

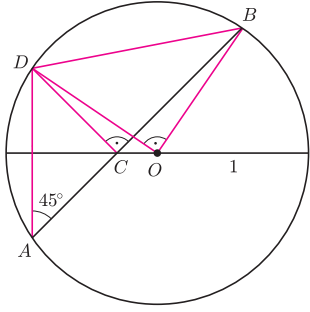


Kwantowe efekty grawitacji

Paweł Tomasz PEŹCZKOWSKI

Rozwiązanie zadania M 1079.

Niech D będzie punktem symetrycznym do punktu A względem danej średnicy.



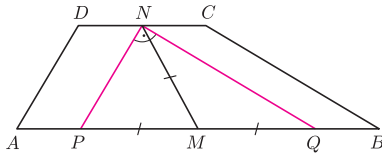
Oznaczmy ponadto przez O środek danego okręgu. Wówczas $\sphericalangle ACD = 90^\circ$ oraz $\sphericalangle DAC = 45^\circ$. Stąd wynika, że $\sphericalangle DOB = 90^\circ$, gdyż jest to kąt środkowy oparty na tym samym łuku co kąt wpisany DAB . Zatem

$$AC^2 + BC^2 = DC^2 + BC^2 = BD^2 = BO^2 + DO^2 = 2.$$



Rozwiązanie zadania M 1080.

Niech P i Q będą takimi punktami leżącymi odpowiednio na odcinkach AM i BM , że czworokąty $ADNP$ i $BCNQ$ są równoległobokami.



Wówczas $AP = BQ$, a więc $PM = MQ$. Ponadto

$$MN = \frac{AB - CD}{2} = \frac{PQ}{2} = MP.$$

Stąd wynika, że punkt M jest środkiem okręgu opisanego na trójkącie PQN . Zatem $\sphericalangle PNQ = 90^\circ$, skąd otrzymujemy

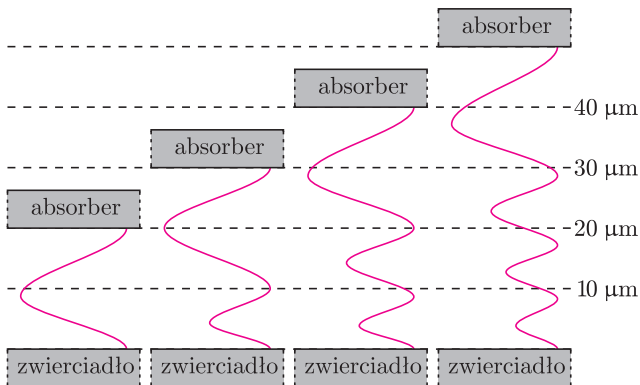
$$\sphericalangle BAD + \sphericalangle ABC = \sphericalangle NPQ + \sphericalangle NQP = 90^\circ.$$

Grawitacja jest obserwowana w dużej skali – rządzi ona ruchem pocisku oraz ruchami planet i gwiazd. Z kolei efekty mechaniki kwantowej, zaniedbywalne dla obiektów makroskopowych, są obserwowane w skali atomów i cząstek elementarnych. W tej skali siła grawitacji jest za słaba, żeby obserwować efekty jej działania. Oddziaływanie grawitacyjne jest zdominowane przez oddziaływanie elektromagnetyczne i oddziaływanie silne. Rozważania teoretyczne przewidują, że pole grawitacyjne powinno prowadzić do stanów kwantowych, podobnych jak dla elektronów w polu elektromagnetycznym i nukleonów w polu oddziaływań silnych. Jednak aby zaobserwować efekty kwantowe pola grawitacyjnego, trzeba wyeliminować wpływ innych pól. Do przeprowadzenia doświadczeń mających na celu badanie efektów kwantowych grawitacji nadają się neutrony, ponieważ mają długi średni czas życia (około 1000 s), są obojętne elektrycznie i mają dużą masę ($939,6 \text{ MeV}/c^2$).

Pierwsze doświadczenie, którego celem było zaobserwowanie powiązania między zjawiskami kwantowo-mechanicznymi a grawitacją, zostało opisane w 1975 roku w artykule [1] i dotyczyło interferencji neutronów znajdujących się w polu grawitacyjnym Ziemi. Drugie doświadczenie zostało przeprowadzone w ostatnich latach przez zespół V.V. Nesvizhevsky'ego w Instytucie Laue-Langevin (ILL) w Grenoble (Francja) [2, 3]. W tym drugim doświadczeniu użyto ultrazimnych neutronów (UCN – ultracold neutrons), generowanych przez ich źródło, dostępne w ILL w Grenoble. Takie neutrony mają tak małe wartości energii kinetycznej, że mogą zostać uwięzione przez grawitację, tak jak odbijająca się od podłogi piłka.

