

Część I - charakterystyka neutronów

Wczesne modele jądra i promieniotwórczości

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

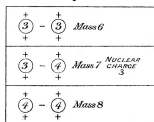


FIG. 3.

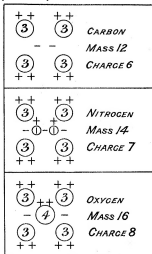
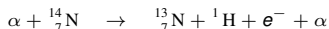


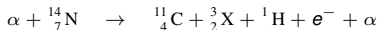
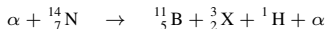
FIG. 4.

Na podstawie reakcji $\alpha + {}^{14}_7\text{N} \rightarrow \text{H} + {}^{17}\text{O}$.

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.

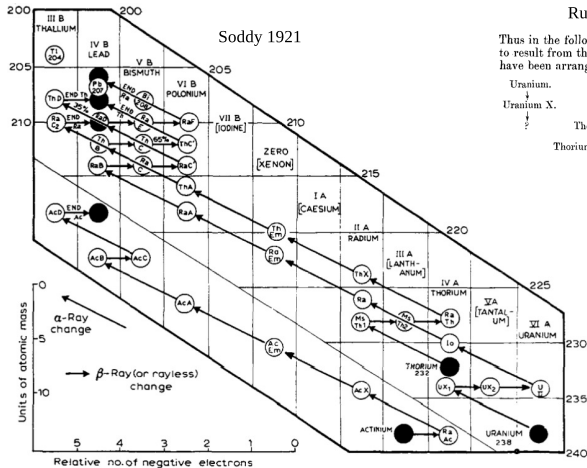


The expulsion of mass 3 carrying two charges from nitrogen, probably quite independent of the release of the H atom, lowers the nuclear charge by 2 and the mass by 3. The residual atom should be thus an isotope of boron of nuclear charge 5 and mass 11. If an electron escapes as well, there remains an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

Uranium.	Thorium.	Radium.
↓	↓	↓
Uranium X.	Thorium X.	Radium Emanation.
?	Thorium Emanation.	Radium-Excited Activity I.
	Thorium-Excited Activity I.	ditto II.
	ditto II.	ditto III.
	?	?

Izotopy i prawo przesunięć

F. Soddy, Wykład noblowski (1921)

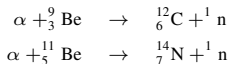
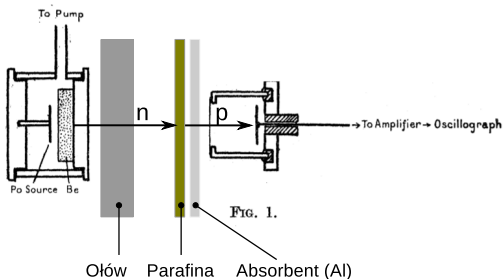
Thus uranium in the last place with an intra-atomic charge of about 90, must have between 2 and 3 units of mass per unit of charge. So that, if its nucleus be imagined to be composed of 60 α -particles with charge 120, there must be present is also 30 electrons to give the nuclear charge 90. This suggestion 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 β -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 Nature¹, 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.

¹F. Soddy, Nature 91(1913)57

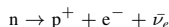
Odkrycie neutronu

- 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 γ "
- 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 α 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 $m = 939.5654205 \pm 0.000005$ MeV lub
- $1.674927471 \pm 0.000000021 \times 10^{-27}$ kg
- Czas życia $\tau = 877.83 \pm 0.3$ s (2025)
- Rozpad



- Ładunek $q = -0.2 \pm 0.8 \times 10^{-21}$ e (brak ładunku)
- Elektryczny moment dipolowy $d < 0.18 \times 10^{-25} e\text{ cm}$ (brak polaryzacji ładunku wewnątrz)
- Moment magnetyczny $\mu = -1.9130427 \pm 0.0000005 \mu_N$ (istnieje rozkład ładunku wewnątrz)

Zadanie

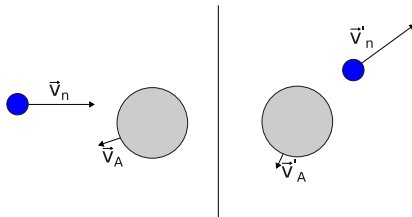
Neutron termiczny (o energii 25 meV) porusza się w ziemskim polu grawitacyjnym. Początkowo neutron jest na wysokości 1 m, a wektor prędkości neutronu jest równoległy do powierzchni Ziemi. Po jakim czasie i w jakiej odległości od punktu początkowego neutron opadnie na Ziemię? Czy oddziaływania grawitacyjne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

Zadanie

Powtórzyć obliczenia dla ultrazimnego neutronu o energii 300 neV.

