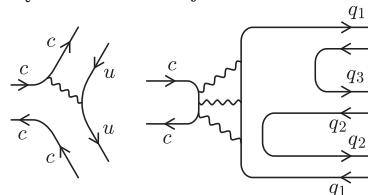


Delta i fizyka cząstek elementarnych (IV): Czego bezpośrednim świadkiem była Delta

Piotr CHANKOWSKI*

Pisząc Δ_{XY}^n , odwołujemy się do numeru n Deltę z roku 19XY lub 20XY. Pełna lista przywoływanych artykułów jest na stronie www.deltami.edu.pl.

Wyjątkowo długi czas życia mezonu J/ψ można jakościowo zrozumieć, analizując schematyczne diagramy reprezentujące możliwe mechanizmy rozpadu układu $c\bar{c}$. Są one dwóch rodzajów:



Fenomenologiczna reguła Okubo–Zweiga–Iizuki (OZI) mówi, że zachodzące pod wpływem oddziaływań silnych rozpadły reprezentowane przez diagram drugiego rodzaju, w których stan końcowy i początkowy nie są połączone ani jedną ciągłą linią kwarkową, są tłumione (tzn. ich amplitudy są znacznie mniejsze) w porównaniu z rozpadami odpowiadającymi pierwszemu diagramowi. Ponieważ struktura kolorowa uniemożliwia przejście pary $q\bar{q}$ w pojedynczy (wirtualny) gluon, a stan dwu gluonów nie może mieć całkowitego momentu pędu równego $1\hbar$ (tzw. twierdzenie Landaua–Yang’a), amplitudy $\mathcal{A}_{(II)}$ odpowiadające diagramom drugiego typu są z konieczności mnożone przez $(\bar{\alpha}_s)^p$ z $p \geq 3$, podczas gdy diagramy pierwszego rodzaju dają $\mathcal{A}_{(I)} \propto \bar{\alpha}_s$. W połączeniu z $\bar{\alpha}_s \equiv \bar{g}_s^2/4\pi < 1$ ($1/4\pi$ jest typowym czynnikiem pochodzącym z diagramów Feynmana), obserwacja ta uzasadnia jakościowo na gruncie chromodynamiki regułę OZI. W przypadku rozpadów cząstki ϕ ($M_\phi = 1,2$ GeV) będącej stanem związanym kwarków s i \bar{s} pierwszy diagram odpowiada rozpadom ϕ na dwa kaony $K^+ = u\bar{s}$ i $K^- = s\bar{u}$ lub $K^0\bar{K}^0$, a drugi rozpadem ϕ na $\pi\rho$ (i następnie $\rho \rightarrow \pi\pi$) lub bezpośrednio na trzy mezony π , które rzeczywiście zachodzą znacznie rzadziej. W przypadku J/ψ pierwszy diagram odpowiadałby rozpadom na mezony $D^+ = c\bar{d}$ i $D^- = d\bar{c}$ lub $D^0\bar{D}^0$, które są zabronione przez zasadę zachowania energii ($M_{J/\psi} < 2M_D$) i możliwe są tylko rozpadły silne odpowiadające drugiemu diagramowi przy czym, ponieważ tu $Q \sim 1,5$ GeV, odpowiednia wartość $\bar{\alpha}_s(Q)$ jest mniejsza (asymptotyczna swoboda! – zob. odcinek II) niż w przypadku rozpadów ϕ . (Rozpadły elektromagnetyczne, np. $J/\psi \rightarrow \ell^+\ell^-$ są z kolei tłumione przez małą wartość stałej sprzężenia e , a słabe rozpadły J/ψ są oczywiście jeszcze mniej prawdopodobne.)

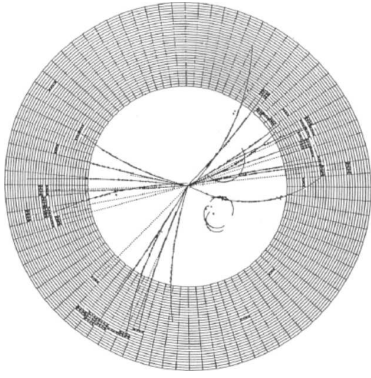
O tym, jak odkrywa się nowe cząstki, badając rozkład masy niezmienniczej produktów zderzeń pisaliśmy w Δ_{99}^6 , Δ_{12}^{12} i Δ_{14}^1 .

