Na tropie egzotycznych hadronów*

Alex R. Dzierba[a], Curtis A. Meyer[b], Eric S. Swanson[c]

[a] *Department of Physics, Indiana University, Bloomington, Indiana, USA*
[b] *Department of Physics, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, Pennsylvania, USA*
[c] *Department of Physics and Astronomy, University of Pittsburgh, Pennsylvania, USA*

The search for QCD exotics

Abstract: Particles predicted by the theory of quantum chromodynamics help explain why the fundamental building blocks of matter are impossible to isolate.

Wstęp

Przez ostatnie ćwierćwiecze fizycy podejrzewali, że musi istnieć subatomowa cząstka niepodobna do żadnej innej – zbudowana wyłącznie z gluonów, które są „klejem" spajającym materię na najbardziej fundamentalnym poziomie. Działają one w obrębie jądra każdego atomu, wiążąc naładowane składniki, które w przeciwnym wypadku by się odepchnęły. Ale czy to możliwe, żeby ów klej odpowiedzialny za siły sam istniał również jako forma materii? Ostatnio poszukiwania nieuchwytnej cząstki zbudowanej wyłącznie z gluonów, zwanej kulą gluonową (ang. glueball), nabrały rozpędu, bo coraz więcej jest oznak jej istnienia. Badacze znaleźli również ślady innych podobnie egzotycznych cząstek. Po ponad stu latach od odkrycia pierwszej cząstki subatomowej – elektronu – fizycy stoją u progu poznania całkiem nowego rodzaju materii.

Rozwój badań struktury materii

Aby w pełni zrozumieć, dlaczego fizycy, tacy jak my, są zapalonymi poszukiwaczami kul gluonowych i innych podobnych cząstek egzotycznych, potrzebna będzie odrobina wysiłku. Chyba najlepiej zacząć od krótkiej dygresji przedstawiającej historię naszej dziedziny.

Od odkrycia elektronu w 1897 r. do odkrycia protonu minęło 14 lat, a do znalezienia neutronu – następnych 21 lat. W roku 1932 wydawało się, że elektron, proton i neutron wystarczą do wyjaśnienia całej fizyki cząstek elementarnych i pojawiło się komfortowe poczucie, że świat subatomowy został całkowicie poznany. Niestety, to samozadowolenie miało wkrótce ustąpić miejsca irytacji i zamieszaniu.

W gruncie rzeczy problemy zaczęły się jednak już w 1910 r., gdy Theodor Wulf, jezuita i fizyk, wszedł na wieżę Eiffla z elektrometrem na plecach. Urządzenie to, które ojciec Wulf sam zaprojektował i zbudował, wykrywało cząstki naładowane. Wiedząc, że takie cząstki są wysyłane przez radioaktywne minerały, badacz oczekiwał, że wskazania jego elektrometru się zmniejszą, gdy przyrząd znajdzie się wysoko nad ziemią. Po wspięciu się na wieżę zaobserwował jednak ze zdziwieniem wzrost wskazań. Wyjaśnienie: cząstki subatomowe spadają na Ziemię z kosmosu.

Chociaż źródło tych cząstek do dziś pozostaje do pewnego stopnia tajemnicą, w latach 20. i 30. ubiegłego wieku ich istnienie stało się dla fizyków oczywiste. A gdy skończyła się II wojna światowa, młodzi ludzie zaczęli się wspinać na szczyty Pirenejów i Alp, aby dokładniej zbadać owe „promienie kosmiczne". Używane wtedy detektory składały się z wielkich stosów płyt fotograficznych, które dosłownie fotografowały miniaturowe ślady pozostawione przez pędzące cząstki. Te wysiłki, wraz z analizą cząstek wytworzonych niedługo później w wielkich, rozbijających atomy akceleratorach, ujawniły ciągle wydłużającą się listę cząstek powstających tylko w ekstremalnych warunkach, m.in. kaonów, pionów i hiperonów Λ.

Dziś znamy ponad 200 takich cząstek. Fizycy początkowo podzielili je według mas na dwie klasy: mezony (od greckiego meso, „średni") ważące więcej niż elektron, ale mniej niż proton, oraz bariony (od greckiego bario, „ciężki") ważące tyle co proton lub więcej. Współczesny podział jest oparty nie na masie, ale na spinie cząstek: mezony mają spin całkowity, a bariony połówkowy, gdy wyrażamy go w jednostkach stałej Plancka podzielonej przez 2π. (Najbliższym ana-

* Artykuł, opublikowany w *American Scientist* **88**, 406 (2000) (*American Scientist Online*: www.americanscientist.org), został przetłumaczony za zgodą Autorów i Wydawcy. [Translated with permission. © 2000 Sigma Xi, The Scientific Research Society]

logiem spinu, wielkości czysto kwantowej, jest moment pędu wirującego bąka).

Mezony i bariony nazywamy łącznie „hadronami" (od grec. adron, „silny"), ponieważ wszystkie te cząstki podlegają oddziaływaniom silnym, które razem z oddziaływaniami elektromagnetycznymi, słabymi i grawitacyjnymi stanowią cztery fundamentalne siły przyrody. Pierwsze wskazówki istnienia oddziaływań silnych pojawiły się w latach 30., kiedy stało się oczywiste, że jądra atomów zawierają zwarte grupy protonów i neutronów. Trudno było to zrozumieć – wzajemne odpychanie elektrostatyczne dodatnio naładowanych protonów powinno spowodować, że składniki jądra atomu rozlecą się w różnych kierunkach. Fizycy rychło zrozumieli, że potrzebny jest inny rodzaj fundamentalnych oddziaływań, takich, które mogą działać tylko na małych odległościach, skoro nigdy nie zostały zaobserwowane poza jądrami.

Zatem już od dawna było jasne, że oddziaływania silne istnieją i że odczuwają je wszystkie hadrony. Ale w jaki sposób nowe hadrony wpisują się w dopiero co uporządkowany świat subatomowy (rys. 1)? Ta zagadka pozostawała nierozwiązana aż do roku 1961, kiedy Murray Gell-Mann (podówczas profesor California Institute of Technology) i Yuval Ne'eman (attaché wojskowy Izraela w Londynie, studiujący jednocześnie fizykę w Imperial College) niezależnie zaproponowali jej rozwiązanie. Obaj zdali sobie sprawę, że znany świat cząstek subatomowych może być pogrupowany według pewnej matematycznej symetrii, którą Gell-Mann nazwał drogą ośmiokrotną przez analogię do buddyjskich „ośmiu dróg do oświecenia".

Argumenty za trafnością tego pomysłu pojawiły się zaskakująco szybko. Już w kilka miesięcy po wymyśleniu nowej teorii Gell-Mann uczestniczył w konferencji w CERN-ie, europejskim laboratorium cząstek w Genewie, i był wśród słuchaczy, gdy grupa z Uniwersytetu Kalifornijskiego w Los Angeles ogłosiła o odkryciu dwóch nowych barionów, Ξ^{*-} oraz Ξ^{*0}. Gell-Mann zauważył, że ta para prawie dopełniła grupę dziesięciu spokrewnionych cząstek (rys. 2). Nie tylko od razu przewidział, że powinna istnieć jeszcze jedna cząstka tego typu, ale potrafił z grubsza odgadnąć jej własności. Owa śmiała hipoteza, którą Gell-Mann wysunął publicznie przed wszystkimi zgromadzonymi, stała się sygnałem rozpoczęcia wyścigu do odkrycia nowej cząstki, nazwanej Ω^-. Została ona zaobserwowana już w lutym 1964 r. przez grupę z Brookhaven National Laboratory w Nowym Jorku, a po kilku tygodniach z CERN-u nadeszło potwierdzenie tej obserwacji.

