

Wszechświat Cząstek Elementarnych dla Humanistów

Model Standardowy

Aleksander Filip Żarnecki

Wykład ogólnouniwersytecki



20 lipca 2021

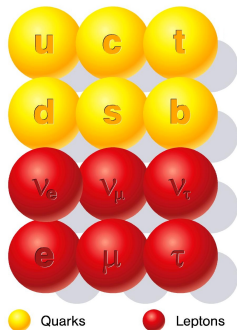
- 1 Budowa materii (przypomnienie)
- 2 Diagramy Feynmana
- 3 Twierdzenie Noether
- 4 Spontaniczne łamanie symetrii
- 5 Mechanizm Higgsa
- 6 Model Standardowy

- 1 Budowa materii (przypomnienie)
- 2 Diagramy Feynmana
- 3 Twierdzenie Noether
- 4 Spontaniczne łamanie symetrii
- 5 Mechanizm Higgsa
- 6 Model Standardowy

Cząstki fundamentalne

Cząstki, które obecnie uważamy za **fundamentalne** (niepodzielne) w ramach tzw. **Modelu Standardowego fizyki cząstek**

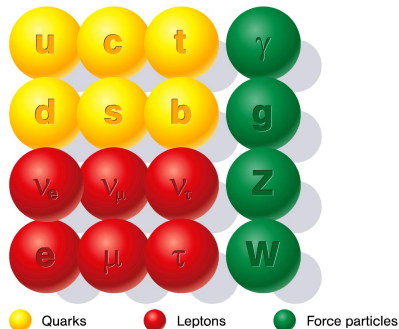
- cząstki materii
kwarki i leptony



Cząstki fundamentalne

Cząstki, które obecnie uważamy za **fundamentalne** (niepodzielne) w ramach tzw. **Modelu Standardowego fizyki cząstek**

- cząstki materii
kwarki i leptony
- nośniki oddziaływań
 γ , g , W^\pm i Z^0

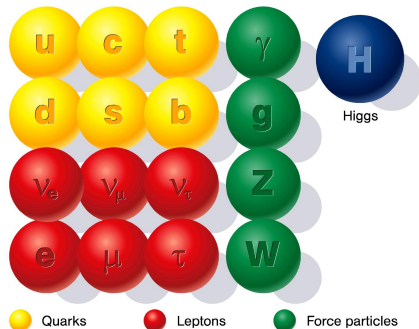


Cząstki fundamentalne

Cząstki, które obecnie uważamy za **fundamentalne** (niepodzielne) w ramach tzw. **Modelu Standardowego fizyki cząstek**

- cząstki materii
 kwarki i leptony
- nośniki oddziaływań
 γ , g , W^\pm i Z^0
- bozon Higgsa

dziś powiemy dlaczego
jest w tym modelu niezbędny...



Bozony

“Cegiełki” oddziałują ze sobą poprzez wymianę **nośników oddziaływań**
 Nośnik przekazuje część energii i/lub pędu jednej cząstki drugiej cząstce

| <i>oddziaływanie</i> | <i>źródło</i> | <i>nośnik</i> | | <i>sprzęga</i> |
|----------------------|-----------------|-------------------------|----------------|-----------------------|
| elektromag. | ładunek | foton | γ | cząstki naładowane |
| silne | kolor | gluony | g | kwarki |
| słabe | “ładunek słaby” | bozony pośredniczące | W^{\pm}, Z^0 | wszystkie fermiony |

Bozony

“Cegiełki” oddziałują ze sobą poprzez wymianę **nośników oddziaływań**
 Nośnik przekazuje część energii i/lub pędu jednej cząstki drugiej cząstce

| <i>oddziaływanie</i> | <i>źródło</i> | <i>nośnik</i> | | <i>sprzęga</i> |
|----------------------|-----------------|-------------------------|----------------|-----------------------|
| elektromag. | ładunek | foton | γ | cząstki naładowane |
| silne | kolor | gluony | g | kwarki |
| słabe | “ładunek słaby” | bozony pośredniczące | W^{\pm}, Z^0 | wszystkie fermiony |

Foton może się także sprzęgać do bozonów W^{\pm} (niosą ładunek).

Bozony

“Cegiełki” oddziałują ze sobą poprzez wymianę **nośników oddziaływań**
 Nośnik przekazuje część energii i/lub pędu jednej cząstki drugiej cząstce

| <i>oddziaływanie</i> | <i>źródło</i> | <i>nośnik</i> | | <i>sprzęga</i> |
|----------------------|-----------------|-------------------------|----------------|-----------------------|
| elektromag. | ładunek | foton | γ | cząstki naładowane |
| silne | kolor | gluony | g | kwarki |
| słabe | “ładunek słaby” | bozony pośredniczące | W^{\pm}, Z^0 | wszystkie fermiony |

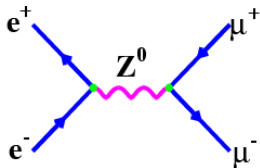
Foton może się także sprzęgać do bozonów W^{\pm} (niosą ładunek).

W oddziaływaniach silnych i słabych dodatkowo pojawiają się oddziaływania między nośnikami!

Omawiając różne procesy, jakie obserwujemy w fizyce cząstek obrazujemy je często przy pomocy diagramów:

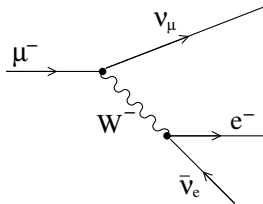
Najprostszy przypadek zderzenia elektron-pozyton

$$e^+e^- \longrightarrow \mu^+\mu^-$$



Rozpad mionu w modelu Weinberg'a-Salam'a

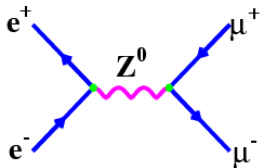
$$\mu^- \longrightarrow e^- + \nu_\mu + \bar{\nu}_e$$



Omawiając różne procesy, jakie obserwujemy w fizyce cząstek obrazujemy je często przy pomocy diagramów:

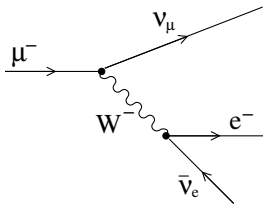
Najprostszy przypadek zderzenia elektron-pozyton

$$e^+e^- \longrightarrow \mu^+\mu^-$$



Rozpad mionu w modelu Weinberg'a-Salam'a

$$\mu^- \longrightarrow e^- + \nu_\mu + \bar{\nu}_e$$

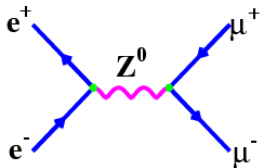


Jak należy rozumieć tego typu diagramy?

Omawiając różne procesy, jakie obserwujemy w fizyce cząstek obrazujemy je często przy pomocy diagramów:

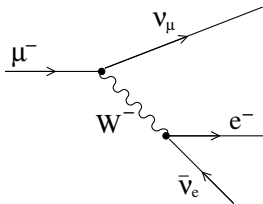
Najprostszy przypadek zderzenia elektron-pozyton

$$e^+e^- \longrightarrow \mu^+\mu^-$$



Rozpad mionu w modelu Weinberg'a-Salam'a

$$\mu^- \longrightarrow e^- + \nu_\mu + \bar{\nu}_e$$



Jak należy rozumieć tego typu diagramy?

Czy to tylko ładne rysunki, czy może coś więcej?...

- 1 Budowa materii (przypomnienie)
- 2 Diagramy Feynmana**
- 3 Twierdzenie Noether
- 4 Spontaniczne łamanie symetrii
- 5 Mechanizm Higgsa
- 6 Model Standardowy

Tzw. diagramy Feynmana są bardzo przydatnym narzędziem w teorii cząstek i oddziaływań fundamentalnych...

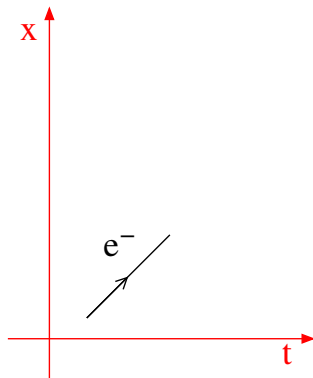
Ale musimy je rysować według ściśle określonych reguł!

