

Jeden kolajder, by wszystkimi rządzić

Choć Wielki Zderzacz Hadronów nie jest już młody, to wciąż daleko mu do emerytury. Przyjdzie jednak dzień, w którym LHC zawiesi przysłowiowe buty na kołku i odda miejsce młodszemu kolajderowi. Wiemy już, że nastąpi to około 2041 roku – przynajmniej według obecnych planów. Kto jednak będzie następcą LHC? Nad tym zarządzający CERN-em głowią się już teraz, bo od ich decyzji zależy kierunek rozwoju fizyki wysokich energii na kolejne dekady.

W niniejszym artykule spróbujemy dokonać przeglądu głównych propozycji. By jednak się z tym zmierzyć, trzeba zacząć od fundamentów.

Co właściwie chcemy badać?

Dzisiejszy obraz fizyki cząstek – a zwłaszcza fizyki najwyższych energii – kształtowany jest przez jedno odkrycie i jeden brak odkrycia. Tym pierwszym jest bozon Higgsa, czyli cząstka odpowiedzialna za mechanizm nadawania mas pozostałym cząstkom Modelu Standardowego. Drugim jest natomiast brak śladów jeszcze cięższych cząstek – takich jak supersymetryczni partnerzy czy dodatkowe bozony Higgsa – których mimo intensywnych poszukiwań nie udało się odnaleźć w LHC. Skłania to wielu fizyków do pytania, czy samo zwiększanie energii zderzeń jest wystarczającą drogą do odkrycia nowej fizyki na obecnym etapie badań.

Ten drugi fakt przyczynił się do popularyzacji idei precyzyjnych pomiarów znanych już obiektów. Poza tym, że są one celem samym w sobie – w końcu pozwalają coraz dokładniej badać prawa natury – zachowują również czułość na fizykę wykraczającą poza Model Standardowy. Co więcej, im większa precyzja pomiaru, tym większa szansa na dostrzeżenie subtelnych odstępstw od jego przewidywań.

A co miałyby być głównym obiektem takich badań? Oczywiście wspomniany już bozon Higgsa. Mimo że odkryto go już piętnaście lat temu, wciąż wiemy o nim zaskakująco niewiele. Znamy jego masę oraz siłę sprzężeń do najcięższych fermionów i bozonów, ale nadal nie zmierzono jego naturalnej szerokości rozpadu, a kształt jego potencjału – odpowiedzialnego za mechanizm łamania symetrii elektroslabej – pozostaje w dużej mierze nieznanym.

Perspektywa ta wydaje się na tyle obiecująca, że środowisko fizyki wysokich energii zdecydowało, iż kolejnym dużym projektem powinno być zbudowanie tzw. fabryki Higgsów – akceleratora dostarczającego możliwie największą liczbę wyjątkowo czystych zdarzeń z bozonem Higgsa.

Taśma produkcyjna Higgsów

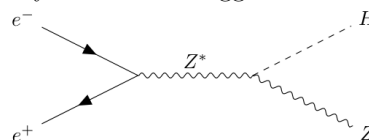
Produkcja bozonu Higgsa może odbywać się na dwa sposoby – poprzez zderzenia par protonów lub par elektron-pozyton. Pierwsza metoda (używana obecnie

w LHC) pozwala osiągać większe energie, ale ma równocześnie istotne ograniczenia. Z jednej strony, przy zderzeniu protonów oddziałują ze sobą tak naprawdę gluony i kwarki budujące protony, co nie pozwala nam precyzyjnie kontrolować energii zderzenia. Z drugiej strony tło powstające w częstych oddziaływaniach silnych (gluonów i kwarków) znacznie utrudnia analizę danych.

Dlatego zderzacz e^+e^- wydaje się obecnie najlepszą opcją. Oddziaływania elektromagnetyczne są dużo czystsze niż oddziaływania silne, a kontrolując energię elektronu i pozytonu, możemy dobrać ją w taki sposób, aby zmaksymalizować liczbę produkowanych bozonów Higgsa.

Optymalna energia dla produkcji bozonów Higgsa w takim kolajderze wynosi z kolei około 240 GeV.

Przy tej energii otwiera się kanał produkcji $e^+e^- \rightarrow Z^0 H$ (rys. 1), który zapewnia największą liczbę wyprodukowanych bozonów Higgsa.



