

# Wszechświat Cząstek Elementarnych dla Humanistów

## Diagramy Feynmana

Aleksander Filip Żarnecki

Wykład ogólnouniwersytecki



26 listopada 2019

- 1 Budowa materii (przypomnienie)
- 2 Diagramy Feynmana
- 3 Amplituda rozpraszania

1 Budowa materii (przypomnienie)

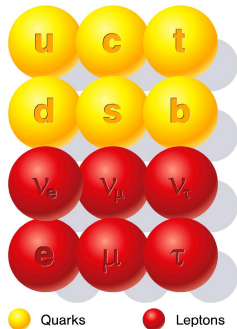
2 Diagramy Feynmana

3 Amplituda rozpraszania

## Cząstki fundamentalne

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

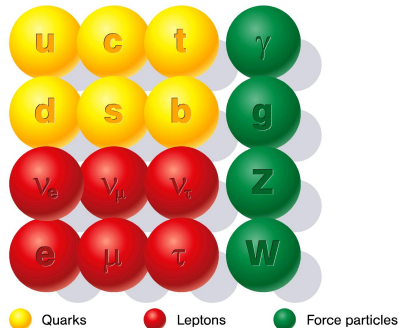
- cząstki materii  
kwarki i leptony



## Cząstki fundamentalne

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

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

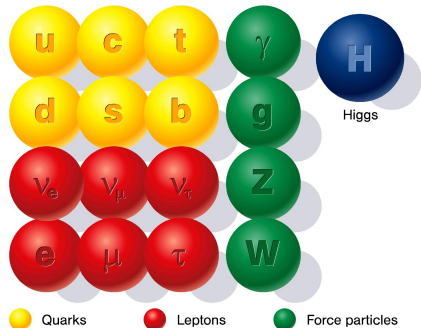


## Cząstki fundamentalne

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

- cząstki materii  
kwarki i leptony
- nośniki oddziaływań  
 $\gamma$ ,  $g$ ,  $W^\pm$  i  $Z^0$
- bozon Higgsa  
konieczny dla  
spójności modelu

“Nadaje masy”  
wszystkim cząstkom



## 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	$\gamma$	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 $\gamma$	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” 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	$\gamma$	cząstki naładowane
silne	kolor	gluony	$g$	kwarki
słabe	“ładunek słaby”	bozony pośredniczące	$W^{\pm}, Z^0$	wszystkie fermiony

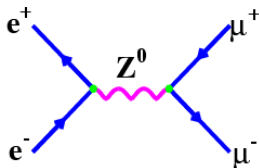
Foton może się także sprzęgać do bozonów  $W^{\pm}$  (niosą ładunek).

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:

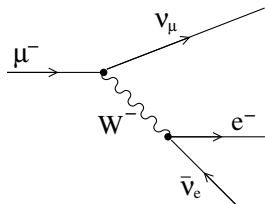
Najprostszy przypadek zderzenia elektron-pozyton

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



Rozpad mionu w modelu Weinberg'a-Salam'a

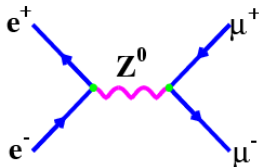
$$\mu^- \longrightarrow e^- + \nu_\mu + \bar{\nu}_e$$



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

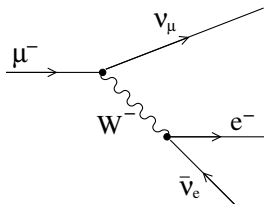
Najprostszy przypadek zderzenia elektron-pozyton

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



Rozpad mionu w modelu Weinberg'a-Salam'a

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

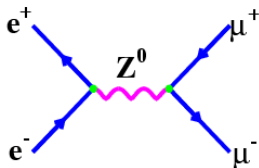


Jak należy rozumieć tego typu diagramy?

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

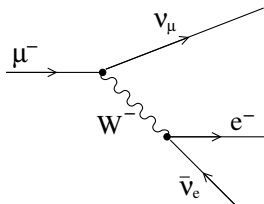
Najprostszy przypadek zderzenia elektron-pozyton

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



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 Amplituda rozpraszania

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

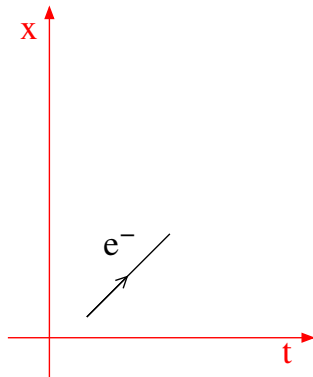
Ale musimy je rysować według ściśle określonych reguł!