1930 — 1935 — 1940 — 1945 — 1950 — 1955 — 1960 — 1965

leptony

e^+ (0,511)	μ^+ (105,6)	ν_e (≈ 0)	ν_μ (≈ 0)
	μ^- (105,6)	$\bar{\nu}_e$ (≈ 0)	$\bar{\nu}_\mu$ (≈ 0)

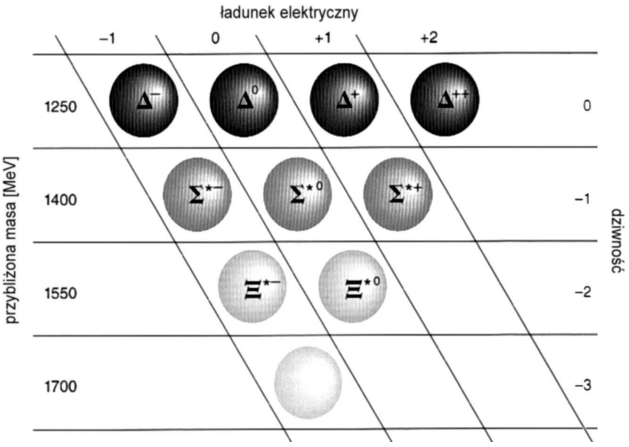
mezony

	π^0 (135)		η (547)
	π^+ (140)		ρ (770)
	π^- (140)		ω (782)
	K^+ (494)		K^* (892)
	K^- (494)		η' (958)
	K^0 (498)		f (980)
			ϕ (1019)
			a_2 (1318)

bariony

n (939,6)	Λ^0 (1115)	$\bar{p}$ (938,3)	Σ^{*0} (1385)
	Σ^+ (1189)	$\bar{n}$ (939,6)	Σ^{*-} (1385)
	Σ^- (1197)	$\bar{\Lambda}^0$ (1115)	Σ^{*+} (1385)
	Δ (1230)	Σ^0 (1192)	Ξ^{*0} (1530)
	Ξ^- (1321)	Ξ^0 (1315)	Ξ^{*-} (1530)
			Ω^- (1672)

Rys. 1. Wśród wielu subatomowych cząstek odkrytych w latach 1930–65 szczególnie zdumiała fizyków wielka różnorodność hadronów. Dopiero w 1961 r. teoretycy zauważyli pewien porządek w wydłużających się tablicach cząstek i – podobnie jak zbudowanie układu okresowego sto lat wcześniej – uporządkowanie to dostarczyło wielu informacji na temat ich wewnętrznej struktury (masy spoczynkowe podano w nawiasach w jednostkach energii – megaelektronowoltach – zgodnie ze słynnym wzorem Einsteina, stwierdzającym równoważność tych wielkości: $E = mc^2$).

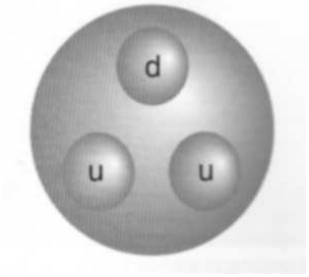


Rys. 2. Znano już siedem cząstek mających ten sam spin (3/2) – dwa górne rzędy – kiedy w 1962 r. zostały odkryte hiperony Ξ^{*-} oraz Ξ^{*0} (trzeci rząd). Teoretyk Murray Gell-Mann natychmiast zauważył, że takie uporządkowanie hadronów wymaga istnienia dziesiątego członka tej rodziny. Przewidział własności brakującej cząstki (u dołu), opierając się na diagramie podobnym do powyższego, a po 2 latach właśnie taka cząstka, nazwana Ω^-, została rzeczywiście znaleziona.

W tym samym roku Gell-Mann i George Zweig (który wtedy pracował w CERN-ie) niezależnie wysunęli przypuszczenie, że symetria znanych wówczas hadronów bierze się stąd, że są one zbudowane z trzech fundamentalnych składników. Gell-Mann ochrzcił je „kwarkami" – żartobliwym słowem użytym przez Jamesa Joyce'a w *Finnegan's Wake* („Three quarks for Muster Mark!").

Przypuszczenie to było ryzykowne, ponieważ hipotetyczne kwarki miały inne własności niż wszystkie znane wcześniej cząstki. Uznano, że kwarki istnieją w trzech odmianach, nazwanych „zapachami": górnym (u), dolnym (d) i dziwnym (s). Tak jak inne cząstki, kwarki miały masę i spin, ale w przeciwieństwie do wszystkich innych miały ułamkowy ładunek elektryczny – kwark górny $+2/3$, kwarki dolny i dziwny $-1/3$ (w jednostkach ładunku elementarnego e). Istotą pomysłu Zweiga i Gell-Manna było to, że hadrony są stanami związanymi trzech kwarków, podobnie jak atom wodoru można uważać za stan związany protonu i elektronu. Na przykład, proton miał się składać z dwóch kwarków u oraz jednego d (rys. 3), co dałoby całkowity ładunek elektryczny $2/3 + 2/3 - 1/3 = 1$. Podobnie, neutron składałby się z dwóch kwarków d oraz jednego u, co dałoby ładunek $-1/3 - 1/3 + 2/3 = 0$. Ułamkowy ładunek był szalonym pomysłem, ale chyba najbardziej niepokojącym aspektem tej teorii było to, że nigdy nie zaobserwowano samych kwarków – fakt, którego ani Gell-Mann, ani Zweig nie wyjaśnili.

Mimo to model kwarkowy uzyskiwał coraz szerszą akceptację. Potężny impuls przyszedł cztery lata później, gdy badacze w Stanford Linear Accelerator Center (SLAC) wykazali w sposób niebudzący wątpliwości, że protony mają strukturę wewnętrzną. Wyniki te pochodzą z eksperymentu będącego właściwie współczesną wersją doświadczenia Ernesta Rutherforda i Ernesta Marsdena z 1909 r. Bombardowali oni cząstkami α cienką warstwę miki i zaobserwowali, że choć zdecydowana większość cząstek przelatujących przez tarczę tylko nieznacznie zmieniała kierunek, to jednak niekiedy cząstki α odbijały się pod dużym kątem. Zaskoczony Rutherford skomentował to słowami: „To tak, jakby 15-calowy pocisk, wystrzelony w stronę arkusika bibułki, odbił się od niego i uderzył w strzelającego". Wkrótce zrozumiał, że tak dziwne zachowanie oznacza, że atomy mają małe, ale ciężkie rdzenie – w ten sposób odkrył jądra atomowe.



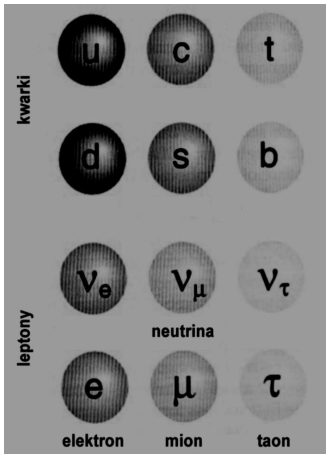
Rys. 3. Model kwarkowy, zaproponowany w roku 1964, przedstawiał proton złożony z dwóch kwarków „górnych" (u), każdy o ładunku $(+2/3)e$, i jednego „dolnego" (d) o ładunku $(-1/3)e$, co daje prawidłowy ładunek protonu $+e$. Na początku myślano o kwarkach tylko jako o użytecznym modelu matematycznym, przydatnym do księgowania cząstek, ale niewnoszącym fizycznej treści.

W stanfordzkim eksperymencie z 1968 r. fizycy rozpraszali elektrony na protonach i zaobserwowali, że mała, ale znacząca ich część zupełnie zmieniała kierunek ruchu. Dowodziło to, że protony – a przez analogię także inne hadrony – mają wewnętrzną strukturę. Dalsze badania wykazały, że składniki protonu mają ułamkowe ładunki.

Te odkrycia stanowią ważną granicę. Wcześniej wielu fizyków (w tym Gell-Mann) uważało, że kwarki są tylko modelem matematycznym, pozwalającym uporządkować świat hadronów. Od tego momentu wszystko zaczęło jednak wskazywać, że kwarki być może rzeczywiście istnieją. W końcu, w roku 1974, wiadomość o odkryciu nowej cząstki przekonała nawet najbardziej opornych. Ta nowa cząstka, mezon, była zbudowana z czwartego zapachu kwarkowego, nazwanego powabnym (c). Potem dodano do menu jeszcze dwa inne zapachy: piękno (b) w 1976 r. i prawdę (t) w roku 1995. Każdy z tych sześciu kwarków ma odpowiadającego mu „antykwarka", co zwiększa liczbę rodzajów tych cząstek do dwunastu (rys. 4).

Chociaż hipoteza kwarków odniosła błyskotliwy sukces, pozostało kilka niepokojących wątpliwości.

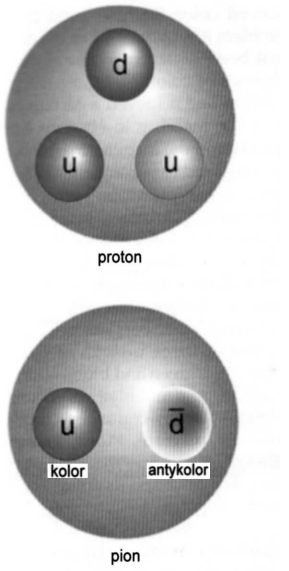
Po pierwsze, nigdy nie zaobserwowano odosobnionego kwarka. Bardziej dokuczliwym problemem było to, że wyznaczone własności barionu nazwanego Δ^{++} wydawały się sprzeczne z jednym z ogólnych twierdzeń kwantowej teorii pola, które mówi, że kwantowe funkcje falowe opisujące hadrony muszą być antysymetryczne, jeżeli cząstki składowe są identyczne. Wiadomo było, że cząstka Δ^{++} składa się z trzech identycznych kwarków u, ale obserwowane własności wskazywały na symetryczną funkcję falową.



