

Model Standardowy i model Higgsa

Sławomir Stachniewicz, IF PK

1. Wstęp.

Model Standardowy to obecnie obowiązująca teoria **cząstek elementarnych**, które są składnikami materii. **Model Higgsa** to dodatek do Modelu Standardowego który wyjaśnia, dlaczego cząstki elementarne mają masy różne od zera. Większość przewidywań Modelu Standardowego potwierdzono w latach 70. i 80. ubiegłego wieku, ale istnienie bozonu Higgsa stwierdzono dopiero w lipcu 2012 roku.

Wprawdzie już w zasadzie nie ulega wątpliwości, że bozon Higgsa istnieje (dodatkowe dane potwierdzające odkrycie opublikowano w marcu 2013 r.) i nawet przyznano za to odkrycie nagrodę Nobla, ale ciągle występują spore niejasności odnośnie

samego bozonu. W szczególności: może jest to jeden bozon, może jest ich kilka a może nawet kilkanaście?

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 **antykuarków**.

Typy hadronów:

- ⇒ bariony – stany związane 3 kwarków
- ⇒ antybariony – stany związane 3 antykuarków
- ⇒ mezony – stany związane kwark-antykuark

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 Yang-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 →	$\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$ 2/3 1/2	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$ 2/3 1/2	$\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$ 2/3 1/2	0 0 1	$\approx 126 \text{ GeV}/c^2$ 0 0
		u up	c charm	t top	g gluon	H Higgs boson
QUARKS		$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$ -1/3 1/2	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$ -1/3 1/2	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$ -1/3 1/2	0 0 1	
		d down	s strange	b bottom	γ photon	
		$0.511 \text{ MeV}/c^2$ -1 1/2	$105.7 \text{ MeV}/c^2$ -1 1/2	$1.777 \text{ GeV}/c^2$ -1 1/2	0 1	
		e electron	μ muon	τ tau	Z Z boson	
LEPTONS		$< 2.2 \text{ eV}/c^2$ 0 1/2	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$ 0 1/2	$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$ 0 1/2	± 1 1	
		ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	W W boson	
					GAUGE BOSONS	

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

Leptony:

⇒ elektron e i neutrino elektronowe ν_e

⇒ mion μ i neutrino mionowe ν_μ

⇒ taon τ i neutrino taonowe ν_τ

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)
- ⇒ nie wyjaśnia fazy inflacyjnej (lub mechanizmu odbicia)
- ⇒ nie wyjaśnia braku antymaterii we Wszechświecie
- ⇒ nie wyjaśnia ilości materii
- ⇒ nie uwzględnia grawitacji
- ⇒ 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 przewidywania: masa cząstki Higgsa powinna być rzędu 10 lub nieco powyżej 15 GeV/c^2 (dla porównania: masa protonu to $0.931 \text{ GeV}/c^2$).
- ⇒ Eksperymenty prowadzone w latach 1990-2000 przy użyciu akceleratora LEP w CERN: jeśli istnieje to musi mieć masę powyżej $114 \text{ GeV}/c^2$.

⇒ Do listopada 2011 r. na poziomie ufności 95% wykluczono obecność bozonu w zakresie mas 141-476 GeV/c² (a w zakresie 146-443 GeV/c² na poziomie 99%).

⇒ W grudniu 2011 r. stwierdzono, że jeśli bozon Higgosa istnieje, to w zakresie mas 116-130 GeV/c² (eksperyment ATLAS) lub 115-127 GeV/c² (eksperyment CMS).

4 lipca 2012 r. CERN ogłosił wyniki danych zebranych przez eksperymenty ATLAS i CMS, wskazujące na **odkrycie bozonu o masie 125.3 ± 0.6 GeV/c²**. Wielu specjalistów sądzi, że jest to ów wyczekiwany bozon Higgosa.

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 $126 \pm 0.4 \pm 0,4 \text{ GeV}/c^2$ na poziomie istotności 5.9σ . Wynik ten – o ile nie jest wynikiem błędu – świadczyłby o tym, że prawdopodobieństwo, iż jest on wynikiem np. fluktuacji tła, jest na poziomie poniżej 1.7×10^{-9} . Kierownictwo eksperymentu zastrzegło, że **potrzebne są dalsze badania w celu jednoznacznej identyfikacji cząstki.**

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 roku Peter Higgs i François Englert zostali uhonorowani nagrodą Nobla w dziedzinie fizyki.

6. Wątpliwości

Niektórzy uczeni przestrzegają przed zbytnim triumfalizmem. Sceptyków można podzielić na dwie kategorie: powątpiewających w istnienie cząstki Higgsa (tych jest chyba coraz mniej) oraz uważających, że cząstka Higgsa ma inne właściwości niż to się na ogół przyjmuje.

Wątpiący zwracają uwagę na fakt, że cząstkę Higgsa odkryto niemal „w ostatniej chwili”, po wyeliminowaniu w zasadzie wszystkich innych możliwych wartości masy. W ostatnich latach było wiele sensacyjnych doniesień o odkryciu nowych cząstek lub dziwnych efektów, które nie zostały potwierdzone albo które zostały zdementowane (jak np. rzekome neutrina poruszające się szybciej od światła).

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

7. Podsumowanie

- ⇒ Uważa się, że Model Standardowy dobrze opisuje zachowanie cząstek elementarnych.
- ⇒ Brakującym elementem Modelu Standardowego jest bozon Higgsa.
- ⇒ Ogłoszono odkrycie cząstki o podobnych właściwościach...
- ⇒ ... ale czy naprawdę jest to cząstka Higgsa?