

# Cząstki elementarne – Model Standardowy i popularne rozszerzenia

Sławomir Stachniewicz, IF PK

## 1. Wstęp.

**Model Standardowy** to obecnie obowiązująca teoria **cząstek elementarnych**, które są składnikami materii. Wprawdzie zapewnia niezłą zgodność przewidywań z wynikami doświadczalnymi ale specjaliści są w zasadzie zgodni, że jest niewystarczający. Pojawiły się rozszerzenia tego modelu, niektóre zdobyły znaczną popularność ale żadne z nich nie zostało odpowiednio potwierdzone.

## 2. Historyczne poglądy na budowę materii.

Pierwsze poglądy, które dotrwały do naszych czasów: starożytna Grecja, VII-VI w. p.n.e. Według nich, materia jest zbudowana z czterech żywiołów: **ognia**, ziemi, **powietrza** i **wody**. Brak zgodności między filozofami, który żywioł miał być najważniejszy, ostatecznie sprecyzował to Empedokles (cała materia miała się składać z 4 żywiołów).

V w. p.n.e.: **Demokryt z Abdery** zapostulował, że materia składa się z małych, niepodzielnych części (**atomów**). Z kolei żyjący później Platon i Arystoteles twierdzili, że **materię można dzielić w nieskończoność**.

Średniowiecze: rozwój alchemii, bazującej na koncepcji żywiołów. Podstawowymi budulcami (**pierwiastkami**) miały być

siarka i rtęć. Koncepcja ta runęła po odkryciu, że pierwiastków jest dużo więcej.

XVIII w.: dzięki pracom m.in. Huygensa i Boyle'a oraz Newtona powrócono do koncepcji atomu. Teza potraktowana bardzo sceptycznie.

1803: Dalton sprecyzował pojęcie atomu i udowodnił, że wtedy można dobrze wytłumaczyć podstawowe prawa chemii.

1897: J.Thomson odkrył ujemnie naładowane elektrony. Miały być umieszczone wewnątrz dodatnio naładowanej materialnej kulki.

1908: E.Rutherford odkrył istnienie jądra atomowego.

1932: J.Chadwick odkrył neutron.

1947: odkrycie istnienia mezonów (H.Yukawa przewidział ich istnienie w 1935 r.; miały to być cząstki pośredniczące w oddziaływaniach silnych).

Następne lata: odkryto istnienie bardzo wielu „cząstek elementarnych”. Zaczęły odzywać się głosy, że powinno się przyznawać nagrody Nobla nie za ich odkrywanie, tylko za zmniejszenie ich ilości...

### 3. Model kwarkowy

Ważnym krokiem na drodze do Modelu Standardowego było powstanie **modelu kwarkowego**. Wymyślili go w 1964 r., niezależnie od siebie, M.Gell-Mann i G.Zweig.

Rozważane cząstki elementarne (**hadrony**) miały składać się z 3 kwarków: **u**, **d** i **s**, oraz z ich antycząstek czyli **antykwarłów**.

Typy hadronów:

- ⇒ bariony – stany związane 3 kwarków
- ⇒ antybariony – stany związane 3 antykwarków
- ⇒ mezony – stany związane kwark-antykwarł

Model został częściowo potwierdzony w 1968 r. kiedy okazało się, że cząstki elementarne składają się z mniejszych czą-

stek, nazwanych przez R.Feynmana partonami. Późniejsze doświadczenia pozwoliły na utożsamienie ich z kwarkami.

Dalsze doświadczenia wykazały, że kwarków jest zbyt mało i trzeba jeszcze wprowadzić 3 kolejne: **c**, **b** i **t**.

## 4. Model standardowy – podstawy i przewidywania

Model Standardowy to efekt poszukiwań jednego, zgrabnego modelu, który opisywałby całą obecną wiedzę na temat cząstek elementarnych i oddziaływań między nimi.

Występują w nim trzy oddziaływania: elektromagnetyczne, słabe i silne. Pod względem matematycznym opiera się na koncepcji pól Yanga-Millsa.

Model powstawał w latach 60. i 70. ubiegłego wieku. Większość jego przewidywań potwierdzono do lat 80. ale przez długi czas nie udawało się potwierdzić ostatniego przewidywania modelu – istnienia tzw. [bozonu Higgsa](#).

