frac{\int_{S_n}^{Q_\beta} \frac{\Gamma_n(E)}{\Gamma_{\text{tot}}(E)} S_\beta(E) f(Z+1, Q_\beta - E) dE}{\int_0^{Q_\beta} S_\beta(E) f(Z+1, Q_\beta - E) dE},$$

Wzór Kratza-Hermanna



K.-L. Kratz and G. Herrmann
Z. Phys. 263(1973)435

$$\Gamma_n / \Gamma_{tot} \approx 1, \quad S_\beta \sim \text{const}$$

$$P_n = a \left(\frac{Q_\beta - S_n}{Q_\beta - C} \right)^b$$

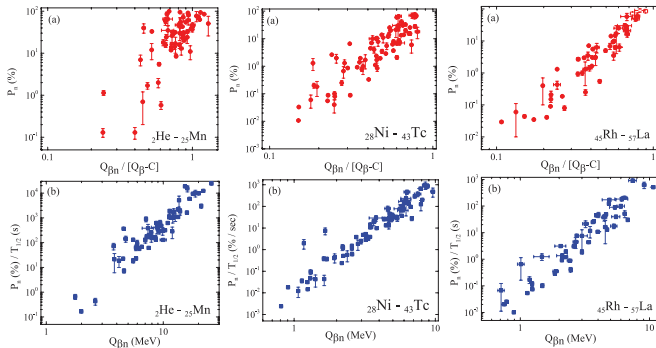
	a	b
$Z < 25$	45	4.40
$28 < Z < 43$	119	5.45
$45 < Z < 57$	141	5.08

$$C = \begin{cases} 0 & \text{p-p} \\ 13/\sqrt{A} & \text{n} \\ 26/\sqrt{A} & \text{n-n} \end{cases}$$

Parametry (2012):

E.A. McCutchan et al. PRC 86 (2012) 041305(R)

Ulepszona systematyka



$$P_n = \frac{\int_{S_n}^{Q_\beta} S_\beta(E) f(Z+1, Q_\beta - E) dE}{\int_0^{Q_\beta} S_\beta(E) f(Z+1, Q_\beta - E) dE},$$

$$\frac{P_n}{T_{1/2}} = c Q_{\beta n}^d$$

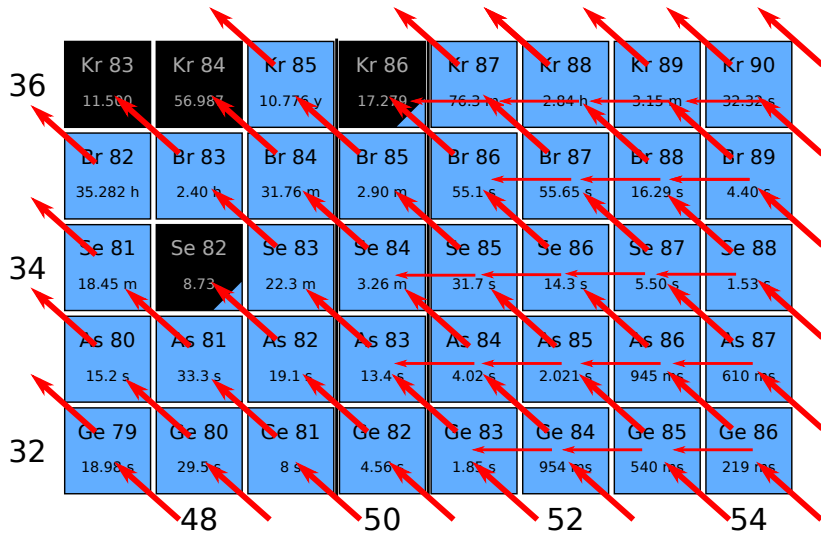
	c	d
$Z < 25$	0.037	4.11
$28 < Z < 43$	0.0097	4.87
$45 < Z < 57$	0.016	4.55

E.A. McCutchan et al. PRC 86 (2012) 041305(R)

Zadanie 10

Wyznacz P_n ze wzoru KHF lub McCutchan et al. dla następujących nuklidów: ^{141}Cs , ^{92}Rb , ^{137}I , ^{93}Rb , ^{98}Y , ^{142}Cs , ^{87}Br , ^{136}Te , ^{92}Kr , ^{99}Y

Sieć rozpadów



Model sześciu grup

Parametry dla ^{235}U

Grupa	Czasy życia	Nuklidy	λ_i (1/s)	α_i
I	55.6 s	^{87}Br	0.0133	0.0380
II	10 – 30 s	^{88}Br , ^{137}I , ...	0.0325	0.1918
III	4 – 10 s	^{89}Br , ^{93}Rb , ...	0.1219	0.1638
IV	1.4 – 4.0 s	^{85}As , ^{90}Br , ...	0.3169	0.3431
V	0.4 – 1.4 s	^{87}As , ^{93}Kr , ...	0.9886	0.1744
VI	< 0.4 s	^{87}As , ^{93}Kr , ...	2.9544	0.0890