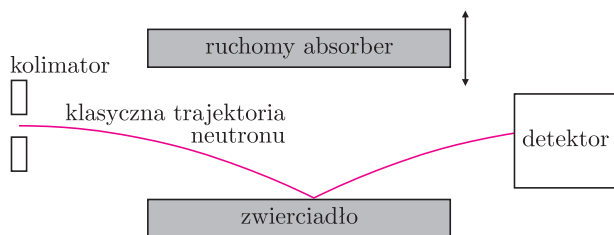
Oprócz pola grawitacyjnego potrzebna jest jeszcze „podłoga” pułapki, którą może być poziome zwierciadło neutronowe. Ponieważ długość fali de Broglie'a dla zimnych neutronów jest większa od odległości międzyatomowych w ciele stałym, to oddziaływanie neutronów z takim ciałem można opisywać za pomocą efektywnego potencjału, a nie oddziaływania z poszczególnymi jądrami. Jeżeli siła odpychająca pochodząca od bariery potencjału jest większa niż energia kinetyczna obliczona tylko dla składowej prędkości prostopadłej do powierzchni zwierciadła, to neutron zostanie odbity. Ponieważ bariera potencjału jest bardzo mała, więc w normalnych warunkach tylko neutrony poruszające się prawie stycznie do powierzchni są odbijane. Jednak neutrony UCN mają tak małą prędkość (poniżej 8 m/s), że od niektórych materiałów są odbijane niezależnie od kąta padania.

Pułapka skonstruowana przez zespół Nesvizhevsky'ego może być formalnie opisana jako studnia potencjału. Cząstka jest uwięziona, ponieważ ma za mało energii, żeby pokonać przyciąganie grawitacyjne. Klasycznie cząstka może mieć w takiej sytuacji dowolną energię (tzn. jej energia zmienia się w sposób ciągły), dopóki jest ona mniejsza niż energia ucieczki. Ale w mechanice kwantowej cząstka w studni potencjału może zajmować tylko dyskretne poziomy energii. Opis matematyczny rozważanego problemu można znaleźć w artykule [2]. Przewiduje on, że energia neutronu w pułapce przyjmuje dyskretne wartości numerowane główną liczbą kwantową n . Dla każdej energii tworzy się w studni fala stojąca, która ma n maksimów. Oznacza to, że prawdopodobieństwo znalezienia neutronu na danej wysokości zmienia się tak, jak jest to pokazane na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat przedstawiający kształt funkcji falowej dla pierwszych czterech wartości energii neutronu w studni potencjału grawitacyjnego.

Pod wpływem grawitacji neutron oscyluje między brzegami studni utworzonej przez pole grawitacyjne Ziemi i poziome zwierciadło odbijające. Z obliczeń analitycznych [3] wynika, że energia dla pierwszych czterech stanów kwantowych wynosi: $E_1 = 1,41$ peV, $E_2 = 2,46$ peV, $E_3 = 3,32$ peV, $E_4 = 4,08$ peV ($1 \text{ peV} = 10^{-12} \text{ eV}$). Natomiast klasyczna energia potrzebna do podniesienia neutronu o $10\mu\text{m}$ w polu grawitacyjnym o natężeniu g wynosi 1 peV . Wynika stąd, że poziom E_1 odpowiada wysokości $z_1 = 15\mu\text{m}$.

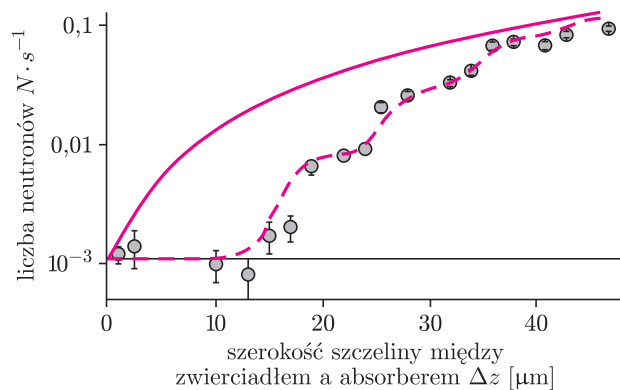


Rys. 2. Schemat doświadczenia [3].