Fizyka wysokich energii powitała narodziny Deltę spektakularnymi wydarzeniami. Najpierw, w listopadzie 1974 roku, w USA, w laboratoriach w SLAC i w Brookhaven odkryto (niemal) niezależnie mezon J/ψ o spinie $1\hbar$, masie około 3,1 GeV i bardzo długim w porównaniu z typowymi rezonansami hadronowymi czasie życia. Odkrycia tego dokonały zespoły B. Richtera i S.C.C. Tinga (spór o pierwszeństwo załagodziła przyznana w roku 1977 obu kierownikom zespołów Nagroda Nobla; Δ_{77}^7). Po trwającym jakiś czas szoku (ówczesną atmosferę oddają artykuły w Δ_{75}^6) mezon J/ψ został zinterpretowany jako przewidziany już wcześniej przez teoretyków stan związany kwarków c i \bar{c} : parę miesięcy przed tym odkryciem M.K. Gaillard, B.W. Lee i J. Rosner, traktując serio pomysł mechanizmu GIM (zob. odcinek III), przeanalizowali dokładnie konsekwencje istnienia czwartego kwarka i , wykorzystując istniejące dane, oszacowali jego masę na około 1,5 GeV, a także (podobnie jak niezależnie T. Appelquist i H. Politzer) przewidzieli istnienie jego stanów związanych, takich jak $c\bar{c}$.

Odkrycia w SLAC dokonano, mierząc przekrój czynny reakcji $e^+e^- \rightarrow$ hadrony (czyli w praktyce liczbę takich reakcji zachodzących w jednostce czasu) w akceleratorze SPEAR, w Brookhaven zaś, badając rozkład masy niezmienniczej par e^+e^- powstających podczas rozpraszania protonów na tarczy berylowej (reakcja $p\text{Be} \rightarrow e^+e^- + \text{cokolwiek}$). Oba typy eksperymentów, które spowodowały tę „rewolucję listopadową”, przyniosły jeszcze dalsze istotne wyniki. Dokładne „przeczesanie” zakresu nieco wyższych energii zderzających się par e^+e^- w kilku działających na świecie akceleratorach tego typu pozwoliło wkrótce odkryć całą rodzinę cząstek podobnych do J/ψ , ale o większych masach (czyli stanów wzbudzonych układu $c\bar{c}$, analogicznych do stanów wzbudzonych atomu wodoru lub pozytonium; Δ_{89}^3). Nieco później w SLAC, CERN-ie i Fermilabie odkryto także hadrony D zbudowane z kwarka c i lekkich kwarków (Δ_{76}^8). Rok później, ponownie w SPEAR w SLAC, odkryty został przez M. Perla (Nagroda Nobla w roku 1995, Δ_{96}^3) trzeci naładowany lepton τ^- (i τ^+) o masie ok. 1,78 GeV, który był zwiastunem trzeciej rodziny fundamentalnych fermionów materii. W roku 1977 zaś, grupa L. Ledermana, wykonując w Fermilabie eksperyment $pH \rightarrow \mu^+\mu^- + \text{cokolwiek}$, tego samego typu co wcześniej grupa Tinga, zaobserwowała dwa wyraźne maksima w rozkładzie masy niezmienniczej pary $\mu^+\mu^-$ świadczące o formowaniu się długożyciowego rezonansu, nazwanego Υ (upsilon) o masie ok. 9,46 GeV i drugiego nieco cięższego rezonansu Υ' . Były to właśnie stany związane piątego kwarka b i jego antykwarka (Δ_{79}^2). Odkrycie to zostało potwierdzone w akceleratorze DORIS w Hamburgu. Podobnie jak w 1976 roku „przeczesanie” większego zakresu energii w akceleratorach zderzających elektrony z pozytonami ujawniło istnienie kilku stanów wzbudzonych układu $b\bar{b}$, z czego stan Υ''' o masie 10,58 GeV, odkryty w akceleratorze CESR w Cornell (USA) i rozpadający się niemal wyłącznie na pary mezonów pięknych $B^0\bar{B}^0$ lub B^+B^- stanowi dziś najwydajniejsze źródło takich par umożliwiające badanie fizyki zapachu. (Pierwszy ciężki hadron „piękny” Λ_b^0 , tj. zawierający pojedynczy kwark b , odkryto w CERN-ie w roku 1991; Δ_{92}^4 .) Tak więc w ciągu zaledwie pięciu lat desperacka propozycja Kobayashiego i Maskawy istnienia trzeciej rodziny fundamentalnych fermionów przybrała realny kształt!

