

Wszechświat Cząstek Elementarnych dla Humanistów

Oddziaływania silne

Aleksander Filip Żarnecki

Wykład ogólnouniwersytecki

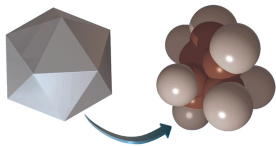


16 lipca 2021

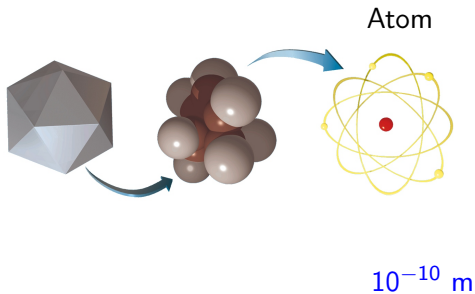
- 1 Budowa materii
- 2 Własności cząstek
- 3 Hipoteza kwarków
- 4 Model partonowy
- 5 Chromodynamika kwantowa

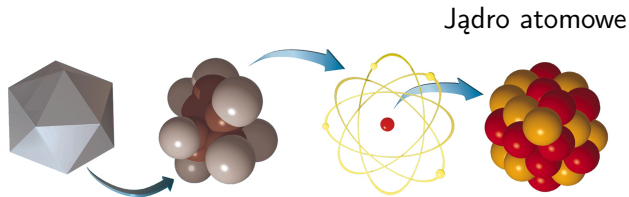
- 1 Budowa materii
- 2 Własności cząstek
- 3 Hipoteza kwarków
- 4 Model partonowy
- 5 Chromodynamika kwantowa

Cząsteczka



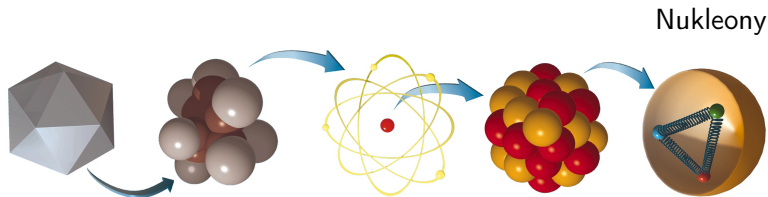
10^{-9} m





10^{-14} m

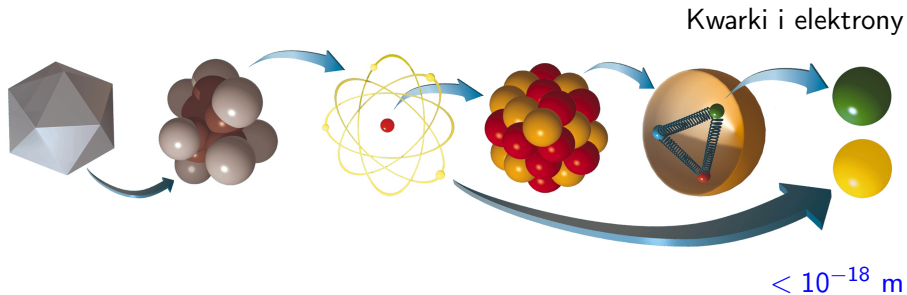
Elektron jest najlżejszą cząstką naładowaną, zalicza się do tzw. leptonów



10^{-15} m

Elektron jest najlżejszą cząstką naładowaną, zalicza się do tzw. leptonów

Nukleony, czyli **protony i neutrony**,

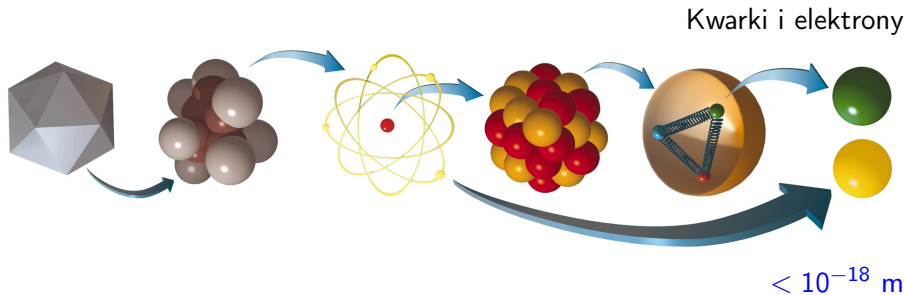


Elektron jest najlżejszą cząstką naładowaną, zalicza się do tzw. leptonów

Nukleony, czyli **protony** i **neutrony**, składają się z kwarków *u* i *d*:

$$p = (uud) \quad n = (udd)$$

O tym jak “znaleźliśmy” kwarki wewnątrz nukleonów powiem w drugiej części dzisiejszego wykładu...



Elektron jest najlżejszą cząstką naładowaną, zalicza się do tzw. leptonów

Nukleony, czyli **protony** i **neutrony**, składają się z kwarków *u* i *d*:

$$p = (uud) \quad n = (udd)$$

Kwarki i **leptony** uważamy za najbardziej fundamentalne i niepodzielne cząstki materii...

