

Model Standardowy i Nowa Fizyka

Karolina Kmieć

Praca zaliczeniowa z przedmiotu Metody i Techniki Jądrowe
prowadzący: prof. dr hab. Jan Pluta

2017-03-20

Spis treści

Rozdział 1. Jak to się zaczęło? - czyli trochę historii	2
Dodatek 1. Symetrie w Fizyce.....	11
Dodatek 2. Diagramy Feynmana.....	12
Rozdział 2. Model Standardowy.....	14
Rozdział 3. Nowa Fizyka. Pytania na które nie odpowiada Model Standardowy.....	25
Rozdział 4. Czy istnieje Teoria wszystkiego?.....	28
Rozdział 5. Podsumowanie.....	31
Bibliografia.....	33
Źródła rysunków	33

Rozdział 1. Jak to się zaczęło? - czyli trochę historii.

Odkrycia poprzedzające bezpośrednie formułowanie się Modelu Standardowego.

Na początku XX wieku znano już cząstki naładowane ujemnie zwane *elektronami*, ich oddziaływanie z innymi naładowanymi cząstkami oraz polem magnetycznym. Badania prowadzone przez **Henriego Becquerela** oraz małżeństwa **Marii i Pierre'a Curie** w latach 1896-1900 doprowadziły do odkrycia promieniotwórczości naturalnej co zostało docenione nagrodą Nobla w dziedzinie Fizyki w roku 1903 dla wyżej wymienionej trójki [1].

W roku 1911 **Ernest Rutherford** po wykonaniu słynnego eksperymentu bombardowania cząstkami α złotej tarczy potwierdził istnienie dodatnio naładowanego jądra atomowego. Oprócz tego, że w owym jądrze miał skupiać się cały ładunek dodatni atomu, miało ono być również miejscem gdzie znajduje się prawie¹ cała masa atomu. Odkrycie to spowodowało całkowitą zmianę myślenia o cząstkach i pierwiastkach i atomach² a także konieczność założenia występowania siły scalającej jądro atomowe.

Siła ta musiała być wielokrotnie większa do siły odpychania elektrostatycznego protonów dlatego też oddziaływanie tej siły nazwano po prostu **silnym**.

W roku 1932 **James Chadwick** odkrył nową cząstkę będącą składową jądra: **neutron** postulowany już wcześniej przed **Rutherforda**. Odkrycie to zostało nagrodzone Noblem w 1935 roku.

Przypatrzmy się nowej cząstce oczami Jamesa Chadwick'a :

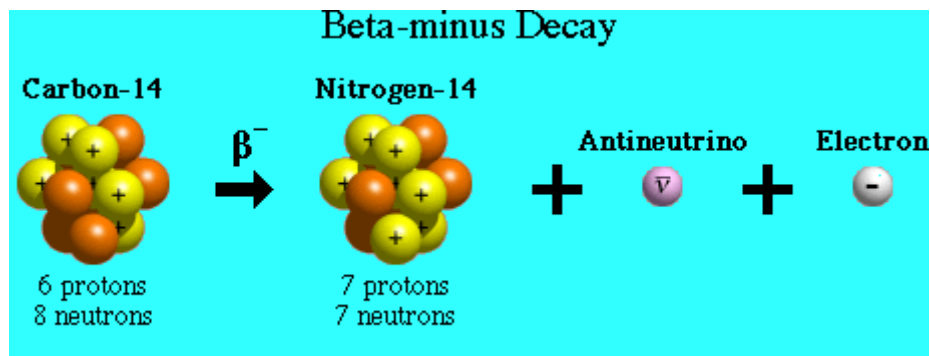
- nie posiadająca ładunku elektrycznego
- zbliżona masa do masy protonu
- składnik jądra
- jeżeli skupić ją w wiązce to promieniowanie będzie bardzo przenikliwe

¹ prawie- gdyż na sumaryczną masę atomu składa się również masa elektronów, jest ona jednak znacznie mniejsza niż masa jądra, gdyż elektron jest ok **1800** razy lżejszy od protonu! (źródło [2])

² Nowe spojrzenie na budowę atomu wymagało nowego modelu wyjaśniającego mechanizm oddziaływań cząstek w jądrze. Planetarny model atomu zawierał za dużo sprzeczności z dotychczasową wiedzą, ale był podwaliną do powstania modelu o skwantowanych orbitach, w którym to duży udział miały prace **Maxa Plancka**. Ostatecznie **Niels Bohr** sformułował skwantowany model atomu, za który dostał nagrodę Nobla w 1922 roku. Jego praca posłużyła także do dalszego formułowania zasad mechaniki kwantowej przez **Wernera Heisenberga**, **Paula Diraca**, **Erwina Schrödingera** i innych.

Wszystkie cechy neutronu powodowały, że działanie siły scalającej jądro musiało zostać uaktualnione by uwzględnić także cząstki neutralne!

Na przełomie lat 20 i 30-tych XX wieku rozwinęła się teoria mechaniki kwantowej, która stanowiła nowe narzędzie do opisu zachowań cząstek w mikroskopowej skali. W dalszym ciągu badano także naturalne rozpady promieniotwórcze co doprowadziło do zapostulowania istnienia kolejnej nowej cząstki neutralnej - *neutrino*³, której obecność pozwalałaby na pełny opis rozpadu β .



Rysunek 1. Przykładowy rozpad β^- zakładający istnienie (anty)neutrino. Źródło [1]

W obserwacjach klasycznego rozpadu β^- w produktach rozpadu pojawiał się proton i elektron. Energia tego elektronu nie była wartością stałą, ale obserwowano ciągłe spektrum energii (głównie kinetycznej). Zasada zachowania energii wymagała, by w rozpadzie występowała jeszcze jedna cząstka, która mogłaby kompensować brakującą w bilansie energię. Zasada zachowania ładunku jednoznacznie wskazywała na cząstkę neutralną. Cząstkę, która miałaby występować wraz z elektronem i protonem w rozpadzie β^- nazwano *neutrinem*.

Badanie promieniowania kosmicznego.

Początki badania promieniowania kosmicznego sięgają 1910 roku, gdy to pewien jezuita o. Theodore Wulf postanowił zbadać promieniotwórczość naturalną Ziemi. Jakim zdziwieniem było, gdy doświadczenie wykazało, iż intensywność promieniowania wzrasta wraz z odległością od podłoża. Wzbudziło to niemałą zagadkę, którą rozwiązał rok później **Victor Hess** podróżując balonem powietrznym z koszem pełnym detektorów. Zebrane przez niego dane jednoznacznie potwierdziły, iż promieniowanie docierające do urządzeń pomiarowych musi mieć swoje źródło poza Ziemią - zasugerowało nazwę "**Promieniowanie Kosmiczne**". Dalsze badania docierające z kosmosu

³ Jak później się okazało **antyneutrino elektronowego**.

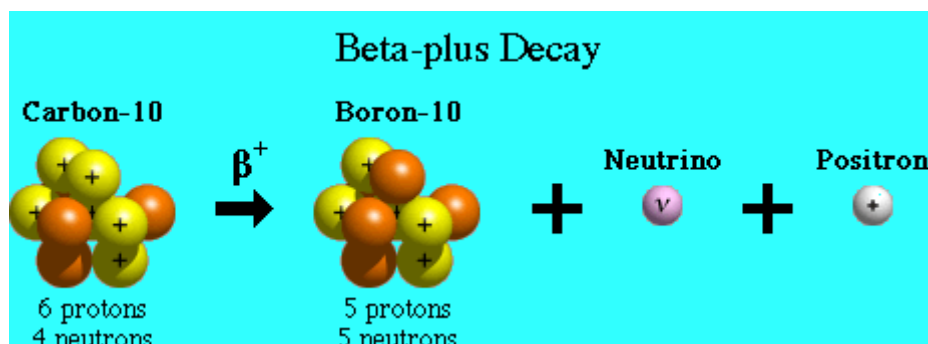
promieniowania pozwoliły na odkrycie kolejnych cząstek min. **pozytonu** będącego przedstawicielem *antymaterii*⁴ a także **mionu** i **pionu**, o których za chwilę.

Promieniowanie Kosmiczne

Docierające z przestrzeni kosmicznej wysokoenergetyczne cząstki ulegają zderzeniom z cząstkami atmosfery ziemskiej. Jądra atomów atmosfery mogą być rozbijane a produkty tych rozpadów mogą wywoływać kolejne rozpady. (Tworzy się kaskada rozpadow) Produktem rozpadu mogą być też nowe cząstki.

W roku 1932 podczas badania promieniowania kosmicznego **Carl Anderson** zauważył nową cząstkę o tej samej masie co elektron, ale przeciwnym ładunku. Czyli wspomniany już wcześniej **pozyton** (postulowany 4 lata wcześniej przez Paula Diraca). Oba odkrycia C. Andersona i V. Hessa zostały docenione nagrodą Nobla z Fizyki w roku 1936.

Rysunek 2 przedstawia przykładowy rozpad β^+ , którego produktem jest pozyton.



Rysunek 2. Przykładowy rozpad β^+ będący naturalnym źródłem pozytonów. Źródło [2]

Klasyczny rozpad β^- polega na rozpadzie neutronu na proton i elektron oraz (anty) neutrino elektronowe. Rozpad β^+ jest o tyle podobny, że teraz to proton ulega przemianie w neutron emitując przy tym identyczną co do masy cząstkę z elektronem, ale o przeciwnym ładunku¹ oraz niemal bezmasowe neutrino (pozwalającą na spełnienie zasady zachowania pędu). Ten lustrzany brat elektronu nazwano **pozytonem** i skategoryzowano jako cząstkę antymaterii.