Badanie reakcji $e^+e^- \rightarrow$ hadrony pozwoliło także potwierdzić w inny sposób niż à la Rutherford (Δ_{91}^6) realność kwarków ($\Delta_{85}^7/\Delta_{98}^7$). Już w latach 1970–71 teoretycy przewidzieli, że skutkiem bardzo słabego wzajemnego oddziaływania kwarków na małych odległościach i jego gwałtownego wzrostu na odległościach dużych, kwark i jego antykwark, powstające w procesie anihilacji pary e^+e^- , powinny utworzyć dobrze skolimowane (tym lepiej, im wyższa jest energia zderzających się elektronów i pozytonów) strugi hadronów rozbiegające się w przeciwnych kierunkach. Strugi takie dziś nazywa się dżetami. Pierwsze ślady dwudżetowej struktury produktów anihilacji e^+e^- udało się zaobserwować już w roku 1975 w akceleratorze SPEAR w SLAC; „czysty” dowód uzyskano jednak dopiero w roku 1979 w Hamburgu przy użyciu akceleratora PETRA o wyższej energii. Statystyczny rozkład kierunku dżetów (w stosunku do osi zderzenia $e^+z e^-$), odzwierciedlający rozkład kierunku rozlotu pierwotnej pary $q\bar{q}$, pozwolił potwierdzić, że kwarki mają spin równy $\hbar/2$. Przy wyższych energiach anihilujących leptonów wzrasta prawdopodobieństwo tego, że powstały kwark lub antykwark wyemituje gluon – zamiast dwóch dżetów powstają wtedy trzy wyraźnie rozdzielone strugi hadronów. Także i takie trzydżetowe przypadki

*Wydział Fizyki, Uniwersytet Warszawski



Typowy ślad przypadku trójdźetowego zarejestrowany przez detektor JADE przy akceleratorze PETRA. Źródło: P. Söding, Eur. Phys. J. H 35 (1), 3–28 (2010).

O tym, dlaczego buduje się wielkie akceleratory – Δ_{89}^6 . O metodach rejestrowania różnych produktów wysokoenergetycznych reakcji – Δ_{00}^5 i Δ_{03}^9 .

Na temat statystycznej wiarygodności odkrycia W^\pm i Z^0 i wcześniejszych odkryć w świetle dzisiejszych standardów pisaliśmy w Δ_{15}^3 .

Technika gromadzenia i spowalniania antyprotonów była w następnych latach rozwijana w CERN-ie i doprowadziła m.in. do wyprodukowania w 1995 r. po raz pierwszy atomów antywodoru, czyli stanów związanych \bar{p} i e^+ (Δ_{02}^{12}). O antymaterii w promieniowaniu kosmicznym i jej roli we Wszechświecie zob. także Δ_{80}^{10} i Δ_{84}^7 .

Warto sobie uświadomić, że opisany w odcinku II mechanizm spontanicznego naruszenia symetrii chiralnej $SU(2)_L \times SU(2)_R$ chromodynamiki kwantowej, po włączeniu tej teorii w pełny Model Standardowy, również przyczynia się do spontanicznego naruszenia symetrii cechowania $SU(2)_W \times U(1)_Y$, ale gdyby było to jedyne źródło tego naruszenia, masy W^\pm i Z^0 byłyby rzędu zaledwie kilkudziesięciu MeV.



(przewidziane teoretycznie w roku 1976) udało się zarejestrować za pomocą akceleratora PETRA w roku 1979. Ich występowanie było bezpośrednim dowodem istnienia gluonów, a rozkład kątowy dźetów potwierdził, że gluony mają spin $1\hbar$. Badanie takich reakcji pozwoliło także wyznaczyć wartość biegnącej stałej sprzężenia $\bar{g}_s(Q)$ oddziaływań silnych przy energii $Q \sim 30$ GeV.

Trzeba tu także wspomnieć, że ślady powstawania dźetów w postaci obfitej produkcji cząstek z dużym pędem poprzecznym p_T (względem osi zderzenia), potwierdzające oczekiwania teoretyków, zaobserwowano już w uruchomionym w roku 1971 pierwszym na świecie, zderzacz protonowo-protonowym (energia zderzeń 27 GeV + 27 GeV) ISR w CERN-ie (zob. Δ_{74}^2).