Konwencja

Diagram obrazuje (względny) ruch cząstek
zależność położenia od czasu

Przykład:

- poruszający się elektron



Tzw. diagramy Feynmana są bardzo przydatnym narzędziem w teorii cząstek i oddziaływań fundamentalnych...

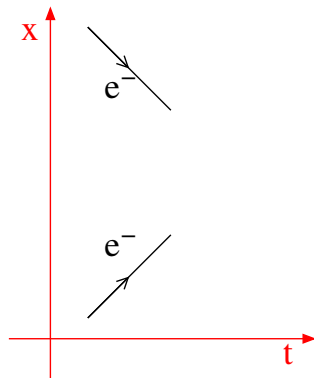
Ale musimy je rysować według ściśle określonych reguł!

Konwencja

Diagram obrazuje (względny) ruch cząstek
zależność położenia od czasu

Przykład:

- poruszający się elektron
- napotyka drugi elektron poruszający się w przeciwną stronę



Tzw. diagramy Feynmana są bardzo przydatnym narzędziem w teorii cząstek i oddziaływań fundamentalnych...

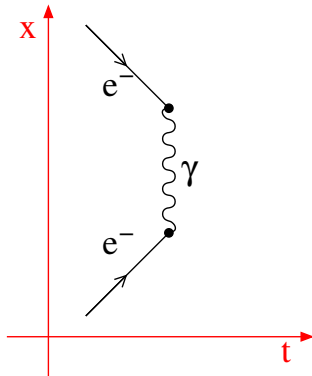
Ale musimy je rysować według ściśle określonych reguł!

Konwencja

Diagram obrazuje (względny) ruch cząstek
zależność położenia od czasu

Przykład:

- poruszający się elektron
- napotyka drugi elektron poruszający się w przeciwną stronę
- oddziałują wymieniając foton



Tzw. diagramy Feynmana są bardzo przydatnym narzędziem w teorii cząstek i oddziaływań fundamentalnych...

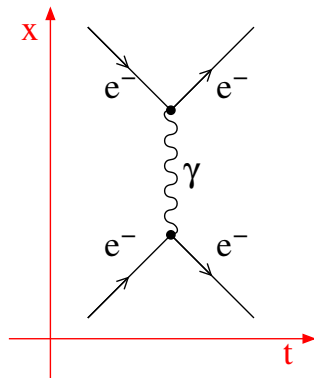
Ale musimy je rysować według ściśle określonych reguł!

Konwencja

Diagram obrazuje (względny) ruch cząstek
zależność położenia od czasu

Przykład:

- poruszający się elektron
- napotyka drugi elektron poruszający się w przeciwną stronę
- oddziałują wymieniając foton
- wymieniając pęd zmieniają kierunek swojego ruchu, następnie oddalają się od siebie



Tzw. diagramy Feynmana są bardzo przydatnym narzędziem w teorii cząstek i oddziaływań fundamentalnych...

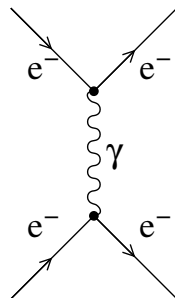
Ale musimy je rysować według ściśle określonych reguł!

Konwencja

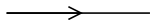
Diagram obrazuje (względny) ruch cząstek
zależność położenia od czasu

Przykład:

- poruszający się elektron
- napotyka drugi elektron poruszający się w przeciwną stronę
- oddziałują wymieniając foton
- wymieniając pęd zmieniają kierunek swojego ruchu, następnie oddalają się od siebie

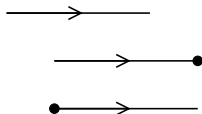


“Elementarz” przykład dla oddziaływań elektronów i fotonów



Linia fermionowa: elektron

“Elementarz” przykład dla oddziaływań elektronów i fotonów

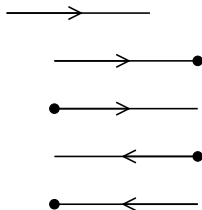


Linia fermionowa: elektron

- w stanie początkowym (przed oddziaływaniem)
- w stanie końcowym (po oddziaływaniu)

kropka (●) oznacza tzw. wierzchołek, czyli moment/punkt gdy elektron oddziałuje - emituje lub pochłania wymieniany foton

“Elementarz” przykład dla oddziaływań elektronów i fotonów

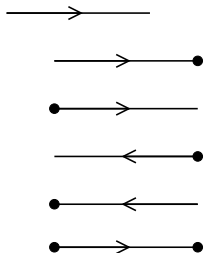


Linia fermionowa: elektron lub **pozyton**

- w stanie początkowym (przed oddziaływaniem)
- w stanie końcowym (po oddziaływaniu)
- **pozyton** w stanie początkowym
- **pozyton** w stanie końcowym

strzałkę na linii pozytonowej rysujemy w przeciwnie do zwrotu osi czasu (więcej za chwilę)

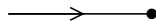
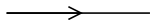
“Elementarz” przykład dla oddziaływań elektronów i fotonów



Linia fermionowa: elektron lub **pozyton**

- w stanie początkowym (przed oddziaływaniem)
- w stanie końcowym (po oddziaływaniu)
- **pozyton** w stanie początkowym
- **pozyton** w stanie końcowym
- wirtualny/wymieniany (linia wewnętrzna)

“Elementarz” przykład dla oddziaływań elektronów i fotonów



Linia fermionowa: elektron lub **pozyton**

- w stanie początkowym (przed oddziaływaniem)
- w stanie końcowym (po oddziaływaniu)
- **pozyton** w stanie początkowym
- **pozyton** w stanie końcowym
- wirtualny/wymieniany (linia wewnętrzna)



Linia bozonowa: foton

- w stanie początkowym
- w stanie końcowym
- wymieniany między cząstkami

Cząstki rzeczywiste

Cząstki, które występują (także na diagramie) w stanie początkowym lub w stanie końcowym, są obiektami fizycznymi, które można zmierzyć.

⇒ muszą mieć wszystkie własności danego typu cząstki

Cząstki rzeczywiste

Cząstki, które występują (także na diagramie) w stanie początkowym lub w stanie końcowym, są obiektami fizycznymi, które można zmierzyć.

⇒ muszą mieć wszystkie własności danego typu cząstki

W szczególności muszą spełniać zależność między energią, pędem i masą, którą narzuca Szczególna Teoria Względności:

$$E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4$$

o cząstkach takich mówimy też, że są **na powłóce masy**

Cząstki rzeczywiste

Cząstki, które występują (także na diagramie) w stanie początkowym lub w stanie końcowym, są obiektami fizycznymi, które można zmierzyć.

⇒ muszą mieć wszystkie własności danego typu cząstki

W szczególności muszą spełniać zależność między energią, pędem i masą, którą narzuca Szczególna Teoria Względności:

$$E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4$$

o cząstkach takich mówimy też, że są **na powłóce masy**

W przypadku fotonu wiemy, że nie ma on masy, więc

$$E^2 = p^2 c^2$$

można też wprowadzić zmienną (wirtualność fotonu)

$$q^2 \equiv E^2 - p^2 c^2$$

i dla rzeczywistego fotonu wiemy, że $q^2 = 0$

Cząstki wirtualne

Cząstki, które łączą na diagramie dwa wierzchołki nazywamy cząstkami wirtualnymi. Cząstek takich nie obserwujemy w doświadczeniu.

Cząstki wirtualne

Cząstki, które **łączą na diagramie dwa wierzchołki** nazywamy cząstkami wirtualnymi. **Cząstek takich nie obserwujemy w doświadczeniu.**

Ponieważ proces wymiany może trwać dowolnie krótko ich masa nie jest ustalona. Wartość:

$$q^2 \equiv E^2 - p^2 c^2$$

nazywamy wirtualnością cząstki. Dla cząstek wirtualnych (na ogół)

$$q^2 \neq m^2 c^4$$

⇒ mówimy, że cząstki te są **poza powłoką masy**

Cząstki wirtualne

Cząstki, które **łączą na diagramie dwa wierzchołki** nazywamy cząstkami wirtualnymi. **Cząstek takich nie obserwujemy w doświadczeniu.**

Ponieważ proces wymiany może trwać dowolnie krótko ich masa nie jest ustalona. Wartość:

$$q^2 \equiv E^2 - p^2 c^2$$

nazywamy wirtualnością cząstki. Dla cząstek wirtualnych (na ogół)

$$q^2 \neq m^2 c^4$$

⇒ mówimy, że cząstki te są **poza powłoką masy**

Wirtualność q^2 może być zarówno większa jak i mniejsza od $m^2 c^4$. Zależy to od rozważanego procesu...

