

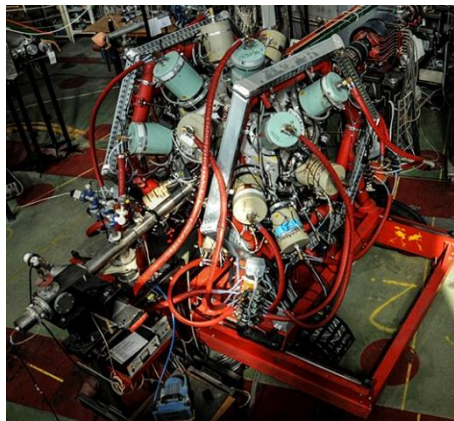
Jądra atomowe spontanicznie łamią symetrię odwracania czasu

Ernest Grodner – Wydział Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego

*Julian Srebrny – Środowiskowe Laboratorium Ciężkich Jonów
Uniwersytetu Warszawskiego*

Urszula Rybicka – Polska Agencja Prasowa

Wirujące wewnątrz jąder atomowych protony i neutrony spontanicznie łamią symetrię odwracania czasu. Fizykom w Warszawie udało się po raz pierwszy zaobserwować to zjawisko, rejestrując przewidywaną przez teoretyków emisję promieniowania gamma z jądra cezu 126 i jądra cezu 128. Od chwili powstania mechaniki kwantowej, problem złamania symetrii odwracania czasu stanowi istotną część badań, których celem jest m.in. wyjaśnienie przewagi istnienia materii nad antymaterią. Wszystkie dotychczasowe badania wskazują na fundamentalne zachowanie symetrii odwracania czasu, mimo to istnieje możliwość jej spontanicznego złamania. Okazuje się, że z taką sytuacją możemy mieć do czynienia w jądrach atomowych w strukturze stanowiącej sprzężenie trzech komponentów, posiadających własne momenty pędu – spiny.



Spektrometr fotonów gamma EAGLE (central European Array for Gamma Levels Evaluation) w Środowiskowym Laboratorium Ciężkich Jonów Uniwersytetu Warszawskiego

Gdyby nie asymetria nic by nie było

Symetrię obserwujemy w wielu zjawiskach naturalnych. Obowiązuje ona także w mechanice kwantowej. W rzeczywistości sytuacja jest bardziej skomplikowana. Gdyby symetria była zawsze zachowana – nie istniałaby materia, a Wszechświat byłby wypełniony jedynie promieniowaniem.

W drugiej połowie XX wieku eksperymetatorzy badający cząstki elementarne ustalili, że jeśli uda się wywołać zjawisko kreacji materii (czyli czystą energię zamienić na cząstki posiadające masę), to liczba powstałych cząstek materii, jak i antymaterii, będzie jednakowa. Oznacza to, że kreacja jednego elektronu wiąże się z kreacją jednego pozytonu (zwanego też pozytronem lub antyelektronem), czyli cząstki o takich samych właściwościach jak elektron, ale o dodatnim ładunku elektrycznym.

Ten „ludzki cud stworzenia” udaje się jednak tylko na moment, bo zaraz dochodzi do odwrotnego procesu. Proces ten nazywany jest anihilacją i następuje zawsze, gdy cząstka materii spotka się ze swoim antymaterialnym odpowiednikiem. W jego wyniku obie te cząstki przestają istnieć, zamieniając się w taką samą ilość czystej energii, jaka była na początku. To właśnie, według fizyków, stało się na początku istnienia Wszechświata. Z tą różnicą, że materii i antymaterii, powstałej w początkowym, gigantycznym akcie kreacji, nie było tyle samo. Materii było nieco więcej (o kilka cząstek na każde dziesięć miliardów) i po niemal całkowitej anihilacji, oprócz ogromnej ilości energii, pozostała w przestrzeni resztką materii tworzącej Wszechświat. Skąd jednak wzięła się ta nadwyżka, wciąż do końca nie ustalono. Prawdopodobnie z jakiegoś powodu proces kreacji nie jest całkowicie symetryczny.

Nie tylko antymateria jest niesymetryczna

W 2008 roku Nagrodę Nobla zdobył m.in. amerykański fizyk japońskiego pochodzenia Yoichiro Nambu, który w roku 1960 sformułował matematyczny opis spontanicznego złamania symetrii w fizyce subatomowej. Według jego teorii, symetria między różnymi procesami fizycznymi w danym układzie istnieje wtedy, kiedy układ ten ma odpowiednią energię. Kiedy energia maleje, układ stopniowo staje się asymetryczny.

