

Prof. dr Andrzej HRYNKIEWICZ, członek korespondent PAN



Swobodny neutron ulega rozpadowi β^- ze średnim czasem życia $\tau = 940$ s. W latach trzydziestych, wkrótce po odkryciu neutronu przez Chadwicka (1932 r.), E. Fermi zwrócił uwagę na to, że w zasadzie można by bardzo powolne neutrony przechowywać „w butelce”. W 1959 r. Ja. B. Zeldowicz podał teorię, z której wynikało, że neutrony o energii kilkudziesięciu nanoelektronowoltów ($1 \text{ neV} = 10^{-9} \text{ eV}$), a więc poruszające się z prędkościami kilku m/s, będą na granicy próżni — materia ulegać odbiciu od większości materiałów niezależnie od kąta padania. Dla cząstki o pędzie p długość fali de Broglie'a $\lambda = \frac{h}{p}$, gdzie h jest stałą Plancka. Jeśli jest ona większa od odległości międzyatomowych w danej substancji, to neutron napotyka na powierzchni próg potencjału U dany przez wzór

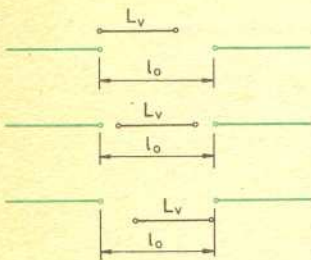
$$(1) \quad U = \frac{h^2}{2\pi m} N a_{\text{coh}},$$

gdzie m jest masą neutronu, N — gęstością jądrową danej substancji, tj. liczbą jąder w jednostce objętości, a a_{coh} — tzw. koherentną długością rozpraszania neutronów w danym materiale. a_{coh} jest wielkością związaną z przekrojem czynnym na elastyczne rozpraszanie neutronów, a więc z prawdopodobieństwem tego procesu. Ponieważ dla większości jąder atomowych $a_{\text{coh}} > 0$ potencjał U ma na ogół charakter odpychający i neutron, którego energia kinetyczna E_k spełnia warunek $E_k < U$, ulega na granicy odbiciu bez zmiany energii. Powierzchnia materiału jest więc idealnym zwierciadłem dla neutronów o dostatecznie niskiej energii. W tablicy podane są dla kilku substancji graniczne wartości energii i prędkości neutronów, dla których zjawisko odbicia występuje

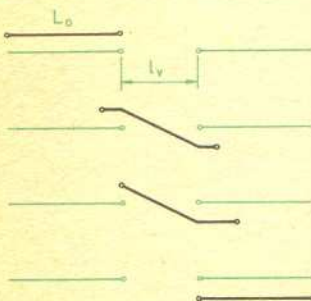
Substancja	$E_{k \text{ gr}}$ neV	V_{gr} m/s
Al	55	3,2
Mg	60,5	3,36
Cu	172	5,7
C	194	6,1
Be	240	6,8



Rozwiązanie zadania F 75. Przeciągnięcie pręta przez otwór w stole bez zmiany jego kierunku oznacza, że w układzie spoczynkowym stołu wszystkie punkty pręta przetną płaszczyznę stołu równocześnie. Zdarzenia równoczesne w układzie spoczynkowym stołu nie mogą jednak być równoczesne w układzie spoczynkowym pręta. W układzie związanym z prętem obserwator spostrzeże więc, że pręt przechodzi przez płaszczyznę stołu ukośnie, co rozwiązuje „paradoks” (patrz rysunki). Przy dokładniejszej analizie tego zdarzenia stwierdzilibyśmy, że pręt po prostu nie może być sztywny, co dowodzi, że pojęcie ciała sztywnego jest sprzeczne ze szczególną teorią względności.



a) Obraz w układzie spoczynkowym stołu.



b) Obraz w układzie spoczynkowym pręta.

