

Wszechświat Cząstek Elementarnych dla Humanistów

Model Standardowy

Aleksander Filip Żarnecki

Wykład ogólnouniwersytecki



29 listopada 2022

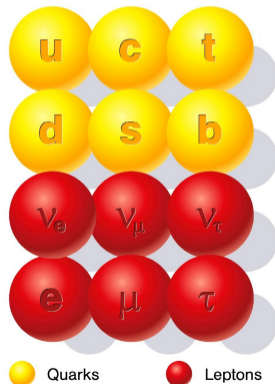
- 1 Budowa materii (przypomnienie)
- 2 Diagramy Feynmana
- 3 Twierdzenie Noether
- 4 Spontaniczne łamanie symetrii
- 5 Mechanizm Higgsa
- 6 Model Standardowy

- 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** (punktowe i niepodzielne) w ramach tzw. Modelu Standardowego fizyki cząstek

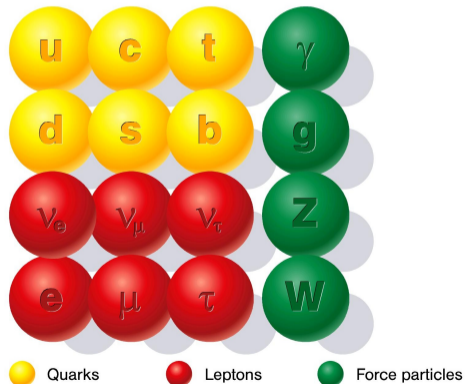
- cząstki materii
kwarki i leptony



Cząstki fundamentalne

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

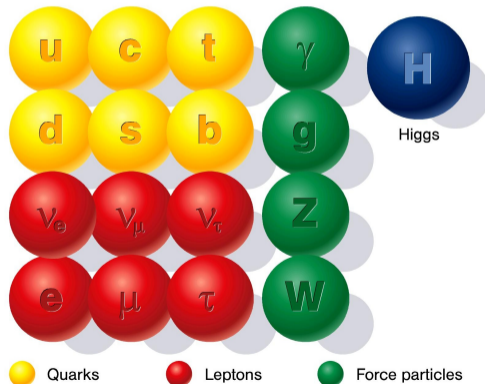
- cząstki materii
 kwarki i leptony
- nośniki oddziaływań
 γ , g , W^\pm i Z^0



Cząstki fundamentalne

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

- cząstki materii
kwarki i leptony
- nośniki oddziaływań
 γ , g , W^\pm i Z^0
- bozon Higgosa
dziś powiemy dlaczego
jest w tym modelu niezbędny...



Bozony

“Cegiełki” materii oddziałują ze sobą poprzez wymianę **nośników oddziaływań**

Nośnik oddziaływania **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 W^{\pm}, Z^0 pośredniczące	wszystkie fermiony

Bozony

“Cegiełki” materii oddziałują ze sobą poprzez wymianę **nośników oddziaływań**

Nośnik oddziaływania **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 W^{\pm}, Z^0 pośredniczące	wszystkie fermiony

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

Bozony

“Cegiełki” materii oddziałują ze sobą poprzez wymianę **nośników oddziaływań**

Nośnik oddziaływania **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!

Oddziaływania słabe

Są najłabsze, ale też z pewnością najbardziej skomplikowane z pośród wszystkich oddziaływań podstawowych:

- pośredniczą masywne nośniki W^{\pm} i Z^0
fotony i gluony są bezmasowe
- mogą zmieniać zapach cząstki (w oddziaływaniach CC)
w oddziaływaniach silnych i EM zapach jest zachowany
- łamią symetrie parzystości: świat odbity wygląda “inaczej”
parzystość zachowana w oddziaływaniach silnych i EM
- łamią sprzężenie ładunkowe: antycząstki oddziałują inaczej niż cząstki
oddziaływani silne i EM takie same

Oddziaływania słabe

Mogłoby się wydawać, że są jednocześnie najmniej dla nas istotne...

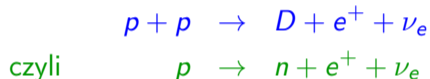
Wprost przeciwnie!

Oddziaływania słabe

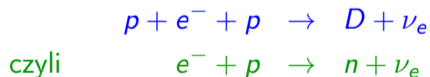
Mogłoby się wydawać, że są jednocześnie najmniej dla nas istotne...

Wprost przeciwnie!

Oddziaływania słabe są odpowiedzialne za przemiany termojądrowe w Słońcu. Proces spalania wodoru zaczyna się od procesu **p-p**:



deuter produkowany jest także w reakcji “**pep**”:

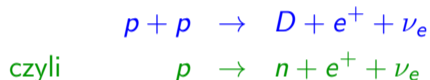


Oddziaływania słabe

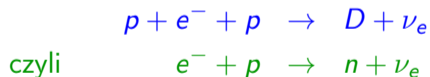
Mogłoby się wydawać, że są jednocześnie najmniej dla nas istotne...