Rys. 4. Zbiór fundamentalnych klocków, z których zbudowana jest materia, ostatecznie został rozszerzony do 6 rodzajów kwarków (i niepokazanych powyżej odpowiadających im 6 antykwarków) oraz 6 lżejszych cząstek (i 6 ich antycząstek) nazwanych leptonami. Te ostatnie nie oddziałują silnie.

Teoretycy chwytali się najdziwniejszych sposobów rozwiązania tej łamigłówki. Oskar Greenberg z Uniwersytetu Marylandzkiego przedstawił jedno z bardziej pomysłowych rozwiązań: zaproponował, żeby przypisać kwarkom nowy rodzaj ładunku, który pozwala na utworzenie antysymetrycznej funkcji falowej. Matematyczna sztuczka Greenberga w gruncie rzeczy obchodziła problem przez stwierdzenie, że pełna funkcja falowa barionu Δ^{++} jest jednak antysymetryczna, tylko dotychczas nie brano pod uwagę pewnej jej części. Gell-Mann nazwał nową cechę cząstek k o l o r e m, choć nie ma ona nic wspólnego z normalnym znaczeniem tego słowa. Przewidywano, że taki „ładunek kolorowy" ma trzy odmiany, często nazywane czerwoną, zieloną i niebieską.

Ale w doświadczeniach nigdy nie zaobserwowano koloru. Wyglądało więc na to, że jeden problem (symetria cząstki Δ^{++}) został po prostu zastąpiony innym (brakiem obserwacji koloru). Niemniej pomysł Greenberga przyniósł pewną korzyść: niemożność zaobserwowania pojedynczych kwarków i niemożność zaobserwowania koloru zostały połączone w „hipotezę uwięzienia koloru", która głosi, że kolor istnieje jedynie ukryty wewnątrz hadronów i nigdy nie może się pojawić, żeby oddziaływać z jakimkolwiek detektorem. Przeciwnie – kolory muszą zawsze występować w grupach, tak by tworzyć obiekty niekolorowe. Protony, neutrony i inne bariony są kombinacjami trzech kwarków o różnych kolorach (czerwonym, zielonym i niebieskim), które tworzą niekolorową kombinację, podobnie jak kombinacja barw trzech luminoforów na ekranie telewizora może dawać plamkę bezbarwną (rys. 5). Piony, kaony i inne mezony są utworzone z kwarka o określonym kolorze i „antykolorowego" względem niego antykwarka.



Rys. 5. Kwarkom zaczęto przypisywać „ładunek kolorowy" na początku lat 70., mimo że kolor nigdy nie został zaobserwowany – kwarki zawsze zbierają się w grupy, tworząc obiekty niekolorowe, jak kwarki 3 różnych kolorów w protonie: dwa różnokolorowe kwarki u oraz jeden kwark d (u góry). W przypadku mezonów składających się z pary kwark–antykwark kolor i antykolor muszą tworzyć odpowiedną parę, np. kwarki u oraz $\bar{d}$ w pionie muszą mieć przeciwne kolory (u dołu).

Chromodynamika kwantowa

Uwięzienie koloru okazało się ważną ideą, ponieważ w ostatecznym rozrachunku pokazało, w jaki sposób kwarki łączą się w hadrony. Mechanizm ten jest podobny do kulombowskiego przyciągania protonu i elektronu, które opisujemy jako wymianę fotonów (cząstek, które nie mają masy ani ładunku, ale mają energię i spin). Z tego powodu fotony są nazywane nośnikami oddziaływań elektromagnetycznych. Co więcej, teoretycy od dziesiątków lat wiedzą, że samo istnienie elektronów i protonów (a dokładniej ich ładunków) wystarcza do stwierdzenia istnienia fotonów i określenia ich własności. Ta magiczna sztuka jest wynikiem matematycznej procedury zwanej c e c h o w a n i e m.

Teoria cechowania pochodzi z prac Hermanna Weyla z 1918 r. Starał się on połączyć grawitację i elektromagnetyzm w jedną teorię przez żądanie, aby wyniki fizyczne nie zależały od lokalnego skalowania (czyli cechowania) czasoprzestrzeni. Choć jego teoria okazała się błędna, idea warunku lokalnej niezmienniczości

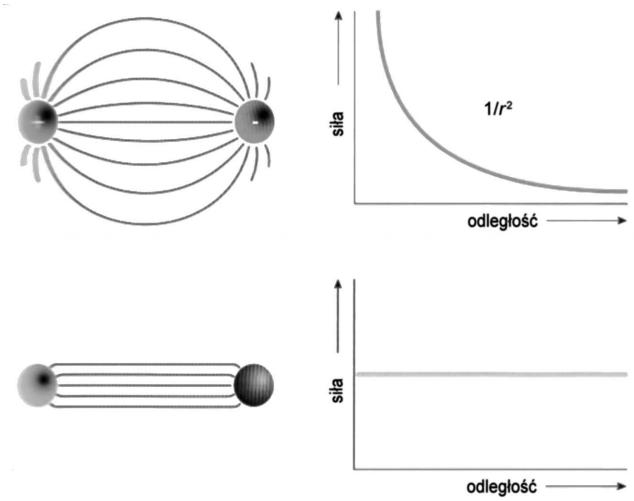
przetrwała. Pierwszy sukces cechowanie odniosło w latach 40., kiedy zostało zastosowane do kwantowej teorii elektromagnetyzmu, zwanej elektrodynamiką kwantową (QED). Idea ta została rozszerzona w latach 60. na zunifikowane oddziaływania elektromagnetyczne i słabe i stanowi podstawę współczesnego rozumienia zarówno oddziaływań elektrosłabych, jak i silnych oraz cząstek im podlegających – podstawę pełnej teorii budowy materii, zwanej Modelem Standardowym.

Cząstki przenoszące oddziaływania, analogiczne do fotonów, musiały zapewne istnieć również dla kwarków – w końcu coś musiało przenosić oddziaływania silne. Ale co to miałyby być za cząstki? Gell-Mann i Harold Fritzsch z Uniwersytetu Monachijskiego pierwsi znaleźli odpowiedź na to pytanie w 1972 r. po przeprowadzeniu procedury cechowania dla oddziaływań silnych. Nazwali otrzymaną teorię chromodynamiką kwantową (QCD), podkreślając w ten sposób jej podobieństwo do elektrodynamiki kwantowej i wagę idei koloru. Ich praca wykazała, że musi istnieć 8 typów cząstek, teraz nazywanych gluonami, będących nośnikami oddziaływań wiążących kwarki. Gluony są podobne do fotonów pod tym względem, że nie mają masy, a mają spin. Różni je jednak kluczowa cecha: gluony mają ładunek kolorowy, podczas gdy fotony nie mają ładunku elektrycznego. Wskutek tego gluony – w przeciwieństwie do fotonów – mogą bezpośrednio oddziaływać ze sobą.

QCD można więc traktować jak przepis na ciasteczka. Kwarki i gluony stanowią składniki, kwantowa teoria pola podaje sposób przyrządzenia, a powstające smakołyki to hadrony. Co ciekawe, QCD wskazuje, że struktura próżni, w której znajdują się cząstki, również ma duże znaczenie. Jeżeli wyobrażamy sobie próżnię jako całkowitą pustkę, to ostatnie stwierdzenie musi budzić zdziwienie. Ale na poziomie kwantowym próżnia nie jest naprawdę pusta. W rzeczywistości jest piekielną zupą, godną szekspirowskich czarownic Hekate, zupą, w której wirtualne cząstki pojawiają się i znikają tak szybko, że zasady zachowania nie są pogwałcone. Cała ta wirtualna aktywność ma dramatyczny wpływ na siłę oddziaływania między kwarkami. Przypomnijmy, że oddziaływanie to powstaje na skutek wymiany gluonów i że muszą się one przedzierać przez próżnię. Wyobraźmy sobie, że gluonom najłatwiej jest podążać przetartym szlakiem. Skutkiem byłoby zlokalizowanie gluonów na wąskiej ścieżce między kwarkami.

Teoretycy zajmujący się na co dzień QCD wolą inną analogię, opartą na idei elektrycznych i magnetycznych linii pola, rozbiegających się i tworzących wzór znany wszystkim uczniom, którzy rozsypywali opiłki żelaza nad magnesem (rys. 6). W przypadku QCD struktura próżni powoduje przyciąganie się linii tzw. pola chromomagnetycznego w taki sposób, że tworzą one cienką wiązkę.