Rys. 1. Produkcja bozonu Higgsa w procesie Higgsstrahlung, zachodzącym przy energiach od około 240 GeV

Pozornie bardziej naturalny proces $e^+e^- \rightarrow H$, dostępny przy energii 125 GeV – odpowiadającej masie bozonu Higgsa – jest mało efektywny, ponieważ siła sprzężenia cząstek z bozonem Higgsa jest proporcjonalna do ich masy. Elektron, będąc około 300 tys. razy lżejszy od kwarka t , sam z siebie produkuje znikomą liczbę bozonów H . Dlatego optymalna metoda produkcji zakłada najpierw wytworzenie wirtualnego bozonu Z^0 , który następnie emituje bozon Higgsa (tzw. Higgsstrahlung, patrz rys. 1).

Produkcja bozonu Higgsa nie jest jednak jedynym punktem na „rozkładzie jazdy” planowanej maszyny e^+e^- . Wszak można przy okazji zbadać również inne procesy elektroslabe, nawet jeśli to bozon Higgsa wciąż pozostaje głównym celem polowania. I tak, poza progiem energii 240 GeV planowane są również inne: 91 GeV – do produkcji bozonów Z^0 ; 160 GeV – do produkcji par W^+W^- oraz 340 GeV – do produkcji par kwarków t^+t^- .

Tak skonstruowany harmonogram (91 GeV $\rightarrow$ 160 GeV $\rightarrow$ 240 GeV $\rightarrow$ 340 GeV) pozwoliłby precyzyjnie zbadać wszystkie najcięższe cząstki elementarne, o których wiemy obecnie zdecydowanie najmniej.

Propozycje na stole

W ten sposób dochodzimy do bohaterów niniejszego artykułu, czyli czterech najpoważniej rozważanych propozycji: ILC (International Linear Collider), CLIC (Compact Linear Collider), CEPC (Circular Electron Positron Collider) oraz FCC_{ee} (Future Circular Collider). Propozycji było oczywiście więcej, ale z racji ograniczonego miejsca artykuł ograniczy się do omówienia wspomnianej czwórki.

Warto wspomnieć jeszcze o zderzacz mionowym, który jest jednak raczej wykluczony jako projekt na lata 40. ze względu na wciąż niewystarczający rozwój technologii.

Pierwsze dwie propozycje – ILC i CLIC – to akceleratory liniowe, w których elektrony i pozytony są rozpędzane wzdłuż linii prostych, zanim zderzą się w centrum detektora.

Takie zderzacze oferują możliwość spolaryzowania wiązki, co pozwala na bardziej precyzyjne badania. Są również tańszą opcją, a jednocześnie pozostają łatwe w rozbudowie – wystarczy przedłużyć istniejący prosty odcinek (podczas gdy akceleratory kołowe wymagają zbudowania nowego pierścienia praktycznie od podstaw). Z drugiej strony są ograniczone tym, że mogą posiadać tylko jeden punkt zderzenia, podczas gdy np. na LHC znajdują się obecnie cztery takie punkty otoczone różnymi detektorami.

ILC wykorzystuje nadprzewodzące węgli radioczęstotliwościowe, natomiast CLIC bazuje na normalnie przewodzących strukturach przyspieszających o bardzo wysokim gradencie (100 MV/m), których zasilanie odbywa się za pomocą specjalnej wiązki napędowej (drive beam). Choć ta druga technologia pozwala osiągać większe energie (nawet rzędu kilku TeV!), to uznawana jest za mniej stabilną i dlatego to ILC jest rozpatrywany jako bardziej prawdopodobna opcja.

Jednak na ten moment bardziej prawdopodobne jest powstanie akceleratorów kołowych.

Chiny czy Europa?

Dwie pozostałe propozycje – europejski FCC i chiński CEPC – to synchrotrony, czyli zderzacze kołowe (tak jak obecne LHC). Ponieważ jednak elektrony trudniej rozpędzać niż protony, rozmiar potencjalnego kolajdera musiałby być znacznie większy, by osiągnąć zakładane energie. FCC planuje tunel o obwodzie 90 km, a CEPC – nieco większy, licząc 100 km.

Dlaczego zderzacze elektronowe muszą być tak duże? Przypomnijmy, że głównym ograniczeniem energii zderzaczy e^+e^- jest promieniowanie synchrotronowe. Każda naładowana cząstka poruszająca się po zakrzywionym torze emituje promieniowanie elektromagnetyczne, tracąc przy tym energię proporcjonalną do: $P \sim \frac{E^4}{m^4 R}$.

