

LHC

W OCZEKIWANIU NA START

PO CO NAM LHC

FABRYKA ODKRYĆ

Największe na świecie laboratorium fizyki cząstek CERN od lat prowadzi badania nad budową materii, poszukując odpowiedzi na pytania: jakie są jej najmniejsze cząstki – cegiełki i co sprawia, że cząstki te trzymają się razem tworząc niezwykle różnorodne i skomplikowane obiekty, o bardzo szerokiej skali wielkości.

Odkrycie, że protony i neutrony, tworzące jądra atomowe, nie są cząstkami elementarnymi zrewolucjonizowało fizykę wysokich energii i doprowadziło do sformułowania tzw. Modelu Standardowego. Model ten wiąże praktycznie wszystkie obserwacje z dziedziny cząstek w jedną, logiczną całość. Protony i neutrony są zbudowane z dwóch rodzajów maleńkich obiektów: kwarków i gluonów, różniących się od siebie między innymi spinem i ładunkiem elektrycznym. Kwarki są obdarzone ładunkiem elektrycznym, a gluony są elektrycznie neutralne. Ich spin jest dwa razy większy od spinu kwarków. Jak dotąd, w naturze kwarki występują jedynie wewnątrz nukleonów i są bardzo silnie ze sobą związane przez gluony. Poza kwarkami i gluonami prawdziwie elementarnymi cząstkami materii są leptony (elektrony, miony, neutrino itd.).

Przewidywania Modelu Standardowego dotyczące oddziaływań elektroślabych zgadzają się z eksperymentami z niezwykłą dokładnością. Opisu oddziaływań silnych dokonano w ramach chromodynamiki kwantowej, będącej częścią Modelu

Standardowego. Aby wytłumaczyć fakt, że cząstki materii posiadają niezerową masę, wprowadzono do teorii hipotetyczną cząstkę, zwaną *bozonem Higgsa*, która uzupełnia Model Standardowy, ale nie została dotąd zarejestrowana w żadnym eksperymencie.

Są pewne argumenty teoretyczne wykraczające poza Model Standardowy, które przemawiają za istnieniem głębszych teorii przy wyższych energiach, np. supersymetria. Cechą wspólną tych teorii jest pojawianie się *nowych, ciężkich cząstek*. Wyjaśnienia wymaga zachowanie się materii w warunkach ekstremalnie wysokich temperatur i bardzo wielkich gęstości jakie panowały tuż po Wielkim Wybuchu, jednym słowem zbadania stanu plazmy kwarkowo-gluonowej. Wciąż nie wiadomo, dlaczego *we Wszechświecie nie ma antymaterii*.

Poszukiwanie odpowiedzi na te wszystkie pytania stanowi program naukowy eksperymentów na największym na świecie akceleratorze LHC, którego budowa właśnie dobiega końca w CERN-ie. Polscy fizycy prowadzący badania teoretyczne wnieśli wkład w opracowanie różnych rozszerzeń Modelu Standardowego, a w szczególności supersymetrii. Ich prace pokazują drogi poszukiwania bozonu Higgsa, cząstek supersymetrycznych, czarnych dziur oraz dodatkowych wymiarów przestrzeni.

RUSZA KOŁOS LHC

LHC – (*Large Hadron Collider*) – Wielki Zderzacz Hadronów jest największym na świecie urządzeniem do zderzania cząstek przy energiach, jakich dotąd nie osiągnięto w żadnym laboratorium na świecie. Uzyskanie tych energii, a także badanie takich zderzeń stanowi gigantyczne wyzwanie technologiczne.



Fot. 1. Pierścień LHC w przekroju. Widoczne są otwory kanałów, przez które poruszać się będą wiązki protonów – w przeciwnych kierunkach

W LHC będą realizowane czołowe zderzenia przeciwbieżnych wiązek protonów o masie własnej 1 GeV, przy całkowitej energii 14 TeV. Zderzenia jądro-jądro w pędzących z przeciwnych kierunków wiązkach jąder ołowiu, będą zachodzić z energią całkowitą równą 1150 TeV!