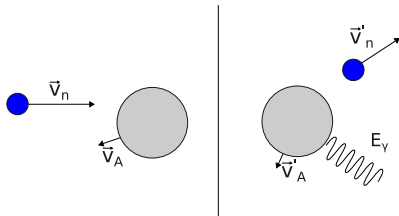
Rozpraszanie elastyczne

- Rozpraszanie elastyczne neutronów ma miejsce gdy po zderzeniu z jądrem atomowym zachowana jest energia kinetyczna układu



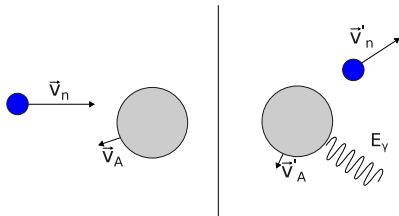
Rozpraszanie nieelastyczne

- W rozpraszaniu nieelastycznym neutron jest pochłonięty przez jądro, a następnie wyemitowany powtórnie, ale z inną energią kinetyczną.
- Różnica w energii kinetycznej powoduje wzbudzenie jądra, które najczęściej następnie emituje kwant γ .



Rozpraszanie nieelastyczne

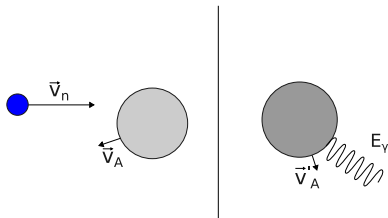
- W rozpraszaniu nieelastycznym neutron jest pochłonięty przez jądro, a następnie wyemitowany powtórnie, ale z inną energią kinetyczną.
- Różnica w energii kinetycznej powoduje wzbudzenie jądra, które najczęściej następnie emituje kwant γ .



- Zachowana jest energia całkowita układu (ale nie energia kinetyczna składników)

Wychwyt radiacyjny

- Wychwyt radiacyjny ma miejsce, gdy neutron zostanie pochłonięty przez jądro atomowe, a następnie energia wzbudzenia jądra złożonego zostanie wyemitowana pod postacią kwantu lub kwantów γ .

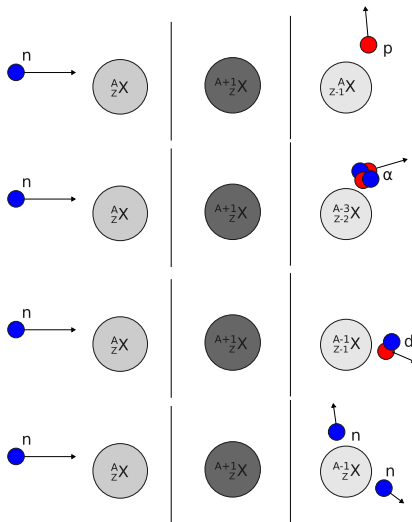


Wychwyt z emisją cząstek

- W wychwycie neutronu z emisją cząstek, neutron jest pochłonięty przez jądro atomowe, a następnie emituje ono lekkie cząstki (proton, deuteron, α , neutrony, ...)

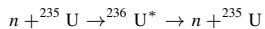
Wychwyt z emisją cząstek

- W wychwycie neutronu z emisją cząstek, neutron jest pochłonięty przez jądro atomowe, a następnie emituje ono lekkie cząstki (proton, deuteron, α , neutrony, ...)



