

# Wszechświat Cząstek Elementarnych dla Humanistów

## Oddziaływania silne

Aleksander Filip Żarnecki

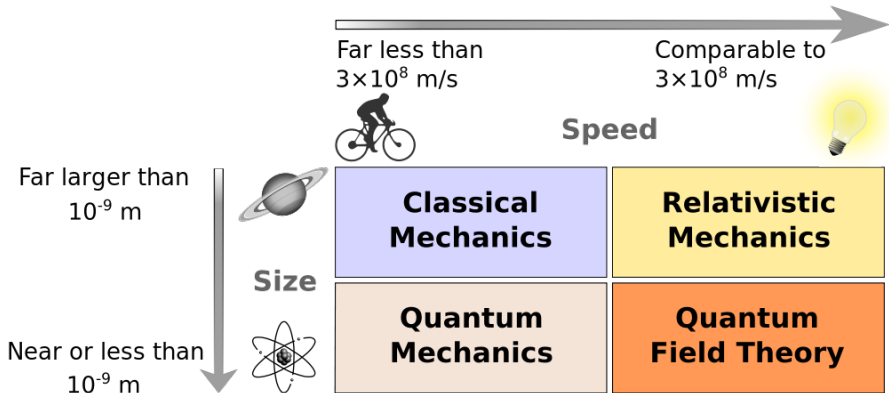
Wykład ogólnouniwersytecki



Wydział Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego

31 października 2017

## Granice stosowalności praw fizyki klasycznej

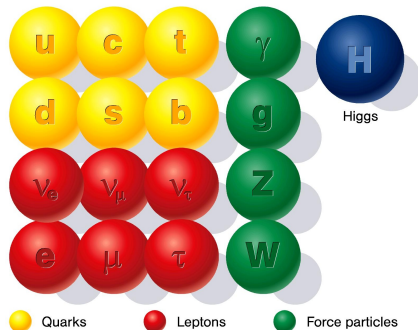


Współczesna fizyka cząstek opisywana jest w języku **Kwantowych Teorii Pola** łączących szczególną teorię względności z mechaniką kwantową. Jest to świat bardzo różny od tego do którego jesteśmy przyzwyczajeni...

## Budowa materii

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

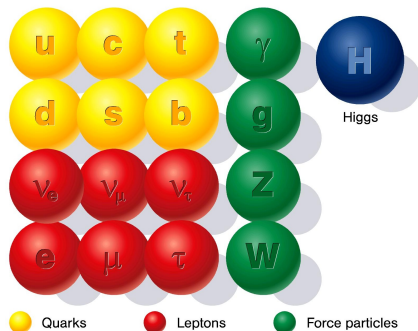
- cząstki materii  
kwarki i leptony
- nośniki oddziaływań  
 $\gamma$ ,  $g$ ,  $W^\pm$  i  $Z^0$
- bozon Higgsa  
“Nadaje masy”  
wszystkim cząstkom



## Budowa materii

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  
    “Nadaje masy”  
    wszystkim cząstkom



Pytanie na dzisiejszy wykład:

**Skąd wiemy, że materia zbudowana jest z kwarków?!..**

- 1 Własności cząstek
- 2 Hipoteza kwarków
- 3 Model partonowy
- 4 Chromodynamika kwantowa

- 1 Własności cząstek
- 2 Hipoteza kwarków
- 3 Model partonowy
- 4 Chromodynamika kwantowa

Naturalną jednostką energii w fizyce cząstek jest **1 elektronowolt (1 eV)**

$$1 e = 1.6 \cdot 10^{-19} C \Rightarrow 1 eV = 1.6 \cdot 10^{-19} J$$

Jednostki pochodne:

$$1 \text{ keV} = 10^3 \text{ eV}, \quad 1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}, \quad 1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}.$$

Naturalną jednostką energii w fizyce cząstek jest **1 elektronowolt (1 eV)**

$$1 e = 1.6 \cdot 10^{-19} C \Rightarrow 1 eV = 1.6 \cdot 10^{-19} J$$

Jednostki pochodne:

$$1 \text{ keV} = 10^3 \text{ eV}, \quad 1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}, \quad 1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}.$$

Jednostkę energii możemy też przyjąć za jednostkę masy (modulo  $c^2$ )

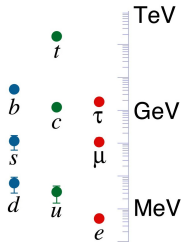
Zgodnie ze wzorem Einsteina:  $E = mc^2 \Rightarrow m = E/c^2$

$$1 \text{ eV}/c^2 = 1.8 \cdot 10^{-36} \text{ kg}$$

masa protonu:	$1.7 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$	$\Rightarrow 938 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1 \text{ GeV}/c^2$
masa elektronu:	$9.1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$	$\Rightarrow 511 \text{ keV}/c^2$	$\approx 0.5 \text{ MeV}/c^2$

Często “zapominamy” o czynniku  $c^2$  i mówimy, że masa protonu to 1GeV...





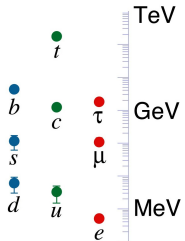
## Masy leptonów i kwarków

Elektron jest najlżejszą znaną cząstką naładowaną

$$m_e \approx 0.5 \text{ MeV}/c^2$$

Wszystkie inne fermiony są znacznie (!) cięższe.

Leptony	mion	$\mu$	106 MeV	
	taon	$\tau$	1.78 GeV	cięższy od protonu



## Masy leptonów i kwarków

Elektron jest najlżejszą znaną cząstką naładowaną

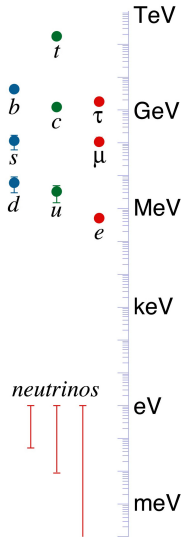
$$m_e \approx 0.5 \text{ MeV}/c^2$$

Wszystkie inne fermiony są znacznie (!) cięższe.

<b>Leptony</b>	mion	$\mu$	106 MeV	
	taon	$\tau$	1.78 GeV	cięższy od protonu
<b>Kwarki</b>	up	$u$	3 MeV	
	down	$d$	7 MeV	
	strange	$s$	150 MeV	
	charm	$c$	1.25 GeV	
	bottom	$b$	4.5 GeV	
	top	$t$	172 GeV	najcięższa cząstka

Masy kwarków są wyznaczone pośrednio, zależą od przyjętego modelu

# Masy cząstek



## Masy leptonów i kwarków

Elektron jest najlżejszą znaną cząstką naładowaną

$$m_e \approx 0.5 \text{ MeV}/c^2$$

Wszystkie inne fermiony są znacznie (!) cięższe.

<b>Leptony</b>	mion	$\mu$	106 MeV	
	taon	$\tau$	1.78 GeV	cięższy od protonu
<b>Kwarki</b>	up	$u$	3 MeV	
	down	$d$	7 MeV	
	strange	$s$	150 MeV	
	charm	$c$	1.25 GeV	
	bottom	$b$	4.5 GeV	
	top	$t$	172 GeV	najcięższa cząstka

Masy kwarków są wyznaczone pośrednio, zależą od przyjętego modelu

Z kolei masy neutrin są bardzo małe, zanedbywalne..