Nowy akcelerator został zbudowany w pierścieniowym tunelu o obwodzie 27 km wydrążonym na średniej głębokości około 100 m pod ziemią pomiędzy górami Jury we Francji i jeziorem Genewskim w Szwajcarii. To ten sam tunel, który wykorzystywano poprzednio dla eksperymentów LEP. Natomiast wszystkie magnesy i elementy rur akceleratorowych musiały być zmontowane od nowa, oczywiście z zegarmistrzowską dokładnością. Podobnie nowej konstrukcji wymagały wszystkie detektory i urządzenia sterujące.

Wiązki pierwotne będą wytwarzane w istniejącym w CERN łańcuchu akceleratorów, a po uzyskaniu energii 0,45 TeV będą wstrzykiwane do LHC. Tam będą się poruszać w próżni, bliskiej próżni kosmicznej, a silne magnesy pracujące w ekstremalnie niskich temperaturach będą zakrzywiać ich tory wewnątrz pierścienia. Cząstki będą wykonywać miliony okrążeń otrzymując przy każdym okrążeniu impuls, czyli porcję energii od pola elektrycznego aż do uzyskania energii maksymalnej. Każda wiązka będzie się składać z 3000 paczek o kształcie kilkucentymetrowych igieł, rozłożonych równomiernie na całym 27-kilometrowym obwodzie akceleratora. Każda paczka będzie zawierać sto bilionów cząstek. Cząstki są tak małe, że szansa na ich zderzenie jest minimalna. Na dwieście bilionów cząstek wydarzy się zaledwie 20 zderzeń! Ale paczki będą się spotykać blisko 40 milionów razy na sekundę. W rezultacie LHC będzie generować 800 milionów zderzeń na sekundę. Z przewidywań uzyskanych z symulacji komputerowych zderzeń, jedna cząstka Higgsa powinna powstawać co 2,5 s.

Pierścień akceleratora ma osiem sektorów zawierających 8000 różnego rodzaju elektromagnesów, w tym 1232 dipole łukowe, które utrzymują wiązki na odpowiednich torach. Muszą one wytwarzać silniejsze niż kiedykolwiek stosowane pola magnetyczne. Uzyskanie takich pól było możliwe dzięki zastosowaniu uzwojeń nadprzewodzących. Ale technologia magnesów o uzwojeniach nadprzewodzących jest niebanalna, szczególnie przy koniecznych wymiarach magnesów LHC (kilkanaście metrów!). Oprócz perfekcyjnego projektu ważne jest bardzo staranne wykonanie. Tylko dwie firmy na świecie były w stanie wyprodukować magnesy dla LHC. A i to nie jest końcem gry. Niedoskonałości wykonania, niewielkie defekty mechaniczne (luzy, przesunięcia) powodują, że magnes nie może 'od razu' osiągnąć swego nominalnego pola. Wspomniane 'defekty' powodują, że magnes przy niższym od nominalnego prądzie 'wypada' z nadprzewodnictwa. Jest to zjawisko – nazywane z języka angielskiego 'quench' – właściwie nieuniknione, a przy tym może być niebezpieczne dla magnesu i jego integralności. Lokalna – skończona 'oporność' powoduje wydzielanie się ciepła. Nieopanowanie tego procesu w bardzo krótkim czasie może doprowadzić do zniszczenia uzwojeń (a tym samym całej konstrukcji). Odpowiednie oprzyrządowanie systemu zasilania magnesu pozwala na 'quench' całkowicie bezpieczny, a przy tym korzystny, ponieważ dzięki niemu usuwana jest jego przyczyna – magnes (jego uzwojenie 'układa' się lepiej!) po paru quench'ach osiąga zwykle nominalne parametry. Proces taki nazywamy 'trenowaniem' magnesu.