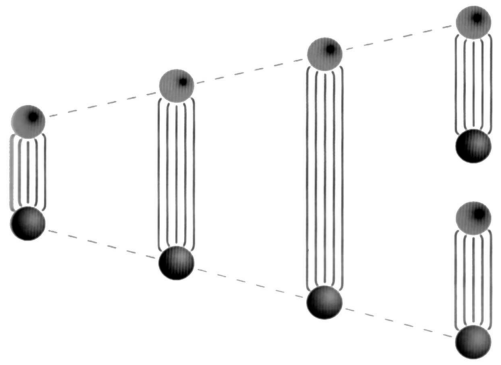
W przypadku pola elektrycznego rozbieganie się linii pola prowadzi do znanej siły kulombowskiej, której wartość jest odwrotnie proporcjonalna do kwadratu odległości między ładunkami. Dla kwarków łączenie się linii pola chromomagnetycznego w cienką wiązkę daje zupełnie inny efekt – siła zachowuje stałą, niezależną od odległości wartość (zwaną napięciem struny), tak jakby wiązka linii była sprężystą taśmą, ściągającą kwarki zawsze tą samą siłą, niezależnie od tego, jak bardzo jest rozciągnięta (rys. 6).



Rys. 6. Linie pola elektrycznego między dwiema przeciwnie naładowanymi cząstkami szeroko się rozbiegają, co prowadzi do własności charakterystycznej dla elektrostatycznej siły Coulomba i dla siły grawitacyjnej: ich wielkość maleje jak kwadrat odległości między cząstkami (u góry). Inaczej jest w przypadku linii pola chromomagnetycznego między dwoma kwarkami – linie te tworzą zwartą wiązkę, co prowadzi do stałej (niezależnej od odległości) siły (u dołu).

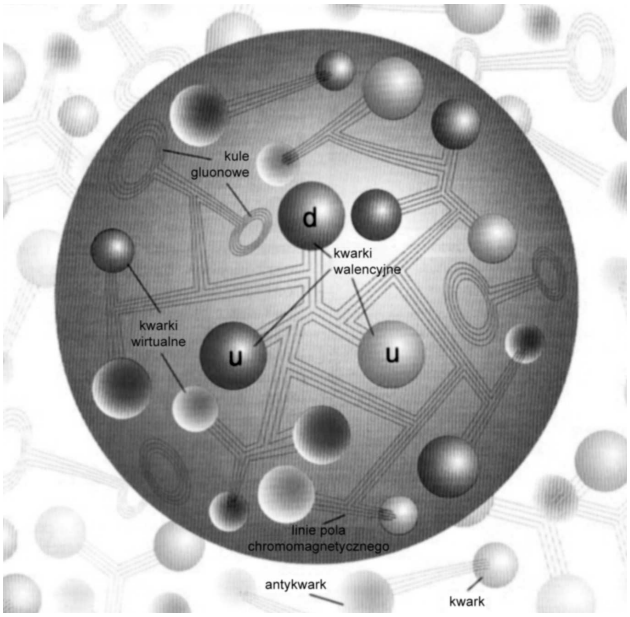
Napięcie struny między kwarkiem a antykwarkiem odpowiada bardzo dużej sile wiążącej, równoważnej ciężarowi ciała o masie 16 ton. Mimo to można by pomyśleć, że taką siłę da się pokonać i rozdzielić obie cząstki. Okazuje się jednak, że nawet nieznaczne ich odciągnięcie (na odległość rzędu promienia protonu) wpompowuje w układ energię wystarczającą do rozerwania wiązki linii pola między kwarkami i utworzenia dwóch nowych cząstek – kwarka i antykwarka, które są przyłączone do nowo utworzonych wolnych końców wiązek linii pola (rys. 7). W wyniku takiego procesu w miejsce jednej niekolorowej cząstki początkowej powstają dwie cząstki niekolorowe. W tym sensie kolor nigdy nie wydostaje się na wolność.

Zatem to szczególny charakter próżni w QCD powoduje uwięzienie koloru. Skomplikowana struktura próżni pozwala również wyjaśnić zaskakujące wartości mas hadronów. Fizycy są przekonani, że kwarki są o wiele za lekkie, aby ich masy mogły dać w sumie masy utworzonych z nich cząstek. Wydaje się więc, że prosty opis hadronów jako połączenia dwóch lub trzech kwarków jest zbyt naiwny. Jednakże kwantowa teoria pola dopuszcza fluktuacje liczby i rodzajów cząstek, z których składa się hadron. Takie fluk-



Rys. 7. Próby rozdzielenia dwóch kwarków tworzących typowy mezon nieuchronnie kończą się niepowodzeniem, ponieważ energia dostarczona w celu rozdzielenia tej pary zostaje zamieniona w nowy kwark i nowy antykwark; powstałe cząstki przyłączają się do swobodnych końców rozerwanej wiązki linii pola.

tuacje mają postać dodatkowych gluonów lub wirtualnych par kwark–antykwark, które, jak wierzą teoretycy, dają nadwyżkę (ok. 98%) masy potrzebną do zbudowania typowego hadronu (rys. 8).



Rys. 8. Jak dziś uważamy, proton zawiera dużo więcej składników niż tylko trzy kwarki walencyjne, składające się na jego ładunek elektryczny $+e$. Kwarki te wnoszą jedynie ok. 2% masy protonu. Reszta pochodzi z „morza" wirtualnych kwarków i kul gluonowych. Nawet na zewnątrz protonu wirtualne cząstki – kule gluonowe, mezony i pary barion–antybarion – pojawiają się i znikają, tworząc zatłoczoną próżnię opisywaną przez chromodynamikę kwantową.

Gluony zatem pomagają uzasadnić wartości mas hadronów. Ale czy są one zawsze we wnętrzu tych cząstek, czy mogą też uciec i podróżować przez przestrzeń, jak fotony, ich kuzyni-lekkoduchy? Fotony z całą pewnością mogą dolecieć daleko – wykorzystuje to każdy, kto czyta tę stronę – natomiast gluony mają kolor, a uwięzienie koloru oznacza, że nigdy nie może on zostać zaobserwowany.

Fritzsch i Peter Minkowski z Uniwersytetu Berneńskiego doszli w 1975 r. do wniosku, że kilka gluonów mogłoby się połączyć w neutralne kolorowo hadrony złożone tylko z materii gluonowej. Takie obiekty – k u l e g l u o n o w e – byłyby zupełnie nowym i nieoczekiwanym rodzajem materii. Elektromagnetycznym ich odpowiednikiem byłoby zbicie się fotonów w „atom" zbudowany z samego światła. Ted Barnes, doktorant w Caltechu, rozwinął ten pomysł w 1977 r., gdy zauważył, że gluony mogłyby również wiązać się z kwarkami i antykwarkami, tworząc mezony hybrydowe. Te hybrydy i kule gluonowe noszą wspólną nazwę c z ą s t e k e g z o t y c z n y c h (ang. QCD exotics).

Na tropie nowych cząstek

Czego potrzeba, żeby odkryć cząstkę egzotyczną? Przede wszystkim, teoretycy muszą mieć jakieś wyobrażenie o jej własnościach – masie, czasie życia, kanałach rozpadu (czyli sposobach, w jakie może ona zniknąć, wytwarzając na swoje miejsce lżejsze, długo żyjące cząstki). Poza tym badacze muszą znać wartości trzech ważnych liczb kwantowych, które opisują poszukiwaną cząstkę. Pierwsza z nich (J) oznacza całkowity spin, druga (P) odnosi się do parzystości, a trzecia (C) – do sprzężenia ładunkowego.

Liczba kwantowa J jest częściowo zdeterminowana przez ustawienie spinów kwarków, z których składa się szukana cząstka. W przypadku mezonów dwukwarkowych suma spinów obu składników może przyjąć tylko dwie wartości: 1, gdy spiny są równoległe, lub 0, gdy są antyrównoległe. Całkowity spin zależy jednak również od względnego momentu pędu obracających się wokół siebie składników, zatem J może przyjmować wartości całkowite większe od 1.

Parzystość i sprzężenie ładunkowe są subtelniejszymi cechami. Opisują one symetrię pary kwark–antykwark w przypadku lustrzanego odbicia przestrzennego (parzystość) lub zamiany miejscami cząstki i antycząstki (sprzężenie ładunkowe). Jeżeli kwantowa funkcja falowa nie zmienia się w czasie takiej operacji, to cząstkę nazywamy symetryczną i przypisujemy jej odpowiednią „liczbę kwantową" o znaku plus; w przeciwnym przypadku cząstka jest antysymetryczna i przypisany jest jej minus.

Podstawowe zasady mechaniki kwantowej mówią, że mezony mogą mieć tylko szczególne kombinacje wartości J, P oraz C, które stanowią identyfikator cząstki, zazwyczaj zapisywany w postaci J^{PC}. Ale chromodynamika kwantowa przewiduje, że sytuacja jest bardziej skomplikowana. Przypomnijmy, że mezon wyobrażamy sobie jako dwa kwarki utrzymywane razem przez wiązkę linii pola, która działa jak sprężysta taśma. Gdyby ktoś mógł przytrzymać te dwa kwarki

i szarpnąć taśmę między nimi, zaczęłaby ona drgać jak struna gitary. I podobnie jak w przypadku szarpnięcia takiej struny, pole między kwarkami może zostać wzbudzone na wiele różnych sposobów – każdy odpowiadałby innemu rodzajowi mezonu hybrydowego.

