

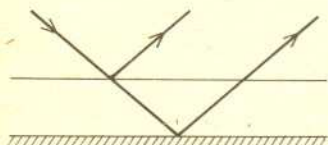
Dr Konrad BLINOWSKI

Jest wiele przyczyn, dla których fizycy interesują się neutronami o skrajnie niskich energiach. Już sama możliwość uzyskania gazu neutronowego jest wystarczającym powodem, aby dążyć do zrealizowania tego eksperymentalnie. Dysponowanie gazem neutronowym pozwala na przeprowadzenie niezwykle interesujących i ważnych dla fizyki badań. Jednym z nich jest dokładne wyznaczenie średniego czasu życia τ swobodnego neutronu – parametru potrzebnego w teorii oddziaływań słabych. Swobodny neutron jest promieniotwórczy. Rozpada się na proton, elektron i antyneutrino. Badania rozpadu neutronów prowadzone na wiązce neutronów pozwoliły na pomiar τ z dokładnością 1,5%, $\tau = (918 \pm 14)$ s. W odniesieniu do podstawowej cząstki elementarnej, jaką jest neutron, taka dokładność jest wysoce niewystarczająca. Np. mniej znana cząstka elementarna – mion (μ) – ma czas życia wyznaczony z dokładnością 0,03%, $\tau = (2,1983 \pm 0,0008) \cdot 10^{-6}$ s. Badania rozpadu na wiązce są obciążone dużymi błędami wynikającymi z niedokładności pomiaru bezwzględnej liczby neutronów znajdujących się w obserwowanym obszarze i określenia granic tego obszaru oraz z niedokładnie znanej wydajności detektorów rejestrujących protony lub elektrony z rozpadu. Uwieszenie ultrazimnych neutronów w zamkniętym pojemniku pozwala na zastosowanie tylko jednego detektora. Jeśli uda się zamknąć neutrony tak, aby ich ucieczka była znikoma, wówczas szybkość ubywania neutronów będzie zależała tylko od rozpadu badanego tak samo, jak rozpad promieniotwórczego izotopu. W takich warunkach na dokładność pomiaru czasu życia wpłyną jedynie błędy statystyczne, a nie aparaturowe.

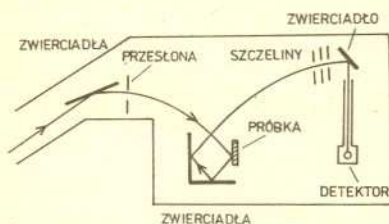
Chociaż neutron jest elektrycznie obojętny – stąd jego nazwa – brak ładunku nie oznacza, że ładunki (+) protonu i (-) elektronu nie mogą w neutronie tworzyć dipolowego momentu elektrycznego. Taką możliwość przewiduje kwarkowy model neutronu. Istnienie dipolowego momentu w neutronie świadczyłoby o łamaniu zasady zachowania symetrii czasowej. Polega ona na tym, że układ opisany funkcją zależną od czasu pozostaje tym samym układem, gdy znak czasu zmienimy na przeciwny. Wyobraźmy sobie neutron z momentem dipolowym równoległym do spinu. Odwrócenie czasu (w równaniu ruchu odwraca się bieg czasu przez podstawienie w miejsce t wartości ujemnej $-t$) zmieni kierunek wirowania na przeciwny, co oznacza odwrócenie kierunku spinu. Orientacja momentu dipolowego pozostanie jednak nie zmieniona, bo znaki ładunków (+) i (-) nie zależą od czasu. Otrzymamy więc inny neutron z dipolem elektrycznym antyrównoległym do spinu! Czyż nie jest to problem fascynujący każdego, kogo interesują fundamentalne zagadnienia budowy materii? Jeżeli neutron ma moment dipolowy, to jego energia w polu elektrycznym będzie zależała od orientacji dipola względem kierunku pola. Po zmianie orientacji neutronu – co możemy zrobić posługując się spolaryzowanymi neutronami – jego energia zmieni się o wielkość proporcjonalną do wartości momentu dipolowego i natężenia zewnętrznego pola elektrycznego. Dostrzegamy już argument przemawiający za użyciem do tych badań neutronów o jak najmniejszych energiach. Łatwiej przecież wykryć małą zmianę energii, gdy sama energia też jest mała. Istotnie, eksperymenty z zimnymi neutronami pozwoliły na oszacowanie górnej granicy momentu dipolowego neutronu jako $D \leq 3 \cdot 10^{-24} e \cdot \text{cm}$. Natomiast zastosowanie bardzo zimnych i ultrazimnych neutronów obniżyło wynik do $D \leq 0,8 \cdot 10^{-25} e \cdot \text{cm}$.