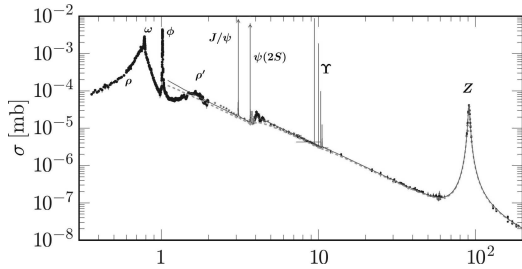
Kolejnym krokiem na drodze do potwierdzenia struktury teorii oddziaływań słabych i elektromagnetycznych musiała być bezpośrednia rejestracja bozonów W^\pm i Z^0 . Oszacowania teoretyczne wskazywały, że bozony te muszą być bardzo ciężkie, dużo cięższe niż wszystkie znane już wtedy cząstki. Aby się do nich „dobrać”, konieczne było zbudowanie nowego akceleratora. Akcelerator taki, nazwany SPS, mogący przyspieszać protony do energii 400 GeV, a w modzie $S\bar{p}pS$ zderzający przeciwbieżne wiązki protonów i antyprotonów o energii 270 GeV każda, został uruchomiony w CERN-ie w roku 1981. Pierwszym osiągnięciem SPS było zarejestrowanie przez detektor UA2 dźetów hadronowych powstających, gdy kwark z protonu i antykwark z antyprotonu zderzają się „czołowo”. Potwierdziło to dobre zrozumienie teoretyczne procesów zachodzących w zderzeniach wysokoenergetycznych hadronów i upewniło wszystkich, że jeśli tylko bozony pośredniczące naprawdę istnieją i nie są zbyt ciężkie, zostaną zarejestrowane. Tak się też rzeczywiście stało: w roku 1983 dwa zespoły, UA1 i UA2, ogłosiły zarejestrowanie kilku przypadków zderzeń, w wyniku których powstawał izolowany wysokoenergetyczny lepton o dużym pędzie poprzecznym (w stosunku do kierunku wiązek) oraz tzw. brakująca energia, tak jak powinno się dziać w procesach $u\bar{d} \rightarrow W^+ \rightarrow e^+\nu_e$ i $\bar{u}d \rightarrow W^- \rightarrow e^-\bar{\nu}_e$ (neutrino umyka z detektora, unosząc ową brakującą energię). Masa W^+ okazała się rzeczywiście duża: 80,4 GeV. Pół roku później odkryto w podobny sposób również bozon Z^0 o masie 91,2 GeV (Δ_{84}^6). *Spiritus movens* całego przedsięwzięcia, C. Rubbia, otrzymał w roku 1985 Nagrodę Nobla (za pomysł poradzenia sobie z niełatwym zadaniem gromadzenia dostatecznej liczby antyprotonów; Nagrodę Nobla otrzymał również inżynier S. van der Meer). Twórcy teorii oddziaływań elektrosłabych, Glashow, Weinberg i Salam, otrzymali Nagrodę Nobla w roku 1979, jeszcze przed odkryciem W^\pm i Z^0 .

Uruchamiając $S\bar{p}pS$, miano także nadzieję na odkrycie kwarka t , którego istnienie było konieczne do wewnętrznej spójności Modelu Standardowego. Jednak odkrycie w roku 1987 znacznego mieszania (czyli oscylacji) neutralnych mezonów B^0 i \bar{B}^0 analogicznego do mieszania $K^0 - \bar{K}^0$ (Δ_{89}^4 , Δ_{78}^5), interpretowane w ramach Modelu Standardowego, oznaczało, że kwark t jest prawdopodobnie na to zbyt ciężki, i zadanie jego znalezienia przejął ukończony w roku 1983 w Fermilabie akcelerator zwany Tevatronem; wykorzystując nadprzewodzące elektromagnesy, zderzał on protony z antyprotonami z energią 900 GeV + 900 GeV = 1,8 TeV.

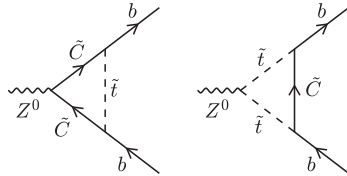
Odkrycie bozonów W^\pm i Z^0 było kamieniem milowym w rozwoju fizyki wysokich energii. Potwierdziło ono bowiem, że u podstaw oddziaływań cząstek leży jednolita struktura teorii z cechowaniem, a różnice w charakterze oddziaływań słabych i elektromagnetycznych są konsekwencją spontanicznego naruszenia części grupy symetrii cechowania (zob. odcinek II). Trzeba tu od razu zaznaczyć, że odkrycie to nie oznaczało potwierdzenia całej opisanej tu wcześniej struktury Modelu Standardowego: pociągające za sobą masywność W^\pm i Z^0 naruszenie symetrii $SU(2)_W \times U(1)_Y$ mogło bowiem być spowodowane kondensatem elementarnego pola skalarnego (tak jak w teorii Weinberga), ale mogło też być (jak w teoriach Nambu) powodowane wewnętrzną dynamiką jakichś nieznanymi silnymi oddziaływań. Tak więc po odkryciu W^\pm i Z^0 następnym oczywistym celem stało się zbadanie mechanizmu naruszenia symetrii $SU(2)_W \times U(1)_Y$. Po drodze należało jednak najpierw przebadać dokładniej odkryte cząstki.