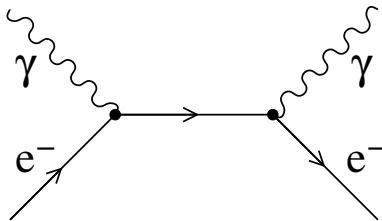
Diagramy skrzyżowane

Na poprawnie narysowany diagram, możemy patrzeć “z każdej strony”.

Mozemy go obracać!

Rozpraszanie Comptona

$$e^- + \gamma \rightarrow e^- + \gamma$$



Diagramy skrzyżowane

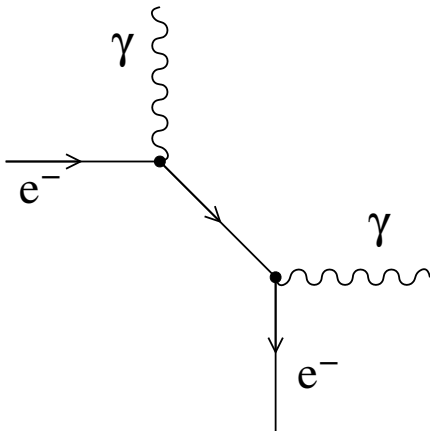
Na poprawnie narysowany diagram, możemy patrzeć “z każdej strony”.

Możemy go obracać!

Rozpraszanie Comptona



Jeśli obrócimy diagram...



Diagramy skrzyżowane

Na poprawnie narysowany diagram, możemy patrzeć “z każdej strony”.

Możemy go obracać!

Rozpraszanie Comptona

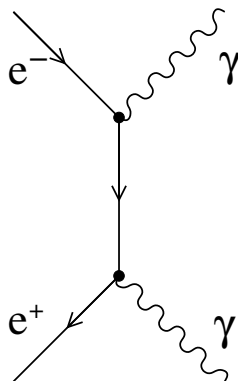
$$e^- + \gamma \rightarrow e^- + \gamma$$

Jeśli obrócimy diagram...

Anihilacja elektron-pozyton

$$e^+ + e^- \rightarrow \gamma + \gamma$$

Wychodzący elektron zamienia się na wchodzący pozyton !!!



Zasady zachowania

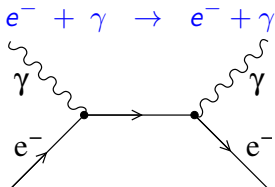
Konwencja, zgodnie z którą kierunek strzałki na linii fermionowej jest **przeciwny dla antycząstek**, ma głębokie uzasadnienie.

Strzałka wskazuje kierunek “przepływu” liczb kwantowych cząstki (ładunku, liczby leptonowej, dziwności itp.)

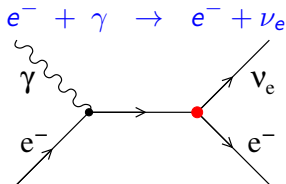
W każdym wierzchołku diagramu musimy mieć tyle samo wchodzących co wychodzących linii fermionowych!

Dzięki temu od razu wiemy czy jest zgodny z zasadami zachowania...

Dozwolone:



Zabronione:

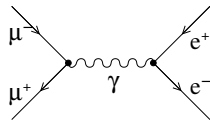
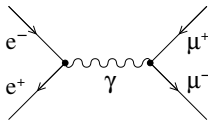


Diagramy skrzyżowane

Wszystkie poniższe procesy opisuje ten sam diagram!

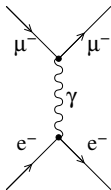
Jeśli może zajść jedna z tych reakcji, wtedy wszystkie “obrócone” są też dozwolone. Prawdopodobieństwa ich zajścia są powiązane...

$$e^+ e^- \rightarrow \mu^+ \mu^-$$

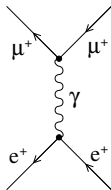


$$\mu^+ \mu^- \rightarrow e^+ e^-$$

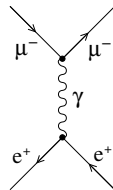
$$e^- \mu^- \rightarrow e^- \mu^-$$



$$e^+ \mu^+ \rightarrow e^+ \mu^+$$



$$e^+ \mu^- \rightarrow e^+ \mu^-$$

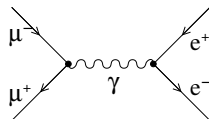
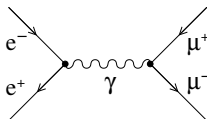


Diagramy skrzyżowane

Wszystkie poniższe procesy opisuje ten sam diagram!

Jeśli może zajść jedna z tych reakcji, wtedy wszystkie “obrócone” są też dozwolone. Prawdopodobieństwa ich zajścia są powiązane...

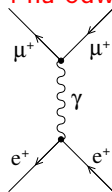
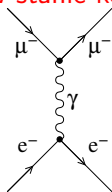
$$e^+ e^- \rightarrow \mu^+ \mu^-$$



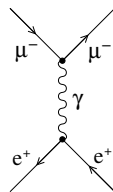
$$\mu^+ \mu^- \rightarrow e^+ e^-$$

Cząstkę (antycząstkę) ze stanu początkowego możemy zawsze zamienić na antycząstkę (cząstkę) w stanie końcowym i na odwrót...

$$e^- \mu^- \rightarrow e^- \mu^-$$

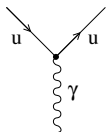


$$e^+ \mu^+ \rightarrow e^+ \mu^+$$

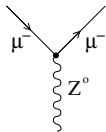


$$e^+ \mu^- \rightarrow e^+ \mu^-$$

Wierzchołki dla innych oddziaływań

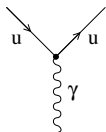


Dla oddziaływań elektromagnetycznych nie może nastąpić zmiana zapachu (ani ładunku) fermionu.

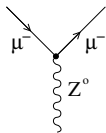


Podobnie w przypadku oddziaływań słabych z wymianą Z^0 (nie istnieją prądy neutralne zmieniające zapach).

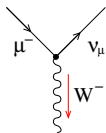
Wierzchołki dla innych oddziaływań



Dla oddziaływań elektromagnetycznych nie może nastąpić zmiana zapachu (ani ładunku) fermionu.

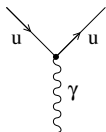


Podobnie w przypadku oddziaływań słabych z wymianą Z^0 (nie istnieją prądy neutralne zmieniające zapach).

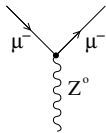


Natomiast wymiana W^\pm wiąże się ze zmianą zapachu w ramach dubletów cząstek (patrz wykład 6).

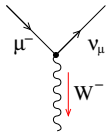
Wierzchołki dla innych oddziaływań



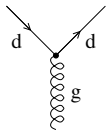
Dla oddziaływań elektromagnetycznych nie może nastąpić zmiana zapachu (ani ładunku) fermionu.



Podobnie w przypadku oddziaływań słabych z wymianą Z^0 (nie istnieją prądy neutralne zmieniające zapach).

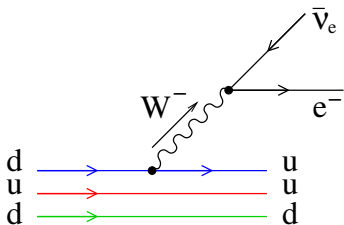


Natomiast wymiana W^\pm wiąże się ze zmianą zapachu w ramach dubletów cząstek (patrz wykład 6).



W oddziaływaniach silnych (wymiana gluonu) nie ma zmiany zapachu, zmienia się natomiast kolor kwarku...