Energia bardzo zimnych neutronów (BZN) jest porównywalna z typowymi wartościami jądrowych potencjałów rozpraszania. Dzięki temu BZN są silnie rozpraszane na fluktuacjach gęstości materii, przy czym rozpraszanie zachodzi pod dość dużymi kątami, co ułatwia prowadzenie pomiarów. Fluktuacje mogą dotyczyć składu próbki albo namagnesowania spowodowanego np. strukturą domenową. Te własności BZN czynią je przydatnymi do badania niejednorodności strukturalnych wewnątrz próbek oraz w warstwach powierzchniowych ciał stałych i cieczy.

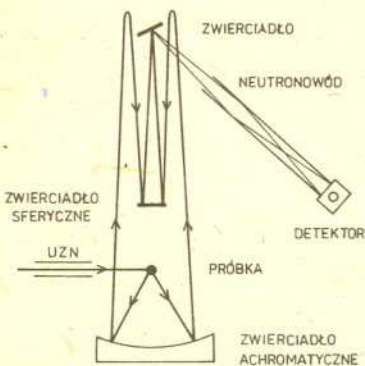
Omówione wcześniej zachowanie się BZN padających na powierzchnię oddzielającą dwa ośrodki optyczne i ulegających odbiciu może być wykorzystane nie tylko do wyznaczania amplitudy rozpraszania, ale również do pomiaru gęstości i grubości cienkiej warstwy. Gęstość wszak zależy bezpośrednio od liczby atomów w jednostce objętości N . Podczas odbijania się BZN na granicach cienkiej warstwy, której grubość jest porównywalna z λ , powstają obrazy interferencyjne fal odbijanych od obydwu powierzchni. Badając takie odbicia można określić grubość i gęstość warstwy.



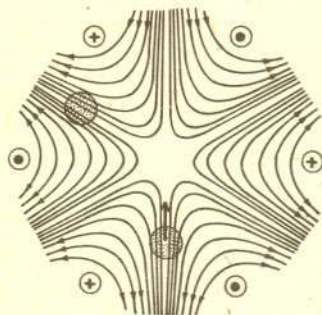
Rys. 1. Zwierciadlane odbicie neutronów od cienkiej warstwy.



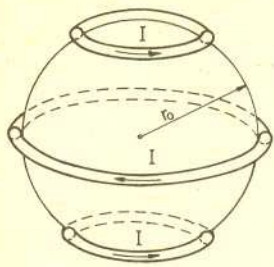
Rys. 2. Schemat działania grawitacyjnego spektrometru UZN.



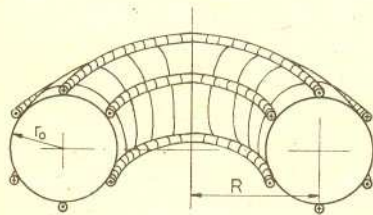
Rys. 3. Zasada funkcjonowania mikroskopu neutronowego.



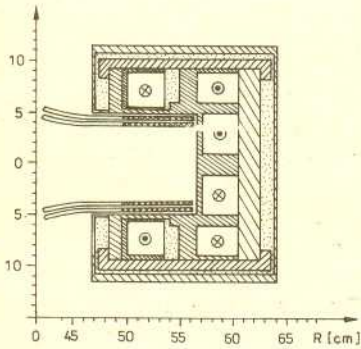
Rys. 4. Rozkład linii sił w heksapolowym polu magnetycznym.



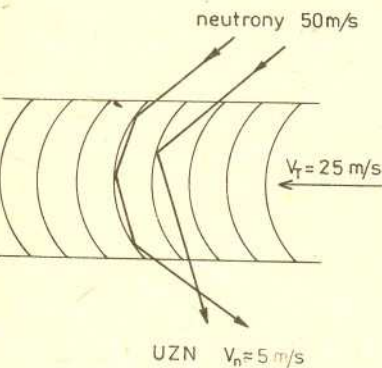
Rys. 5. Butelka magnetyczna z uzwojeniami nadprzewodzącymi.



