

TOMASZ MICHNIOWSKI
Lublin

ZAGADNIENIE CZĄSTKI ELEMENTARNEJ W FIZYCE I W KOSMOLOGII

Poszukiwania najbardziej elementarnych składników substancji, z której zbudowany jest wszechświat, sięgają zarania nauki. Pierwotna dyskusja na temat ewentualnie ziarnistej lub ciągłej natury świata i substancji, w której doniosłe znaczenie miała zaproponowana jeszcze w starożytności przez Demokryta i Leucypa koncepcja atomu, rozstrzygnięta została w w. XVIII i XIX poprzez odkrycie podstawowych praw chemii, zasadniczo wykluczających koncepcję ciągłej budowy materii. Chwilowy komfort w nauce, związany z przekonaniem o elementarnej naturze atomu, prysł jednak w momencie odkrycia elektronu przez Thompsona. Okazało się, że atom jest najmniejszą drobiną materii, mającą własności określonego pierwiastka chemicznego, z pewnością jednak nie jest najmniejszą drobiną substancji jako takiej. Dla zrozumienia istoty całej przyrody konieczne okazało się wejrzenie w głąb struktury atomowej. Chemia, jako nauka, ze swej natury nie była predysponowana do badań w tym zakresie skal wielkości. Dziedzinę, której przedmiot badań był adekwatny do postawionego problemu, dziś nazywamy fizyką atomową. Pytanie o elementarność obiektów badanych w tej skali nie zostało jednak rozstrzygnięte. Wkrótce okazało się, że przenosi się ono „piętro niżej”, do wnętrza jądra atomowego (fizyka jądrowa). W kolejności, po II wojnie światowej, zagadnienie elementarności zaczęło być rozważane na poziomie poszczególnych cząstek, m.in. konstytuujących jądro atomowe (fizyka cząstek elementarnych), jakkolwiek i tu nie znalazło rozstrzygnięcia. Bardziej subtelne modele, za pomocą których problem elementarności rozważa się w okresie minionych trzech dekad, wchodzi w skład dziedziny zwanej fizyką oddziaływań elementarnych albo krótko fizyką pola.

Ogromne nakłady finansowe ponoszone obecnie na badania w tej dziedzinie przez wszystkie znaczące ośrodki naukowe, państwa i organizacje ponad-

narodowe na całym świecie nie mają li tylko na celu zaspokojenia intelektualnych zachcianek filozofów. W trakcie dotychczasowych badań zagadnienia okazało się bowiem, iż problem elementarności wiąże się z rozumieniem całej fizyki, zarówno w odniesieniu do jej zastosowań lokalnych, jak i teorii globalnych (kosmologicznych). To zaś w dużej mierze warunkuje możliwość jej, fizyki, dalszego rozwoju. Jakkolwiek w obecnej chwili fizycy na całym świecie nie mogą skarżyć się na niedomiar zajęć i bezrobocie nie grozi im jeszcze przez długi czas ze względu na konieczność dopracowania ogromnej ilości detali w obszarze wiedzy dotychczas zbadanym, to jednak należy mieć na uwadze fakt, iż bez „generalnego” postępu w fizyce¹ niemożliwe będzie osiągnięcie teorii, a następnie technologii, jakościowo lepszych od obecnie posiadanych. Tych zaś powszechnie się od nauki i naukowców oczekuje, choćby ze względu na coraz większą liczbę osobników zamieszkujących naszą planetę – ludzi nieodwołalnie zainteresowanych pozyskiwaniem określonych dóbr i narzędzi. W tym kontekście zagadnienie nabiera dramatycznego charakteru starań o dalszy rozwój cywilizacji, a być może i o jej przetrwanie.

Istotność badań w zakresie struktur elementarnych wydaje się we współczesnej nauce nie do przecenienia.

I. WTRĘTY HISTORYCZNE

W klasycznym okresie fizyki (aż do początku XX w.), zagadnienie obiektu elementarnego w znacznej mierze sprowadzało się do znalezienia najmniejszej (i niepodzielnej już) cząstki (lub: cząstek), która mogłaby stanowić najmniejszą „cegiełkę” materii. Określenie jej własności mogłoby prowadzić do ścisłego, w ramach mechaniki klasycznej, opisu jej ruchów oraz oddziaływania z innym cząstkami. Tym samym możliwe byłoby co najmniej jakościowe określenie praw opisujących własności materii w obrębie trzech stanów skupienia (stałego, ciekłego i gazowego), a w najgorszym razie, gdyby zagadnienie okazało się w sposób ogólny zbyt skomplikowane rachunkowo – przeliczenie konkretnego stanu i uzyskanie stanu deterministycznie następnego. Od razu widać², iż konkretnych wyników można by oczekiwać jedynie w odniesieniu do układów konstytuowanych przez niewielką liczbę cząstek elementar-

¹ Między innymi związanego z adekwatnym pojmowaniem zagadnienia elementarności.

² Tak zwany problem wielu ciał nie ma ogólnego rozwiązania analitycznego.

nych. O obliczeniach „dla dowolnej liczby cząstek”, nawet w ujęciu statystycznym, nie można by marzyć z dokładnością lepszą niż jakościowa, a o ujęciu globalnym (kosmologicznym) można by jedynie spekulować. Problem znalezienia cząstki naprawdę elementarnej miał więc na gruncie fizyki klasycznej bardziej prestiżowy niżli poznawczy wymiar.

Mimo to, a może raczej – dlatego, sprawa wydawała się dosyć prosta: znalezienie cząstki elementarnej dokonać się może (i – jak wierzano – ostatecznie dokona) w wyniku żmudnych, precyzyjnych eksperymentów, dających wgląd w głąb struktur materii. Jak już powiedziano, w pewnym okresie za „elementarny” można było uważać atom. Jego potwierdzenie³ i sklasyfikowanie w tabeli układu okresowego było wielkim dokonaniem XIX-wiecznej chemii. Zaznaczył się, co prawda, pewien dyskomfort naukowy związany z liczbą pierwiastków (wiele cząstek elementarnych, różnych, choć o sekwencyjnie podobnych właściwościach), lecz nie czyniło to jeszcze odkrycia sprzecznym lub bezwartościowym. Rzecz skomplikowała się dopiero po wyizolowaniu elektronu (1897). W momencie, gdy okazało się, że atom *musi* mieć *jakaś* strukturę wewnętrzną, nie było możliwe traktowanie go dłużej jako cząstki „elementarnej”.

Fakt ten w zasadzie był naukowo wygodny: niczego nowego nie wnosił do samego pojmowania zagadnienia elementarności, a jednocześnie dawał nadzieję na znalezienie kilku rzeczywiście „elementarnych” cząstek, z których można będzie konstruować (i przewidywać!) atomy różnych pierwiastków, odtwarzając ich właściwości w sposób oczywisty okresowo powtarzające się. Co więcej, niektóre z tych „nowych” cząstek elementarnych, występując w oderwaniu od struktur atomowych, mogłyby być odpowiedzialne za inne, „niematerialne” zjawiska, jak np. prąd elektryczny (strumień elektronów). Tak więc odkrycie Rutheforda i współpracowników (1911), jakkolwiek zaskakujące wynikiem⁴, nie stanowiło jeszcze rewolucji w fizyce. Dopiero próba opisu atomu składającego się z masywnego jądra i lekkich elektronów, dokonana przez Bohra (1913), pokazała, że struktura taka nie może istnieć w rozumieniu klasycznym⁵.

³ Pośrednie – poprzez prawa chemiczne, np. stałości związku etc.

⁴ Stosunek rozmiarów (oraz masy) jądra do masy elektronów był zaskakująco duży.