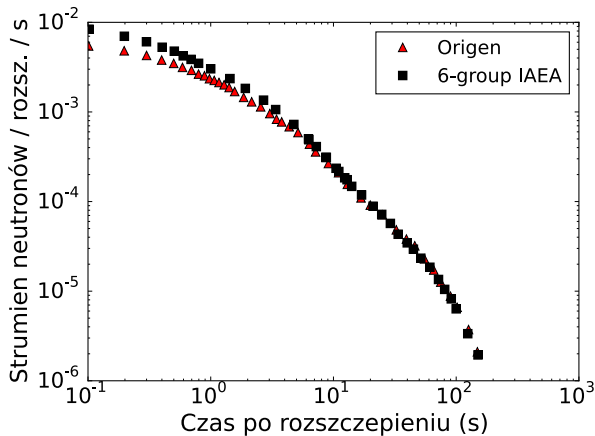
Model sześciu grup

TABLE 5.1 Delayed Neutron Parameters

Group	Fast Neutrons		Thermal Neutrons	
	Decay Constant λ_i (s ⁻¹)	Relative Yield β_i/β	Decay Constant λ_i (s ⁻¹)	Relative Yield β_i/β
²³³ U		$v_d = 0.00731$ $\beta = 0.0026$		$v_d = 0.00667$ $\beta = 0.0026$
1	0.0125	0.096	0.0126	0.086
2	0.0360	0.208	0.0337	0.299
3	0.138	0.242	0.139	0.252
4	0.318	0.327	0.325	0.278
5	1.22	0.087	1.13	0.051
6	3.15	0.041	2.50	0.034
²³⁵ U		$v_d = 0.01673$ $\beta = 0.0064$		$v_d = 0.01668$ $\beta = 0.0067$
1	0.0127	0.038	0.0124	0.033
2	0.0317	0.213	0.0305	0.219
3	0.115	0.188	0.111	0.196
4	0.311	0.407	0.301	0.395
5	1.40	0.128	1.14	0.115
6	3.87	0.026	3.01	0.042
²³⁹ Pu		$v_d = 0.0063$ $\beta = 0.0020$		$v_d = 0.00645$ $\beta = 0.0022$
1	0.0129	0.038	0.0128	0.035
2	0.0311	0.280	0.0301	0.298
3	0.134	0.216	0.124	0.211
4	0.331	0.328	0.325	0.326
5	1.26	0.103	1.12	0.086
6	3.21	0.035	2.69	0.044

W.M. Stacey "Nuclear Reactor Physics" Wiley 2007

Metoda 6-grup, a dane jądrowe



Ian C. Gauld (ORNL Reactor Science Group),

Widmo energetyczne neutronów opóźnionych

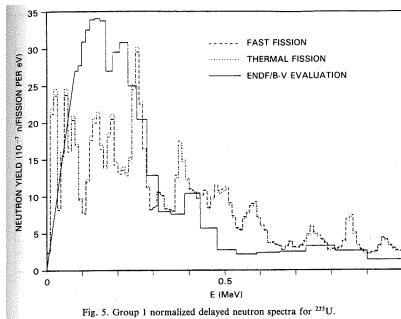


Fig. 5. Group 1 normalized delayed neutron spectra for ^{235}U .

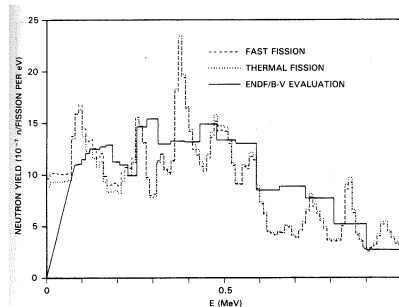
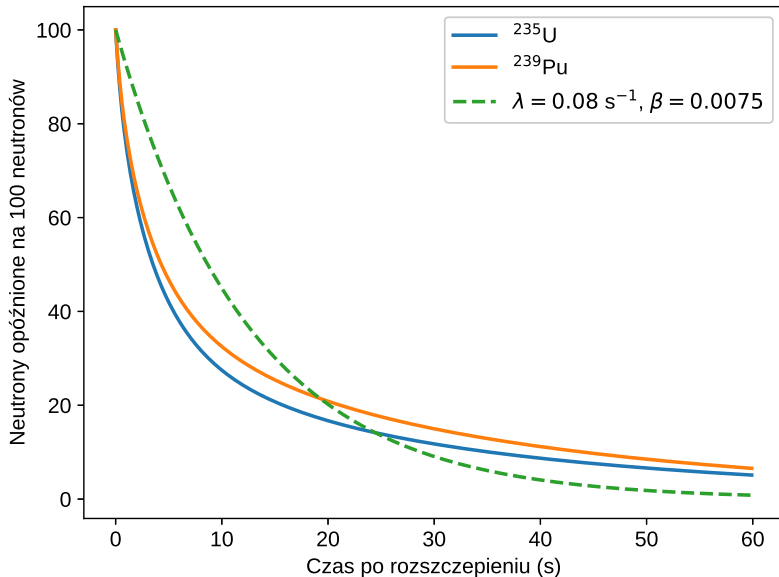


Fig. 6. Group 2 normalized delayed neutron spectra for ^{235}U .