Rys. 6. Idea torusa magnetycznego.



Rys. 7. Przekrój poprzeczny torusa ukazujący rozmieszczenie uzwojeń nadprzewodzących, oznaczonych \odot i \otimes . Maksymalne natężenie pola wynosi 3,5 T, gradient pola 1,2 T/cm. Na górze i na dole wnętrza widoczne liczniki scyntylacyjne do rejestracji elektronów z rozpadu neutronów.



Rys. 8. Wycinek obrotu turbiny do spowalniania neutronów. v_T – szybkość liniowa łopatek umocowanych na obwodzie koła.

Ze względu na bardzo małą energię ultrazimne neutrony (UZN) stanowią niezwykle czułe narzędzie do wykrywania małych zmian energii zachodzących podczas oddziaływania z materią. Rolę analizatora energii spełnia ziemskie pole grawitacyjne. Możemy łatwo obliczyć, że neutron o energii 10^{-7} eV, poruszający się przeciwnie do kierunku grawitacji, wznieśnie się na wysokość 1 m. Po zatrzymaniu się, oczywiście, znacznie spada ruchem jednostajnie przyspieszonym zwiększając swoją energię tak jak każdy spadający w próżni przedmiot. Rysunek 2 przedstawia zasadę działania pierwszego neutronowego spektrometru grawitacyjnego, zbudowanego przez dr. A. Steyerla z Politechniki Monachijskiej. Regulowane położenie szczeliny i zwierciadła umieszczonego nad detektorem określa bieg zakrzywionego w polu ciężkości toru neutronów, a tym samym ich energię. Odległość detektora od zwierciadła jest tak dobrana, aby spadające neutrony miały energię wystarczającą do przeniknięcia przez okienko detektora. Spektrometr UZN służy do badania wzbudzeń powierzchniowych oraz do badania dynamiki makromolekuł m.in. substancji biologicznych. UZN zostały również wykorzystane do realizacji mikroskopu neutronowego, którego schemat pokazany jest na rysunku 3. Część neutronów rozproszonych na próbce dochodzi do zwierciadła achromatycznego i zostaje od niego odbita poruszając się do góry po torach parabolicznych. Spadając na zwierciadło sferyczne neutrony znowu ulegają odbiciu i, zogniskowane na zwierciadle płaskim, odbijają się po raz trzeci w kierunku neutronowodu i detektora. Uzyskany „obraz” mikroskopowy jest zupełnie niepodobny do obrazów w mikroskopach optycznych lub elektronowych, niemniej jednak zawiera informacje o rozkładzie gęstości próbki, ze zdolnością rozdzielczą do 1 μ m.

Magazynowanie UZN w zamkniętych pojemnikach, chociaż w zasadzie proste, okazało się w realizacji niezwykle trudne. Czas przebywania neutronów zgromadzonych w przechowalniku jest znacznie krótszy niż należałoby oczekiwać na podstawie czasu życia neutronu. Podczas zderzeń ze ściankami naczynia jedne neutrony odbijają się sprężysto, inne odbierają porcję energii i tak „podgrzane” przy następnym spotkaniu ze ścianką przedostają się na zewnątrz. Ubywanie neutronów może być też spowodowane ich absorpcją przez zanieczyszczenia osiadłe na ściankach, przede wszystkim wodor. Należało więc zbudować taki pojemnik, aby neutrony nie mogły mieć w nim kontaktu z jakimkolwiek materiałem. Spełnienie tego wymagania stało się możliwe dzięki temu, że neutron ma moment magnetyczny. Magnetyczny dipol, jakim jest neutron, poruszający się w polu magnetycznym dostatecznie wolno i przeciwnie do linii sił pola, będzie hamowany aż do zatrzymania. Następnie znacznie się cofać ruchem przyspieszonym, podobnie jak to się dzieje w polu grawitacyjnym. Jeśli w drodze powrotnej napotka znowu pole magnetyczne skierowane przeciwnie, to sytuacja powtórzy się – na podobieństwo ruchu wahadła lub oscylatora. Neutron zostanie uwięziony bez możliwości przekroczenia granicy prędkości pozwalającej na ucieczkę. Warunki takiego ukształtowania pola magnetycznego spełnione są w heksapolowym polu magnetycznym (Rys. 4). Ideę butelki magnetycznej z heksapolową geometrią zrealizowano praktycznie w Instytucie Lauego-Langevina w Grenoble. Kulisty pojemnik jest otoczony trzema pierścieniami nadprzewodzących uzwojeń, wytwarzających sferyczne heksapolowe pole magnetyczne (Rys. 5). Zostaje on napełniony nadciętym helem i umieszczony w wiązce zimnych neutronów o energii $E \approx 0,001$ eV. Neutrony o tej energii wchodzić przez przezroczystą dla nich ściankę do wnętrza naczynia. Rozpraszają się na nadciętym płynie tracąc prawie całą swoją energię i stają się neutronami ultrazimnymi. Ich ucieczka jest uniemożliwiona przez pole magnetyczne również po opróżnieniu pojemnika z helu. Analogiczne warunki przechowywania neutronów uzyskuje się w torusie magnetycznym, w którym UZN krążą po orbicie, podobnie jak cząstki naładowane w cyklotronie (Rys. 6 i 7). W pierścieniowym zbiorniku neutronów wystarczy wytworzenie pola magnetycznego tylko po zewnętrznej stronie torusa, ponieważ siła odśrodkowa neutronów nie pozwala im na ucieczkę do środka.

