

Szukanie dziury w całym w Wielkim Zderzaczu Hadronów

Sebastian TROJANOWSKI*

*AstroCeNT, Centrum Astronomiczne im. Mikołaja Kopernika Polskiej Akademii Nauk

Postęp naukowy w dużej mierze opiera się na nieustannym odkrywaniu luk w poprzednich rozumowaniach. Luki te często prowadzą do całkiem nowych pomysłów i idei. Przysłowiowe szukanie dziury w całym okazuje się więc zajęciem nie tylko przynoszącym satysfakcję, ale również bardzo pożytecznym.

Jednym z głównych zadań Wielkiego Zderzacza Hadronów (*Large Hadron Collider*, LHC) jest poszukiwanie nowych cząstek elementarnych. W tym celu doprowadzamy do około 1 mld zderzeń protonów na sekundę, a następnie analizujemy produkty powstałe po zderzeniu. Wykorzystujemy do tego podziemne detektory o rozmiarach zbliżonych do budynków mieszkalnych, opierając się przy tym na pracy wielkich międzynarodowych zespołów eksperymentalnych, w tym badaczy z Polski. Przed zderzeniem protony są rozpędzane w akceleratorze do prędkości niezwykle bliskich prędkości światła, $v = 0,999999991c$. Detektory umieszczone wokół punktu zderzeń protonów są bardzo szczelnie wypełnione elektroniką, ponieważ nie chcemy, aby jakakolwiek istotna informacja na temat zderzenia umknęła naszej uwadze.

Prędkości protonów w Wielkim Zderzaczu można oszacować za pomocą czynnika Lorentza: $\gamma = E_p/m_p$, znając energię protonów w zderzaczu, $E_p = 7000$ GeV, ich masę, $m_p \sim 1,67 \times 10^{-27}$ kg, oraz pamiętając, że $\gamma = 1/\sqrt{1 - (v/c)^2}$.

Nasze poszukiwania koncentrują się typowo na próbie znalezienia sygnału pochodzącego od coraz bardziej masywnych nowych cząstek, do których wytworzenia potrzeba coraz potężniejszych zderzaczy. Taka strategia badań doprowadziła do wielu wspaniałych odkryć w XX wieku, choć niestety ostatnie kilka lat pracy LHC nie dostarczyło nam w pełni uznanych, naukowych dowodów na istnienie kolejnych nowych cząstek. Udało nam się jednak odkryć bozon Higgsa i tym samym potwierdzić prawdziwość kluczowego mechanizmu odpowiedzialnego m.in. za nadanie mas bozonom cechowania pośredniczącym w oddziaływaniach słabych.

W odróżnieniu od oddziaływań słabych, w oddziaływaniach elektromagnetycznych pośredniczą bezmasowe fotony.

Pomyślmy nieco głębiej o dość dramatycznym zdarzeniu, w którym dwa rozpędzone protony wpadają na siebie, co prowadzi do powstania nowej cząstki o masie m ponad 100 razy większej niż masa m_p każdego z protonów z osobna (dla przykładu, masa bozonu Higgsa wynosi $m \simeq 133 m_p$). Proces ten niewątpliwie wymaga, aby nie mała część pędu obu protonów przemieniła się w masę spoczynkową i pęd nowej cząstki. W języku fizyki mówimy wówczas o dużym przekazie pędu pomiędzy zderzającymi się protonami. Nietrudno się domyślić, że nowo powstała cząstka może w dość losowy sposób lecieć w niemal dowolnym kierunku (czyli w przybliżeniu izotropowo) od punktu zderzenia protonów. W żargonie fizyków powiedzielibyśmy, że jej pęd poprzeczny p_T , czyli składowa wektora pędu skierowana prostopadle do kierunku ruchu protonów, może być bardzo duży. W istocie często jest on zbliżony do masy nowo powstałej cząstki, $p_T \sim m$. Nasze eksperymenty powinny więc pokrywać większą część obszaru wokół miejsca zderzenia protonów, aby nowe cząstki nie mogły unikać detekcji.



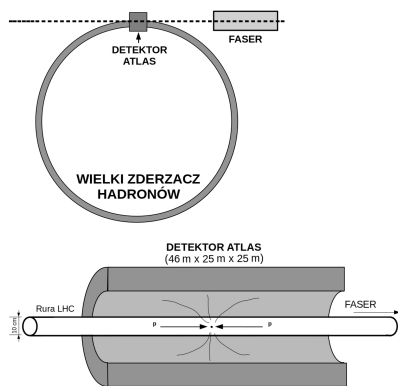
Rozwiązanie zadania M 1701. Zauważmy, że odcinki BO i DK są środkowymi trójkąta ADB , więc przecinają się w takim punkcie X , że $BX : XO = 2 : 1$. Rozważmy teraz trójkąt CBE oraz jego środkowe BO i EN . Argumentując w podobny sposób, otrzymujemy, że przecinają się w punkcie dzielącym odcinek BO w stosunku $2 : 1$, licząc od wierzchołka B , czyli w punkcie X . Wobec tego proste DK , EN i BO przecinają się w punkcie X .