Kwadrupolowe elektromagnesy ogniskujące wiązkę do średnicy 16 μm (najpierw ją ściskają w poziomie, potem w pionie i jeszcze raz w poziomie) są umieszczone po trzy z obu stron czterech punktów przecięcia wiązek. Jeszcze nigdy na świecie nie zbudowano tak potężnych instalacji nadprzewodzących.

Warto wspomnieć, że inżynierowie i technicy z IFJ PAN przepracowali około 1000 miesięcy w tunelu LHC. Zgodnie z umową pomiędzy IFJ PAN i CERN, utworzono krakowski zespół o nazwie ELQA, który zajmował się zabezpieczeniem jakości obwodów elektrycznych na łuku i we wszystkich sektorach akceleratora LHC, wykonaniami sprawdzeniem pomocniczych, wieloprzewodowych kabli, służących do zasilania magnesów korekcyjnych, ogniskujących i rozogniskujących (ogółem potrzebowano 23 km kabla 42 żyłowego i 80 km kabla 48 żyłowego). Ponadto, pomagał załodze CERN przy sprzętowym uruchomieniu podzespołów akceleratora LHC oraz przy projektowaniu i konstrukcji sprzętu i oprogramowania potrzebnych do działalności zespołu. Drugi zespół z IFJ PAN (Inspection Team)

ARTYKUŁY

wykonywał kontrolę połączeń rur próżniowych, połączeń rur dla ciekłego helu i azotu, a także wszystkich pozostałych połączeń między segmentami magnesu LHC (segment to około 150 m). W pracach w tunelu uczestniczyli także inżynierowie z AGH i Politechniki Wrocławskiej, przyczyniając się do ogólnego sukcesu.

Cztery detektory: ATLAS, CMS, LHCb oraz ALICE, pracujące przy LHC będą rejestrować ślady cząstek powstających w badanych zderzeniach. Są to ogromne urządzenia. Detektor ATLAS (*A Toroidal LHC Apparatus*) ma wysokość 25 m czyli równą pięciu pięter i długość 46 m. Jest największym na świecie detektorem, jaki kiedykolwiek zaprojektowano. Może mierzyć ślady cząstek z dokładnością 0,01 mm. Najbardziej wewnętrzne elementy w ATLAS-ie mają tyle skomplikowanych struktur półprzewodnikowych, ile jest gwiazd w całej Drożce Mlecznej. Różne warstwy detektora będą rejestrować ładunki i mierzyć energie cząstek naładowanych i neutralnych.

Pracownicy IFJ PAN oraz Wydziału Fizyki i Informatyki Stosowanej AGH budowali detektor wewnętrzny ATLAS-a, opracowali dla niego detektory krzemowe i słomkowe, tworzyli elektronikę do ich zasilania, odczytu i sterowania, instalowali, uruchamiali i testowali poszczególne elementy aparatury.

Detektor CMS (*Compact Muon Solenoid* – Kompaktowy Solenoid Mionowy) jest dwa razy mniejszy od ATLAS-a, ale za to dwa razy cięższy. W jego zewnętrznych warstwach będą rejestrowane miony, które łatwo przenikają przez materię.

Przy budowie CMS pracowali fizycy i inżynierowie z Instytutu Fizyki Doświadczalnej UW. Zaprojektowali szybką elektronikę zapewniającą podejmowanie decyzji co 25 ns. Zbudowali około 3000 jej elementów oraz zapewnili poprawne działanie całego systemu preselekcji mionów.

Detektory ATLAS i CMS są detektorami ogólnego przeznaczenia, głównie do poszukiwania bozonów Higgsa oraz innych ciężkich cząstek, których istnienie sugerują różne teorie wykraczające poza Model Standardowy.

Detektory ALICE (*A Large Ion Collider Experiment*) i LHCb (*Large Hadron Collider beauty*) są bardziej wyspecjalizowane. LHCb jest nastawiony na poszukiwanie kwarków i antykwarków pięknych, by wyjaśnić dlaczego we Wszechświecie brakuje antymaterii. Detektory LHCb nie są ustawione na kształt kolistej rozety, jak w przypadku ATLAS-a czy CMS, ale znajdują się tylko po jednej stronie punktu zderzenia.

