

## Problem promienia protonu (chyba) wyjaśniony

Wiadomo, że proton nie jest cząstką punktową – złożony jest z trzech kwarków „posklejanych” gluonami i jest opisywany przez pewien przestrzenny rozkład ładunku elektrycznego, rozkład momentu magnetycznego, polaryzowalność elektryczną i magnetyczną. W szczególności sensowne jest pytanie o to, jaki jest promień protonu, a w burzliwej historii pomiarów tej wielkości właśnie nastąpił kolejny zwrot akcji. Aby docenić jego doniosłość, trzeba cofnąć się do poprzedniego zwrotu akcji, który miał miejsce w roku 2010, kiedy opublikowano w czasopiśmie *Nature* wyniki pomiarów różnicy energii stanów  $2S$  i  $2P$  w wodorze mionowym, co pozwoliło wyznaczyć promień protonu z dokładnością kilkadziesiąt razy lepszą niż uzyskiwana przed rokiem 2010.

Wygodną jednostką długości, dostosowaną do skali rozmiarów jąder atomowych, jest *femtometr*:  $1\text{ fm} = 10^{-15}\text{ m}$ . Promień protonu to trochę mniej niż  $1\text{ fm}$ . W interferometrach LIGO i Virgo, rejestrujących fale grawitacyjne, których prostopadłe ramiona mają kilka kilometrów długości, mierzy się zmiany różnicy długości ramion interferometru z dokładnością do  $10^{-18}\text{ m}$ . Dla porównania, często mówi się, że to jest tyle, co jedna tysięczna promienia protonu. Ciekawostką jest fakt, że na razie samego promienia protonu nie potrafimy zmierzyć z tak dużą precyzją.

Wspomniana niepunktowość protonu (czyli jego przestrzenna rozciągłość) daje wkład do energii przejść pomiędzy stanami atomu wodoru, którego jądrem jest pojedynczy proton. Oznacza to, że gdyby cały ładunek protonu był skupiony w jednym punkcie, to te energie byłyby inne niż dla rozciągniętego protonu, przy czym energie te wyznacza się za pomocą przybliżonych rachunków, w których najpierw oblicza się dokładne wartości dla punktowego protonu (bo te umiemy obliczyć ściśle), następnie za pomocą przybliżonych rachunków oblicza się kolejne tzw. poprawki, uwzględniające różnorakie efekty. Największa poprawka jest proporcjonalna do tzw. średniej kwadratowej rozkładu ładunku w protonie (czyli pewnej miary jego rozciągłości). Wkład ten jest niewielki, ale większy niż dokładność pomiarów spektroskopowych i szacowany błąd obliczeń teoretycznych, co oznacza, że powinno dać się go zmierzyć. Obliczenia energii przejść w atomie wodoru opierają się na elektrodynamice kwantowej i są jednymi z najbardziej skomplikowanych rachunków kiedykolwiek wykonanych. Naturalnie, to, czy tak skomplikowane obliczenia da się wykonać, nie popołniając w ich trakcie błędu, jest źródłem pewnego sceptycyzmu wobec uzyskanych wyników, ale ufano im na tyle, że publikowana przed 2010 rokiem wartość promienia ładunkowego protonu wyznaczana była głównie z porównania pomiarów energii różnych przejść pomiędzy stanami atomu wodoru z teoretycznymi przewidywaniami wykonanymi dla punktowego jądra. Istniały także niezależne pomiary promienia protonu pochodzące z doświadczeń nad rozpraszaniem elektronów na protonach.

Jednym z pomysłów na dokładniejszy pomiar rozkładu ładunku w protonie było wykonanie pomiarów spektroskopowych w wodorze mionowym – atomie wodoru, w którym elektron byłby zastąpiony przez 200 razy cięższy mion. Ta różnica mas sprawia, że

względny wkład rozmiaru protonu do energii przejść zwiększa się o czynnik  $200^3$  i nie jest to już mała poprawka pośród setek tysięcy innych, dużo bardziej subtelnych.