⁵ Zgodnie ze znanymi już wówczas prawami Maxwella elektron krążący klasycznie po orbicie wokół jądra powinien promieniować elektromagnetycznie w płaszczyźnie orbity. Energię tego promieniowania czerpać mogłyby jedynie z zasobu swej energii potencjalnej związanej z promieniem orbity, co oznacza, że musiałyby w krótkim czasie spaść na jądro, kończąc istnie-

Postulaty Bohra⁶, hipoteza de Broglie'a⁷ i założenie Plancka⁸ sygnowały nieuświadomione jeszcze w pełni odkrycie, iż rzeczywistość fizyczna w mikroskali nie da się poprawnie opisywać w sposób klasyczny. Dopiero więc pojawienie się w połowie lat dwudziestych nowego modelu, dziś nazywanego modelem mechaniki kwantowej⁹, pozwoliło w pełny i weryfikowalny sposób dokonać opisu struktury atomu. Było to poważne osiągnięcie, które, w miarę rozwoju modelu kwantowego, pociągnęło rychłą zmianę samego pojęcia elementarności. Formalizm mechaniki kwantowej, znajdujący dowcipną egzemplifikację w paradygmacie „kota Schrödingera”¹⁰, uzmysłowił badaczom kilka niesłychanie istotnych rzeczy jednocześnie, a przede wszystkim, że:

- materia nie jest „obiektywna”, lecz stanowi pewną superpozycję subtelniejszych stanów wirtualnych;
- obserwowane (różne) obiekty fizyczne mogą być różnymi manifestacjami tego samego układu kwantowego;
- pomiar niektórych cech fizycznych obiektu mikroskopowego jest w ogólności niemożliwy ze względu na nieoznaczoność Heisenberga¹¹;

nie konkretnego atomu.

⁶ Założenia nie znajdujące usprawiedliwienia na gruncie mechaniki klasycznej, które musiałyby zostać przyjęte, aby „uratować” atom o strukturze sugerowanej przez Rutheforda.

⁷ O tzw. falach materii. Z rozważań wynikało, że każda cząstka powinna wykazywać co najmniej niektóre własności falowe i odwrotnie – każda fala powinna mieć własności korpuskularne.

⁸ Mówiące, iż oscylatory harmoniczne, którymi są atomy w określonej temperaturze, powinny posiadać dyskretne widmo energii kinetycznych, a stałą charakterystyczną powinna być h , jedna z trzech fundamentalnych stałych przyrody, dziś zwana stałą Plancka. Założenie to pozostawało w zgodzie z późniejszymi postulatami Bohra.

⁹ Skonstruowanego przez Schrödingera, Heisenberga i Diraca na przestrzeni liniowej, zespolonej (Hilberta).

¹⁰ Doświadczenie myślowe zwane zagadnieniem „kota Schrödingera” jest następujące. W szczelnie zamkniętym pudle znajdują się kot i trucizna. Działanie trucizny jest uzależnione od rozpadu pojedynczego atomu radioaktywnego pierwiastka. Pytanie: czy po czasie t_k kot w pudle jest żywy czy nieżywy? Doświadczenie ukazywało, że klasyczne pojęcie stanu fizycznego nie ma w ogólności sensu w mechanice kwantowej. Do chwili bowiem otwarcia pudła żaden ze stanów kota (żywy / nieżywy) nie manifestuje się. Kot jest zatem superpozycją obu swych stanów wirtualnych, podobnie jak atom (którego rozpad uaktywnia truciznę) jest superpozycją swych kwantowych stanów wirtualnych.

¹¹ Niektóre wielkości fizyczne nie komutują, tzn. że ich iloczyn zależy od kolejności czynników.

- przyroda nie jest deterministyczna, lecz – w najlepszym razie – może wykazywać determinizm ograniczony do przedziałów wyznaczonych zasadą nieoznaczoności;
- na przyjmowanie określonych wartości parametrów fizycznych przez niektóre obiekty mikroskopowe nałożone jest silne ograniczenie w postaci zakazu Pauliego¹²;
- własności poszczególnych cząstek określone są nieprzypadkowo przez zbiór związanych z ich stanami energetycznymi liczb kwantowych¹³;
- niemierzalność określonej cechy fizycznej danej cząstki jest konsekwencją zerowania się odpowiednich jej liczb kwantowych;
- że, co wynika z poprzedniego – cząstki bezmasowe lub neutralne elektrycznie nie są ani mniej, ani bardziej „materialne” od innych cząstek posiadających masę, ładunek elektryczny lub inne cechy fizyczne.

Odkrycia te, uprawomocnione zgodnością¹⁴ ze znaną już od 1905 r. słynną zależnością Einsteina $E = mc^2$, pozwoliły spojrzeć na zagadnienie elementarności w zupełnie innym świetle. Jeżeli każdy stan fizyczny jest pewną sumą stanów wirtualnych, a co za tym idzie, nie jest on klasycznie lokalizowalny ani mierzalny, wówczas oczekiwać należy, iż podobnymi własnościami będzie charakteryzował się również obiekt (lub: obiekty) elementarny. Nie należy zatem oczekiwać znalezienia cząstki elementarnej w sensie dosłownym, umożliwiającym, mówiąc pół-żartem, umieszczenie wzorca takiego obiektu w Biurze Miar i Wag pod Paryżem, lecz spodziewać się można jedynie odkrycia (zdefiniowania) pewnego zbioru wirtualnych stanów energetycznych, którego rzeczywista manifestacja¹⁵ jest najbardziej podstawową z możliwych. „Elementarność” takiego obiektu (lub: obiektów) sprowadzałaby się do konstatacji, że inne obiekty fizyczne byłyby różnymi jego (ich) kombinacjami.

Oczywiście, zanim powyższe (i inne) wnioski zostały wyartykułowane, minęło sporo czasu, w którym badania struktury materii przeniosły się na

¹² W tym samym stanie nie mogą ukazywać się jednocześnie dwa obiekty o tych samych własnościach fizycznych (liczbach kwantowych).

¹³ Co w znaczeniu ogólnym oznacza również, że np. elektron nie „przenosi” ładunku elektrycznego, lecz że ładunek ten jest jego integralną cechą, której nie można zmienić w sposób dowolny (mówiąc trywialnie: nie da się „naelektryzować” elektronu ani mniej, ani bardziej). To samo dotyczy większości innych liczb kwantowych (własności cząstek).

¹⁴ Równoważność energii i materii oraz możliwość przechodzenia jednego w drugie są zgodne z rozumieniem zjawisk kreacji-anihilacji na gruncie kwantowomechanicznym.

¹⁵ W sensie: reprezentowana przez operatory hermitowskie.

kolejne „piętro” skal wielkości, a mianowicie do wnętrza jądra atomowego. Po odkryciu neutronu przez Chadwicka (1932) oraz po pracach Pauliego, Diraca i Yukawy (1930-35)¹⁶ fizyka atomu zmieniła się w fizykę jądra atomowego. Wprowadzenie pojęcia nukleonu przez Heisenberga (1935) było znakiem tej zmiany. Aktualnymi kandydatami do roli obiektów elementarnych stały się poszczególne cząstki: elektron, proton i neutron. Badania jąder składających się z protonów i neutronów nieuchronnie doprowadzić musiały do pytania o sposób ich wzajemnego oddziaływania. Dawne klasyczne hipotezy fluidów były całkowicie nieprzydatne na gruncie mechaniki kwantowej, co więcej, znane dotychczas oddziaływania¹⁷ nie wystarczały do usprawiedliwienia obserwowanej struktury jądra. Pozornie karkołomna hipoteza Yukawy z połowy lat trzydziestych, zakładająca istnienie cząstek pośredniczących, które mogłyby przenosić oddziaływanie¹⁸, naprowadziła Breita i Wigniera (1936-37) na pytanie o pełną liczbę oddziaływań fundamentalnych¹⁹. Odpowiedzi na to pytanie można było udzielić badając własności poszczególnych cząstek, niekoniecznie w strukturze jądra. Pełne zdumienia „*who ordered that?!*”²⁰ Rabiego (1947), będące reakcją na odkrycie kolejnej cząstki²¹, oznaczało przejście badań na kolejny „poziom” istotności, dziś zwany poziomem fizyki cząstek elementarnych.

Fizyka jądrowa, pomimo wielkich osiągnięć teoretycznych i praktycznych, z których najbardziej spektakularnymi były eksplozje pierwszych bomb atomowych, nie zdołała rozstrzygnąć zagadnienia obiektu elementarnego. Po raz

¹⁶ Między innymi zapostulowano neutrino, podjęto próbę opisu matematycznego rozpadu β . Wyjaśniono istotę zjawiska anihilacji i in.

¹⁷ Na początku lat trzydziestych wciąż jeszcze znano tylko oddziaływania grawitacyjne i elektromagnetyczne.

¹⁸ Mechanizm przenoszenia oddziaływań jest w tym ujęciu analogiczny do oddziaływania dwóch mijających się pojazdów, pomiędzy którymi przeskakują pasażerowie; pojazdy są w tej analogii cząstkami oddziałującymi, skaczący zaś ludzie – wymienianymi cząstkami pośredniczącymi. Pomimo iż pojazdy się nie stykają, oddziaływanie następuje, a jego konsekwencją jest zmiana pędu przez oba mijające się obiekty.