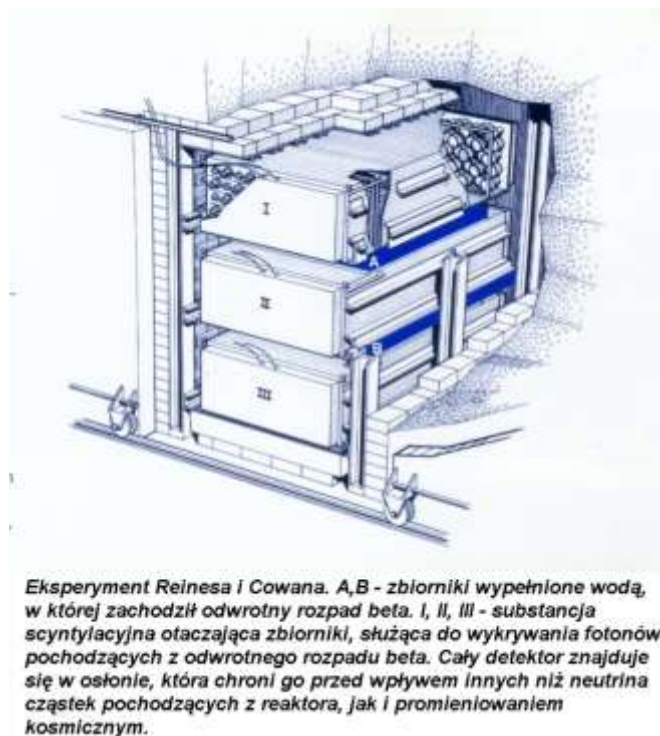
⁴ cząstki antymaterii - bliźniaczo podobne do cząstek materii, posiadające **przeciwnie** ładunki elektryczne i przeciwnie liczby kwantowe do ich odpowiedników materii. Cały obserwowany przez nas świat jest zbudowany z cząstek materii. Antymateria przy spotkaniu z materią anihiluje, czyli znika uwalniając energię zgodnie ze wzorem Einsteina $E = mc^2$.

Miony, piony, neutrino.

Następnymi cząstkami schwytanymi dzięki promieniowaniu kosmicznemu były **miony**. Cząstki **bardzo** podobne (w zasadzie różniące się tylko masą) do elektronów jednakże ok. 200 razy cięższe [2]. Obserwowano także rozpady mionów, których produktami (między innymi) były elektrony.

W 1947 roku **Donald Perkins** odkrył kolejną nową cząstkę - **pion**- jeszcze cięższą od mionu i także naładowaną⁵. Cecil Frank Powell, który również obserwował ową cząstkę w promieniowaniu kosmicznym przedstawił ją także jako wcześniej przewidzianą w modelu teoretycznym oddziaływań jądrowych Yukawy⁶. W tej interpretacji piony byłyby pośrednikami przenoszącymi oddziaływanie między protonami i neutronami w jądrze.

W latach 40 dysponowano już reaktorami jądrowymi, w których zachodziły przemiany rozszczepienia uranu. Produkty tego rozpadu także były radioaktywne i ulegały między innymi przemianom β^- . Wobec tego powinny być dobrym źródłem (anty) neutrin. Anty-neutrino te trafiając protony powinny zainicjować rozpady β^+ dające w produktach pozytony i neutrony. Pozytony anihilując zamieniają się w dwa fotony, a neutrony po wchłonięciu w jądra (atomów ośrodka, w którym zachodzi reakcja) wzbudzą je co spowoduje wystanie kolejnego kwantu promieniowania przy powrocie jądra do stanu podstawowego. Fotony z anihilacji i z relaksacji jądra będą zatem dowodem powstania przemiany β^+ zapoczątkowanej przez anty-neutrino. Eksperyment taki skonstruowali **Frederick Reines and Clyde L. Cowan** i zakończyli potwierdzeniem. Za eksperymentalne odkrycie neutrin i otrzymali nagrodę Nobla w roku 1955.



Rysunek 3. Eksperyment Reines'a i Cowan'a. Źródło [3]

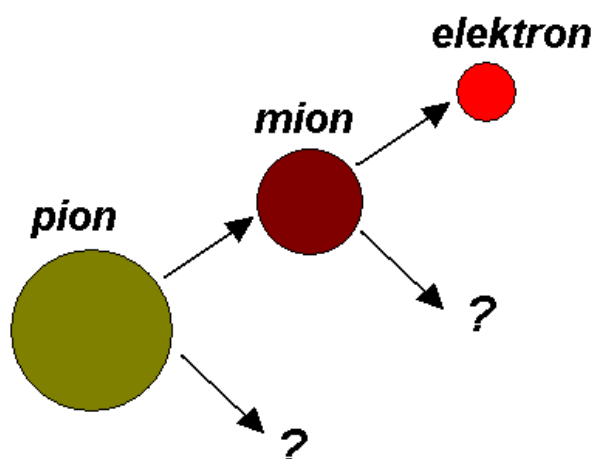
⁵ Teraz wiadomo, że piony mogą być dodatnie, ujemne lub neutralne.

⁶ Więcej o modelu tym i Hideki'm Yukawie w dalszej części opracowania.

Co dało odkrycie mionu, pionu i po co te neutrino?

Dalsze badania rozpadów cząstek pozwalały stawiać coraz dokładniejsze pytania na temat oddziaływań słabych.

Obserwowano rozpady pionu na miony oraz mionów na elektrony. Spełnienie zasady zachowania energii, pędu i ładunku elektrycznego wskazywała również na udział wcześniej opisanych neutrino.



Rysunek 4. Rozpad pionu i mionu. Źródło [4]

Jak ustalić ilość neutrino?

Wstępem do wszystkich rozważań jest oczywiście zasada zachowania pędu i energii. W rozpadach dwuciałowych energia cząstek obserwowanych w układzie, w którym cząstki spoczywają będzie stała. Jeśli zachodzi taka relacja w wynikach doświadczeń można jednoznacznie powiedzieć, czy rozpad jest dwuciałowy. Np. gdyby w rozpadzie β^- elektrony miały zawsze tę samą energię nie potrzebna by była koncepcja neutrino.

Takie podejście pozwoliło twierdzić, że mion rozpada się na elektron i jedno neutrino, natomiast pion na mion i dwa neutrino.

Co więcej, kolejne rozważania doprowadziły do wniosku, że neutrino powstające w rozpadach pionów różnią się od tych z rozpadów mionów. Dodatkową zagadką była niemożliwość obserwacji rozpadu mionu na elektron i foton, który teoretycznie był dozwolony.

Powstała wtedy nowa idea, która nadawała mionowi liczbę "mionowości" 1, a elektronowi "elektronowości" 1. W obliczu konieczności zachowania tej liczby neutrino były by w zasadzie antyneutrino mionowym i elektronowym o liczbach -1. Poszukiwany rozpad mionu na elektron i foton był by wtedy zabroniony i wyniki doświadczeń odzwierciedlałyby zasady teoretyczne.

Pomysł ten przetrwał i stanowi obecnie zasadę zachowania liczby leptonowej⁷, od której odstępstw nie zarejestrowano do tej pory.

Eksperymentalne potwierdzenie występowania **dwóch** rodzajów neutrin dokonali **Melvin Schwartz, Jack Steinberger i Leon Lederman**⁸, co również zostało uhonorowane nagrodą nobla w dziedzinie fizyki w roku 1988.

By zakończyć już sprawę neutrin, kolejne z nich zostało zapostulowane zaraz po odkryciu kolejnego leptonu, starszego brata elektronu - **taonu**. Taon jest ok. 3000 razy cięższy od elektronu, ale poza tym posiada te same cechy co elektron i mion (ładunek, spin). Został odkryty w eksperymencie zderzenia elektronów z pozytonami w roku **1974** przez zespół badawczy **Martina Perla** (Nobel 1995). Wiązki rozpędzono w jednym z największych ówczesnych akceleratorów **SLAC** w Stanford. Pomysł neutrina taonowego był oczywistym posunięciem, jednakże na doświadczalny dowód jego istnienia trzeba było czekać do roku 2000, kiedy to w eksperymencie DONUT w Państwowym Laboratorium im. Fermiego udało się ponad wszelką wątpliwość potwierdzić oczekiwania teoretyków.

Hipoteza kwarków - rozwój i kolejne odkrycia, bozony oddziaływań i unifikacja sił do elektro-słabych

Musimy teraz cofnąć się nieco w czasie, gdyż równoległe z odkrywaniem neutrin szukano spójnego opisu oddziaływań międzycząsteczkowych. Najbardziej tajemniczą siłą była **silna** i pierwszym jej przybliżeniem była wspomniana już teoria H. Yukawy, która zakładała, że oddziaływania między protonami i neutronami są przenoszone przez inną cząstkę - mezon π . Był to rok 1934.

Elektrodynamiczny opis oddziaływań zakładał istnienie pola, które przenosiło oddziaływanie. O ile w przypadku siły elektrycznej czy magnetycznej równania Maxwella opisywały oddziaływania kompletnie, o tyle w przypadku sił słabych czy silnych nie udało się utworzyć spójnego opisu w ramach znanych już teorii.

Odpowiedzią na tak postawioną sprawę okazało się założenie wprowadzone wcześniej przez Yukawę; mianowicie, że za przenoszenie oddziaływania jest odpowiedzialna inna cząstka - tzw. bozon⁹ pośredniczący. Teoria Yukawy była prototypem obecnie używanej *kwantowej teorii pola z cechowaniem*¹⁰, co znaczy właściwie to, że jeśli mamy jakieś pole (oddziaływanie) to mamy elementarny kwant tego pola który może być cząstką rzeczywistą (możliwym do wytworzenia i zaobserwowania np. przez silne wzbudzenie pola) lub wirtualną - wirtualnym bozonem pośredniczącym. **Julian Schwinger, Sidney Bludman, i Sheldon Glashow**, w niezależnych pracach wprowadzili właśnie takie rozumowanie (lata 1957-59). Oddziaływanie słabe przekazywać miały bozony W^+ i W^- , które odkryto w eksperymencie przy akceleratorze SPS (CERN) przez **Carla Rubbia**

⁷ leptony- cząstki fundamentalne, lekkie, o spinie połówkowym, nie oddziałujące silnie. Więcej w kolejnym rozdziale.

⁸ Eksperyment, służący do potwierdzenia istnienia dwóch neutrin oparty był o niezwykle ciekawą koncepcję i wykorzystywał 14 metrową (!) ścianę ze stali. Polecam zajrzeć do źródła:

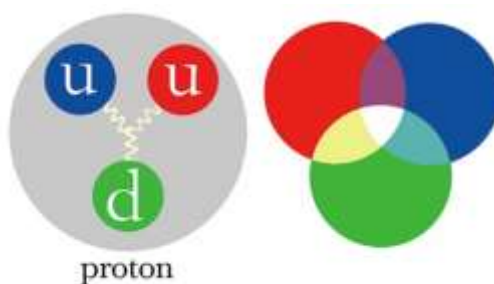
http://neutrino.fuw.edu.pl/pl/odkrywanie_neutrin/odkrycie/mionowe

⁹ Bozon- cząstka o spinie całkowitym, podlegająca statystyce Bosego-Einsteina

¹⁰ Podstawą matematyczną była "teoria z cechowaniem" wprowadzona w 1954 przez C.N. Yanga i Roberta Millsa

w 1983 roku (**Nobel 1984**). W tym samym eksperymencie zaobserwowano również bozony Z^0 , których znaczenie opisał w roku 1973 **Donald Perkins**.