## 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...

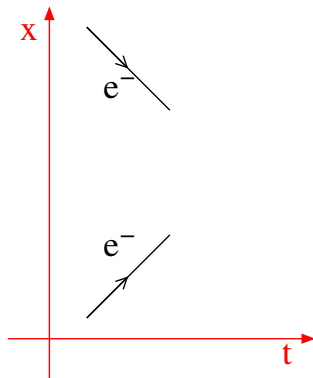
Ale musimy je rysować według ściśle określonych reguł!

## 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...

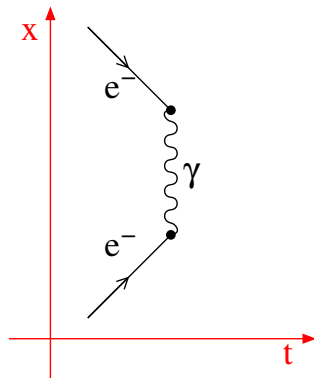
Ale musimy je rysować według ściśle określonych reguł!

## 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...

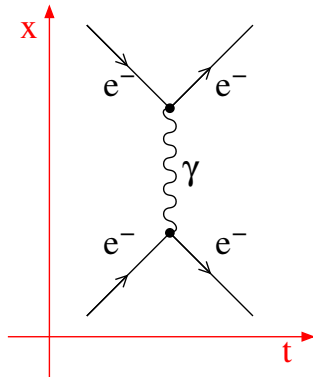
Ale musimy je rysować według ściśle określonych reguł!

## 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...

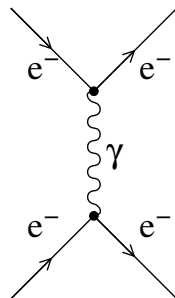
Ale musimy je rysować według ściśle określonych reguł!

## Konwencja

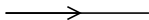
Diagram obrazuje (względny) ruch cząstek  
zależność położenia od czasu

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

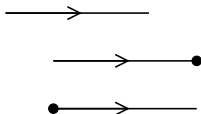


**“Elementarz”**      przykład dla oddziaływań elektronów i fotonów



Linia fermionowa: elektron

## “Elementarz” przykład dla oddziaływań elektronów i fotonów

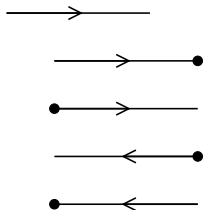


Linia fermionowa: elektron

- 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

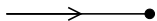
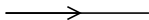


Linia fermionowa: elektron lub **pozyton**

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

strzałkę na linii pozytonowej rysujemy w przeciwnym kierunku (więcej za chwilę)

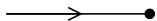
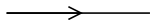
## “Elementarz” przykład dla oddziaływań elektronów i fotonów



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...

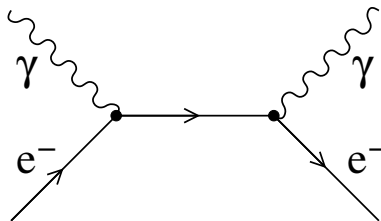
## Diagramy skrzyżowane

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

Mozemy go obracać!

Rozpraszanie Comptona

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



## Diagramy skrzyżowane

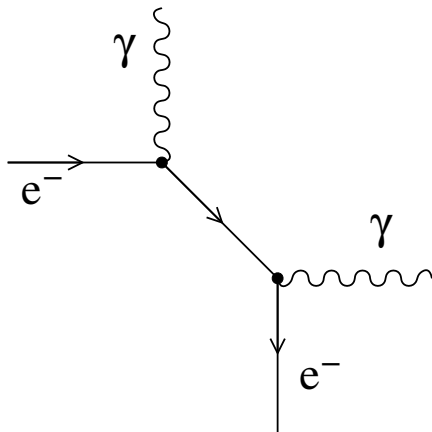
Na poprawnie narysowany diagram, możemy patrzeć “z każdej strony”.

Możemy go obracać!

Rozpraszanie Comptona



Jeśli obrócimy diagram...



## Diagramy skrzyżowane

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

Mozemy go obracać!