Przykładem takiego zjawiska (ograniczającego się jedynie do złamania symetrii w przestrzeni) jest proces zachodzący w ferromagnetykach (np. w żelazie). W atomach takiej substancji spiny cząstek układają się wzdłuż jednej osi. Momenty magnetyczne związane z ruchem obrotowym elektronów uporządkowują się wzdłuż jednej prostej. Cała próbka ferromagnetyka ulega namagnesowaniu w pewnym spontanicznie wybranym kierunku. Cząstki, porządkując się, łamią symetrię, według której wszystkie procesy powinny wyglądać tak samo niezależnie od kierunku, z jakiego się na nie patrzy.

Nie oznacza to jednak, że istnieją jakieś prawa fizyki nakazujące cząstkom w określony sposób układać swoje spiny. Można powiedzieć, że one same je sobie wybierają. Stąd określenie „spontaniczne” złamanie symetrii.

Innym przykładem takiego zjawiska może być tworzenie się cząsteczki DNA z mniejszych molekuł. Dopóki roztwór z tymi molekułami jest gorący (ma wysoką energię), większa cząsteczka nie powstaje. Potencjalnie może z nich powstać podwójna spirala lewoskrętna i prawoskrętna. To tzw. symetria odbiciowa, przypominająca odbicie lustrzane. Ponieważ zasady fizyki nie preferują żadnej z tych możliwości, symetria lustrzana jest w większości przypadków zachowana.

Przy schładzaniu pojemnika z molekułami w pewnej chwili energii w układzie jest już na tyle mało, że cząsteczki zaczynają się łączyć, tworząc spiralę DNA. Robią to spontanicznie, wybierając jedną z dwu możliwych skrętności. W ten sposób spontanicznie łamią symetrię zwierciadlaną. Powstała nić DNA jest powiedzmy prawoskrętna, natomiast jej odbicie w lustrze jest inne –

lewoskrętne. Mimo tego, że zasady fizyki nie preferują żadnej z możliwych skrętności, może dojść do spontanicznego złamania symetrii lustrzanej przez spiralę DNA. Tym samym symetria zwierciadlana jest łamana spontanicznie, lecz zachowana fundamentalnie.

Naukowcy szukają potwierdzenia, że podobne zjawiska zachodzą również w innych układach. W warszawskim Środowiskowym Laboratorium Ciężkich Jonów (ŚLCJ) grupa badaczy podjęła się zaobserwowania spontanicznego naruszenia symetrii T na poziomie pojedynczych jąder atomowych.

Potencjalna asymetria jądra

Jądra atomów bada się zupełnie inaczej niż większe układy. W normalnym ciele stałym mamy ogromną liczbę atomów, natomiast jądro atomowe składa się z niewielkiej liczby protonów i neutronów. Tych protonów i neutronów jest skończona liczba – od jednego do kilkuset. W jądrze cezu jest 55 protonów. W izotopie cezu 128 są ponadto 73 neutrony. Naszą rolą, jako fizyków jądrowych, jest zbadanie, jak te protony i neutrony zachowują się w jądrze.

Sztucznie wytworzone jądra cezu 128 są wysoko wzbudzone. W języku makroskopowym można powiedzieć, że są gorące. Energia wzbudzenia jest szybko tracona, przez co dochodzi do spontanicznego naruszenia symetrii odwracania czasu. Zjawisko to udało się zaobserwować dzięki cyklotronowi, działającemu w ŚLCJ na Uniwersytecie Warszawskim. Tam wytworzono odpowiednio rozpędzone jądra i obserwowano, jak się zachowywały, wytracając energię.

Analizowano moment pędu całego jądra. Składają się na niego obroty wszystkich znajdujących się wewnątrz cząstek lub ich grup. Wykonywano pomiary energii traconej przez jądro przy każdej zmianie momentu pędu poprzez rejestrację energii promieniowania gamma. Promieniowanie to jest emitowane przy każdej zmianie wartości momentu pędu przez jądro cezu.