**Nie wiemy co powoduje tak duże rozpiętości mas cząstek!**

Jest to jedno z ważniejszych pytań, na które wciąż szukamy odpowiedzi...

W zderzeniach cząstek (np. protonów promieniowania kosmicznego z jądrami w atmosferze, albo elektronów i pozytonów w kolajderze) energia zderzenia może zamienić się na energię spoczynkową nowych cząstek.  
Zawsze jednak w zgodzie z zasadą zachowania energii i pędu!

W zderzeniach cząstek (np. protonów promieniowania kosmicznego z jądrami w atmosferze, albo elektronów i pozytonów w kolajderze) energia zderzenia może zamienić się na energię spoczynkową nowych cząstek.

Zawsze jednak w zgodzie z zasadą zachowania energii i pędu!

W zderzeniach może nastąpić produkcja dwóch, trzech,.. N cząstek (praktycznie dowolnie dużej liczby).

Energia zderzenia może się też zamienić całkowicie na energię spoczynkową jednej nowej cząstki - to tzw. produkcja rezonansowa.

W zderzeniach cząstek (np. protonów promieniowania kosmicznego z jądrami w atmosferze, albo elektronów i pozytonów w kolajderze) energia zderzenia może zamienić się na energię spoczynkową nowych cząstek. **Zawsze jednak w zgodzie z zasadą zachowania energii i pędu!**

W zderzeniach może nastąpić produkcja dwóch, trzech,.. N cząstek (praktycznie dowolnie dużej liczby).

Energia zderzenia może się też zamienić całkowicie na energię spoczynkową **jednej nowej cząstki** - to tzw. **produkcja rezonansowa**.

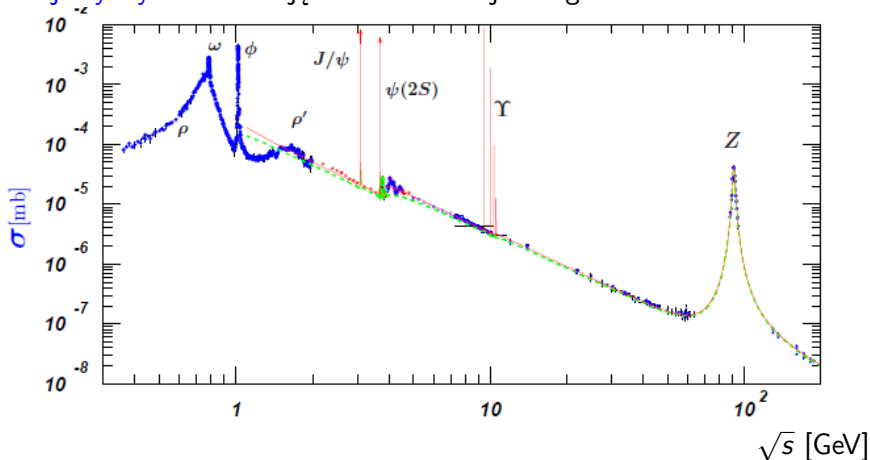
W przypadku produkcji rezonansowej musimy tak dobrać energie zderzających się wiązek (najczęściej elektronów i pozytonów), żeby spełniona była zależność:

$$\text{tzw. energia dostępna} \quad \sqrt{s} = \sqrt{4E_1 E_2} = mc^2$$

⇒ tak odkryto wiele cząstek

## Produkcja rezonansowa

Przekrój czynny na anihilację  $e^+e^-$  w funkcji energii zderzenia



Przekrój czynny: wielkość opisująca **prawdopodobieństwo** danej reakcji  
 Klasycznie odpowiada polu powierzchni poprzecznej obszaru oddziaływania

Rozpad cząstki to swobodne przejście do innego stanu, złożonego z wielu cząstek. Przykładowo:

$$K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^+ \pi^-$$

$$\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$$

$$\mu^- \rightarrow e^- \nu_\mu \bar{\nu}_\mu$$

Ważne: to nie jest rozpad cząstki złożonej na jej składniki!

Kaon ( $K^+$ ) nie składa się z trzech pionów...



Rozpad cząstki to swobodne przejście do innego stanu, złożonego z wielu cząstek. Przykładowo:



Ważne: to nie jest rozpad cząstki złożonej na jej składniki!

Kaon ( $K^+$ ) nie składa się z trzech pionów...

Tak jak w przypadku produkcji cząstek, **zachowana musi być energia i pęd**. Ponieważ energia produktów rozpadu jest conajmniej równa ich energii spoczynkowej to musi być spełniona zależność:

$$m_{początkowa} > \sum_{i \in \text{koncowe}} m_i$$

Im większa masa cząstki tym więcej (na ogół) możliwych kanałów rozpadu  
Nie można z góry określić, który kanał wybierze rozpadająca się cząstka!

Przykład:

$$K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0$$

$$K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 \pi^0$$

$$K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^+ \pi^-$$

Przykład:

$$K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0$$

$$K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 \pi^0$$

$$K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^+ \pi^-$$

$$K^+ \rightarrow e^+ \nu_e$$

$$K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$$

Przykład:

$$K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0$$

$$K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 \pi^0$$

$$K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^+ \pi^-$$

$$K^+ \rightarrow e^+ \nu_e$$

$$K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$$

$$K^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu_e$$

$$K^+ \rightarrow \pi^0 \mu^+ \nu_\mu$$

Przykład:

$$K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0$$

$$K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 \pi^0$$

$$K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^+ \pi^-$$

$$K^+ \rightarrow e^+ \nu_e$$

$$K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$$

$$K^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu_e$$

$$K^+ \rightarrow \pi^0 \mu^+ \nu_\mu$$

$$K^+ \rightarrow \pi^0 \pi^0 e^+ \nu_e$$

$$K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^- e^+ \nu_e$$

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

Przykład:

BR (prawdopodobieństwo rozpadu)

$$K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0$$

$$K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 \pi^0$$

$$K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^+ \pi^-$$

$$K^+ \rightarrow e^+ \nu_e$$

63.4 %

$$K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$$

$$K^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu_e$$

$$K^+ \rightarrow \pi^0 \mu^+ \nu_\mu$$

$$K^+ \rightarrow \pi^0 \pi^0 e^+ \nu_e$$

$$K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^- e^+ \nu_e$$

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

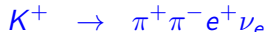
Przykład:

BR

21.1 %



63.4 %



Przykład:

BR

$$21.1 \% \quad K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0$$

$$1.7 \% \quad K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 \pi^0$$

$$5.6 \% \quad K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^+ \pi^-$$

$$K^+ \rightarrow e^+ \nu_e$$

$$63.4 \% \quad K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$$

$$4.9 \% \quad K^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu_e$$

$$3.3 \% \quad K^+ \rightarrow \pi^0 \mu^+ \nu_\mu$$

$$K^+ \rightarrow \pi^0 \pi^0 e^+ \nu_e$$

$$K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^- e^+ \nu_e$$

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



Przykład:

BR

21.1 %	$K^+$	$\rightarrow$	$\pi^+\pi^0$
1.7 %	$K^+$	$\rightarrow$	$\pi^+\pi^0\pi^0$
5.6 %	$K^+$	$\rightarrow$	$\pi^+\pi^+\pi^-$
0.0015 %	$K^+$	$\rightarrow$	$e^+\nu_e$
63.4 %	$K^+$	$\rightarrow$	$\mu^+\nu_\mu$
4.9 %	$K^+$	$\rightarrow$	$\pi^0e^+\nu_e$
3.3 %	$K^+$	$\rightarrow$	$\pi^0\mu^+\nu_\mu$
0.0021 %	$K^+$	$\rightarrow$	$\pi^0\pi^0e^+\nu_e$
0.0041 %	$K^+$	$\rightarrow$	$\pi^+\pi^-e^+\nu_e$
nie obserwowany	$K^+$	$\rightarrow$	$\pi^+\mu^+e^-$

Dlaczego jedne rozpady zachodzą częściej niż inne?