Równoległe z teorią oddziaływań próbowano wciąż szukać najmniejszego budulca materii. Około roku 1964 **Murray Gell-Mann** i **George Zweig** rozwinęli koncepcję kwarków - punktowych obiektów, o ułamkowym¹¹ ładunku, z których składają się cząstki takie jak protony, neutrony, piony- ogólnie **hadrony**¹². Wtedy jeszcze wydawało się, że kwarki są tworem jedynie teoretycznym, pozwalającym na lepszy opis materii. W roku 1965 **O.W. Greenberg, M.Y. Han i Yoichiro Nambu** uzupełnili koncepcję kwarku o ładunek kolorowy¹³ oraz założenie, że wszystkie obserwowane hadrony są kolorowo neutralne (białe)¹⁴



Rysunek 5. Kwarki jako budulec protonu oraz idea ładunku kolorowego z palety RGB. Źródło [5]

W roku 1967 **Steven Weinberg i Abdus Salam** zunifikowali siły elektromagnetyczne i słabe w jedno **elektrosłabe oddziaływanie**. Było to przełomowe zdarzenie, do tamtej chwili jedyną unifikacją było połączenie elektryczności i magnetyzmu w równaniach Maxwela. Unifikacja oddziaływań elektrosłabych wymagała istnienia jeszcze dwóch dodatkowych bozonów neutralnych Z^0 , który został odkryty razem z bozonami W^\pm w CERN-ie oraz bozonu Higgsa odkrytego w roku 2012.

Idea kwarków czekała na potwierdzenie, aż do roku 1969, kiedy to w eksperymencie rozpraszania elektronów na protonach w Stanford okazało się, że przy odpowiednio dużych energiach elektrony odbijane są przez coś w rodzaju "rdzeni" wewnątrz protonu. Pomysłodawcami tej metody byli **Richard Taylor, Henry Kendoll i Jerry Friendman**. Interpretacji pod kątem istnienia kwarków dokonali **James Bjorken i Richard Feynman**. Rok 1973 przyniósł sformułowanie **kwantowej teorii pola silnych oddziaływań** (QCD- angl. Quantum Chromo- Dynamics) przez **Harald Fritzscha i Murray Gell-Manna**. Teoria ta opisuje oddziaływania kwarków i gluonów¹⁵ obdarzonych ładunkiem kolorowym.

Dalsze poszukiwania cząstek przewidywanych przez kształtujący się Model Standardowy zaowocowały potwierdzeniem istnienia wszystkich szukanych kwarków. Lata 80' i 90' były przepełnione

¹¹ ułamkowym względem ładunku elementarnego

¹² hadrony- cząstki zbudowane z 2 lub więcej kwarków. Dzielą się na bariony - cząstki 3 kwarkowe- i mezony- cząstki 2- kwarkowe.

¹³ Historycznie do nazw wybrano kolory z palety barw RGB. Anty- kwarki mają anty- kolory z palety barw CMYK.

¹⁴ Czyli siły kolorowe oddziałują tylko na b. małym dystansie. W skali większej niż obserwowana cząstka są niewidoczne.

¹⁵ gluony- bezmasowe bozony przenoszące oddziaływania silne, same obdarzone ładunkiem kolorowym więc mogą także oddziaływać ze sobą nawzajem.

fantastycznymi odkryciami, które stopniowo dawały coraz mocniejsze dowody poprawności postulowanych obiektów i zasad ich oddziaływań.

Potrzeby fizyki eksperymentalnej stały się bodźcem rozwoju całej technologii. By zajrzeć "głębiej" trzeba było coraz większych energii rozpędzanych wiązek, gdyż właśnie zderzanie cząstek i sprawdzanie produktów tych małych eksplozji okazało się jedyną dostępną nam techniką badawczą.¹⁶Zbudowano ogromne kompleksy eksperymentalne, akceleratory i detektory oraz ośrodki skupiające naukowców z różnych nacji. Największe eksperymenty dostarczające obecnie danych doświadczalnych przedstawia rys 6.



Rysunek 6. Największe eksperymenty wysokich energii. Źródło [6]

Odkrycia minionego wieku były obficie obsypywane nagrodami Nobla, co potwierdza jak wielki przełom miał miejsce. Fizyka wkroczyła w nową erę, a cały świat zwrócił swe oczy ku mikroskopijnym obiektom odkrywanych dekada po dekadzie. Wraz z odkryciem ostatniego postulowanego bozonu-Bozonu Higgsa Model Standardowy został domknięty. Na całe szczęście (!) nadal jest wiele efektów, które wykraczają poza znane nam teorie i do przyszłych pokoleń będzie należało wyjaśnienie kolejnych zagadek.

¹⁶ Moglibyśmy jeszcze badać gwiazdy neutronowe, ale tam jest troszkę za gorąco dla naszych detektorów.

Dodatek 1. Symetrie w Fizyce

Nasz świat jest pełny symetrii, począwszy od ludzkiego ciała skończywszy na samej materii i antymaterii. Symetria jest też często jednym z kryteriów piękna, my, jako ludzie bardzo lubimy symetrie.

Fizycy również lubią symetrię i okazuje się, że jej poszukiwanie podczas konstruowania teorii niejednokrotnie pozwalało nie tylko na spójny opis obserwowanych zjawisk, ale także na wysnucie przewidywań co do przyszłych odkryć.

Symetria jest ściśle zdefiniowana jako :

klasa przekształceń (inaczej przekształcenie symetrii) danego układu, które nie zmieniają przebiegu zjawisk w tym układzie zachodzących [1]. Rozróżniamy dwa rodzaje symetrii: dyskretne i ciągłe.

Symetrie **ciągłe**, to takie które można opisać przez parametr będący liczbą rzeczywistą np. symetria względem przesunięcia w przestrzeni będzie sparametryzowana wektorem przesunięcia.

Symetrie **dyskretne** to takie, których nie można sparametryzować i "pomiędzy" nimi nie istnieją żadne przekształcenia pośrednie. Przykładem takiego przekształcenia może być zamiana kierunku zmiany czasu lub ładunku elektrycznego.

Słynne twierdzenie **Emmy Noether** jest właśnie powiązaniem symetrii z zasadami zachowania wielkości fizycznych, które możemy sprawdzić doświadczalnie.

Tw. Emmy Noether :

Z każdą **ciągłą** symetrią praw fizyki jest związanych tyle samo praw zachowania ile parametrów opisujących przekształcenie odpowiadające tej symetrii.

Obserwowane zasady **zachowania energii, pędu i momentu pędu** są konsekwencją niezmienniczości względem przesunięcia równań (odpowiednio) w **czasie, przestrzeni i obrotu**.

Jeśli przyjrzeć się temu głębiej jest to bardzo logiczne - nie chcemy by np. klasyczne zasady dynamiki zależały od miejsca ich stosowania czy czasu.

Źródła:

1. <https://zapytajfizyka.fuw.edu.pl/pytania/czym-sa-symetrie-w-fizyce-i-jaki-jest-ich-zwiazek-z-zasadami-zachowania/>

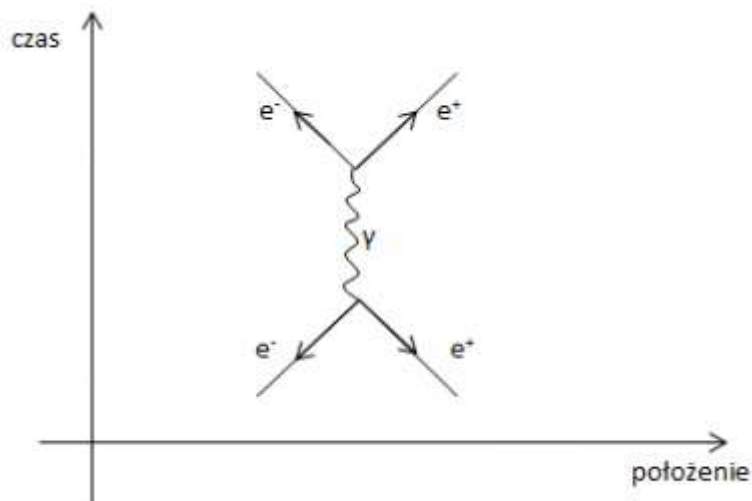
Dodatek 2. Diagramy Feynmana

Diagramy Feynmana są graficzną reprezentacją procesów fizycznych w jakich oddziałują lub mogą oddziaływać cząstki. Wymyślił je i wprowadził Richard Feynman. Zasady konstruowania są następujące:

—————	kwark, lepton, neutrino
~~~~~	foton (bozon W, bozon Z)
~~~~~	gluon
-----	bozony W, Z

Rysunek 5. Oznaczenia na diagramach Feynmana. Źródło [1]

- Linie wchodzące i wychodzące do wierzchołków stanowią cząstki rzeczywiste, swobodne.
- Linie łączące wierzchołki są cząstkami wirtualnymi.
- Strzałki na liniach pokazują kierunek ewolucji w czasie. Cząstki i anty-cząstki są w tym ujęciu tymi samymi obiektami, które różni jedynie kierunek poruszania się w czasie (np. elektron poruszający się w czasie wstecz, jest tym samym co pozyton poruszający się w czasie w przód). Przekrój czynny¹⁷ takiego oddziaływania jest identyczny dla obu przypadków.
- W miejscu wierzchołka spełnione są wszystkie zasady zachowania (energii, pędu, liczby leptonowej i liczby barionowej)



Rysunek 6. Przykładowy Diagram Feynmana. Źródło [2]

W wierzchołkach mamy do czynienia ze *statymi sprzężeniami* - liczbami które określają siłę oddziaływania.