¹⁹ Pierwszą teorię (nie ostateczną) rozpadów β , jak dziś wiemy, będących konsekwencją oddziaływań słabych, sformułował Dirac w 1932 r. Hipoteza Yukawy o cząstkach pośredniczących oznaczała wprowadzenie kolejnego oddziaływania o charakterze fundamentalnym. Jeśli mogłyby istnieć cząstki przenoszące jakieś oddziaływanie, to może inne cząstki byłyby w stanie przenosić inne oddziaływania. Jaka jest więc liczba oddziaływań w przyrodzie?

²⁰ „A któż to zamawiał?!”

²¹ Był nią mion. Zdumienie Rabiego wynikało z faktu, iż nowo odkryta cząstka była zupełnie „niepotrzebna” z punktu widzenia teorii atomu.

kolejny okazało się, że po odpowiedź sięgnąć trzeba do skal wielkości i energii dotychczas jeszcze nie badanych. W tym obszarze załamują się ostatecznie wszelkie pojęcia i wyobrażenia klasyczne, a jakiegokolwiek próby modelowania zjawisk poprzez analogie do doświadczeń zmysłowych i „zdroworozsądkowych” wynikań prowadzą do kompletnych nieporozumień. Zrozumienie fizyki w skali cząstek elementarnych wymaga dobrej znajomości geometrii i prawdziwie detektywistycznych zdolności kojarzenia faktów pozornie odległych i nie związanych.

Na przełomie lat pięćdziesiątych i sześćdziesiątych, przy pełnej świadomości faktu istnienia czterech oddziaływań fundamentalnych²², zaczęto dostrzegać określone zależności dotyczące liczb kwantowych cząstek i poszczególnych oddziaływań. Zauważono zatem, iż zjawiska z udziałem każdego z oddziaływań przebiegają z zachowaniem energii, krętu, ładunku elektrycznego oraz barionowej i leptonowej liczby kwantowej. Tymczasem zachowanie niektórych spośród innych liczb kwantowych zachodzi jedynie w zjawiskach związanych z określonym oddziaływaniem, np. izospin²³ zachowuje się jedynie w zjawiskach z udziałem oddziaływań silnych, jego zaś trzecia składowa oraz dziwność – słabych. Były to wyniki trudne do wyjaśnienia w ówczesnym okresie, a z upływem czasu odkrywano kolejne zaskakujące fakty (Wu, Lee i Yang), jak niezachowanie parzystości (P) w zjawiskach z udziałem oddziaływań słabych, a także brak niezmienniczości względem sprzężenia ładunkowego (C). Próba ratowania dotychczasowego rozumienia zjawisk w obrębie teorii Fermiego, dokonana przez Cabibo i polegająca na dołączeniu do teorii kolejnego parametru (tzw. kąta Cabibo), nie przyniosła rezultatu w postaci ogólnego prawa zachowania²⁴. Fundamentalne zagadnienie zachowania w zjawiskach subjądrowych zaczęło się komplikować coraz bardziej. Wyjaśnienie nadeszło z niespodziewanej strony.

Już od czasów Yukawy i Diraca opisywano zjawiska jądrowe w kategoriach geometrycznych, odwołując się do pojęcia symetrii. Potocznie przez symetryczny rozumie się obiekt, który nie zmienia swej postaci ze względu

²² Było to już m.in. po odkryciu elektrodynamiki kwantowej przez Feynmana, Tomonagę i Schwingera (1948-1949), a także po zidentyfikowaniu mezonu, hiperonów, neutrina elektronowego, niektórych antycząstek i rezonansów.

²³ Pojęcie izospinu wprowadził Heisenberg, próbując opisać protony oraz neutrony jako dwa stany tej samej cząstki.

²⁴ Niezachowanie parzystości CP w rozpadach leptonów neutralnych odkryli Cronin i Fitch (1964).

na określone przekształcenie, np. translację, obrót, odbicie itd. Idąc za tym skojarzeniem, niezmienniczość zjawisk fizycznych w danym układzie odniesienia nazywa się symetrią. Można zdefiniować grupę symetrii²⁵, której elementy reprezentują niezmienniczość obiektu względem określonych przekształceń. Zagadnienie zachowania w fizyce sprowadza się zatem do znalezienia w strukturze modelu odpowiednich obiektów geometrycznych²⁶. W ten sposób udało się skojarzyć zachowanie izospinu z grupą $SU(2)$. Na początku lat sześćdziesiątych Gell-Mann dokonał próby rozszerzenia grupy izospinu o zjawiska związane z wymianą liczby kwantowej dziwności. W efekcie otrzymał on grupę $SU(3)$, względem której niezmiennicze okazały się oddziaływania silne. Odkrycie uczyniło możliwym wprowadzenie nowej klasyfikacji hadronów, a to z kolei oznaczało wskazanie kolejnych cząstek, które z czasem zidentyfikowano. Teraz odkrycia nabrały tempa: charakterystyczne własności wszystkich odkrytych hadronów i mezonów sugerowały istnienie substruktury wszystkich znanych cząstek, a logicznym jej usprawiedliwieniem były subcząstki zwane kwarkami²⁷. Odtąd hadrony traktowano jako cząstki składające się z trzech elementów substruktury kwarkowej, mezony zaś – z dwóch. Fizyka zstąpiła na kolejny poziom struktury materii odpowiadający kolejnym skalom wielkości²⁸.

Ujęcie geometryczne okazało się bardzo efektywnym narzędziem w badaniu zjawisk fizycznych w mikroskali. Wnioskowanie w fizyce, szczególnie w odniesieniu do tak odległej od klasycznych klasy zjawisk, jest niezmiernie trudne, jeśli nie niemożliwe bez ujęć modelowych. Dostrzeżenie koincydencji pomiędzy zjawiskami pozornie rozłącznymi może być jedynie sprawą przypadku, a wszelkie ekstrapolacje natrafiają niemal natychmiast na ograniczenia prawomocności. „Odgadnięcie” kolejnego elementu teorii jest w zasadzie niemożliwe, co więcej, wobec ogromnych kosztów aparatury doświadczalnej jest ono nieweryfikowalne na drodze eksperymentalnej²⁹. Najkrócej mówiąc,

²⁵ Która jest strukturą algebraiczną spełniającą określone aksjomaty.

²⁶ Zależność ta wyrażana jest przez tzw. twierdzenie Noether, mówiące, że prawa zachowania związane są z odpowiednimi grupami symetrii, które da się zdefiniować na geometrycznej strukturze modelu reprezentującego daną rzeczywistość fizyczną.

²⁷ Wprowadzone przez Gell-Manna i Zweiga w 1964 r.

²⁸ Fizyka atomowa dotyczy zjawisk w skali większej niż 10^{-10} m, fizyka jądra odpowiednio 10^{-15} m, fizyka cząstek dotyczy skali ponad 10^{-18} m. W skali mniejszej mówi się o teorii oddziaływań elementarnych.

²⁹ Nigdy bowiem nie wiadomo, czy brak potwierdzenia wyniku oznacza ułomność koncepcji, czy związany jest z niedoskonałością pomiaru w sensie metody, niepewności, technologicz-

jest konieczne, by przystępując do eksperymentu weryfikującego dane element teorii, być w pełni świadomym, czego się szuka, gdyż najmniejsze nieporozumienie w tym względzie oznacza zmarnowanie ogromnej ilości czasu i wielkich środków finansowych. Podejście geometryczne umożliwiło znaczący postęp w rozumieniu zjawisk mikroświata poprzez wykorzystanie struktur geometrycznych modelujących fizyczną rzeczywistość³⁰.