Wprost przeciwnie!

Oddziaływania słabe są odpowiedzialne za przemiany termojądrowe w Słońcu. Proces spalania wodoru zaczyna się od procesu **p-p**:



deuter produkowany jest także w reakcji “**pep**”:



Ponieważ są to oddziaływania słabe to reakcje te zachodzą bardzo powoli!

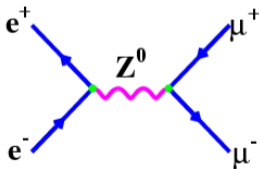
Słońce świeci od ok. 5 mld. lat, dzięki temu mogło rozwinąć się życie na Ziemi.

Gdyby oddziaływania słabe były silniejsze, nie mielibyśmy szans...

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

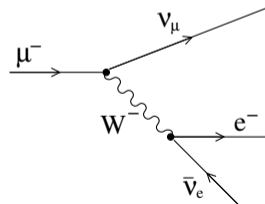
Najprostszy przypadek zderzenia elektron-pozyton

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



Rozpad mionu w modelu Weinberg'a-Salam'a

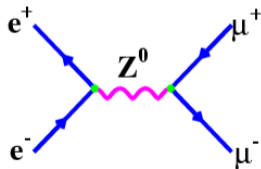
$$\mu^- \longrightarrow e^- + \nu_\mu + \bar{\nu}_e$$



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

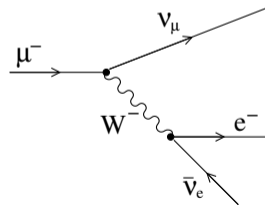
Najprostszy przypadek zderzenia elektron-pozyton

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



Rozpad mionu w modelu Weinberg'a-Salam'a

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



Jak należy rozumieć tego typu diagramy? 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

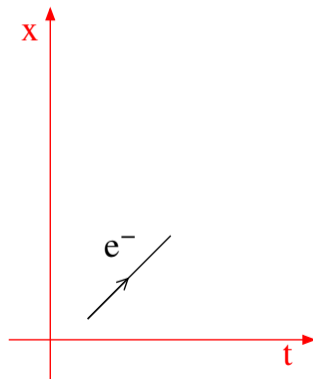
Tzw. diagramy Feynmana są bardzo przydatnym narzędziem w teorii cząstek i oddziaływań fundamentalnych... **Ale musimy je rysować według ściśle określonych reguł!**

Konwencja

Diagram obrazuje (względny) ruch cząstek
zależność położenia od czasu

Przykład:

- poruszający się elektron



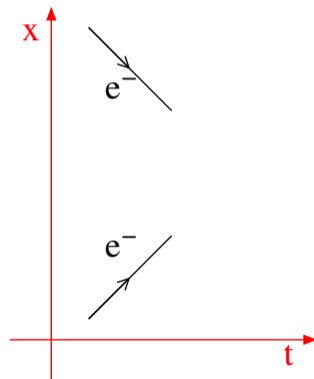
Tzw. diagramy Feynmana są bardzo przydatnym narzędziem w teorii cząstek i oddziaływań fundamentalnych... **Ale musimy je rysować według ściśle określonych reguł!**

Konwencja

Diagram obrazuje (względny) ruch cząstek
zależność położenia od czasu

Przykład:

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



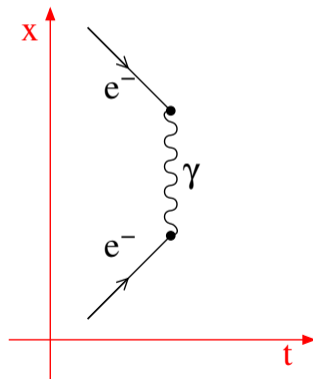
Tzw. diagramy Feynmana są bardzo przydatnym narzędziem w teorii cząstek i oddziaływań fundamentalnych... **Ale musimy je rysować według ściśle określonych reguł!**

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



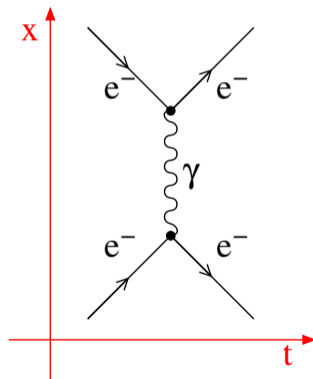
Tzw. diagramy Feynmana są bardzo przydatnym narzędziem w teorii cząstek i oddziaływań fundamentalnych... **Ale musimy je rysować według ściśle określonych reguł!**

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



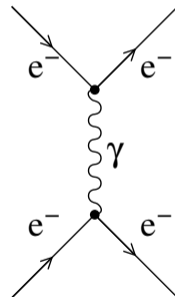
Tzw. diagramy Feynmana są bardzo przydatnym narzędziem w teorii cząstek i oddziaływań fundamentalnych... **Ale musimy je rysować według ściśle określonych reguł!**