Fermiony

Świat “codzienny”: 3 “cegietki” (elektron oraz kwarki u i d)

	leptony		kwarki	
	e <i>elektron</i>		d <i>down</i>	u <i>up</i>
ładunek [e]	-1		$-1/3$	$+2/3$

Fermiony

Świat “codzienny”: 3 “cegietki” (elektron oraz kwarki u i d) + *neutrino*

leptony		kwarki	
e	ν_e	d	u
<i>elektron</i>	<i>neutrino el.</i>	<i>down</i>	<i>up</i>

ładunek [e]	-1	0	-1/3	+2/3
-------------	----	---	------	------

Neutrino potrzebne do opisu rozpadów promieniotwórczych

Fermiony

Świat “codzienny”: 3 “cegietki” (elektron oraz kwarki u i d) + *neutrino*

Fizyka cząstek \Rightarrow 12 fundamentalnych “cegietek” materii, fermionów

	leptony		kwarki	
pokolenie 1	e <i>elektron</i>	ν_e <i>neutrino el.</i>	d <i>down</i>	u <i>up</i>
pokolenie 2	μ <i>mion</i>	ν_μ <i>neutrino mionowe</i>	s <i>strange</i>	c <i>charm</i>
pokolenie 3	τ <i>taon</i>	ν_τ <i>neutrino taonowe</i>	b <i>beauty</i> <i>(bottom)</i>	t <i>top</i> <i>(truth)</i>
ładunek [e]	-1	0	-1/3	+2/3

“Kto zamówił te cząstki?”

nie potrafimy wyjaśnić istnienia 3 pokoleń/generacji

Fermiony

Świat “codzienny”: 3 “cegietki” (elektron oraz kwarki u i d) + *neutrino*

Fizyka cząstek \Rightarrow 12 fundamentalnych “cegietek” materii, fermionów

	leptony		kwarki	
pokolenie 1	e <i>elektron</i>	ν_e <i>neutrino el.</i>	d <i>down</i>	u <i>up</i>
pokolenie 2	μ <i>mion</i>	ν_μ <i>neutrino mionowe</i>	s <i>strange</i>	c <i>charm</i>
pokolenie 3	τ <i>taon</i>	ν_τ <i>neutrino taonowe</i>	b <i>beauty</i> <i>(bottom)</i>	t <i>top</i> <i>(truth)</i>
ładunek [e]	-1	0	-1/3	+2/3

+ **anty-fermiony** (kolejnych 12)

Fermiony

Świat “codzienny”: 3 “cegietki” (elektron oraz kwarki u i d) + *neutrino*

Fizyka cząstek \Rightarrow 12 fundamentalnych “cegietek” materii, fermionów

	leptony		kwarki	
pokolenie 1	e <i>elektron</i>	ν_e <i>neutrino el.</i>	d <i>down</i>	u <i>up</i>
pokolenie 2	μ <i>mion</i>	ν_μ <i>neutrino mionowe</i>	s <i>strange</i>	c <i>charm</i>
pokolenie 3	τ <i>taon</i>	ν_τ <i>neutrino taonowe</i>	b <i>beauty</i> <i>(bottom)</i>	t <i>top</i> <i>(truth)</i>
ładunek [e]	-1	0	-1/3	+2/3

+ *anty-fermiony* (kolejnych 12)

A gdzie jest foton ?!

nie pasuje tutaj...

Oddziaływania

W fizyce klasycznej oddziaływania między ciałami zachodziły na odległość. Opisywaliśmy je wprowadzając pojęcie pola (grawitacyjnego, elektrycznego, magnetycznego)

Oddziaływania

W fizyce klasycznej **oddziaływania** między ciałami zachodziły na **odległość**.
Opisywaliśmy je wprowadzając pojęcie **poła** (grawitacyjnego, elektrycznego, magnetycznego)

W przypadku **zmiany rozkładu** masy (lub ładunku) pole grawitacyjne (elektryczne) zmieniało się **natychmiast w całej przestrzeni !**

Jest to sprzeczne z postulatami Einsteina, że nic nie może przemieszczać się szybciej od prędkości światła, także oddziaływanie...

Oddziaływania

W fizyce klasycznej **oddziaływania** między ciałami zachodziły na **odległość**. Opisywaliśmy je wprowadzając pojęcie **poła** (grawitacyjnego, elektrycznego, magnetycznego)

W przypadku **zmiany rozkładu** masy (lub ładunku) pole grawitacyjne (elektryczne) zmieniało się **natychmiast w całej przestrzeni !**

Jest to sprzeczne z postulatami Einsteina, że nic nie może przemieszczać się szybciej od prędkości światła, także oddziaływanie...

W opisie oddziaływań między cząstkami rezygnujemy z pojęcia pola i siły! Zamiast tego wprowadzamy (**równoważny, jak się okazuje**) opis poprzez wymianę **nośników oddziaływań**

Oddziaływania

W fizyce klasycznej **oddziaływania** między ciałami zachodziły na **odległość**. Opisywaliśmy je wprowadzając pojęcie **poła** (grawitacyjnego, elektrycznego, magnetycznego)

W przypadku **zmiany rozkładu** masy (lub ładunku) pole grawitacyjne (elektryczne) zmieniało się **natychmiast w całej przestrzeni !**

Jest to sprzeczne z postulatem Einsteina, że nic nie może przemieszczać się szybciej od prędkości światła, także oddziaływanie...