Otrzymamy wyobrażenie o tym, z jak małymi energiami kinetycznymi neutronów mamy tu do czynienia, obliczając, na jaką wysokość H może się wznieść neutron o początkowej energii kinetycznej 100 neV poruszający się pionowo w górę w polu grawitacyjnym Ziemi. Korzystając ze wzoru

$$(2) \quad H = \frac{E_k}{mg},$$

gdzie g jest przyspieszeniem ziemskim i podstawiając wartości liczbowe $E_k = 100 \text{ neV} = 1,602 \cdot 10^{-26} \text{ J}$, $m = 1,672 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ i $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ otrzymamy

$$H = 0,98 \text{ m}.$$

Dlaczego neutrony o tak niskich energiach kinetycznych nazywamy ultrazimnymi? Jak wiadomo, szybkie neutrony wytwarzane np. w reaktorze jądrowym, możemy spowolnić wykorzystując materiały, w których neutron, nie wywołując reakcji jądrowych, będzie tracił energię przez elastyczne zderzenia z lekkimi jądrami. Na pytanie dlaczego materiał jest tym lepszym spowalniaczem neutronów, im z lżejszych atomów się składa, Czytelnik powinien sam łatwo znaleźć odpowiedź. Powszechnie stosowanymi spowalniaczami neutronów są woda lub parafina, zawierające dużo wodoru, a także grafit, w którym atomy węgla o liczbie masowej $A = 12$ są także stosunkowo lekkie. W spowalniaczu energia kinetyczna nie maleje jednak do zera, lecz tylko do wartości odpowiadającej średniej energii kinetycznej termicznego ruchu atomów w danej temperaturze. Energia ta jest proporcjonalna do temperatury bezwzględnej T i wyraża się wzorem

$$(3) \quad \langle E_k \rangle = \frac{3}{2} kT,$$

gdzie $k = 8,617 \cdot 10^{-5} \text{ eV/K}$ jest stałą Boltzmann.



Rozwiązanie zadania M 222.

Wybierzmy dowolną średnicę B_1, B_2 naszego okręgu. Wiemy, że

$$2 = B_1 B_2 \leq B_1 A_1 + B_2 A_1,$$

$$2 = B_1 B_2 \leq B_1 A_2 + B_2 A_2,$$

$$\dots$$

$$2 = B_1 B_2 \leq B_1 A_{100} + B_2 A_{100}.$$

Dodając te nierówności stronami otrzymamy $200 \leq (B_1 A_1 + B_1 A_2 + \dots + B_1 A_{100}) + (B_2 A_1 + B_2 A_2 + \dots + B_2 A_{100})$ i wobec tego co najmniej jedna z sum w nawiasach jest większa lub równa 100. Tak więc co najmniej jeden z dowolnych dwóch średnicowo przeciwległych punktów spełnia warunki zadania.

W przypadku spowalnicza o temperaturze pokojowej (293 K) średnia energia kinetyczna spowolnionych neutronów wynosi 0,040 eV. Neutrony o takiej średniej energii nazywamy termicznymi. Obniżając temperaturę materiału spowalniającego będziemy otrzymywać neutrony o coraz mniejszej końcowej średniej energii kinetycznej czyli coraz „zimniejsze”. Warto przypomnieć, że pierwsze eksperymenty z „zimnymi” neutronami spowolnionymi w ciekłym azocie o temperaturze 80 K przeprowadzał w 1935 r. w Cambridge znany polski fizyk Henryk Niewodniczański (1900—1968) wspólnie z C. H. Westcottem. Jeżeli średnia kinetyczna energia neutronu 0,04 eV odpowiada temperaturze pokojowej, to łatwo obliczyć, że energia neutronów 100 neV odpowiadałaby temperaturze $7 \cdot 10^{-4}$ K. Jak widać ich nazwa „ultrazimne” jest jak najbardziej uzasadniona.