Dlaczego niektóre (dostępne energetycznie) rozpady w ogóle nie zachodzą?

Podobnie jak nie można przewidzieć w jaki sposób cząstka się rozpadnie (jeśli ma kilka kanałów rozpadu do wyboru), nie można też przewidzieć kiedy to nastąpi.

Potrafimy tylko zmierzyć ile średnio trzeba na ten rozpad czekać

⇒ średni czas życia cząstki ( $\tau$ ).

Podobnie jak nie można przewidzieć w jaki sposób cząstka się rozpadnie (jeśli ma kilka kanałów rozpadu do wyboru), nie można też przewidzieć kiedy to nastąpi.

Potrafimy tylko zmierzyć ile średnio trzeba na ten rozpad czekać  
⇒ średni czas życia cząstki ( $\tau$ ).

Prawdopodobieństwo, że po czasie  $t$  cząstka jeszcze się nie rozpadnie:

$$p(t) = e^{-t/\tau}$$

⇒ szansa przeżycia czasu  $\tau$  to ok. 37%,  $2\tau$  - 14%,  $3\tau$  - 5% ...

Podobnie jak nie można przewidzieć w jaki sposób cząstka się rozpadnie (jeśli ma kilka kanałów rozpadu do wyboru), nie można też przewidzieć kiedy to nastąpi.

Potrafimy tylko zmierzyć ile średnio trzeba na ten rozpad czekać  
⇒ średni czas życia cząstki ( $\tau$ ).

Prawdopodobieństwo, że po czasie  $t$  cząstka jeszcze się nie rozpadnie:

$$p(t) = e^{-t/\tau}$$

⇒ szansa przeżycia czasu  $\tau$  to ok. 37%,  $2\tau$  - 14%,  $3\tau$  - 5% ...

Oczekiwany czas życia cząstki nie zależy od jej historii !!!

Niezależnie czy cząstka przeżyła już  $2\tau$  (od momentu produkcji) czy  $10\tau$ , wciąż ma szansę 37% na przeżycie kolejnego  $\tau$ !

Podobnie jak nie można przewidzieć w jaki sposób cząstka się rozpadnie (jeśli ma kilka kanałów rozpadu do wyboru), nie można też przewidzieć kiedy to nastąpi.

Potrąfimy tylko zmierzyć ile średnio trzeba na ten rozpad czekać  
⇒ średni czas życia cząstki ( $\tau$ ).

Prawdopodobieństwo, że po czasie  $t$  cząstka jeszcze się nie rozpadnie:

$$p(t) = e^{-t/\tau}$$

⇒ szansa przeżycia czasu  $\tau$  to ok. 37%,  $2\tau$  - 14%,  $3\tau$  - 5% ...

Oczekiwany czas życia cząstki nie zależy od jej historii !!!

Niezależnie czy cząstka przeżyła już  $2\tau$  (od momentu produkcji) czy  $10\tau$ , wciąż ma szansę 37% na przeżycie kolejnego  $\tau$ !

Czas po którym rozpadnie się połowa cząstek

$$t_{1/2} \approx 0.69 \tau$$

tzw. czas połowicznego zaniku (często używany w fizyce jądrowej)

Jedynie nieliczne cząstki uważamy za stabilne (nie rozpadające się), są to proton (antyproton), elektron (pozyton) i neutrino.

Wszystkie pozostałe cząstki rozpadają się, ale czasy życia są bardzo różne. Przykładowo:

		$\tau$	$c\tau$
mion	$\mu$	$2.2 \cdot 10^{-6} \text{ s}$	660 m
kaon	$K^{\pm}$	$1.2 \cdot 10^{-8} \text{ s}$	3.7 m
lambda	$\Lambda$	$2.6 \cdot 10^{-10} \text{ s}$	7.9 cm
mezon	$B^{\pm}$	$1.7 \cdot 10^{-12} \text{ s}$	0.5 mm
taon	$\tau$	$2.9 \cdot 10^{-13} \text{ s}$	87 $\mu\text{m}$
pion	$\pi^0$	$8 \cdot 10^{-17} \text{ s}$	25 nm
mezon	$\rho^0$	$5 \cdot 10^{-24} \text{ s}$	1.3 fm

$c\tau$  - czas życia przeliczony na odległość jaką może pokonać cząstka  
**Wartość szacunkowa!** W konkretnym przypadku trzeba to przemnożyć przez czynnik uwzględniający prędkość cząstki i **dylatację czasu** (!).

Obserwacja rozpadów cząstek była (i wciąż jest) podstawowym źródłem informacji o ich własnościach.

Wiele obserwacji było zagadkowych:

- dlaczego jedne rozpady zachodzą częściej niż inne?
- dlaczego niektóre (dostępne energetycznie) rozpady nie zachodzą?
- dlaczego jedne cząstki rozpadają się szybciej, a inne wolniej?

Obserwacja rozpadów cząstek była (i wciąż jest) podstawowym źródłem informacji o ich własnościach.

Wiele obserwacji było zagadkowych:

- dlaczego jedne rozpady zachodzą częściej niż inne?
- dlaczego niektóre (dostępne energetycznie) rozpady nie zachodzą?
- dlaczego jedne cząstki rozpadają się szybciej, a inne wolniej?

Głównym czynnikiem, który ma na to wpływ jest **masa cząstki!**

**Najczęściej** powinny zachodzić rozpady, dla których różnica między masą cząstki początkowej i masą produktów rozpadu jest **największa**.

Im większa różnica mas tym **szybciej** też powinien zachodzić dany rozpad.



Obserwacja rozpadów cząstek była (i wciąż jest) podstawowym źródłem informacji o ich własnościach.

Wiele obserwacji było zagadkowych:

- dlaczego jedne rozpady zachodzą częściej niż inne?
- dlaczego niektóre (dostępne energetycznie) rozpady nie zachodzą?
- dlaczego jedne cząstki rozpadają się szybciej, a inne wolniej?

Głównym czynnikiem, który ma na to wpływ jest **masa cząstki!**

**Najczęściej** powinny zachodzić rozpady, dla których różnica między masą cząstki początkowej i masą produktów rozpadu jest **największa**.

Im większa różnica mas tym **szybciej** też powinien zachodzić dany rozpad.

**Ale nie zawsze to działa!** Przy porównywalnych masach: (patrz wykład 2)

$$\Lambda \rightarrow p + \pi^- \quad \tau \approx 3 \cdot 10^{-10} \text{ s}$$

$$\Delta \rightarrow p + \pi^- \quad \tau \sim 10^{-23} \text{ s}$$

Aby wyjaśnić obserwowane kanały produkcji i rozpadów cząstek, a także mierzone czasy życia, trzeba było założyć, że oprócz **zasad zachowania energii i pędu** obowiązują też inne zasady zachowania związane z **własnościami samych cząstek!**

Aby wyjaśnić obserwowane kanały produkcji i rozpadów cząstek, a także mierzone czasy życia, trzeba było założyć, że oprócz **zasad zachowania energii i pędu** obowiązują też inne zasady zachowania związane z **własnościami samych cząstek!**

## Zachowanie ładunku elektrycznego

Ściśle przestrzegane w przyrodzie.