O detektorze IceCube pisał Paweł Przewłocki w Δ_{16}^3 .

Nieco inna logika od lat napędza niezwykle płodne badania neutrin, które bez wątpienia są najbardziej nieuchwytnymi znanymi nam cząstkami elementarnymi. Neutrino skrywają swe tajemnice tak mocno dzięki temu, że bardzo słabo oddziałują z pozostałymi składnikami materii. Dlatego w tym wypadku rozmiar eksperymentów też ma znaczenie. Przykładowo detektor IceCube ma wielkość około 1 km^3 i jest umieszczony 1450 m pod arktycznym lodem w pobliżu bieguna południowego. Im większy jest taki eksperyment, tym zwiększa się szansa na uchwycenie bardzo rzadkich procesów z udziałem neutrin, podczas gdy ogromna liczba takich cząstek przelatuje przez detektor bez żadnego widocznego wpływu na urządzenia pomiarowe. W ostatnich latach takie podejście dało przyczynek do rozwoju programu badawczego, w którym analizuje się możliwość istnienia wielu innych lekkich nowych cząstek tego typu.

Co istotne, takie nowe cząstki mogą być stabilne jak neutrino, ale mogą też rozpadać się na inne cząstki po przeleceniu pewnej odległości.

Skala obu tych programów badawczych dotyczących zderzaczy oraz pomiarów neutrin może imponować. Okazuje się jednak, że z tych dwóch wielkich całości można też złożyć jeden bardzo niewielki nowatorski projekt.



Schemat detektora ATLAS będącego częścią Wielkiego Zderzacza Hadronów



Rozwiązanie zadania M 1699.
Odpowiedź: 0 lub 5.

Niech n – dana liczba, t – jej reszta z dzielenia przez 40 i z dzielenia przez 625. Wtedy liczba $n - t$ jest podzielna przez 40 i przez 625, czyli dzieli się przez $NWW(40, 625) = 5000$. Oznacza to, że różnica $n - t$ kończy się na 5000 lub 0000. Ponadto reszta t jest mniejsza niż 40. Dlatego cyfrą w miejscu tysiąca może być 0 lub 5.

Obie sytuacje są możliwe, np. liczby 10000 i 15000 (obie te liczby mają reszty równe 0 po podzieleniu przez 40 i 625).

A jak nadajemy masę ciemnemu fotonowi? Odpowiedzialne za to może być... „ciemne” pole Higgsa. Ale to już temat na osobną dyskusję.

Ciemne światło? Nie brnijmy dalej w tę analogię...

Takim właśnie zagadnieniem autor niniejszego artykułu miał przyjemność zajmować się kilka lat temu wraz z trójką innych badaczy zatrudnionych wówczas na Uniwersytecie Kalifornijskim w Irvine. Poszukiwaliśmy luk w wielkoskalowych eksperymentach w LHC, licząc, że może uda nam się znaleźć jakiś innowacyjny sposób spojrzenia na zderzacz. Prawdopodobnie jedyną opcją, której rozważanie wcześniej całkowicie nie miało sensu, było spojrzenie na kierunek wzdłuż osi wiązki zderzających się protonów (patrz rysunek). Na pozór nie sposób tam przecież umieścić detektora, bo tam właśnie podróżują protony w swoim nieustannym pędzie ku unicestwieniu w zderzacz. Z drugiej strony, stwarzało to możliwość, że inni badacze przeoczyli jakąś mniej oczywistą naukową okazję.

Wspomnieliśmy wyżej o ciężkich cząstkach, które mogą być produkowane w LHC. Są to jednak bardzo rzadkie zdarzenia. W takim razie, co się dzieje przy większości zderzeń protonów w LHC, których jest przecież tak wiele? Typowa odpowiedź udzielana jeszcze kilka lat temu brzmiałaby: „nic ciekawego”. Jest w tym ziarno prawdy, bo większość takich zderzeń prowadzi do produkcji znanych nam cząstek, np. lekkich mezonów, jak piony, kaony itp. Przykładowo w nadciągającym etapie prac LHC, który ma się na dobre rozpocząć na wiosnę 2022 roku, spodziewamy się wyprodukować oszałamiającą liczbę ponad 10^{17} neutralnych pionów π^0 i podobną liczbę pionów naładowanych. Pamiętajmy jednak, że $p_T \sim m$, a w przypadku pionów $m \sim 0,1 m_p$, więc są one typowo produkowane z niskim pędem poprzecznym. Ich całkowity pęd może jednak być bardzo duży, $p \sim 10^3 m_p$. Jest on dyktowany przez energię zderzeń w LHC. W rezultacie spora część takich lekkich mezonów będzie charakteryzowała się bardzo niewielkim stosunkiem $p_T/p \ll 1$. W praktyce oznacza to, że ich pęd prawie w całości jest skierowany wzdłuż osi wiązki i podróżują one wraz z protonami w rurze akceleratora. W istocie są niemal wystrzeliwane z punktu zderzenia protonów w bardzo skupionej wiązce pędzącej do przodu.

