

# Neutronika

## semestr letni 2023/24

Krzysztof Miernik

# Wykład 1

# Zasady zaliczenia

- 1 Podział wykład/ćwiczenia będzie umowny i charakter zajęć będzie się przeplatał w zależności od tematyki
- 2 Na wykładach będą pojawiać się problemy do samodzielnego rozwiązania.
- 3 Na każdy problem będą dwa tygodnie do rozwiązania.
- 4 Spóźnienie będzie skutkowało obniżeniem punktacji (-1 / tydzień).
- 5 Egzamin będzie w formie testu z zagadnień teoretycznych poruszanych na wykładzie
- 6 Ocena będzie wystawiona na podstawie punktów za problemy i test (po 50% wkładu).
- 7 Dla chętnych będzie możliwość zmiany oceny na egzaminie ustnym.
- 8 Uwaga! Materiały z wykładu będą dostępne tylko częściowo (wiele obliczeń będzie się pojawiać tylko na tablicy).

# Plan wykładu

- 1 Podstawowe własności neutronów
- 2 Przekrój czynny, reakcje jądrowe
- 3 Współczynnik mnożenia
- 4 Strumień i prąd neutronów
- 5 Teoria dyfuzji neutronów
- 6 Zagadnienia ze strumieniem zewnętrznym
- 7 Zagadnienia z materiałem rozszczepialnym
- 8 Reflektor neutronów, samoekranowanie
- 9 Homogenizacja
- 10 Rozwiązywanie problemów metodami numerycznymi
- 11 Wielogrupowa teoria dyfuzji
- 12 Teoria transportu neutronów
- 13 Modele Monte-Carlo

# Wczesne modele jądra i promieniotwórczości

E. Rutherford, Phil. Mag 37(1919)581,  
Proc. Roy. Soc. A97(1920)374

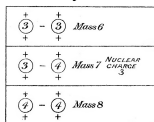


FIG. 3.

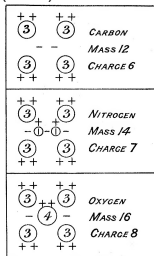
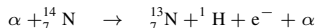


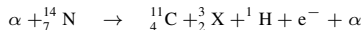
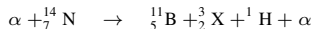
FIG. 4.

Na podstawie reakcji  $\alpha + {}^{14}\text{N} \rightarrow \text{H} + {}^{17}\text{O}$ .

*The expulsion of an H atom carrying one charge from nitrogen should lower the mass by 1 and the nuclear charge by 1. The residual nucleus should thus have a nuclear charge of 6 and mass 13, and should be an isotope of carbon. If a negative electron is released at the same time, the residual atom becomes an isotope of nitrogen.*

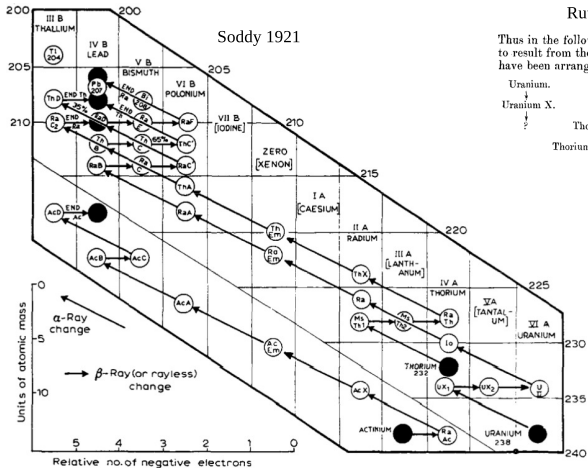


*The expulsion of mass 3 carrying two charges from nitrogen, probably quite independent of the release of the H atom, lowers the nuclear charge by 2 and the mass by 3. The residual atom should be thus an isotope of boron of nuclear charge 5 and mass 11. If an electron escapes as well, there remains an isotope of carbon of mass 11.*



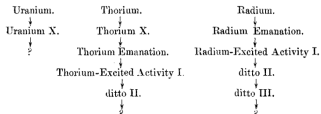
*The data at present available are quite insufficient to distinguish between these alternatives.*

# Szeregi promieniotwórcze



## Rutherford and Soddy 1903

Thus in the following table the metabolons at present known to result from the disintegration of the three radio-elements have been arranged in order.



F. Soddy, Wykład noblowski (1921)

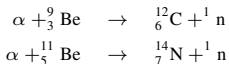
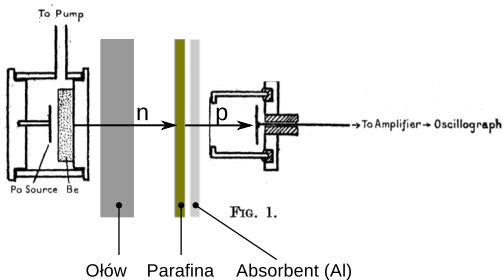
*Thus uranium in the last place with an intra-atomic charge of about 90, must have between 2 and 3 units of mass per unit of charge. So that, if its nucleus be imagined to be composed of 60  $\alpha$ -particles with charge 120, there must be present is also 30 electrons to give the nuclear charge 90. This suggestion of Van den Broek was adopted by Bohr in his theoretical researches on the structure of the atom. Bohr's views required that the electronic system is stable, so that to remove an electron involves the expenditure of energy. Hence it followed that the  $\beta$ -particles expelled in radioactive change must come from the nucleus and not from the external electronic system. (...)*

*Thus the chemically identical elements - or isotopes, as I called them for the first time in this letter to Nature<sup>1</sup>, because they occupy the same place in the Periodic Table - are elements with the same algebraic or nett nuclear charge, but with different numbers of + and - charges in the nucleus. On the view that the concentrated positive charge is the massive particle in the atomic structure, since positive electricity has never been observed free possessing less than the mass of an atom, the atomic weight of the isotope is a function of the total number of positive charges in the nucleus and the chemical character a function of the nett number.*