Dodatkowo ładunek cząstek elementarnych jest skwantowany - występuje tylko jako wielokrotność ładunku elektronu

Aby wyjaśnić obserwowane kanały produkcji i rozpadów cząstek, a także mierzone czasy życia, trzeba było założyć, że oprócz **zasad zachowania energii i pędu** obowiązują też inne zasady zachowania związane z **własnościami samych cząstek!**

## Zachowanie ładunku elektrycznego

Ściśle przestrzegane w przyrodzie.

Dodatkowo ładunek cząstek elementarnych jest skwantowany - występuje tylko jako wielokrotność ładunku elektronu

## Zachowanie liczby barionowej

bariony: cząstki złożone z 3 kwarków

Zapostulowane w 1938 roku, że wyjaśnić stabilność protonu.

Bariony (p, n,  $\Lambda$ ...):  $B=+1$ , antybariony:  $B=-1$ , pozostałe:  $B=0$ .

Rozpad protonu nie jest zabroniony przez zasadę zachowania ładunku ani zasadę zachowania energii, np.



Ale rozpad taki nie zachowuje liczby barionowej ( $1 \rightarrow 0$ )! **ZABRONIONY!**

## Zachowanie liczby leptonowej

W wielu procesach elektronowi towarzyszy neutrino (lub antyneutrino), np.



zaś nie występują procesy typu



## Zachowanie liczby leptonowej

W wielu procesach elektronowi towarzyszy neutrino (lub antyneutrino), np.



zaś nie występują procesy typu



Można to wytłumaczyć wprowadzając **elektronową liczbę leptonową**  $L_e$   
 $L_e(e^-) = L_e(\nu_e) = +1$ ,  $L_e(e^+) = L_e(\bar{\nu}_e) = -1$ , pozostałe:  $L_e = 0$

## Zachowanie liczby leptonowej

W wielu procesach elektronowi towarzyszy neutrino (lub antyneutrino), np.



zaś nie występują procesy typu



Można to wytłumaczyć wprowadzając **elektronową liczbę leptonową**  $L_e$   
 $L_e(e^-) = L_e(\nu_e) = +1$ ,  $L_e(e^+) = L_e(\bar{\nu}_e) = -1$ , pozostałe:  $L_e = 0$   
 Suma  $L_e$  w stanie początkowym musi być równa sumie  $L_e$  na końcu.

## Zachowanie liczby leptonowej

W wielu procesach elektronowi towarzyszy neutrino (lub antyneutrino), np.



zaś nie występują procesy typu



Można to wytłumaczyć wprowadzając **elektronową liczbę leptonową**  $L_e$   
 $L_e(e^-) = L_e(\nu_e) = +1$ ,  $L_e(e^+) = L_e(\bar{\nu}_e) = -1$ , pozostałe:  $L_e = 0$   
 Suma  $L_e$  w stanie początkowym musi być równa sumie  $L_e$  na końcu.

Analogicznie do  $L_e$  wprowadzamy **liczbę mionową**  $L_\mu$  i **liczbę taonową**  $L_\tau$ .  
 Całkowita liczba leptonowa:  $L = L_e + L_\mu + L_\tau$  ściśle zachowana !!!

Poszczególne liczby  $L_e$ ,  $L_\mu$ ,  $L_\tau$  zachowane prawie zawsze,  
 odstępstwa zaobserwowano dotychczas tylko przy oscylacjach neutrino...



## Dziwność

Wśród cząstek odkrywanych w latach 30 i 40 XX w. wyróżniała się klasa cząstek o **nieoczekiwanie długich czasach życia**. **Było to “dziwne”...**  
Okazało się też, że cząstki te produkowane są zawsze w parach ?!...

## Dziwność

Wśród cząstek odkrywanych w latach 30 i 40 XX w. wyróżniała się klasa cząstek o **nieoczekiwanie długich czasach życia**. **Było to "dziwne"...**  
Okazało się też, że cząstki te produkowane są zawsze w parach ?!...

Dlatego zapostulowano wprowadzenie nowej liczby kwantowej: **dziwności  $S$** .  
Dziwność jest **zachowana w oddziaływaniach silnych i elektromagnetycznych**, dlatego cząstki obdarzone dziwnością mogą być tylko **produkowane w parach (cząstka + antycząstka)**.

## Dziwność

Wśród cząstek odkrywanych w latach 30 i 40 XX w. wyróżniała się klasa cząstek o **nieoczekiwanie długich czasach życia**. **Było to "dziwne"...**  
Okazało się też, że cząstki te produkowane są zawsze w parach ?!...

Dlatego zapostulowano wprowadzenie nowej liczby kwantowej: **dziwności  $S$** .  
Dziwność jest **zachowana w oddziaływaniach silnych i elektromagnetycznych**, dlatego cząstki obdarzone dziwnością mogą być tylko **produkowane w parach (cząstka + antycząstka)**.

**Gdyby dziwność była ściśle zachowana to cząstki dziwne byłyby stabilne!**

Dziwność **nie jest jednak zachowana w oddziaływaniach słabych**

- ⇒ cząstki dziwne rozpadają się w wyniku oddziaływań słabych
- ⇒ to tłumaczy dużo dłuższy czas życia (w porównaniu do rozpadów "zwykłych" cząstek w oddz. silnych i elektromagnetycznych)

## Dziwność

Wśród cząstek odkrywanych w latach 30 i 40 XX w. wyróżniała się klasa cząstek o **nieoczekiwanie długich czasach życia**. **Było to "dziwne"...**  
Okazało się też, że cząstki te produkowane są zawsze w parach ?!...

Dlatego zapostulowano wprowadzenie nowej liczby kwantowej: **dziwności  $S$** .  
Dziwność jest **zachowana w oddziaływaniach silnych i elektromagnetycznych**, dlatego cząstki obdarzone dziwnością mogą być tylko **produkowane w parach (cząstka + antycząstka)**.

**Gdyby dziwność była ściśle zachowana to cząstki dziwne byłyby stabilne!**

Dziwność **nie jest jednak zachowana w oddziaływaniach słabych**

⇒ cząstki dziwne rozpadają się w wyniku oddziaływań słabych  
⇒ to tłumaczy dużo dłuższy czas życia (w porównaniu do rozpadów "zwykłych" cząstek w oddz. silnych i elektromagnetycznych)

**Dziś wiemy już, że dziwność cząstki odpowiada liczbie kwarków  $s$ ...**

Wraz z powstaniem mechaniki kwantowej możliwe było wytłumaczenie obserwowanych widm atomów (powłoki elektronowe w atomie). Ale wciąż nie rozumiano dlaczego w atomach o więcej niż dwóch elektronach, **nie wszystkie elektrony obsadzają stan podstawowy!**

Wraz z powstaniem mechaniki kwantowej możliwe było wytłumaczenie obserwowanych widm atomów (powłoki elektronowe w atomie).