Według Modelu Standardowego, podstawowe cząstki w przyrodzie występują w postaci cząstek należących do dwóch



kategorii: **bozonów** i **fermionów**. Bozony i fermiony są opisywane różnymi statystykami (Bosego-Einsteina i Fermiego-Diraca); różnica jest m.in. taka, że w przypadku fermionów obowiązuje tzw. **zakaz Pauliego** a w przypadku bozonów – nie.

	mass →	charge →	spin →																									
	≈2.3 MeV/c <sup>2</sup>	2/3	1/2	<b>u</b>	up	≈1.275 GeV/c <sup>2</sup>	2/3	1/2	<b>c</b>	charm	≈173.07 GeV/c <sup>2</sup>	2/3	1/2	<b>t</b>	top	0	0	1	<b>g</b>	gluon	≈126 GeV/c <sup>2</sup>	0	0	0	<b>H</b>	Higgs boson		
<b>QUARKS</b>	≈4.8 MeV/c <sup>2</sup>	-1/3	1/2	<b>d</b>	down	≈95 MeV/c <sup>2</sup>	-1/3	1/2	<b>s</b>	strange	≈4.18 GeV/c <sup>2</sup>	-1/3	1/2	<b>b</b>	bottom	0	0	1	<b>γ</b>	photon								
	0.511 MeV/c <sup>2</sup>	-1	1/2	<b>e</b>	electron	105.7 MeV/c <sup>2</sup>	-1	1/2	<b>μ</b>	muon	1.777 GeV/c <sup>2</sup>	-1	1/2	<b>τ</b>	tau	91.2 GeV/c <sup>2</sup>	0	1		<b>Z</b>	Z boson							
<b>LEPTONS</b>	<2.2 eV/c <sup>2</sup>	0	1/2	<b>ν<sub>e</sub></b>	electron neutrino	<0.17 MeV/c <sup>2</sup>	0	1/2	<b>ν<sub>μ</sub></b>	muon neutrino	<15.5 MeV/c <sup>2</sup>	0	1/2	<b>ν<sub>τ</sub></b>	tau neutrino	80.4 GeV/c <sup>2</sup>	±1	1		<b>W</b>	W boson							
																												<b>GAUGE BOSONS</b>

Fermiony są podstawowym budulcem materii i dzielą się na leptony i kwarki.

Leptony:

⇒ elektron  $e$  i neutrino elektronowe  $\nu_e$

⇒ mion  $\mu$  i neutrino mionowe  $\nu_\mu$

⇒ taon  $\tau$  i neutrino taonowe  $\nu_\tau$

Kwarki:

⇒ górny  $u$  (+2/3) i dolny  $d$  (-1/3)

⇒ powabny  $c$  (+2/3) i dziwny  $s$  (-1/3)

⇒ szczytowy (prawdziwy)  $t$  (+2/3) i denny (piękny)  $b$  (-1/3)

Bozony są cząstkami pośredniczącymi w oddziaływaniach

⇒ elektromagnetycznych: fotony

⇒ słabych: bozony  $W^+$ ,  $W^-$  i  $Z^0$

⇒ silnych: gluony przenoszące pewne liczby kwantowe, tzw. kolory.

Kolory to są liczby kwantowe pozwalające odróżnić od siebie kwarki. Są trzy kolory (czerwony  $r$ , zielony  $g$  i niebieski  $b$ ), dzięki czemu w skład jednej cząstki elementarnej mogą wchodzić aż trzy kwarki tego samego typu, np.  $ddd$ . Gluony zwykle są w postaci par kolor-antykolor (np.  $r\bar{g}$ ) ale istnieją również dwa bardziej skomplikowane gluony:  $\frac{1}{\sqrt{2}}(r\bar{r} - b\bar{b})$  i  $\frac{1}{\sqrt{6}}(r\bar{r} + b\bar{b} - 2g\bar{g})$ .

Po wyemitowaniu lub zaabsorbowaniu gluonu kwark może zmienić kolor, np. kwark czerwony po wyemitowaniu gluonu  $r\bar{g}$  zmienia kolor na zielony.

Problemy Modelu Standardowego:

- ⇒ w pierwotnych wersjach modelu wszystkie cząstki są bezmasowe
- ⇒ ma aż 19 swobodnych parametrów (głównie masy cząstek)
- ⇒ problem hierarchii i tzw. fine tuning – precyzyjnego dostrojenia wielu parametrów
- ⇒ nie uwzględnia grawitacji, nie wyjaśnia ilości materii ani braku antymaterii we Wszechświecie
- ⇒ w podstawowej wersji nie uwzględnia mas neutrin.

## 5. Bozon Higgsa

Aby nadać masy cząstkom elementarnym, trzeba było w jakiś sposób wprowadzić tzw. **spontaniczne złamanie symetrii**. Jednym z rozwiązań może być wprowadzenie dodatkowej cząstki – **bozonu Higgsa**. Z matematycznego punktu widzenia, do oddziaływań dodano skalarne pole kwantowe (Higgsa), sprzężone z innymi polami kwantowymi materii (bozonów i fermionów). Pierwotne modele przewidywały masę rzędu 10 lub nieco powyżej  $15 \text{ GeV}/c^2$  (dla porównania: masa protonu to  $0.931 \text{ GeV}/c^2$ ).

4 lipca 2012 r. CERN ogłosił wyniki danych zebranych przez eksperymenty ATLAS i CMS, wskazujące na **odkrycie bozonu o masie  $125.3 \pm 0.6 \text{ GeV}/c^2$** .