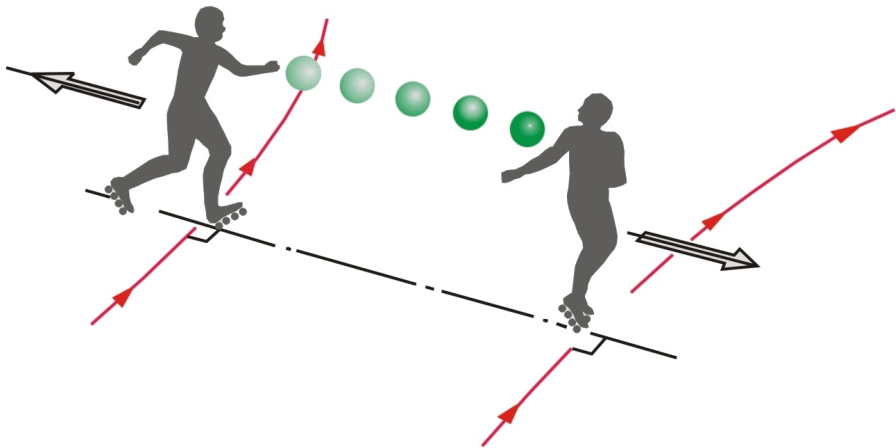
W opisie oddziaływań między cząstkami rezygnujemy z pojęcia pola i siły! Zamiast tego wprowadzamy (równoważny, jak się okazuje) opis poprzez wymianę **nośników oddziaływań**

Dwa rodzaje cząstek: o spinie będziemy jeszcze mówić później

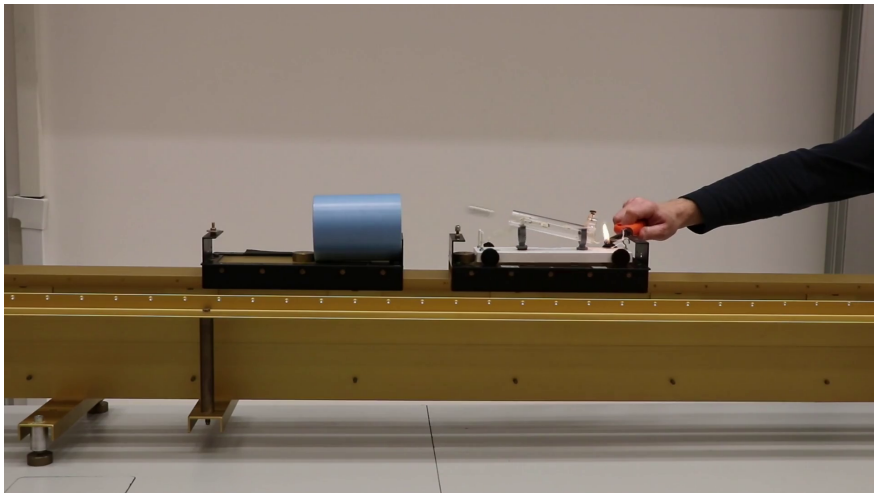
- cząstki materii - fermiony (cząstki o spinie $\frac{1}{2}$)
- nośniki oddziaływań - bozony (cząstki o spinie całkowitym)

Bozony

Klasyczny obraz opisu oddziaływania poprzez wymianę cząstek-nośników



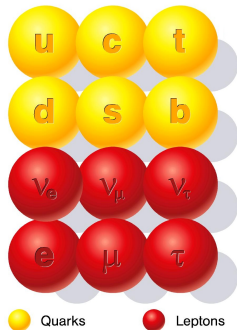
Nośniki oddziaływań - pokaz



Cząstki fundamentalne

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

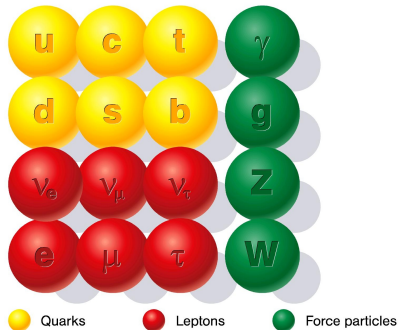
- cząstki materii
 kwarki i leptony



Cząstki fundamentalne

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

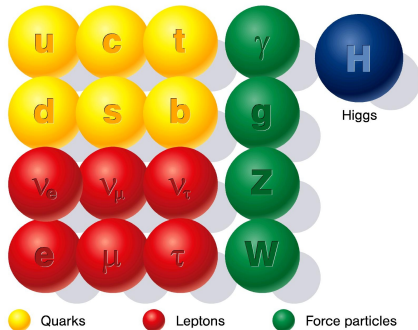
- cząstki materii
kwarki i leptony
- nośniki oddziaływań
 γ , g , W^\pm i Z^0



