



Strangeness in Quark Matter 2011

WOJCIECH FLORKOWSKI

W dniach 18–24 września 2011 odbyła się w Krakowie, w Polskiej Akademii Umiejętności, międzynarodowa konferencja *Strangeness in Quark Matter* (SQM 2011). Tematyka tej konferencji – zorganizowanej przez fizyków wysokich energii – dotyczyła przede wszystkim procesów zachodzących w trakcie zderzeń jąder atomowych przy najwyższych możliwych obecnie energiach, uzyskiwanych w **Wielkim Zderzaczu Hadronów** (ang. *Large Hadron Collider*, LHC) w ośrodku CERN pod Genewą.

W terminologii fachowej mówi się w tym kontekście o fizyce **relatywistycznych ciężkich jonów**. Ciężkie jony w tym przypadku to jednak nic innego, tylko całkowicie zjonizowane atomy niemal najcięższych pierwiastków, takich jak ołów lub złoto (czyli ich jądra atomowe). Natomiast **relatywistyczność** oznacza, że jony poruszają się z prędkościami zbliżonymi do prędkości światła, a ich energia kinetyczna jest o wiele większa od energii związanej z ich masą spoczynkową, danej przez słynny wzór Einsteina: $E = mc^2$.

Aby przybliżyć znaczenie nazwy tej konferencji, trzeba odwołać się do hierarchicznego opisu materii, stworzonego przez fizyków w ostatnim stuleciu: cząsteczki chemiczne składają się z atomów; atomy z jąder atomowych i krążących wokół nich elektronów; jądra z protonów i neutronów, a te z **kwarków** i **gluonów**. Podstawowym budulcem protonów i neutronów są kwarki oznaczane literami *u* i *d* (od ang. *up* i *down*). Ale w trakcie zderzenia produkowane są jeszcze inne kwarki, w szczególności kwarki *s* (od ang. *strange*, czyli **dziwne**). Pojawiają się one parami: wyprodukowanemu kwarkowi *s* towarzyszy zawsze jego antykwark. *Strangeness in Quark Matter* to **dziwność w materii kwarkowej**, czyli kwarki dziwne w otoczeniu innych kwarków – wszystko to wyprodukowane w trakcie niesłychanie burzliwego zderzenia dwóch jąder atomowych.

Dlaczego owa **dziwność** jest tak ważna? Otóż chcemy dowiedzieć się, jakie właściwości fizyczne ma układ tak wyprodukowanych kwarków. Wiemy, że są tam jeszcze gluony. Oddziaływanie pomiędzy kwarkami polega na wymianie gluonów, podobnie jak oddziaływanie pomiędzy elektronami polega na wymianie fotonów. Różnica pomiędzy oddziaływaniem kwarków i elektronów przejawia się m.in. w tym, że oddziaływanie za pomocą gluonów jest (zwykle) o wiele, wiele silniejsze. I tu dochodzimy do sedna sprawy: wyprodukowana w trakcie zde-

rzeń jądrowych materia to układ niezwykle silnie oddziałujących kwarków i gluonów. Ponieważ kwarki dziwne są produkowane dopiero w tym układzie, to ich badanie przynosi informacje o właściwościach ośrodka, w którym powstają.

Szkopuł w tym, że samych kwarków nie jesteśmy w stanie obserwować. Eksperymentalnie badamy cząstki zbudowane z kwarków, tzw. **hadrony**. Niemniej jednak, badając te ostatnie, możemy wysuwać wnioski o wcześniej powstałej materii kwarkowej, która dezintegruje się na setki albo tysiące hadronów. Ponieważ tam, gdzie są kwarki, są też i gluony, należy więc raczej mówić o materii kwarkowo-gluonowej. Fizycy ukuli termin **plazma kwarkowo-gluonowa** (ang. *quark-gluon plasma*, QGP), nawiązując w tej nazwie do plazmy elektronowo-jonowej powstałej w trakcie jonizacji gazów.

Co zatem wiemy o plazmie kwarkowo-gluonowej? Badania różnych charakterystyk wyemitowanych z tej plazmy hadronów, w szczególności cząstek zawierających kwark dziwny, wskazują na to, że układ ten jest bardzo dobrze stermalizowany i podlega prawom hydrodynamiki. Jego opis jest bardzo podobny do opisu pogody (ruchu mas powietrza) lub prądu wody w rzece – co jakiś czas podajemy wartość temperatury w różnych miejscach oraz kierunek i wartość wektora prędkości przepływu.