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 kierunku przeciwnym 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 elektron lub pozyton (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 elektron lub pozyton (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 $E^2 = p^2 c^2$ Energia \sim pęd

można też wprowadzić zmienną (**wirtualność fotonu**) $q^2 \equiv E^2 - p^2 c^2$,

która dla rzeczywistego fotonu musi być zerowa, $q^2 = 0$

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**

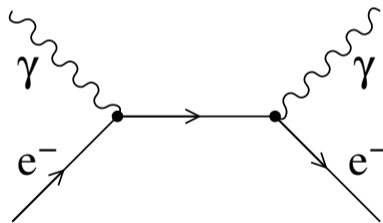
Wirtualność q^2 może być zarówno większa jak i mniejsza od $m^2 c^4$. Zależy to od procesu...
“Przekaz czteropędu” w opisie rozpraszania (wykład 5), to wartość wirtualności fotonu, $Q^2 = |q^2|$

Diagramy skrzyżowane

Na poprawnie narysowany diagram, możemy patrzeć “z każdej strony”. [Możemy go obracać!](#)

Rozpraszanie Comptona

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



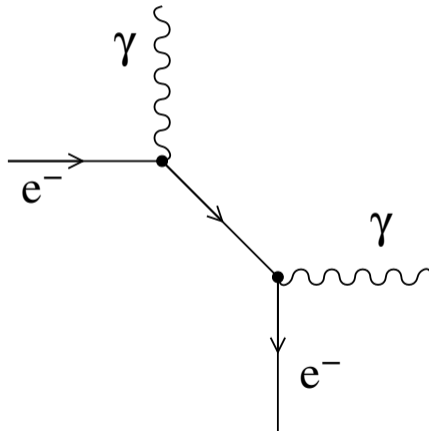
Diagramy skrzyżowane

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!

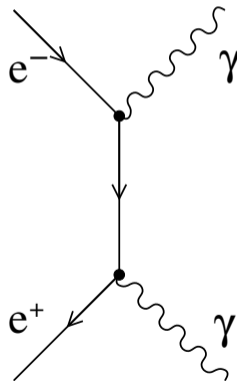
Rozpraszanie Comptona

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

Jeśli obrócimy diagram...

Anihilacja elektron-pozyton

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



Wychodzący elektron zamienia się na wchodzący pozyton !!!

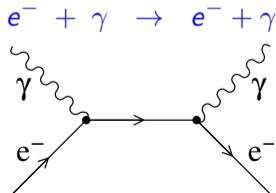
Zasady zachowania

Konwencja, zgodnie z którą kierunek strzałki na linii fermionowej jest **przeciwny dla antycząstek**, ma głębokie uzasadnienie i bardzo pomaga w prawidłowym rysowaniu diagramów.

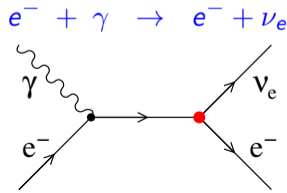
Strzałka wskazuje kierunek “przepływu” liczb kwantowych cząstki (ładunku, liczby leptonowej, dziwności itp.)

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:

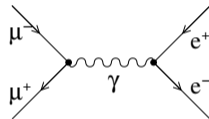
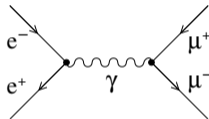


Diagramy skrzyżowane

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...

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

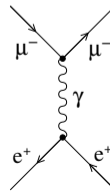
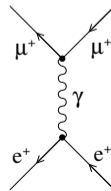
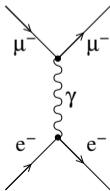
$$\mu^+ \mu^- \rightarrow e^+ e^-$$



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

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

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



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...

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

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

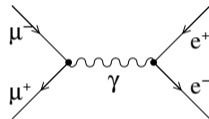
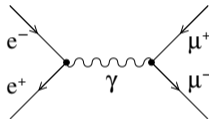
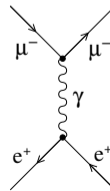
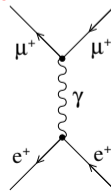
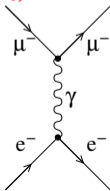


Diagram możemy dowolnie odbijać i obracać. Cząstkę (antycząstkę) ze stanu początkowego możemy zawsze zamienić na antycząstkę (cząstkę) w stanie końcowym i na odwrót...

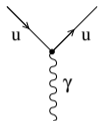
$$e^- \mu^- \rightarrow e^- \mu^-$$

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

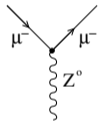
$$e^+ \mu^- \rightarrow e^+ \mu^-$$



Wierzchołki dla innych oddziaływań

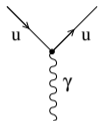


Dla oddziaływań elektromagnetycznych nie może nastąpić zmiana zapachu (ani ładunku) fermionu.