W budowie detektora LHCb uczestniczyli polscy fizycy i inżynierowie z IFJ PAN, IPJ oraz AGH, którzy znacznie przyczynili się do opracowania prototypu detektora słomkowego i jego finalnej wersji, opracowali elektronikę do synchronizacji detek-



Fot. 2. Elektromagnes w hali, gdzie poddawany jest bardzo dokładnym badaniom jakościowym

tora z akceleratorem. Wszystkie panele do konstrukcji modułów detektora o powierzchni 1000 m² w ultralekkiej technologii powstały w IFJ. Zespół warszawski wykonał system precyzyjnego monitorowania położenia elementów detektora.

Detektor ALICE ma powtórzyć w laboratorium warunki panujące podczas Wielkiego Wybuchu. Będzie rejestrował produkty zderzeń rozpędzonych jąder ołowiu. Oczekuje się, że podczas tych zderzeń powstaną miniaturowe Wielkie Wybuchy, w których utworzy się „ognista kula” plazmy kwarkowo-gluonowej. W wyniku może powstać nawet 20 tysięcy cząstek, dlatego detektor ALICE został wyposażony w mniejsze detektory o bardzo dobrej zdolności rozdzielczej. Zderzenia proton-proton będą w tym eksperymencie traktowane jako dane porównawcze do zderzeń jonów ołowiu.

W projektowaniu, budowie i testowaniu Czasowej Komory Projekcyjnej (TPC), cylindrycznego detektora o średnicy i długości 5 m uczestniczyło kilku Polaków z IFJ PAN. Detektor ten posłuży do określenia torów pojedynczych cząstek. Fizycy z IPJ budowali detektor PHOS, złożony z 18 tysięcy kryształów wolframanu ołowiu, który będzie rejestrować pojedyncze fotony o dużej energii, emitowane z plazmy kwarkowo-gluonowej. Fizycy i studenci z Politechniki Warszawskiej współtworzyli elektronikę do detektora T0, służącego do preselekcji interesujących zderzeń, na podstawie których opracowuje się sposób poszukiwania plazmy.

Razem wielkie detektory ATLAS, CMS, LHCb oraz ALICE, otaczające miejsca zderzeń rozpędzonych do ogromnych energii przeciwbieżnych wiązek protonów (lub jonów ołowiu), będą produkować 10-15 petabajtów (10-15 milionów gigabajtów) danych rocznie. Dane te będą szczegółowo analizowane i porównywane z symulacjami komputerowymi obliczeń teoretycznych. W miarę upływu czasu ich liczba jeszcze będzie rosła.

W eksperymentach na LHC uczestniczy 5000 naukowców z około 500 instytutów badawczych



Fot. 3. Fragment detektora ATLAS sfotografowany na początku kwietnia tego roku – tuż przed zamknięciem tunelu dla zwiedzających

i uniwersytetów na całym świecie. Wszyscy oni muszą mieć zapewniony pełny dostęp do danych przez cały czas pracy LHC, który przewiduje się na 15-20 lat. Aktualizacja, analiza i przechowywanie danych wymagają olbrzymich pamięci i mocy obliczeniowej rzędu 100 000 CPU-s (Central Processing Units). Zcentralizowanie tych urządzeń w jednym miejscu, w pobliżu eksperymentu w CERN, pozornie naturalne, w rzeczywistości jednak byłoby organizacyjnie bardzo trudne.

