

Wojciech Królikowski
Instytut Fizyki Teoretycznej
Wydział Fizyki UW

Sześćdziesiąt lat IFT UW*

Szanowni Państwo.

Niewiarygodne, ale upływa 60 lat od utworzenia z inicjatywy Stefana Pieńkowskiego i Leopolda Infelda dwu naszych Instytutów. Okres ten to cała epoka obejmująca działania kilku pokoleń Polaków zajmujących się fizyką na Hożej. Z okazji dzisiejszego spotkania moje bardzo niekompletne reminiscencje, rozciągnięte nieprzyzwoicie w czasie, starałem się spisać i chciałbym je teraz Państwu przeczytać. Będzie potrosze o organizacji Instytutu Fizyki Teoretycznej UW i potrosze o jego światowym tle naukowym w zakresie badań fundamentalnych w fizyce. Timing oceniam na około pół godziny.

* * *

Tak się złożyło, że okres tych sześćdziesięciu lat był niezwykle znaczący dla rozwoju fizyki na świecie i związanych z nią technologii, ale także dla życia politycznego w Polsce. Rzeczywiście, zmienił się w tym czasie na naszych oczach obraz otaczającego nas świata. Np. w 1952 r., gdy powstawał Instytut, daleko jeszcze było do komputerów osobistych, internetu, telefonów komórkowych, a przez Atlantyk latały samoloty śmigłowe. W tymże czasie Józef Stalin dożywał swoich dni, Radio Wolna Europa zaczynało nadawać, a w Warszawie zbudowano tzw. MDM. Gdy chodzi o tło naukowe, to należałoby pokreślić, że w czasie trzech pierwszych dekad istnienia Instytutu ukształtował się w fizyce światowej tzw. Model Standardowy oddziaływań fundamentalnych ze wszystkimi swymi zaletami i wadami.

W skład utworzonego Instytutu weszły początkowo trzy katedry: dwie, istniejące już poprzednio, mechaniki teoretycznej prof. Rubinowicza i fizyki teoretycznej prof. Białobrzeskiego oraz nowa katedra elektrodynamiki i teorii

*Referat na połączonym konwersatorium IFD UW i IFT UW w dniu 21 maja 2012 z okazji sześćdziesięciolecia utworzenia obu instytutów.

względności prof. Infelda. Inicjator IFT UW, prof. Infeld, znany ze swej współpracy z Einsteinem został pierwszym dyrektorem Instytutu. Początkowo fizyka kwantowa przypadała głównie katedrze mechaniki, której kierownik, prof. Rubinowicz, był jednym z niewielu polskich fizyków zapisanych w dziejach mechaniki kwantowej. W ramach IFT UW powstawały później nowe katedry/zakłady, m.in. katedra teorii cząstek elementarnych została wydzielona z katedry prof. Rubinowicza. Zmieniały się też nazwy katedr/zakładów.

Pierwotna idea Instytutu polegała na utworzeniu na UW jednostki organizacyjnej skupiającej nowoczesne nauczanie i efektywne prowadzenie badań naukowych w najważniejszych działach fizyki współczesnej, a więc realizującej wypróbowaną formułę Uniwersytetu. A przecież nie była to jedyna możliwa idea do realizacji. Prawie równolegle, Henryk Niewodniczański formował na UJ Instytut praktycznie wyspecjalizowany w kierunku fizyki jądrowej i później fizyki cząstek elementarnych, uzyskując z czasem znaczące rezultaty dydaktyczne i badawcze.