Oznacza to, że podwojenie energii zwiększa straty aż 16-krotnie, podczas gdy dwukrotne zwiększenie promienia zmniejsza je jedynie dwukrotnie.

Dla protonów w LHC efekt ten jest praktycznie pomijalny, ponieważ moc promieniowania jest odwrotnie proporcjonalna do czwartej potęgi masy cząstki, a proton jest około 1836 razy cięższy od elektronu. Głównym ograniczeniem LHC jest natomiast zdolność magnesów do zakrzywiania toru protonów.

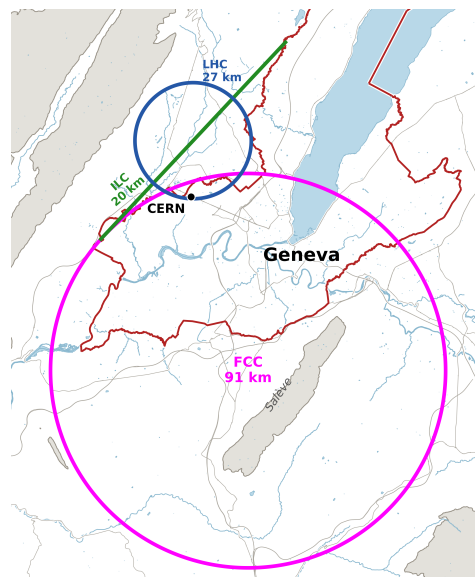
Pod względem planowanych badań obie maszyny nie różnią się od siebie zbyt wiele; różnią je natomiast aspekty praktyczne. Chińskie plany zakładały, że CEPC mógłby powstać za połowę kosztu FCC, a także 10 lat szybciej – w roku 2035, podczas gdy FCC mogłoby rozpocząć pracę najwcześniej w 2045 roku.

Nie da się ukryć, że taki scenariusz pogrzebałby szanse na budowę większego akceleratora w Genewie – zanim FCC by powstało, CEPC zdążyłby już zakończyć zbieranie danych. Przy takiej różnicy nie byłoby większego sensu budować praktycznie takiej samej maszyny.

FCC ma jednak za sobą bardzo korzystny rok. Z jednej strony CERN wybrał go jako swoją preferowaną opcję, a z drugiej CEPC wyraźnie stracił impet. Chiński

kolajder nie został wpisany do chińskiego planu pięcioletniego (2025–2030), co zasadniczo przekreśla optymistyczny scenariusz czasowy.

Na ten moment wydaje się więc, że to FCC jest nieco z przodu, choć wciąż pozostaje wiele niewiadomych – w tym znalezienie finansowania, na które środki z samego budżetu CERN-u nie wystarczą.



Rys. 2. Poglądowe porównanie rozmiarów LHC, FCC i ILC

Wielki, większy, największy...

Na koniec warto wspomnieć, że oba projekty nie ograniczają się do najbliższej przyszłości. Choć obie maszyny planowane są jako zderzacze e^+e^- , to nic nie stoi na przeszkodzie, aby w wybudowanym tunelu puścić inne wiązki – przede wszystkim protonów. Odpowiednie projekty noszą obecnie robocze nazwy FCC_{hh} oraz SPPC (czyli Super Proton-Proton Collider).

Historia zna już takie przypadki, a najbardziej znanym przykładem jest obecnie działający LHC. Jego 27-kilometrowy tunel był wcześniej wykorzystywany przez eksperyment LEP, w którym zderzano właśnie pary elektron-pozyton. Budowa nowego zderzacza kołowego – FCC lub CEPC – mogłaby więc przebiec podobnie: rozpocząć się od zderzania elektronów i pozytonów, a następnie przejść do zderzania protonów.

Oznaczałoby to oczywiście powrót do wysokich energii – jak już zostało wspomniane, zderzanie protonów, choć znacznie mniej precyzyjne, pozwala osiągać większe energie niż zderzanie par e^+e^- . W tym przypadku mowa byłaby o energiach rzędu 100 TeV, czyli około ośmiokrotnie większych od osiąganych obecnie w LHC.

Praca tych maszyn mogłaby rozpocząć się dopiero w latach 60. (SPPC) lub 70. (FCC_{hh}).

Póki co możemy być jednak pewni, że to nie koniec historii. Opcji na stole jest wiele i niezależnie od tego, który z wielkich projektów zostanie wybrany, będzie on dalej przesuwiał granice naszego zrozumienia fizyki cząstek. A wciąż pozostaje w niej wiele do zrozumienia...

Wiktor MATYSZKIEWICZ