Skojarzenie zjawisk z udziałem niektórych oddziaływań z odpowiednimi grupami symetrii było punktem wyjścia do poszukiwania bardziej ogólnych struktur geometrycznych, potencjalnie modelujących wszystkie oddziaływania jednocześnie. Największym dotychczas osiągnięciem w tym zakresie jest odkrycie Weinberga i Salama z 1967 r., rozwinięte przez następców w tzw. model (teorię³¹) oddziaływań elektroślabych. Grupa oddziaływań elektroślabych (nieprzemienna³²) ma postać $SU(2) \times U(1)$ ³³. Nieabelowość członu $SU(2)$ generuje sprzężenie pomiędzy cząstkami (bozonami) pośredniczącymi, a masy tych bozonów są duże ze względu na krótki zasięg oddziaływań słabych³⁴. Ostatecznie model przewiduje cztery cząstki: masowe bozony W^+ , W^- , Z^0 oraz bezmasowy γ (foton). Trzy z nich (bozony) zidentyfikowano eksperymentalnie dopiero w 1983 r., ale teoria została niezależnie potwierdzona innym, wcześniejszym, odkryciem. Po skonstruowaniu modelu oddziaływań elektroślabych okazało się, że sektor teorii z Z^0 powinien odpowiadać za nieznane wcześniej zjawiska z udziałem hadronów i neutrin. Zjawiska te, niemożliwe do przewidzenia bez reprezentacji geometrycznej, zidentyfikowano w CERN-ie³⁵ w 1973 r. Doniosłość tych odkryć uznano przyznając teoretykom zajmującym się modelem aż dwie nagrody Nobla³⁶. Pośrednio jest to

nych możliwości aparatury lub sposobu gromadzenia i opracowania danych pomiarowych etc.

³⁰ O modelach matematycznych i modelowaniu pisałem kilkakrotnie w „Rocznikach Filozoficznych” z. 3 z r. 1995 i lat następnych.

³¹ W slangu fizycznym często używa się terminów „model” i „teoria” zamiennie; dosłownym odpowiednikiem terminu „teoria” (w rozumieniu: coś, co zostało zaproponowane) jest termin „koncepcja”, zamiennie określane też jako „pomysł”.

³² Czyli: nieabelowa.

³³ Teoria ma być niezmiennicza względem transformacji cechowania.

³⁴ Nieoznaczoność Heisenberga dla energii i czasu ma postać $dE dt = \hbar$. Stąd mamy, że $dE = \hbar/dt$. Krótki zasięg oddziaływań oznacza bardzo krótki przedział czasu dt ($< ds/c$, gdzie ds jest zasięgiem, c zaś – prędkością światła), a to pociąga relatywnie dużą wartość dE . Ponieważ $m = dE/c^2$, masa ta musi być znaczna.

³⁵ *Conseil Europeen pour la Recherche Nucleaire* – Europejskie Centrum Badań Jądrowych.

³⁶ Salamowi, Glashowowi i Weinbergowi w 1978 r. (za wkład w konstrukcję modelu

uznanie dla fizyków, którzy od paradygmatu mechanicystycznego zdołali w ciągu kilkudziesięciu lat przejść mentalnie do swoistego platonizmu: matematyka na tyle dobrze naśladuje rzeczywistość fizyczną, iż poznawanie tej ostatniej w strukturach zwanych modelami umożliwia poznawanie świata fizycznego³⁷.

Jak widać z powyższych wypisów, zagadnienie elementarności dokonało w XX stuleciu karkołomnej ewolucji. Ewolucja ta biegła od klasycznie dosłownego rozumienia terminu „cząstka elementarna”, związanego z wyobrażeniem cząstki jako obiektu materialnego o ustalonych właściwościach fizycznych, do efemerycznego, niemal platońskiego, pojmowania go jako kwantu pola³⁸. Cząstka elementarna u końca XIX w. mogła być przedmiotem, który można by umieścić w charakterze wzorca do oglądania przez wycieczki szkolne w jednej z gablot Biura Wag i Miar. Sto lat później ten sam obiekt oznacza określoną matematykę, w której prawdziwość wierzymy, gdyż sprawdza się ona w niesłychanie kosztownych i skomplikowanych eksperymentach. Sprawdza się, oczywiście, bynajmniej nie zmysłowo; fizycznym potwierdzeniem prawdziwości postaci określonego obiektu matematycznego w strukturze modelu są jedynie mrugające diody urządzeń pomiarowych i wijące się linie wykresów na ciekłokrystalicznych wyświetlaczach.

II. CO WIADOMO OBECNIE

Zagadnienie cząstki elementarnej u końca XX stulecia jest poznawczo wieloznaczne i jednocześnie bardziej otwarte niż kiedykolwiek wcześniej. Dotyczy ono rozumienia struktur matematycznych, w szczególności struktury noszącej w literaturze miano „standardowego modelu oddziaływań elementarnych”. Model ten pozwala nam na tyle rozumieć fizykę obiektów zwanych cząstkami elementarnymi, że pokusić się możemy obecnie zarówno o klasyfi-

oddziaływań elektrosłabych), t'Hooft-owi zaś w 1999 r. (za dowód renormalizowalności teorii elektrosłabej ze spontanicznym naruszeniem symetrii cechowania).

³⁷ Eksperyment pełni tu jedynie funkcję instancji weryfikującej odkrycia poczynione na drodze analitycznej. Jest to, co prawda, instancja ostateczna; niezgodność teorii z eksperymentem odbiera rację bytu tej pierwszej.

³⁸ Aby wielkość tej zmiany podkreślić, należy zauważyć, że pojęcie pola fizycznego obecnie i sto lat temu, abstrahując od formalnych podobieństw definicyjnych, prowadziło do całkowicie odmiennych skojarzeń. Termin „kwant” pojawił się natomiast wraz z mechaniką kwantową i na początku XX w. w ogóle nie istniał.

kowanie cząstek, jak i o próby przewidywania własności obiektów nie odkrytych, a nawet o działania zmierzające ku wyjaśnieniu mechanizmów zjawisk fizycznych w zakresie skal subjądrowych. Nie znaczy to bynajmniej, że mamy w tym względzie ostateczną wiedzę i ustalony pogląd na sprawę.

Klasyfikacja odkrytych cząstek, znajdująca odzwierciedlenie w ich nazewnictwie, jest skomplikowana. Ze względu na tzw. statystykę³⁹ cząstki dzieli się na tzw. fermiony i bozony (od nazwy typu rozkładu). Fermiony dzielą się z kolei na kwarki i leptony⁴⁰. Układy kwarkowe, które są silnie oddziaływającymi⁴¹ fermionami, noszą nazwę barionów, hadrony zaś, stanowiące układy kwarkowe podlegające statystyce Bosego-Einsteina (bozony), nazywane są mezonami⁴².

Hadrony, występujące w powyższej klasyfikacji, są cząstkami o strukturze kwarkowej. Kwarki, będące fermionami, mają m.in. niezerowe liczby kwantowe koloru (ładunku silnego), które podlegają wymianie w oddziaływaniach silnych (dla kwarków możliwe są trzy różne wartości koloru – tzw. żółty, czerwony i zielony⁴³). Oddziaływania silne są niezmiennicze względem lokalnych transformacji cechowania układów odniesienia w fazowej przestrzeni koloru⁴⁴. Oznacza to, że istnieje grupa generatorów reprezentujących owe transformacje (symetria), a grupą tą w przypadku oddziaływań silnych (kolorowych) jest $SU(3)$. Utrzymanie niezmienniczości wymaga jednak wprowadzenia pól cechowania, których bezmasowe kwanty (zwane gluonami, występują w ośmiu kolorach) są bozonami i również wchodzi w skład zbioru obiektów elementarnych⁴⁵.

³⁹ Jest nią funkcja rozkładu statystycznego gazu cząstek w stanie równowagi w określonej energii (temperaturze); ze spełnieniem określonej statystyki (Fermiego-Diraca lub Bosego-Einsteina) związane są określone właściwości cząstek (spin, ładunki ...). Cząstki te również, ze względu na określoną symetrię funkcji falowej, odpowiednio podlegają lub nie zakazowi Pauliego.

⁴⁰ Ze względu na oddziaływanie silne.

⁴¹ Cząstki oddziaływające silnie nazywa się hadronami.

⁴² Źródłosłów nazw jest zazwyczaj grecki, np. termin „mezon” pochodzi od *mesos* (pośredni); wprowadzono go ze względu na masę μ -mezonu, większą od masy elektronu, a mniejszą od masy protonu lub neutronu.

⁴³ Według modelu QCD (*Quantum Chromodynamics*) wszystkie cząstki są „białe”. Oznacza to, że kolorowe liczby trzech kwarków (lub antykwarków) konstituujących bariony muszą dopełniać się do barwy białej, liczby zaś koloru i antykoloru układów: kwark – antykwark konstituujących mezony muszą się znosić.

⁴⁴ W modelu chromodynamiki kwantowej (QCD).