Nazewnictwo

- Rozpraszanie elastyczne (n, EL)

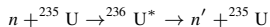


Nazewnictwo

- Rozpraszanie elastyczne (n, EL)



- Rozpraszanie nieelastyczne (n, n')

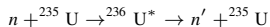


Nazewnictwo

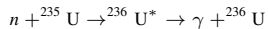
- Rozpraszanie elastyczne (n, EL)



- Rozpraszanie nieelastyczne (n, n')



- Wychwyt radiacyjny (n, γ)



Nazewnictwo

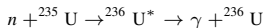
- Rozpraszanie elastyczne (n, EL)



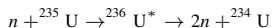
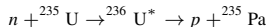
- Rozpraszanie nieelastyczne (n, n')



- Wychwyt radiacyjny (n, γ)

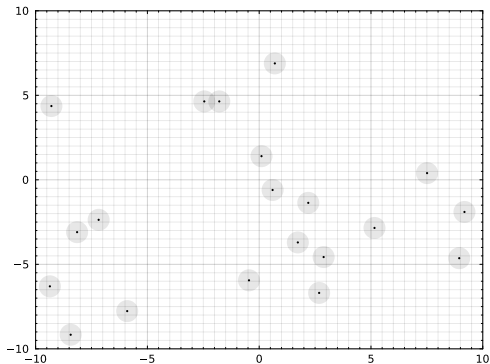


- Wychwyt z emisją cząstek (n, p), (n, d), (n, α), ($n, 2n$), ...



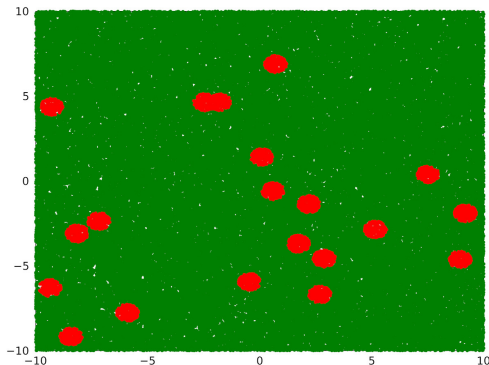
Przekrój czynny

- Załóżmy, że mamy $a = 10$ tarcz o średnicy 1 cm każda w kwadracie o boku 20 cm. Losowo padająca cząstka jeżeli trafi w tarczę, zostanie zatrzymana, jeżeli nie - przejdzie. Ile cząstek zostanie zatrzymanych na 100 000 strzałów?



Przekrój czynny

- Załóżmy, że mamy $a = 10$ tarcz o średnicy 1 cm każda w kwadracie o boku 20 cm. Losowo padająca cząstka jeżeli trafi w tarczę, zostanie zatrzymana, jeżeli nie - przejdzie. Ile cząstek zostanie zatrzymanych na 100 000 strzałów?



- Pole powierzchni tarcz to $s = a\pi r^2 = 10 \cdot \pi \cdot 0.5^2 = 7.854$. Pole powierzchni całego obszaru $S = 400$. Spodziewamy się, że na $k = 100000$ strzałów zatrzymanych będzie

$$k \frac{s}{S} = 100000 \times \frac{7.854}{400} = 1963$$

czyli 1.963%

Przekrój czynny

- Jeżeli przyjmiemy, że pada Φ cząstek na sekundę na cm^2 obszaru, to łączna liczba padających cząstek na obszar o powierzchni S to

$$k = \Phi S$$

Przekrój czynny

- Jeżeli przyjmiemy, że pada Φ cząstek na sekundę na cm^2 obszaru, to łączna liczba padających cząstek na obszar o powierzchni S to

$$k = \Phi S$$

- Jeżeli rozmiar jednej tarczy to σ i tych tarcz jest N , to liczba zatrzymanych cząstek to liczba padających cząstek pomnożona przez stosunek pola powierzchni zajętej przez tarcze ($N\sigma$) do całej powierzchni (S).

$$R = \Phi S \frac{N\sigma}{S} = \Phi N\sigma$$

Przekrój czynny

- Jeżeli przyjmiemy, że pada Φ cząstek na sekundę na cm^2 obszaru, to łączna liczba padających cząstek na obszar o powierzchni S to

$$k = \Phi S$$

- Jeżeli rozmiar jednej tarczy to σ i tych tarcz jest N , to liczba zatrzymanych cząstek to liczba padających cząstek pomnożona przez stosunek pola powierzchni zajętej przez tarcze ($N\sigma$) do całej powierzchni (S).

$$R = \Phi S \frac{N\sigma}{S} = \Phi N\sigma$$

- W podobny sposób zachowują się neutrony oraz jądra atomowe, a wielkość σ nosi nazwę przekroju czynnego.