¹⁷ Przekrój czynny - wielkość, która jest miarą prawdopodobieństwa zajścia zdarzenia

Diagramy Feynmana mogą posłużyć do obliczenia rzeczywistych parametrów.

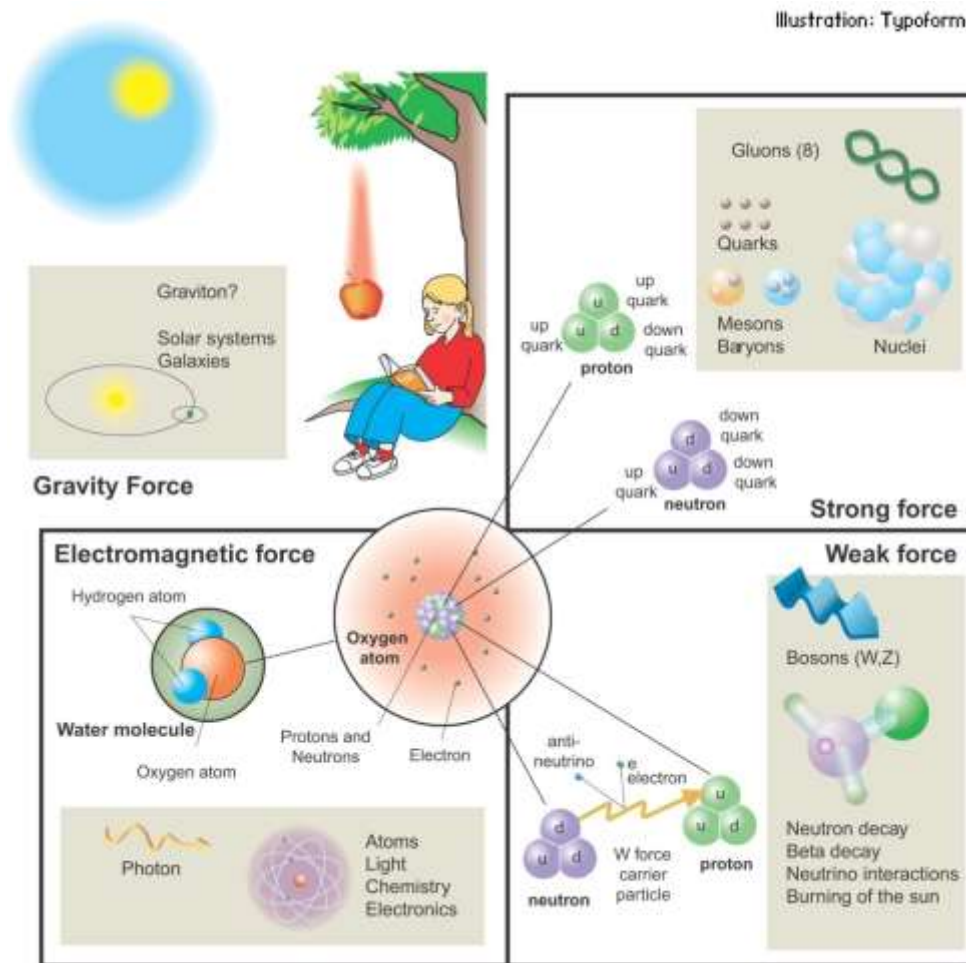
Jeśli dla danego procesu fizycznego narysujemy wszystkie możliwe sposoby jego zajścia, to suma wszystkich przyczynków do stałej sprzężenia będzie odzwierciedlać realną siłę oddziaływania w tym procesie.

Źródła rysunków:

1. *Fizyka zderzeń ciężkich jonów* - slajdy pomocnicze do wykładu, wykład 2, slajd 13
<http://www.if.pw.edu.pl/~kperl/HIP/hip.html>
2. <http://eszkola.pl/fizyka/diagramy-feynmana-4635.html>

Rozdział 2. Model Standardowy

Model Standardowy- teoria oddziaływań fundamentalnych, która w ramach jednej struktury matematycznej opisuje trzy z spośród czterech znanych oddziaływań : **silne, elektromagnetyczne i słabe**. Teoria ta nie obejmuje oddziaływania grawitacyjnego, które to opisuje **Ogólna Teoria Względności** Einsteina.



Rysunek 7. Oddziaływania w przyrodzie. Źródło [7]

Co jest budulcem materii?

Według Modelu Standardowego cała materia zbudowana jest z dwóch rodzajów cząstek fundamentalnych¹⁸, mianowicie **kwarków i leptonów**. Kwarki są podstawowym budulcem **hadronów** (barionów, mezonów) i nie mogą występować samodzielnie (przynajmniej po dwa).

¹⁸Co to jest cząstka fundamentalna i czym się różni od elementarnej? - fundamentalna- najmniejszy budulec materii, elementarna - zbudowana z fundamentalnej np. proton zbudowany z kwarków uud

Kwarki są **fermionami**¹⁹ o spinie równym $\frac{\hbar}{2}$ i przyjmują ładunek elektryczny $-\frac{1}{3}e$ lub $+\frac{2}{3}e$ oraz jeden z 3 możliwych ładunków kolorowych (RGB). Każdy z kwarków ma swój unikatowy **zapach** tj. **górny, dolny, piękny, powabny, szczytowy lub spodni**.



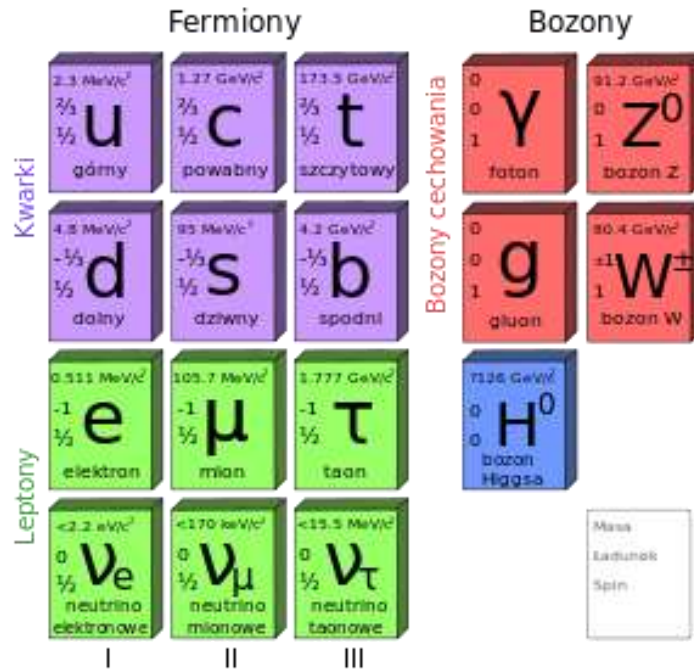
Rysunek 8. Kwarki i ich zapachy. Źródło [8]

Leptony, czyli elektrony i neutrina posiadają również spin równym $\frac{\hbar}{2}$, ale w porównaniu do kwarków są cząstkami *lekkimi*²⁰. Elektrony wchodzą w skład atomów, natomiast neutrina można obserwować przy okazji rozpadów promieniotwórczych $n \rightarrow p + e + \bar{\nu}_e$

Leptony również są fermionami, ale nie oddziałującymi silnie tzn. nie są obdarzone ładunkiem kolorowym. Elektron posiada ładunek całkowity elektryczny, natomiast neutrina jest obojętne.

¹⁹ Fermiony - cząstki podlegające statystyce Fermiego-Diraca. Obowiązuje je zakaz Pauli'ego - dwa identyczne fermiony nie mogą przebywać na raz w tym samym stanie kwantowym. Fermionami są również elektrony, protony.

²⁰ Model Standardowy w swej wersji podstawowej zakłada brak masy neutrin, o czym mowa będzie jeszcze później



Rysunek 9. Cząstki fundamentalne opisywane przez Model Standardowy. Źródło [9]

Każda z wymienionych cząstek posiada swój odpowiednik w postaci **antycząstki**, czyli cząstki o tej samej masie i spinie, ale obdarzonej przeciwnym ładunkiem (elektrycznym lub kolorowym gdy mowa o kwarkach).

Dwa kwarki (jeden o ładunku $-1/3e$ i jeden o ładunku $+2/3e$) oraz dwa leptony stanowią jedną **rodzinę** (generację). Model Standardowy zakłada istnienie jedynie 3 rodzin, przy czym odpowiadające sobie cząstki w rodzinach różnią się tylko masą.

Praktycznie cała materia przez nas widziana w makroskopowym świecie jest zbudowana z cząstek rodziny pierwszej (kwarki u i d, elektron i neutrino elektronowe).

Nośniki oddziaływań.

Drugą grupę cząstek jaką opisuje MS jest grupa **bozonów**²¹ - nośników oddziaływań. Tak więc mamy elektrycznie obojętny **foton** jako nośnik oddziaływań elektromagnetycznych. Bozony **W⁺, W⁻, Z⁰** –to nośniki oddziaływania słabego, **gluon** (posiada na raz kolor i antykolor) -pośrednik oddziaływań silnych oraz **bozon Higgsa** odpowiadający za nadawanie cząstkom masy²². Wszystkie cząstki uszeregowane w rodziny oraz rodzaje przedstawia rysunek 9.

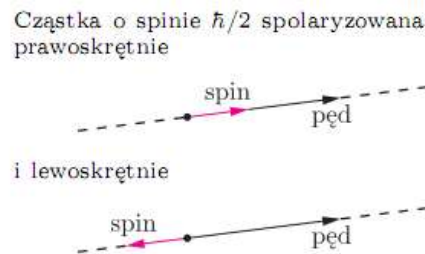
Spin, Chiralność(Lewoskrętność, Prawoskrętność)

Spin jest wewnętrznym momentem pędu cząstki. Mierzmy go w jednostkach \hbar . Cząstki których spin jest całkowity nazywamy **bozonami** i podlegają one statystyce Bosego-Einsteina. Podobnie cząstki

²¹ Bozony - cząstki opisywane statystyką Bosego-Einsteina.