Z dzisiejszej perspektywy wydaje się, że w IFT UW udało się bardzo dobrze zorganizować nauczanie, osiągając rzeczywiście wysoki poziom merytoryczny (może trochę za trudny dla słabszych studentów). W wyniku tego wykształciła się liczna i kompetentna kadra naukowa, która dość szybko awansowała. Jeśli chodzi o badania naukowe, to były one prowadzone, na ogół z powodzeniem, w poszczególnych katedrach/zakładach, a rola Instytutu sprowadzała się do organizacyjnej opieki nad nimi i czasem prób koordynacji. Oczywiście o sukcesie decydowały naprawdę ludzkie talenty. Natomiast częste były przypadki inicjowania przez Instytut nowych kierunków badań przez tworzenie nowych katedr/zakładów np. w zakresie optyki kwantowej. Naturalnie, większość katedr IFT UW blisko współpracowała nie tylko z IFD UW, ale także z dwoma potężnymi instytutami badawczymi w Warszawie, wyspecjalizowanymi w fizyce fazy skondensowanej oraz fizyce jądra i cząstek elementarnych: IF PAN oraz IBJ, później IPJ im. Andrzeja Sołtana, a teraz NCBJ. Oba powstały przy

istotnej pomocy kadrowej Wydziału Fizyki UW (i w pewnym sensie pod jego patronatem). Założycielem pierwszego był Leonard Sosnowski, drugiego Andrzej Sołtan wraz z Marianem Danyszem.

Dzielnymi następcami prof. Infelda na stanowisku dyrektora Instytutu byli przez wszystkie te lata kolejno Józef Werle, Andrzej Trautman, Stefan Pokorski, Grzegorz Rohoziński i Marek Napiórkowski (każdy przez parę kadencji). Niestety, Instytut poniósł ciężkie straty osobowe przez przedwczesną śmierć kilku swych pracowników. Pozwólcie, że w skupieniu sięgnę pamięcią do postaci Grzegorza Białkowskiego, Jana Blinowskiego, Jerzego Mycielskiego, Jerzego Plebańskiego, Zdzisława Szymańskiego, Józefa Werlego i Krzysztofa Wódkiewicza. Przedwcześnie odeszli również inni znakomici fizycy, początkowo związani z IFT UW. Pragnę wspomnieć z wdzięcznością Mariana Günthera, Leszka Łukaszuka, Bohdana Karczewskiego, Jerzego Sawickiego, Macieja Suffczyńskiego i Przemysława Zielińskiego.

* * *

Bogate dzieje IFT UW zawierają wiele wątków, które mogłyby być przedmiotem osobnych rozważań. Ograniczę się tutaj do wymienienia kilku z nich.

- Najpierw wątek personalny. Pojawienie się i interakcja na Hożej dwu silnych osobowości: Wojciecha Rubinowicza i Leopolda Infelda. Pierwszy z nich był fizykiem kwantowym starszego pokolenia, wybitnym współpracownikiem Sommerfelda, skoncentrowanym na swoim sprawnym warsztacie. Wysoko cenił sobie niezależność akademicką. Drugi — fizykiem klasycznym, znanym współpracownikiem Einsteina w badaniach nad grawitacją, wykazującym wyraźne uzdolnienia organizacyjne i piarowskie. Był otwarty na nowe inicjatywy naukowe i chętnie je promował w Instytucie. Po powrocie do Polski z Kanady uzyskał uprzywilejowany status w PRL, m.in. gorącą linię telefoniczną do władz rządowych. Jak sporo znanych intelektualistów w Zachodniej Europie, w pewnej krytycznej chwili prof. Infeld przyłączył się do prosowieckiego Ruchu Obrońców Pokoju. Starał się

potem uwolnić od związanych z tym żenujących obligacji, nie zawsze z powodzeniem. Prof. Infeld zmarł w 1968 r. w wieku 70 lat, a prof. Rubinowicz w 1974 mając 85 lat (prof. Białobrzeski zmarł już w 1953 r. w wieku 75 lat).

- Przechodząc do wątków naukowych wymienię najpierw wątek kwantyzacji grawitacji, jeden z nierozwiązanych dotąd problemów fizyki współczesnej, mimo zdecydowanej presji w tym kierunku ze strony fizyki cząstek. Inny problem grawitacyjny, który był obecny na Hożej, to współzależność na poziomie klasycznym równań pola i równań ruchu cząstek. Na poziomie kwantowym, dla innych pól niż grawitacyjne, problem ten jest rozwiązywany przez konstrukcję reprezentacji Focka.

