



Nowa cząstka w LHC!

Hadrony to cząstki złożone z kwarków, które ze względu na swoją budowę dzielą się na dwie główne grupy: bariony oraz mezony. Bariony, takie jak proton (uud) i neutron (udd), składają się zawsze z trzech kwarków. Natomiast mezony, jak na przykład J/Ψ (układ kwarka c i jego antycząstki $\bar{c}$) albo piony π^+ ($u\bar{d}$), π^- ($d\bar{u}$), powstają z połączenia kwarka i antykwarka.

Oddziaływania silne, odpowiedzialne za wiązanie kwarków, są na tyle potężne, że kwarki nigdy nie występują samodzielnie. Samotny kwark, posiadający kolorowy ładunek oddziaływań silnych, ulega procesowi **hadronizacji**. W jego trakcie oddziaływanie silne, pośredniczone przez gluony, prowadzi do tworzenia dodatkowych cząstek, które łączą się z kwarkiem, tworząc hadrony.

Wyjątek stanowi ciężki kwark wysoki, nazywany z angielskiego kwarkiem t (top), co czyni go niewątpliwie najbardziej osobliwym z kwarków. Tę odkrytą w 1995 roku (w amerykańskim Tevatronie) cząstkę – najcięższą ze wszystkich opisywanych przez Model Standardowy – cechuje czas życia rzędu 10^{-25} sekundy. Ponieważ jest on o rząd wielkości krótszy niż proces hadronizacji (10^{-24} sekundy), więc kwark t nie tworzy żadnych złożonych cząstek. Po prostu rozpada się szybciej, niż może zostać związany w postaci hadronów!

Jest to unikalna cecha kwarka wysokiego, który jako jedyna oddziałująca silnie cząstka elementarna może być obserwowany w postaci swobodnej. Dzięki temu, że kwark t nie zdąży wytworzyć hadronu, można bezpośrednio badać jego właściwości, np. spin. Obserwując kinematykę produktów rozpadu par kwark-antycwark ($t\bar{t}$), fizycy z eksperymentów CMS i ATLAS potrafili odtworzyć momenty pędu wyjściowych kwarków. Po analizie wielu takich zdarzeń znaleźli korelację między ich spinami – co interpretujemy jako **splątanie kwantowe** [1, 2].

Najnowsze odkrycia idą jednak jeszcze dalej. Choć kwark t nie tworzy hadronów, to w krótkiej chwili przed jego rozpadem możemy zaobserwować zaczątki hadronizacji. Oddziaływanie z gluonami sprawia, że produkcja par $t\bar{t}$ jest zwiększona, co prowadzi do większej liczby obserwowanych zdarzeń, niż gdyby nie dochodziło do hadronizacji.

Takie zjawisko zaobserwowali niedawno fizycy pracujący w eksperymencie CMS [3]. Nową „cząstkę” nazywamy **Toponium** i przedstawiamy jako nieuformowany stan związany kwarku wysokiego i jego antycząstki $\bar{t}$. Jego masa jest równa około 340 GeV, czyli jest niemal równa podwójnej masie kwarka t . Łatwo to zrozumieć – wkład energetyczny od oddziaływań silnych (w przeciwieństwie do lekkich hadronów, jak piony, protony czy neutrony) jest tu marginalny, ponieważ kwarki t (171 GeV) są dużo cięższe niż suma energii zawartych w Toponium gluonów (ok. 1 GeV).

Ciekawym kierunkiem dalszych badań byłaby możliwość istnienia stanów wzbudzonych Toponium. W przypadku lżejszych mezonów, takich jak J/Ψ , znane są całe serie wyższych stanów energetycznych (np. $\Psi(2S)$), odpowiadających różnym modom oscylacyjnym czy orbitalnym kwarków. Podobne wzbudzenia, nawet w postaci krótkich korelacji, moglibyśmy hipotetycznie zaobserwować w przypadku kwarka t .

Najważniejszy wydaje się jednak fakt, że w LHC zarejestrowano zupełnie nową cząstkę. Jest to pierwsze tego typu odkrycie od zarejestrowania bozonu Higgsa, które miało miejsce ponad dziesięć lat temu. Istnienie Toponium stanowiło do tej pory hipotezę, i wreszcie udało się ją potwierdzić eksperymentalnie. Jest to pierwszy hadron zawierający najcięższy z kwarków, co czyni go wyjątkowym.

Nie ulega wątpliwości, że badania nad kwarkiem wysokim wciąż przynoszą nowe odkrycia. Możemy więc z nadzieją i ekscytacją czekać na przyszłość fizyki kwarka t .

Wiktor MATYSZKIEWICZ

Warto zaznaczyć, że nie mamy jeszcze pełnego potwierdzenia, że nowo odkryta cząstka to na pewno Toponium. Alternatywy są jednak jeszcze bardziej ekscytujące – oznaczałyby bowiem, że jest to zupełnie nowa cząstka elementarna, sygnalizująca odkrycie zupełnie nowej fizyki.

Bibliografia

- [1] ATLAS Collaboration. *Observation of quantum entanglement with top quarks at the ATLAS detector*. Nature 633 (2024). arXiv: 2311.07288 [hep-ex].
- [2] CMS Collaboration. *Measurements of polarization and spin correlation and observation of entanglement in top quark pairs using lepton + jets events from proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV*. Physical Review D 110 (2024).
- [3] CMS Collaboration. *Observation of a pseudoscalar excess at the top quark pair production threshold*. (eprint, marzec 2025) arXiv: 2503.22382 [hep-ex].