Rozpraszanie Comptona

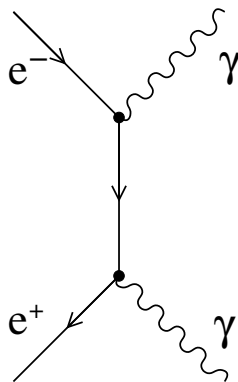
$$e^- + \gamma \rightarrow e^- + \gamma$$

Jeśli obrócimy diagram...

Anihilacja elektron-pozyton

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

Wychodzący elektron zamienia się na wchodzący pozyton !!!





## Zasady zachowania

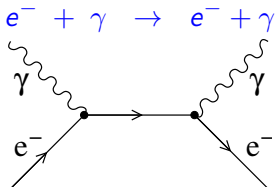
Konwencja, zgodnie z którą kierunek strzałki na linii fermionowej jest **przeciwny dla antycząstek**, ma głębokie uzasadnienie.

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

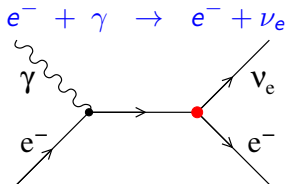
W każdym wierzchołku diagramu musimy mieć tyle samo wchodzących co wychodzących linii fermionowych!

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

Dozwolone:



Zabronione:

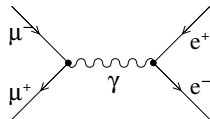
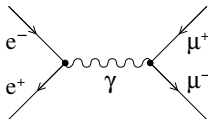


## Diagramy skrzyżowane

Wszystkie poniższe procesy opisuje ten sam diagram!

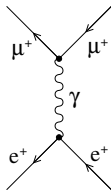
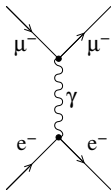
Jeśli może zajść jedna z tych reakcji, wtedy wszystkie “obrócone” są też dozwolone. Prawdopodobieństwa ich zajścia są powiązane...

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

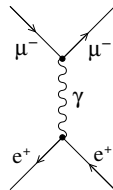


$$\mu^+\mu^- \rightarrow e^+e^-$$

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



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



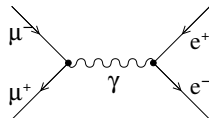
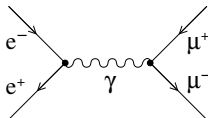
$$e^+\mu^- \rightarrow e^+\mu^-$$

## 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...

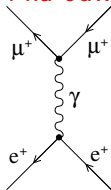
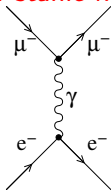
$$e^+ e^- \rightarrow \mu^+ \mu^-$$



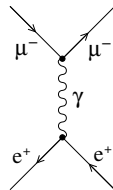
$$\mu^+ \mu^- \rightarrow e^+ e^-$$

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

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

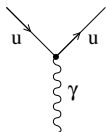


$$e^+ \mu^+ \rightarrow e^+ \mu^+$$

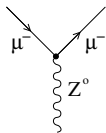


$$e^+ \mu^- \rightarrow e^+ \mu^-$$

## Wierzchołki dla innych oddziaływań

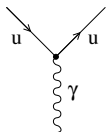


Dla oddziaływań elektromagnetycznych nie może nastąpić zmiana zapachu (ani ładunku) fermionu.

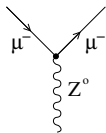


Podobnie w przypadku oddziaływań słabych z wymianą  $Z^0$  (nie istnieją prądy neutralne zmieniające zapach).

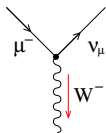
## Wierzchołki dla innych oddziaływań



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

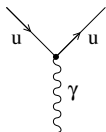


Podobnie w przypadku oddziaływań słabych z wymianą  $Z^0$  (nie istnieją prądy neutralne zmieniające zapach).

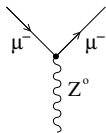


Natomiast wymiana  $W^\pm$  wiąże się ze zmianą zapachu w ramach dubletów cząstek (patrz wykład 6).

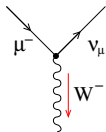
## Wierzchołki dla innych oddziaływań



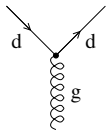
Dla oddziaływań elektromagnetycznych nie może nastąpić zmiana zapachu (ani ładunku) fermionu.



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

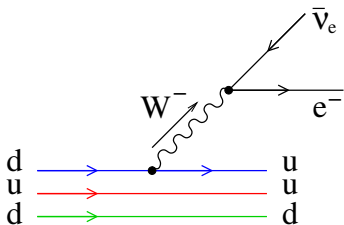


Natomiast wymiana  $W^\pm$  wiąże się ze zmianą zapachu w ramach dubletów cząstek (patrz wykład 6).