Cząstki fundamentalne

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

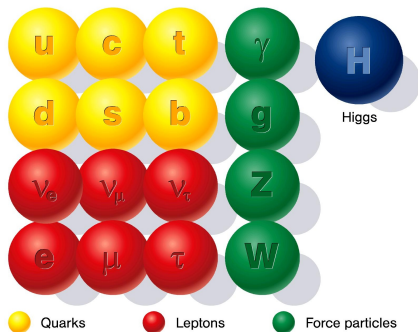
- cząstki materii
kwarki i leptony
- nośniki oddziaływań
 γ , g , W^\pm i Z^0
- bozon Higgsa
konieczny dla
spójności modelu
"Nadaje masy" wszystkim cząstkom



Cząstki fundamentalne

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

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



Pytanie na dzisiejszy wykład:

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

Cząstki fundamentalne

Najmniejsze, niepodzielne składniki materii (kwarki i leptony) oraz nośniki oddziaływań. Zakładamy, że są punktowe (nie udało się dotąd zmierzyć ich rozmiarów, zawsze wychodzą zgodne z zerem). Jest ich stosunkowo niewiele (17 nie licząc antycząstek i różnych stanów ładunkowych).

Cząstki fundamentalne

Najmniejsze, niepodzielne składniki materii (kwarki i leptony) oraz nośniki oddziaływań. Zakładamy, że są punktowe (nie udało się dotąd zmierzyć ich rozmiarów, zawsze wychodzą zgodne z zerem). Jest ich stosunkowo niewiele (17 nie licząc antycząstek i różnych stanów ładunkowych).

Cząstki elementarne

Cząstki fundamentalne oraz wszystkie cząstki subatomowe złożone z kwarków, czyli hadrony. Hadrony dzielimy na bariony (układ trzech kwarków) oraz mezony (kwark i anty-kwark). Znamy ich już tysiące...

Cząstki fundamentalne

Najmniejsze, niepodzielne składniki materii (kwarki i leptony) oraz nośniki oddziaływań. Zakładamy, że są punktowe (nie udało się dotąd zmierzyć ich rozmiarów, zawsze wychodzą zgodne z zerem). Jest ich stosunkowo niewiele (17 nie licząc antycząstek i różnych stanów ładunkowych).

Cząstki elementarne

Cząstki fundamentalne oraz wszystkie cząstki subatomowe złożone z kwarków, czyli hadrony. Hadrony dzielimy na bariony (układ trzech kwarków) oraz mezony (kwark i anty-kwark). Znamy ich już tysiące...

Cząsteczki

Cząsteczki związków chemicznych złożone z atomów.
Nie są (na ogół) obiektem zainteresowania fizyków cząstek...

- 1 Budowa materii
- 2 Własności cząstek**
- 3 Hipoteza kwarków
- 4 Model partonowy
- 5 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:

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

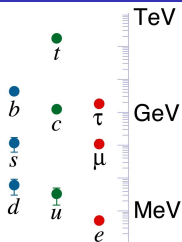
Jednostkę energii możemy też przyjąć za jednostkę masy (modulo c^2)

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...



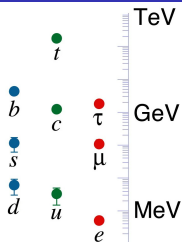
Masy leptonów i kwarków

Elektron jest najlżejszą znaną cząstką naładowaną

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

Inne naładowane fermiony są znacznie (!) cięższe.

Leptony	mion	μ	106 MeV	
	taon	τ	1.78 GeV	cięższy od protonu



Masy leptonów i kwarków

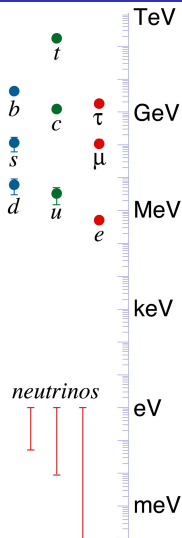
Elektron jest najlżejszą znaną cząstką naładowaną

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

Inne naładowane fermiony są znacznie (!) cięższe.

Leptony	mion	μ	106 MeV	
	taon	τ	1.78 GeV	cięższy od protonu
Kwarki	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 leptonów i kwarków

Elektron jest najlżejszą znaną cząstką naładowaną

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

Inne naładowane fermiony są znacznie (!) cięższe.

Leptony	mion	μ	106 MeV	
	taon	τ	1.78 GeV	cięższy od protonu
Kwarki	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.