Ta prosta obserwacja zaowocowała pomysłem na nowy eksperyment, nazwany FASER (*ForwArd Search ExpeRiment*) w nawiązaniu do fazera znanego fanom serialu „Star Trek”. Okazało się, że powyższa wiązka jest tak mocno skupiona wokół osi zderzenia protonów, że nawet bardzo niewielki detektor o promieniu 20 cm umieszczony na tej osi około pół kilometra dalej jest w stanie zaobserwować efekty jej istnienia – np. w postaci dużej wiązki wysokoenergetycznych mionów pochodzących z LHC. Pierwszym celem tego eksperymentu jest poszukiwanie śladów rozpadów długo żyjących lekkich nowych cząstek, które mogą być produkowane podobnie do wspomnianych wyżej pionów. Ich istnienie mogłoby być powiązane np. z zagadką istnienia ciemnej materii we Wszechświecie.

Same takie cząstki są niestabilne, więc nie mogą być ciemną materią wypełniającą Wszechświat od zarania dziejów. Mogą one jednak pełnić funkcję bozonów pośredniczących w jej oddziaływaniach ze znaną nam materią, podobnie jak bozony z Modelu Standardowego. Co ciekawe, jednym z flagowych pomysłów jest tzw. „ciemny foton”, który mógłby być masywnym bratem zwykłego fotonu. Co istotne, taki ciemny foton może dość silnie oddziaływać z ciemną materią, a jednocześnie sporo słabiej, ale niezaniebawalnie, ze znanymi nam cząstkami. W ten sposób może on stanowić okno na tajemniczy świat cząstek wykraczający poza Model Standardowy. Z pewnym przymrużeniem oka można powiedzieć, że ciemny foton mógłby być kwantem światła w ciemnym sektorze Wszechświata. Więcej o FASERze mogliśmy przeczytać w Δ_{19}^{05} , w artykule Krzysztofa Turzyńskiego *Zrób sobie eksperyment*.

Na tym jednak historia się nie kończy. Nie od dziś wiadomo, że rozpady lekkich mezonów są znakomitym źródłem neutrin. Efektywnie więc LHC jest fabryką wysokoenergetycznych neutrin, które tylko czekają na pomiar. W tym wypadku wiązka neutrin jest również bardzo skupiona, co umożliwia skuteczne pomiary nawet bardzo niewielkim detektorom. Pierwsza taka wstępna obserwacja kandydatów na neutrina w historii LHC została niedawno ogłoszona przez zespół badaczy współpracujących w ramach FASER. Opiera się ona na instrumencie pomiarowym o rozmiarach rzędu $(10 \text{ cm})^3$, co trudno jest nawet

zestawiać ze współczesnymi ogromnymi eksperymentami neutrinowymi.

Okazji do współdziałania różnych rodzajów eksperymentów w celu lepszego poznania natury neutrin w najbliższych latach będzie dużo więcej. W szczególności twórcy eksperymentu FASER planują prowadzenie badań przy wykorzystaniu specjalnego detektora FASER ν umieszczonego tuż przed głównym detektorem FASER. Będzie on nieco większy niż wyżej opisane podręczne urządzenie. FASER ν o długości 1 m umożliwi obserwację około 10^4 zderzeń neutrin z jądrami atomów wolframu. Głównym celem eksperymentu jest bardzo dokładne zmierzenie częstości i przebiegu tych procesów przy energiach neutrin około 1000 GeV, dla których nie zostało to dotychczas zrobione. W tym celu zastosowany zostanie nowoczesny detektor wykorzystujący emulsję filmową, który będzie mógł niejako robić zdjęcia poszczególnym zderzeniom i umożliwi wgląd w szczegółowy rozkład ich produktów.

Okazuje się, że lepsze zrozumienie procesu produkcji neutrin w zderzeniach protonów i ich późniejszych oddziaływań ma też istotne znaczenie dla rozwiązania niektórych zagadek związanych z analizą zderzeń wysokoenergetycznych promieni kosmicznych z atmosferą ziemską, jak również dla naszego rozumienia oddziaływań silnych wiążących jądra atomowe (tzw. chromodynamika kwantowa).