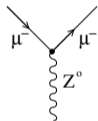


Podobnie w przypadku oddziaływań słabych z wymianą Z^0 (nie istnieją prądy neutralne zmieniające zapach).

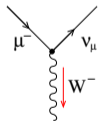
Wierzchołki dla innych oddziaływań



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

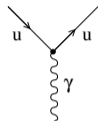


Podobnie w przypadku oddziaływań słabych z wymianą Z^0 (nie istnieją prądy neutralne zmieniające zapach).

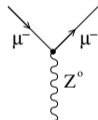


Natomiast wymiana W^\pm wiąże się ze zmianą zapachu w ramach dubletów cząstek (patrz wykład 6).

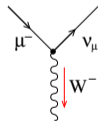
Wierzchołki dla innych oddziaływań



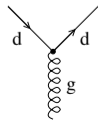
Dla oddziaływań elektromagnetycznych nie może nastąpić zmiana zapachu (ani ładunku) fermionu.



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

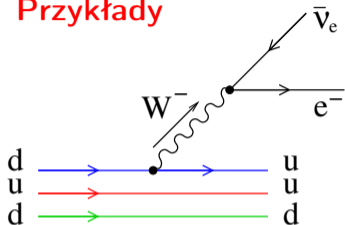


Natomiast wymiana W^\pm wiąże się ze zmianą zapachu w ramach dubletów cząstek (patrz wykład 6).

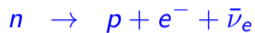


W oddziaływaniach silnych (wymiana gluonu) nie ma zmiany zapachu, zmienia się natomiast kolor kwarku...

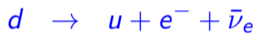
Przykłady



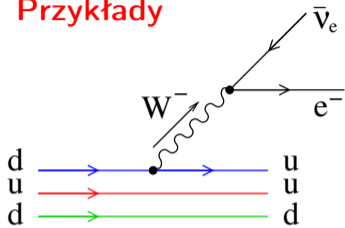
Rozpad neutronu:



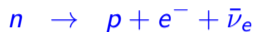
na poziomie kwarkowym:



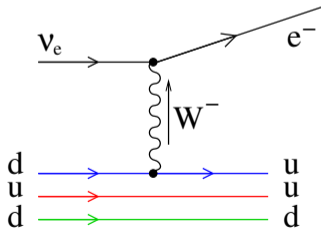
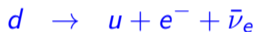
Przykłady



Rozpad neutronu:



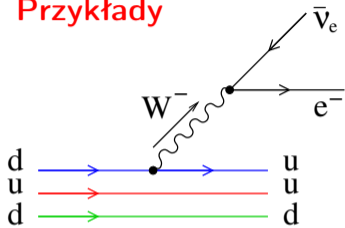
na poziomie kwarkowym:



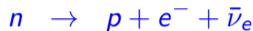
Jest opisany tym samym diagramem co oddziaływanie neutrina:



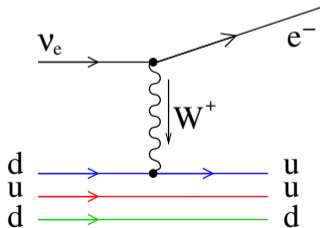
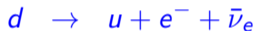
Przykłady



Rozpad neutronu:



na poziomie kwarkowym:

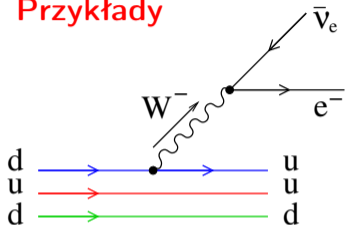


Jest opisany tym samym diagramem co oddziaływanie neutrina:

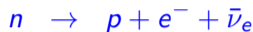


Znak wymienianego W jest w tym przypadku umowny...

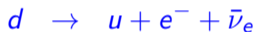
Przykłady



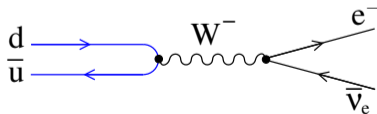
Rozpad neutronu:



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 (ściślej: kwantowe teorie pola) pozwala opisać oddziaływania cząstek fundamentalnych.

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

Prawdopodobieństwo reakcji

Podobnie jak w przypadku opisu zachowania pojedynczej cząstki, mechanika kwantowa (ściślej: kwantowe teorie pola) pozwala opisać oddziaływania cząstek fundamentalnych.

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

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 (ściślej: kwantowe teorie pola) pozwala opisać oddziaływania cząstek fundamentalnych.

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

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 (ściślej: kwantowe teorie pola) pozwala opisać oddziaływania cząstek fundamentalnych.

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

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)

przyporządkujemy odpowiednie wyrażenie algebraiczne, zależne od rodzaju oddziaływania, typu cząstki, jej parametrów (ładunku, energii, pędu, polaryzacji) 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)

przyporządkujemy odpowiednie wyrażenie algebraiczne, zależne od rodzaju oddziaływania, typu cząstki, jej parametrów (ładunku, energii, pędu, polaryzacji) itp.