<sup>1</sup>F. Soddy, Nature 91(1913)57

# Odkrycie neutronu

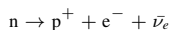
- I. Curie and F. Joliot, 18 stycznia 1932, Comptes Rendus 194(1932)273 "Emisja protonów o dużej energii z substancji bogatych w wodór pod wpływem promieni  $\gamma$  "
- J. Chadwick, 27 lutego 1932, Nature 129(1932)312, "Prawdopodobne istnienie neutronu"
- I. Curie and F. Joliot, 11 kwietnia 1932, Comptes Rendus 194(1932)1229, "O naturze silnie penetrującego promieniowania wywołanego przez cząstki  $\alpha$  padające na lekkie jądra"
- J. Chadwick, 1 czerwca 1932, Proc. Roy. Soc. 136(1932)692, "O istnieniu neutronu"





# Właściwości neutronu

- Barion ( $udd$ ),  $J^P = 1/2^+$
- Masa  $m = 939.565413 \pm 0.000006$  MeV lub
- $1.674927471 \pm 0.000000021 \times 10^{-27}$  kg
- Czas życia  $\tau = 880.2 \pm 1.0$  s
- Rozpad



- Ładunek  $q = -0.2 \pm 0.8 \times 10^{-21}$  e
- Elektryczny moment dipolowy  $d < 0.30 \times 10^{-25}$  e cm
- Moment magnetyczny  $\mu = -1.9130427 \pm 0.0000005 \mu_N$

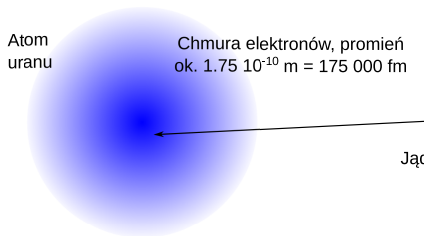
## Zadanie 1

Neutron termiczny (o energii 25 meV) porusza się w ziemskim polu grawitacyjnym. Początkowo neutron jest na wysokości 1 m, a wektor prędkości neutronu jest równoległy do powierzchni Ziemi. Po jakim czasie i w jakiej odległości od punktu początkowego neutron opadnie na Ziemię? Czy oddziaływania grawitacyjne będą miały znaczenie w opisie reaktora jądrowego?

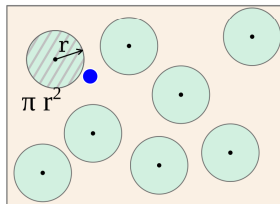
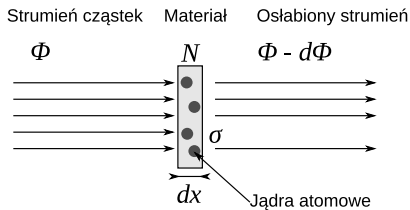
## Zadanie 2

Powtórzyć obliczenia dla ultrazimnego neutronu o energii 300 neV.

# Przekrój czynny



Jądro atomowe, promień  $r = r_0 A^{1/3}$



Przekrój czynny - pole powierzchni tarczy

Liczba usuniętych cząstek

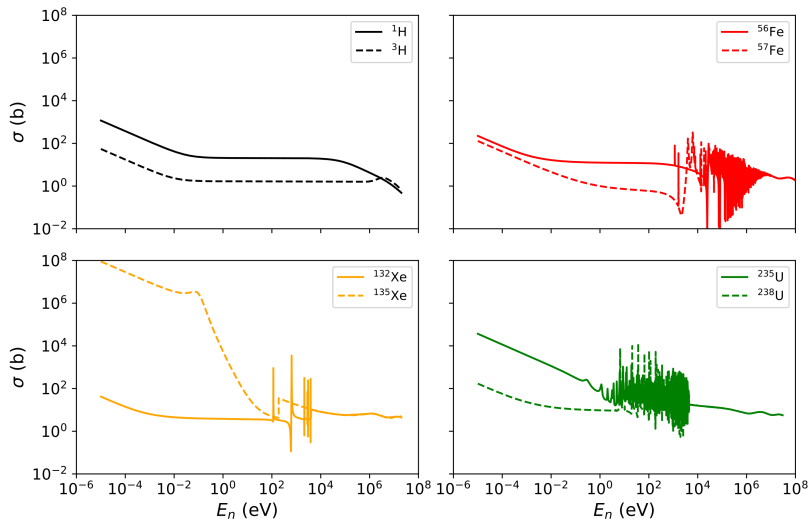
$$d\Phi = -\sigma N dx \Phi$$

Prawdopodobieństwo usunięcia cząstki z wiązki

## Zadanie 3

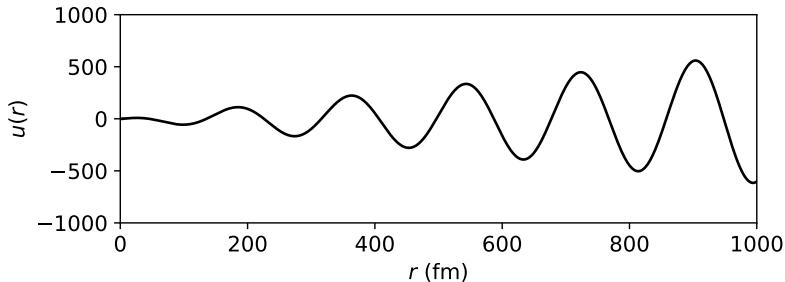
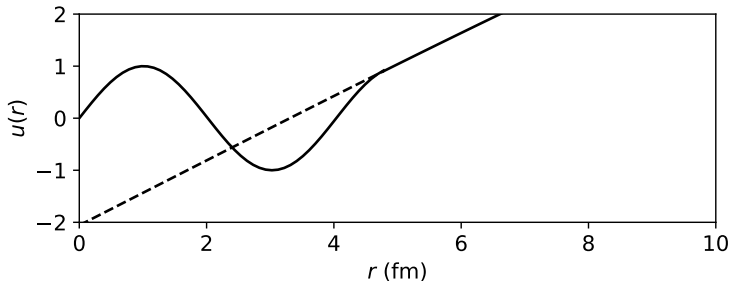
Zakładając geometryczną interpretację przekroju czynnego oszacuj jego wartość dla reakcji neutronów na jądrach  $^1\text{H}$ ,  $^3\text{H}$ ,  $^{56}\text{Fe}$ ,  $^{57}\text{Fe}$ ,  $^{132}\text{Xe}$ ,  $^{135}\text{Xe}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ .