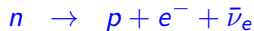


W oddziaływaniach silnych (wymiana gluonu) nie ma zmiany zapachu, zmienia się natomiast kolor kwarku...

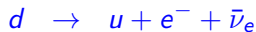
## Przykłady



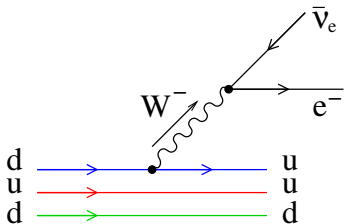
Rozpad neutronu:



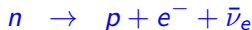
na poziomie kwarkowym:



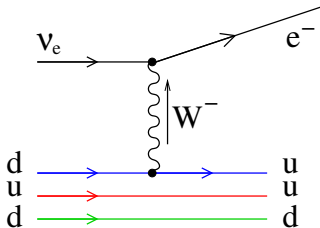
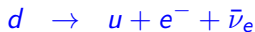
## Przykłady



Rozpad neutronu:



na poziomie kwarkowym:

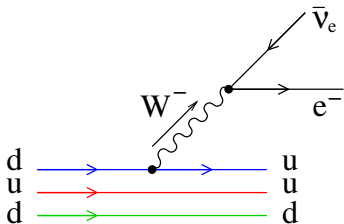


Jest opisany tym samym diagramem co oddziaływanie neutrina:

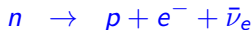




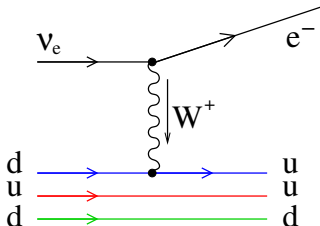
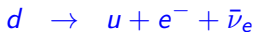
## Przykłady



Rozpad neutronu:



na poziomie kwarkowym:

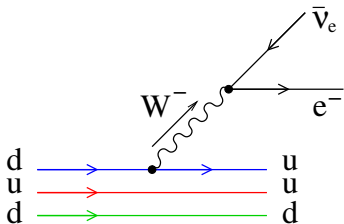


Jest opisany tym samym diagramem co oddziaływanie neutrina:

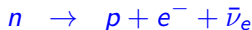


Znak wymienianego  $W$  jest w tym przypadku umowny...

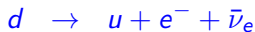
## Przykłady



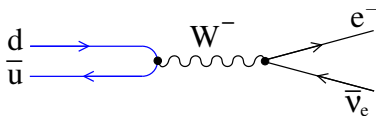
Rozpad neutronu:



na poziomie kwarkowym:

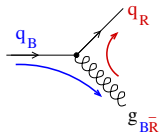


Jest opisany tym samym diagramem co rozpad pionu:



## Przeptyw koloru

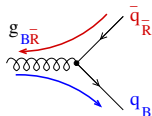
## dla oddziaływań silnych



Cechą szczególną oddziaływań silnych jest to, że gluon niesie ładunek kolorowy: kolor + antykolor.

**Kwark emitując gluon zmienia swój kolor!**

$$q_B \rightarrow q_R + g_{B\bar{R}}$$

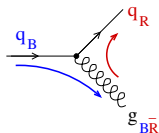


Podobnie gluon (wirtualny) może zmienić się (konwertować) w parę kwarków. Mają one różne kolory, bo początkowy gluon nie jest "biały":

$$g_{B\bar{R}} \rightarrow q_B + \bar{q}_{\bar{R}}$$

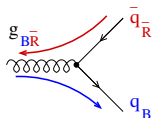
## Przeptyw koloru

## dla oddziaływań silnych



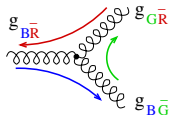
Cechą szczególną oddziaływań silnych jest to, że gluon niesie ładunek kolorowy: kolor + antykolor.  
**Kwark emitujący gluon zmienia swój kolor!**

$$q_B \rightarrow q_R + g_{B\bar{R}}$$



Podobnie gluon (wirtualny) może zmienić się (konwertować) w parę kwarków. Mają one różne kolory, bo początkowy gluon nie jest "biały":