Cząstki elementarne *elektron*, *mion* oraz *taon* są bardzo podobne. Mają ten sam ładunek elektryczny oraz spin. W odróżnieniu od *kwarków* (z których jest zbudowany np. proton) nie podlegają oddziaływaniom silnym. Istotnie różnią się jedynie masą. Odkryty w 1936 roku mion jest 203 razy cięższy od elektronu, a odkryty w 1975 roku taon jest 3477 razy cięższy od elektronu (a więc prawie 2 razy cięższy od protonu). Dzięki temu, że mion jest tak podobny do elektronu, może go zastąpić w atomie, ale na krótko, ponieważ jest nietrwały – jego średni czas życia to około  $2 \cdot 10^{-6}\text{ s}$ , co w porównaniu z innymi nietrwałymi cząstkami elementarnymi jest bardzo długim czasem życia. Swą „długowieczność” mion zawdzięcza właśnie temu, że nie podlega oddziaływaniom silnym i za jego rozpad odpowiadają tylko oddziaływania słabe. Cząstki rozpadające się poprzez oddziaływania silne robią to znacznie szybciej. Te dwie milionowe części sekundy muszą wystarczyć badaczom, aby połączyć mion z protonem w atom i zdążyć zmierzyć energię przejścia pomiędzy poziomami energetycznymi, zanim mion się rozpadnie.

Po kilkunastu latach prób, w 2010 roku, wykonano w końcu wspomniany pomiar energii przejść  $2S - 2P_{1/2}$  i  $2S - 2P_{3/2}$  w wodorze mionowym i... okazało się że zmierzony w ten sposób promień protonu ( $0,84184 \pm 0,00067\text{ fm}$ ) jest znacząco (o 5%) mniejszy niż wcześniej publikowane wartości ( $0,8768 \pm 0,0069\text{ fm}$ ). Różnica pomiędzy rozmiarem protonu wydedukowanym z pomiarów „elektronowych” i „mionowych” siedem razy przekraczała szacowany błąd wcześniejszych wyników.

Przez siedem lat podejmowano kolejne nieudane próby odkrycia, co jest powodem niezgodności. Tytułowy „problem promienia protonu” był jednym z bardziej tajemniczych nierozwiązanych problemów fizyki współczesnej. Pomysłów początkowo były setki, od błędów w niezwykle skomplikowanych obliczeniach elektrodynamiki kwantowej, rozmaitych błędów doświadczalnych w starych pomiarach elektronowych i w nowych – mionowych, powstawania egzotycznych cząsteczek z udziałem mionów, które zaburzałyby pomiary, aż po najbardziej fascynujące: manifestacje „nowej fizyki” – jakieś nowe zjawisko – być może nowe cząstki lub nowe oddziaływanie, o którym dotąd nie wiedzieliśmy. Najmniej podejrzany był wynik pomiaru w wodorze mionowym, bo mierzony efekt był duży, a cały eksperyment był prosty i w zasadzie nie było gdzie w nim zrobić błędu.

5 października 2017 opublikowano w magazynie *Science* artykuł, który przyczynia się wreszcie do wyjaśnienia zagadki. Zmierzono ponownie, używając nowych technik doświadczalnych, dwa przejścia ( $2S - 4P_{1/2}$  i  $2S - 4P_{3/2}$ ) w atomie wodoru (tym zwykłym, elektronowym). Okazało się, że wynik znacząco różni się od opublikowanego wcześniej i jest zgodny z tym, co powinno było wyjść, jeśli by wierzyć obliczeniom teoretycznym i wartości promienia protonu z pomiarów w wodorze mionowym. Opublikowane wyniki wskazują, że obecnie najbardziej prawdopodobne wytłumaczenie zagadki promienia protonu to przyjęcie, że część z pomiarów energii przejść w zwykłym elektronowym atomie wodoru była błędna.

Grzegorz ŁACH

Wydział Fizyki, Uniwersytet Warszawski