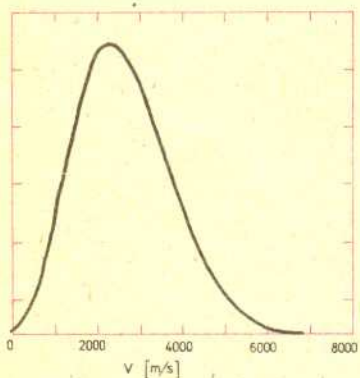


Ultrazimne neutrony (I)

Dr Konrad

BLINOWSKI



Maxwellowski rozkład termicznych neutronów jako funkcja prędkości.



Rozwiązanie zadania M 558.
Z pięciu miejsc zajętych i jedenastu pustych można otrzymać (patrz zadanie M 556) nie więcej niż jedenaście serii – tyle właśnie mamy. Przy jednakowo prawdopodobnych rozmieszczeniach szansa uzyskania takiego wyniku wynosi, na mocy zadania M 557,

$$\frac{\binom{4}{4} \binom{10}{5}}{\binom{16}{5}} = 0,0577 \dots$$

Jest to raczej niedużo i łatwiej uwierzyć, że goście przy barze starają się siedzieć osobno.

Skąd się biorą neutrony zimne i ultrazimne, czyli neutrony o bardzo niskich energiach? Spróbujmy odpowiedzieć na to pytanie śledząc przebieg spowalniania neutronu od chwili jego otrzymania. Najbardziej rozpowszechnionymi źródłami neutronów, używanych do badań i zastosowań praktycznych, są reaktory działające na zasadzie kontrolowanej reakcji łańcuchowej. Neutrony otrzymuje się w reaktorze w wyniku reakcji rozszczepienia jąder uranu 235, z których każda wyzwala energię wynoszącą około 200 MeV. Jest to głównie energia kinetyczna ciężkich fragmentów rozszczepienia; niewielka jej część przypada na swobodne neutrony, których jest średnio 2,5 na jedno rozszczepienie. Średnia energia neutronu z rozszczepienia wynosi 2 MeV, ale są też neutrony o energii większej, dochodzącej do 15 MeV. Prędkie neutrony zderzając się z jądrami atomów moderatora przekazują im swoją energię kinetyczną. Proces spowalniania do energii termicznych zachodzi w czasie $10^{-7} - 10^{-3}$ s, a w miarę jak maleje energia neutronów, zmienia się jego mechanizm. Przy energii rzędu 1 eV istotną staje się struktura molekularna moderatora, a to dlatego, że energia wiązań atomów w cząsteczkach wynosi około 1 eV. Energia przekazywana teraz przez neutrony powoduje pobudzenie w cząsteczkach drgań oscylacyjnych i rotacyjnych.

Neutrony o energii mniejszej niż 0,1 eV rozpraszają się na cząsteczkach jak na sztywnych obiektach poruszających się ze średnią energią drgań termicznych kT , gdzie $k = 8,617 \cdot 10^{-5}$ eV/K jest stałą Boltzmana, a T – temperaturą moderatora. W końcowej fazie procesu spowalniania, nazywanego też termalizacją, dochodzi do wzajemnej wymiany energii między neutronami a cząsteczkami lub atomami spowalnicza. Jeżeli spowalniane neutrony nie są absorbowane w moderatorze, albo ich pochłanianie jest słabe, wówczas zachodzi równowaga termodynamiczna między neutronami a ośrodkiem spowalniającym. Rozkład prędkości neutronów dany jest funkcją statystycznego rozkładu Maxwella:

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

gdzie $dN(v)$ jest liczbą neutronów w przedziale prędkości $(v, v + dv)$, N – liczbą wszystkich neutronów, a m – masą neutronu. Rozkład Maxwella liczby neutronów w zależności od ich energii E ma postać:

$$N(E)dE = A \frac{E^{1/2}}{(kT)^{3/2}} \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) dE,$$

gdzie A jest stałą związaną z liczbą neutronów i średnim czasem ich życia w moderatorze. Wykres rozkładu Maxwella prędkości neutronów jest przedstawiony na rysunku obok.