Aby zrealizować ten cel, CERN (zob. Δ_{74}^2 , Δ_{89}^6 , Δ_{96}^6 , Δ_{04}^8) złamał swoją tradycję budowania akceleratorów protonowych i postawił na zderzenia elektronów z pozytonami. Wielki akcelerator LEP przyspieszający przeciwbieżne wiązki e^- i e^+ , którego podziemny tunel ma 27 km obwodu, został ukończony w roku 1989 (w tym samym tunelu umieszczony został działający obecnie akcelerator LHC). W czterech punktach tunelu swoje detektory zainstalowały grupy: ALEPH, DELPHI, OPAL i L3. Celem pierwszej fazy tego eksperymentu, w której energia wiązek wynosiła po około 45 GeV, było rejestrowanie reakcji $e^-e^+ \rightarrow Z^0 \rightarrow$ cokolwiek, umożliwiającej

dokładne zbadanie właściwości Z^0 (Δ_{94}^6). Analogiczny, choć nieco na mniejszą skalę zakrojony eksperyment ze zderzeniami przyspieszanych w akceleratorze liniowym elektronów i pozytonów, został równolegle uruchomiony w SLAC (Δ_{89}^{10}).



Zależność przekroju czynnego $\sigma(e^+e^- \rightarrow \text{hadrony})$ od energii \sqrt{s} pary e^+e^- . Widoczne są piki odpowiadające rodzinie stanów związanych $c\bar{c}$ ($J/\psi, \psi, \dots$), rodzinie cząstek Υ oraz duży pik odpowiadający powstawaniu bozonu Z^0 (czas życia $\tau_Z = 2,6 \cdot 10^{-25}$ s). Obliczona na podstawie teorii szerokość tego maksimum zależy silnie od liczby N_ν lekkich neutrino. Zgodność z danymi wymaga przyjęcia, że $N_\nu = 3$.



Występujące w supersymetrycznych wariantach Modelu Standardowego dodatkowe diagramy Feynmana dające poprawki do rozpadu $Z^0 \rightarrow b\bar{b}$ (\tilde{t} oznacza bezspinowego superpartnera kwarku t , a \tilde{C} – superpartnera o spinie $h/2$ bozonu W). Utrzymujące się przez pewien czas spore odstępstwo otrzymanej z pomiarów szerokości tego rozpadu od wartości przewidywanej na podstawie Modelu Standardowego było w latach 1995–6 źródłem nadziei, że jest to pierwszy oczekiwany sygnał istnienia cząstek supersymetrycznych.

Jako ostatnią z cząstek tworzących trzy rodziny fundamentalnych fermionów odkryto neutrino ν_τ ; miało to miejsce w 2000 roku w przeprowadzanym w Fermilabie eksperymencie DONUT.



Pomiary wykonane przez zespoły ALEPH, DELPHI, OPAL i L3 (i SLD w SLAC) były tak precyzyjne, że przy ich interpretacji trzeba było uwzględnić wpływ naprężeń skorupy ziemskiej na rurę akceleratora (Δ_{94}^6) i „błądzące” w ziemi prądy generowane przez przejeżdżające w pobliżu pociągi TGV (Δ_{96}^6). Pomiary te umożliwiły dokładne testowanie Modelu Standardowego jako teorii kwantowej: w teoretycznych obliczeniach mierzonych wielkości konieczne było uwzględnianie tzw. poprawek pętlowych, które zależą od nieznanymi jeszcze wtedy mas kwarka t i bozonu Higgosa h^0 , co pozwalało nakładać na te nieznanne masy ograniczenia przez porównywanie rachunków teoretycznych z danymi (Δ_{00}^1). Innym ważnym wynikiem uzyskanym dzięki LEP było ustalenie, że istnieją tylko trzy bezmasowe (lub bardzo lekkie) neutrino ($\Delta_{90}^{11}, \Delta_{98}^9$).