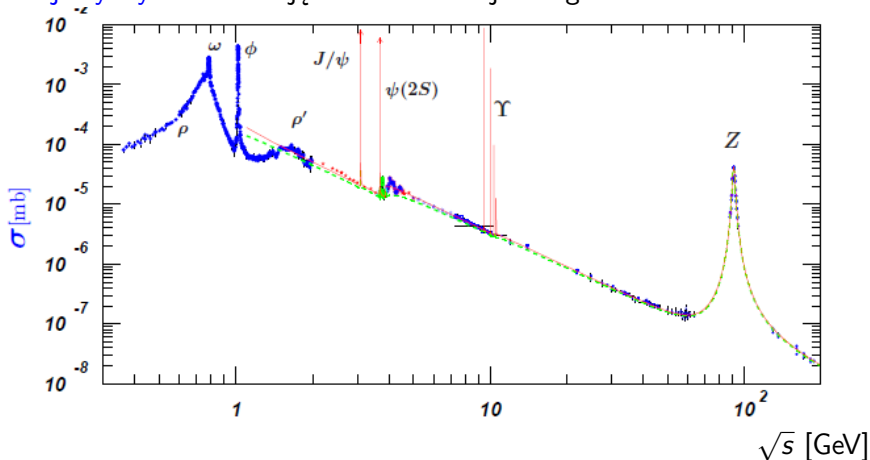
W przypadku produkcji rezonansowej musimy tak dobrać energie zderzających się wiązek (najczęściej elektronów i pozytonów), żeby spełniona była zależność:

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

⇒ 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:

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

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

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

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 %

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

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

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

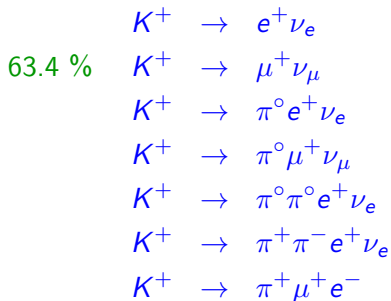
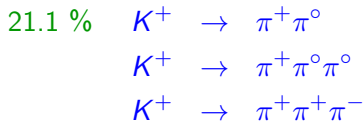
$$K^+ \rightarrow \pi^0 \pi^0 e^+ \nu_e$$

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

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

Przykład:

BR



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:

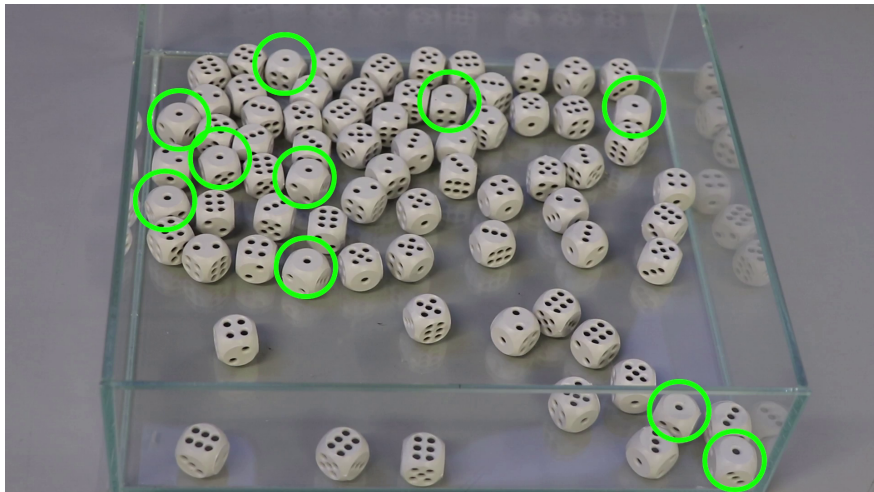
BR

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?

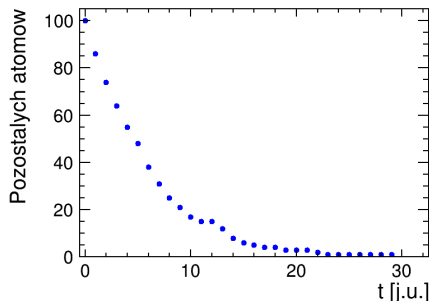
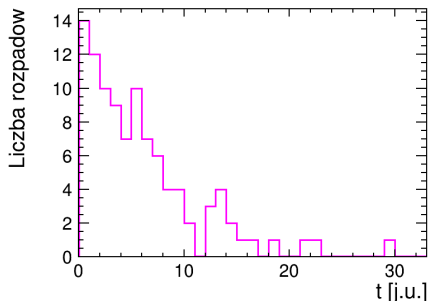
Czas życia - pokaz



Czas życia - wyniki eksperymentu modelowego

Liczba rozpadów - liczba kości które pokazały [●] w danej turze

Pozostałych atomów - liczba kości, które pozostały w pojemniku



W każdej turze powinna średnio “rozpaść się” 1/6 kości

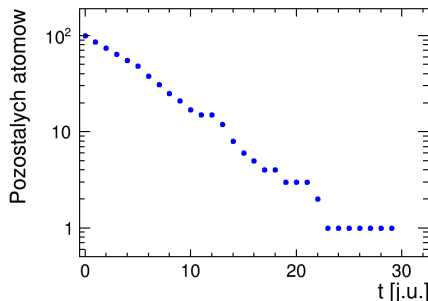
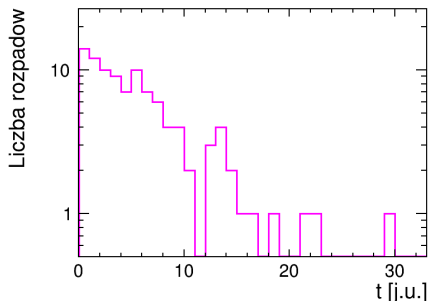
Po każdej turze liczba kości powinna zmniejszyć się średnio o czynnik 5/6