$$g_{B\bar{R}} \rightarrow q_B + \bar{q}_{\bar{R}}$$



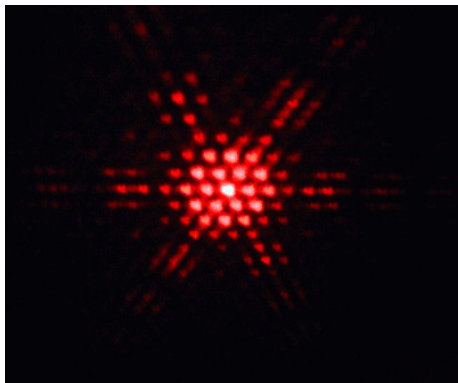
Gluon może także "rozszczyć się" na dwa gluony.  
 Ładunek kolorowy musi być w każdym wierzchołku zachowany !!!

- 1 Budowa materii (przypomnienie)
- 2 Diagramy Feynmana
- 3 Amplituda rozpraszania

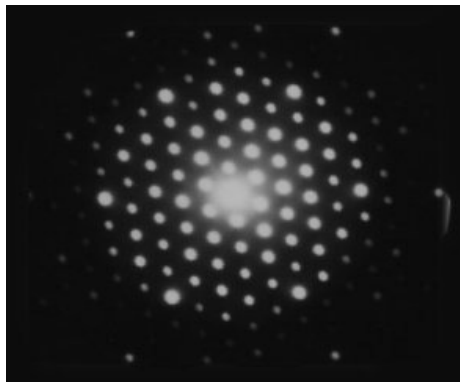
W roku 1923 Louis de Broglie wysunął hipotezę, że **wszystkie cząstki** powinny przejawiać własności **falowe** !

Dyfrakcja na strukturach heksagonalnych

**Światło**



**Elektrony**



## Mechanika klasyczna

Jeśli znamy **dokładnie** początkowe **położenia** i **prędkości** wszystkich elementów układu (np. **planet w Układzie Słonecznym**) potrafimy **przewidzieć** w jakim stanie będzie się znajdował w **przyszłości**.

## Mechanika klasyczna

Jeśli znamy **dokładnie** początkowe **położenia** i **prędkości** wszystkich elementów układu (np. planet w Układzie Słonecznym) potrafimy **przewidzieć** w jakim stanie będzie się znajdował w **przyszłości**.

## 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)



## Mechanika klasyczna

Jeśli znamy **dokładnie** początkowe **położenia** i **prędkości** wszystkich elementów układu (np. **planet w Układzie Słonecznym**) potrafimy **przewidzieć** w jakim stanie będzie się znajdował w **przyszłości**.

## 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 klasyczna

Jeśli znamy **dokładnie** początkowe **położenia** i **prędkości** wszystkich elementów układu (np. planet w Układzie Słonecznym) potrafimy **przewidzieć** w jakim stanie będzie się znajdował w **przyszłości**.

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

Dopiero dedykowany **pomiar** może rozstrzygnąć gdzie znajduje się cząstka. Wcześniej możemy tylko "zgadywać"...

## Mechanika klasyczna

Jeśli znamy **dokładnie** początkowe **położenia** i **prędkości** wszystkich elementów układu (np. **planet w Układzie Słonecznym**) potrafimy **przewidzieć** w jakim stanie będzie się znajdował w **przyszłości**.

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

Dopiero dedykowany **pomiar** może rozstrzygnąć gdzie znajduje się cząstka. **Wcześniej możemy tylko "zgadywać"...**

Nie możemy **dowolnie dokładnie** poznać stanu cząstki, np. jednocześnie zmierzyć położenie i pęd - **zasada nieoznaczoności**.

## 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



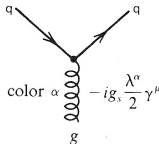
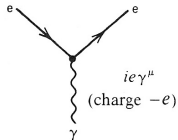
$$\frac{i}{\not{p} - m}$$



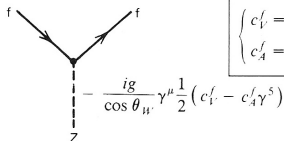
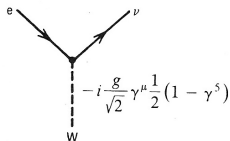
$$\frac{-ig_{\mu\nu}}{p^2}$$