Uruchamiając LEP, liczono także na odkrycie kwarka t (Δ_{89}^6), lub bozonu Higgosa h^0 (mimo, że mechanizm naruszenia symetrii $SU(2)_W \times U(1)_Y$ mógł być inny, fizycy, zwłaszcza doświadczalni, szybko oswoili się z myślą, że jest nim kondensat pola skalarnego). Nieskrywane były też nadzieje na odkrycie tzw. „nowej fizyki”, tj. cząstek nieprzewidywanych przez Model Standardowy; w szczególności silne było oczekiwanie zarejestrowania sygnałów supersymetrii (zob. $\Delta_{85}^{12}, \Delta_{00}^5, \Delta_{07}^2$ i odcinek VI). Cząstki przewidywane przez supersymetryczną wersję Modelu Standardowego (lub jej warianty) mogłyby, gdyby istniały i były dostatecznie lekkie, ujawnić się bezpośrednio (czyli zostać wyprodukowane w zderzeniach e^+e^-) lub przez przyczynki wnoszone przez nie (poprzez zawierające te cząstki w pętlach diagramy Feynmana) do obliczanych amplitud mierzonych procesów. Nic takiego jednak się nie wydarzyło. . .

Pod koniec roku 1994 w Tevatronie odkryto wreszcie kwark t . Okazał się on najcięższą ze znanych cząstek: waży bowiem 173 GeV! (Nie mógł zatem zostać wyprodukowany w LEP-ie.) Żyje na tyle krótko, że rozpada się, zanim mogłyby uformować się zawierające go hadrony.

Ustalenie masy kwarka t pozwoliło wyeliminować z rachunków teoretycznych jeden nieznanymi parametr i tym samym ustalić, że bozon Higgosa, jeśli Model Standardowy jest właściwą teorią, musi być lekki ($M_h < 180$ GeV). Spotęgowało to nadzieje na odkrycie go w drugiej (trwającej od 1997 roku) fazie działania LEP-u, gdy energie obu wiązek podwyższono do około 100 GeV. Wyższa energia zderzeń e^-e^+ umożliwiła też po raz pierwszy bezpośrednią produkcję par W^+W^- i częściowe zbadanie sprzężeń $W^+W^-Z^0, W^+W^-\gamma$ przewidywanych przez teorię (zob. odc. I). Zaostrzone też zostały dolne ograniczenia na masy potencjalnych nowych cząstek przewidywanych np. przez teorie supersymetryczne. Tuż przed zamknięciem LEP pojawiły się sygnały bezpośredniej produkcji czegoś, co mogło być bozonem Higgosa (Δ_{01}^1). Program LEP musiał jednak zostać zakończony z powodu konieczności rozpoczęcia budowy LHC. . .

Z ważnych wydarzeń końca XX wieku należy odnotować rozpoczęcie w roku 1990 i zarzucenie (wskutek nieprzyznania dalszych funduszy przez Kongres USA) budowy Nadprzewodzącego Super Akceleratora (SSC), który miał przyspieszać przeciwbieżne wiązki protonów do fantastycznych energii 20 TeV (czyli energia zderzeń miała wynosić 40 TeV!). Gdyby został on zbudowany, akcelerator LHC nie byłby potrzebny. . .

Bardzo ważnym urządzeniem stał się uruchomiony w roku 1992 w DESY w Hamburgu akcelerator HERA, jako jedyny na świecie zderzający przeciwbieżne wiązki protonów (870 GeV) i elektronów (30 GeV). Przeprowadzone za jego pomocą eksperymenty typu głęboko nieelastycznego rozpraszania pozwoliły dokładnie poznać strukturę protonu (czyli wyznaczyć tzw. funkcje struktury protonu w sposób fenomenologiczny parametryzujące rozkład w jego wnętrzu kwarków i gluonów oraz ich pędów) i dostarczyły danych niezbędnych do ilościowego opisu zderzeń protonów w LHC. Akcelerator HERA zakończył pracę w 2007 roku, ale zebrane w nim unikalne dane jeszcze długo będą przedmiotem analiz dostarczających informacji o wewnętrznej budowie protonu.

W okresie pomiędzy zamknięciem akceleratora LEP, a uruchomieniem w roku 2009 LHC, fizykę wysokich energii zdominowały dwa kierunki badań. Pierwszym było wszechstronne badanie fizyki zapachu, w szczególności procesów rzadkich i naruszających zachowanie CP. Drugim była fizyka neutrino. O tym napiszę w następnym odcinku.