Przykłady



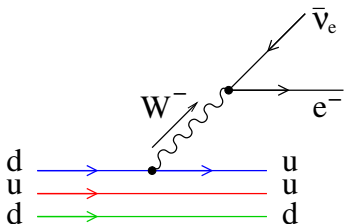
Rozpad neutronu:

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$$

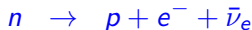
na poziomie kwarkowym:

$$d \rightarrow u + e^- + \bar{\nu}_e$$

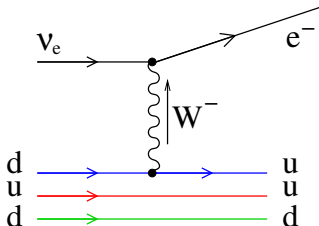
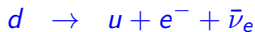
Przykłady



Rozpad neutronu:



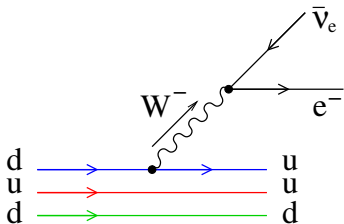
na poziomie kwarkowym:



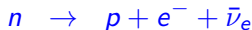
Jest opisany tym samym diagramem co oddziaływanie neutrina:



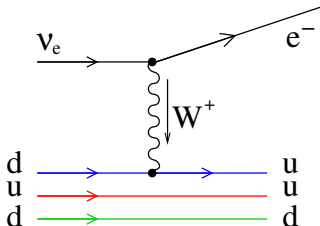
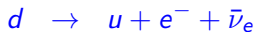
Przykłady



Rozpad neutronu:



na poziomie kwarkowym:

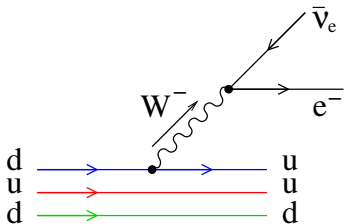


Jest opisany tym samym diagramem co oddziaływanie neutrina:

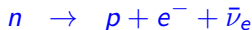


Znak wymienianego W jest w tym przypadku umowny...

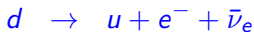
Przykłady



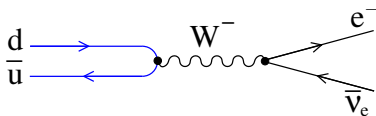
Rozpad neutronu:



na poziomie kwarkowym:



Jest opisany tym samym diagramem co rozpad pionu:



Prawdopodobieństwa wszystkich procesów są ze sobą ściśle powiązane...



Prawdopodobieństwo reakcji

Podobnie jak w przypadku opisu zachowania pojedynczej cząstki, mechanika kwantowa opisuje **oddziaływania cząstek fundamentalnych**.

Zderzając cząstki nigdy nie możemy przewidzieć jaka reakcja zajdzie, możemy wyłącznie policzyć prawdopodobieństwo.

Prawdopodobieństwo reakcji

Podobnie jak w przypadku opisu zachowania pojedynczej cząstki, mechanika kwantowa opisuje **oddziaływania cząstek fundamentalnych**.

Zderzając cząstki nigdy nie możemy przewidzieć jaka reakcja zajdzie, możemy wyłącznie policzyć prawdopodobieństwo.

Prawdopodobieństwo przejścia od zadanego stanu początkowego i do stanu końcowego f zależy od **kwadratu amplitudy** odpowiedniego procesu

$$p_{i \rightarrow f} \sim \left| \mathcal{M}_{if} \right|^2$$

Prawdopodobieństwo reakcji

Podobnie jak w przypadku opisu zachowania pojedynczej cząstki, mechanika kwantowa opisuje **oddziaływania cząstek fundamentalnych**.

Zderzając cząstki nigdy nie możemy przewidzieć jaka reakcja zajdzie, możemy wyłącznie policzyć prawdopodobieństwo.

Prawdopodobieństwo przejścia od zadanego stanu początkowego i do stanu końcowego f zależy od **kwadratu amplitudy** odpowiedniego procesu

$$p_{i \rightarrow f} \sim \left| \sum_{\text{procesy}} \mathcal{M}_{if} \right|^2$$

W przypadku gdy możliwych jest kilka procesów prowadzących do tego samego stanu końcowego, należy dodać ich amplitudy

Prawdopodobieństwo reakcji

Podobnie jak w przypadku opisu zachowania pojedynczej cząstki, mechanika kwantowa opisuje **oddziaływania cząstek fundamentalnych**.

Zderzając cząstki nigdy nie możemy przewidzieć jaka reakcja zajdzie, możemy wyłącznie policzyć prawdopodobieństwo.

Prawdopodobieństwo przejścia od zadanego stanu początkowego i do stanu końcowego f zależy od **kwadratu amplitudy** odpowiedniego procesu

$$p_{i \rightarrow f} \sim \sum_f \left| \sum_{\text{procesy}} \mathcal{M}_{if} \right|^2$$

W przypadku gdy możliwych jest kilka procesów prowadzących do tego samego stanu końcowego, należy dodać ich amplitudy

W przypadku gdy uwzględniamy różne możliwe stany końcowe (np. produkcja różnych zapachów kwarków) należy dodać kwadraty amplitud



Diagramy Feynmana

Diagramy Feynmana nie są wyłącznie “ilustracją” przebiegu danego procesu.

Dają nam one także ścisłe reguły liczenia odpowiednich amplitud!

Diagramy Feynmana

Diagramy Feynmana nie są wyłącznie “ilustracją” przebiegu danego procesu.

Dają nam one także ścisłe reguły liczenia odpowiednich amplitud!

Każdemu elementowi diagramu

- wierzchołkom oddziaływania
- liniom wewnętrznym (tzw. propagatorom)
- liniom zewnętrznym (cząstki stanu początkowego i końcowego)

przyporządkowujemy odpowiednie wyrażenie algebraiczne, zależne od typu cząstki, rodzaju oddziaływania itp.

Diagramy Feynmana

Diagramy Feynmana nie są wyłącznie “ilustracją” przebiegu danego procesu.

Dają nam one także ścisłe reguły liczenia odpowiednich amplitud!

Każdemu elementowi diagramu

- wierzchołkom oddziaływania
- liniom wewnętrznym (tzw. propagatorom)
- liniom zewnętrznym (cząstki stanu początkowego i końcowego)

przyporządkowujemy odpowiednie wyrażenie algebraiczne, zależne od typu cząstki, rodzaju oddziaływania itp.

Następnie musimy tylko pracowicie przekształcić otrzymane wyrażenie na amplitudę, żeby dostać interesujący nas wynik.

Dla najprostszych procesów można to zrobić na kartce papieru.

Dla bardziej skomplikowanych mamy dedykowane programy komputerowe...

Diagramy Feynmana

zestaw reguł dla Modelu Standardowego



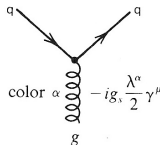
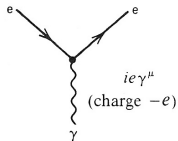
$$\frac{i}{\not{p} - m}$$



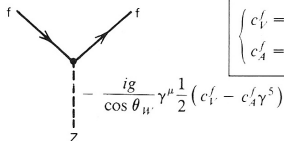
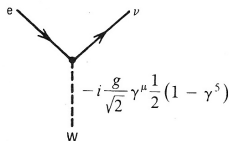
$$\frac{-ig_{\mu\nu}}{p^2}$$



$$\frac{-i(g_{\mu\nu} - p_\mu p_\nu / M^2)}{p^2 - M^2}$$



$$\left\{ \begin{aligned} \alpha_s &= \frac{g_s^2}{4\pi} \\ &= \frac{12\pi}{(33 - 2n_f) \log(Q^2/\Lambda^2)} \end{aligned} \right.$$



$$\left\{ \begin{aligned} c_V^f &= T_f^3 - 2 \sin^2 \theta_W Q_f \\ c_A^f &= T_f^3 \end{aligned} \right.$$

- 1 Budowa materii (przypomnienie)
- 2 Diagramy Feynmana
- 3 Twierdzenie Noether**
- 4 Spontaniczne łamanie symetrii
- 5 Mechanizm Higgsa
- 6 Model Standardowy

Twierdzenie Noether (1918)

Każdej ciągłej symetrii praw fizyki (czyli takiemu przekształceniu, które nie zmienia zachowania badanych układów fizycznych) odpowiada prawo zachowania.

Jest to jedno z najbardziej fundamentalnych praw współczesnej fizyki

Twierdzenie Noether (1918)

Każdej ciągłej **symetrii** praw fizyki (czyli takiemu przekształceniu, które nie zmienia zachowania badanych układów fizycznych) odpowiada **prawo zachowania**.