Przekrój czynny

- Jeżeli przyjmiemy, że pada Φ cząstek na sekundę na cm^2 obszaru, to łączna liczba padających cząstek na obszar o powierzchni S to

$$k = \Phi S$$

- Jeżeli rozmiar jednej tarczy to σ i tych tarcz jest N , to liczba zatrzymanych cząstek to liczba padających cząstek pomnożona przez stosunek pola powierzchni zajętej przez tarcze ($N\sigma$) do całej powierzchni (S).

$$R = \Phi S \frac{N\sigma}{S} = \Phi N\sigma$$

- W podobny sposób zachowują się neutrony oraz jądra atomowe, a wielkość σ nosi nazwę przekroju czynnego.
- Ponieważ rozmiar jąder atomowych jest rzędu kilku fm (10^{-15} m), to rozmiar "tarczy" to

$$\pi r^2 = \pi (5 \times 10^{-15})^2 = 78.5 \times 10^{-30} = 0.785 \times 10^{-28} \text{ m}^2$$

- Dla wygody wprowadzona została jednostka $\text{barn} = 10^{-28} \text{ m}^2 = 10^{-24} \text{ cm}^2$.

Przekrój czynny

- Mikroskopowy przekrój czynny (σ_i) - efektywna powierzchnia jednego jądra w reakcji i . Jednostką jest barn (b), $1 \text{ b} = 10^{-24} \text{ cm}^2$
- Makroskopowy przekrój czynny (Σ_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 Δx

$$n = \Sigma_i \Delta x$$

- 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 cm^3 materiału

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

- Dla mieszaniny pierwiastków

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

Zadanie

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

Zadanie

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

$$R = r_0 \times A^{1/3}$$

$$\sigma_{geom} = \pi R^2$$

$$R_{eff} = \sqrt{\sigma_{exp} / \pi}$$

Izotop	R (fm)	σ_{geom} (b)	σ_{exp} (b)	R_{eff} (fm)
^1H	1.25	0.05	0.33	3.2
^2H	1.58	0.08	0.0005	0.13
^{56}Fe	4.78	0.72	2.59	9.08
^{57}Fe	4.81	0.73	2.43	8.79
^{132}Xe	4.78	1.27	0.45	3.78
^{135}Xe	6.36	1.29	2 665 000	9210
^{235}U	7.71	1.87	594	137.5
^{238}U	7.45	1.88	2.68	9.24

Zadanie

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

$$R = r_0 \times A^{1/3}$$

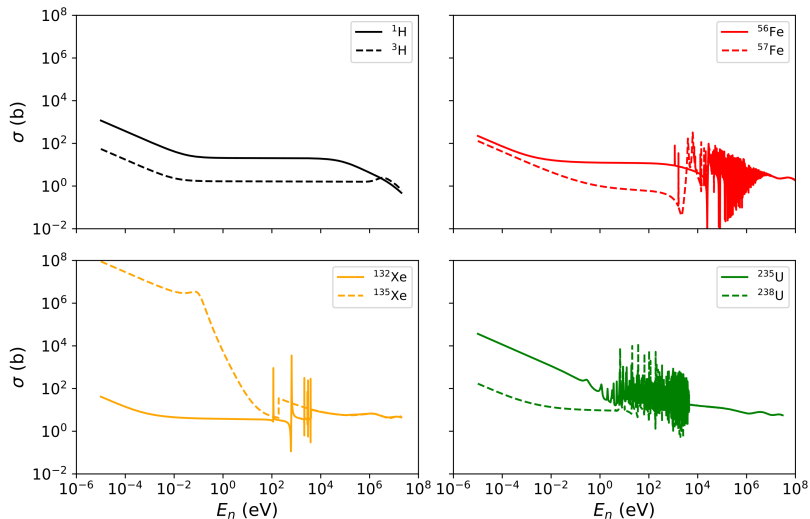
$$\sigma_{geom} = \pi R^2$$

$$R_{eff} = \sqrt{\sigma_{exp} / \pi}$$

Izotop	R (fm)	σ_{geom} (b)	σ_{exp} (b)	R_{eff} (fm)
^1H	1.25	0.05	0.33	3.2
^2H	1.58	0.08	0.0005	0.13
^{56}Fe	4.78	0.72	2.59	9.08
^{57}Fe	4.81	0.73	2.43	8.79
^{132}Xe	4.78	1.27	0.45	3.78
^{135}Xe	6.36	1.29	2 665 000	9210
^{235}U	7.71	1.87	594	137.5
^{238}U	7.45	1.88	2.68	9.24

Skąd taka różnica? Jak to możliwe?