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



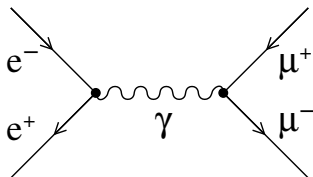
$$\left\{ \begin{aligned} \alpha_s &= \frac{g_s^2}{4\pi} \\ &= \frac{12\pi}{(33 - 2n_f) \log(Q^2/\Lambda^2)} \end{aligned} \right.$$



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

## Przykład oszacowanie zależności od energii zderzenia

Proces



Do amplitudy procesu wliczamy:

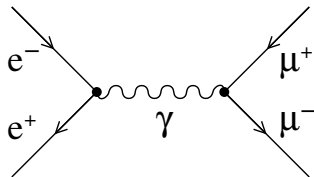
- dwa wierzchołki: nie zależą od energii
- sprzężenie fotonu proporcjonalne do ładunku fermionu  $q_f$
- propagator fotonu:  $\sim 1/E^2$
- zewnętrzne fermiony:  $\sim \sqrt{E}$

Ostatecznie okazuje się, że amplituda nie zależy od energii:

$$\mathcal{M}_{e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-} \sim \frac{1}{E^2} \left(\sqrt{E}\right)^4 q_e q_\mu = q_e q_\mu$$

Ostatecznie prawdopodobieństwo reakcji (przekrój czynny) maleje jak  $\sim 1/E^2$  bo dochodzi czynnik kinematyczny...

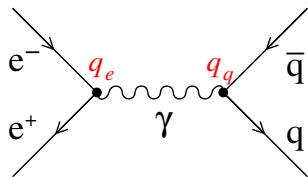
## Przykład



W wyniku anihilacji elektron-pozyton mogą powstawać miony

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

## Przykład

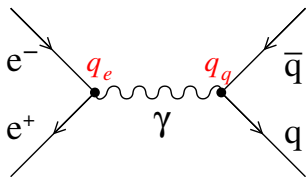


W wyniku anihilacji elektron-pozyton mogą też powstawać kwarki

$$e^+ e^- \rightarrow q \bar{q}$$

Czego powstanie więcej, mionów czy kwarków?

## Przykład



W wyniku anihilacji elektron-pozyton mogą też powstawać kwarki

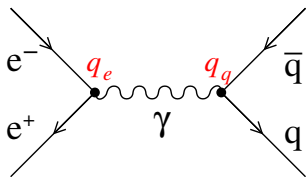
$$e^+ e^- \rightarrow q \bar{q}$$

Czego powstanie więcej, mionów czy kwarków?

Dla produkcji kwarków, **zmienia się ładunek** w jednym z wierzchołków:

$$R = \frac{\sigma(e^+ e^- \rightarrow q \bar{q})}{\sigma(e^+ e^- \rightarrow \mu^+ \mu^-)} = \frac{|\mathcal{M}_{e^+ e^- \rightarrow q \bar{q}}|^2}{|\mathcal{M}_{e^+ e^- \rightarrow \mu^+ \mu^-}|^2} = \frac{q_e^2 q_q^2}{q_e^2 q_\mu^2} = \frac{q_q^2}{q_\mu^2}$$

## Przykład



W wyniku anihilacji elektron-pozyton mogą też powstawać kwarki

$$e^+ e^- \rightarrow q \bar{q}$$

Czego powstanie więcej, mionów czy kwarków?

Dla produkcji kwarków, **zmienia się ładunek** w jednym z wierzchołków:

$$R = \frac{\sigma(e^+ e^- \rightarrow q \bar{q})}{\sigma(e^+ e^- \rightarrow \mu^+ \mu^-)} = \frac{|\mathcal{M}_{e^+ e^- \rightarrow q \bar{q}}|^2}{|\mathcal{M}_{e^+ e^- \rightarrow \mu^+ \mu^-}|^2} = \frac{q_e^2 q_q^2}{q_e^2 q_\mu^2} = \frac{q_q^2}{q_\mu^2}$$

czyli pojedynczy kwark produkowany jest rzadziej niż mion ( $q_q = \frac{2}{3}, -\frac{1}{3}$ )...



## Przykład

W doświadczeniu nie rozróżniamy (na ogół) zapachów kwarków.

