

# Einstein a sprawa CERNowska

Sławomir Stachniewicz, IF PK

## 1. Kim Pan był, panie Einstein?

Albert Einstein (1879-1955) jest znany przede wszystkim jako twórca **Teorii Względności**. Dwa przełomowe lata to 1905 (publikacja artykułów na temat **Szczególnej Teorii Względności**, efektu fotoelektrycznego i ruchów Browna) i 1915 (publikacja **Ogólnej Teorii Względności**). Później spędził wiele lat (niektórzy twierdzą, że zmarnowanych) na bezowocne poszukiwania **Teorii Wielkiej Unifikacji**.

Wprawdzie niektórzy podważają rolę Einsteina w powstaniu Teorii Względności, ale w powszechnym odczuciu był **najwybitniejszym fizykiem XX wieku** i jednym z najwybitniejszych w historii. Jako twórca Teorii Względności i współtwórca fizyki kwantowej położył podwaliny pod fizykę współczesną.

## 2. Szczególna Teoria Względności.

STW jest teorią czasoprzestrzeni opartą na założeniu, że **prędkość światła w próżni jest prędkością graniczną**. Ponadto w jej ramach można pogodzić teorię elektromagnetyzmu (**równania Maxwella**) z mechaniką.

Podstawowe przewidywania STW:

⇒ względność czasu

⇒ dylatacja czasu  $\tau_0 = \tau \sqrt{1 - v^2/c^2}$

⇒ skrócenie Lorentza  $L = L_0 \sqrt{1 - v^2/c^2}$

⇒ zmienione prawo dodawania prędkości

⇒ masa rośnie wraz z prędkością  $m = m_0 / \sqrt{1 - v^2/c^2}$

- ⇒ równoważność między masą a energią  $E = mc^2$
- ⇒ jeśli cząstki poruszają się z prędkością światła  $c$ , muszą mieć zerową masę spoczynkową  $m_0$  i nie mogą poruszać się wolniej.

### 3. Ogólna Teoria Względności.

Podstawowa idea: wszelki ruch określa się i mierzy względem innych określonych układów odniesienia. W odróżnieniu od STW są to dowolne układy, nie tylko inercjalne. Prawa fizyki mają identyczną postać matematyczną bez względu na układ odniesienia. **Zasada równoważności**: nie można lokalnie rozróżnić spadku swobodnego w polu grawitacyjnym od ruchu w układzie nieinercjalnym. Masa bezwładna i grawitacyjna są równoważne.

Obecność masy zakrzywia przestrzeń i dlatego poruszające się ciała mają tory zakrzywione ku tej masie. W ten sposób powstają przyspieszenia i jest to obserwowane jako działanie sił grawitacyjnych.

Pełny opis matematyczny OTW wymaga znajomości rachunku tensorowego i geometrii różniczkowej. Istnieje kilka prostych przewidywań:

- ⇒ zakrzywienie toru światła obok dużych mas (np. Słońce może odchylić światło gwiazd o 1,6 sekundy łuku)
- ⇒ spowolnienie ruchu zegarów w obecności pola grawitacyjnego – jedną z konsekwencji jest fakt, że światło emitowane z powierzchni masywnego ciała ma niższą częstotliwość, czyli większą długość; jest to efekt, który musi być uwzględniany m.in. w nawigacji GPS
- ⇒ anomalny ruch perycentrów (w przypadku peryhelium Merkurego jest to ok. 48 sekund łuku na stulecie)

⇒ istnienie czarnych dziur czyli ciał, z których powierzchni nic się nie może wydostać – nawet światło. Promień takiego ciała musi być mniejszy od tzw. **promienia Schwarzschilda** równego  $2GM/c^2$  (dla ciała o masie Słońca jest on równy ok. 3 km, dla Ziemi niecałe 9 mm).

## 4. Model kwarkowy

Aby zrozumieć, co jest badane w CERN-ie, trzeba zacząć od **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**.

## 5. 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 → |                      |                   |                           |      |     |                      |               |                            |      |     |                      |              |                         |    |   |          |          |                         |   |   |   |          |             |  |                     |
|----------------|--------------------------|----------|--------|----------------------|-------------------|---------------------------|------|-----|----------------------|---------------|----------------------------|------|-----|----------------------|--------------|-------------------------|----|---|----------|----------|-------------------------|---|---|---|----------|-------------|--|---------------------|
|                | ≈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)
- ⇒ 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.

## 6. 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  $\text{GeV}/c^2$  (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/c<sup>2</sup> (a w zakresie 146-443 GeV/c<sup>2</sup> na poziomie 99%).

⇒ W grudniu 2011 r. stwierdzono, że jeśli bozon Higgosa istnieje, to w zakresie mas 116-130 GeV/c<sup>2</sup> (eksperyment ATLAS) lub 115-127 GeV/c<sup>2</sup> (eksperyment CMS).

4 lipca 2012 r. CERN ogłosił wyniki danych zebranych przez eksperymenty ATLAS i CMS, wskazujące na **odkrycie bozonu o masie  $125.3 \pm 0.6$  GeV/c<sup>2</sup>**. 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  $5.9\sigma$ . Wynik ten – o ile nie jest wynikiem błędu – świadczyłby o tym, że prawdopodobieństwo, iż jest on wynikiem np. fluktuacji tła, jest na poziomie poniżej  $1.7 \times 10^{-9}$ . 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.