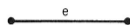
Następnie musimy tylko pracowicie przekształcić otrzymane wyrażenie na amplitudę, żeby dostać interesujący nas wynik. Dla najprostszych procesów można to zrobić na kartce papieru. Dla bardziej skomplikowanych mamy dedykowane programy komputerowe...

Diagramy Feynmana


zestaw reguł dla
Modelu Standardowego

F.Haltzen, A.D.Martin,
Quarks and Leptons

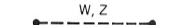




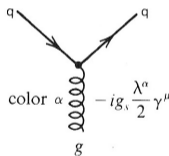
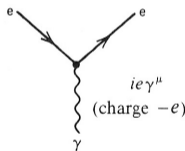
$$\frac{i}{(\not{p} - m)}$$



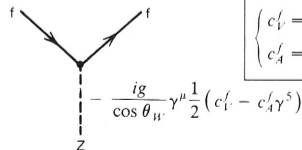
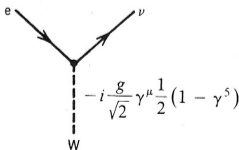
$$\frac{-ig_{\mu\nu}}{p^2}$$



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



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



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

- 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 zamiast metrów to nie zmieni 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 zamiast metrów to nie zmieni 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. r. Schrödingera, 1925)

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

Mechanika kwantowa

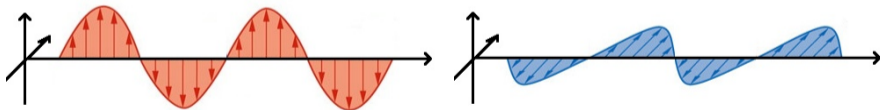
Ruch cząstki to rozchodzenie się “fali prawdopodobieństwa”. Falę opisuje tzw. funkcja falowa $\psi(\vec{r}, t)$, której ewolucję potrafimy opisać odpowiednimi równaniami (np. r. Schrödingera, 1925)

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

Funkcje falowe są zespolone (wartość “dwuwymiarowa”), ale wynik pomiaru **nie zależy od fazy**

Faza (“polaryzacja fali”, “kierunek” w płaszczyźnie zespolonej) jest **nieistotna!**

⇒ dodatkowa **symetria cechowania** (obrotu w płaszczyźnie zespolonej)



Mechanika kwantowa

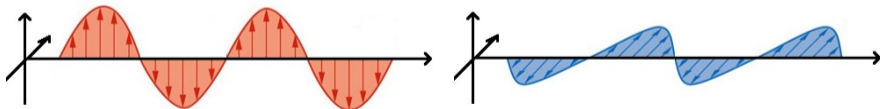
Ruch cząstki to rozchodzenie się “fali prawdopodobieństwa”. Falę opisuje tzw. funkcja falowa $\psi(\vec{r}, t)$, której ewolucję potrafimy opisać odpowiednimi równaniami (np. r. Schrödingera, 1925)

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

Funkcje falowe są zespolone (wartość “dwuwymiarowa”), ale wynik pomiaru **nie zależy od fazy**

Faza (“polaryzacja fali”, “kierunek” w płaszczyźnie zespolonej) jest **nieistotna!**

⇒ dodatkowa **symetria cechowania** (obrotu w płaszczyźnie zespolonej)



Niezmienniczość praw przyrody względem transformacji cechowania

⇒ Zasada Zachowania Ładunku

Funkcja falowa

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

Funkcja falowa

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 powinna też być 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

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 powinna też być 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

Łamanie symetrii

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)**.

Łamanie symetrii

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...**

Łamanie symetrii

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?

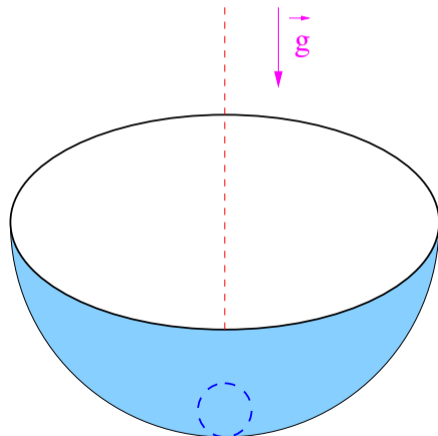
Czy w symetrycznym świecie mogą istnieć stany łamiące symetrię?