# Przekrój czynny



Jakie są efektywne „rozmiary” tych jąder dla termicznych neutronów? Jak to jest możliwe?

# Rozpraszanie neutronów termicznych



# Przekrój czynny

- Mikroskopowy przekrój czynny ( $\sigma_i$ ) - efektywna powierzchnia jednego jądra w reakcji  $i$ . Jednostką jest barn (b),  $1 \text{ b} = 10^{-24} \text{ cm}^2$
- Makroskopowy przekrój czynny ( $\Sigma_i$ ) - prawdopodobieństwo na jednostkę odległości, że neutron wejdzie w reakcję typu  $i$  z materiałem. Jednostką jest  $1/\text{cm}$ .
- Liczba reakcji typu  $i$  na odległości  $\Delta x$

$$n = \Sigma_i \Delta x$$

- Średnia droga swobodna neutronu

$$\lambda_i = \frac{1}{\Sigma_i}$$

# Przekrój czynny

- Związek makro- i mikroskopowego przekroju czynnego

$$\Sigma_i = N\sigma_i$$

- Gdzie  $N$  - liczba atomów w  $1 \text{ cm}^3$  materiału

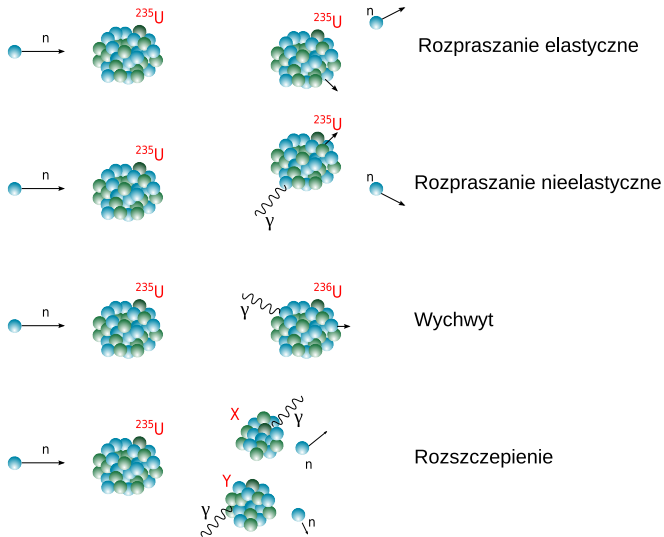
$$N = \frac{N_A \rho}{A}$$

- Dla mieszaniny pierwiastków

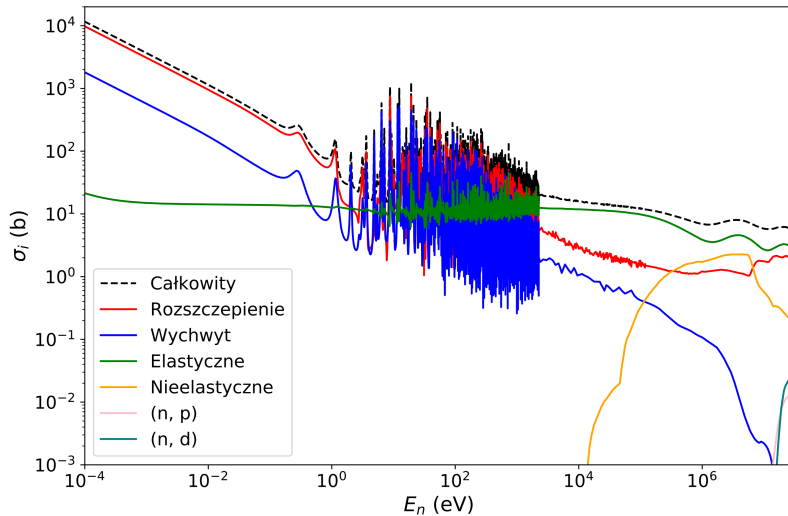
$$\Sigma_i = \sum_k N_k \sigma_{ik}$$



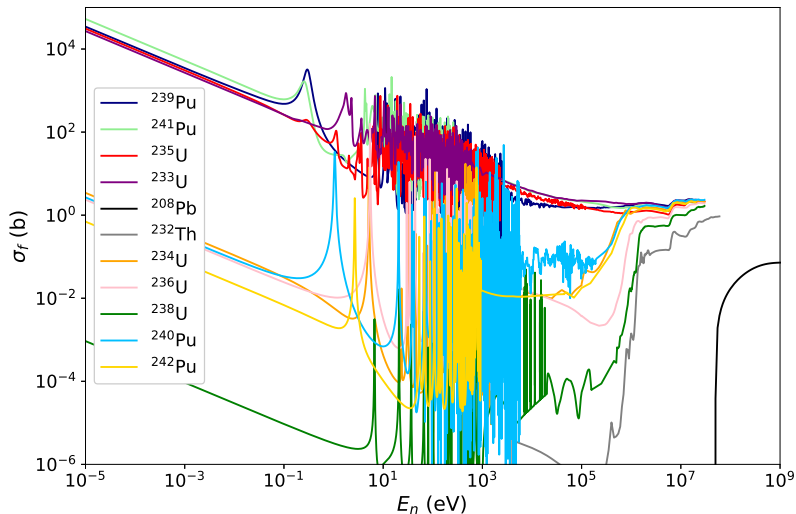
# Reakcje neutronów z uranem



# Reakcje neutronów z uranem



# Reakcje rozszczepienia z ciężkimi pierwiastkami (1)



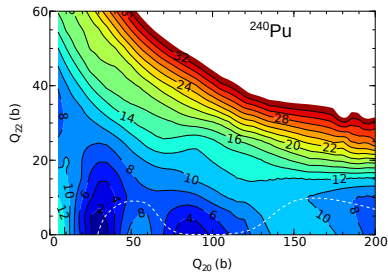
# Materiały rozszczepialne

- Rozszczepialny - *fissionable*
- Rozszczepialny (rozszczeplenny) - *fissile*
- Paliworodny - *fertile*