Całkowity przekrój czynny dla wybranych izotopów

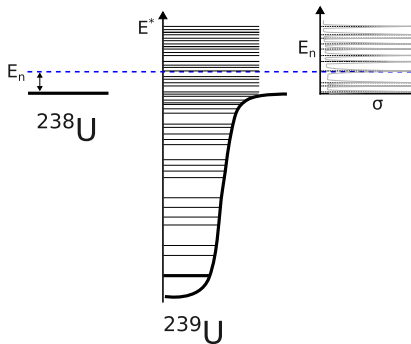


Wychwył neutronu

- Ani jądro, ani neutron nie są obiektami klasycznymi
- Jaka jest długość fali de Broglie'a dla neutronu $\lambda = h/p$?

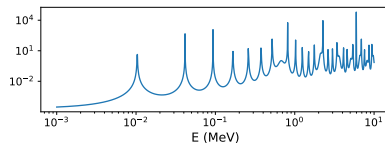
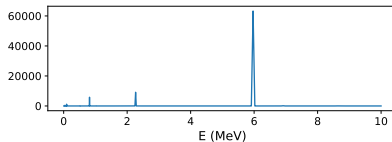
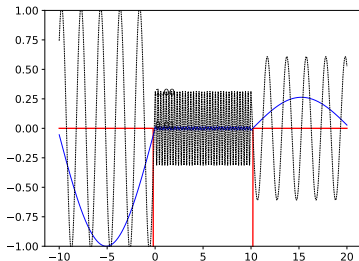
Wychwył neutronu

- Ani jądro, ani neutron nie są obiektami klasycznymi
- Jaka jest długość fali de Broglie'a dla neutronu $\lambda = h/p$?
- Jądra atomowe, z punktu widzenia mechaniki kwantowej, są dla neutronu pewną studnią potencjału.
- Padający neutron, o małej energii, znajduje się w obszarze energetycznym, w którym istnieje duża gęstość rozwiązań (stanów rozproszonych quasi-stabilnych). Odległości między tymi stanami są rzędu eV.

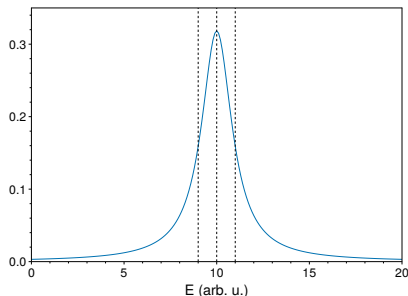


Wychwył neutronu

- Stany rezonansowe w oddziaływaniu neutronu z prostokątną studnią potencjału o głębokości 50 MeV i szerokości 10 fm



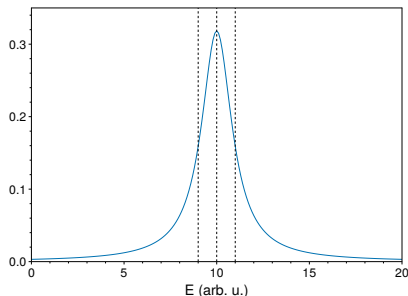
Wychwyt neutronu



- Prawdopodobieństwo wychwytu neutronu zależy od energii neutronu w układzie środka masy (E_c), energii rezonansowej E_0 , szerokości Γ oraz szerokości ze względu na wychwyt neutronu Γ_n .

$$\sigma_{\gamma}(E_c) = \frac{\Gamma_n}{\Gamma} \left(\frac{E_0}{E_c} \right)^{1/2} \frac{\Gamma^2}{\Gamma^2 + 4(E_c - E_0)^2}$$

Wychwyt neutronu



- Prawdopodobieństwo wychwytu neutronu zależy od energii neutronu w układzie środka masy (E_c), energii rezonansowej E_0 , szerokości Γ oraz szerokości ze względu na wychwyt neutronu Γ_n .

$$\sigma_{\gamma}(E_c) = \frac{\Gamma_n}{\Gamma} \left(\frac{E_0}{E_c} \right)^{1/2} \frac{\Gamma^2}{\Gamma^2 + 4(E_c - E_0)^2}$$

- Szerokość stanu jest powiązana z jego czasem życia poprzez zasadę nieoznaczoności $\Delta E \Delta t \leq \hbar/2$. Ponieważ Γ w krzywej Lorentza oznacza połowę szerokości

$$\Gamma = \frac{\hbar}{\tau} = \frac{6.582 \times 10^{-16} \text{ eV} \cdot \text{s}}{\tau}$$

Zadanie

Jaka jest czas życia stanu o szerokości 1 eV?