31 lipca kierownictwo eksperymentu ATLAS przedstawiło wyniki analizy pomiarów aż do czerwca włącznie, a dotyczące badania hipotetycznych kanałów rozpadu bozonu Higgsa powstałego w wyniku zderzeń p-p:

$$H \longrightarrow ZZ^{(*)} \longrightarrow 4l$$

$$H \longrightarrow \gamma\gamma$$

$$H \longrightarrow WW^{(*)} \longrightarrow e\nu\mu\nu$$

Potwierdzono zaobserwowanie nowej cząstki o masie  $126 \pm 0.4 \pm 0,4 \text{ GeV}/c^2$ . W 2013 r. przedstawiono dalsze wyniki, oparte na analizie 2.5-krotnie większej liczby danych. Według nich, cząstka ma **spin równy zero** (pierwsza odkryta cząstka skalarna) i dodatnią parzystość. Wyniki te są zgodne

z postulatami modelu Higgsa. W związku z tym, w tym samym roku Peter Higgs i François Englert zostali uhonorowani nagrodą Nobla w dziedzinie fizyki.

Niektórzy uczeni wskazują na to, że odkryta cząstka może być czymś jeszcze bardziej egzotycznym, np. może być **więcej niż jeden** bozon Higgsa (np. **tryplet**) a odkryty byłby najlżejszym z nich (co postulują np. modele supersymetryczne) albo że miałyby inne kanały rozpadu.

## 6. Supersymetria

Supersymetria zakłada, że każda *cegiełka* materii ma swojego supersymetrycznego partnera. Każdy bozon ma swój supersymetryczny fermion i na odwrót. Nazwy powstają przez dodanie na początku litery **s** lub końcówki **-ino**:

kwark-skwark, elektron-selektron, gluon-gluino, neutrino-sneutrino, foton-fotino, W-wino, Z-zino...

Zalety:

- ⇒ unifikacja bozonów i fermionów
- ⇒ unifikacja oddziaływań przy jednej energii
- ⇒ kandydat na ciemną materię (stabilny **najlżejszy partner supersymetryczny**, czyli w większości modeli **neutralino**)



- ⇒ złagodzenie rozbieżności w ramach teorii (łatwiejsza do **re-normalizacji**)
- ⇒ możliwe rozszerzenie na grawitację – **supergrawitacja** łatwiejsza *w obsłudze* niż kwantowa grawitacja (partnerem grawitonu byłoby grawitino).

Zasadniczą wadą jest to, że te modele nie mają **żadnego** potwierdzenia doświadczalnego, dlatego fizycy cząstek są do nich coraz bardziej zniechęceni.

## 7. Teorie wielowymiarowe

Pierwsze propozycje: **teoria Kaluzy-Kleina** (1921-25). Dodanie dodatkowego wymiaru pozwoliło zunifikować pola grawitacyjne i elektromagnetyczne. Świat byłby cylindryczny, zaś dodatkowy wymiar byłby **skompaktyfikowany** na długości rzędu **długości Plancka** (rzędu  $10^{-35}$  m).

Propozycje oparte o kwantową teorię pola zakładają znacznie większą liczbę dodatkowych wymiarów. Najprostsza wersja to 11-wymiarowa (3+1+7) supergrawitacja. Wersje oparte o **struny kwantowe** mają znacznie więcej wymiarów, np. 26. W przypadku **supersymetrycznych strun** (**superstrun**) liczba wymiarów może zmaleć do 10 (Green i Schwarz, 1984).

Kolejna klasa teorii to tzw. **M-teorie**, w których występują 0-brany (cząstki), 1-brany (struny), 2-brany (membrany) i być może obiekty o większej liczbie wymiarów. W tego typu teoriach może pojawić się olbrzymia liczba dodatkowych wymiarów, np. zamiast czasoprzestrzeni 11-wymiarowej postulowana jest czasoprzestrzeń 11+517-wymiarowa. Mówi się też o wprowadzaniu geometrii nieprzemiennej.

Oprócz tego istnieją inne, jeszcze bardziej egzotyczne rozszerzenia Modelu Standardowego (np. leptokwarki albo mały Higgs).

## 8. Podsumowanie

- ⇒ Model Standardowy dobrze opisuje zachowanie cząstek elementarnych.
- ⇒ Po długich poszukiwaniach odkryto brakujący element (bozon Higgsa), choć nie jest do końca jasne, czy to faktycznie ta cząstka.
- ⇒ Duża liczba swobodnych parametrów i konieczność ich precyzyjnego dostrojenia powoduje, że teoretycy poszukują innego, ulepszanego modelu.
- ⇒ Najprostsze rozszerzenie (supersymetria) nie ma żadnego potwierdzenia doświadczalnego, zaś te bardziej skomplikowane zakładają istnienie bardzo egzotycznej fizyki.

Papier wszystko zniesie – a sytuacja jest wynikiem tego, że ograniczenia techniczne nie pozwalają na weryfikację *radosnej twórczości* teoretyków.