M.C. Brady and T. R. England, Nuc. Sci. Eng. 103 (1989)

Przybliżenie jednogrupowe



Okres reaktora

- Inne definicja, pozwalająca praktycznie obliczać okres reaktora to

$$\tau = \frac{l^*}{\rho} + \frac{\bar{\beta}_{eff} - \rho}{\lambda_{eff}\rho + \dot{\rho}}$$

gdzie

- l^* - średni czas powielania neutronów natychmiastowych
- $\bar{\beta}_{eff}$ - efektywny wkład neutronów opóźnionych
- ρ - reaktywność
- λ_{eff} - efektywna stała rozpadu dla źródeł neutronów opóźnionych
- $\dot{\rho}$ - prędkość zmian reaktywności (pochodna po czasie)

Okres reaktora

- Inne definicja, pozwalająca praktycznie obliczać okres reaktora to

$$\tau = \frac{l^*}{\rho} + \frac{\bar{\beta}_{eff} - \rho}{\lambda_{eff}\rho + \dot{\rho}}$$

gdzie

- l^* - średni czas powielania neutronów natychmiastowych
 - $\bar{\beta}_{eff}$ - efektywny wkład neutronów opóźnionych
 - ρ - reaktywność
 - λ_{eff} - efektywna stała rozpadu dla źródeł neutronów opóźnionych
 - $\dot{\rho}$ - prędkość zmian reaktywności (pochodna po czasie)
- Dla reaktora pracującego przy stałej mocy, wszystkie emitory neutronów opóźnionych znajdują się w stanie równowagi

Okres reaktora

- Inne definicja, pozwalająca praktycznie obliczać okres reaktora to

$$\tau = \frac{l^*}{\rho} + \frac{\beta_{eff}^- - \rho}{\lambda_{eff}\rho + \dot{\rho}}$$

gdzie

- l^* - średni czas powielania neutronów natychmiastowych
 - β_{eff}^- - efektywny wkład neutronów opóźnionych
 - ρ - reaktywność
 - λ_{eff} - efektywna stała rozpadu dla źródeł neutronów opóźnionych
 - $\dot{\rho}$ - prędkość zmian reaktywności (pochodna po czasie)
- Dla reaktora pracującego przy stałej mocy, wszystkie emitery neutronów opóźnionych znajdują się w stanie równowagi
 - Podczas zwiększania mocy (strumienia neutronów) powstaje stosunowo więcej krótkożytyciowych nuklidów tego typu i λ_{eff} będzie rosło ($\tau = 1/\lambda$).
 - Podczas zmniejszania mocy odwrotne zjawisko powoduje zmniejszenia λ_{eff} .
 - W rezultacie dodanie lub odjęcie reaktywności powoduje niewielki chwilowy skok mocy

Krytyczność natychmiastowa

- W równaniu na okres reaktora możemy zauważyć, że jeżeli dodana reaktowność ρ jest równa $\bar{\beta}_{eff}$ to okres reaktora

$$\tau = \frac{l^*}{\rho} + \frac{\overbrace{\bar{\beta}_{eff} - \rho}^{=0}}{\lambda_{eff}\rho + \dot{\rho}} = \frac{l^*}{\rho}$$

Krytyczność natychmiastowa

- W równaniu na okres reaktora możemy zauważyć, że jeżeli dodana reaktowność ρ jest równa $\bar{\beta}_{eff}$ to okres reaktora

$$\tau = \frac{l^*}{\rho} + \frac{\overbrace{\bar{\beta}_{eff} - \rho}^{=0}}{\lambda_{eff}\rho + \dot{\rho}} = \frac{l^*}{\rho}$$

- W takim przypadku reaktorowi wystarczają neutrony natychmiastowe aby osiągnąć krytyczność (*prompt critical*). Reaktor zbliżający się do tego warunku ma duże prawdopodobieństwo awarii wywołanej gwałtownym skokiem mocy, która może wzrosnąć tysiące razy w ciągu sekundy. (Np. $\lambda_{eff} = 0.05$ 1/s)
- Ze względu na istotność tego warunku, czasami używane są specjalne jednostki reaktowności. Dolar (\$) oznacza odpowiednik wkładu od neutronów opóźnionych ($\bar{\beta}_{eff}$). Cent (¢) to 1/100 dolara. Jeżeli reaktowność jest równa 1\$, reaktor osiąga krytyczność natychmiastową. Ponieważ $\bar{\beta}_{eff}$ zmienia się w czasie i od rodzaju użytego paliwa, wartość \$ również podlega zmianom.

Reaktor z neutronami opóźnionymi