⁴⁵ Gluony mogą wchodzić w skład struktur mezonowych lub barionowych albo też tworzyć

W przypadku oddziaływań elektrosłabych symetrią cechowania⁴⁶ jest grupa $SU(2) \times U(1)$. Foton oraz trzy wzmiankowane już bozony pośredniczące (W^+ , W^- , Z^0) są, w analogiczny sposób, kwantami pól cechowania związanymi z tą symetrią. Spontaniczne naruszenie symetrii oddziaływań elektrosłabych (objawiające się posiadaniem przez cząstki pośredniczące niezerowych mas) może być konsekwencją tzw. mechanizmu Higgsa. Do jego zaistnienia, w najprostszym przypadku, wymagane jest uwzględnienie, w kolejności, dubletu pól skalarnych, co pociąga istnienie co najmniej jednej kolejnej cząstki elementarnej, tzw. bozonu Higgsa⁴⁷. Tak więc wśród bozonów można wskazać cząstki nie mające struktury gluonowo-kwarkowej. Należą do nich cząstki przewidywane standardowo przez grupę elektrosłabą, czyli bozony pośredniczące w wymianie zapachu oraz fotony.

Tak więc ostateczna liczba cząstek elementarnych (zob. diagram) przewidywanych przez model standardowy wynosi co najmniej 61. Składają się na nią kwarki i antykwarki, występujące w trzech kolorach i sześciu zapachach (łącznie 36 cząstek), leptony i antyleptony (elektron, mion, taon oraz ich neutrino – wraz z antycząstkami daje to 12 obiektów), gluony (8), bozony pośredniczące (3), foton oraz bozon Higgsa (co najmniej jeden). Wydaje się, że jest to wielkość zbyt duża, aby można było uznać ją za liczbę określającą „pogłowie” obiektów naprawdę elementarnych, podobnie jak trudno było przed stu laty uznać za elementarne atomy występujące również w liczbie kilkudziesięciu. Nie oznacza to, że obecnie posiadane modele, w tym sam model standardowy, są konstrukcjami niepoprawnymi. Przeciwnie, jak się wydaje, stanowią one jedno z największych osiągnięć naukowych XX stulecia. Model standardowy potwierdza się eksperymentalnie bardzo dobrze aż do skali 10^{-18} m, jest kwantowy i renormalizowalny, spontanicznie narusza symetrię w sektorze elektrosłabym i pozostaje zgodny z przewidywaniami standardowego modelu kosmologicznego⁴⁸. Co więcej, dostarcza refleksji nad znaczeniem terminu „elementarność”, szczególnie w odniesieniu do takich

tzw. gluonia (cząstki „czysto” gluonowe) czy hybrydy (mezon z odpowiednio wzbudzonym gluonem).

⁴⁶ Związaną z niezmienniczością względem układu odniesienia w przestrzeni ładunku elektrosłabego (zapachu).

⁴⁷ Ich liczba może być większa przy innym wprowadzeniu pól skalarnych.

⁴⁸ Tak zwanego modelu Big-Bangu; przewiduje on realizację kolejnych epok ewolucji kosmicznej. Skala energii i wielkości odpowiadająca kolejnym epokom pokrywa się z wielkościami skal dla standardowego modelu oddziaływań elementarnych.

objektów, jak kwarki czy lepton⁴⁹. Jego użyteczność w odniesieniu do zjawisk fizyki jądrowej i cząstek elementarnych jest niezaprzeczalna, niemniej nie ma on charakteru konstrukcji ostatecznej. Przeciwnie, wiele wskazuje, że stanowi jedynie element wciąż nie odkrytego, bardziej ogólnego modelu. Znaczna liczba wolnych parametrów⁵⁰ (w modelu standardowym należą do nich np. masy, kąty mieszania, stałe sprzężenia⁵¹) oraz arbitralny charakter⁵² samego mechanizmu Higgsa są głównymi spośród przyczyn, dla których sądzimy, że do zrozumienia zagadnienia elementarności jest jeszcze daleko, podobnie zresztą, jak do rozumienia wszystkich zjawisk fizycznych w skali subjądrowej. Wyróżniamy na przykład trzy rodziny kwarków i leptonów o identycznych własnościach silnych i elektroślabych, różniących się jedynie masą⁵³. Masa jest jednak parametrem niezwiązanym modelu standardowego i nie potrafimy podać powodów, dla których taki podział egzystuje. Nie wiemy również, czy jest on podziałem istotnym z punktu widzenia teorii i czy istnieją inne podziały podobnego rodzaju. Jeszcze większych trosk dostarcza grawitacja, która w ogóle nie wchodzi w skład struktury modelu i nie daje się ująć za pomocą opisów adekwatnych do struktur ujmujących oddziaływania silne i elektroślabe. Tymczasem włączenie grawitacji do kom-

⁴⁹ Zagadnienie elementarności traci w odniesieniu do tych cząstek swe dotychczasowe, tradycyjne, znaczenie. Jeśli mówi się o obiektach „bardziej elementarnych”, to już nie w dosłownym znaczeniu substruktury, lecz jedynie w odśłownym skojarzeniu. Na przykład elektron (lepton) można uważać za cząstkę bez struktury albo za strukturę złożoną z pary: elektron – foton, albo za strukturę: elektron – elektron – pozyton itp. Odpowiednie traktowanie elektronu określone jest jednakże prawdopodobieństwem związanym z parametrami niezależnymi (stałe sprzężenia). Takie rozumienie substruktury dalekie jest od „zdroworozsądkowego” i „obiektywnego”.

⁵⁰ To znaczy takich, których wartości nie wynikają z modelu.

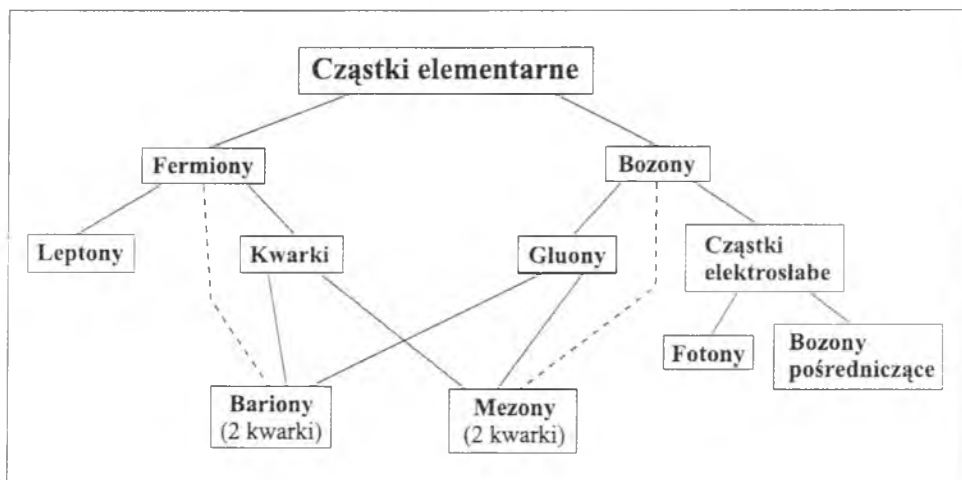
⁵¹ Wskazuje to na nieadekwatność lub zbyt małą subtelność modelu. Na przykład poszczególne oddziaływania różnią się w przyrodzie swą intensywnością („siłą”) o prawie 40 rzędów, nawet zaś w obrębie modelu (nie obejmującego grawitacji) o rzędów 5-6. Tymczasem niezwiązanie parametru stałej sprzężenia oznacza, że nie mamy pojęcia, dlaczego tak jest. „Dobry” model powinien zawierać *jakąś* informację na ten temat.

⁵² Próby skonstruowania mechanizmu Higgsa (i inne zabiegi) polegają m.in. na dobraniu odpowiednich parametrów, aby „wszystko działało”. Tymczasem dobór ten może być niejednoznaczny (różne zestawy parametrów umożliwiają „działanie” mechanizmu), bez sugestii (niezwiązanie) co do aktualności któregoś z zestawów. Wówczas kwestią arbitralnie podjętej decyzji jest przyjęcie lub odrzucenie konkretnego rozwiązania. Może to kosztować wiele czasu i pieniędzy, gdy dojdzie do eksperymentalnych prób zweryfikowania wyników teoretycznych.

⁵³ W skład tzw. rodzin kwarków i leptonów wchodzi odpowiednio: do rodziny I – elektron i neutrino elektronowe, a także kwarki *u* oraz *d*, do rodziny II – mion μ , neutrino mionowe i kwarki *c* oraz *s*, do rodziny III – taon τ , neutrino taonowe i kwarki *t* oraz *b*.

pleksowej teorii oddziaływań może być kluczowe dla rozumienia zjawisk fizycznych w mikroskali.