Zadanie

Jakiej szerokości odpowiada stan o czasie życia równym czasie przelotu swobodnego neutronu o energii kinetycznej 1 eV przez odcinek o długości odpowiadającej rozmiarowi jądra (10 fm)?

Wychwył neutronu

- Wzór opisuje przekrój czynny dla zderzeń w układzie środka masy
- Atomy i jądra w materiale mają pewien rozkład energii kinetycznej związanej z ruchami termicznymi – rozkład Maxwella

$$f(E, T) = 2\sqrt{\frac{E}{\pi}} \frac{1}{(kT)^{3/2}} \exp\left(-\frac{E}{kT}\right)$$

- Dla jakiej energii kinetycznej ten rozkład ma maksimum? ($k = 8.617 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$, $T = 293 \text{ K}$, $m = 939.565 \text{ MeV}/c^2$)

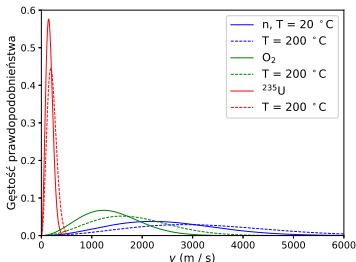
Wychwyt neutronu

- Wzór opisuje przekrój czynny dla zderzeń w układzie środka masy
- Atomy i jądra w materiale mają pewien rozkład energii kinetycznej związanej z ruchami termicznymi – rozkład Maxwella

$$f(E, T) = 2\sqrt{\frac{E}{\pi}} \frac{1}{(kT)^{3/2}} \exp\left(-\frac{E}{kT}\right)$$

- Dla jakiej energii kinetycznej ten rozkład ma maksimum? ($k = 8.617 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$, $T = 293 \text{ K}$, $m = 939.565 \text{ MeV}/c^2$)
- Rozkład Maxwella w funkcji prędkości

$$f(v, T) = \left(\frac{m}{2\pi kT}\right)^{3/2} 4\pi v^2 \exp\left(-\frac{mv^2}{2kT}\right)$$



- Dla jakiej prędkości mamy maksimum? Jakiej energii kinetycznej odpowiada?

Reakcja z ruchomą tarczą

- Przekrój czynny musimy uśrednić po ruchach jądra

$$\bar{\sigma}(E, T) = \frac{1}{v(E)} \int E' |v(E) - v(E')| \sigma(E_c) f(E', T)$$

gdzie E i E' to energia neutronu i jądra w układzie laboratoryjnym.

Reakcja z ruchomą tarczą

- Przekrój czynny musimy uśrednić po ruchach jądra

$$\bar{\sigma}(E, T) = \frac{1}{v(E)} \int E' |v(E) - v(E')| \sigma(E_c) f(E', T)$$

gdzie E i E' to energia neutronu i jądra w układzie laboratoryjnym.

- Po rozpisaniu

$$\bar{\sigma}(E, T) = \frac{\sigma_0 \Gamma \gamma}{\Gamma} \left(\frac{E_0}{E} \right)^{1/2} \psi(\xi, x)$$

$$x = \frac{2}{\Gamma} (E - E_0)$$

$$\xi = \frac{\Gamma}{\sqrt{4E_0 kT/A}}$$

$$y = \frac{2}{\Gamma} (E_c - E_0)$$

$$\psi(\xi, x) = \frac{\xi}{2\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-1/4(x-y)^2 \xi^2\right) \frac{dy}{1+y^2}$$

Reakcja z ruchomą tarczą

- Przekrój czynny musimy uśrednić po ruchach jądra

$$\bar{\sigma}(E, T) = \frac{1}{v(E)} \int E' |v(E) - v(E')| \sigma(E_c) f(E', T)$$

gdzie E i E' to energia neutronu i jądra w układzie laboratoryjnym.