- Trzeci wątek, to potężna eksplozja badań w fizyce fazy skondensowanej na świecie a Hoża, w szczególności badania różnych układów niskowymiarowych.

- Czwarty, to CERN a Hoża o przełomowym znaczeniu dla naszej fizyki cząstek elementarnych przez wiele lat, w szczególności problem Higgsa i problem supersymetrii.

- Piąty wątek, który chciałbym wymienić, to intensywny rozwój badań nad strukturą ciężkich jąder a Hoża.

- Szósty, fizyka statystyczna na Hożej oraz renesans równania Boltzmann m.in. w kosmologii i w problemie ciemnej materii a Hoża.

- Dalej, siódmy, precyzyjna elektrodynamika kwantowa prostych stanów związanych.

- Wreszcie, jako ósmy wymienię własności analityczne amplitud przejść kwantowych.

* * *

Przechodzę teraz do drugiego rozdziału mojego referatu, w którym postaram się scharakteryzować rozwój fundamentalnych badań fizycznych na świecie w

początkowym okresie funkcjonowania IFT UW, ważnym dla formowania się znacznej części jego preferencji naukowych na przyszłość.

Późne lata czterdzieste i wczesne pięćdziesiąte dwudziestego wieku były okresem dominacji w fundamentalnych badaniach fizycznych elektrodynamiki kwantowej, która dzięki odkryciu przez Tomonagę, Schwingera i Feynmana kowariantnej renormalizowalności perturbacyjnej stała się najbardziej precyzyjną teorią fizyczną, wkrótce dokładniejszą od już wtedy wyrafinowanego doświadczenia (przesunięcie Lamba, anomalny moment magnetyczny).

Słabe procesy promieniotwórcze były wówczas w dalszym ciągu opisywane przez przedwojenne kontaktowe oddziaływanie Fermiego prądów fermionowych zmieniających ładunek elektryczny (1934). W latach pięćdziesiątych Gell-Mann i Feynman trafnie przypuścili, że na poziomie elementarnym prądy te są kombinacjami chiralnymi (zmieniającymi parzystość) typu $V-A$ wektorowych i aksjalnych prądów fermionowych (1958). Trochę wcześniej (1956), Lee i Yang przewidzieli niezachowanie parzystości w rozpadach β , szybko potwierdzone w eksperymencie Madame Wu.

Istotny przełom nastąpił w latach sześćdziesiątych wraz z wprowadzeniem przez Weinberga (1967) i Salama (1968) nowego modelu tzw. oddziaływań elektroślabych, zawierającego bozony pośredniczące i dodatkowo, obok prądów zmieniających ładunek, neutralne prądy fermionowe mieszające się z elektromagnetycznymi prądami fermionowymi. Istnienie nowych prądów zostało potwierdzone eksperymentalnie w latach siedemdziesiątych (1973). Model Weinberga-Salama jest chiralną teorią typu Yanga-Millsa (chiralną nie-Abelową teorią cechowania) (1954) i ma jeszcze jedną podstawową właściwość, że jego symetria $SU(2)_L \times U(1)$ jest złamana spontanicznie przez mechanizm zaproponowany w pracach Englerta i Brouta (1964) oraz niezależnie Higgsa (1964). Powoduje to pojawienie się mas dla fermionów oraz dla bozonów wektorowych pochodzących od bozonów cechowania (z wyjątkiem fotonu). W latach osiemdziesiątych potwierdzono eksperymentalnie istnienie masywnych bozo-