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



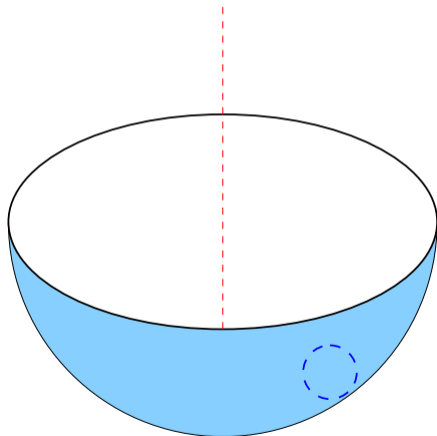
Analogia klasyczna

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!?**



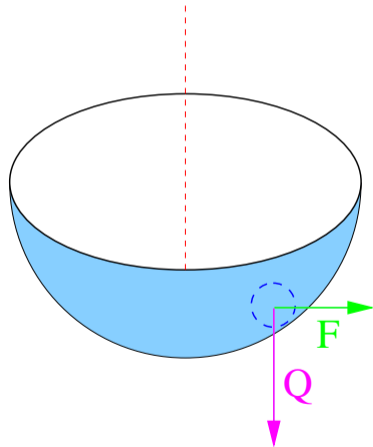
Analogia klasyczna - pokaz (2)



Analogia klasyczna

Możliwe wytłumaczenia:

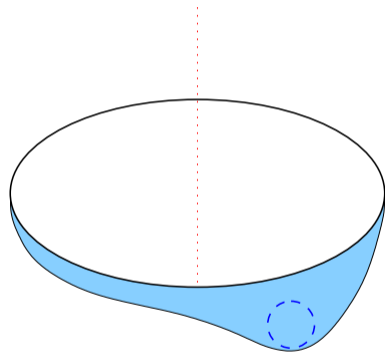
- na kulkę działa dodatkowa siła, skierowana **pod kątem**



Analogia klasyczna

Możliwe wytłumaczenia:

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



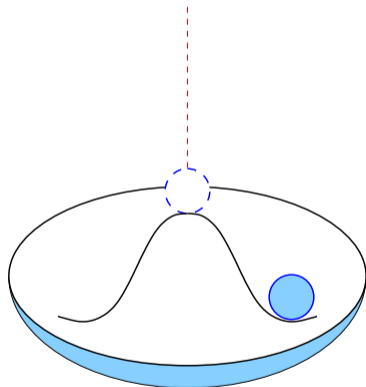
Analogia klasyczna

Możliwe wytłumaczenia:

- na kulkę działa dodatkowa siła, skierowana **pod kątem**
- 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** (równorzędnych) położen równowagi



Analogia klasyczna

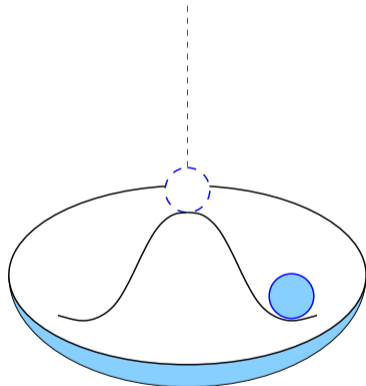
Możliwe wytłumaczenia:

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

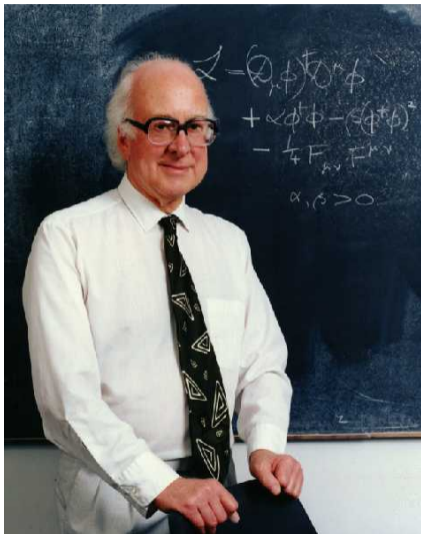
⇒ kulka stacza się wybierając jedno z **wielu możliwych** (równorzędnych) położen równowagi

Stoczenie się kulki powoduje spontaniczne złamanie symetrii !



Analogia klasyczna - pokaz (3)



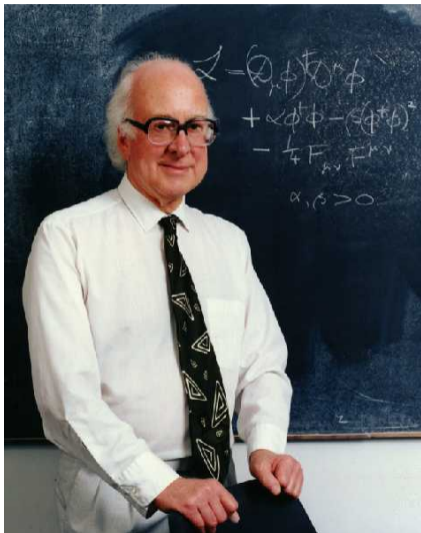


Na możliwość nadania mas nośnikom oddziaływań poprzez spontaniczne łamanie symetrii wskazał czterdzieści lat temu (1964) m.in.† [Peter W. Higgs](#).