Do spowalniania zimnych neutronów, w celu otrzymania ultrazimnych neutronów, służą też mechaniczne turbiny, w których łopatki umieszczone na obwodzie odbijają neutrony jak uciekające przed nimi zwierciadła. Podczas odbicia, jak w zjawisku Dopplera, zmienia się długość fali neutronu w wyniku przekazania porcji pędu ruchomej łopatce. Rysunek 8 ilustruje zasadę spowalniania neutronów za pomocą turbiny. A teraz spójrzmy na odwrotną sytuację. Czy możliwe jest przyspieszenie bardzo zimnych neutronów przez zmianę kierunku obrotu turbiny? Ależ tak! Tylko zaraz powstaje pytanie – w jakim celu? Po co znowu zwiększać energię neutronów po tylu skomplikowanych zabiegach ze spowalnianiem? Taki zamiar, wydawałoby się, zakrawa na absurd, ale nim nie jest. Kryje się w nim wyrachowany i bardzo



Rozwiązanie zadania M 559.
 Ponieważ $u_n \leq 2^n$, więc szereg jest zbieżny bezwzględnie dla $|z| < \frac{1}{2}$.
 Mamy

$$u_n z^n = u_{n-1} z^n + u_{n-2} z^n.$$

Oznaczmy $f(z) = \sum_{n=0}^{\infty} u_n z^n$. Sumując dla $n = 2, 3, \dots$ otrzymamy

$$f(z) - z = z f(z) + z^2 f(z),$$

(tu korzystamy ze zbieżności bezwzględnej). Ostatecznie

$$f(z) = \frac{z}{1-z-z^2}.$$

obietujący pomysł. Do odbicia neutronów zastosowana jest jednak nie turbina z łopatkami, lecz płytka monokrystaliczna. Schłodzenie od temperatury pokojowej do temperatury ciekłego wodoru, lub jeszcze lepiej helu, powoduje skupienie widma neutronów z szerokiego przedziału energii w przedziale o małej szerokości. Wszystkie neutrony z widma termicznego mają teraz zbliżoną energię. Dostarczenie tym neutronom jednakowej porcji energii prowadzi do zwielokrotnienia natężenia neutronów o ściśle określonej energii równej sumie wartości początkowej i dodanej.

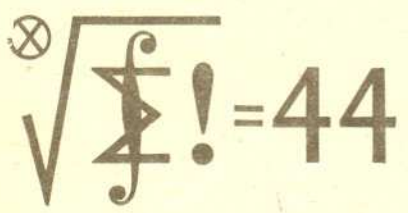
Odkąd zaczęto stosować neutrony, czy to jako przedmiot badań, czy jako narzędzie badawcze, zawsze istniała potrzeba zwiększenia uzyskiwanych natężeń. Nic dziwnego zatem, że po wyczerpaniu bezpośrednich możliwości technicznych, takich jak zwiększenie gęstości mocy reaktorów, wyspecjalizowanie konfiguracji rdzenia i optymalizacji elementów paliwowych, dalszy postęp prowadzi przez realizację coraz bardziej wyrafinowanych pomysłów. Zwiększenie natężenia neutronów pozwala na dokładniejsze i szybsze wykonywanie eksperymentów, a w konsekwencji na bardziej efektywne wykorzystywanie tak kosztownych urządzeń, jakimi są reaktory.