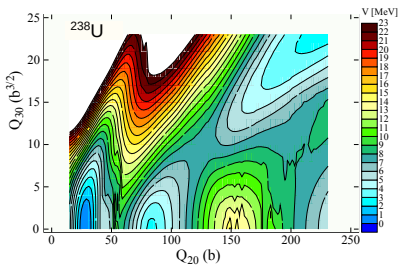
## Pytanie

Dlaczego niektóre materiały są rozszczepialne, a inne nie? Jakie wielkości fizyczne o tym decydują? Jakie jądra należą do kategorii rozszczepialnych, rozszczepiennych i paliworodnych?

# Ścieżka rozszczepienia

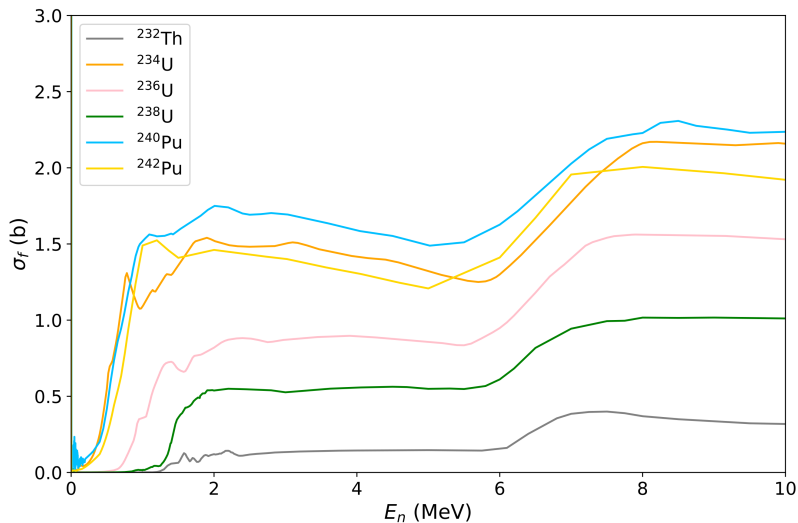


N. Schunck et al. PRC90 (2014)

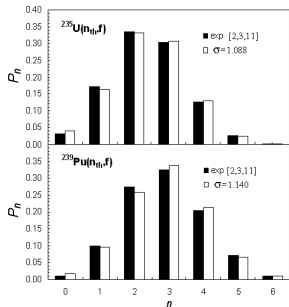


J. Sadhukhan et al. APPB46 (2015)

# Reakcje rozszczepienia z ciężkimi pierwiastkami (2)

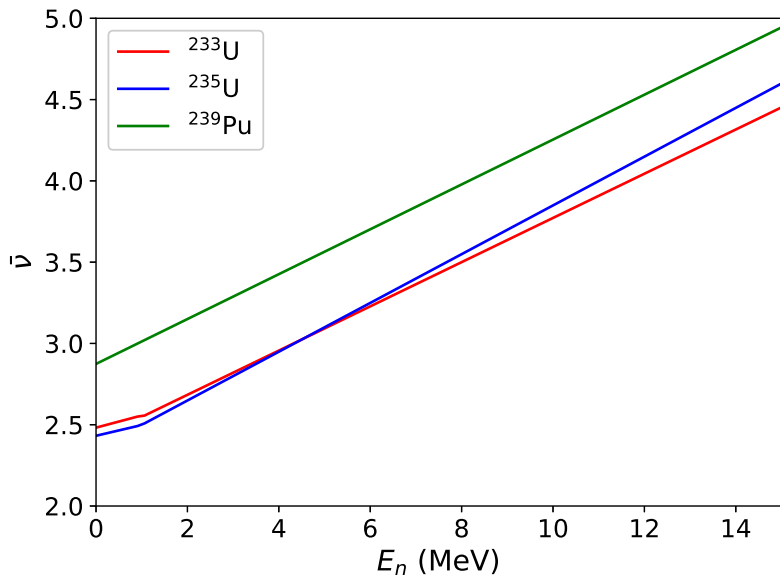


# Neutrony natychmiastowe (1)



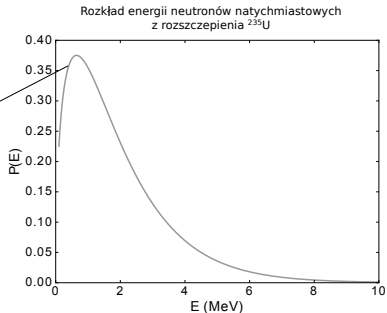
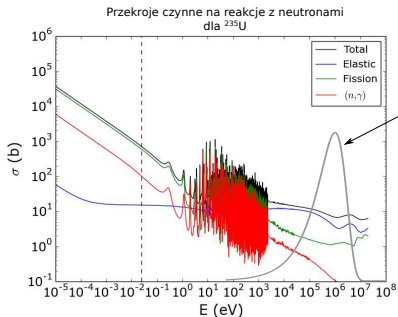
$n$	$^{235}\text{U}(n_{th}, f)$		$^{239}\text{Pu}(n_{th}, f)$	
	$P_n^{\text{exp}}$	$P_n(\sigma = 1.088)$	$P_n^{\text{exp}}$	$P_n(\sigma = 1.140)$
0	0.0317±0.0015	0.0398	0.0109±0.0001	0.0187
1	0.1720±0.0014	0.1621	0.0995±0.0028	0.0955
2	0.3363±0.0031	0.3314	0.2750±0.0003	0.2576
3	0.3038±0.0004	0.3085	0.3270±0.0041	0.3372
4	0.1268±0.0036	0.1308	0.2045±0.0087	0.2144
5	0.0266±0.0026	0.0251	0.0728±0.0133	0.0661
6	0.0026±0.0009	0.0022	0.0097±0.0027	0.0099
7	0.0002±0.0001	0.0000	0.0006±0.0009	0.0007
$V_1$	2.413	2.413	2.875	2.875
$V_2$	4.635	4.655	6.738	6.761
$V_3$	6.816	6.778	12.528	12.475