Badania przeprowadzone w latach 2000–2010 na zderzaczu RHIC (ang. *Relativistic Heavy Ion Collider* – akceleratorze działającym w Brookhaven National Laboratory na Long Island, NY, USA), który był w omawianej dziedzinie poprzednikiem Wielkiego Zderzacza Hadronów LHC w CERN-ie, wykazały, iż plazma kwarkowo-gluonowa zachowuje się jak płyn o niezwykle niskim stosunku współczynnika lepkości do gęstości entropii. Z tego względu plazma ta stanowi w przyrodzie układ o właściwościach zbliżonych możliwie najbardziej do właściwości tzw. **plynu doskonałego**.

W tym miejscu należy dodać, że początkowe wyobrażenia o plazmie kwarkowo-gluonowej były przeciwne do obecnie wysuwanych konkluzji. Sądono, że zachowuje się ona jak **gaz doskonały** kwarków i gluonów. Podstawą takich przewidywań, które na wiele lat ukierunkowały badania zderzeń jąder atomowych, jest zjawisko **asymptotycznej swobody** (ang. *asymptotic freedom*). Polega ono na tym, że oddziaływanie kwarków na małych odległościach (lub przy bardzo dużych przekazach

(ciąg dalszy – str. 2)

Strangeness in Quark Matter 2011

(ciąg dalszy ze str. 1)

peđu w zderzeniach) jest znikome. Odwrotną stroną medalu jest w tym przypadku zjawisko **uwięzienia kwarków** (ang. *quark confinement*). Na dużych odległościach oddziaływanie pomiędzy kwarkami rośnie, co skutkuje tym, że nie można ich oddzielić od siebie – energia, którą próbuje się wykorzystać do oddzielenia pojedynczego kwarku, zostaje w efekcie zużyta na produkcję nowych kwarków, które w stanach końcowych pojawiają się w grupach – jako hadrony. Rachunki teoretyczne pokazują jednak, że w bardzo gorącym i gęstym układzie kwarków i gluonów długozasięgowe siły, odpowiedzialne za uwięzienie kwarków, są niwelowane (fizycy mówią o ich **ekranowaniu**). To przemawia za koncepcją plazmy kwarkowo-gluonowej jako nowego stanu materii, gdzie kwarki są prawie swobodne – mówimy tu o **uwolnieniu kwarków** (ang. *quark deconfinement*) i dlatego rozważa się przejście fazowe od gazu hadronów do plazmy (ang. *deconfinement phase transition*). Oczywiście kwarki mogą swobodnie podróżować jedynie w obszarze zajmowanym przez plazmę kwarkowo-gluonową.

W latach 1980–2000 panował pogląd, że w trakcie wysokoenergetycznego zderzenia jąder atomowych wyprodukowana materia jest na tyle gorąca i gęsta, że oddziaływania pomiędzy wytworzonymi kwarkami są bardzo słabe i stąd układ ten zachowuje się w przybliżeniu jak gaz doskonały. Doświadczalne poszukiwania takiego asymptotycznego stanu materii, rozpoczęte w połowie lat osiemdziesiątych XX wieku, zakończyły się jednak bez definitywnych konkluzji. Wydaje się nam teraz, że obraz bardzo gorącej i gęstej materii, oparty na zjawisku asymptotycznej swobody, jest zbyt uproszczony (lecz być może energie dostępne w akceleratorach są ciągle zbyt niskie). Wspomniane wyżej eksperymenty na akceleratorze RHIC, których wyniki świetnie opisuje relatywistyczna hydrodynamika płynu doskonałego, wskazują na obecność silnych oddziaływań pomiędzy składnikami plazmy kwarkowo-gluonowej (to ostatnie pojęcie zaczęło zatem funkcjonować w oderwaniu od jego pierwotnego znaczenia związanego z gazem słabo oddziałujących kwarków i gluonów).

Co wnoszą nowe dane przedstawione na konferencji *Strangeness in Quark Matter 2011* w PAU? Na razie trudno na to pytanie odpowiedzieć, bo teoretycy muszą się teraz zająć ich interpretacją. Wydaje się, że obraz fizyczny uzyskany na akceleratorze RHIC utrzyma się w zasadniczych zrębach, ale większa precyzja danych z LHC stanowi wyzwanie dla konstruowanych przez fizyków dokładnych modeli i teorii. Dzięki tym danym dowiadujemy się w szczególności, jakie właściwości miała materia we wczesnym Wszechświecie, gdy jego wiek wynosił około 10 mikrosekund (10^{-5} s)!