nów wektorowych W^+ , W^- , Z^0 , pośredniczących w słabych oddziaływaniach (1983). Wraz z fotonem jako czwartym bozonem wektorowym zidentyfikowano je precyzyjnie (razem z ich masami i stałymi sprzężenia) z odpowiednio przeformowanymi przez mechanizm Higgsa czterema bozonami cechowania modelu Weinberga-Salama. Na początku lat siedemdziesiątych (1971) 't Hooft pokazał perturbacyjną renormalizowalność teorii elektroslabej. Renormalizowalność ta wiąże się z faktem, że przed złamaniem symetrii elektroslabej mamy do czynienia z teorią cechowania o bezmasowych bozonach pośredniczących, zachowującą swą renormalizowalność po spontanicznym złamaniu. Natomiast słabość oddziaływań słabych (małość efektywnej stałej Fermiego) bierze się stąd, że po złamaniu symetrii elektroslabej bozony pośredniczące (z wyjątkiem fotonu) stają się masowe i ciężkie. Niezachowanie parzystości w słabych oddziaływaniach wynika oczywiście z chiralności prądów słabych.

Tak powstała teoria elektroslaba unifikuje w specyficzny sposób elektromagnetyzm ze słabymi oddziaływaniami i jest, jak dotąd, w pełni zgodna z doświadczeniem. Jej wadę stanowi duża liczba zawartych w niej wolnych parametrów, m.in. są nimi wszystkie masy cząstek poza fotonem. Mechanizm Higgsa, będący ciągle hipotezą jest w tej chwili w CERNie obiektem intensywnego procesu weryfikacji na tak bądź nie.

Oczywiście, na poziomie elementarnym, fermionami modelu Weinberga-Salama są wszystkie leptony i kwarki. Do scharakteryzowania silnych oddziaływań i kwarków właśnie przechodzę. Leptony pozostawiam na koniec.

* * *

Lata pięćdziesiąte dwudziestego wieku, pierwsza dekada istnienia IFT UW, a następnie siedemdziesiąte były świadkiem lawiny odkryć różnych cząstek silnie oddziałujących, hadronów, których znane wcześniej spektrum sprowadzało się jedynie do dwu nukleonów (protonu i neutronu), hiperonu dziwnego Λ , trzech pseudoskalarnych mezonów π^+ , π^- , π^0 i dwu pseudoskalarnych mezonów

dziwnych K^+ , K^0 (stąd wziął się model Sakaty z trójką barionów p , n , Λ jako budulcem dla mezonów π i K ; w rzeczywistości okazało się, że ich stany związane to tzw. hiperfragmenty odkryte przez Danysza i Pniewskiego w Warszawie w IFD UW w 1952). Ze wszystkich odkrytych i odkrywanych hadronów tylko proton okazał się (jak dotąd) trwały, inne rozpadały się silnie bądź słabo lub elektromagnetycznie. Wśród hadronów występowały stany wzbudzone bardziej podstawowych hadronów (rezonanse) rozpadające się silnie, jak i stany różniące się od stanów nukleonów i mezonów π nowymi liczbami kwantowymi, zapachami (*flavors*), rozpadające się słabo lub elektromagnetycznie. Do chwili obecnej odkryto cztery takie liczby kwantowe: *dziwność* (*strangeness*), *charm*, *bottom*, *top*. Wszystkie komutują ze sobą i z silnym izospinem. Do tej liczby dodaje się zwykle jeszcze dwie liczby kwantowe: orientację *up* i *down* silnego izospinu charakteryzujące proton i neutron, lub, na bardziej podstawowym poziomie, kwark *up* i *down*, gdy wprowadzimy kwarki jako elementarne fermionowe składniki wszystkich hadronów.

Obserwujemy więc w przyrodzie sześć zapachów i wprowadzamy odpowiednio sześć kwarków jako ich nośniki wewnątrz hadronów. Z drugiej strony, z punktu widzenia słabego izospinu generującego chiralną symetrię $SU(2)_L$ w ramach modelu Weinberga-Salama, tworzą one trzy dublety kwarków lewoskrętnych:

$$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}_L, \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}_L, \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}_L$$

oraz sześć singletów kwarków prawoskrętnych:

$$u_R, d_R, c_R, s_R, t_R, b_R.$$

Występują więc trzy pokolenia (generacje) kwarków, w każdym pokoleniu jeden dublet i dwa singlety słabego izospinu. W szczególności, słabe przejścia kwantowe zmieniające ładunek elektryczny następują wewnątrz dubletów. Przejścia pomiędzy dubletami (ze zmianą liczby pokoleniowej) pojawiają się

również, ale są znacznie słabsze (mieszanie Cabibbo-Kobayashi-Maskawa stanów masowych w zapachowe i odwrotnie). Widzimy, że zapachy nie są ścisłymi liczbami kwantowymi dla kwarków.