Jak jednak sprawdzić, że w rzeczywistości jest tak, jak to przewiduje teoria? W doświadczeniu nie jest możliwe, żeby podnieść neutron, upuścić go i zmierzyć rozkład gęstości jako funkcję wysokości.

W doświadczeniu opisanym w publikacji [3] użyto poziomego zwierciadła długości 10 cm i neutronów o prędkościach około 10 m/s , uzyskanych z generatora ultra-zimnych neutronów w ILL w Grenoble. Schemat układu doświadczalnego jest pokazany na rysunku 2.

Oprócz zwierciadła użyto ruchomego absorbera neutronów – wielkość szczeliny między zwierciadłem i absorberem mogła być regulowana. W doświadczeniu neutrony przelatywały między zwierciadłem i absorberem. Rejestrowano liczbę N przechodzących przez układ neutronów w zależności od wielkości szczeliny między zwierciadłem i absorberem Δz . Spodziewano się, że jeżeli Δz będzie mniejsza niż szerokość odpowiadającą najmniejszemu stanowi kwantowemu, to N powinno być równe zero (neutrony w ogóle nie powinny docierać do detektora). Gdy szerokość Δz zostanie powiększona do wielkości odpowiadającej pierwszemu stanowi kwantowemu, to powinien nastąpić gwałtowny wzrost liczby N transmitowanych neutronów. Ogólnie oczekiwano skokowej zależności liczby N przechodzących przez układ neutronów od szerokości szczeliny Δz .



Rys. 3. Wyniki doświadczenia [3].

Wynik eksperymentu jest przedstawiony na rysunku 3. Punkty oznaczone kółkami przedstawiają wyniki doświadczenia.

Kolorowa linia ciągła oznacza krzywą teoretyczną przewidywaną przez fizykę klasyczną, natomiast kolorowa linia przerywana odpowiada przewidywaniom mechaniki kwantowej. Pozioma linia prosta wskazuje poziom sygnału przy wyłączonym źródle neutronów.

Jak widać, wyniki świetnie zgadzają się z kwantowo-mechanicznym opisem zjawiska. Dla małych wartości szerokości szczeliny sygnał w ogóle nie jest rejestrowany. Dopiero przy $\Delta z \approx 15\mu\text{m}$ liczba

rejestrowanych neutronów zaczyna rosnąć w sposób skokowy, przy czym miejsca gwałtownych wzrostów zgadzają się z przewidywaniami mechaniki kwantowej.

Autorzy planują dalsze badania. Rozdzielczość energii jest określona przez zasadę nieoznaczoności i czas, jaki UCN spędzają w pułapce. Jeżeli ten czas będzie zwiększony, to można osiągnąć wyższą rozdzielczość. Silniejsze źródła UCN (budowane obecnie) pozwolą na uzyskanie dokładności umożliwiającej przeprowadzenie testów fundamentalnych praw fizyki.

Chodzi przede wszystkim o test zasady równoważności. Jest ona kluczowym krokiem prowadzącym do ogólnej teorii względności. Stwierdza, że efekty przyspieszenia są nieodróżnialne od efektów jednorodnego pola grawitacyjnego. Oznacza to, że masa bezwładna i masa grawitacyjna neutronów są równoważne. Ten postulat trzeba sprawdzić doświadczalnie, a badania Nesvizhevsky'ego i jego kolegów idą w kierunku przeprowadzenia takiego testu o większej dokładności niż uzyskana innymi metodami.

[1] R. Colella, A.W. Overhauser, S.A. Wagner, *Observation of Gravitationally Induced Quantum Interference*, Phys. Rev. Lett. **34**(1975)1472-1474.

[2] V.V. Nesvizhevsky, H. Börner, A.M. Gagarski, G.A. Petrov, A.K. Petukhov, H. Abele, S. Bäßler, T. Stöferle, S.M. Soloviev, *Search for quantum states of the neutron in a gravitational field: gravitational levels*, Nuclear Instr. and Meth. in Phys. Research **A440**(2000)754-759.

[3] V.V. Nesvizhevsky, H.G. Börner, A.K. Petukhov, H. Abele, S. Bäßler, F.J. Rueß, T. Stöferle, A. Westfal, A.M. Gagarski, G.A. Petrov, A.V. Strelkov, *Quantum states of neutrons in the Earth's gravitational field*, Nature **415**(2002)297-299.