Tak więc mierzona wartość  $R$  powinna wynosić ( $q_{\mu}^2 = 1$ )

$$R = \sum_q q_q^2 = \frac{2}{3} (u, d, s) \text{ lub } \frac{10}{9} (u, d, s, c) \text{ lub } \frac{11}{9} (u, d, s, c, b)$$

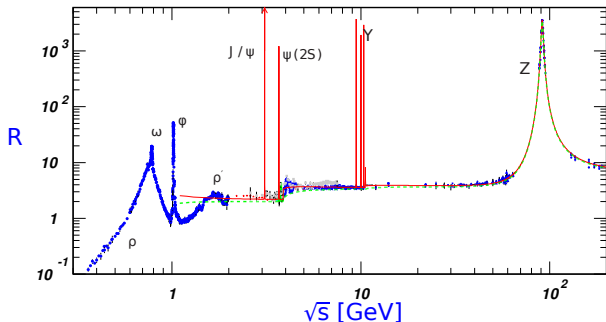
zależnie od energii.

## Przykład

W doświadczeniu nie rozróżniamy (na ogół) zapachów kwarków.  
 Tak więc mierzona wartość  $R$  powinna wynosić ( $q_\mu^2 = 1$ )

$$R = \sum_q q_q^2 = \frac{2}{3} (u, d, s) \text{ lub } \frac{10}{9} (u, d, s, c) \text{ lub } \frac{11}{9} (u, d, s, c, b)$$

zależnie od energii. Mierzona wartość  $R$  w funkcji energii zderzenia  $e^+e^-$ :



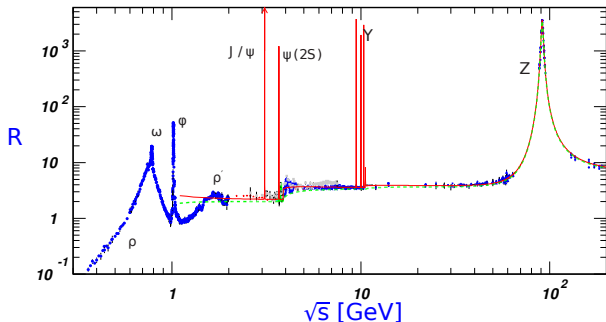
Mierzona wartość  
 $3 \times$  za duża ?!

## Przykład

W doświadczeniu nie rozróżniamy (na ogół) zapachów kwarków.  
 Tak więc mierzona wartość  $R$  powinna wynosić ( $q_{\mu}^2 = 1$ )

$$R = N_c \sum_q q_q^2 = 2 (u, d, s) \text{ lub } \frac{10}{3} (u, d, s, c) \text{ lub } \frac{11}{3} (u, d, s, c, b)$$

zależnie od energii. Mierzona wartość  $R$  w funkcji energii zderzenia  $e^+e^-$ :



Mierzona wartość  
 $3 \times$  za duża ?!

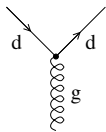
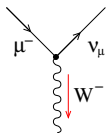
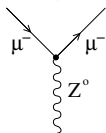
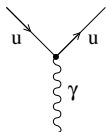
Kwarków jest  $3 \times$  więcej

Trzeba liczyć każdy kolor osobno !!!

$$N_c \equiv 3$$

## Stałe sprzężenia

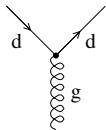
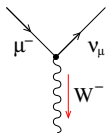
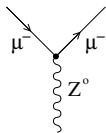
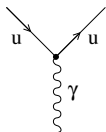
Dla oddziaływań fotonu, każdy wierzchołek daje czynnik  $q_f$  do amplitudy. Wkład do prawdopodobieństwa procesu proporcjonalny jest do



$$\alpha_{em} \equiv \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c} \approx \frac{1}{137}$$

⇒ tzw. stała struktury subtelnej

## Stałe sprzężenia



Dla oddziaływań fotonu, każdy wierzchołek daje czynnik  $q_f$  do amplitudy. Wkład do prawdopodobieństwa procesu proporcjonalny jest do

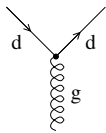
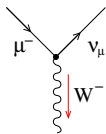
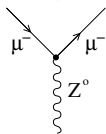
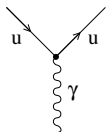
$$\alpha_{em} \equiv \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c} \approx \frac{1}{137}$$

⇒ tzw. stała struktury subtelnej

Dla oddziaływań słabych:

$$\alpha_w = \frac{g_w^2}{4\pi} \approx \frac{1}{32}$$

## Stałe sprzężenia



Dla oddziaływań fotonu, każdy wierzchołek daje czynnik  $q_f$  do amplitudy. Wkład do prawdopodobieństwa procesu proporcjonalny jest do

$$\alpha_{em} \equiv \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c} \approx \frac{1}{137}$$