Podobnie zresztą jest dla leptonów, dla których występują również trzy pokolenia (generacje), w każdym pokoleniu jeden dublet i dwa singlety słabego izospinu. Zapachy, nie będąc ścisłymi liczbami kwantowymi także dla leptonów, powodują fenomen oscylacji neutrin w stanach zapachowych, związany z uzyskaniem przez neutrina małych, ale niezerowych mas.

Liderem w rozwoju interpretacji widma hadronów był niewątpliwie Gell-Mann. On wprowadził dziwność (1956) oraz (razem z Ne'emanem) tzw. *eightfold way* (1964), podejście oparte na przybliżonej zapachowej symetrii globalnej $SU(3)_F$ porządkującej hadrony w zapachowe oktety i dekuplety, o ile się uwzględni tylko trzy pierwsze zapachy *up*, *down*, *dziwność* i wprowadzi trzy odpowiadające im kwarki *u*, *d*, *s* (1963), grupując je w zapachowy tryplet (model hadronów zawierający trzy kwarki *u*, *d*, *s* rozważał także Zweig).

Należy zauważyć, że uwzględnienie dalszych trzech kwarków *c*, *b*, *t* przez rozszerzenie zapachowej symetrii globalnej $SU(3)_F$ do kolejno $SU(4)_F$, $SU(5)_F$, $SU(6)_F$ daje coraz gorsze przybliżenia na skutek coraz większych różnic mas między kwarkami ($m_u \sim 3$ MeV, $m_d \sim 6$ MeV, $m_s \sim 100$ MeV, $m_c \sim 1.3$ GeV, $m_b \sim 4.2$ GeV, $m_t \sim 172$ GeV). Nadawanie więc zapachom międzypokoleniowej struktury grupowej wydaje się mijać z celem, co sugeruje, że zapachy i pokolenia mogą mieć charakter raczej dynamiczny (być konsekwencją pewnej złożoności kwarków i leptonów).

W następnym kroku, Gell-Mann wprowadził niezależny od zapachu, nowy nie-Abelowy ładunek kwarkowy, nazwany kolorem (1973), generujący ścisłą kolorową symetrię cechowania $SU(3)_C$. W ten sposób dla każdego zapachu odpowiedni kwark został zastąpiony przez odpowiedni kolorowy tryplet kwarków. Kolorowe kwarki *u*, *d*, *c*, *s*, *t*, *b* uważamy dziś za składniki wszystkich

hadronów. W szczególności, bariony = qqq a mezony = qq^c (przypuszcza się dziś, że istnieją też hadrony więcej-kwarkowe).

Jednym z bezpośrednich wniosków z hipotezy kolorowych kwarków była prawidłowa statystyka (statystyka Fermiego) dla kwarków w (niekolorowych) nukleonach, w których kolorowe stopnie swobody tworzą stan całkowicie antysymetryczny, zaś spinowe i zapachowe stopnie swobody razem – stan całkowicie symetryczny (a więc w przypadku symetrycznego stanu przestrzennego potrójnie S , stan trzech kolorowych kwarków w nukleonie jest całkowicie antysymetryczny).

