



Antyśpadanie

Jeden z twórców teorii kwantów, Paul Dirac, szukając właściwego opisu elektronu, który byłby jednocześnie kwantowy i zgodny z teorią względności, odkrył słynne równanie. Jedną z konsekwencji teorii Diraca był postulat istnienia cząstki o tej samej masie co elektron, ale przeciwnym ładunku. Cząstka taka – pozyton, zwana również antyelektronem, została po raz pierwszy zaobserwowana w 1932 roku przez Carla Davida Andersona. Taki był początek badań nad antymaterią.

Model standardowy (reprezentujący obecny stan wiedzy o budowie materii) przewiduje, że każda cząstka elementarna ma swoją antycząstkę (przy czym niektóre cząstki są swoimi własnymi antycząstkami). Jeżeli cząstka ma jakikolwiek niezerowy ładunek (np. elektryczny lub inny, taki jak liczba leptonowa, zapach, kolor itp.), to jej antycząstka ma przeciwne wartości wszystkich tych ładunków.

Pary cząstka-antycząstka mogą spontanicznie powstawać, o ile tylko dostępna jest wystarczająca ilość energii, żeby stworzyć taką parę. Cząstki rozpędza się w akceleratorach, nadając im ogromne energie kinetyczne, wielokrotnie większe od ich masy spoczynkowej, a następnie zderza się je ze sobą. W wyniku zderzeń energia kinetyczna może zostać przekształcona w inną formę i wykorzystana do produkcji par cząstka-antycząstka różnych rodzajów.

Produkowane w akceleratorach antycząstki istnieją bardzo krótko, ponieważ bardzo szybko zachodzi proces odwrotny do ich kreacji, czyli anihilacja. Wytwarzane w zderzeniach antycząstki natychmiast znajdują sobie partnera, z którym anihilują. Para cząstka-antycząstka znika, a energia, która po nich zostaje, jest unoszona przez promieniowanie.

Analizując ogromne ilości zderzeń w akceleratorach i własności produkowanych w nich cząstek i antycząstek, można badać różne ich własności. Jak na razie wszystkie wyniki eksperymentów zgadzają się z przewidywaniami modelu standardowego. Warto jednak zrobić tutaj jedno zastrzeżenie: typowe eksperymenty akceleratorowe pozwalają badać własności trzech spośród czterech oddziaływań elementarnych: elektromagnetycznych, słabych i silnych. Oddziaływanie grawitacyjne jest zbyt słabe w porównaniu z pozostałymi i jego wpływ na przebieg typowych zderzeń w akceleratorze jest niemożliwy do zaobserwowania. Z drugiej strony model standardowy nie zawiera w sobie opisu grawitacji. Jest ona takim trochę *outsiderem* – trudno jej znaleźć wspólny język z innymi oddziaływaniami elementarnymi. Do jej opisu używamy zupełnie innej teorii.

Jak to jednak jest z grawitacyjnym oddziaływaniem antymaterii? Jeżeli antycząstka ma wszystkie ładunki przeciwne, to masę może też ma przeciwną? Odpowiedź brzmi: „nie”. Model standardowy przewiduje istnienie cząstek o przeciwnych wszystkich ładunkach, ale takiej samej masie. Oznacza to, że obie strony z pary cząstka-antycząstka powinny dokładnie tak samo oddziaływać grawitacyjnie.

Skoro pojawiło się przewidywanie, to oczywiście warto je sprawdzić eksperymentalnie. Jednak droga do badania grawitacyjnych własności antymaterii jest najeżona różnymi technicznymi przeszkodami. Istnieją cząstki antymaterii, takie jak pozyton czy antyproton, które nie rozpadają się spontanicznie, czyli w tym sensie są trwałe. Jednak antyelektrony i antyprotony błyskawicznie anihilują, spotykając cząstki zwykłej materii. Nie można więc trzymać antymaterii w żadnym pojemniku wykonanym ze zwykłej materii. Antymateria, żeby trwać, musi być od materii oddzielona próżnią. Dodatkowo antycząstki produkowane w akceleratorze mają na ogół ogromne (relatywistyczne) prędkości. Taką antycząstkę trzeba więc wyhamować i złapać w próżniowej pułapce magnetycznej, dbając o to, aby w żadnym momencie nie zbliżyła się do czegokolwiek wykonanego z materii. Nie jest to łatwe zadanie... a to nie koniec trudności.

Żeby badać własności grawitacyjne, trzeba dysponować cząstkami obojętymi elektrycznie, ponieważ oddziaływanie elektrostatyczne jest wiele rzędów wielkości silniejsze niż grawitacyjne. Naturalnym kandydatem na królika doświadczalnego jest atom antywodoru, czyli atom złożony z antyprotonu i antyelektronu. Trzeba więc jednocześnie wyprodukować antyprotony, antyelektrony i doprowadzić do ich rekombinacji (utworzenia stanu związanego, czyli atomu). Pierwszy raz takie atomy udało się wytworzyć w CERN w 1995 roku. W 2010 roku po raz pierwszy zdołano 38 takich atomów schwytać i utrzymać w pułapce magnetycznej przez 1/6 sekundy. W kolejnych latach atomy antywodoru udawało się utrzymywać w pułapce coraz dłużej, dzięki czemu możliwe było badanie ich różnych własności, takich jak np. struktura poziomów energetycznych.

Dopiero niedawno, w opublikowanej we wrześniu 2023 roku pracy zreferowano wyniki pierwszego eksperymentu, w którym zaobserwowano oddziaływanie atomów antywodoru z ziemskim polem grawitacyjnym. Eksperyment został przeprowadzony przez zespół ALPHA w CERN. Atomy antywodoru są pułapkowane w urządzeniu zwanym ALPHA-g („g” symbolizuje przyspieszenie ziemskie), którego centralnym elementem jest pionowa rura z próżnią. Doświadczenie polega na stopniowym obniżaniu barier pułapki magnetycznej i obserwacji, jaka część atomów ucieknie przez górne „wieczko” pułapki, a jaka przez dolne. Atomy, które wylatują z pułapki, anihilują oczywiście bardzo szybko i miejsce tej anihilacji można zaobserwować. Należy się spodziewać, że grawitacja Ziemi spowoduje, że większość atomów ucieknie dołem. Wyniki eksperymentu potwierdziły te oczekiwania – zgodnie z symulacjami tego procesu 80% atomów ucieka dołem, a 20% górą. Jest to pierwsze bezpośrednie doświadczalne potwierdzenie, że antymateria spada w polu grawitacyjnym tak samo jak „normalna” materia, z której jesteśmy zbudowani.

Szymon CHARZYŃSKI

[1] E. K. Anderson i inni: *Observation of the effect of gravity on the motion of antimatter*, Nature volume 621, pages 716–722 (2023).

[2] Animacja na YouTube: youtu.be/prhmv9CavR0