Krótko mówiąc, model standardowy jest wspaniałym narzędziem w rękach fizyków, ale, jak w przypadku każdego narzędzia, ma swoje ograniczenia.



Klasyfikacja cząstek elementarnych

III. CO DALEJ?

Od ponad dwóch dekad trwają intensywne prace teoretyczne zmierzające do poszerzenia zasięgu modelu standardowego. Dotychczasowe prace przebiegają wedle kilku koncepcji. I tak, postuluje się na przykład wprowadzenie w odpowiedni sposób pól skalarnych odpowiedzialnych za naruszenie symetrii elektroslabej. Wymaga to, oczywiście, założenia kolejnego oddziaływania elementarnego (tzw. oddziaływania technicolorowego), które musiałyby w skali modelu standardowego dawać wkłady zaniedbywalnie małe. Podejście to, jakkolwiek najmniej skomplikowane w sensie pomysłu, ma jednak zasadnicze wady. Obok bowiem niewygodnej metodologicznie arbitralności samej koncepcji pojawiają się podczas praktycznej realizacji istotne trudności z generowaniem mas fermionów. Innym pomysłem (teorie supersymetryczne, SUSY) jest dynamiczne określanie skali spontanicznego naruszenia symetrii.

Wymaga to jednak założenia kolejnych cząstek elementarnych, będących partnerami cząstek już znanych⁵⁴. Szalenie komplikuje to model, kolidując z zasadą prostoty⁵⁵. W dodatku, mimo intensywnych prób, dotychczas nie udało się zidentyfikować choćby jednej cząstki supersymetrycznej⁵⁶.

Niesłuchanie oryginalną koncepcją badawczą jest na tym tle koncepcja superstrun. Na podstawie wiedzy dotychczasowej oraz przesłanek kosmologicznych uważa się, że czasoprzestrzeń nie zawsze w swej historii była strukturą czterowymiarową. W związku z tym można wyobrazić sobie, iż pewne wielowymiarowe obiekty wczesnej próżni mogły w wyniku kompaktyfikacji niektórych wymiarów przybrać postać swoistych „strun”⁵⁷, które w obecnej przestrzeni tworzą zróżnicowane konfiguracje. Lokalnie⁵⁸ struny takie (a mówiąc bardziej precyzyjnie: ich stany energetyczne, zwane wzbudzeniami) mogłyby reprezentować określone cząstki, oddziaływania zaś pomiędzy cząstkami mogłyby być uważane za wynik „mieszania się” rozmaitych strun w rozmaitych stanach energetycznych. Poszczególne procesy jądrowe dałoby się zilustrować ewolucją strun, na przykład rozpad cząstki mógłby być uważany za wynik zapętlenia struny i następnie jej rozpadu na dwie niezależne struktury o określonej geometrii⁵⁹ (zob. rysunek). Koncepcja superstrun w naturalny sposób koresponduje z teoriami SUSY, wydaje się również – co bardzo ważne – godzić formalizm mechaniki kwantowej z ogólną teorią pola.

Podobnie ma się rzecz z poszukiwaniem substruktur znanych obecnie cząstek. Skoro bowiem identyfikujemy na przykład różne rodziny fermionów, to (ponownie nasuwa się analogia z atomami w układzie okresowym pierwiastków) być może należy oczekiwać istnienia wewnętrznej struktury tych ostatnich. Ponieważ jednak mowa jest o bardzo małych już hipotetycznych obiektach, oczekiwać należy ogromnych energii wiązań⁶⁰, zbyt dużych na

⁵⁴ Cząstki te powinny mieć energie rzędu TeV (por. przyp. 34 niniejszego artykułu).

⁵⁵ Uważa się, że z wielu możliwych modeli prawdziwy jest ten, który jest najprostszy. Swoistą egzemplifikacją tej „zasady” jest fakt poruszania się cząstek próbnych w czasoprzestrzeni po geodetykach (najkrótszych z linii łączących dwa punkty).

⁵⁶ Niektóre eksperymenty z 2000 r. wydają się pośrednio świadczyć o istnieniu cząstek supersymetrycznych.

⁵⁷ Analogia do rury, która zamienia się w infinytesymalnie cienką strunę po skompaktyfikowaniu wszystkich jej wymiarów poza długością.

⁵⁸ A więc tam, gdzie krzywizna czasoprzestrzeni jest niewielka, czyli następuje separacja czasu i przestrzeni.

⁵⁹ Czyli właściwościach fizycznych.

⁶⁰ Zob. przyp. 34 niniejszego artykułu.

nasze obecne możliwości eksperymentalnej weryfikacji. Póki zaś zagadnienie niedostępne jest doświadczalnemu sprawdzeniu, koncepcja pozostaje spekulacją. To samo dotyczy pomysłu usprawiedliwiania obecnego stanu rzeczy poprzez dołączenie zasady antropicznej⁶¹.

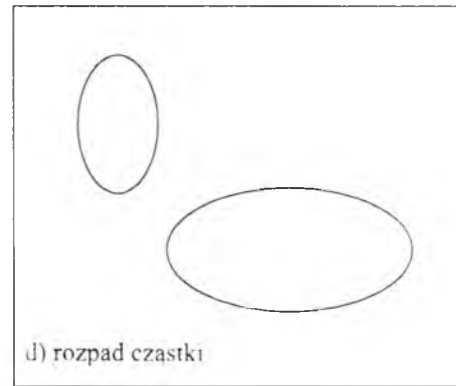
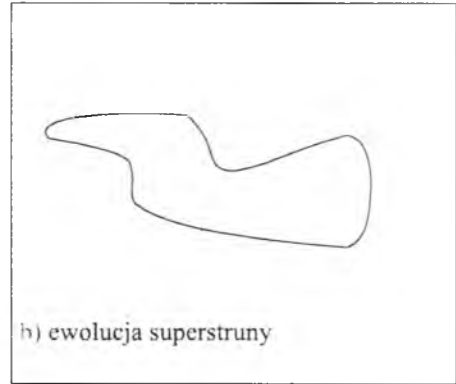
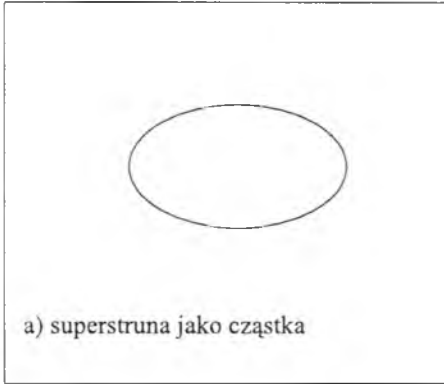


Diagram rozpadu cząstki w modelu superstrunowym

⁶¹ To, co widzimy, wydaje się niezwiązane, ale nie może być inne. wówczas bowiem my sami nie istnielibyśmy. Cały Wszechświat jest zbudowany sensownie (jego parametry są związane), ale my, ludzie, żyjemy w tym podzbiornie *Universum*, w którym warunki fizyczne umożliwiają nasze istnienie, i dlatego widzimy tylko to, co do podzbiornie należy. Nie możemy zatem oczekiwać związania wszystkich parametrów (związanie to przebiega poza naszym podzbiornie). Według wielu, w tym i autora niniejszego artykułu, jest to swoiste współczesne *science-fiction*.