Jest to jedno z najbardziej fundamentalnych praw współczesnej fizyki

Przykład 1

Jeśli zmienimy czas z letniego na zimowy to nie zmienia to praw fizyki.

Pomiar czasu można rozpocząć w dowolnym momencie, nie istnieje “czas absolutny” (wyróżniona chwila $t = 0$)

Twierdzenie Noether (1918)

Każdej ciągłej symetrii praw fizyki (czyli takiemu przekształceniu, które nie zmienia zachowania badanych układów fizycznych) odpowiada prawo zachowania.

Jest to jedno z najbardziej fundamentalnych praw współczesnej fizyki

Przykład 1

Jeśli zmienimy czas z letniego na zimowy to nie zmienia to praw fizyki.

Pomiar czasu można rozpocząć w dowolnym momencie, nie istnieje "czas absolutny" (wyróżniona chwila $t = 0$)

Prawa przyrody są niezmiennicze względem przesunięcia w czasie

⇒ Zasada Zachowania Energii

Twierdzenie Noether (1918)

Każdej ciągłej symetrii praw fizyki (czyli takiemu przekształceniu, które nie zmienia zachowania badanych układów fizycznych) odpowiada prawo zachowania.

Jest to jedno z najbardziej fundamentalnych praw współczesnej fizyki

Przykład 2

Jeśli odległość będziemy mierzyć w jardach to nie zmienia to praw fizyki.

Wybór jednostki długości i punktu zerowego jest zawsze umowny, nie istnieje wyróżniony układ odniesienia

Twierdzenie Noether (1918)

Każdej ciągłej symetrii praw fizyki (czyli takiemu przekształceniu, które nie zmienia zachowania badanych układów fizycznych) odpowiada prawo zachowania.

Jest to jedno z najbardziej fundamentalnych praw współczesnej fizyki

Przykład 2

Jeśli odległość będziemy mierzyć w jardach to nie zmienia to praw fizyki.

Wybór jednostki długości i punktu zerowego jest zawsze umowny, nie istnieje wyróżniony układ odniesienia

Prawa przyrody są niezmiennicze względem przesunięcia w przestrzeni

⇒ Zasada Zachowania Pędu

Mechanika kwantowa

Ruch cząstki to rozchodzenie się “fali prawdopodobieństwa”

Falę opisuje tzw. funkcja falowa $\psi(\vec{r}, t)$, której ewolucję potrafimy opisać odpowiednimi równaniami (np. równanie Schrödingera, 1925)

Kwadrat amplitudy funkcji falowej daje nam **prawdopodobieństwo**

znalezienia cząstki w danym miejscu i danej chwili czasu

$$p = |\psi(\vec{r}, t)|^2$$

Mechanika kwantowa

Ruch cząstki to rozchodzenie się "fali prawdopodobieństwa"

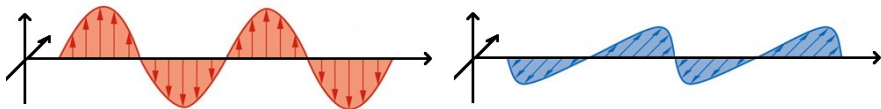
Falę opisuje tzw. funkcja falowa $\psi(\vec{r}, t)$, której ewolucję potrafimy opisać odpowiednimi równaniami (np. równanie Schrödingera, 1925)

Kwadrat amplitudy funkcji falowej daje nam **prawdopodobieństwo** znalezienia cząstki w danym miejscu i danej chwili czasu $p = |\psi(\vec{r}, t)|^2$

Funkcje falowe są zespolone, ale wynik pomiaru **nie zależy od fazy**

Faza ("polaryzacja fali") jest **nieistotna!**

⇒ dodatkowa **symetria cechowania**



Mechanika kwantowa

Ruch cząstki to rozchodzenie się "fali prawdopodobieństwa"

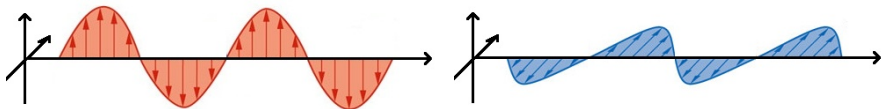
Falę opisuje tzw. funkcja falowa $\psi(\vec{r}, t)$, której ewolucję potrafimy opisać odpowiednimi równaniami (np. równanie Schrödingera, 1925)

Kwadrat amplitudy funkcji falowej daje nam **prawdopodobieństwo** znalezienia cząstki w danym miejscu i danej chwili czasu $p = |\psi(\vec{r}, t)|^2$

Funkcje falowe są zespolone, ale wynik pomiaru **nie zależy od fazy**

Faza ("polaryzacja fali") jest **nieistotna!**

⇒ dodatkowa **symetria cechowania**



Niezmienniczość względem transformacji cechowania

⇒ Zasada Zachowania Ładunku

Funkcja falowa

Transformacja **obrotu fazy** o **ustalony** kąt α : $\psi(x) \rightarrow e^{i\alpha} \cdot \psi(x)$
 \Rightarrow “globalna” symetria cechowania

Funkcja falowa

Transformacja **obrotu fazy** o **ustalony** kąt α : $\psi(x) \rightarrow e^{i\alpha} \cdot \psi(x)$
 \Rightarrow **“globalna”** symetria cechowania

Jeśli faza funkcji falowej nie jest mierzalna to czy nasza teoria jest też niezmiennicza względem **“lokalnej”** symetrii cechowania:

$$\psi(x) \rightarrow e^{i\alpha(x)} \cdot \psi(x)$$

gdzie kąt obrotu fazy $\alpha(x)$ zależy od położenia (i czasu) ?

Funkcja falowa

Transformacja **obrotu fazy** o **ustalony** kąt α : $\psi(x) \rightarrow e^{i\alpha} \cdot \psi(x)$
 \Rightarrow “**globalna**” symetria cechowania

Jeśli faza funkcji falowej nie jest mierzalna to czy nasza teoria jest też niezmiennicza względem “**lokalnej**” symetrii cechowania:

$$\psi(x) \rightarrow e^{i\alpha(x)} \cdot \psi(x)$$

gdzie kąt obrotu fazy $\alpha(x)$ zależy od położenia (i czasu) ?

Nie jest to możliwe dla swobodnej cząstki.

Musimy dodać do teorii opis oddziaływań elektromagnetycznych (!)

Z **niezmienniczości** względem **lokalnej** symetrii cechowania otrzymujemy

Elektrodynamikę Kwantową (QED)

pełną teorię oddziałujących ładunków elektrycznych i fotonów

- 1 Budowa materii (przypomnienie)
- 2 Diagramy Feynmana
- 3 Twierdzenie Noether
- 4 Spontaniczne łamanie symetrii**
- 5 Mechanizm Higgsa
- 6 Model Standardowy

Założenie **symetrii cechowania** pozwala na bardzo prosty i elegancki **opis wszystkich oddziaływań** cząstek w Modelu Standardowym, w języku kwantowej teorii pola. **Opis taki wprowadzono z powodzeniem dla oddziaływań elektromagnetycznych (QED) i silnych (QCD).**

Założenie **symetrii cechowania** pozwala na bardzo prosty i elegancki **opis wszystkich oddziaływań** cząstek w Modelu Standardowym, w języku kwantowej teorii pola. **Opis taki wprowadzono z powodzeniem dla oddziaływań elektromagnetycznych (QED) i silnych (QCD).**

Z **symetrii** cechowania wynika jednak, że wszystkie nośniki oddziaływań powinny być **bezmasowe**.

Foton nie ma masy, podobnie gluon...

Założenie **symetrii cechowania** pozwala na bardzo prosty i elegancki **opis wszystkich oddziaływań** cząstek w Modelu Standardowym, w języku kwantowej teorii pola. **Opis taki wprowadzono z powodzeniem dla oddziaływań elektromagnetycznych (QED) i silnych (QCD).**

Z **symetrii** cechowania wynika jednak, że wszystkie nośniki oddziaływań powinny być **bezmasowe**.

Foton nie ma masy, podobnie gluon...

Z drugiej strony **doświadczenie** pokazuje, że bozony W^\pm i Z^0 mają **niezerową masę...**

⇒ czy potrafimy pogodzić wymóg symetrii z doświadczeniem ?!