Jeżeli na przykład spiny kwarków są równoległe, a ruch wiązki pola odpowiada pierwszemu stanowi wzbudzonemu (odpowiednik podstawowej częstości drgań gitary), to J^{PC} może np. wynosić 0^{+-} lub 1^{-+}; są to wartości niemożliwe dla stanu złożonego z tylko dwóch kwarków. Takie kombinacje jednoznacznie odpowiadają zatem nowym rodzajom cząstek – mezonom hybrydowym. Podczas gdy własności normalnego mezonu można wyjaśnić przez spiny oraz momenty pędu kwarka i antykwarka, w przypadku mezonu hybrydowego są one również związane ze wzbudzoną wiązką pola. Co więcej, wzbudzone wiązki są wystarczająco mocne, aby utworzyć mezon bez żadnych kwarków. Takie samotne wiązki pola, zwinięte w zamknięte pierścienie, są kulami gluonowymi, zbudowanymi wyłącznie z tego, co zazwyczaj odpowiada jedynie za spoistość materii.

Czy takie ciekawe cząstki mogą istnieć? Tak, ale niezbyt długo. Olbrzymia większość mezonów produkowanych w zderzeniach cząstek rozpada się prawie natychmiast po utworzeniu, wytrzymując jedynie ok. 10^{-23} sekundy. Nawet jeśli poruszają się z prędkością bliską prędkości światła, to odległość, jaką przebywają od narodzin do śmierci jest nie większa niż średnica protonu. Zatem fizycy cząstek muszą się domyślać ich ulotnego istnienia na podstawie pozostawionych przez nie szczątków. W większości przypadków wyraźnymi znakami są inne mezony o dużo mniejszych masach i dłuższych czasach życia – wystarczających, aby zostawić rozróżnialne ślady.

Przez wiele lat fizycy badali tory takich cząstek, używając komór pęcherzykowych – zbiorników z ciekłym wodorem utrzymywanym pod wysokim ciśnieniem. W chwili wejścia cząstki do komory tłok jest odciągany, co gwałtownie obniża ciśnienie. Taki manewr obniża temperaturę wrzenia, ale wodór nie zamienia się natychmiast w parę. Przez chwilę pozostaje niestabilną, „przegrzaną" cieczą. Ponieważ przelatująca cząstka naładowana oddaje energię, przegrzany wodór zaczyna wrzeć wzdłuż jej toru, zaznaczając go tym samym niewielkimi bąbelkami. Jeżeli komora znajduje się w polu magnetycznym, to naładowana cząstka jest odciągana w bok, a widoczne na fotografii zakrzywienie toru jest miarą jej pędu (rys. 9). Prześledzenie kierunków ruchu wszystkich produktów rozpadu – zazwyczaj mezonów o znanych masach – pozwala odtworzyć własności (masę i J^{PC}) efemerycznej cząstki, z której te produkty powstały.

Zaletą komór pęcherzykowych jest to, że dostarczają one dosyć pełnego i niezniekształconego obrazu eksperymentu. Niestety, przeglądanie zdjęć tysięcy pęcherzykowych śladów wymaga mrówczej pracy i w ten sposób można odkryć tylko najczęściej spotykane mezony. Dlatego od ponad 30 lat modne są elektroniczne komory drutowe, zbudowane ze zbiornika gazu poprzecinanego krzyżującymi się drutami pod dużym napięciem. Przejście naładowanej cząstki jonizuje gaz wzdłuż jej toru, łącząc elektrycznie niektóre druty. Miejsca, gdzie obwody zostały chwilowo zwarte, pokazują tor cząstki. Inny rodzaj elektronicznego detektora, zwany kalorymetrem, mierzy jej energię. Oba urządzenia umieszczone razem w polu magnetycznym nazywa się spektrometrem. Współczesne spektrometry mogą wykonywać miliony pomiarów przechodzących przez nie cząstek i dlatego są tak cenne przy poszukiwaniu nowych mezonów. Niestety, ich czułość – w przeciwieństwie do czułości komór pęcherzykowych – nie jest taka sama dla wszystkich kierunków ruchu cząstek.

Rys. 9. Zakrzywiające się linie na tym zdjęciu z komory pęcherzykowej pokazują tory – a przez to rodzaje – różnych subatomowych cząstek powstających w akceleratorze. Dokładne zbadanie tych śladów (tutaj robi to Renee Jones z Fermilabu w ramach doświadczenia z 1984 r.) pokazuje własności niezostawiających śladów obiektów, które – rozpadając się – są źródłami takich strumieni cząstek. Jak większość współczesnych badaczy, autorzy niniejszego artykułu zamiast komór pęcherzykowych wykorzystują detektory elektroniczne, unikając dzięki temu tego pracochłonnego etapu polowania na szczególne przypadki cząstek egzotycznych, czyli takich, które są utworzone (w całości lub części) z obiektów zazwyczaj odpowiedzialnych tylko za oddziaływanie wiążące materię (fot. David Parker, Science Source/Photo Researchers, Inc.).

Żeby uwzględnić ten fakt, fizycy używają metody Monte Carlo, która polega na tym, że komputer symuluje wielką liczbę przypadkowych zderzeń cząstek, od których żądamy jedynie zachowania energii i pędu. Program oblicza wtedy reakcję detektora na taką sztuczną inwazję. Z powodów konstrukcyjnych we współczesnych detektorach nie wszystkie tory cząstek można zarejestrować jednocześnie. Wiedząc jednak, co nie zostało wykryte w czasie symulowanego zdarzenia, można poprawić wyniki otrzymywane w prawdziwym doświadczeniu. Gdy szuka się mezonów egzotycznych, ten krok musi być wykonany starannie, ponieważ przypisanie J^{PC} opiera się na znajomości kierunków ruchu wszystkich produktów rozpadu. Gdyby korekta zniekształceń pomiaru została wykonana niewłaściwie, sygnał egzotycznego J^{PC} mógłby się pojawić tam, gdzie egzotycznej cząstki wcale nie było.

Poszukiwania na całym świecie

Pierwszy poważny program poszukiwania kul gluonowych zainicjował Claude Amsler z CERN-u. W roku 1985 przekonał on grupę swoich kolegów do budowy detektora nazwanego „Crystal Barrel" (Kryształowa Beczka) – cylindra wypełnionego krystalicznymi kalorymetrami – i dołączenia go do obsługiwanego przez nich pierścienia z niskoenergetycznymi antyprotonami (rys. 10). Eksperyment polegał na doprowadzaniu do zderzeń antyprotonów z protonami i szukaniu kul gluonowych, które, jak przewidywali niektórzy teoretycy, mogłyby w takim procesie powstawać.

Detektor został uruchomiony w grudniu 1989 r. W pierwszej serii pomiarów odkryto cząstkę, która rozpadała się na dwa neutralne piony – podobnej cząstki nie zaobserwowano nigdy wcześniej. Do kwietnia 1990 r. detektor Crystal Barrel zarejestrował 35 tys. takich zdarzeń – gigantyczny zbiór pomiarów!