“Średni czas życia”, średni czas po którym nastąpił “rozpad”: ok. 5.5 “tury”

Czas życia - wyniki eksperymentu modelowego

Liczba rozpadów - liczba kości które pokazały [●] w danej turze

Pozostałych atomów - liczba kości, które pozostały w pojemniku



W każdej turze powinna średnio “rozpaść się” $1/6$ kości

Po każdej turze liczba kości powinna zmniejszyć się średnio o czynnik $5/6$

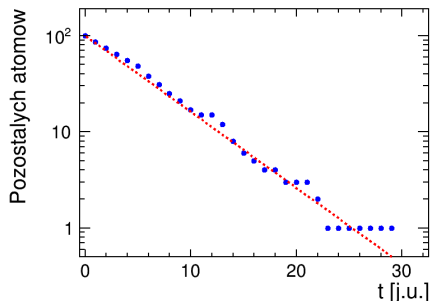
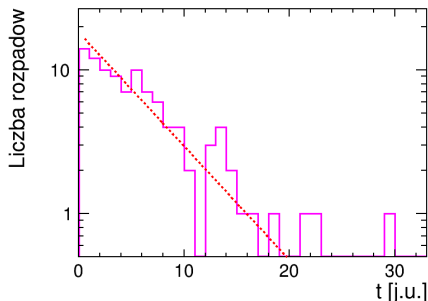
W skali logarytmicznej obie te zależności przedstawia linia prosta

⇒ opisuje je **funkcja wykładnicza**

Czas życia - wyniki eksperymentu modelowego

Liczba rozpadów - liczba kości które pokazały [●] w danej turze

Pozostałych atomów - liczba kości, które pozostały w pojemniku



W każdej turze powinna średnio “rozpaść się” $1/6$ kości

Po każdej turze liczba kości powinna zmniejszyć się średnio o czynnik $5/6$

W skali logarytmicznej obie te zależności przedstawia linia prosta

⇒ opisuje je **funkcja wykładnicza**

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 (τ).

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 (τ).

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

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

⇒ szansa przeżycia czasu τ to ok. 37%, 2τ - 14%, 3τ - 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 (τ).

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

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

⇒ szansa przeżycia czasu τ to ok. 37%, 2τ - 14%, 3τ - 5% ...

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

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

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 (τ).

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

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

⇒ szansa przeżycia czasu τ to ok. 37%, 2τ - 14%, 3τ - 5% ...

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

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

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:

		τ	$c\tau$
mion	μ	$2.2 \cdot 10^{-6}$ s	660 m
kaon	K^{\pm}	$1.2 \cdot 10^{-8}$ s	3.7 m
lambda	Λ	$2.6 \cdot 10^{-10}$ s	7.9 cm
mezon	B^{\pm}	$1.7 \cdot 10^{-12}$ s	0.5 mm
taon	τ	$2.9 \cdot 10^{-13}$ s	87 μ m
pion	π°	$8 \cdot 10^{-17}$ s	25 nm
mezon	ρ°	$5 \cdot 10^{-24}$ 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** (!).



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 dedykowanej **liczby kwantowej**. Jest nią liczba określająca orientację spinu - **własnego moment pędu** elektronu.

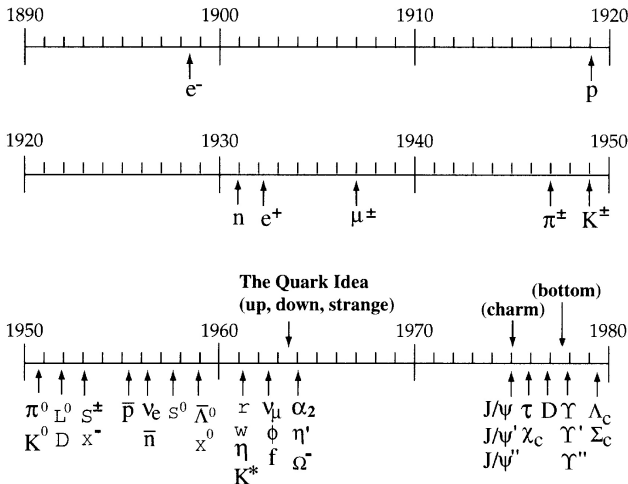
Mechanika kwantowa przewiduje, że dla dowolnie wybranego kierunku Z rzut spinu elektronu s może przyjąć tylko dwie wartości:

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

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

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

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

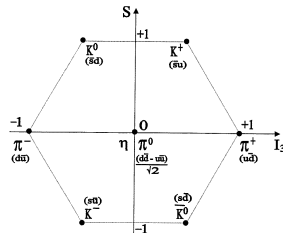
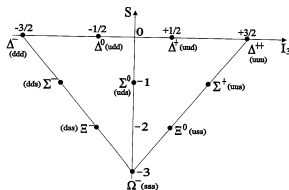
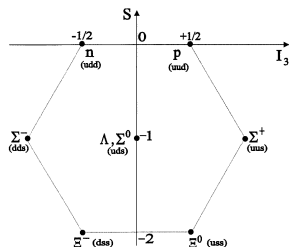


W latach 50 i 60 XX w. lawinowo odkrywano nowe cząstki.