Jak sformułować kwantową teorię oddziaływań słabych?

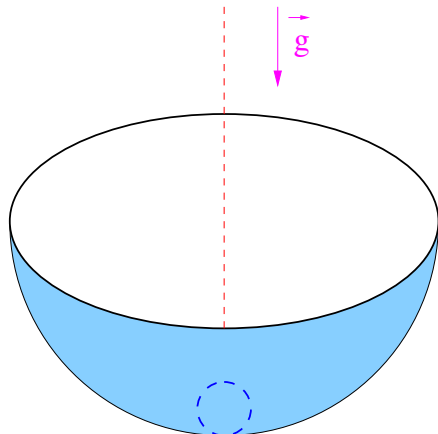
Czy w symetrycznym świecie mogą istnieć stany łamiące symetrię?

Analogia klasyczna

Podobny problem spotykamy
rozważając kulkę w
osiowo-symetrycznej czaszy
(w jednorodnym polu grawitacyjnym).

Nawet jeśli nie znamy kształtu czaszy
możemy oczekiwać, że położenie
równowagi kulki znajduje się na osi
symetrii czaszy.

Niezależnie od warunków
początkowych kulka powinna się tam
w końcu znaleźć...



Analogia klasyczna - pokaz



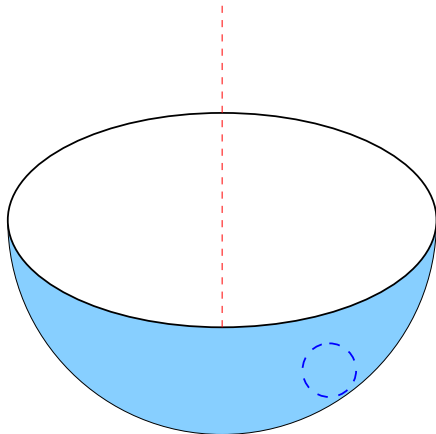
Analogia klasyczna

Podobny problem spotykamy
rozważając kulkę w
osiowo-symetrycznej czaszy
(w jednorodnym polu grawitacyjnym).

Nawet jeśli **nie znamy kształtu** czaszy
możemy oczekiwać, że **położenie**
równowagi kulki znajduje się **na osi**
symetrii czaszy.

Jednak doświadczenie może wykazać,
że kulka nie znajduje się na osi
symetrii !...

⇒ co nam to mówi!?



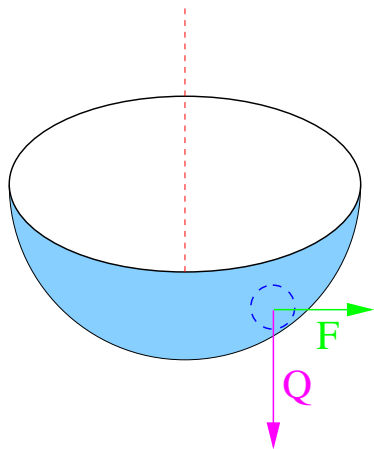
Analogia klasyczna - pokaz



Analogia klasyczna

Możliwe wytłumaczenia:

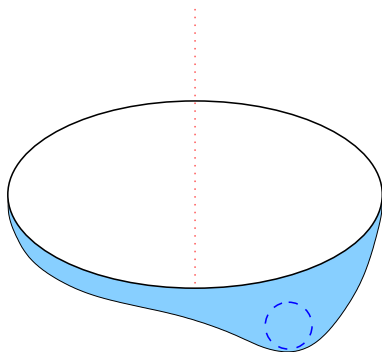
- na kulkę działa dodatkowa siła, skierowana **pod kątem** do osi



Analogia klasyczna

Możliwe wytłumaczenia:

- na kulkę działa dodatkowa siła, skierowana **pod kątem** do osi
 - czasza **nie ma symetrii** osiowej
- ⇒ w obu tych przypadkach musimy przyznać, że nasza symetria jest **“złamana”** (nie obowiązuje)



Analogia klasyczna

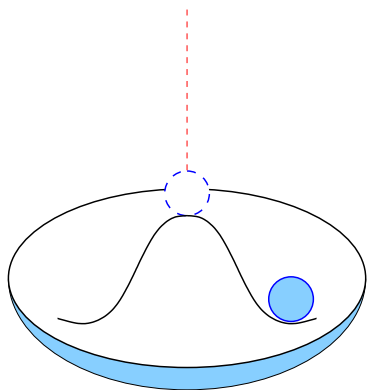
Możliwe wytłumaczenia:

- na kulkę działa dodatkowa siła, skierowana **pod kątem** do osi
- czasza **nie ma symetrii** osiowej
 - ⇒ w obu tych przypadkach musimy przyznać, że nasza symetria jest **“złamana”** (nie obowiązuje)
- czasza **zachowuje symetrię osiową**

ale położenie na osi nie jest stanem równowagi trwałej

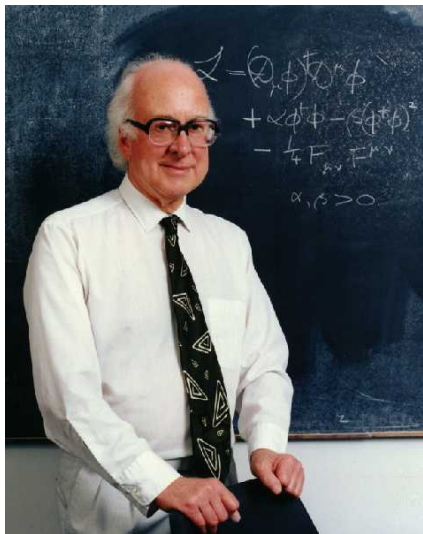
⇒ kulka stacza się wybierając jedno z **wielu możliwych** położen równowagi

Stoczenie się kulki powoduje spontaniczne złamanie symetrii !



Analogia klasyczna - pokaz



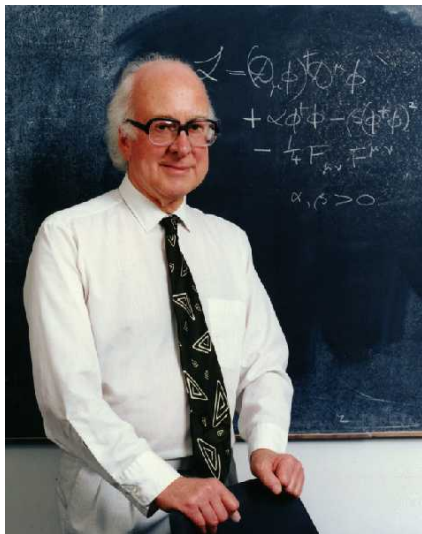


Na możliwość nadania mas nośnikom oddziaływań poprzez spontaniczne łamanie symetrii wskazał czterdzieści lat temu (1964) m.in.[†] Peter W. Higgs.

Mechanizm spontanicznego łamania symetrii, zwany także **mechanizmem Higgsa**, jest podstawą współczesnej teorii oddziaływań elektroslabych.

Wszystkie cząstki uzyskują **masę** poprzez oddziaływanie z polem Higgsa!

[†] wymieniani są także Anderson, Brout, Englert, Guralnik, Hagen, Kibble i 't Hooft



Na możliwość nadania mas nośnikom oddziaływań poprzez spontaniczne łamanie symetrii wskazał czterdzieści lat temu (1964) m.in.[†] **Peter W. Higgs**.

Mechanizm spontanicznego łamania symetrii, zwany także **mechanizmem Higgsa**, jest podstawą współczesnej teorii oddziaływań elektroslabych.

Wszystkie cząstki uzyskują **masę** poprzez oddziaływanie z **polem Higgsa**!