Ale wciąż nie rozumiano dlaczego w atomach o więcej niż dwóch elektronach, **nie wszystkie elektrony obsadzają stan podstawowy!**

Wyjaśnienie tego problemu zaproponował w 1925 roku **Wolfgang Pauli**.

Zapostulował, że **dwa elektrony** w atomie **nie mogą** być w stanie opisanym przez **ten sam zestaw liczb kwantowych**. ⇒ **Zakaz Pauliego**

Wraz z powstaniem mechaniki kwantowej możliwe było wytłumaczenie obserwowanych widm atomów (powłoki elektronowe w atomie).

Ale wciąż nie rozumiano dlaczego w atomach o więcej niż dwóch elektronach, **nie wszystkie elektrony obsadzają stan podstawowy!**

Wyjaśnienie tego problemu zaproponował w 1925 roku **Wolfgang Pauli**.

Zapostulował, że **dwa elektrony** w atomie **nie mogą** być w stanie opisanym przez **ten sam zestaw liczb kwantowych**.  $\Rightarrow$  **Zakaz Pauliego**

Potrzebne jednak było wprowadzenie jeszcze jednej **liczby kwantowej**. Jest nią liczba określająca orientację spinu - **własnego moment pędu** elektronu.

Mechanika kwantowa przewiduje, że dla dowolnie wybranego kierunku  $Z$  rzut spinu elektronu  $s$  może przyjąć tylko dwie wartości:

$$s_z = +\frac{1}{2}\hbar \quad \text{lub} \quad s_z = -\frac{1}{2}\hbar$$

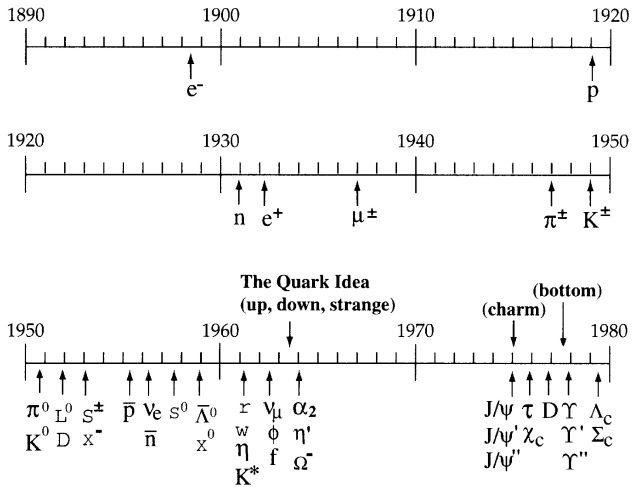
Dlatego mówimy, że elektron ma **“spin połówkowy”** (jest fermionem).  
Okazuje się, że zakaz Pauliego dotyczy wszystkich leptonów i kwarków.

- 1 Własności cząstek
- 2 Hipoteza kwarków**
- 3 Model partonowy
- 4 Chromodynamika kwantowa



# Lawina odkryć

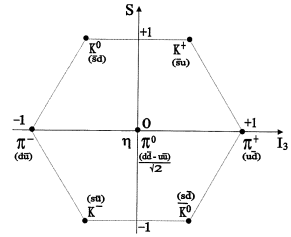
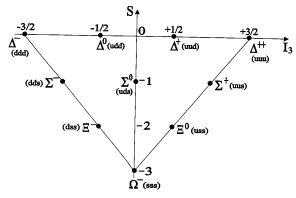
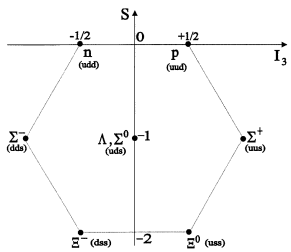
W latach 50 i 60 XX w. lawinowo odkrywano nowe cząstki.  
(m.in. dzięki wynalezieniu komory pęcherzykowej i synchrotronu)



# Lawina odkryć

W latach 50 i 60 XX w. lawinowo odkrywano nowe cząstki.  
(m.in. dzięki wynalezieniu komory pęcherzykowej i synchrotronu)

Dziwność (S) była jednym z kryteriów ich klasyfikacji.  
Drugą zmienną był tzw. izospin ( $I_3$ ) związany z ładunkiem cząstek.



Okazało się, że wszystkie znane cząstki układają się w multiplety.  
Jak to wytłumaczyć?

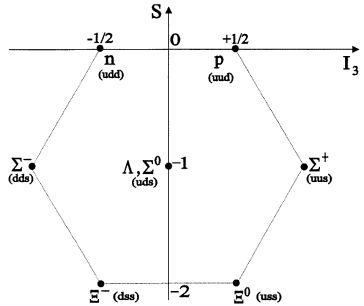
# Hipoteza kwarków

## Model Gell-Mann'a i Zweig'a

W połowie lat 60 obserwowana **symetria** w świecie znanych **cząstek** elementarnych doprowadziła ich do hipotezy istnienia **kwarków**

Trzy kwarki tworzyłyby bariony:

- $p = (uud)$
- $n = (udd)$
- $\Lambda = (uds)$



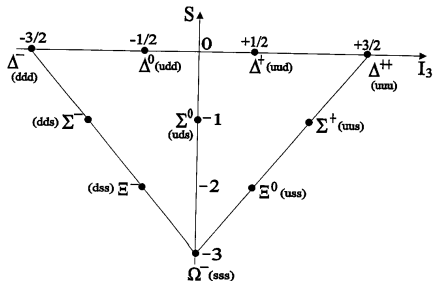
# Hipoteza kwarków

## Model Gell-Mann'a i Zweig'a

W połowie lat 60 obserwowana **symetria** w świecie znanych **cząstek** elementarnych doprowadziła ich do hipotezy istnienia **kwarków**

Trzy kwarki tworzyłyby bariony:

$$\begin{aligned}
 p &= (uud) \\
 n &= (udd) \\
 \Lambda &= (uds) \\
 \Delta^0 &= (udd)
 \end{aligned}$$



# Hipoteza kwarków

## Model Gell-Mann'a i Zweig'a

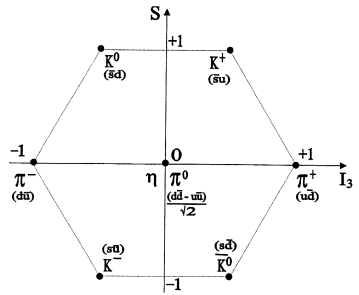
W połowie lat 60 obserwowana **symetria** w świecie znanych **cząstek elementarnych** doprowadziła ich do hipotezy istnienia **kwarków**

Trzy kwarki tworzyłyby bariony:

- $p = (uud)$
- $n = (udd)$
- $\Lambda = (uds)$
- $\Delta^{\circ} = (udd)$

Para kwark-antykwar kwark mezony:

- $K^+ = (u\bar{s})$
- $\pi^+ = (u\bar{d})$



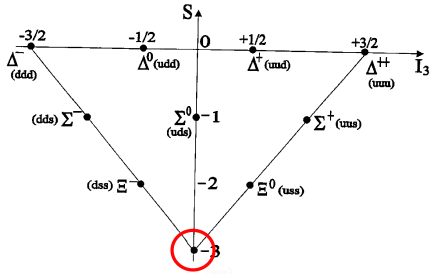
Gell-Mann i Zweig zakładali, że kwarki są bardzo masywne i **silnie związane**

# Hipoteza kwarków

## Model Gell-Mann'a i Zweig'a

Zakładając istnienie tylko trzech kwarków ( $u, d, s$ ) można było wytłumaczyć spektrum wszystkich znanych cząstek.