- Po rozpisaniu

$$\bar{\sigma}(E, T) = \frac{\sigma_0 \Gamma \gamma}{\Gamma} \left(\frac{E_0}{E} \right)^{1/2} \psi(\xi, x)$$

$$x = \frac{2}{\Gamma} (E - E_0)$$

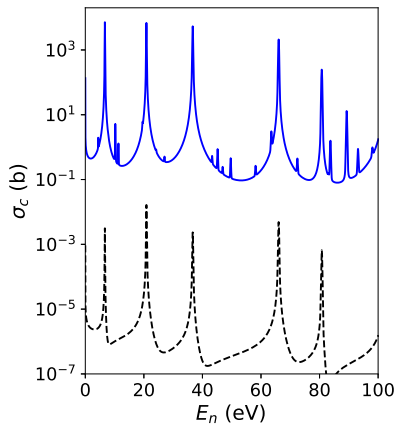
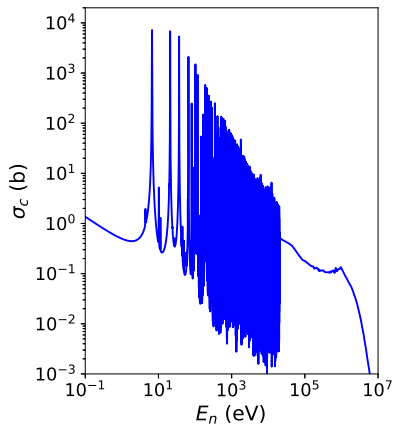
$$\xi = \frac{\Gamma}{\sqrt{4E_0 kT/A}}$$

$$y = \frac{2}{\Gamma} (E_c - E_0)$$

$$\psi(\xi, x) = \frac{\xi}{2\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-1/4(x-y)^2 \xi^2\right) \frac{dy}{1+y^2}$$

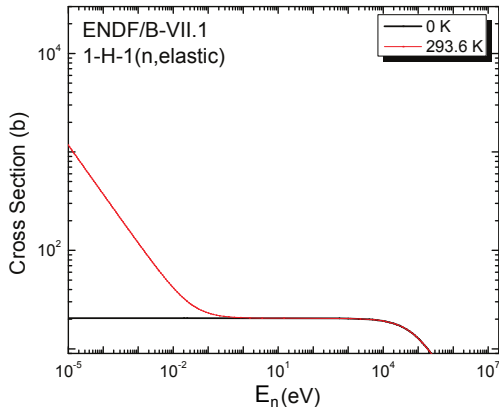
- Najważniejsze dla nas będzie fakt, iż $\sigma \sim \sqrt{E_0/E}$

Reakcja (n, γ) dla ^{238}U



Wpływ temperatury

- Przekrój czynny jest podawany zwykle dla temperatury pokojowej (20°C)
- Dla niektórych izotopów można znaleźć także dane ekstrapolowane do temperatury 0 K
- Przy braku ruchów termicznych zależność $1/\sqrt{E}$ (czyli $1/v$) dla niskich energii zanika



Wpływ temperatury

- Dla neutronów termicznych ($< 1\text{eV}$) poniższy wzór pozwala przeliczać zmianę przekroju czynnego dla danej temperatury (T w Kelwinach), jeżeli znany jest dla temperatury pokojowej σ_0 ($T_0 = 293^\circ\text{K}$)

$$\sigma = \sigma_0 \left(\frac{T_0}{T} \right)^{1/2}$$

Wpływ temperatury

- Dla neutronów termicznych ($< 1\text{eV}$) poniższy wzór pozwala przeliczać zmianę przekroju czynnego dla danej temperatury (T w Kelwinach), jeżeli znany jest dla temperatury pokojowej σ_0 ($T_0 = 293^\circ\text{K}$)

$$\sigma = \sigma_0 \left(\frac{T_0}{T} \right)^{1/2}$$

- W przypadku reakcji przez rezonanse wpływ temperatury nazywa się również poszerzeniem Dopplerowskim. Dla spoczywającego jądra, pochłonie ono neutrony o bardzo wąskim przedziale energii E_0 . Jeżeli jądro porusza się w stronę neutronu to energia neutronu musi być mniejsza, aby pasowała do E_0 , a jeżeli w przeciwnym kierunku odpowiednio większa. Wzrost temperatury powoduje wzrost wibracji i prędkości cząstek materii i w efekcie rezonanse poszerzają się i wyłapują neutrony z szerszego zakresu energii.