Oczekujemy także istnienia **dodatkowej cząstki**: **bozonu Higgsa**

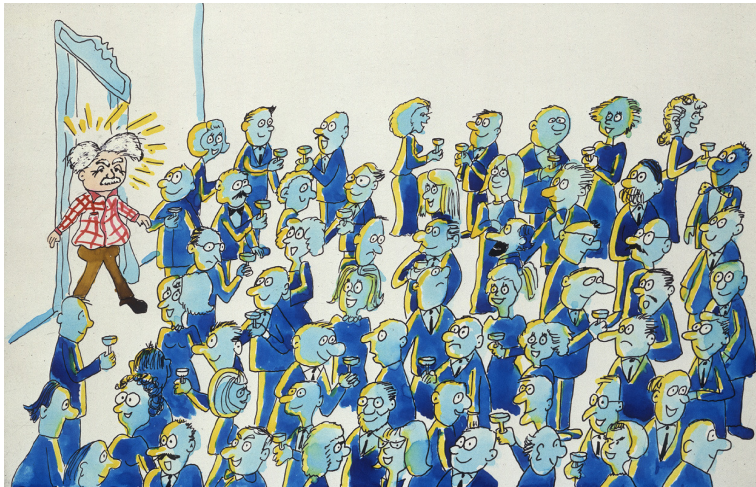
[†] wymieniani są także Anderson, **Brout**, **Englert**, Guralnik, Hagen, Kibble i 't Hooft

- 1 Budowa materii (przypomnienie)
- 2 Diagramy Feynmana
- 3 Twierdzenie Noether
- 4 Spontaniczne łamanie symetrii
- 5 Mechanizm Higgsa**
- 6 Model Standardowy

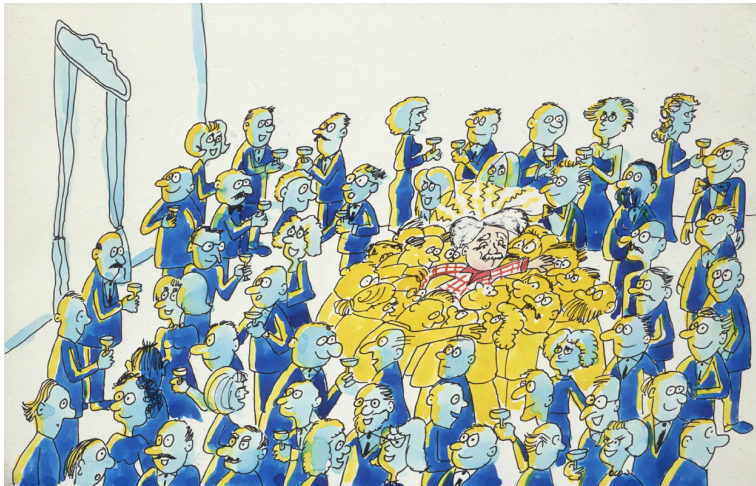
Wyobraźmy sobie salę bankietową
równomiernie wypełnioną ludźmi (pole Higgsa)



Pojawia się sławny naukowiec (bozon cechowania)
przyciągając uwagę zebranych...



Ludzie cisnący się wokół naukowca
utrudniają mu poruszanie się (nadają mu masę)



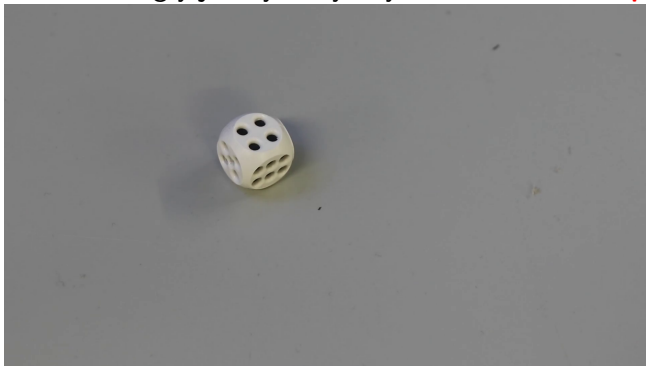
Ludzie na bankiecie (pole Higgsa) mogą też **spontanicznie** tworzyć “zgęszczenia” \Rightarrow oczekujemy istnienia dodatkowej **cząstki Higgsa**



Spontaniczne łamanie symetrii na poziomie kwantowym jest kluczowym elementem koniecznym do budowy **Modelu Standardowego**.

Ale przykłady też znamy z życia codziennego!

Przykład 1: Kostka do gry jest symetrycznym sześcianem: - **pokaz**



Ale ustawia się spontanicznie jedną ze ścianek do góry (całkowicie losowo)

Spontaniczne łamanie symetrii na poziomie kwantowym jest kluczowym elementem koniecznym do budowy **Modelu Standardowego**.

Ale przykłady też znamy z życia codziennego!

Przykład 2: Ustawiony pionowo ołówek zachowuje symetrię względem obrotu wokół osi pionowej:



Spontaniczne łamanie symetrii na poziomie kwantowym jest kluczowym elementem koniecznym do budowy **Modelu Standardowego**.

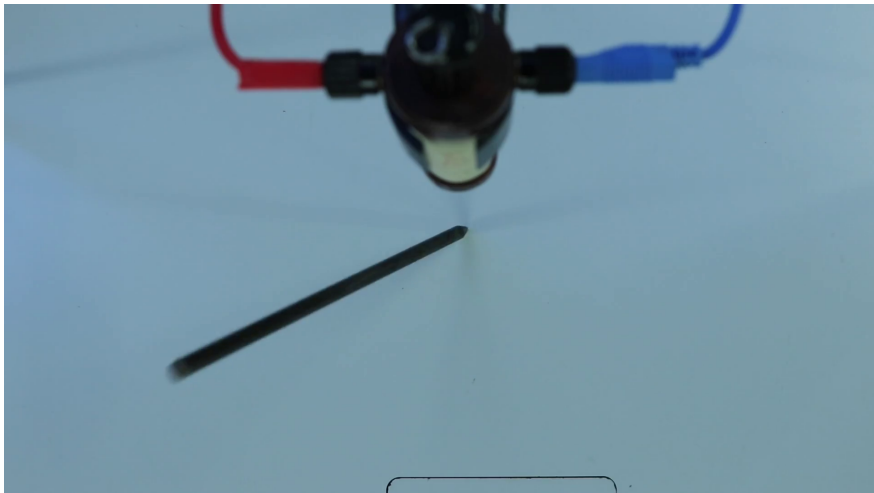
Ale przykłady też znamy z życia codziennego!

Przykład 2: Ustawiony pionowo ołówek zachowuje symetrię względem obrotu wokół osi pionowej:



Ale upadając wybiera spontanicznie jakiś (losowy) kierunek...

Upadający "ołówki" - pokaz



Spontaniczne łamanie symetrii na poziomie kwantowym jest kluczowym elementem koniecznym do budowy **Modelu Standardowego**.

Ale przykłady też znamy z życia codziennego!

Przykład 3: Zasiadanie przy okrągłym stole:

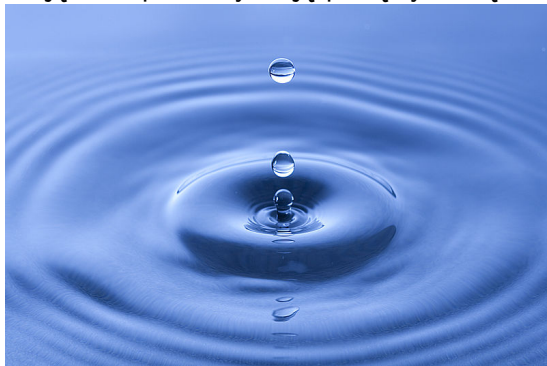


Gdy pierwsza osoba sięgnie (**spontanicznie**) po chleb z prawej lub lewej strony, wszyscy będą musieli zrobić tak samo...

Spontaniczne łamanie symetrii na poziomie kwantowym jest kluczowym elementem koniecznym do budowy **Modelu Standardowego**.

Ale przykłady też znamy z życia codziennego!

Przykład 4: Spadające krople wody mają pełną symetrię obrotową:



Spontaniczne łamanie symetrii na poziomie kwantowym jest kluczowym elementem koniecznym do budowy **Modelu Standardowego**.

Ale przykłady też znamy z życia codziennego!

Przykład 4: Spadające krople wody mają pełną symetrię obrotową:



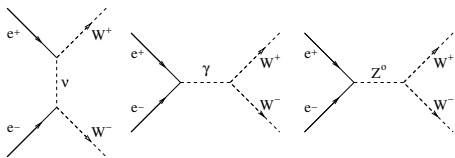
Ale gdy zamarzają tworzą płatki śniegu o mniejszej symetrii...