Klub 44

Liga zadaniowa Wydziału Matematyki, Informatyki i Mechaniki, Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego i Redakcji *Delty*

Skrót regulaminu

Każdy może nadsyłać rozwiązania zadań z numeru n w terminie do końca miesiąca $n + 3$. Szkice rozwiązań zamieszczamy w numerze $n + 4$. Można nadsyłać rozwiązania czterech, trzech, dwóch lub jednego zadania (każde na oddzielnej kartce), można to robić co miesiąc lub z dowolnymi przerwami. Rozwiązania zadań z matematyki i z fizyki należy przesyłać w oddzielnych kopertach, umieszczając na kopercie dopisek: **Klub 44 M** lub **Klub 44 F**. Oceniamy zadania w skali od 0 do 1 z dokładnością do 0,1. Ocenę mnożymy przez współczynnik trudności danego zadania: $WT = 4 - 3S/N$, gdzie S oznacza sumę ocen za rozwiązania tego zadania, a N - liczbę osób, które nadesłały rozwiązanie choćby jednego zadania z danego numeru w danej konkurencji (M lub F) - i tyle punktów otrzymuje nadsyłający. Po zgromadzeniu 44 punktów, w dowolnym czasie i w którejkolwiek z dwóch konkurencji (M lub F), zostaje on członkiem Klubu 44, a nadwyżka punktów jest zaliczana do ponownego udziału. Trzykrotne członkostwo - to tytuł Weterana. Szczegółowy regulamin został wydrukowany w numerze 1/1989.



Czołówka ligi zadaniowej Klub 44 M

po uwzględnieniu ocen rozwiązań zadań 189 (WT=2,48), 190 (WT=2,25), z numeru 4/1989

Henryk Kasprzak	- Żary	45,24 pkt
Józef Siwy	- Białka G.	40,89 pkt
Adam Csornik	- Bytom	40,37 pkt
Krzysztof Zawisławski	- Warszawa	39,34 pkt
Jerzy Janowicz	- Bolesławiec	37,99 pkt

Pan Kasprzak w znakomitym stylu kończy drugą rundę „44”.

Zadania z matematyki nr 199, 200

Redaguje dr Marcin E. KUCZMA

199. W trójkącie równoramiennym ABC ($|AC| = |BC|$) odcinek CM jest wysokością. Niech P będzie dowolnym punktem tego odcinka. Prowadzimy półprostą AP : jej punkt przecięcia z okręgiem Ω opisanym na trójkącie ABC oznaczmy przez D . Rozważamy okrąg Γ styczny do odcinków PD , PB , i do łuku BD okręgu Ω . Przy jakim położeniu punktu P na odcinku CM średnica okręgu Γ jest maksymalna?

200. Na stole stoi sześcian o krawędzi długości n , zbudowany z n^3 klocków - kostek jednostkowych. Na ile sposobów można go całkowicie rozebrać zdejmując kolejno po jednym klocku? (Wolno za każdym razem zdjąć dowolny klocek, na którym nie stoi żaden inny.) Jaka jest najmniejsza wartość n , dla której znaleziona liczba sposobów przekroczy trylion (10^{18})?

Zadanie 200 zaproponował pan Janusz Fiett z Warszawy.

Zadania z fizyki nr 97, 98

Redaguje dr Andrzej NADOLNY

97. Wyobraźmy sobie w miejscu Ziemi oraz Marsa planety składające się wyłącznie z wody (i nie mające księżyców). Jakie co najmniej powinny być średnice tych planet, aby mogły one istnieć w sposób trwały? Przedyskutować czynniki decydujące o trwałości wodnych planet.

98. Po tafli lodowiska otoczonego owalną bandą (rysunek), ślizga się krążek hokejowy. Krążek wystrzelony jest z punktu A pod dowolnym kątem α względem osi lodowiska. Przy jakich wartościach kąta α krążek może wrócić do punktu startowego? Zakładamy, że banda ogranicza figurę złożoną z kwadratu i dwóch połówek koła oraz że odbicie krążka od bandy jest doskonale sprężyste.

Zadanie kwalifikuje się do rozwiązania numerycznego. W przypadku wykorzystania komputera prosimy o dołączenie programu do rozwiązania.

