

stawiona w tabeli 1.3. Należy zauważyć, że wielkości te są jedynie orientacyjne, ponieważ siły zależą od rozważanej odległości i skali energii.

Tabela 1.3. Cztery znane siły natury. Względne siły są wartościami orientacyjnymi dla dwóch podstawowych cząstek znajdujących się w odległości $1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$ (w przybliżeniu średnica protonu)

Oddziaływanie	Wartość	Bozon		Spin	Masa/GeV
Silne	1	gluon	g	1	0
Elektromagnetyczne	10^{-3}	foton	γ	1	0
Słabe	10^{-8}	bozon W	W^\pm	1	80,4
		bozon Z	Z	1	91,2
Grawitacja	10^{-37}	grawiton?	G	2	0

1.1.3. Bozon Higgsa

Ostatnim elementem Modelu Standardowego jest bozon Higgsa, który został odkryty podczas eksperymentów ATLAS i CMS w Wielkim Zderzaczu Hadronów (LHC, ang. Large Hadron Collider) w 2012 roku. Bozon Higgsa, który ma masę

$$m_H \approx 125 \text{ GeV}$$

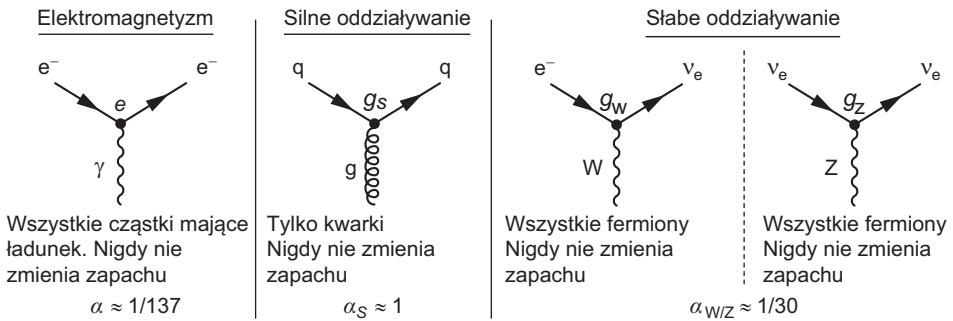
różni się od wszystkich innych cząstek Modelu Standardowego. W przeciwieństwie do podstawowych fermionów i bozonów cechowania, które są odpowiednio cząstkami o spinie połówkowym i spinie 1, bozon Higgsa jest cząstką skalarną o spinie 0. Zgodnie z założeniami Modelu Standardowego bozon Higgsa jest jedyną fundamentalną cząstką skalarną odkrytą do tej pory.

Bozon Higgsa odgrywa szczególną rolę w Modelu Standardowym: zapewnia mechanizm, dzięki któremu wszystkie inne cząstki zyskują masę. Bez niej Wszechświat byłby zupełnie inny, a wszystkie cząstki nie miałyby masy i rozchodziłyby się z prędkością światła! W teorii pola kwantowego QFT bozon Higgsa można traktować jako wzbudzenie pola Higgsa. W przeciwieństwie do pól związanych z fundamentalnymi fermionami i bozonami, które mają zerową wartość oczekiwaną w próżni, uważa się, że pole Higgsa ma niezerową wartość oczekiwaną w próżni. To oddziaływanie początkowo pozbawionych masy cząstek z niezerowym polem Higgsa nadaje im masę. Odkrycie cząstki podobnej do cząstki Higgsa w Wielkim Zderzaczu Hadronów stanowiło niezwykle potwierdzenie idei teoretycznych Modelu Standardowego. Matematyczne szczegóły mechanizmu Higgsa są subtelne i zostały szczegółowo omówione w rozdziale 17. Masy bozonów W^\pm , Z oraz H są rzędu 100 GeV, co jest znane jako skala elektroślaba. Nie jest to dziełem przypadku. W Modelu Standardowym masy słabych bozonów cechowania są ściśle związane z mechanizmem Higgsa.

1.1.4. Wierzchołki w Modelu Standardowym

Charakter silnych, elektromagnetycznych i słabych sił jest określony przez właściwości bozonów powiązanej kwantowej teorii pola oraz przez to, w jaki sposób bozony cechowania łączą się z fermionami ze spinem połówkowym.

Sprężenie bozonów cechowania z fermionami jest określane w Modelu Standardowym przez wierzchołki oddziaływania, jak pokazano na rysunku 1.4. W każdym przypadku oddziaływaniem jest trypunktowy wierzchołek tworzony przez bozon cechowania oraz wchodzący i wychodzący fermion. Z każdym rodzajem oddziaływania związana jest siła sprężenia g . W przypadku QED siła sprężenia to po prostu ładunek elektronu, $g_{\text{QED}} = e \equiv +|e|$.



Rys. 1.4. Wierzchołki oddziaływania w Modelu Standardowym.

Sprężenie cząstki z bozonem przenoszącym oddziaływanie następuje tylko wtedy, gdy cząstka przenosi ładunek oddziaływania. Na przykład tylko elektrycznie naładowane cząstki sprzęgają się z fotonem. Tylko kwarki przenoszą ładunek kolorowy QCD, a zatem tylko kwarki uczestniczą w oddziaływaniu silnym. Każdy z dwunastu podstawowych fermionów przenosi ładunek oddziaływania słabego znany jako izospin słaby i z tego powodu wszystkie uczestniczą w oddziaływaniu słabym. Słabe oddziaływanie przez prądy naładowane nie odpowiada zwykłemu pojęciu siły, ponieważ łączy ze sobą fermiony z różnym zapachem. Ponieważ bozony W^+ i W^- mają ładunki odpowiednio $+e$ i $-e$, więc w celu zachowania ładunku elektrycznego słabe oddziaływanie przez prądy naładowane sprzęga tylko te pary podstawowych fermionów, które różnią się o jedną jednostkę ładunku elektrycznego. Z definicji, w przypadku leptonów oddziaływanie słabe sprzęga naładowany lepton z odpowiadającym mu neutrinem,

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu^- \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau^- \end{pmatrix}.$$

W przypadku kwarków oddziaływanie słabe sprzęga wszystkie możliwe kombinacje różniące się o jedną jednostkę ładunku,

$$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} u \\ s \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} u \\ b \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} c \\ d \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} c \\ b \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} t \\ d \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} t \\ s \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}.$$