Zastosowano inny optymalny sposób: globalny Grid, czyli model rozproszonych mocy obliczeniowych. Powstał sprawny światowy system obliczeniowy – World LHC Computing Grid (WLCG) – pozwalający przesyłać dane czy programy do rozmieszczonych na całym globie elementów komputerowych, na których będą wykonywane obliczenia i analizowane wyniki. Koszty utrzymania i aktualizacji koniecznych mocy obliczeniowych dla takiego komputerowego wyzwania były znacznie łatwiejsze do poniesienia w rozproszonym środowisku. Poszczególne instytuty i narodowe organizacje uczestniczące w projekcie mogły znaleźć lokalne zasoby komputerowe i przejąć za nie odpowiedzialność, przyczyniając się w ten sposób do osiągnięcia globalnego celu. Ponadto, system rozproszony nie ma słabych punktów. Wielokrotne kopie danych i automatyczne wyznaczanie komputerowych zadań dla dostępnych zasobów zapewnia szerokie zrównoważenie tych zasobów i ułatwia dostęp do danych dla wszystkich uczestników projektu, niezależnie od szerokości i długości geograficznej.

Dane z eksperymentów na LHC będą rozprowadzane po całym świecie zgodnie z czterowęzłowym modelem. Pierwotny zapis danych na taśmach będzie dokonywany w CERN, który będzie stanowić węzeł zerowy LHC Computing Grid (LCG) – Tier-0. Dane te będą kopiowane do serii węzłów Tier-1 – wielkich centrów komputero-

wych, o dużych zasobach pamięciowych – gdzie będą wstępnie opracowywane i kompresowane w mniejsze obiekty. Centra Tier-1 udostępnią dane węzłom Tier-2, z których każdy składa się z wielu współpracujących urządzeń liczących, posiadających wystarczającą moc obliczeniową dla analizy przypadków fizycznych oraz dużych pamięci dla przechowywania rezultatów. System gridowy Tier-0, Tier-1 i Tier-2 będzie w dyspozycji eksperymentów poprzez odpowiednie „organizacje wirtualne”. Indywidualni fizycy będą mieli dostęp do danych przez liczące centra Tier-3, które mogą się składać z lokalnych klastrów na wydziałach uniwersyteckich lub nawet z indywidualnych PC-tów, i które mogą być włączone do regularnej bazy LCG.

W projekcie CrossGrid uczestniczyło pięć ośrodków polskich: z Krakowa Akademickie Centrum Komputerowe Cyfronet AGH – jako koordynator – i IFJ PAN; z Warszawy IPJ oraz Interdyscyplinarne Centrum Modelowania Matematycznego i Komputerowego (ICM) UW; a z Poznania Poznańskie Centrum Superkomputerowo-Sieciowe (PCSS). Powstała infrastruktura gridowa na potrzeby polskich fizyków cząstek i pilotażowy projekt (LCG). Przeprowadzone testy pokazały, że już jesteśmy w stanie sprostać wymaganiom partnerów współpracy światowej sieci WLCG.

Projekt LHC pod każdym względem zapiera dech w piersiach. Ma szansę rozwiązać fundamentalne problemy fizyki (i astrofizyki) z nieznanego terytorium. Nikt nie potrafi przewidzieć, jak bardzo rewolucyjne zmiany nas czekają. Respekt budzi właściwie wszystko:

- liczba osób uczestniczących w projekcie – 10000 fizyków, inżynierów i techników z kilkudziesięciu krajów
- energia zderzeń – ponad 7 razy, a świetlności wiązki ponad 40 razy większa niż w Tevatronie w Narodowym Laboratorium Fermiego koło Chicago. Przy pełnej świetlności i maksymalnej energii wszystkie krążące w akceleratorze cząstki będą miały energię 900 samochodów pędzących z prędkością 100 km/h!
- największa na świecie instalacja nadprzewodząca
- największa sieć gridowa, itd.

Ludzie CERN-u są przekonani, że to wszystko musi się udać. I uda się na pewno, ale na razie odliczamy dni do godziny zero, kiedy kolos ruszy i zacznie przyspieszać pierwsze paczki protonów.

*dr Małgorzata Nowina Konopka
Instytut Fizyki Jądrowej
Polskiej Akademii Nauk,
Kraków*

ARTYKUŁY