Najbardziej prawdopodobna prędkość v_0 , odpowiadająca maksimum rozkładu, jest określona zależnością zachodzącą między energią kinetyczną a temperatura

$$\frac{1}{2}mv_0^2 = kT, \quad \text{skąd} \quad v_0 = \left(\frac{2kT}{m}\right)^{1/2}.$$

Dla temperatury pokojowej $T = 293$ K, po podstawieniu $m = 1,6747 \cdot 10^{-24}$ g, otrzymujemy $kT = 0,02525$ eV i $v_0 = 2\,200$ m/s. Podobnie możemy obliczyć średnią prędkość, przyjmując zgodnie z prawami termodynamiki średnią energię kinetyczną w stanie równowagi termicznej $E_{sr} = \frac{3}{2}kT$. Jak widzimy, termiczne neutrony poruszają się bardzo szybko, szybciej od pocisku karabinowego. Tak duża prędkość mimo małej energii jest, oczywiście, uwarunkowana wartością masy neutronu. Rozkład Maxwella dopuszcza w stanie równowagi termicznej obecność zarówno neutronów gorących, którym odpowiada temperatura $T = 2\,000$ K i więcej, jak również neutronów zimnych (ZN), bardzo zimnych (BZN) i ultrazimnych (UZN) o energii rzędu 10^{-7} eV, dla której $T = 0,001$ K. Tak więc skala energetyczna widma neutronów z reaktora rozciąga się od 10^7 eV do 10^{-7} eV. Możliwość otrzymania ultrazimnych neutronów z widma termicznego została zauważona już w 1959 r. Wówczas jednak pierwsze próby stwierdzenia obecności takich neutronów nie miały szans powodzenia. Powodem było zbyt mała gęstość neutronów o skrajnie małych energiach. Praktycznie



Rozwiązanie zadania M 557.

Będziemy uważać jednakowe litery za nierozróżnialne. Jest $\binom{a+b}{a}$ sposobów ustawienia liter w ciąg (ponieważ trzeba wybrać a miejsc dla liter A spośród $a+b$ miejsc).

Zobaczmy teraz, na ile sposobów można otrzymać m serii z a elementów.

Sprowadza się to do pytania o liczbę rozmieszczeń a kul w m komórkach tak, by wszystkie komórki były zajęte.

Ponieważ jest a kul i $a-1$ miejsc między nimi, w które można wstawić $m-1$ przegródek, sposobów jest $\binom{a-1}{m-1}$.

Niech $k=2m$. Jak widzieliśmy w poprzednim zadaniu, musi być m serii liter A i m serii liter B . Mamy

$$p_{2m} = \frac{2 \binom{a-1}{m-1} \binom{b-1}{m-1}}{\binom{a+b}{a}}$$

ponieważ można rozpocząć ciąg litera A lub B .

Niech teraz $k=2m+1$. Wtedy może być m serii A i $m+1$ serii B lub odwrotnie, skąd

$$p_{2m+1} = \frac{\binom{a-1}{m} \binom{b-1}{m-1} + \binom{a-1}{m-1} \binom{b-1}{m}}{\binom{a+b}{a}}$$

przy czym przyjmujemy umowę, że $\binom{p}{q} = 0$, o ile $q > p$.

eksperymenty w tym kierunku rozpoczęto prawie 10 lat później. Nastąpiło to po opracowaniu i uruchomieniu tak zwanych źródeł zimnych neutronów umieszczonych w reaktorach w pobliżu strefy aktywnej. Są to pojemniki zawierające jako moderator ciekły wodór H_2 lub deuter D_2 albo ich mieszaninę. W takim moderatorze o temperaturze 20 K rozkład Maxwella przesuwają się w kierunku początku skali energii. Zawartość ultrazimnych neutronów w widmie dla $T=20$ K jest już na tyle wysoka, że umożliwia wyprowadzenie ich na zewnątrz reaktora i wykorzystanie do eksperymentów. Określenie przynależności neutronu do grupy bardzo zimnych lub ultrazimnych nie jest ścisłe. Nie ma dokładnie zdefiniowanej granicy oddzielającej te dwie sąsiadujące grupy. Przyjęto uważać za ultrazimne takie neutrony, które poruszając się w próżni odbijają się całkowicie od każdej powierzchni materialnego ośrodka, niezależnie od rodzaju materiału i kąta padania. Są to więc neutrony o właściwości pozwalającej teoretycznie na przechowywanie ich w zamkniętej przestrzeni tak długo, jak na to pozwala czas życia swobodnego neutronu. Mówiąc o całkowitym odbiciu neutronów mamy na myśli, oczywiście, odbicie natury optycznej, wynikające z optycznych właściwości neutronu, a określone przez długość fali λ :

$$\lambda = \frac{h}{mv} \quad \text{albo} \quad \lambda = \frac{h}{\sqrt{2mE}} = \frac{0,286}{\sqrt{E}} \text{ \AA},$$