# Neutrony natychmiastowe (2)





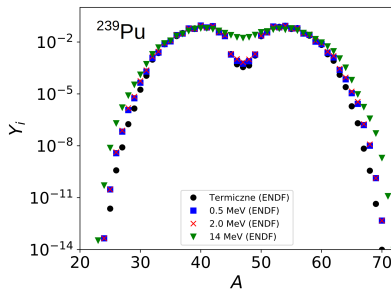
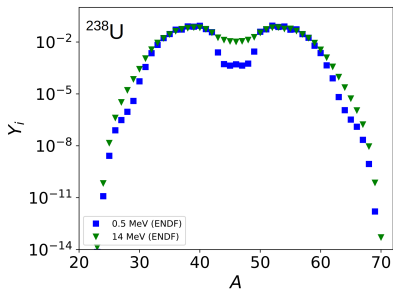
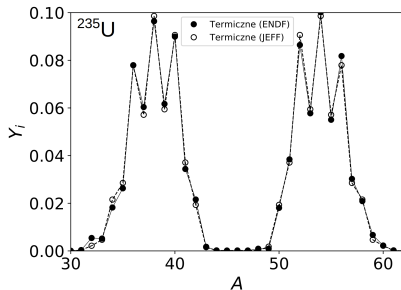
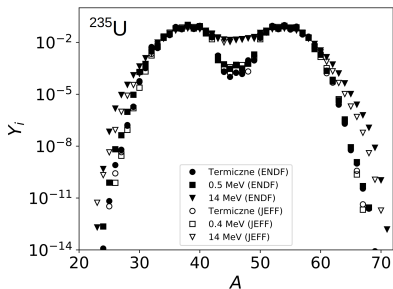
# Neutrony natychmiastowe (3)



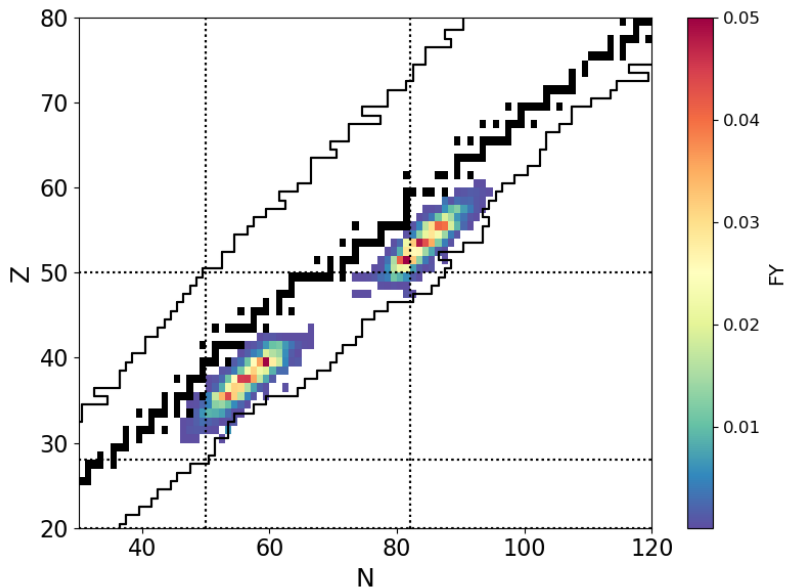
$$N(E) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{E}{(kT)^3}} \exp(-E/kT)$$

$$kT = 1.29 \text{ MeV}$$

# Fragmenty rozszczepienia (1)



## Fragmenty rozszczepienia (2)



# Fragmenty rozszczepienia (3)

44	Ru 94 51.8 m	Ru 95 1.643 h	Ru 96 5.54	Ru 97 2.8370 d	Ru 98 1.87	Ru 99 12.76	Ru 100 12.60	Ru 101 17.06	Ru 102 31.55	Ru 103 39.247 d	Ru 104 19.82
	Tc 93 2.75 h	Tc 94 203 m	Tc 95 20.0 h	Tc 96 4.28 d	Tc 97 4.21 Mj	Tc 98 4.3 Mj	Tc 99 211.1 ky	Tc 100 15.46 s	Tc 101 14.22 m	Tc 102 5.28 s	Tc 103 54.2 s
42	Mo 92 14.53	Mo 93 4.0 ky	Mo 94 9.15	Mo 95 15.84	Mo 96 18.07	Mo 97 3.09	Mo 98 34.3	Mo 99 63.976 h	Mo 100 3.32	Mo 101 14.61 m	Mo 102 11.5 m
	Nb 91 440 y	Nb 92 34.7 Mj	Nb 93 100	Nb 94 20.4 ky	Nb 95 34.991 d	Nb 96 23.35 s	Nb 97 2.1 m	Nb 98 2.86 s	Nb 99 15.0 s	Nb 100 1.5 s	Nb 101 7.1 s
40	Zr 90 51.45	Zr 91 11.22	Zr 92 17.15	Zr 93 1.61 Mj	Zr 94 17.38	Zr 95 64.002 d	Zr 96 2.30	Zr 97 15.340 s	Zr 98 30.7 s	Zr 99 2.1 s	Zr 100 7.1 s
	Y 89 100	Y 90 44.00 h	Y 91 3.54 h	Y 92 3.34 h	Y 93 10.18 h	Y 94 18.7 m	Y 95 10.3 m	Y 96 1.27 s	Y 97 548 ms	Y 98 1.484 s	Y 99 1.484 s
38	Sr 88 42.58	Sr 89 50.563 d	Sr 90 38.792	Sr 91 9.85 h	Sr 92 2.611 s	Sr 93 7.43 m	Sr 94 75.3 s	Sr 95 23.07	Sr 96 1.07 s	Sr 97 409 ms	Sr 98 855 ms
	Rb 87 27.83	Rb 88 17.773 m	Rb 89 15.32 m	Rb 90 1.93 s	Rb 91 58.2 s	Rb 92 4.48 s	Rb 93 5.84 s	Rb 94 2.702 s	Rb 95 377.7 ms	Rb 96 201 ms	Rb 97 165.1 ms
36	Kr 86 17.272	Kr 87 76.3 m	Kr 88 2.825 h	Kr 89 3.15 m	Kr 90 32.32 s	Kr 91 8.97 s	Kr 92 1.840 s	Kr 93 1.286 s	Kr 94 212 ms	Kr 95 114 ms	Kr 96 80 ms