²² Dokładnie **masy gołej**- masa odpowiadająca samotnej cząstce przemierzającej czasoprzestrzeń bez "wirtualnej chmury" (wykład 1, slajd 34, "Wstęp do fizyki ciężkich jonów" dr hab. Katarzyny Grebieszko <http://www.if.pw.edu.pl/~kperl/HIP/wyklad1.pdf>)

obdarzone spinem połówkowym nazywamy **fermionami** i podlegają statystyce Fermiego-Diraca. Z zasad mechaniki kwantowej wynika, że spin przyjmuje wartości większe od zera, a jego rzut na dowolny kierunek może przyjmować wartości od $-s, -s + 1, \dots, s - 1, s$. W przypadku cząstek elementarnych wyróżnionym kierunkiem na jaki rzutujemy spin jest kierunek pędu takiej cząstki. Cząstka o jakiej powiemy że jest lewoskrętna będzie miała rzut spinu skierowany zgodnie z kierunkiem pędu, co przedstawia rysunek 11.



Rysunek 70. Idea spinu jako wektora. Źródło [10]

Cząstki bezmasowe o spinie s mogą przyjmować skrętność tylko równą $\pm s$ (skrajne wartości) co oznacza zarazem, że ich skrętność **nie może** wynosić 0.

Warto tutaj zaznaczyć, że ilustracja jest tylko pomocnicza i że chiralność nie jest właściwością fizyczną cząstki taką jak np. masa. Chiralność jest właściwością **funkcji falowej**²³ przypisanej do cząstki. Dokładniej jest to "cecha przekształcenia przy zmianie układu odniesienia pól, których wzbudzeniami są fermiony"[3] a więc przy dokonaniu transformacji obrotu równań opisujących funkcję falową.²⁴

Liczby kwantowe i zasady zachowania.

Liczba barionowa B - jest przypisana do każdego kwarku w wymiarze $\frac{1}{3}$ ($-\frac{1}{3}$ dla antykwarku). Mezony i leptony mają liczbę barionową równą 0. B podlega zasadzie zachowania we wszystkich oddziaływaniach.

Liczba leptonowa L_e - przypisana tylko leptonom, oddzielnie elektronowa liczba leptonowa, mionowa i taonowa. Każda oddzielnie musi być spełniona we wszystkich procesach.

Dziwność S - skalarna, addytywna wielkość, przypisana do cząstek zbudowanych z *kwarku dziwnego s* ($S = -1$), zachowywana w procesach elektromagnetycznych i silnych, natomiast może się zmieniać o 1 w trakcie rozpadów słabych.

Hiperładunek $Y = B + S$ - suma liczby barionowej i dziwności.

²³ Funkcja Falowa w fizyce cząstek - obiekt matematyczny, będący rozwiązaniem r-nia Schrödingera opisującego prawa fizyki na poziomie kwantowym. Kwadrat modułu funkcji falowej jest miarą prawdopodobieństwa znalezienia cząstki w konkretnych współrzędnych przestrzennych, dla których szukano rozwiązania.

²⁴ Więcej w Dodatku 1.

Izospin I_3 - wielkość wektorowa przypisywana cząstkom wiążąc je w grupy o podobnych właściwościach. Pomysł na nadanie takiej wielkości powstał, gdy zauważono ogromne podobieństwo między protonem a neutronem. Liczba kwantowa izospinu pozwalała traktować te cząstki jako jedną, która może przyjmować jeden z dwóch dostępnych stanów. W takim układzie proton i neutron stanowią dublet izospinowy. W późniejszym czasie okazało się, że jest więcej cząstek, którym można przypisać taką wielkość oraz, że wynikają z tego nowe nieobserwowane cząstki. Istnienie części z nich udało się już potwierdzić (np. przewidziany tryplet pionów $\pi^+ \pi^- \pi^0$) co świadczy o głębszej strukturze cząstek i ich zależnościach.

Formuła Gell-Mana-Nishijmy

Ładunek elektryczny Q , izospin I_3 i hipertładunek Y są ze sobą powiązane wg wzoru:

$$Q = I_3 + \frac{Y}{2}$$

nazywanego formułą **Gell-Mana-Nishijmy**.

Parzystość - własność funkcji falowej opisującej układ. Jeśli po zamianie kierunku osi funkcja falowa pozostaje bez zmian to mówimy o parzystości $P=+1$. Gdy funkcja zmieni znak na przeciwny to $P=-1$

Umownie przyjęto że parzystość protonu oznaczamy jako dodatnie $P_p = +1$.

Parzystość jest zachowana w procesach silnych i elektromagnetycznych, natomiast może się zmieniać w procesach słabych.

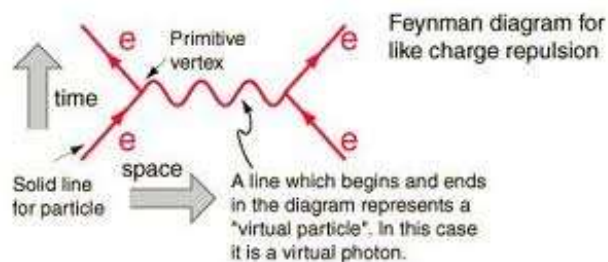
Innymi liczbami kwantowymi są określane dla kwarków (i cząstek z nich zbudowanych) **pięknob**, **powab C**, **prawda T**.

Co to jest oddziaływanie?

Zgodnie z relatywistyczną kwantową teorią pola cząstki są wzbudzeniem pola tzw. "kwantami", natomiast oddziaływanie jest elementarnym aktem, podczas którego cząstki rzeczywiste wymieniają z **polem** cząstki **wirtualne**²⁵. Może też nastąpić oddziaływanie cząstek ze sobą, które jest możliwe dzięki wymianom bozonów pośredniczących.

²⁵ wirtualne - czyli takie, które nie spełniają relatywistycznego związku energii i pędu $E^2 = p^2 + m^2$ oraz mogące się kreować i anihilować spontanicznie, ale tylko o energii i w czasie dopuszczalnym przez zasadę nieoznaczoności Heisenberga $\Delta E \Delta t \cong \hbar$.

Przykład.1 Elektron (cząstka rzeczywista) znajdująca się w polu elektro-magnetycznym może wyemitować, lub pochłonąć foton zmieniając przy tym swoją energię i pęd. Gdy taki foton zostanie pochłonięty przez inną cząstkę rzeczywistą zmieni jej energię i pęd, co będzie równoznaczne z oddziaływaniem tych cząstek.



Rysunek 8. Diagram Feynmana opisujący przykład 1. Źródło [11]

Jaki formalizm matematyczny?

Podstawą matematyczną Modelu Standardowego jest **kwantowa teoria pola z cechowaniem**, która zakłada istnienie pewnej abstrakcyjnej przestrzeni Hilberta. Stan pola jest reprezentowany przez wektory w tej przestrzeni. Oddziaływanie jest zmianą wartości tych wektorów, spowodowanym działaniem operatorów w tej przestrzeni.

Analizując powtórnie przykład 1. można powiedzieć, że w wyniku działania operatora na wektory reprezentujące stan pola nastąpiła zmiana ich wartości i ten akt nazywamy oddziaływaniem.

Siła oddziaływań

Jeżeli potraktujemy oddziaływanie jako wymianę wirtualnych cząstek - bozonów pośredniczących, to siła oddziaływań będzie odpowiadała temu, w jakim tempie nastąpi ta wymiana. Warto zaznaczyć, że ani pole, ani wirtualne cząstki nie są mierzalne, mierzalna jest tylko siła, która działa na ładunki (czy to kolorowe, czy elektryczne).

Teoria Yukawy (1935) Oddziaływanie silne, ładunki kolorowe.

Hideki Yukawa poszukiwał opisu krótkozasięgowych sił scalających jądro. Swoją teorię oparł na hipotezie oddziaływania protonów i neutronów wymieniających cząstki wirtualne, jednakże posiadające masę.

Skorzystał z równania Kleina-Gordona²⁶

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = \nabla^2 \psi - \frac{m^2 c^2}{\hbar^2} \psi$$

c - prędkość światła w próżni

$\frac{\partial^2}{\partial t^2}$ – operator drugiej pochodnej po czasie

²⁶ Jednego z najważniejszych równań w relatywistycznej fizyce kwantowej. Jest ono relatywistyczną wersją równania Schrödingera. Wyprowadzone zostało z równania na związek energii, pędu i masy $E^2 = p^2 + m^2$, (przyjmujemy $c=1$) i zamiast E i p podstawimy kwantowe operatory im odpowiadające.

∇^2 – operator drugiej pochodnej przestrzennej

m – masa oddziałującej cząstki

\hbar – stała Plancka

ψ – statyczny potencjał oddziaływania $U(\mathbf{r})$ (stacyjny, czyli pomijamy człon zależny od czasu).

Szukając sferycznie symetrycznych rozwiązań (najprostszy przypadek) otrzymujemy równanie:

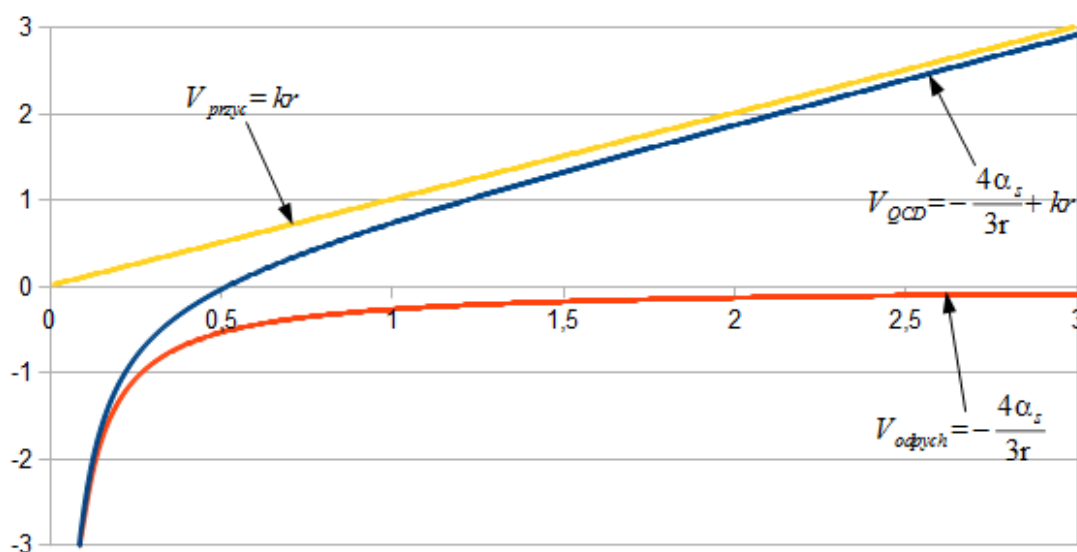
$$\nabla^2 U(r) = \frac{m^2 c^2}{\hbar^2} U(r)$$

które po scałkowaniu daje wzór na potencjał w zależności od odległości r od źródła i siły ładunku źródłowego g_0

$$U(r) = \frac{g_0}{4\pi r} e^{-\frac{r}{R}}, \quad R = \frac{\hbar}{mc} \quad (1)$$

Takie podejście oddziaływania silnego wymagało wprowadzenia ładunku do opisu oddziaływania **silnego**, który posiadałyby cząstki oddziałujące w ten sposób. Ładunek ten jak się później okazało, nie jest "jeden" - jak w przypadku oddziaływań elektromagnetycznych, a ma **trzy** rodzaje, co umownie nazwano ładunkiem kolorowym i nazewnictwo przyjęto z teorii łączenia barw palety RGB. Ponieważ, wszystkie cząstki w Modelu Standardowym posiadają swoje lustrzane odpowiedniki cząstek antymaterii, w opisie przyjmuje się też istnienie antykoloru a nazwy zaczerpnięto z palety CMYK.