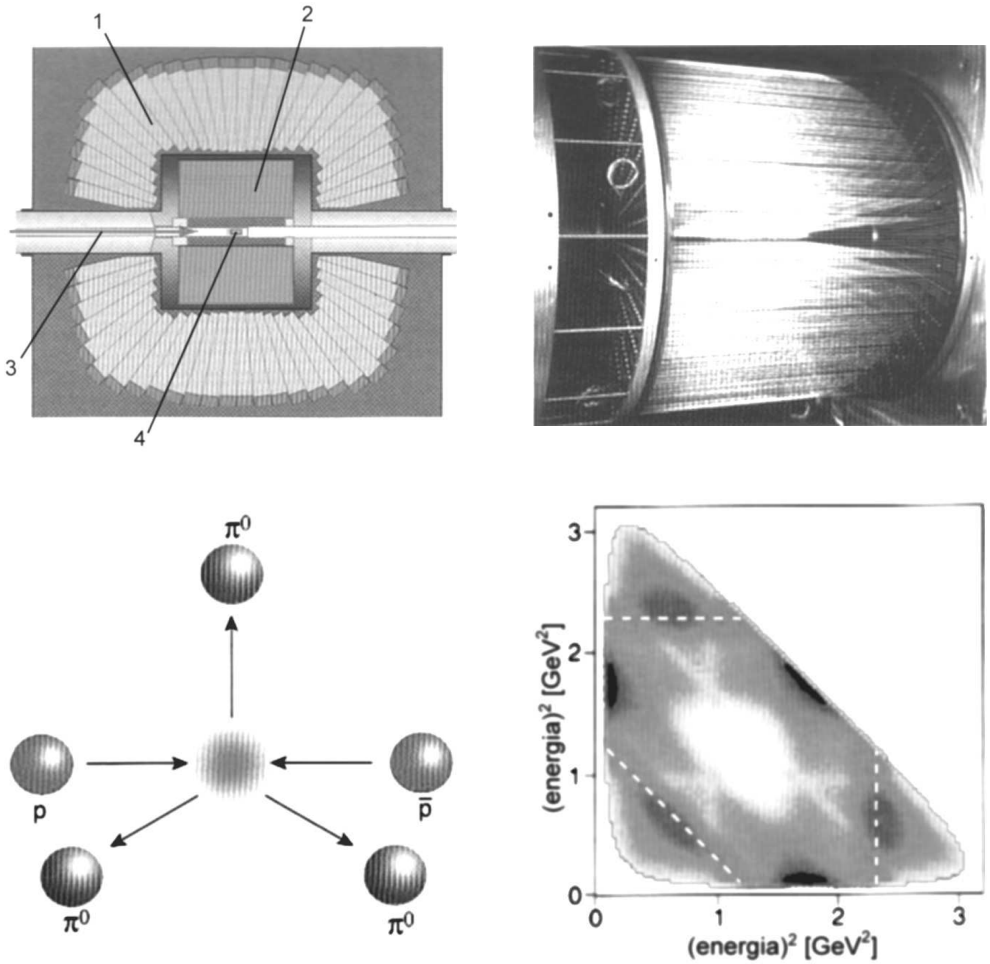
Grupa pod kierunkiem Eberharda Klempta, podówczas z Uniwersytetu Mogunckiego, zajęła się analizą tej reakcji. W lipcu 1990 r. fizycy ze współpracy Crystal Barrel zaczęli ostrożnie przedstawiać swoje wyniki, które interpretowali jako obserwację nowego mezonu o spinie 2. Dwa lata później David Bugg z Queen Mary and Westfield College i Peter Blum z Uniwersytetu w Karlsruhe (obaj uczestniczący w tym eksperymencie) niezależnie przejrzeli jeszcze raz wyniki i doszli do wniosku, że lepiej by je tłumaczyły dwie nowe cząstki o spinie 0. W roku 1994, po przestudiowaniu znacznie większego zbioru danych, badacze ze współpracy Crystal Barrel doszli do wniosku, że prawdziwa jest kombinacja obu rozwiązań. Najbardziej ekscytującą cząstką była jedna z tych o zerowym spinie, nazwana $f_0(1500)$ zgodnie z konwencją, według której nazwa zawiera spin i masę (1500 MeV/c^2, ponad półtorej masy protonu).

Z upływem następnego roku, gdy dodawano wyniki kolejnych pomiarów, stawało się coraz bardziej oczywiste, że $f_0(1500)$ prawdopodobnie nie jest zwykłym mezonem. W roku 1995 Amsler i Frank Close z Rutherford Appleton Laboratory w Anglii opublikowali pierwszy artykuł, w którym twierdzili, że cząstka ta jest w gruncie rzeczy kulą gluonową. Jeszcze w tym samym roku Donald Weingarten, teoretyk z IBM Watson Research Center w Nowym Jorku, argumentował jednak, że $f_0(1500)$ jest zwykłym mezonem: nieuchwytna kula gluonowa według jego ocen powinna być cięższa. Wysunął za to sugestię, że kulą gluonową może z powodzeniem być $f_0(1710)$ – ciekawa cząstka, znana już wtedy od ponad 10 lat. Wielu fizyków sądzi obecnie, że obie te cząstki są kwantowymi superpozycjami kuli gluonowej i dwóch mezonów.

Eksperyment Crystal Barrel działał aż do roku 1996, gdy pierścień niskoenergetycznych protonów w CERN-ie został wyłączony. Doświadczenie w Genewie nie było jednak jedyną próbą upolowania cząstki egzotycznej. W połowie lat 80. Jurij D. Prokoszkin z grupą rosyjskich kolegów twierdzili, że odkryli nową cząstkę rozpadającą się na cztery fotony – byłoby to pierwsze wykrycie egzotycznej hybrydy. Detektory, które ustawili w CERN-ie oraz Instytucie Wielkich Energii w Protwinie („miasteczku naukowym" pod Moskwą, zbudowanym wokół akceleratora cząstek) składały się z bloków szkła ołowiowego służących do pomiarów energii fotonów powstających w rozpadach mezonów. Rosyjscy badacze nie próbowali wykryć cząstek naładowanych, obserwowali jedynie fotony, niemniej wykazali, że potrafią tą metodą identyfikować dobrze poznane mezony. Pomimo to ich raporty o wykryciu mezonów egzotycznych spotkały się ze sceptycyzmem z powodu niespójności w skomplikowanej analizie danych.

We wczesnych latach 90. jeden z nas (Dzierba) nawiązał współpracę z Suh Urk Chungiem z Brookhaven National Laboratory, aby sprawdzić wyniki Rosjan. Zaczęliśmy tworzyć grupę, której celem było ulepszenie detektora cząstek naładowanych w Brookhaven, zwanego spektrometrem wielocząstkowym – wielkiego magnesu z przyłączonymi komorami drutowymi. Natomiast członkowie grupy Dzierby w Indiana University połączyli siły z inną grupą z Protwina, kierowaną przez Siergieja P. Denisowa, aby zbudować detektor fotonów zawierający 3000 bloków szkła ołowiowego.

Jeżeli grupa Prokoszkina rzeczywiście odkryła cząstkę egzotyczną, to cząstka ta powinna być widoczna zarówno w śladach naładowanych cząstek pochodzących z rozpadów, jak i przez obserwacje powstających fotonów. Eksperymenty w Brookhaven, wykorzystujące spektrometr wielocząstkowy i 11 ton szkła ołowiowego, powinny być czułe na oba rodzaje sygnałów. Pierwszy test odbył się w 1993 r., dwie serie danych zebrano w latach 1994 i 1995. Nasze pierwsze próby znalezienia wyraźnych rozpadów czterofotonowych nie powiodły się, ale taki wynik nie był specjalnym zaskoczeniem: do tego czasu większość fizyków cząstek straciła zaufanie do pierwotnego odkrycia, ponieważ powtórna analiza rosyjskich pomiarów podważyła początkową interpretację. Inne raporty na temat



Rys. 10. Urządzenie Crystal Barrel zbudowane w 1989 r. w CERN-ie zawierało 1380 detektorów z jodku cezu (1). Otaczały one komorę (2) zawierającą ok. 4000 gęsto rozpiętych równoległych drutów (zdjęcie), które dodatkowo rejestrowały naładowane cząstki powstające w zderzeniach wysokoenergetycznych antyprotonów (3) z protonami tarczy z ciekłego wodoru (4). Szczególnie ważny wynik eksperymentu Crystal Barrel pochodzi z analizy reakcji produkującej trzy obojętne piony (π^0, u dołu po lewej), z których dwa pochodziły z rozpadu intrygującej, krótko żyjącej cząstki. Nie da się w takim przypadku ustalić, która para z tych trzech pionów pochodzi z badanej cząstki. Dlatego badacze analizują wiele przypadków takich procesów i dla każdego robią wykres sumy energii dwóch pionów w funkcji sumy energii innej pary, oznaczając różnymi barwami lub stopniami szarości różne gęstości występowania punktów odpowiadających wynikom analizy. Linie dużej gęstości na takim „diagramie Dalitza" (przerywane kreski na rys. u dołu po prawej) ujawniają krótko żyjącą cząstkę i jej masę – w tym przypadku ok. 1500 MeV/c^2. Ta cząstka, nazwana $f_0(1500)$, była przez niektórych uważana za kulę gluonową, ale obecnie wielu fizyków sądzi, że jest to kwantowa superpozycja kuli gluonowej i dwóch mezonów.

tego samego mezonu egzotycznego zostały w końcu również uznane za błędne identyfikacje. Przyczyną błędów było niepełne zrozumienie działania aparatury, które doprowadziło niektórych badaczy do interpretowania niewielkiej części rozpadów licznych zwykłych mezonów jako śladów rzadkich hybryd egzotycznych.

W tym samym czasie uczestnicy współpracy z Brookhaven przeanalizowali inny możliwy kanał rozpadu (na dwa fotony i naładowany pion), używając danych zebranych w 1994 r., i wysunęli hipotezę istnienia egzotycznej hybrydy o tych samych własnościach (masie i J^{PC}), co w oryginalnych wynikach Rosjan. Ponadto jeszcze jedna grupa z Protwina zaobserwowała ten sam kanał rozpadu, ale nie zdecydowała się na ogłoszenie odkrycia mezonu egzotycznego. Krążyły też plotki, że również w detektorze Crystal Barrel wykryto ślady podobnej cząstki.