58	Ce 134 3.16 d	Ce 135 17.7 h	Ce 136 5.195	Ce 137 50 h	Ce 138 0.251	Ce 139 137.641 d	Ce 140 89.650	Ce 141 32.511 d	Ce 142 11.114	Ce 143 33.099 h	Ce 144 284.91 d
	La 133 3.912 h	La 134 6.45 m	La 135 19.3 h	La 136 9.87 m	La 137 60 ky	La 138 0.0888	La 139 99.91119	La 140 40.285 h	La 141 3.92 h	La 142 91.1 m	La 143 14.2 m
56	Ba 132 0.101	Ba 133 10.501 y	Ba 134 2.417	Ba 135 6.592	Ba 136 7.854	Ba 137 11.232	Ba 138 71.698	Ba 139 93.159	Ba 140 13.702 d	Ba 141 18.27 m	Ba 142 10.6 m
	Cs 131 9.689 d	Cs 132 6.480 d	Cs 133 100	Cs 134 2.0652 y	Cs 135 1.33 Mj	Cs 136 13.16 d	Cs 137 30.08 y	Cs 138 31.41 m	Cs 139 8.72 Mj	Cs 140 8.72 Mj	Cs 141 24.84 s
54	Xe 130 4.0770	Xe 131 21.2324	Xe 132 25.9309	Xe 133 5.2475 d	Xe 134 10.4337	Xe 135 9.14 h	Xe 136 8.8573	Xe 137 3.816 m	Xe 138 4.8 s	Xe 139 39.68 s	Xe 140 13.65 s
	I 129 15.7 Mj	I 130 12.36 h	I 131 8.0252 d	I 132 2.295 h	I 133 20.89 h	I 134 52.5 m	I 135 6.58 h	I 136 83.4 s	I 137 24.13 s	I 138 6.23 s	I 139 2.282 s
52	Te 128 31.74	Te 129 69.6 m	Te 130 34.03	Te 131 25.0 m	Te 132 3.204 d	Te 133 12.5 m	Te 134 41.8 m	Te 135 19.9 s	Te 136 17.83 s	Te 137 2.49 s	Te 138 1.4 s
	Sb 127 3.85 d	Sb 128 9.05 h	Sb 129 4.366 h	Sb 130 39.5 m	Sb 131 23.03 m	Sb 132 2.79 m	Sb 133 2.24 m	Sb 134 79.1 ms	Sb 135 1.675 s	Sb 136 5.15 s	Sb 137 488 ms
50	Sn 126 230 ky	Sn 127 2.10 h	Sn 128 59.07 m	Sn 129 2.23 m	Sn 130 3.72 m	Sn 131 54.0 s	Sn 132 39.7 s	Sn 133 1.46 s	Sn 134 800 ms	Sn 135 515 ms	Sn 136 350 ms

$$\sum = 21.36 \text{ MeV}$$

## Widmo całkowitej energii elektronów

$$I(f \leftarrow i; E) = \frac{|J_{fi}|^2}{2\pi^3 \hbar^7 c^6} E(E_0 - E) \sqrt{E^2 - m_e^2 c^4} \sqrt{(E_0 - E)^2 - m_e^2 c^4}$$

## Funkcja Fermiego

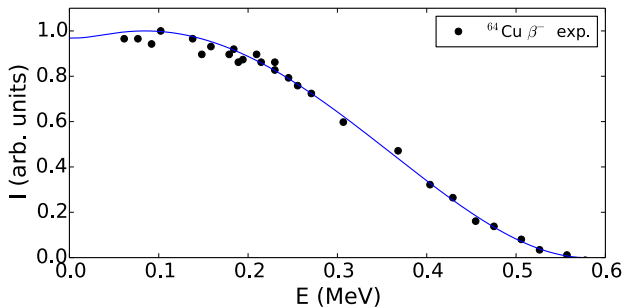
$$F(Z, E) = \frac{|\psi_e(0)|^2}{|\psi_e^{Z=0}(0)|^2}$$

## Postać relatywistyczna

$$F(Z, E) = \frac{2(1+s)}{\Gamma(2s)^2} (2p\rho)^{2s-2} \exp(\pi\eta) |\Gamma(s-1+i\eta)|^2$$

$$s = \sqrt{1 - \alpha^2 Z^2}, \quad \alpha \approx 1/137, \quad \eta = \pm \frac{Ze^2}{\hbar v}, \quad (+ \text{ dla } \beta^-), \quad \rho = \frac{R}{\hbar/mc^2}$$

# Widmo cząstek $\beta$ (2)



Inne poprawki (nieuwzględnione):