Chodziło o to, żeby potwierdzić, iż całkowita rotacja jądra atomowego może być złożeniem rotacji trzech obiektów: jednego protonu, jednego neutronu oraz tzw. rdzenia składającego się z grupy cząstek. Każdy z tych trzech obiektów posiada swoją oś obrotu wyznaczoną przez wektor momentu pędu (spin) danego obiektu.

Zasugerowano to teoretycznie i wydaje się, że my potwierdziliśmy, iż istnieją takie układy, w których trzy osie obrotu składników jądra nie pokrywają się, a nawet – są do siebie wzajemnie prostopadłe. Całkowity spin jądra jest wówczas sumą trzech wzajemnie prostopadłych spinów. Istnienie takiego układu w jądrze atomu świadczy, zdaniem fizyków, o tym, że jądra spontanicznie łamią symetrię odwracania czasu.

Jądro to, aby przejść do niższych stanów energetycznych musi wybrać jedną z dwu możliwości: prawoskrętny układ trzech spinów albo lewoskrętny układ trzech spinów. Przyroda nie preferuje żadnej z dwóch możliwych konfiguracji. Mówimy wobec tego o fundamentalnym zachowaniu symetrii. Odwrócenie

czasu w równaniach mechaniki powoduje zmianę kierunku ruchu obrotowego na przeciwny, a w konsekwencji – zmianę skrętności układu trzech prostopadłych spinów. Żadna inna symetria, np. lustrzana czy obrotowa, nie powoduje zmiany skrętności. Dlatego jądro, wybierając spontanicznie jedną z dwu możliwości (np. układ lewoskrętny trzech wektorów momentu pędu), łamie w sposób spontaniczny symetrię odwracania czasu.

Ponieważ badane zjawiska wiążą się z ruchem obrotowym cząstek, postanowiliśmy przyjrzeć się dokładniej związanym z tym ruchem momentom magnetycznym jąder cezu 128. Są to badania komplementarne, mające na celu uzyskanie danych niezależnych od poprzednio opisanych pomiarów. Ponieważ trzy składniki – rdzeń, proton i neutron – posiadają różne ładunki elektryczne, to związane z ich ruchem obrotowym momenty magnetyczne mają ściśle określone wielkości. Całkowity moment magnetyczny jądra jest uzależniony od wzajemnego ustawienia momentów magnetycznych składników.

Dzięki temu badania te dostarczają bezpośredniej informacji nie tylko o konfiguracji momentów magnetycznych, lecz także o wzajemnym ustawieniu spinów rdzenia, protonu i neutronu. Wykonaliśmy pionierskie opracowania teoretyczne oraz pierwsze pomiary we współpracy międzynarodowej naukowców z Polski, Francji, Włoch, Rumunii i Chin. Otrzymane dane są w trakcie analizy i stanowią część rozprawy habilitacyjnej jednego z autorów (E.G.).

Uważamy, że wszystkie dotychczasowe obserwacje wskazują na fundamentalne zachowanie symetrii odwracania czasu w obszarze niskich energii, a jądra atomowe są pierwszymi kwantowymi obiektami, w których zaobserwowano jej spontaniczne złamanie. Zostało to dokonane właśnie w Polsce, w Warszawie, dzięki badaniom przeprowadzonym w ŚLCJ z użyciem warszawskiego cyklotronu.

Badania prowadzono w zespole naukowców, w składzie: Chrystian Droste, Ernest Grodner, Iwona Sankowska, Tomasz Morek, Grzegorz Rohoziński, Julian Srebrny, Alexandr Pasternak, Leszek Próchniak, Krzysztof Starosta, Piotr Decowski, Tomasz Marchlewski, Roman Szenborn, Maciej Kisieliński, Michał Kowalczyk, Jan Kownacki, Michalina Komorowska, Jan Mierzejewski, Katarzyna Wrzosek-Lipska, Andrzej Kordyasz, Paweł Napiorkowski, Ewa Ruchowska, Weronika Płóciennik, Jarosław Perkowski, Justyna Samorajczyk, Anna Stolarz, Tomasz Abraham, Andrzej Tucholski.

Pierwsza publikacja teoretyczna dotycząca opisanego zjawiska ukazała się w 1997 roku. W XX-lecie tej publikacji, doceniając nasz wkład w zrozumienie zjawiska i potwierdzenia eksperymentalne, zaproponowano Polakom zorganizowanie w 2017 roku konferencji podsumowującej otrzymane na całym świecie wyniki.