Obecnie przyjmuje się, że nośnikiem oddziaływania silnego jest bezmasowy **gluon** oraz, że kształt potencjału jest nieco inny od wyżej przedstawionego rozwiązania sferycznie symetrycznego; mianowicie oprócz członu kulombowskiego występuje człon liniowy względem promienia oddziaływania r . Tak jak przedstawia to rysunek 12.



Rysunek 92. Potencjał oddziaływań silnych. Źródło [12]

Pomimo, że kształt potencjału jest obecnie postrzegany inaczej niż wyprowadził to Yukawa, to z jego rozważań wynika jeszcze jeden ważny wzór. Jeżeli obliczymy *transformatę Fouriera*²⁷ dla potencjału opisanego wzorem (1) to transformata ta będzie stanowiła **amplitudę rozpraszania** (inaczej element macierzowy²⁸).

$$f(q^2) = \frac{g_0 g}{q^2 + m^2} \quad (2)$$

m – masa źródła

g_0 – ładunek źródłowy

g – ładunek oddziałujący

Amplituda rozpraszania definiuje przekrój czynny²⁹ zdarzenia $\frac{d\sigma}{d\Omega} = |f(q^2)|^2$

w którym nastąpi przekaz czteropędu $q^2 = \Delta p^2 - \Delta E^2$, p -pęd, E - Energia
Oddziaływanie **silne** (jak również elektromagnetyczne) jest **niechiralne**, co znaczy, że zachodzi zarówno dla lewo- jak i prawo-skrętnych cząstek.

Oddziaływanie elektromagnetyczne.

Wychodząc z tego samego równania Kleina-Gordona, ale zakładając, że cząstka oddziałująca nie ma masy otrzymamy wynik odpowiedni dla oddziaływania elektromagnetycznego, gdzie bezmasową cząstką będzie foton.

Całość oddziaływań elektromagnetycznych jest opisywane przez równania Maxwella jak również przez ogólniejszą teorię - **Elektrodynamikę Kwantową** (angl. QED - Quantum Electrodynamics) - uwzględniającą efekty kwantowe.

Oddziaływanie słabe.

²⁷ specjalna całka zespolona, ściśle zdefiniowana, o określonych własnościach

²⁸ element macierzowy - macierzy CKM, o tym na kolejnych stronach

²⁹ przekrój czynny- miara prawdopodobieństwa zajścia danej reakcji

Oddziaływania słabe są podstawowymi oddziaływaniami występującymi w przyrodzie. Mimo, że udało się je już zunifikować³⁰ z oddziaływaniami elektromagnetycznymi omówię je tu oddzielnie. Oddziaływania te są odpowiedzialne za rozpad β , rozpad ciężkich kwarków i leptonów do lżejszych. **Jedynie fotony nie oddziałują słabo.**

Nośnikami oddziaływań słabych są bozony W^+ (antycząstka to W^-) i Z^0 . Są to cząstki cięższe od protonu ok.90 razy i charakteryzujące się spinem całkowitym.

Oddziaływanie poprzez prądy neutralne - bozon Z^0 nie zmienia "tożsamości" cząstki. Bozon Z^0 może być emitowany przez fermiony zarówno prawo i lewoskrętne, jednakże oddziaływania te wyglądają inaczej.

Stała sprzężenia dla oddziaływań poprzez bozon Z^0 jest w tym przypadku zależna od chiralności i wynosi $\frac{e}{\sin 2\theta_W}$, gdzie kąt θ_W jest nazywany *kątem Weinberga* i $\sin^2 \theta_W \approx 0,23$.

Oddziaływanie poprzez prądy bozony W^\pm również ma **nietrywialną strukturę chiralną**, co właśnie oznacza, że cząstki o różnej chiralności będą oddziaływały inaczej przy propagacji bozonu W^\pm .

Cząstki podczas wymiany bozonów W^\pm będą zmieniały swój ładunek elektryczny, tak więc elektron zamieni się w neutrino. Kwarki również mogą oddziaływać słabo, a co więcej oddziaływania te mają również nietrywialną strukturę zachowawczą.

Stała sprzężenia bozonów W^\pm do leptonów wynosi $\frac{e}{\sqrt{2}\sin\theta_W}$, natomiast bozonów W^\pm do kwarków jest dodatkowo osłabiana przez elementy macierze *macierzy CKM*.

Dodatkowo mogą istnieć oddziaływania bozonów W^\pm, Z^0 między sobą i z fotonami.

Macierz Cabibbo-Kobayashiego-Maskawy

Macierz ta jest matematycznym opisem prawdopodobieństw zajścia konkretnych rozpadów słabych.

Jeśli potraktujemy *zapach* kwarku jako jego *stan własny*³¹ masy to moduł kwadratu elementu macierzy $|V_{ij}^2|$ można interpretować jako prawdopodobieństwo przejścia kwarku i-tego w j-ty w wyniku oddziaływań słabych. Elementy macierzy CKM są w ogólności liczbami zespolonymi.

Przejście jednego kwarku w inny nazywa się mieszaniami i dotyczy tylko kwarków d, s, b. Jak dotąd uważa się, że kwarki u, c, t są stanami czystymi.

³⁰ Unifikacja oddziaływań elektromagnetycznych i słabych - Sheldon Glashow, Abdus Salam i Steven Weinberg (Nobel 1979).

³¹ stan własny masy - jedno z możliwych rozwiązań równania różniczkowego opisującego stany kwarków

Rysunek 13. przedstawia schemat macierzy CKM. Stany d' , s' , b' są to stany mieszane, natomiast d , s , b to stany czyste.

$$\begin{pmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix}$$

Rysunek 3. Macierz CKM. Źródło [13]

Najbardziej prawdopodobne są przejścia kwarków w obrębie tej samej generacji czyli:

$$u \rightarrow d$$

$$c \rightarrow s$$

$$t \rightarrow b$$

Macierz CKM jest macierzą unitarną³² o wymiarach 3x3, która posiada 18 swobodnych parametrów, które dzięki wymogowi unitarności można sprowadzić do 4. Elementy macierzy wyznacza się doświadczalnie poprzez mierzenie stosunków ilości rozpadów.

Macierz CKM tłumaczy niezachowanie symetrii CP³³ w rozpadach słabych, co z kolei jest (jak dotąd) najbardziej prawdopodobnym wyjaśnieniem przewagi antimaterii nad materią we wszechświecie.

Macierz CKM została wprowadzona po raz pierwszy w pracy³⁴M. Kobayashiego i T. Maskawy w roku 1973 i dzięki temu można było przewidzieć istnienie nieodkrytych wtedy kwarków c , b , t , co zostało nagrodzone Noblem w 2008 roku.

Czym jest spontaniczne łamanie symetrii?

Gdy mamy do czynienia z symetrią w równaniach oznacza to, że opisują one cząstki niezależnie od rozważanego kierunku w przestrzeni. Rozwiązanie takiego równania jest już jednak szczególnym przypadkiem wybierającym dowolny, ale tylko jeden kierunek co sprawia że symetria zostaje złamana.

Innymi słowy można powiedzieć, że :

Każde rozwiązanie jest szczególnym przypadkiem łamiącym symetrię równań, ale pełny zbiór rozwiązań jest symetryczny.

³² Unitarna - czyli posiada macierz odwrotną równą jej *hermitowskiemu* sprzężeniu (Złożenie operacji transpozycji i sprzężenia zespolonego)

³³ Symetria CP - cząstka i jej antycząstka rozpadają się dokładnie w ten sam sposób. Patrztaż dodatek 1.

³⁴ M. Kobayashi, T. Maskawa. *CP Violation in Renormalizable Theory of Weak Interaction*. „Progress of Theoretical Physics”. 1973. **49**. s. 652 (ang.).

By to lepiej zobrazować możemy posłużyć się doskonale znanym przykładem ołówka znajdującego się przez chwilę w punkcie równowagi niestabilnej, który w końcu traci tę równowagę i upada wybierając jeden z nieskończenie wielu możliwych kierunków. Dopóki ołówek stoi każdy z kierunków jest równouprawniony i występuje pełna symetria, jednakże w momencie upadku symetria zostaje złamana. Przedstawia to rysunek 14.



Rysunek 104. Przykład łamania symetrii po utracie równowagi ołówka. Źródło [14]

Mechanizm spontanicznego łamania symetrii jest powszechny w świecie cząstek elementarnych i odpowiada za nadawanie cząstkom **masy gołej**³⁵.

Skąd pochodzi masa? Bozon Higgs'a.

Zgodnie z wzorem Einsteina o równoważności masy i energii $E = mc^2$ wiadomo, że masa jest równoważna energii, więc obserwowana przez nas masa *cząstek elementarnych* może mieć źródło w oddziaływaniach *cząstek fundamentalnych*. Jest tu mowa o masie **konstytuentnej** czyli oszacowanej na podstawie mas hadronów, z uwzględnieniem, że składają się z kwarków.