Taki wysokoenergetyczny proton docierający z przestrzeni kosmicznej do Ziemi ma energię $E_p = 10^8$ GeV i zderza się ze „statycznym” protonem wewnątrz jądra tlenu lub argonu w atmosferze Ziemi. W układzie środka masy energia tego zderzenia jest opisana zmienną Mandelstama, $s \simeq \sqrt{2E_p m_p} \simeq (14 \text{ TeV})^2$, co odpowiada energii zderzeń w LHC. Pamiętajmy przy tym, że $1 \text{ TeV} = 1000 \text{ GeV}$.

Wyniki eksperymentów FASER i FASER ν będą więc miały wpływ na szereg dziedzin fizyki cząstek. Dostarczą też one nowych danych dotyczących fizyki neutrin taonowych, które nieustannie stanowią ogromny ból

głowy dla kolejnych pokoleń eksperymentatorów. Dość wspomnieć, że od czasu ich pierwszej doświadczalnej bezpośredniej obserwacji na przełomie tysiącleci w detektorze DONUT nadal dysponujemy zaledwie garścią takich zdarzeń kiedykolwiek zmierzonych z dużą dokładnością oraz dodatkowymi obserwacjami bazującymi na zjawisku oscylacji, które raportowały w późniejszych latach zespoły eksperymentalne IceCube, OPERA oraz SuperKamiokande.

Trwają też dyskusje nad rozszerzeniem tego programu badawczego na dalsze lata działania LHC. W tym celu rozważa się stworzenie jeszcze większego laboratorium podziemnego (*Forward Physics Facility*, FPF), który mógłby pomieścić więcej detektorów umieszczonych na linii osi zderzenia wiązki protonów w LHC. Wśród nich znaleźć by się mogła większa wersja eksperymentu FASER, ale też np. niedawno zaproponowany detektor FLArE (*Forward Liquid Argon Experiment*). Miałby on wykorzystywać technologię ciekłoargonowej komory projekcji czasowej oraz fotonowielacze zbierające pierwszy sygnał zderzenia w detektorze w postaci błysku (*flare*) scyntylacyjnego. Taki eksperyment mógłby też służyć do bezpośredniej detekcji stabilnych lekkich cząstek ciemnej materii, które mogą być nieustannie produkowane w LHC, lub też wykluczyć tego typu scenariusze teoretyczne. Pomimo pandemii w ostatnich miesiącach zorganizowano już (zdalnie) dwa duże międzynarodowe spotkania fizyków zainteresowanych rozbudową tego programu badawczego w LHC. Wykonano też szereg wstępnych prac inżynierskich w celu dokładnego zaplanowania nowego laboratorium i oszacowania kosztów jego budowy. Obecne szacunki opiewają na około 0,5–1% kosztów budowy LHC.

I tak na naszych oczach rodzi się całkiem nowy kierunek badawczy w LHC, co w tym przypadku ma znaczenie niemal dosłowne.

Ciągi Dolda i punkty periodyczne

Grzegorz GRAFF*, Mateusz SCHARMACH**

Albrecht Dold (1928–2011), wybitny niemiecki matematyk, był autorem wielu eleganckich konstrukcji topologicznych. W jego pracy z 1984 roku pojawił się pewien specyficzny układ kongruencji, które zajmują ważne miejsce w teorii układów dynamicznych i topologii. Okazuje się, że idea, jaka leży u ich podłoża, jest o wiele bardziej uniwersalna. Artykuł [2] kończy się następującą definicją, która dla nas stanowić będzie punkt wyjścia.

Ciąg całkowitoliczbowy $a = (a_n)_{n \in \mathbb{N}}$ nosi nazwę *ciągu Dolda*, jeżeli dla wszystkich $n \geq 1$

$$(1) \quad \sum_{k|n} \mu\left(\frac{n}{k}\right) a_k \equiv 0 \pmod{n}.$$

Funkcja μ występująca w powyższym wzorze to klasyczna funkcja Möbiusa, zdefiniowana następująco:

$$\mu(n) = \begin{cases} 1 & \text{jeżeli } n = 1, \\ 0 & \text{jeżeli } n \text{ ma dzielnik będący kwadratem,} \\ (-1)^r & \text{jeżeli } n \text{ jest iloczynem } r \text{ różnych liczb pierwszych.} \end{cases}$$

* Wydział Fizyki Technicznej i Matematyki Stosowanej, Politechnika Gdańska
** Student, Wydział Matematyki, Informatyki i Mechaniki, Uniwersytet Warszawski