Mechanizm spontanicznego łamania symetrii, zwany także **mechanizmem Higgsa**, jest podstawą współczesnej teorii oddziaływań elektroslabych i całego Modelu Standardowego

Wszystkie cząstki, nie tylko bozony W^\pm i Z^0 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 i całego Modelu Standardowego

Wszystkie cząstki, nie tylko bozony W^\pm i Z^0 uzyskują **masę** poprzez **oddziaływanie z polem Higgsa!**

Teoria przewidywała także istnienie **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

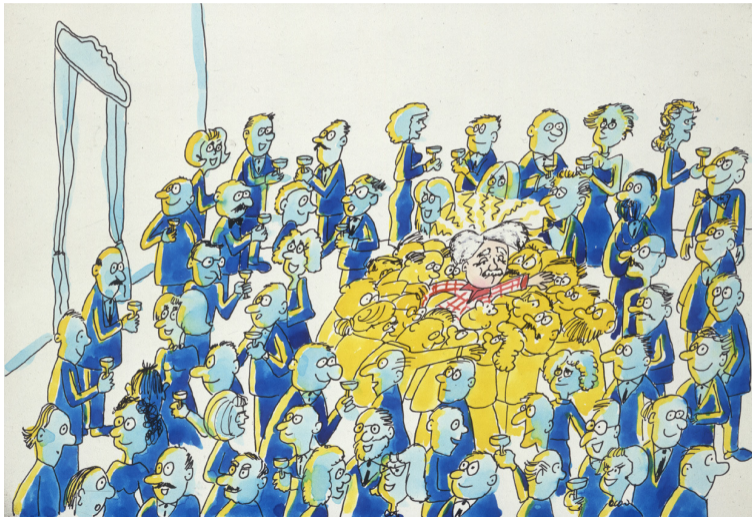
Wyobraźmy sobie salę bankietową **równomiernie** wypełnioną ludźmi (**pole Higgsa**)



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



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



Ludzie na bankiecie (pole Higgsa) mogą też **spontanicznie** tworzyć "zgęszczenia"



Ludzie na bankiecie (**pole Higgsa**) mogą też **spontanicznie** tworzyć "zgęszczenia"



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 obrotu wokół osi pionowej:



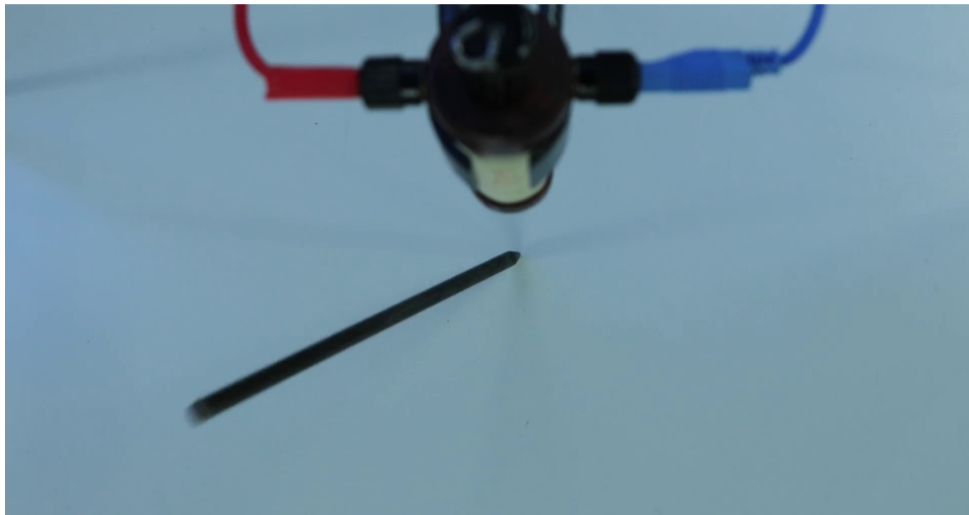
Spontaniczne łamanie symetrii na poziomie kwantowym jest kluczowym elementem koniecznym do budowy **Modelu Standardowego**. Ale przykłady też znamy z życia codziennego!

Przykład 2: Ustawiony pionowo ołówek zachowuje symetrię 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!

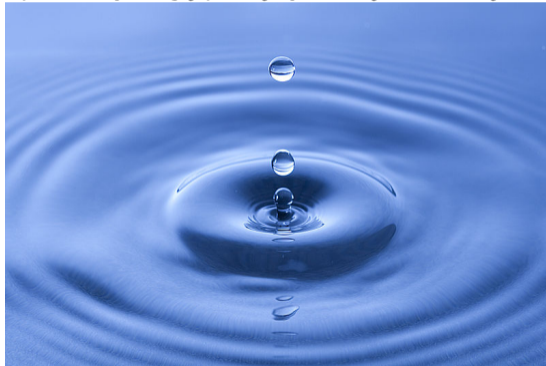
Przykład 3: Zasiadanie przy okrągłym stole:



Gdy pierwsza osoba sięgnie (**spontanicznie**) po chleb z prawej lub lewej strony złamie symetrię, 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:



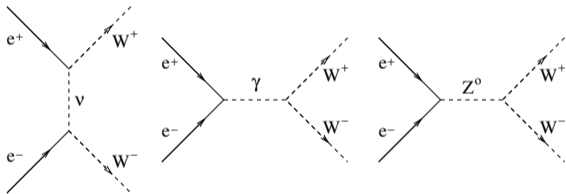
Ale gdy zamarzają tworzą płatki śniegu o mniejszej symetrii...