Przyczynki masy konstytuentnej mają swoje pochodzenie z:

- energii zmagazynowanej w kolorowych polach gluonowych
- energii ruchu kwarków

Rodzi się wówczas pytanie, czy same cząstki elementarne mają masę, a jeśli tak, to w jaki sposób ją uzyskują.

³⁵ masy związanej z obiektem fizycznym niezależnej od jego energii

W odpowiedzi na to pytanie przychodzi model mechanizmu Englert-Brout-Higgs-Guralnik-Hagen-Kibble, według którego pochodzenie **masy gołej** kwarków, leptonów, neutrino i bozonów W i Z ma źródło w oddziaływaniach z polem Higgs'a.

Zakłada się, że całą przestrzeń wypełnia pole Higgs'a o niezerowej wartości oczekiwanej tworząc kondensat V o wymiarze masy $V \approx 246 \text{ GeV}$. Kwantem tego pola jest bozon Higgsa. Neutralna cząstka o masie $m_H = 125,3 \text{ GeV}$, skalarna (czyli spin $s = 0$).

Cząstki znajdujące się w polu Higgsa oddziałują z nim wysyłając wirtualne bozony Higgsa i tym samym nabierając masy. Jedynie fotony i gluony pozostają bezmasowe, czyli neutralne w tym polu.

Masa goła nadawana cząstkom w ten sposób stanowi zaledwie niecałe **2%** z **4%** masy znajdującej się we Wszechświecie opisywanej przez Model Standardowy.

Rozdział 3. Nowa Fizyka. Pytania, na które nie odpowiada Model Standardowy.

1) Dlaczego $q_p = q_e$?

Pomimo znacznych różnic w budowie i oddziaływaniach protonu i elektronu charakteryzują się one **taką samą wartością** ładunku elektrycznego (z dokładnością do znaku). **Proton** zbudowany z trzech kwarków walencyjnych u i d oraz **elektron** - lepton traktowany jako cząstkę punktową, niepodzielną, mają identyczne wartości ładunku, dzięki czemu atomy są jako całość obojętne elektrycznie. Stąd także i my, jako ludzie, oraz większość materii otaczającej nas na Ziemi.

Pochodzenie tego jest niewiadome, jednakże można wnioskować, że obecność ładunku elektrycznego wynika z jakiegoś głębszego prawa fizycznego, dla którego zarówno leptony jak i kwarki są cząstkami z jednej rodziny o podobnej strukturze (podobnie oddziałują z hipotetycznym polem i nabierają ładunku). Trzeba jednak pamiętać, że leptony nie oddziałują silnie, co niesie za sobą szereg konsekwencji.

2) Dlaczego masy wynoszą akurat tyle, ile wynoszą?

Model Standardowy jest teorią renormalizowaną, co znaczy, w dużym uproszczeniu, że pozwala się badać doświadczalnie, ale wymaga wyznaczenia ponad 20 swobodnych parametrów.

Parametrami tymi są masy cząstek, co stanowi kolejną zagadkę. Dlaczego masa kwarka top jest dużo większa od pozostałych? Dlaczego w ogóle masy mają takie a nie inne wartości?

Innymi swobodnymi parametrami są liczby opisujące moc trzech opisywanych oddziaływań, powiązania między nimi czy też łamanie symetrii CP³⁶

Problem swobodnych parametrów jest jednym z podstawowych i uprzykrza życie również fizykom doświadczalnym, utrudniając weryfikację założeń MS.

3) Dlaczego oddziaływania słabe naruszają parzystość i nie zachowują dziwności?

Obserwowane w rozpadach mezonów $K^0 \leftrightarrow \bar{K}$ (Kwarkowo: $\bar{d}s \leftrightarrow d\bar{s}$) niezachowanie parzystości jest jedną z zagadek współczesnej fizyki. W ramach MS tylko macierz CKM jest jedyną strukturą gdzie oscylacje te są uwzględnione w sposób formalny. Jednakże elementy macierzy CKM są wyznaczone doświadczalnie co sprawia, że zjawisko łamania zasady zachowania parzystości nie jest wynikiem żadnych obliczeń.

³⁶ Łamanie symetrii CP - mechanizm powodujący niezachowania dziwności i parzystości w oddziaływaniach słabych

4) Dlaczego jest przewaga materii nad antymaterią?

Pomimo obserwowania antymaterii w laboratorium świat przez nas obserwowany jest zbudowany z materii, a nawet dokładniej mówiąc z kwarków i leptonów pierwszej generacji.

Przewiduje się, że zaraz po Wielkim Wybuchu przez krótką chwilę istniała równowaga materii i antymaterii, która następnie została zachwiana na korzyść materii, która dalej ulegała oddziaływaniu i ekspansji w czasoprzestrzeni. Co się stało z antymaterią? Jakie oddziaływanie spowodowało tą obserwowaną przewagę?

Symetria równań względem kierunków przestrzennych i czasowych, oraz ładunku (zamiana cząstka - antycząstka) jest nazywana symetrią CPT. Równania w kwantowej teorii pola są symetryczne względem operacji CPT, jednakże obserwowana przez nas przewaga materii nad antymaterią definitywnie tą symetrię zaburza. Andriej Sacharow wysunął hipotezę, że we wczesnym wszechświecie istniała pełna symetria CPT, a po zaistnieniu **jednego** zdarzenia/ mechanizmu nastąpiło złamanie na raz symetrii zarówno czasowej, kierunkowej, jak i symetrii materia - antymateria.

5) Czym jest ciemna materia i ciemna energia?

Jak już zostało wcześniej wspomniane Model Standardowy odpisuje 4% z istniejącej materii we Wszechświecie. Astronomowie obserwując ruchy gwiazd zauważyli pewne nieścisłości z przewidywaniami teoretycznymi, co mogłoby wytłumaczyć oddziaływanie grawitacyjne z nieobserwowaną - "niewidzialną" materią.

Niewidzialną to znaczy niepromieniującą w zakresie fal możliwych dla nas do detekcji, ani nie oddziałującą ze znanymi nam substancjami. Jednym przejawem "widoczności" materii jest oddziaływanie grawitacyjne.

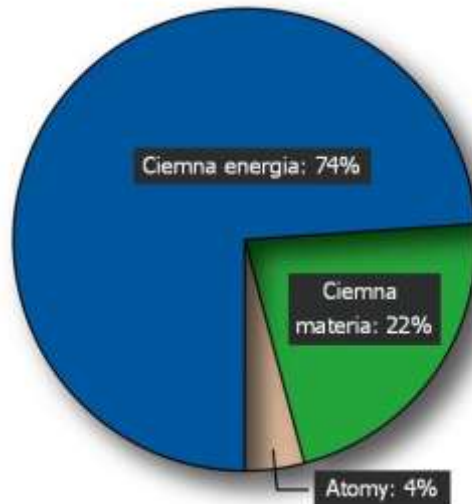
Inną sprawą jest, że wg. obecnego stanu wiedzy masa całego Wszechświata którą jesteśmy w stanie obliczyć jest zdecydowanie za mała aby po Wielkim Wybuchu powstała jakakolwiek galaktyka.

Brakującą masę nazwano **ciemną materią**, która wg oszacowania stanowi 80% masy oddziałującej grawitacyjnie.

Ciemna energia.

Według szacowań o ilości masy i energii ($E = mc^2$) we Wszechświecie opisywana przez MS materia oraz ciemna materia (oddziałująca grawitacyjnie w znany nam sposób) stanowią w sumie ok. 28%.

Co z resztą? Czym jest pozostałe 74% masy lub energii?



Rysunek 15. Rozkład procentowy szacowanej ilości energii we Wszechświecie. Źródło [15]

Kolejną sprawą jest obserwacja przyspieszonej ekspansji świata. Innymi słowy wszechświat się rozszerza coraz szybciej, a my nie znamy przyczyny tego zjawiska.

Ciemna materia ma być częściowo wyjaśnieniem tej zagadki. Postuluje się, że wypełnia ona jednorodnie całą przestrzeń oraz wywiera ujemne ciśnienie ("antygravitacja"), które "rozpycha" materię na zewnątrz.

W przeciwnym przypadku było by to zwykłą materią i oddziaływało by w sposób nam znany.

Ciemna energia jest oczywiście niewidzialna, nie promieniuje, w znany nam sposób, bo została by już zidentyfikowana.

Unifikacja sił.

Każda z sił opisywanych przez MS oddziałuje z pewną stałą sprzężenia g , odpowiednio inną dla sił elektromagnetycznych, słabych i silnych. W zakresie badanych energii oddziaływania EM i słabe są w przybliżeniu stałe, natomiast siła oddziaływań silnych maleje ze wzrostem energii (obserwowane jako zjawisko asymptotycznej swobody kwarków).

Jeżeli zależności siły wszystkich oddziaływań będziemy ekstrapolować do bardzo wysokich energii (rzędu $10^{15} GeV$) to stała sprzężenia wszystkich sił będzie określona jedną liczbą, co znaczy, że oddziaływania będą nierozróżnialne i osiągniemy unifikację oddziaływań.

Niestety takie energie raczej nie będą nigdy dostępne w laboratoriach. Zasadnym pytaniem jest też czy w ogóle można ekstrapolować zależności zbadane przy niskich energiach o tyle rzędów wielkości wzwyż.

Dlaczego MS nie opisuje oddziaływań grawitacyjnych?

Ogólna Teoria względności Einsteina, zweryfikowana już kilkakrotnie, jest obecnie najlepszą teorią opisującą oddziaływania grawitacyjne. Pomimo wielu prób nie udało jak dotąd skonstruować teorii, która łączyłaby OTW z innymi oddziaływaniami opisywanymi w ramach MS, w taki sposób by można było sprawdzić doświadczalnie prawdziwość takiej teorii. (*Dlaczego? o tym dalej.*)

Rozdział 4. Czy istnieje Teoria Wszystkiego?

Na pytania postawione we wcześniejszym rozdziale starają się odpowiedzieć hipotezy takie jak GUT (**Grand Unified Theory**), SUSY (**Super Symmetry**) czy **Teoria Superstrun**.

Skonstruowanie takiej teorii nie jest rzeczą prostą, przede wszystkim musi w sobie zawierać i uogólniać wiedzę już poznaną oraz zgrabnie łączyć odpowiedzi na niewyjaśnione zjawiska.

Jak w ogóle szukać teorii unifikującej wszystkie siły?- Kwantowy model grawitacji.