Ale okazało się, że nie wszystkie miejsca w multipletach były zajęte!

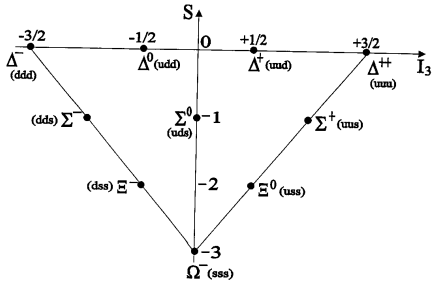


# Hipoteza kwarków

## Model Gell-Mann'a i Zweig'a

Zakładając istnienie tylko **trzech kwarków** ( $u, d, s$ ) można było wytłumaczyć spektrum **wszystkich znanych cząstek**.

Ale okazało się, że nie wszystkie miejsca w multipletach były zajęte!



Gell-Mann i Zweig **przewidzieli** istnienie (**i oszacowali masę**) nie znanej wcześniej cząstki:  $\Omega^- = (s s s)$ .

Jej późniejsze odkrycie było ogromnym sukcesem modelu...

- 1 Własności cząstek
- 2 Hipoteza kwarków
- 3 Model partonowy**
- 4 Chromodynamika kwantowa



# Doświadczenie Rutherforda

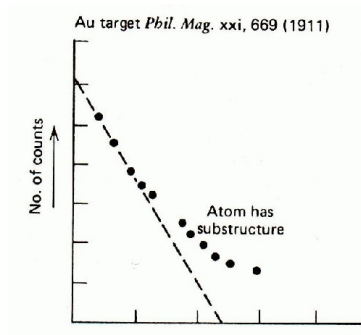
## Istota pomiaru

Rozpraszanie cząstek  $\alpha$  na cienkiej złotej folii



Obserwowano błyski wywołane przez padające cząstki na ekranie scyntylacyjnym - ocena kąta rozproszenia

Obserwowany rozkład kątów:



kąt rozproszenia  $\theta \rightarrow$

odbiegał od przewidywań modelu rozciągniętego rozkładu ładunku w atomie (linia przerywana)

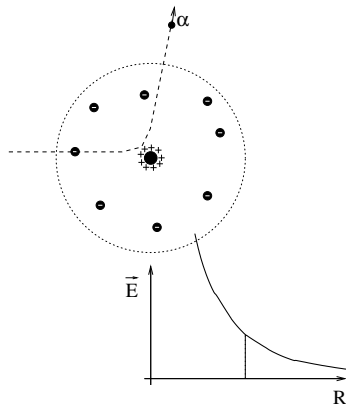
# Doświadczenie Rutherforda

## Istota pomiaru

Rozpraszanie cząstek  $\alpha$  na cienkiej złotej folii



Obserwowano błyski wywoływane przez padające cząstki na ekranie scyntylacyjnym - ocena kąta rozproszenia



Cząstka  $\alpha$  zawsze czuje cały ładunek dodatni  $\Rightarrow$  większe kąty rozproszenia

O rozpraszaniu elastycznym mówimy wtedy, gdy w stanie końcowym obserwujemy te same cząstki co w stanie początkowym: cząstkę wiązki (“pocisk”) i cząstkę z którą nastąpiło oddziaływanie (“tarczę”). Np.



# Rozpraszanie elastyczne

O rozpraszaniu elastycznym mówimy wtedy, gdy w stanie końcowym obserwujemy te same cząstki co w stanie początkowym: cząstkę wiązki (“pocisk”) i cząstkę z którą nastąpiło oddziaływanie (“tarczę”). Np.



## Kinematyka

Między cząstkami może nastąpić mały lub duży **przekaz energii i pędu**. Najczęściej opisujemy to wprowadzając zmienną

$$Q^2 = (\Delta\vec{p})^2 - (\Delta E)^2$$

**Małe**  $Q^2$  oznacza “miękkie” oddziaływanie, **duże**  $Q^2$  - “twarde”.

Przekaz czteropędu  $Q^2$  można wyznaczyć mierząc energię  $E'$  i kąt rozproszenia  $\theta$  pocisku:

$$Q^2 = 2 E E' (1 - \cos\theta)$$

gdzie:  $E$  - energia początkowa pocisku. Masa pocisku została zaniedbana.

# Rozpraszanie elastyczne

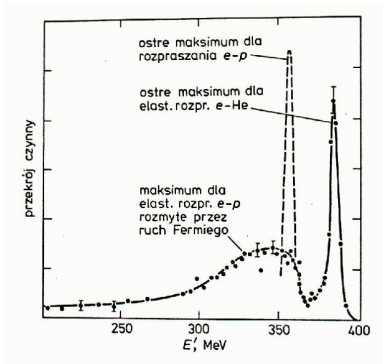
## Rozpraszanie $e$ $He$

Jeśli oddziaływanie jest elastyczne to energia rozproszonego pocisku jest jednoznacznie określona przez kąt rozproszenia:

$$E' = \frac{E}{1 + \frac{E}{M}(1 - \cos \theta)}$$

$$\Rightarrow M = \frac{E E'(1 - \cos \theta)}{E - E'}$$

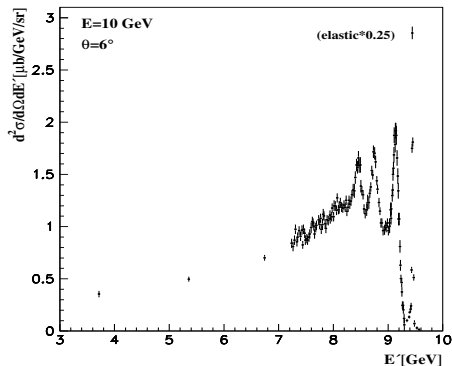
Rozkład energii elektronów o energii 400 MeV, rozproszonych na jądrach  $He$  pod kątem  $45^\circ$ :



Oprócz elastycznego rozpraszania  $e-He$  ( $M = M_{He}$ ) widoczne jest rozpraszanie  $e-p$  ( $M = m_p$ )  $\Rightarrow$  widoczna podstruktura jądra

## Rozpraszanie $e p$

Bardzo podobną strukturę widma energii obserwujemy w rozpraszaniu **na protonach**:



Oczekiwana dla rozpraszania elastycznego:  $E' = 9.45$  GeV

Przypadki z dużo niższymi wartościami energii  $E'$  wskazują na rozpraszanie na **podstrukturze** protonu (!)

$\Rightarrow$  rozpraszanie nieelastyczne !  
(proton ulega rozbiciu)

Maksima w obszarze 8–9 GeV odpowiadają produkcji stanów wzbudzonych protonu (rezonansów barionowych) o masach pomiędzy 1 i 2 GeV.

# Model partonowy

## Rozpraszanie $e p$

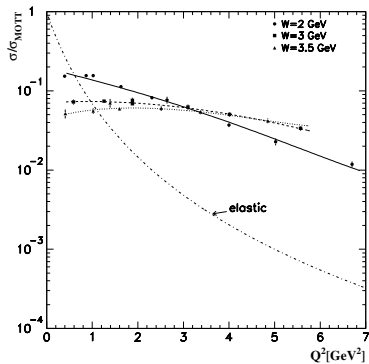
Stosunek przekroju czynnego na rozpraszanie **nieelastyczne** do przekroju czynnego na rozpraszanie **elastyczne** na ładunku punktowym ( $\sigma_{Mott}$ )  $\Rightarrow$

Ta sama zależność od  $Q^2$  !!!