Stosunkowo bardziej zachęcającym kierunkiem badań są próby stworzenia modelu opisującego wszystkie oddziaływania elementarne w obrębie jednej struktury⁶². Sukces unifikacji oddziaływań elektromagnetycznych i słabych daje nadzieję na potencjalny dalszy postęp w tej dziedzinie. Oczekuje się, że w pewnej skali wielkości (zatem przy odpowiednio wielkich energiach) oddziaływania przestają się różnić między sobą. Powodem tego może być fakt, iż podczas wnikania odpowiednio głęboko w obszar chmury cząstek wirtualnych danego obiektu przestają być widoczne różnice pomiędzy nim a obiektami uczestniczącymi w procesach z udziałem innych oddziaływań. Oczywiście, różnice te są ewidentne przy mniejszych energiach, gdyż cząstki wirtualne różnych obiektów mają różne własności (liczby kwantowe), co „jest widoczne” (ekranowanie) z większej odległości. Niestety, bardzo trudno jest „zgadnąć” grupę symetrii obejmującą oddziaływania elektroślabe i silne, a ponadto grawitacyjne, jeśli nie wiemy dokładnie, czy zmierzone różnice pomiędzy stałymi sprzężeń są jedynymi różnicami pomiędzy wymienionymi oddziaływaniami, a ponadto nie mamy pomysłu, czym mogłyby być cząstki przenoszące oddziaływania grawitacyjne (grawitony). Dotychczasowe próby ekstrapolacji naszej obecnej wiedzy w tym zakresie nie wyglądają oszałamiająco. Jak się przez pewien czas wydawało, przy pewnych zastrzeżeniach model standardowy mógłby być niezłym przybliżeniem grupy $SU(5)$ w skali energii 10^{15}GeV . Niestety, przewidywane w tej sytuacji czasy życia protonów znacznie (nawet o trzy rzędy) różnią się od mierzonych. Obecnie „podejrzanyymi w sprawie” są inne obiekty geometryczne⁶³. Tak czy owak, nie jest to na razie ani nowy model, ani nawet jego zapowiedź. Być może, alternatywnie do wiedzy posiadanej, udało się uchwycić kolejny aspekt zagadnienia w odpowiedniej skali wielkości.

Wobec fiaska metod ekstrapolacyjnych podejmowane są próby podejścia do zagadnienia od „drugiej strony”. Wiadomo, że w strukturach modelowych algebra funkcji gładkich (geometria przemienna) zawiera wszystkie informacje o poszczególnych punktach rozmaitości modelującej czasoprzestrzeń. Fakt ten można wykorzystać do konstruowania bardziej ogólnych struktur. Dobierając mianowicie odpowiednią algebrę nieprzemienią (algebrę macierzy), można oczekiwać, że zawierać ona będzie informację o poszczególnych stanach fizycznych w czasoprzestrzeni. Formalnie rzecz biorąc, informacja ta jest

⁶² *Grand Unified Theory* (GUT) – Wielka Teoria Unifikacji.

⁶³ Na przykład grupa $SO(10)$.

explicite możliwa do wyliczenia. Podejście to wydaje się obiecujące, jednak i ono ma ograniczenia. Przede wszystkim wysoki poziom ogólności modelu oznacza długą i mozolną (w sensie rachunkowym) drogę do konkretności w postaci końcowego wyrażenia. Po drugie, wszystkie potencjalne wyniki będą czasowe, co nie ułatwia ich rozumienia oraz interpretowania. Wreszcie, z powodów formalnych, rachunki wykonywane być muszą nie bezpośrednio na strukturze geometrii nieprzemiennej, lecz na jej reprezentacji. Utrudnia to dodatkowo rozumienie zagadnienia i stwarza okazję do omyłek, choć zarazem weryfikuje pozytywnie samą koncepcję. Jak bowiem wskazują dotychczasowe dokonania, struktura przyjętej do obliczeń reprezentacji Connesa daje w granicy obiekty strukturalnie tożsame z – odpowiednio – ogólną teorią względności oraz z mechaniką kwantową. Co więcej, wnioski odnośnie do stanów globalnych wydają się zgodne z dotychczasową wiedzą kosmologiczną w tej materii. Oczywiście, pomimo tych spektakularnych wyników do konkretności choćby w postaci wielkości energii odpowiadającej skali łamania symetrii jest jeszcze daleko.

Jak widać, mimo licznych prób, trwających od ponad dwóch dekad, w fizyce wysokich energii nie nastąpił koncepcyjny przełom i zagadnienie obiektu elementarnego – jak i inne zagadnienia związane z ewentualnym modelem świata w mikroskali – wciąż nie znajduje rozstrzygnięcia. Dyskusowanie przyczyn tego stanu rzeczy jest jałowe. Wszyscy bowiem rozumieją, iż ekstrapolacje obecnej wiedzy mają niewielką wartość. Próby konstruowania modelu, którego podstrukturami byłyby obecne teorie, siłą rzeczy odsyłają nas na niezmiernie wysoki poziom ogólności, a we wszystkim brak jest możliwości wykorzystania „zdroworozsądkowych” (czyli klasycznych) schematów logicznych i metodologicznych oraz posłużenia się znaną z badań w makroskali wyobraźnią desygnatywną⁶⁴. Sytuacja nie wygląda zatem różowo.

IV. FIZYKA U PROGU *MILLENNIUM*

Sto (z górą) lat badań zjawisk fizycznych w mikroskali umożliwiło nam znaczny postęp w rozumieniu tego, czym jest czasoprzestrzeń, energia, oddziaływania i w ogóle cały Wszechświat. Rzecz wyobrażamy sobie następująco. W wyniku procedury podobnej do kwantowego tunelowania z „super-

⁶⁴ Inaczej wyobrażamy sobie krzesło, a inaczej przestrzeń wielowymiarową. Do tej ostatniej nie potrafimy wskazać desygnatu.

wszechświata”⁶⁵ wyłoniła się struktura o dość skomplikowanej, prawdopodobnie 11-wymiarowej, geometrii. Identyczne kwanty pól nowego Wszechświata (zwane cząstkami Higgsa) zarówno przechowywały energię próżni, jak i pośredniczyły w jedynym, zunifikowanym oddziaływaniu. Oddziaływanie to, z punktu widzenia czasowej ewolucji struktury Wszechświata, miało charakter odpychający, a jego konsekwencją była ekspansja przestrzeni. Schładzanie próżni, następujące w konsekwencji *quasi*-adiabadycznej ekspansji, z czasem „popsuło” równowagę w „morzu” cząstek Higgsa. W wyniku bliżej nie znanych procedur następowało kolejno przejście do nowych stadiów organizacji próżni⁶⁶ (nowe symetrie, m.in. związane z kompaktyfikacją niektórych wymiarów), co oznaczało pojawienie się cząstek wyspecjalizowanych (kwarków). Z nich „montowane” były cząstki pośredniczące i masowe. Procesy zachodzące z ich udziałem spełniają określone prawa zachowania, ściśle odpowiadające symetriom próżni. Ich wynikiem, z upływem czasu, była nukleosynteza, a w dalszym biegu – powstawanie struktur galaktycznych etc.

Powyższe rozumienie rzeczy jest niewątpliwie wielkim osiągnięciem intelektu ludzkiego⁶⁷. Niemniej popadanie w samozadowolenie nie byłoby uzasadnione, gdyż wciąż nie znamy najistotniejszych detali całej historii. Odkrywana rzeczywistość nie jest bowiem ani deterministyczna, ani klasyczna⁶⁸. Co zatem należy sobie jeszcze wyobrazić, aby zagadnienie elementarności na jakimś poziomie istotności rozstrzygnąć? Gdybyśmy na przykład umieli przedstawić sobie, jaka jest struktura próżni, w której elektromagnetyzm jest parzysty, a oddziaływanie słabe nie jest, być może bylibyśmy zdolni do zrozumienia istoty unifikacji elektroslabej⁶⁹. Niestety, nie potrafimy sobie tego wyobrazić. Ani wielu innych rzeczy.

Sytuacja jest nieco przynębiająca. Prace teoretyczne i doświadczalne, bardzo intensywne i z zaangażowaniem wielkich środków finansowych, trwają bez przerwy, ale nie prowadzą do przełomu. W gruncie rzeczy od dwudziestu lat, abstrahując od masy odkryć przyczynkowych, obserwuje się koncepcyjną

⁶⁵ Przez Hawkinga i Hartle’a zwanego Nicością.

⁶⁶ Stale pojmowanej w sensie struktury geometrycznej.

⁶⁷ Dla przypomnienia: przy końcu XIX w. Wszechświat uważano za stacjonarny, wieczny, trójwymiarowy z absolutnym czasem, deterministyczny.

⁶⁸ Włączając w to logikę dwuwartościową.