Wśród fizyków uczestniczących we współpracy z Brookhaven zaczęła się intensywna dyskusja. Większość była przekonana o odkryciu mezonu egzotycznego i chciała natychmiast opublikować raport. Ci jednak z nas, którzy pracują w Indiana University, nie chcieli się zdecydować na takie stwierdzenie, przynajmniej nie przed analizą wyników obu serii pomiarów. Niemniej większość zdecydowała o szybkim ogłoszeniu w *Physical Review Letters* o odkryciu nowej cząstki

hybrydowej o masie 1400 MeV/c^2. Wkrótce potem grupa z CERN-u opublikowała dane potwierdzające istnienie tej cząstki, nazwanej $\pi_1(1400)$.

Te kontrowersje wytworzyły nieprzyjemne napięcia między współpracującymi zespołami, lecz niebawem wszyscy razem obwieścili odkrycie jeszcze jednej cząstki egzotycznej, z zupełnie innym kanałem rozpadu i większą masą. Analiza tej cząstki, nazwanej $\rho(1600)$, nie obejmowała problemów mogących poprzednio spowodować fałszywą identyfikację lżejszej hybrydy, a jej odkrycie zostało wkrótce potwierdzone w niezależnym eksperymencie. Niemniej problemem pozostaje fakt, że oba znalezione mezony mają masy mniejsze niż wskazywana przez niektórych teoretyków najmniejsza możliwa masa cząstek egzotycznych (1900 MeV/c^2). Co więcej, w obu przypadkach kanały rozpadu nie były takie, jakich teoretycy wcześniej się spodziewali.

Dziewicze tereny

Wszyscy trzej współpracujemy z innymi eksperymentatorami i teoretykami (razem ok. 80 osób z 25 instytucji w 7 krajach) nad wykorzystaniem wiązki fotonów do wytwarzania mezonów egzotycznych. Dlaczego właśnie fotonów? Przede wszystkim niewiele wiadomo o mezonach, które mogą powstawać z wysokoenergetycznych fotonów. Co jednak ważniejsze, QCD wskazuje, że wiązki fotonów powinny się idealnie nadawać do produkcji cząstek egzotycznych: kwantowo rzecz biorąc, foton z dużym prawdopodobieństwem może zachowywać się przez krótki czas jak para kwark–antykwark o równoległych spinach. Nathan Isgur (podówczas na Uniwersytecie w Toronto) i Jack Paton (z Uniwersytetu w Oksfordzie) wysunęli przypuszczenie, że pole między tą parą może zostać wzbudzone (struna – szarpnięta) w czasie zderzenia z nieruchomą tarczą. W takim procesie powinny łatwo tworzyć się cząstki o egzotycznych wartościach J^{PC} – takie wartości byłyby niezbitym dowodem na znalezienie mezonów hybrydowych.

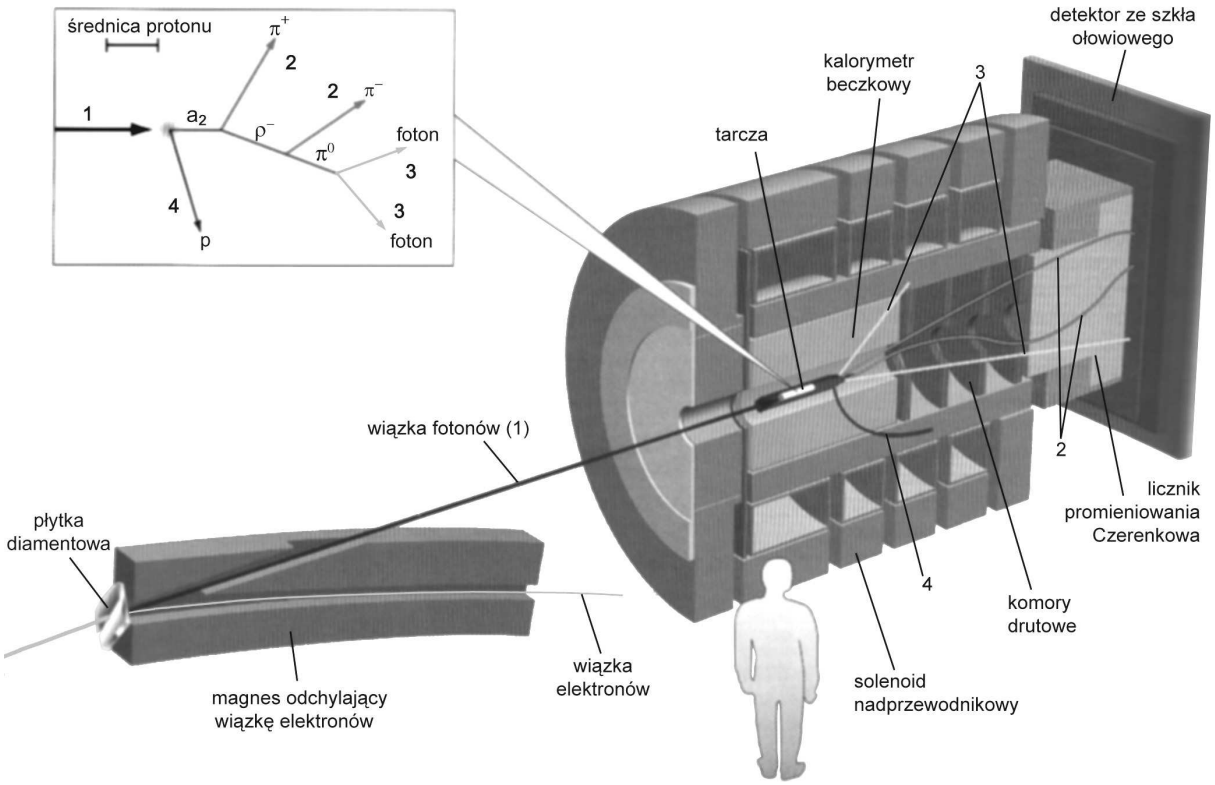
Eksperyment ten będziemy prowadzić w Thomas Jefferson National Accelerator Facility w Newport News w Wirginii (USA), gdzie obecnie działa wielki akcelerator elektronów. Po pewnych modyfikacjach wysokoenergetyczne elektrony z tego urządzenia można byłoby wykorzystać do wytwarzania odpowiednich wiązek fotonów. Trik polegałby na przepuszczeniu pędzących elektronów przez cienką płytkę syntetycznego diamentu. Elektrony będą wylatywały z akceleratora ok. 6 metrów pod ziemią i zderzały się z diamentową tarczą. Niektóre z nich zostaną spowolnione, produkując fotony promieniowania hamowania. Jeżeli wszystko jest odpowiednio przygotowane, to na skutek spójnego odrzutu atomów kryształu diamentu może nastąpić wzmocniona emisja fotonów o pewnych szczególnych wartościach energii, tzw. spójnego promieniowania hamowania. Takie zjawisko daje dodatkową korzyść: powstaje wiązka fotonów o polaryzacji liniowej, tzn. pole elektryczne ma jeden ustalony kierunek. Ta cecha ułatwia wyznaczenie J^{PC} produkowanych mezonów. Warto dodać, że wiązki pionów zazwyczaj wykorzystywane do wytwarzania nowych mezonów nie mogą być spolaryzowane.

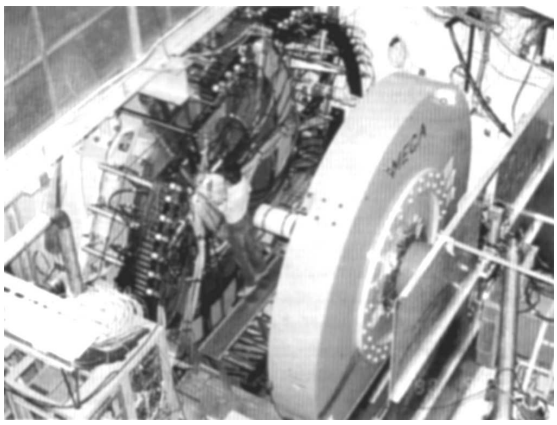
Fotony wyprodukuje tylko część elektronów, lecz wszystkie zostaną odchylone w stronę otaczającego gruntu (rys. 11). Tylko fotony – ok. 50 milionów w każdej sekundzie – osiągną tarczę. Detektor będzie się składał z wielkootworowego magnesu nadprzewodnikowego z wewnętrznymi komorami drutowymi i kalorymetrami oraz masywnego kalorymetru ze szkła ołowiowego na jednym końcu. Aby obniżyć koszty, wykorzystamy istniejącą już aparaturę. Magnes nadprzewodnikowy, wart ok. 12 milionów dolarów amerykańskich, zbudowano 30 lat temu na potrzeby eksperymentu w SLAC-u. W połowie lat 80. został przeniesiony do Los Alamos National Laboratory w celu przeprowadzenia innych badań i niedługo zostanie przywieziony do Jefferson Lab, gdzie będzie wykorzystany w naszym eksperymencie. Kalorymetr ze szkła ołowiowego będzie przewieziony z Brookhaven, gdzie został zbudowany za 3 miliony dolarów. Jeśli wszystko przebiegnie zgodnie z planem, to pierwsze pomiary cząstek egzotycznych zostaną wykonane około roku 2008. Pomimo oszczędności związanych z użyciem już istniejącego sprzętu całkowity koszt eksperymentu wyniesie jednak ok. 30 milionów dolarów.