(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?

Model Gell-Mann'a i Zweig'a

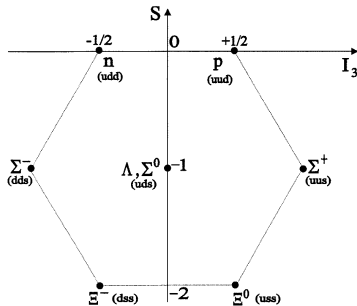
W połowie lat 60 obserwowana **symetria** w świecie znanych **cząstek** elementarnych doprowadziła ich do hipotezy istnienia **kwarków**

Trzy kwarki tworzyłyby bariony:

$$p = (uud)$$

$$n = (udd)$$

$$\Lambda = (uds)$$

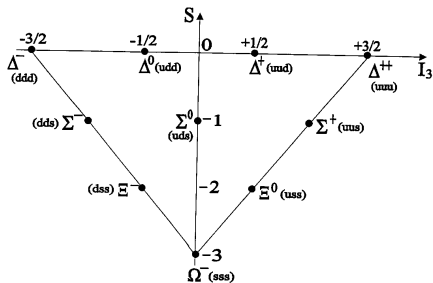


Model Gell-Mann'a i Zweig'a

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

Trzy kwarki tworzyłyby bariony:

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



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:

$$p = (uud)$$

$$n = (udd)$$

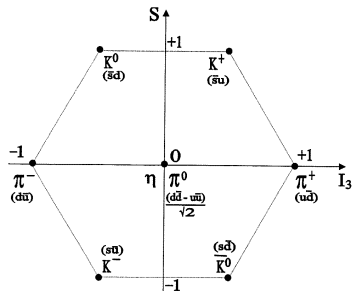
$$\Lambda = (uds)$$

$$\Delta^{\circ} = (udd)$$

Para kwark-antykwar kwark mezony:

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

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

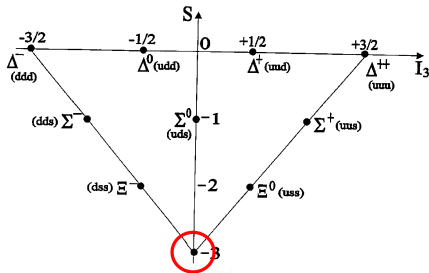


Gell-Mann i Zweig zakładali, że kwarki są bardzo masywne i **silnie związane**

Model Gell-Mann'a i Zweig'a

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

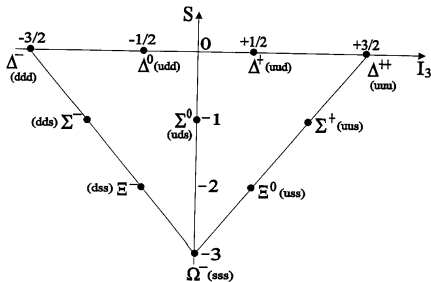
Ale okazało się, że nie wszystkie miejsca w multipletach były zajęte!



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 Budowa materii
- 2 Własności cząstek
- 3 Hipoteza kwarków
- 4 Model partonowy**
- 5 Chromodynamika kwantowa

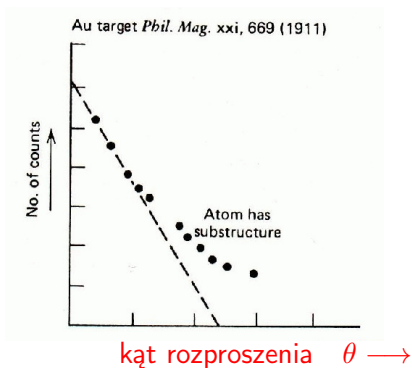
Istota pomiaru

Rozpraszanie cząstek α na cienkiej złotej folii



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

Obserwowany rozkład kątów:



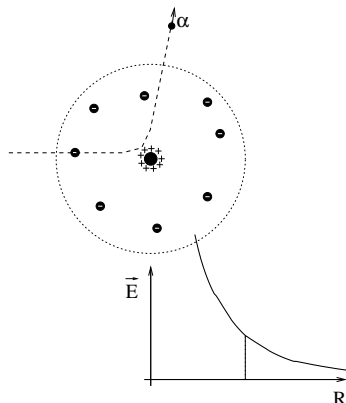
odbiegał od przewidywań modelu rozciągniętego rozkładu ładunku w atomie (linia przerywana)

Istota pomiaru

Rozpraszanie cząstek α na cienkiej złotej folii



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



Cząstka α 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.