⇒ tzw. stała struktury subtelnej

Dla oddziaływań słabych:

$$\alpha_w = \frac{g_w^2}{4\pi} \approx \frac{1}{32}$$

Dla oddziaływań silnych:

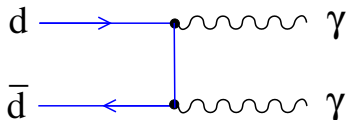
$$\alpha_s = \frac{g_s^2}{4\pi} \sim 1$$

przy skalach oddziaływania rzędu 1 GeV

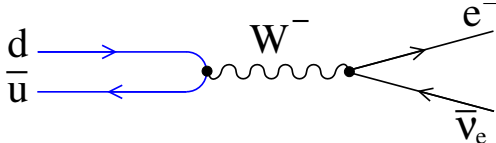
## Propagatory

Stała sprzężenia dla oddziaływań słabych ( $\alpha_w \approx \frac{1}{32}$ ) jest większa niż dla elektromagnetycznych ( $\alpha_{em} \approx \frac{1}{137}$ ). Dlaczego więc są słabe?

Rozpad  $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$  (EM)



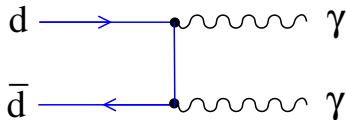
Rozpad  $\pi^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e$  (oddz. słabe)



## Propagatory

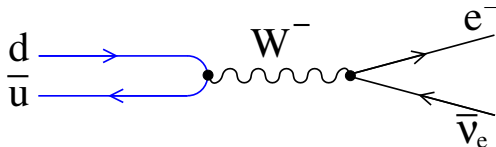
Stała sprzężenia dla oddziaływań słabych ( $\alpha_w \approx \frac{1}{32}$ ) jest większa niż dla elektromagnetycznych ( $\alpha_{em} \approx \frac{1}{137}$ ). Dlaczego więc są słabe?

Rozpad  $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$  (EM)



Dwa wierzchołki:  $\alpha_{em}^2$

Rozpad  $\pi^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e$  (oddz. słabe)



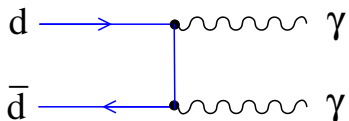
$\alpha_w^2$



## Propagatory

Stała sprzężenia dla oddziaływań słabych ( $\alpha_w \approx \frac{1}{32}$ ) jest większa niż dla elektromagnetycznych ( $\alpha_{em} \approx \frac{1}{137}$ ). Dlaczego więc są słabe?

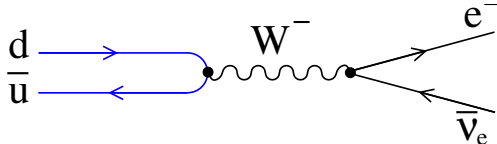
Rozpad  $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$  (EM)



Dwa wierzchołki:  $\alpha_{em}^2$

Propagator:  $\frac{1}{m_q^2}$

Rozpad  $\pi^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e$  (oddz. słabe)



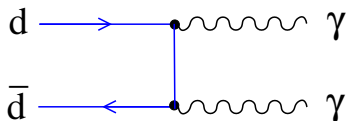
$\alpha_w^2$

$\frac{1}{M_W^4}$

## Propagatory

Stała sprzężenia dla oddziaływań słabych ( $\alpha_w \approx \frac{1}{32}$ ) jest większa niż dla elektromagnetycznych ( $\alpha_{em} \approx \frac{1}{137}$ ). Dlaczego więc są słabe?

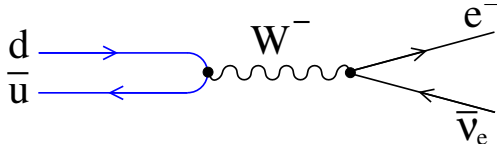
Rozpad  $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$  (EM)



Dwa wierzchołki:  $\alpha_{em}^2$

Propagator:  $\frac{1}{m_q^2}$

Rozpad  $\pi^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e$  (oddz. słabe)



$\alpha_w^2$

$\frac{1}{M_W^4}$

$$\Rightarrow \tau = 8.4 \cdot 10^{-17} \text{ s}$$

$$\tau = 2.6 \cdot 10^{-8} \text{ s}$$

Oddziaływania słabe są "słabe" (duże  $\tau$ ) dlatego, że masa  $W$  jest duża !...