gdzie h – stała Plancka, E – energia neutronu w eV, współczynnik załamania ośrodka $n = 1 - \frac{\lambda^2 N b}{2\pi}$, gdzie N – liczba jąder w 1 cm^3 , b – długość rozpraszania. Długość rozpraszania może być interpretowana jako zasięg oddziaływania neutronu z jądrem ośrodka. Ze wzoru na współczynnik załamania można wyznaczyć kąt krytyczny θ_c dla całkowitego odbicia, bowiem $\cos \theta_c = n$. Kąt θ_c jest zawarty między kierunkiem padającego neutronu a powierzchnią oddzielającą próżnię od ośrodka materialnego (a nie jak w optyce – między kierunkiem padania i normalną do powierzchni). Przyjmując maksymalną wartość $\theta_c = 90^\circ$ możemy oszacować λ_c spełniające warunek na to, aby neutron był ultrazimny dla ośrodka o długości rozpraszania b . Na przykład dla węgla (grafitu) $b(C) = 0,665 \cdot 10^{-12} \text{ cm}$, a dla izotopu niklu 58 $b(Ni) = 1,44 \cdot 10^{-12} \text{ cm}$. Korzystając ze wzoru

$$N = \frac{\text{liczba Avogadro} \cdot \text{gęstość}}{\text{ciężar atomowy}},$$

mamy

$$N(C) = \frac{6,022 \cdot 2}{12} \cdot 10^{23} \quad \text{i} \quad N(Ni) = \frac{6,022 \cdot 8,9}{58} \cdot 10^{23},$$

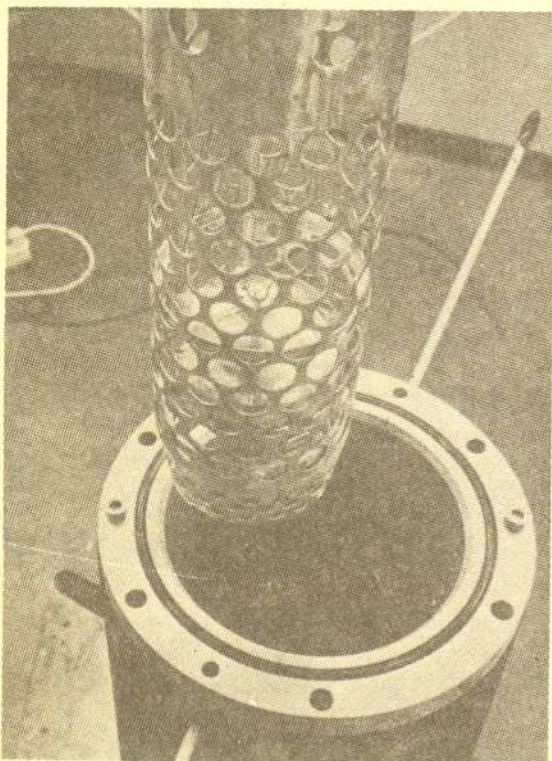
skąd otrzymujemy

$$\lambda_c(C) = 970 \text{ \AA} \quad \text{i} \quad \lambda_c(Ni) = 687 \text{ \AA}.$$

Dokładniejsza metoda obliczania krytycznych parametrów odbicia, posługująca się potencjałem oddziaływania neutronu z ośrodkiem, daje mniejsze wartości, mianowicie $\lambda_c(C) = 683 \text{ \AA}$, $\lambda_c(Ni) = 550 \text{ \AA}$.

„Temperatura”, energia, długość fali i prędkość neutronu wyrażone kolejno w kelwinach (K), elektronowoltach (eV), angstromach (Å) i m/s związane są prostymi zależnościami: $T = 949,3/\lambda^2$, $E = 0,0818/\lambda^2$, $T = 1,16 \cdot 10^4 E$, $v = 1,385 \cdot 10^4 \sqrt{E}$. Obliczmy, jaka temperatura odpowiada neutronowi o energii 10^{-7} eV i jaka jest jego prędkość.

Otrzymany wynik $T = 0,001$ K mówi nam, skąd się bierze nazwa „ultrazimne” neutrony, a prędkość $v = 4,4$ m/s świadczy o tym, że ultrazimny neutron może być dogoniony i schwytyany przez biegnącego człowieka. Oczywiście, na schwytywanie ultrazimnych neutronów wymyślono inne sposoby. Będzie o nich mowa w drugiej części artykułu, a także o tym, po co się to robi.



Źródło zimnych neutronów do zainstalowania w kanale poziomym reaktora w Kjeller (Norwegia). Wewnątrz perforowanej osłony widoczny kulisty zbiornik na ciekły wodór.