Oktet bezmasowych bozonów cechowania (też kolorowych) ścisłej symetrii $SU(3)_C$ nazywanych gluonami, pośredniczy w przenoszeniu silnych oddziaływań pomiędzy kolorowymi kwarkami, prowadząc (wg argumentów perturbacyjnych) do ich uwięzienia w niekolorowych hadronach (i ewentualnie w większych niekolorowych skupiskach kolorowych kwarków i gluonów, większych workach kwarkowo-gluonowych). Wtedy stany pojedynczych izolowanych kwarków nie istnieją (nie istnieją stany asymptotyczne).

Teoria silnych oddziaływań kwarków i gluonów oparta o ścisłą symetrię cechowania $SU(3)_C$ nosi nazwę chromodynamiki kwantowej. Łącznie z teorią Weinberga-Salama oddziaływań elektroślabych (rządzonych spontanicznie złamaną symetrią cechowania $SU(2)_L \times U(1)$) stanowi tzw. Model Standardowy oddziaływań fundamentalnych.

Nim zwyciężyła dla silnych oddziaływań chromodynamika kwantowa, która jest dość skomplikowaną ale kanoniczną teorią pola, konkurowało z nią podejście propagowane przez Geoffreya Chew, oparte o analityczne własności amplitud przejść, które spełniały relacje dyspersyjne i, ogólniej, tzw. równania Low, żądano przy tym samouzgodnienia i zdominowania przez osobliwości. Podejście to doprowadziło do wnikliwego poznania własności analitycznych amplitud przejść, ale fizycznie się wyczerpało. Znalazło to wyraz w jego ironicznej nazwie „*bootstrap*” zaczerpniętej z angielskiego tłumaczenia

niemieckiej bajki o baronie Münchhausenie, który wyciągnął się z trzęsawiska za swoje własne strzemiączka od butów.

* * *

W świecie fermionów nie wykazujących silnych oddziaływań, leptonów, występują trzy leptony naładowane e^- , μ^- , τ^- i trzy odpowiadające im neutrina ν_e , ν_μ , ν_τ o zerowym ładunku. Odkrywano je kolejno w ciągu wielu lat. Przed powstaniem IFT UW znano tylko e^- , μ^- , ν . Było wtedy sprawą otwartą, czy neutrino mionowe jest różne od elektronowego. Z punktu widzenia słabego izospinu generującego chiralną symetrię $SU(2)_L$ leptony te tworzą, podobnie jak kwarki, trzy dublety lewoskrętne:

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix}_L, \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu^- \end{pmatrix}_L, \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau^- \end{pmatrix}_L$$

oraz sześć singletów prawoskrętnych:

$$\nu_{eR}, e^-_R, \nu_{\mu R}, \mu^-_R, \nu_{\tau R}, \tau^-_R,$$

występują więc trzy pokolenia (generacje) leptonów, podobnie jak kwarków. W odróżnieniu od kwarków nie obserwuje się, jak dotąd, przejść kwantowych między dubletami (ze zmianą liczby pokoleniowej) z wyjątkiem zjawiska oscylacji neutrin. Również w przypadku leptonów mówimy o sześciu zapachach (*flavors*) $\nu_e, e^-, \nu_\mu, \mu^-, \nu_\tau, \tau^-$. Jednakże, neutrina prawoskrętne (w przeciwieństwie do neutrin lewoskrętnych) nie pojawiają się w prądach elektroślabych modelu Weinberga-Salama. Nie występowałyby więc wcale w Modelu Standardowym, gdyby były bezmasowe.

Tymczasem, pod koniec dwudziestego wieku okazało się eksperymentalnie, w zgodzie z przewidywaniami Pontecorvo jeszcze z lat pięćdziesiątych (1957), że – podczas swobodnego ruchu – neutrina lewoskrętne, produkowane jako stany zapachowe, stają się zależnymi od czasu superpozycjami trzech lewoskrętnych stanów masowych neutrin o małych ale niezerowych masach (mieszanie Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata stanów masowych w zapachowe i odwrot-