W przyrodzie występuje kilka fundamentalnych stałych np. :

- ✓ stała Plancka $\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1,054 * 10^{-34} [J * s]$
- ✓ prędkość światła w próżni $c = 3 * 10^8 \left[\frac{m}{s}\right]$
- ✓ stała grawitacyjna $G = 6,67 * 10^{-11} \left[\frac{m^3}{kg*s^2}\right]$

Oczekuje się, że Teoria Wszystkiego będzie zawierała te wszystkie stałe.

Jeśli chcemy powiązać formalizm mechaniki kwantowej i grawitacji powinniśmy znaleźć jakąś wielkość opisywaną przez powyższe stałe.

Jest nią tzw. **długość Plancka** $l_p = \sqrt{G * \frac{\hbar}{c^3}} = 1,6 * 10^{-35} m$

Przypomnijmy sobie zasadę nieoznaczoności Heisenberga odnoszącą się do energii i czasu.

Wyrażenie to wygląda następująco: $\Delta E * \Delta t \geq \hbar$

Mając do dyspozycji sygnał poruszający się z prędkością światła możemy zmierzyć odległość równą

$$\Delta x = c * \Delta t$$

Następstwem zasady nieoznaczoności jest zatem wzór $\Delta E \Delta x \geq \hbar c$ ³⁷

Pamiętamy także wzór Einsteina $E = mc^2$ z którego wynika, że fluktuacje energii ΔE są równoważne fluktuacjom masy zgodnie ze wzorem : $\Delta E = \Delta M c^2$.

Kolejnym wzorem służącym do wyprowadzenia skal unifikacji jest wzór na **Promień Schwarzschilda** R_s przypisywany każdemu obiektowi o masie m.

$$R_s = \frac{2Gm}{c^2}$$

³⁷ Całość wyprowadzenia dostępne w artykule "Struny- Kolejna unifikacja?" Delta 06/1989 dostępne pod adresem <http://www.wiw.pl/delta/struny.asp>

Jeśli obiekt ma rozmiary mniejsze od R_s to żadne informacje nie wychodzą na zewnątrz z sfery o tym promieniu. Promień Schwarzschilda jest granicą, która wyznacza horyzont czarnej dziury dla obiektu o masie m . Nie możemy zatem próbować obszarów wewnątrz R_s .

Obliczmy zatem taki promień dla fluktuacji masy ΔM

$$R_{\Delta M} = \frac{2G\Delta M}{c^2}$$

Promień ten jednocześnie najmniejszym Δx_{min} .

$$\Delta x_{min} = \frac{2G\Delta M}{c^2}$$

Ponieważ zaś $\Delta M = \frac{\Delta E}{c^2}$ i $\Delta E \Delta x \geq \hbar c \Rightarrow \Delta M = \frac{\hbar}{\Delta x c}$

Otrzymujemy minimalny obszar sondowania $\Delta x_{min} = \sqrt{\frac{2G\hbar}{c^3}} = \sqrt{2l_p}$, któremu odpowiada masa $\Delta M \approx M_p = 1,2 * 10^{19} GeV/c^2$ nazwana **Masą Plancka**.

Chcąc badać przestrzeń na odległości l_p musimy uwzględnić kwantowe efekty grawitacji.

Pierwszą kandydatką do miana Teorii Wszystkiego jest :

Teoria Superstrun.

Założenia:

- Cząstki elementarne są wzbudzeniami jednowymiarowych strun o długości rzędu $10^{-35}m$ ³⁸
- Do opisu potrzebujemy 10 wymiarów (9-ciu przestrzennych i 1-go czasowego) .
- Oddziaływania fundamentalna są opisywane przez jedną stałą o wymiarze długości - dł. Plancka l_p , która stanowi jednocześnie rozmiar struny.
- Dla dużych odległości siła oddziaływań maleje z kwadratem odległości - cząstki wydają się być punktowe, a obecne opisy oddziaływań pozostają prawdziwe
- Dla małych odległości znaczenie nabiera rozmiar struny.

Konsekwencją teorii Superstrun w obszarze niskich energii jest Model Standardowy.

Problemem jest to, że Teoria Superstrun nie jest jednoznaczna. Mnogość rozwiązań wprowadza nieweryfikowalną hipotezę wielu światów, a wielkości na poziomie długości i czasu w skali Plancka są obecnie niemożliwe do zmierzenia.

³⁸ $10^{-35}m$ – skala Plancka

GUT - Grand Unified Theory

- Ekstrapolacja opisu sił elektroslabych i silnych do wyższych energii
- Unifikacja sił następuje dla energii rzędu $10^{15} GeV$
- Możliwy rozpad protonu
- Istnienie supermasywnych cząstek bozonów X (tysiąc bilionów mas protonu)
- Teoria SU(5) zakłada skwantowanie ładunku w porcjach $\frac{1}{3}e$ oraz wspólną strukturę dla kwarków i leptonów.

SUSY – Supersymmetry Theory

- Każda z cząstek posiada swojego supersymetrycznego partnera należącym do przeciwnej grupy statystyki kwantowej (fermion - bozon) kwark-skwark, lepton-slepton, bozon W - Wino itd.
- Dostajemy kandydatów na cząstki ciemnej materii - trwałe i bardzo masywne cząstki supersymetryczne
- Cząstki SUS pochodzą z ery Wielkiego Wybuchu, ale mogły przetrwać do dzisiaj

Przypominając raz jeszcze problem złamania symetrii we wszechświecie teoria SUSY tłumaczy to w ten sposób, że liczba cząstek jest nieskończona, jednakże tylko skończoną ich część możemy obserwować w dostępnych dla nas zakresach energii.

Rozdział 5. Słowo na zakończenie.

Podsumowując wszystkie wcześniejsze rozważania Model Standardowy jest obecnie najlepszą teorią opisującą cząstki i oddziaływania na poziomie fundamentalnym.

Model standardowy ma przynajmniej 24 parametry które należy wyznaczać doświadczalnie (masy cząstek) oraz nie opisuje sił grawitacyjnych a także nie unifikuje oddziaływań silnych.

Istnieje jednak wiele nieoczekiwanych efektów na które nie znamy odpowiedzi .

Dąży się do znalezienia jednolitej teorii łączącej wszystkie oddziaływania EM, słabe, silne grawitacyjne, oraz wyjaśniającej inne aspekty, których nie obejmuje MS (Ciemna Energia, dlaczego materia, a nie anty-materia?)

Rozwiązanie tych zagadek stanowi już teraz wyzwanie i będzie wymagało kolejnego kroku rozwoju zarówno technologicznego i inżynierskiego, gdyż potrzeba coraz większych energii, jak i teoretycznego - potrzeba nowej Fizyki i nowej Matematyki.

Bibliografia

[1] <http://www.nobelprize.org/>

[2] <http://pdg.lbl.gov/>

[3] Artykuł opublikowany na stronie internetowej czasopisma Delta: Delta i fizyka cząstek elementarnych (I) "Model Standardowy jaki jest, każdy widzi" Piotr Chankowski UW.
http://www.deltami.edu.pl/temat/fizyka/struktura_materii/2015/12/31/Model_Standardowy_jaki_est_est_kaz/

[4] Murray Gell-Mann *Kwarki Jaguar*. Wydawnictwo CIS. Warszawa 1996

[5] http://www.symmetrymagazine.org/sites/default/files/legacy/pdfs/200502/beyond_the_standard_model.pdf

[6] *Model Standardowy-wykład prof. Krzysztofa Maissnera w ramach cyklu "Drogi do rzeczywistości" w Centrum Nauki Kopernik* <https://www.youtube.com/watch?v=JnH-K3qOxsY>

[7] Murray Gell-Mann | *Beauty and Elegance in Physics*
<https://www.youtube.com/watch?v=7qiJTNKTihk&t=2809s> [dostęp]

[8] Garrett Lisi at TEDxMaui 2013, *The Geometry of Particle Physics*
<https://www.youtube.com/watch?v=wfALJzn1hE8>

[9] Garrett Lisi, *A theory of everything*, https://www.youtube.com/watch?v=y-Gk_Ddhr0M

[10] Brian Greene, *Making sense of string theory*, https://www.youtube.com/watch?v=YtdE662eY_M

[11] Brian Greene, *Why is our universe fine-tuned for life?*
<https://www.youtube.com/watch?v=bf7BXwVeyWw>

[12] Frank Close *Kosmiczna cebula kwarki i wszechświat*. PWN. Warszawa 1988

[13] *Foton nr. 123, Zima 2013* <http://www.foton.if.uj.edu.pl/documents/12579485/793a2013-285d-45de-bc45-aa15f869b6de>

Źródła rysunków

1. <http://education.jlab.org/glossary/betadecay.gif>
2. <http://education.jlab.org/glossary/betadecay.gif>
3. http://neutrino.fuw.edu.pl/edu_pict/reines_exp.jpg
4. http://www.fuw.edu.pl/~neutrino/img/pion_decay.gif
5. https://www.ias.edu/sites/default/files/styles/grid_feature_teaser/public/images/featured-thumbnails/ideas/Greenberg-images.jpg?itok=cXJwSCLl
6. *Fizyka zderzeń ciężkich jonów* - slajdy pomocnicze do wykładu, wykład 4, slajd 38.
<http://www.if.pw.edu.pl/~kperl/HIP/hip.html>
7. http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2004/phympub1highen.jpg
8. <https://i.ytimg.com/vi/nlv06ISAC7c/maxresdefault.jpg>

9. https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/8/8a/Czastki_elementarne_modelu_standardowego.svg/300px-Czastki_elementarne_modelu_standardowego.svg.png
10. http://www.deltami.edu.pl/temat/fizyka/struktura_materii/2015/12/31/Model_Standardowy_jaki_jest_kaz/
11. <http://nirmukta.com/wp-content/uploads/2013/01/FeynmannDiagram.jpg>
12. By Persino - Praca własna, CC BY-SA 3.0,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=18407343>
13. *Fizyka zderzeń ciężkich jonów* - slajdy pomocnicze do wykładu, wykład 2, slajd 21.
<http://www.if.pw.edu.pl/~kperl/HIP/hip.html>
14. <http://fizyka.org/?artykul,73>
15. <http://kopalniawiedzy.pl/media/lib/65/durhamastron.jpg>