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

Przewidywania modelu

Pełna teoria powinna dawać **skończone przewidywania** dla wszystkich możliwych procesów.

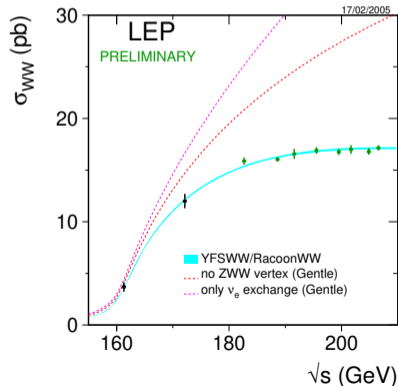
Produkcja par bozonów W^+W^- w zderzeniach e^+e^- : wkład od **trzech** różnych procesów



Sprężenia wynikają z symetrii/struktury **Modelu Standardowego**

⇒ ścisłe przewidywania teoretyczne

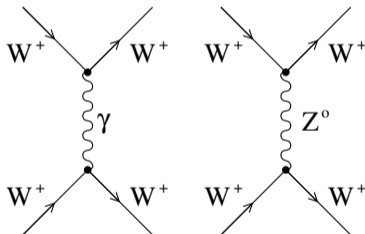
Doświadczalnie potwierdzone **kasowanie rozbieżności** od różnych procesów



Przewidywania modelu

Pełna teoria powinna dawać **skończone przewidywania** dla wszystkich możliwych procesów.

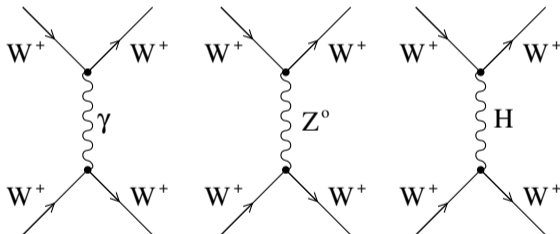
Rozbieżności pojawiają się także w rachunkach rozpraszania bozonów W^+



Przewidywania modelu

Pełna teoria powinna dawać **skończone przewidywania** dla wszystkich możliwych procesów.

Rozbieżności pojawiają się także w rachunkach rozpraszania bozonów W^+

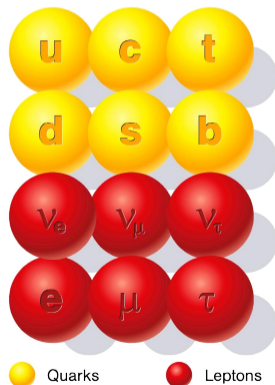


Dodatkowy diagram z wymiana bozonu Higgsa (H) konieczny, aby uzyskać skończone wyniki w granicy dużych energii zderzenie... **Bozon Higgsa nie tylko "nadaje masy", ale też zapewnia uzyskanie konsyntenych wyników... Jest naturalnym "towarzyszem" bozonów Z^0 ...**

Cząstki fundamentalne

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

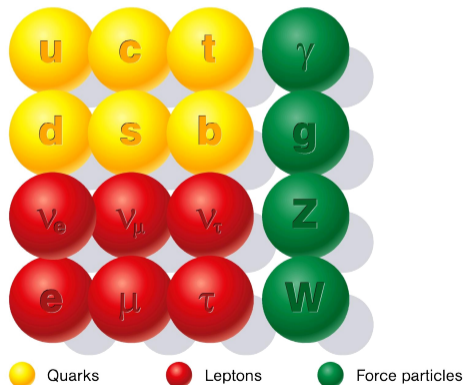
- cząstki materii
 kwarki i leptony



Cząstki fundamentalne

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

- 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**

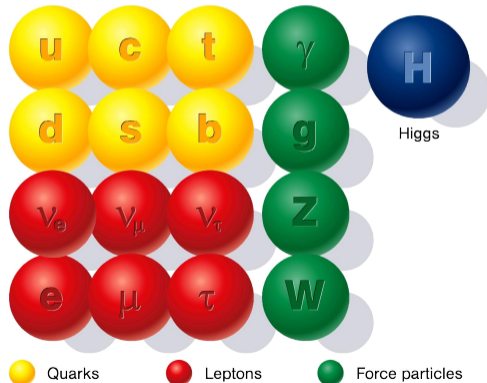
- cząstki materii
kwarki i leptony

- 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 kwantowych teorii pola (Quantum Field Theory, QFT).

Oddziaływania fundamentalne

Opis oddziaływań w Modelu Standardowym oparty jest na formalizmie 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 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 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 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 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...