⁶⁹ Byłoby to tożsame z wiedzą na temat struktury cząstek, które stosowałyby się do takich, a nie innych praw symetrii, a to oznaczałoby posiadanie recepty na konstruowanie cząstek w ogóle. Stąd krok do tzw. Teorii Wszystkiego.

stagnację. Coraz bardziej wyrafinowane matematycznie modele SUSY, SUGRA⁷⁰ i GUT znajdują się poza obszarem dostępnej nam technologii eksperymentu. Próby „pożenienia” formalizmów obu najważniejszych istniejących modeli (ogólnej teorii pola i mechaniki kwantowej) we wspólny model niezmiennie napotykać ograniczenie różnic strukturalnych. Renormalizowalność teorii związana jest z koniecznością arbitralnego określenia warunków. Również „ręcznie” odbywa się wprowadzanie pól dla odpowiednich mechanizmów (np. mechanizmu Higgsa). Niemal w każdym podejściu mamy do czynienia z parametrami wolnymi. Wszystko to wskazuje, że problem ciągle nie jest dobrze określony. Wyniki ostatnich doświadczeń w międzynarodowym programie Super Kamiokande⁷¹ są przykładem tego, jak dalece fizyczna rzeczywistość może nas zaskakiwać, a co za tym idzie, jak bardzo „zgrubne” są nasze modele, którymi posługujemy się w fizyce wysokich energii.

Próba z konstruowaniem modelu „od ogółu do szczegółu”, wykorzystująca koncepcję geometrii zewnętrznych, jakkolwiek – póki co – nie prowadząca do detali, daje jednak wgląd w głębię zagadnienia. Okazuje się, że, odmiennie niż w czasach mechaniki klasycznej, kiedy pracowano nad problemami wysoce zlokalizowanymi i równoległe podejścia zwykle się wykluczały, obecnie wszyscy (lub prawie wszyscy) badacze pracujący nad zagadnieniem elementarności mogą mieć rację. W gruncie rzeczy np. podejścia GUT i supersymetryczne nie wykluczają się. Najwyraźniej zagadnienie jest na tyle złożone, że dotychczas udało nam się dostrzec jedynie niektóre jego aspekty. Przypomina to nieco oglądanie słonia stojącego za parkanem przez nieliczne dziury w deskach. Gdzieniedzie „coś szarego” prześwituje, ale jak zgadnąć, co to jest. Do wykreowania modelu ogólnego przesłanek (dziur) jest za mało, do ekstrapolacji danych z poszczególnych przesłanek trzeba by wprawdzie „powiększyć dziury” (koszta!), gdyż to, co jest widoczne, stanowi wiedzę zbyt małą, aby ekstrapolacja mogła się udać.

Tymczasem rozstrzygnięcie zagadnienia elementarności ma istotne znaczenie dla fizyki, zarówno na poziomie mikroskalowym (struktura materii i niżej) jak i w ujęciu globalnym (kosmologia). Aby móc rozwijać niezbędne

⁷⁰ Supergrawitacja.

⁷¹ Pokazujących, że przynajmniej niektóre neutrino posiadają niezerową masę.

nam technologie⁷², potrzebujemy obecnie rozumieć najbardziej podstawowe rzeczy, takie jak:

- skąd się wziął Wszechświat i jakie symetrie spełniał w swej ewolucji,
- jaka jest struktura próżni;
- jak następuje kreacja oraz anihilacja cząstek;
- jakie cząstki są możliwe (kompletna klasyfikacja, związanie parametrów wolnych);
- jaki mechanizm odpowiada za łamanie symetrii i kompaktyfikację niektórych wymiarów czasoprzestrzeni;
- czy są możliwe alternatywne modele próżni? (inne wszechświaty);
- czy nasz Wszechświat jest jedynie przekrojem przez strukturę bardziej złożoną i czy jego symetrie są swoistym uproszczeniem symetrii ewentualnego otoczenia.

Pytania te, ważne dla współczesnej fizyki, będą musiały znaleźć odpowiedź w nadchodzących dekadach. Bez tego pozostaniemy w świecie ograniczonym możliwościami obecnych technologii, z których wiele osiągnęło kres wydolności lub do niego się zbliża⁷³. Oznaczałoby to globalną stagnację w ciągu najbliższych dekad. Co więcej, obecne, w znacznej mierze prymitywne sposoby pozyskiwania i przetwarzania energii niezbędnej do podtrzymywania egzystencji cywilizacyjnej, są wysoce nieekologiczne. Stagnacja taka musi więc w krótkim czasie zakończyć się degradacją środowiska i zapaścią cywilizacyjną.

Około połowy ubiegłego stulecia spekulowano, iż dalszy rozrost miast doprowadzi w kolejnych dekadach do ich samozniszczenia, gdyż ilość nawozu produkowanego przez zwierzęta pociągowe (niezbędne do utrzymania egzystencji miasta) przekroczy możliwości jego usuwania. Być może tak by się i stało, ale postęp w fizyce umożliwił dostęp do technologii, które umożliwiły zbudowanie silnika, który zastąpił konia. Obecnie rzecz się powtarza, jedynie jej zasięg jest większy, bo już globalny. Badania w naukach podstawowych nie są jedynie fanaberią naukowców dążących do poznawania rzeczywistości za wszelką cenę. Są one koniecznością cywilizacyjną. Badania w zakresie

⁷² Komputery kwantowe, materiałoznawstwo na poziomie submolekularnym, sterowanie układami dynamicznymi, sieci neuronowe, transfer i przechowywanie informacji, pozyskiwanie i przetwarzanie energii – materii – informacji itd.

⁷³ Na przykład nie da się już znacznie przyspieszyć szybkości przetwarzania informacji za pomocą znanych obecnie procesorów. Zwiększanie ich ukomplikowania niewiele daje, gdyż napotyka się barierę szybkości przekazu, związaną z szybkością rozchodzenia się kwantów światła.

fizyki wysokich energii, są w tym względzie kluczowe. Warto o tym pamiętać u progu kolejnego tysiąclecia.

BIBLIOGRAFIA

- A j d u k Z., P o k o r s k i S., Ewolucja fizyki cząstek elementarnych, „Postępy Fizyki”, 42, 1, 5-33 (1991).
- C l o s e F., P a g e Ph., Gluonia, „Świat Nauki”, 1/1999, s. 36-41.
- E l b a z E., The Quantum Theory of Particles, Fields and Cosmology, Springer Vlg. 1998.
- E l l i s J., GUTs and Supersymmetric GUTs in the Very Early Universe, [w:] Very Early Universe, Cambridge: Cambridge Univ. Press 1983.
- F e y n m a n R., QED – osobliwa teoria światła i materii, Warszawa: PIW 1992.
- F r e e d m a n D., N i c u w e n h u i z e n P., Supergravity and the Unification of the Laws of Physics, „Sci. Amer.”, 238, 2, 126-43 (1978).
- G l a s h o w S., Ku zunifikowanej teorii – wątki gobelinu. „Postępy Fizyki”, 32, 1, 49-59 (1981).
- H e l l e r M., Unifikacja i geometryzacja fizyki w kosmologicznym kontekście, „Postępy Fizyki”, 42, 2, 131-46 (1991).
- H e l l e r M., S a s i n W., Noncommutative Structure of Singularities in General Relativity. „J. Math. Phys.”, 37, 5665-71 (1996).
- K r a u s s L. M., R e y S., Spontaneous CP Violation at the Electroweak Scale, „Phys. Rev. Lett.”, 69, 9, 1308-11 (1992).
- L e a d e r E., P r e d a z z i E., Wstęp do teorii oddziaływań kwarków i leptonów, Warszawa: PWN 1990.
- L e d e r m a n L., T e r e s i D., Boska Cząstka, Warszawa: Prószyński i S-ka 1996.
- M o s s I., The Quantum Origin of the Universe, [w:] The Early Universe. D. Reidel Pub. Co. 1988.
- N e w t o n R., Zrozumieć przyrodę, Warszawa: Prószyński i S-ka 1996.
- P o k o r s k i S., T a y l o r T., Czy chromodynamika kwantowa jest teorią oddziaływań silnych?, „Postępy Fizyki”, 32, 3, 215-40 (1981).
- P o n c e d e L e o n J., Cosmological Models that Describe Particle Creation in..., „J. Math. Phys.”, 32, 12, 3546-52 (1991).
- S t r z a ł k o w s k i A., O siłach rządzących światem, Warszawa: PWN 1996.
- Z a k r z e w s k i J., Leptony i kwarki – czyżby koniec drogi?. „Postępy Fizyki”, 31, 1, 33-64 (1980).

THE PROBLEM OF ELEMENTARY PARTICLE IN PHYSICS
AND IN COSMOLOGY

S u m m a r y

In the paper one discusses historical aspect of the 'elementary particle problem'. Understanding of it is important for development of modern physics in both local, as well as cosmological scale. At the end of 20-th century, importance of the issue comes to be of fundamental kind because of its strict connections with civilizational increase. The problem has been discussed at possible wide area of scientific properties and some important questions, which science will have to answer in nearest future.