Otrzymywanie ultrazimnych neutronów

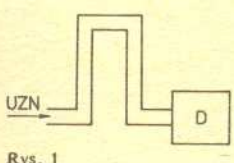
Oczywiście nie ma mowy o otrzymywaniu ultrazimnych neutronów (UZN) przez ich spowolnienie w materiale o temperaturze 10^{-3} K, gdyż nie potrafimy tak oziębic wystarczająco dużej ilości materiału spowalniającego. Muszą być zastosowane inne metody. UZN zostały otrzymane po raz pierwszy w 1968 r. przez F. L. Szapiro i jego współpracowników w Zjednoczonym Instytucie Badań Jądrowych w Dubnej oraz niezależnie przez A. Steyerla w Monachium. Nie będziemy opisywać szczegółowo metod zastosowanych w tych pracach. Zainteresowanych Czytelników odsyłam do oryginalnych publikacji. Wystarczy powiedzieć, że grupie badaczy w Dubnej udało się przy użyciu tzw. konwertera wybrać z widma energetycznego neutronów termicznych te neutrony, które mają energie kinetyczne bliskie zera i wprowadzić je do neutronowodu (rury próżniowej o ściankach pokrytych miedzią), w którym UZN, odbijając się od ścianek bez zmiany energii poruszały się w kierunku detektora. W pracach Steyerla zastosowana została między innymi tzw. „turbina neutronowa”, w której już dostatecznie zimne neutrony traciły w dalszym ciągu energię, odbijając się od układu szybko wirujących zwierciadeł metalicznych. Otrzymane dotychczas w obu laboratoriach wiązki UZN, poruszających się w neutronowodach o średnicy ok. 10 cm, mają bardzo małe natężenia rzędu 10^3 neutronów/s. Jest to strumień 10^{12} razy mniejszy od całkowitego strumienia neutronów termicznych z reaktora. Ale nawet z tak małymi ilościami UZN mogą być przeprowadzane eksperymenty. Przechowywania UZN w „butelce” nie udało się zrealizować w pełni. Okazało się, że nierówności powierzchni oraz jej zanieczyszczenia powodują straty nagromadzonych w naczyniu neutronów. Może również występować tzw. rozproszenie quasi-elastyczne powodujące wzrost energii UZN i ich ucieczkę z naczynia w momencie, gdy energia kinetyczna przekroczy wartość graniczną. W rezultacie średni czas przechowywania UZN w naczyniu nie jest równy ich średniemu czasowi życia ze względu na rozpad β (940 s), lecz krótszy od niego. Najdłuższy średni czas przechowywania UZN udało się uzyskać w naczyniu, którego wewnętrzna powierzchnia pokryta jest warstwą napyłonego w próżni czystego berylu. Wynosi on ok. 650 s.



Eksperymenty z ultrazimnymi neutronami

Widmo energetyczne UZN można zmieniać w prosty sposób przez skierowanie neutronowodu, w którym poruszają się, w górę lub w dół. Jak już wiemy zmiana poziomu o 1 m spowoduje zmianę energii kinetycznej neutronów w polu grawitacyjnym Ziemi o ok. 100 neV. Na tej zasadzie został zbudowany niezwykle prosty spektrometr grawitacyjny, który pozwala wyznaczać kształt widma energetycznego UZN, tzn. mierzyć ich liczbę w zależności od energii. Ideę takiego spektrometru ilustrują rysunki obok. Neutronowód N jest wygięty w sposób pokazany na rys. 1. UZN, aby móc dotrzeć do detektora D, muszą pokonać wysokość kolanka neutronowodu. Kolanko możemy obracać wokół osi neutronowodu, zmieniając w ten sposób wysokość, na jaką muszą się wnieść UZN. Przy określonym przechyleniu kolanka, pokazanym na rys. 2, do detektora dotrą tylko takie UZN, których energia kinetyczna E_k pozwoli na pokonanie wysokości H , czyli spełniające warunek

$$E_k \geq mgH = 0,98 H \frac{\text{neV}}{\text{cm}}.$$

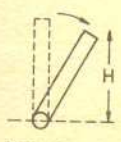


Rys. 1

Obracając kolanko i licząc UZN dochodzące do detektora wyznaczamy ich rozkład energetyczny.

Zaproponowano szereg interesujących eksperymentów, które można wykonać dysponując UZN. Do najważniejszych z nich należą:

1. Precyzyjny pomiar średniego czasu życia swobodnych neutronów, który jest obecnie znany z dokładnością kilku procent.
2. Próba wykrycia elektrycznego momentu dipolowego neutronu. Gdyby się okazało, że neutron ma elektryczny moment dipolowy, oznaczałoby to naruszenie niezmienniczości praw fizyki ze względu na zmianę kierunku upływu czasu (tzw. niezmienniczości T). Można również marzyć o tym, że nagromadzony w naczyniu gaz UZN o dostatecznie dużej gęstości będzie kiedyś wykorzystany jako tarcza do badań oddziaływań cząstek wysokich energii ze swobodnymi neutronami.



Rys. 2