Model zaproponowany przez Feynman'a w 1969 roku:

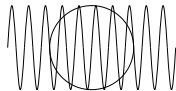
**elastyczne** rozpraszanie na punktowych **partonach** w protonie

Według Feynmana partony powinny być **lekkie** i **quasi-swobodne** (ich oddziaływania są słabe w porównaniu z rozproszeniem)

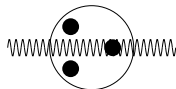


Dlaczego dopiero doświadczenia w SLAC pozwoliły nam dostrzec partony?  
Ze **wzrostem** przekazu czteropędu  $Q^2$  **maleje długość fali** wymianianego w oddziaływaniu fotonu:

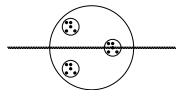
“miękki” foton, małe  $Q^2$ : rozpraszanie na jądrze



pośrednie  $Q^2$ : możemy zobaczyć nukleony w jądrze



“twardy” foton, duże  $Q^2$  ( $\gg m_p$ ): dostrzegamy partony





Gell-Mann i Zweig zakładali, że kwarki są:

- bardzo masywne
- silnie związane

Z drugiej strony partony w modelu Feynman'a są:

- lekkie
- quasi-swobodne

Czy partony to kwarki ?

To wcale nie było takie oczywiste...

Gell-Mann i Zweig zakładali, że kwarki są:

- bardzo masywne
- silnie związane

Z drugiej strony partony w modelu Feynman'a są:

- lekkie
- quasi-swobodne

Czy partony to kwarki ?

To wcale nie było takie oczywiste...

Dopiero powstanie teorii opisującej oddziaływania silne pozwoliło nam to wszystko zrozumieć...

- 1 Własności cząstek
- 2 Hipoteza kwarków
- 3 Model partonowy
- 4 Chromodynamika kwantowa

## Problem

Istnienie cząstki  $\Omega^-$  było potwierdzeniem koncepcji kwarków.

Jednocześnie jednak było zagadką: stan ten naruszał zakaz Pauliego!

Masa cząstki zgodna była z hipotezą, że kwarki znajdują się w stanie podstawowym, ale wszystkie trzy kwarki miały ten sam zapach (s) i kierunek spinu (całkowity rzut spinu cząstki:  $\frac{3}{2} = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} + \frac{1}{2}$ ).

⇒ musi istnieć jakaś własność (liczba kwantowa) która rozróżnia ich stany !

## Problem

Istnienie cząstki  $\Omega^-$  było potwierdzeniem koncepcji kwarków.

Jednocześnie jednak było zagadką: **stan ten naruszał zakaz Pauliego!**

Masa cząstki zgodna była z hipotezą, że kwarki znajdują się w stanie podstawowym, ale wszystkie trzy kwarki miały ten sam zapach (s) i kierunek spinu (całkowity rzut spinu cząstki:  $\frac{3}{2} = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} + \frac{1}{2}$ ).

⇒ musi istnieć jakaś własność (liczba kwantowa) która rozróżnia ich stany !

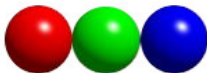
## Kolor

Tą dodatkową liczbą kwantową dla kwarków jest “kolor” (ładunek kolorowy) Kolor może być trzech rodzajów: **czzerwony (R)**, **zielony (G)** i **niebieski (B)**.

Każdy kwark w  $\Omega^-$  ma inny kolor ⇒ nie jest naruszony zakaz Pauliego.

## Kolor

Każdy z kwarków obdarzony jest ładunkiem kolorowym:  $R$ ,  $G$  lub  $B$ .



Anty-kwarki mają odpowiednie anty-kolory (kolory "ujemne"):  $\bar{B}$ ,  $\bar{R}$ ,  $\bar{G}$



## Hadrony

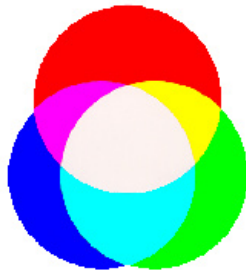
Jako swobodne mogą istnieć tylko cząstki nie niosące netto ładunku kolorowego

(cząstki "białe"):

$$R + G + B = 0$$

$$\bar{R} + \bar{G} + \bar{B} = 0$$

$$R + \bar{R} = G + \bar{G} = B + \bar{B} = 0$$



⇒ bariony (3 kwarki), antybariony (3 antykwarki) i mezony (kwark+antykwark)

## Kolor

Szczególną cechą oddziaływań silnych jest to, że bezmasowe nośniki oddziaływań, **gluony**, też niosą **ładunek kolorowy** (odpowiadający kombinacji kolor+antykolor).

Oddziaływania między gluonami prowadzą do “odwrotnej” zależności sprzężenia od odległości między ładunkami:

- na małych odległościach oddziaływanie jest słabe
- na dużych odległościach oddziaływanie szybko rośnie

# Oddziaływania kwarków

## Kolor

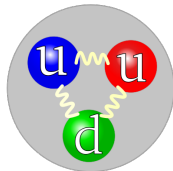
Szczególną cechą oddziaływań silnych jest to, że bezmasowe nośniki oddziaływań, **gluony**, też niosą **ładunek kolorowy** (odpowiadający kombinacji kolor+antykolor).

Oddziaływania między gluonami prowadzą do “odwrotnej” zależności sprzężenia od odległości między ładunkami:

- na małych odległościach oddziaływanie jest słabe
- na dużych odległościach oddziaływanie szybko rośnie

Oddziaływanie silne wiążące kwarki **przypomina** sprężynki łączące kulki:

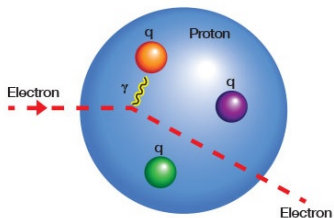
- gdy sprężynki są luźne, kulki “nie czują” swojej obecności
- gdy jednak chcemy jedną z kulek odsunąć, sprężyny się naciągają i nas powstrzymują





## Asymptotyczna swoboda

Jeśli cząstka wiązki ("pocisk") mając dużą energię rozprasza się na protonie to z dużym prawdopodobieństwem będzie to rozproszenie na pojedynczym kwarku:



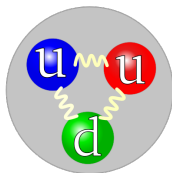
Przez **bardzo krótki czas zderzenia** kwark zachowuje się jakby był swobodny, wpływ pozostałych kwarków (i gluonów) w protonie można zaniedbać.

**Obrazek ten działa tym lepiej im wyższy jest przekaz czteropędu  $Q^2$**

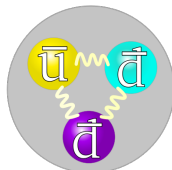
Oddziaływania silne wciąż pozostają bardzo istotne, ale na kolejnym etapie. Gdy z rozbitego protonu powstaje wiele nowych cząstek...