- 1 Budowa materii (przypomnienie)
- 2 Diagramy Feynmana
- 3 Twierdzenie Noether
- 4 Spontaniczne łamanie symetrii
- 5 Mechanizm Higgsa
- 6 Model Standardowy**

Przewidywania modelu

Oczekujemy, że model powinien dawać skończone przewidywania dla wszystkich możliwych procesów.

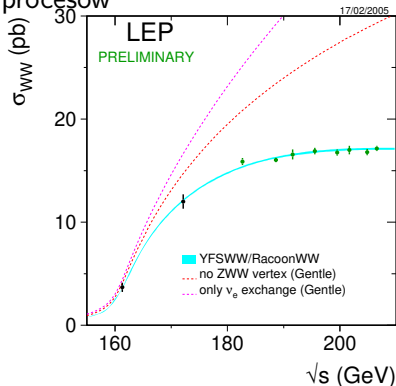
Produkcja par bozonów W^+W^- w zderzeniach e^+e^- :
wkład od trzech różnych procesów



Sprzężenia wynikają z symetrii/struktury Modelu Standardowego

⇒ ścisłe przewidywania teoretyczne

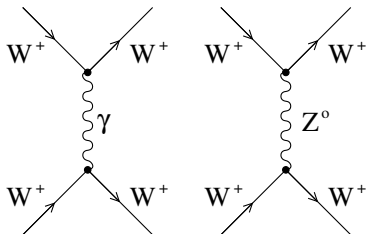
Doświadczalnie potwierdzone kasowanie rozbieżności od różnych procesów



Przewidywania modelu

Oczekujemy, że model powinien dawać **skończone przewidywania** dla wszystkich możliwych procesów.

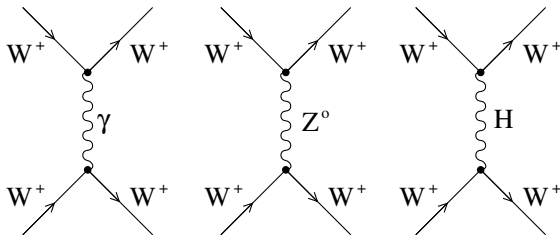
Rozbieżności pojawiają się także w rachunkach rozpraszania bozonów W^+



Przewidywania modelu

Oczekujemy, że model powinien dawać **skończone przewidywania** dla wszystkich możliwych procesów.

Rozbieżności pojawiają się także w rachunkach rozpraszania bozonów W^+



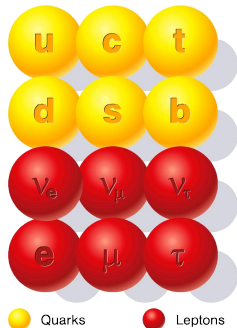
Dodatkowy diagram z wymiana bozonu Higgsa (H) konieczny, aby uzyskać skończone wyniki w granicy dużych energii zderzenie...

Bozon Higgsa nie tylko “nadaje masy”, ale też zapewnia konsystencje rachunków prowadzonych w ramach modelu...

Cząstki fundamentalne

Cząstki, które obecnie uważamy za **fundamentalne** w ramach tzw. **Modelu Standardowego** fizyki cząstek

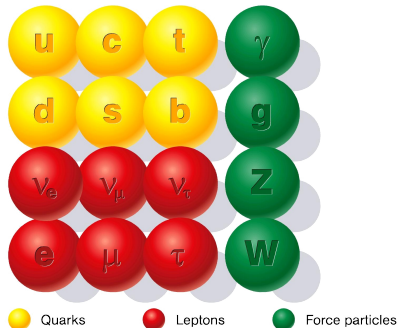
- cząstki materii
 kwarki i leptony



Cząstki fundamentalne

Cząstki, które obecnie uważamy za **fundamentalne** w ramach tzw. **Modelu Standardowego** fizyki cząstek

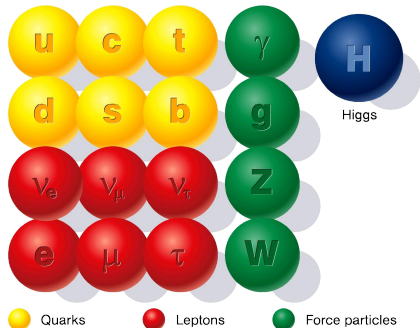
- cząstki materii
kwarki i leptony
- nośniki oddziaływań
 γ , g , W^\pm i Z^0



Cząstki fundamentalne

Cząstki, które obecnie uważamy za **fundamentalne** w ramach tzw. **Modelu Standardowego** fizyki cząstek

- cząstki materii
kwarki i leptony
- nośniki oddziaływań
 γ , g , W^\pm i Z^0
- bozon Higgsa
konieczny dla
spójności modelu
"Nadaje masy"
wszystkim cząstkom



Oddziaływania fundamentalne

Opis oddziaływań w Modelu Standardowym oparty jest na formalizmie tzw. kwantowych teorii pola (Quantum Field Theory, QFT).

Oddziaływania fundamentalne

Opis oddziaływań w Modelu Standardowym oparty jest na formalizmie tzw. kwantowych teorii pola (Quantum Field Theory, QFT).

Podstawą tego opisu jest zawsze dostrzeżenie **lokalnych symetrii cechowania**

- symetria względem obrotu fazy funkcji falowej: $U(1)$
⇒ opis oddziaływań elektromagnetycznych (QED), foton

Oddziaływania fundamentalne

Opis oddziaływań w Modelu Standardowym oparty jest na formalizmie tzw. kwantowych teorii pola (Quantum Field Theory, QFT).

Podstawą tego opisu jest zawsze dostrzeżenie **lokalnych symetrii cechowania**

- symetria względem obrotu fazy funkcji falowej: $U(1)$
⇒ opis oddziaływań elektromagnetycznych (QED), foton
- symetria względem zamiany kolorów cząstek: $SU(3)$
⇒ opis oddziaływań silnych (QCD), gluony

Oddziaływania fundamentalne

Opis oddziaływań w Modelu Standardowym oparty jest na formalizmie tzw. kwantowych teorii pola (Quantum Field Theory, QFT).

Podstawą tego opisu jest zawsze dostrzeżenie **lokalnych symetrii cechowania**

- symetria względem obrotu fazy funkcji falowej: $U(1)$
⇒ opis oddziaływań elektromagnetycznych (QED), foton
- symetria względem zamiany kolorów cząstek: $SU(3)$
⇒ opis oddziaływań silnych (QCD), gluony
- symetria względem zamiany cząstek w dubletach: $SU(2)$
⇒ opis oddziaływań słabych (model Weinberg'a-Salam'a), W^\pm , Z^0

Oddziaływania fundamentalne

Opis oddziaływań w Modelu Standardowym oparty jest na formalizmie tzw. kwantowych teorii pola (**Quantum Field Theory, QFT**).

Podstawą tego opisu jest zawsze dostrzeżenie **lokalnych symetrii cechowania**

- symetria względem obrotu fazy funkcji falowej: $U(1)$
⇒ opis oddziaływań elektromagnetycznych (QED), foton
- symetria względem zamiany kolorów cząstek: $SU(3)$
⇒ opis oddziaływań silnych (QCD), gluony
- symetria względem zamiany cząstek w dubletach: $SU(2)$
⇒ opis oddziaływań słabych (model Weinberg'a-Salam'a), W^\pm , Z^0

$$SM \equiv U(1) \times SU(2) \times SU(3)$$

Oddziaływania fundamentalne

Opis oddziaływań w Modelu Standardowym oparty jest na formalizmie tzw. kwantowych teorii pola (**Quantum Field Theory, QFT**).

Podstawą tego opisu jest zawsze dostrzeżenie **lokalnych symetrii cechowania**

- symetria względem obrotu fazy funkcji falowej: $U(1)$
⇒ opis oddziaływań elektromagnetycznych (QED), foton
- symetria względem zamiany kolorów cząstek: $SU(3)$
⇒ opis oddziaływań silnych (QCD), gluony
- symetria względem zamiany cząstek w dubletach: $SU(2)$
⇒ opis oddziaływań słabych (model Weinberg'a-Salam'a), W^\pm , Z^0

$$SM \equiv U(1) \times SU(2) \times SU(3)$$

+ spontaniczne łamanie symetrii konieczne do wytłumaczenia mas...