Jak widać, skala przedsięwzięcia jest olbrzymia. Ale nasz eksperyment nie jest jedynym, który jest w przygotowaniu. Nowe badania są albo planowane, albo już prowadzone w Genewie, Nowosybirsku i Pekinie. Zupełnie nowe laboratorium mające prowadzić tego rodzaju badania jest projektowane w Japonii. Oczekujemy, że w ciągu najbliższych 10 lat zostanie odkryty i szczegółowo zbadany bogaty zbiór egzotycznych hadronów. Dopiero wtedy fizycy cząstek będą mogli twierdzić, że naprawdę zrozumieli, jak są zbudowane kule gluonowe i hybrydy, jak rozpadają się hadrony, jak oddziałują i skąd bierze się ich masa. I co najważniejsze, dopiero wtedy będziemy mogli powiedzieć, że naprawdę rozumiemy Model Standardowy.

Uzupełnienie (Alex R. Dzierba, grudzień 2004)

11 listopada 2003 r. Spencer Abraham, amerykański sekretarz ds. energii, wygłosił przemówienie w National Press Club w Waszyngtonie, przedstawiając plan, który w ciągu najbliższych 20 lat ma doprowadzić do powstania w Stanach Zjednoczonych nowych wielkich urządzeń badawczych. Jednym z krótkoterminowych priorytetów tego planu jest podwojenie energii akceleratora elektronowego CEBAF (Continuous Electron Beam Accelerator Facility) w Jefferson Lab oraz budowa nowej hali pomiarowej (Hall D) i aparatury pokazanej na rys. 11. Według owego 20-letniego





Rys. 11. Eksperyment planowany przez autorów niniejszego artykułu i ich współpracowników w Jefferson National Accelerator Facility w Newport News w Wirginii (USA) wykorzysta urządzenia z wcześniejszych doświadczeń. Magnes nadprzewodnikowy wielkości pokoju (zdjęcie po lewej), aktualnie w Los Alamos National Laboratory w Nowym Meksyku (USA), i 11-tonowy detektor ze szkła ołowiowego (zdjęcie po prawej), aktualnie w Brookhaven Laboratory w Nowym Jorku, zostaną przewiezione i staną się częścią nowego urządzenia pomiarowego. Zderzając się z cieniutką płytką diamentową, wysokoenergetyczna wiązka elektronów wyprodukuje fotony promieniowania γ (1). Tor elektronów (z których część ulegnie spowolnieniu w diamencie) zostanie odchylony, tak że tylko fotony zderzą się z tarczą. W przykładowej reakcji, w zderzeniu powstaje proton i krótko żyjąca cząstka a_2, która rozpada się na mezony ρ^- oraz π^+. Pierwsza z tych cząstek rozpada się szybko na π^- oraz π^0, które z kolei rozpada się na dwa fotony. Tory obu naładowanych pionów (2) zakrzywiają się w polu magnetycznym i kończą się w miejscu zderzenia tych cząstek z jednym z detektorów. Natomiast fotony powstające w reakcji (3) poruszają się po liniach prostych dopóty, dopóki nie wpadną do detektora ze szkła ołowiowego lub kalorymetru beczkowego (w tych przypadkach mogą zostać wykryte) lub zderzą się z inną częścią urządzenia. [Fotografie dzięki uprzejmości odpowiednio Los Alamos National Laboratory i Brookhaven National Laboratory]

planu Departamentu Energii „realizacja tego przedsięwzięcia pozwoli naukowcom podjąć próbę zgłębienia jednej z wielkich tajemnic współczesnej fizyki – mechanizmu wiążącego kwarki. Nowe obliczenia prze-

prowadzone na superkomputerach wskazują, że mogą być zań odpowiedzialne pola w postaci wiązek, których wzbudzenie powinno prowadzić do wytworzenia nigdy wcześniej nieobserwowanych cząstek elementarnych". 19 kwietnia 2004 r. Kyle McSlarrow, zastępca sekretarza ds. energii, i John Warner, senator ze stanu Wirginia, uczestniczyli w Jefferson Lab w ceremonii oficjalnej inauguracji przedsięwzięcia.

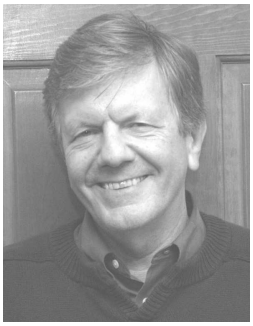
Współpraca przy eksperymencie obejmuje ponad 100 fizyków z 25 instytucji w 6 krajach, w tym w Polsce (Robert Kamiński i Leonard Leśniak z Instytutu Fizyki Jądrowej PAN im. Henryka Niewodniczańskiego w Krakowie – red.). Prowadzą oni program wstępnych badań, którego celem jest optymalizacja konstrukcji detektora, przygotowanie oprogramowania analizy danych oraz rozwinięcie teorii badanych zjawisk. Eksperyment i cała współpraca przyjęły nazwę GlueX (od ang. gluonic excitations experiment, www.gluex.org). Oficjalnym przedstawicielem współpracy jest Alex Dzierba, a Curtis Meyer jest jego zastępcą. Eric Swanson jest członkiem należącej do współpracy grupy teoretyków, której przewodzi Adam Szczepaniak, dyrektor Nuclear Theory Center w Indiana University. Konstrukcja urządzeń badawczych i unowocześnienie akceleratora mają zakończyć się w 2008 r., a pierwszych wyników można się spodziewać rok lub dwa lata później.

Tłumaczył *Marek Więckowski*
Instytut Fizyki Teoretycznej
Uniwersytet Warszawski

Lektura uzupełniająca

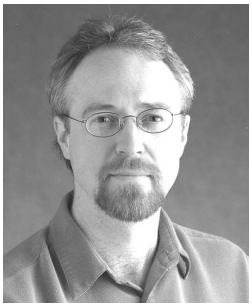
- F.E. Close, *The Cosmic Onion* (American Institute of Physics Press, New York 1983); F. Close, *Kosmiczna cebula: kwarki i Wszechświat* (PWN, Warszawa 1988).
- F. Close, M. Martin, C. Sutton, *The Particle Explosion* (Oxford University Press, Oxford 1987).
- F.E. Close, P.R. Page, „Glueballs", *Scientific American*, November 1998, s. 80.
- C. Amsler, „Proton-antiproton annihilation and meson spectroscopy with the Crystal Barrel", *Rev. Mod. Phys.* **70**, 1293 (1998).
- D.R. Thompson i in., „Evidence for exotic meson production in the reaction $\pi^- p \to \eta\pi^- p$ at 18 GeV/c", *Phys. Rev. Lett.* **79**, 1630 (1997).
- G.S. Adams i in., „Observation of a new $J^{PC} = 1^{-+}$ exotic state in the reaction $\pi^- p \to \pi^+\pi^-\pi^- p$ at 18 GeV/c", *Phys. Rev. Lett.* **81**, 5760 (1998).

Redakcja dziękuje prof. Adamowi Szczepaniakowi za przejrzenie tłumaczenia.



ALEX R. DZIERBA otrzymał doktorat z doświadczalnej fizyki cząstek w 1969 r. na University of Notre Dame. Po czteroletnim kontrakcie w Caltechu zaczął pracę na Indiana University, gdzie nadal uczy i prowadzi badania.

CURTIS A. MEYER uzyskał doktorat z doświadczalnej fizyki cząstek na Uniwersytecie Kalifornijskim w Berkeley w 1987 r. Prowadził badania na Uniwersytecie w Zurychu, a następnie, w 1993 r., został profesorem na Wydziale Fizyki Carnegie Mellon University.



ERIC S. SWANSON otrzymał doktorat z fizyki w 1991 r. na Uniwersytecie w Toronto, gdzie badał dwuwymiarowe układy kwantowe spinów. Pracował m.in. w Centrum Fizyki Teoretycznej MIT, w Rutherford Appleton Laboratory w Wielkiej Brytanii i North Carolina State University oraz na Wydziale Fizyki i Astronomii Uniwersytetu w Pittsburghu.