Warto tu podkreślić różnicę w badaniach w CERN-ie zderzeń proton–proton i zderzeń jądro–jądro. Zderzenia proton–proton ukierunkowane są na odkrycia nowych cząstek (bozon Higgsa i cząstki supersymetryczne) i weryfikację nowych teorii o charakterze fundamentalnym. Zderzenia jąder atomowych odbywają się przy nieco niższych energiach i ich celem jest badanie własności układów makroskopowych złożonych z kwarków i gluonów, takich jak np. równanie stanu lub współczynniki kinetyczne (trzeba tu jednak pamiętać, że objętości tych makroskopowych obiektów wynoszą typowo 10 fm^3 [femtometrów sześciennych], a jeden femtometr to 10^{-15} metra).

W swej istocie fizyka relatywistycznych ciężkich jonów łączy tradycyjną fizykę jądrową z fizyką cząstek elementarnych. Stosuje się w niej metody teoretyczne z praktycznie wszystkich działów fizyki, co czyni z niej dział fizyki o interdyscyplinarnym charakterze. Wspomniane wyżej związki fizyki relatywistycznych ciężkich jonów z kosmologią, a także z astrofizyką, nadają jej dużą atrakcyjność. Najważniejsze jest jednak to, że to dział fizyki silnie motywowany przez eksperyment, gdzie praca fizyka polega na zrozumieniu istoty nowo badanych procesów fizycznych.

Wracając do SQM 2011, chyba najwspanialsze jest to, że w Krakowie mogliśmy oglądać po raz pierwszy tak wiele nowych danych z obecnie najpotężniejszego na świecie akceleratora. Pragnienie pochwalenia się uzyskanymi nowymi rezultatami spowodowało, że krakowskie wydanie SQM (trzynaste z kolei) zanotowało rekordową liczbę uczestników: blisko 170 osób z 20 krajów. Oprócz sesji plenarnych, odbywających się w Dużej Auli PAU, zorganizowane zostały sesje równoległe w pokojach seminaryjnych Akademii.

Krakowska konferencja *Strangeness in Quark Matter* odbyła się w cztery miesiące po konferencji *Quark Matter 2011* (23–28 maja 2011 w Annecy, Francja). Konferencje z serii *Quark Matter* są najważniejszym wydarzeniem tego typu w fizyce ciężkich jonów. W Annecy, gdzie po raz pierwszy na dużą skalę omawiano wyniki z LHC, spotkało się prawie 800 osób. Można pokusić się o stwierdzenie, że konferencja SQM 2011 w Krakowie stanowiła bardzo istotne uzupełnienie *Quark Matter 2011*, jeżeli chodzi o prezentację danych z LHC. Pod koniec SQM 2011 niektórzy jej uczestnicy twierdzili nawet, że skrót SQM może oznaczać nie *Strangeness in Quark Matter*, lecz *Small Quark Matter*. Patrząc na program SQM 2011 i tytuły prezentacji, zauważamy jednak, że tematyka tej konferencji była tradycyjnie zorientowana na cząstki dziwne.

W trakcie konferencji SQM 2011 odbyła się sesja jubileuszowa z okazji 60. urodzin prof. Johanna Rafelskiego, pomysłodawcy badania cząstek dziwnych jako swoistego rodzaju przekaźników informacji o plazmie kwarkowo-gluonowej oraz założyciela serii konferencji SQM. Johann Rafelski, który urodził się w Krakowie, obecnie pracuje na University of Arizona w Tucson, AZ. Poświęcona Mu sesja naukowa dodatkowo przyczyniła się do tego, że na naszej konferencji licznie pojawili się światowej sławy specjaliści w dziedzinie fizyki ciężkich jonów.

Przyznanie przywileju zorganizowania tej ważnej konferencji międzynarodowej Krakowowi traktuję jako wyraz uznania dla wyników naukowych uzyskanych w Krakowie, a także we współpracujących z nami polskich ośrodkach naukowych.

Na koniec chciałbym serdecznie podziękować Panu prof. Andrzejowi Białasowi za przyjęcie konferencji SQM 2011 pod skrzydła Polskiej Akademii Umiejętności. Dostojność wnetrz Akademii i jej usytuowanie w sercu starego Krakowa nadały naszemu wydaniu SQM doprawdy niepowtarzalny charakter.

WOJCIECH FLORKOWSKI

Uniwersytet Jana Kochanowskiego w Kielcach
& Instytut Fizyki Jądrowej PAN w Krakowie

Strangeness in Quark Matter 2011



Andrzej Białas i Helmut Satz



Piotr Bożek



Wojciech Florkowski, Johann Rafelski, Emanuele Quercigh i Michał Praszalowicz



Berndt Mueller



Peter Braun-Munzinger i Wojciech Broniowski



Joseph Kapusta



Andrzej Białas i Johann Rafelski



Wojciech Florkowski