## Uwięzienie kwarków

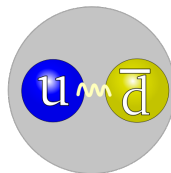
Gdy oddziaływania są “miękkie” (małe  $Q^2$ ) to siły kolorowe zmuszają kwarki do łączenia się w “białe” układy.



barion



antybarion

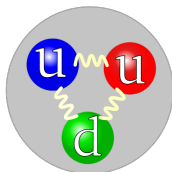


mezon

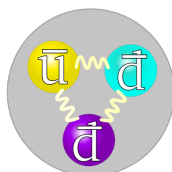
Tylko takie układy kwarków mogą się dodać od siebie na duże odległości.

## Uwięzienie kwarków

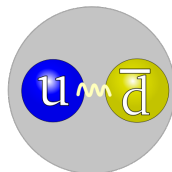
Gdy oddziaływania są “miękkie” (małe  $Q^2$ ) to siły kolorowe zmuszają kwarki do łączenia się w “białe” układy.



barion



antybarion



mezon

Tylko takie układy kwarków mogą się dodać od siebie na duże odległości.

Co się stanie jeśli spróbujemy wyrwać kwark z protonu?

Koszt dostarczonej energii wyprodukowane zostaną **dodatkowe pary kwark-antykwar** tak, żeby każdy “swobodny” kwark został otoczony dodatkowymi kwarkami (lub antykwarkami) **“neutralizującymi”** jego kolor.

Nigdy nie obserwujemy swobodnego kwarku!

Gdy powstawał model kwarków, wystarczyły trzy zapachy ( $u$ ,  $d$ ,  $s$ ), ale już w roku 1970 zauważono, że powinno ich być więcej...

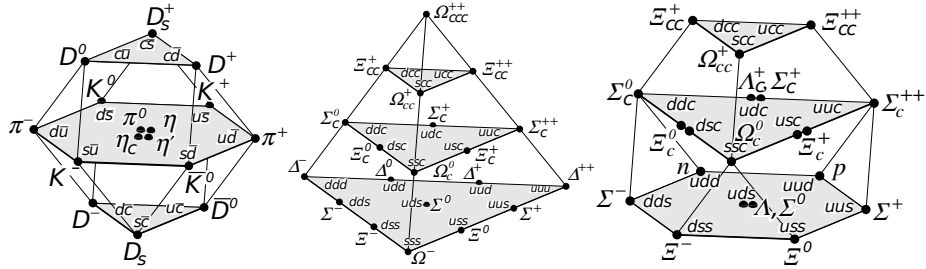
Czwarty kwark był potrzebny, żeby wytłumaczyć znikanie pewnych reakcji.

# Ciężkie kwarki

Gdy powstawał model kwarków, wystarczyły trzy zapachy ( $u, d, s$ ), ale już w roku 1970 zauważono, że powinno ich być więcej...

Czwarty kwark był potrzebny, żeby wytłumaczyć znikanie pewnych reakcji.

Pierwsza cząstka zawierająca kwark  $c$  została odkryta w roku 1974. Potem nastąpiła lawina. Nasz "układ okresowy" stał się trójwymiarowy



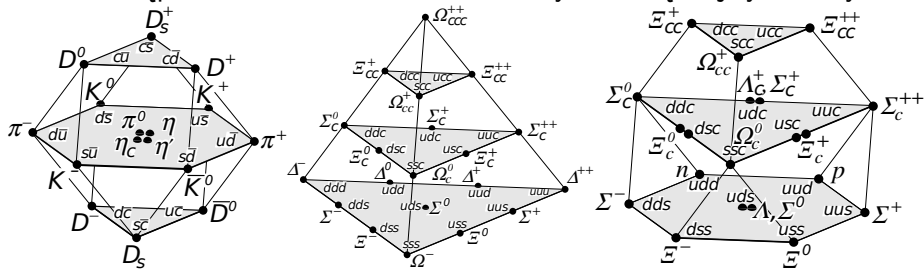
Każda kombinacja trzech kwarków lub kwark-antykwarok odpowiada jakiejś cząstce (w często więcej niż jednej!)

Gdy powstawał model kwarków, wystarczyły trzy zapachy ( $u$ ,  $d$ ,  $s$ ), ale już w roku 1970 zauważono, że powinno ich być więcej...

Czwarty kwark był potrzebny, żeby wytłumaczyć znikanie pewnych reakcji.

Pierwsza cząstka zawierająca kwark  $c$  została odkryta w roku 1974.

Potem nastąpiła lawina. Nasz "układ okresowy" stał się trójwymiarowy



Każda kombinacja trzech kwarków lub kwark-antykwarok odpowiada jakiejś cząstce (w często więcej niż jednej!)

W 1977 roku odkryto kwark  $b \Rightarrow$  jeszcze więcej możliwości...

# Masa protonu

Masa protonu wynosi  $m_p = 938 \text{ MeV}$ .

Masy kwarków  $u$  i  $d$  to odpowiednio:  $m_u \sim 3 \text{ MeV}$  i  $m_d \sim 7 \text{ MeV}$

Okazuje się więc, że:

$$\sum_{uud} m_q \ll m_p$$

Z czego pochodzi masa protonu?...

# Masa protonu

Masa protonu wynosi  $m_p = 938 \text{ MeV}$ .

Masy kwarków  $u$  i  $d$  to odpowiednio:  $m_u \sim 3 \text{ MeV}$  i  $m_d \sim 7 \text{ MeV}$

Okazuje się więc, że:

$$\sum_{uud} m_q \ll m_p$$

Z czego pochodzi masa protonu?...

Obrazek w którym proton składa się z 3 kwarków jest skrajnie uproszczony. Te trzy kwarki nazywamy **kwarkami walencyjnymi**, one decydują o własnościach cząstki (**ładunku, liczbach kwantowych**)



# Masa protonu

Masa protonu wynosi  $m_p = 938 \text{ MeV}$ .

Masy kwarków  $u$  i  $d$  to odpowiednio:  $m_u \sim 3 \text{ MeV}$  i  $m_d \sim 7 \text{ MeV}$

Okazuje się więc, że:

$$\sum_{uud} m_q \ll m_p$$

Z czego pochodzi masa protonu?...

Obrazek w którym proton składa się z 3 kwarków jest skrajnie uproszczony. Te trzy kwarki nazywamy **kwarkami walencyjnymi**, one decydują o własnościach cząstki (**ładunku, liczbach kwantowych**)

Ale oprócz nich w protonie mogą występować **pary kwark-antykwar** (**para jako całość jest obojętna, nie niesie żadnych liczb kwantowych**)

# Masa protonu

Masa protonu wynosi  $m_p = 938 \text{ MeV}$ .

Masy kwarków  $u$  i  $d$  to odpowiednio:  $m_u \sim 3 \text{ MeV}$  i  $m_d \sim 7 \text{ MeV}$

Okazuje się więc, że:

$$\sum_{uud} m_q \ll m_p$$

Z czego pochodzi masa protonu?...

Obrazek w którym proton składa się z 3 kwarków jest skrajnie uproszczony. Te trzy kwarki nazywamy **kwarkami walencyjnymi**, one decydują o własnościach cząstki (**ładunku, liczbach kwantowych**)

Ale oprócz nich w protonie mogą występować **pary kwark-antykwar** (**para jako całość jest obojętna, nie niesie żadnych liczb kwantowych**)

W protonie są też **gluony**, które spajają go w całość.

**Masa protonu pochodzi głównie z energii wiązania!**