- Ekranowanie przez elektrony
- Skończony rozmiar jądra
- Odrzut jądra

# Energia wydzielona w rozszczepieniu

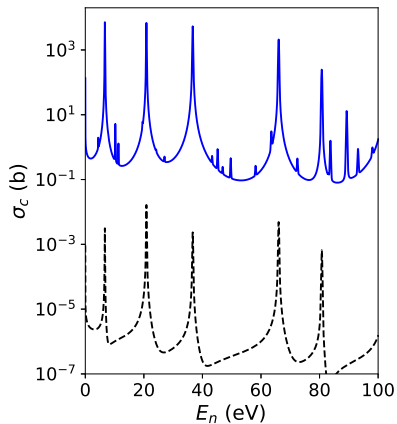
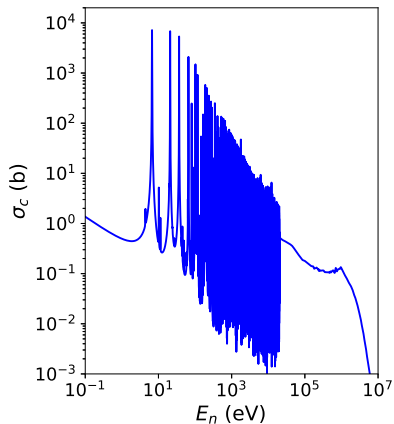
<b>Źródło</b>	<b>Energia (MeV)</b>	<b>Zasięg</b>
Energia kinetyczna fragmentów	168	< 1 mm
Energia kinetyczna neutronów	5	1 - 10 cm
Natychmiastowe promieniowanie $\gamma$	7	10 - 100 cm
Promieniowanie $\gamma$ z wychwytu neutronów	7	10 - 100 cm
Rozpad produktów rozszczepienia (energia opóźniona)		
Energia kinetyczna elektronów	5	$\sim$ mm
Promieniowanie $\gamma$	3	10 - 100 cm
Energia kinetyczna antyneutrin	12	$\infty$
Suma	187 + 8 + 12 = 207 MeV	

# Energia odzyskiwalna

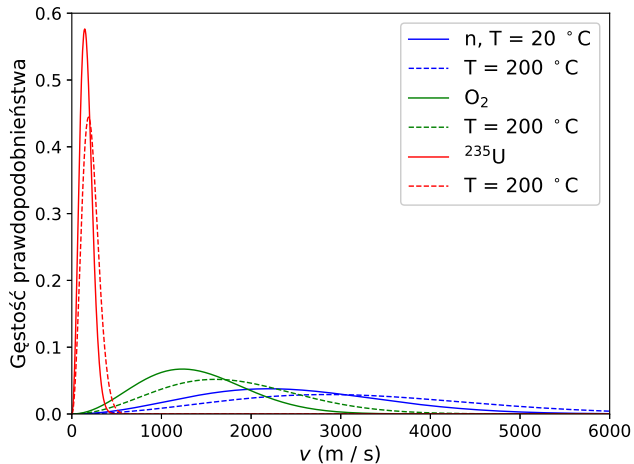
<b>Izotop</b>	<b>Neutrony termiczne</b>	<b>Neutrony prędkie</b>
<sup>233</sup> U	190.0	-
<sup>235</sup> U	192.9	-
<sup>239</sup> Pu	198.5	-
<sup>241</sup> Pu	200.3	-
<sup>232</sup> Th	-	184.2
<sup>234</sup> U	-	188.9
<sup>236</sup> U	-	191.4
<sup>238</sup> U	-	193.9
<sup>237</sup> Np	-	193.6
<sup>238</sup> Pu	-	196.9
<sup>240</sup> Pu	-	196.9
<sup>242</sup> Pu	-	200.0



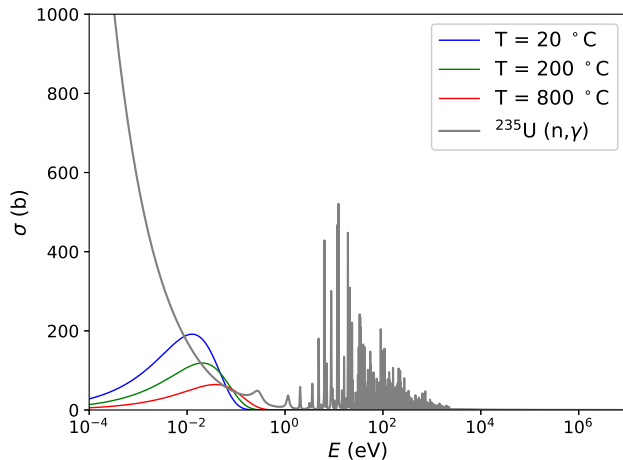
# Reakcja $(n, \gamma)$ dla $^{238}\text{U}$