nie). Objawia się to oscylacjami między trzema neutrinami lewoskrętnymi w stanach zapachowych, które obserwujemy w detektorze na końcu drogi od ich obszaru produkcji do obszaru detekcji. To odkrycie masy neutrin zmusza nas do wprowadzenia do Modelu Standardowego (po złamaniu symetrii elektroślabej) wyrazów masowych dla neutrin (niediagonalnych dla ich stanów zapachowych). Do tego celu konieczne są neutrina prawoskrętne ν_R obok neutrin lewoskrętnych ν_L (wyrazy masowe typu Diraca) lub antyneutrin lewoskrętnych $(\nu^c)_L = (\nu_R)^c$ (wyrazy masowe typu Majorany). Mogą też być użyte neutrina lewoskrętne ν_L obok antyneutrin prawoskrętnych $(\nu^c)_R = (\nu_L)^c$ (inne wyrazy masowe typu Majorany, zwykle pomijane w popularnym modelu *seesaw*). Gdy występują wyrazy masowe typu Majorany, stany masowe neutrin stają się identyczne ze stanami masowymi antyneutrin. Mówimy wtedy, że neutrina są typu Majorany.

Dla neutrin typu Majorany możliwy jest bezneutrinowy podwójny rozpad β ($0\nu\beta\beta$), np. $nn \rightarrow pp e^- e^-$ (w jądrze, o ile energia na to pozwala). Jest to kryterium istnienia neutrin typu Majorany.

* * *

W tym miejscu kończę mój pobieżny przegląd wielkich wydarzeń w fizyce oddziaływań fundamentalnych, które przeżywaliśmy z perspektywy IFT UW, w większości na wczesnym etapie jego historii, i do których niekiedy zbliżaliśmy się we własnych pracach. O późniejszych wydarzeniach nie będę więcej mówił, nie tylko ze względu na timing, ale również z tej prostej przyczyny, że naprawdę w teorii cząstek elementarnych poza Modelem Standardowym nic pewnego ciągle jeszcze nie wiemy. Dotyczy to m.in. roli supersymetrii w przyrodzie, mimo jej atrakcyjnych cech formalnych, nie mówiąc już o superstrunach mimo ich matematycznego wdzięku.

Istnieje jednak od tego istotny wyjątek, mianowicie przekonująca ewidencja za występowaniem we wszechświecie ciemnej materii dominującej ilościowo (ok. 80% : 20%) zwykłą materię podlegającą Modelowi Standardowemu. W niedalekiej przyszłości prawdopodobnie ona będzie jednym z głównych

obiektów dla fizycznych (i oczywiście astrofizycznych) badań fundamentalnych. Dziś ciągle niewiele wiemy o jej naturze, w szczególności, czy jest czy też nie jest ściśle sterylna względem materii Modelu Standardowego (gdy wyłączymy grawitację). Oczywiście, ciemna materia oddziałuje grawitacyjnie z materią Modelu Standardowego w pewnym sensie z definicji. Przypuszcza się na ogół, że również pozagrawitacyjnie nie jest w pełni sterylna, co by otwierało szersze możliwości jej badania (które już w tej chwili biegnie wartkim nurtem). Popularnym przypuszczeniem jest wiązanie ciemnej materii z tzw. neutralinami występującymi w supersymetrii.

Na samo zakończenie jeszcze jedna uwaga. Rozwój fizyki w ostatnich dziesięcioleciach wskazuje, że jej pierwotny uniwersalizm, tak widoczny w mechanice klasycznej Newtona, termodynamice, teorii grawitacji Einsteina i mechanice kwantowej Schrödingera, zmienia charakter: coraz mniej mamy podstawowych równań jednakowych dla wszystkich rodzajów materii, a więcej zgodnych z uniwersalnymi grupami symetrii (ściślejszej i łamanej), realizujących się różnie dla różnych rodzajów materii. Przy tym, pojawiające się grupy nie są najprostsze i niekiedy występują parokrotnie (dla pokoleń). Stąd wiele liczb kwantowych i wiele wolnych parametrów (wiele stopni swobody, trochę jak w botanice i zoologii, ale na szczęście nie w takiej obfitości).