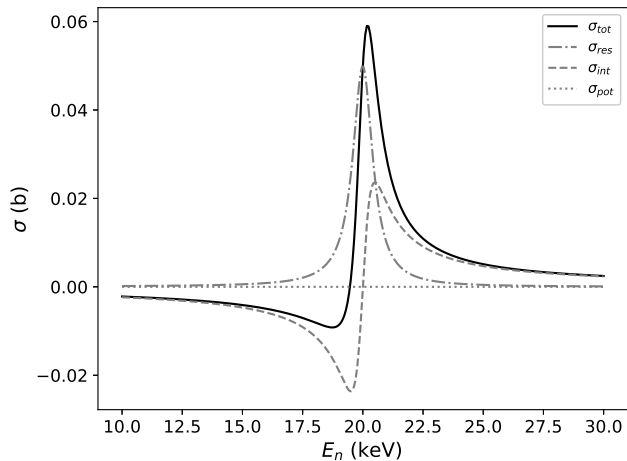
# Rozkład Maxwella



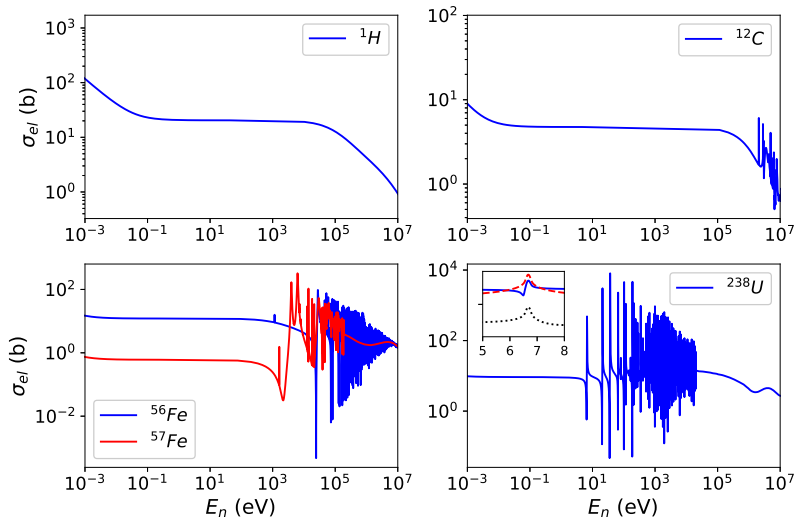
# Rozkład Maxwella



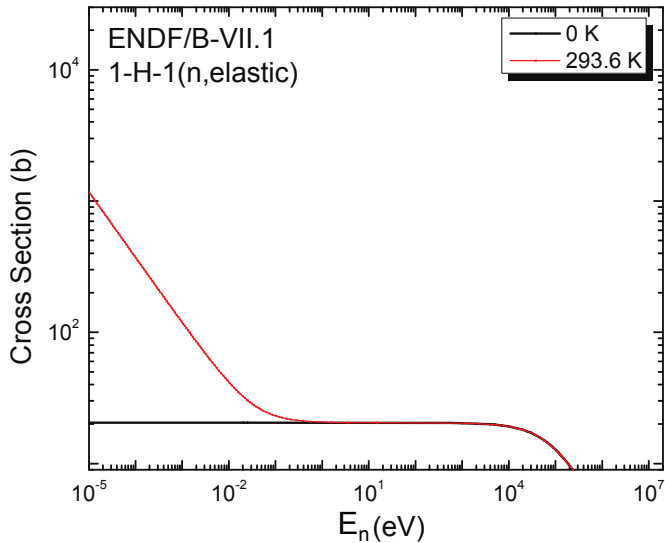
# Składowe rezonansu



# Przekrój czynny na rozproszenie



# Uśrednianie po ruchach termicznych



# Úsrednioné przekroje czynne

Spectrum-Averaged Thermal, Resonance, and Fast Neutron Cross Sections (barns)

Nuclide	Thermal Cross Section			Resonance Cross Section		Fission Spectrum Cross Section				
	$\sigma_f$	$\sigma_\gamma$	$\sigma_{el}$	$\sigma_f$	$\sigma_\gamma$	$\sigma_f$	$\sigma_\gamma$	$\sigma_{el}$	$\sigma_{in}$	$\sigma_{n,2n}$
<sup>233</sup> U <sub>92</sub>	469	41	11.9	774	138	1.9	0.07	4.4	1.2	$4 \times 10^{-3}$
<sup>235</sup> U <sub>92</sub>	507	87	15.0	278	133	1.2	0.09	4.6	1.8	$12 \times 10^{-3}$
<sup>239</sup> Pu <sub>94</sub>	698	274	7.8	303	182	1.8	0.05	4.4	1.5	$4 \times 10^{-3}$
<sup>241</sup> Pu <sub>94</sub>	938	326	11.1	573	180	1.6	0.12	5.2	0.9	$21 \times 10^{-3}$
<sup>232</sup> Th <sub>90</sub>	-	6.5	13.7	-	84	0.08	0.09	4.6	2.9	$14 \times 10^{-3}$
<sup>238</sup> U <sub>92</sub>	-	2.4	9.4	2	278	0.31	0.07	4.8	2.6	$12 \times 10^{-3}$
<sup>240</sup> Pu <sub>94</sub>	0.05	264	1.5	8.9	8103	1.4	0.09	4.3	2.0	$4 \times 10^{-3}$
<sup>242</sup> Pu <sub>94</sub>	-	16.8	8.3	5.6	1130	1.1	0.09	4.8	1.9	$7 \times 10^{-3}$
<sup>1</sup> H <sub>1</sub>	-	0.29	20.5	-	0.15	-	$4 \times 10^{-5}$	3.9	-	-
<sup>2</sup> H <sub>1</sub>	-	$5 \times 10^{-4}$	3.4	-	$3 \times 10^{-4}$	-	$7 \times 10^{-6}$	2.5	-	-
<sup>10</sup> B <sub>5</sub>	-	443	2.1	-	0.22	-	$8 \times 10^{-5}$	2.1	0.07	-
<sup>12</sup> C <sub>6</sub>	-	0.003	4.7	-	0.002	-	$2 \times 10^{-5}$	2.3	0.01	-
<sup>16</sup> O <sub>8</sub>	-	$2 \times 10^{-4}$	3.8	-	$6 \times 10^{-4}$	-	$9 \times 10^{-5}$	2.7	-	-
<sup>23</sup> Na <sub>11</sub>	-	0.47	3.0	-	0.31	-	$2 \times 10^{-4}$	2.7	0.5	-
<sup>56</sup> Fe <sub>26</sub>	-	2.5	12.5	-	1.4	-	$3 \times 10^{-3}$	3.0	0.7	-
<sup>91</sup> Zr <sub>40</sub>	-	1.1	10.6	-	6.9	-	0.01	5.0	0.7	-
<sup>135</sup> Xe <sub>54</sub>	-	$2.7 \times 10^6$	$3.8 \times 10^5$	-	$7.6 \times 10^3$	-	0.01	4.9	1.0	-
<sup>149</sup> Sm <sub>62</sub>	-	$6.0 \times 10^4$	373	-	$3.5 \times 10^3$	-	0.22	4.6	2.2	-
<sup>157</sup> Gd <sub>64</sub>	-	$1.9 \times 10^3$	819	-	761	-	0.11	4.7	2.2	$11 \times 10^{-3}$

Source Data from <http://www.nndc.bnl.gov/>.