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 θ pocisku:

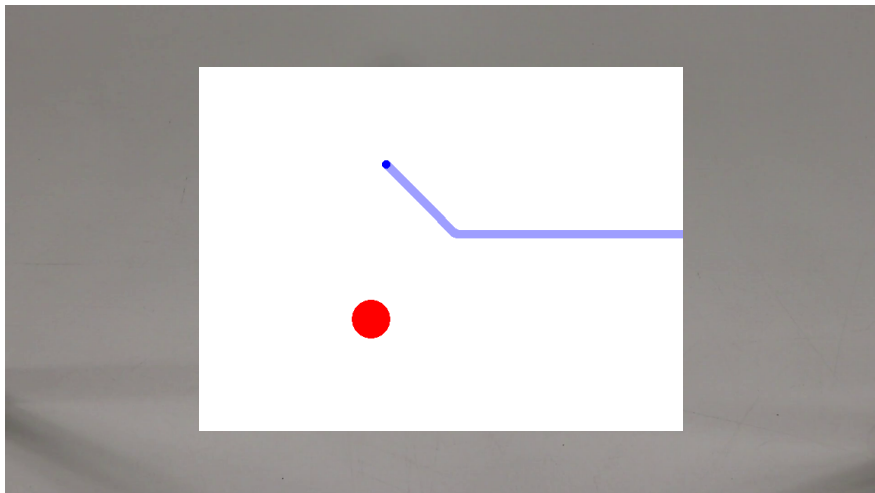
$$Q^2 = 2 E E' (1 - \cos\theta)$$

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

Rozpraszanie elastyczne - pokaz



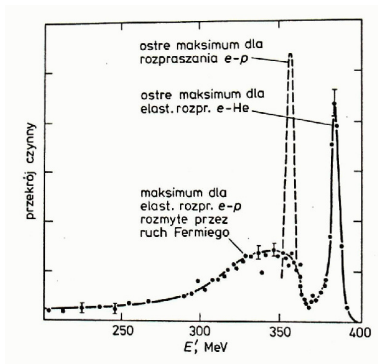
Rozpraszanie elastyczne - pokaz i model



Rozpraszanie e He

Jeśli oddziaływanie jest elastyczne to **energia** rozproszonego pocisku jest **jednoznacznie określona** przez energię początkową, kąt rozproszenia i masę tarczy (M)

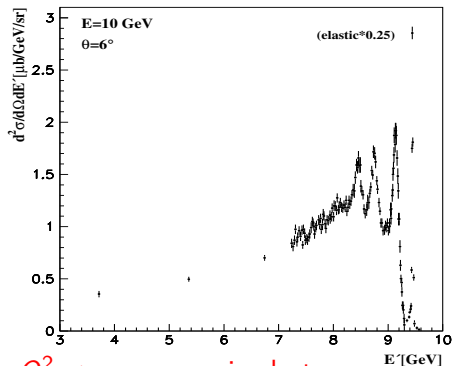
Rozkład energii elektronów o energii 400 MeV, rozproszonych na jądrach He pod kątem 45° :



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**:



Małe $Q^2 \Rightarrow$ rozpraszanie elastyczne
"miękkie" oddziaływanie

Oczekiwana dla rozpraszania elastycznego: $E' = 9.45 \text{ GeV}$

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

\Rightarrow rozpraszanie nieelastyczne !
Proton ulega rozbiciu!

Duże $Q^2 \Rightarrow$ nieelastyczne
"twarde" oddziaływanie

Rozpraszanie elastyczne (małe Q^2) - pokaz



Rozpraszanie nieelastyczne (duże Q^2) - pokaz



Rozpraszanie $e p$

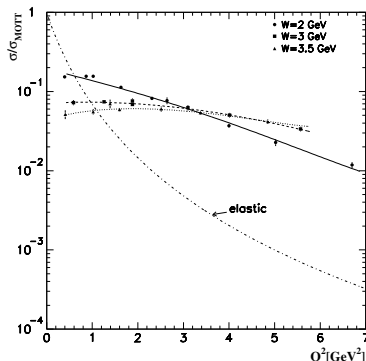
Stosunek przekroju czynnego na rozpraszanie **nieelastyczne** do **oczekiwanego** przekroju czynnego na rozpraszanie elastyczne **na ładunku punktowym** (σ_{Mott}) \Rightarrow

Ta sama zależność od Q^2 !!!
stosunek w przybliżeniu jest stały

Model zaproponowany przez Feynman'a w 1969 roku:

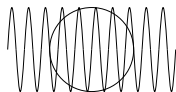
elastyczne rozpraszanie na punktowych **partonach** w protonie

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

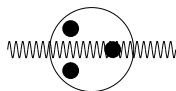


Dlaczego dopiero doświadczenia w SLAC pozwoliły nam dostrzec partony?
 Ze **wzrostem** przekazu czteropędu Q^2 **maleje długość fali** wymienianego w oddziaływaniu fotonu:

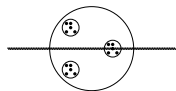
“miękki” foton, małe Q^2 : rozpraszanie na jądrze



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 Budowa materii
- 2 Własności cząstek
- 3 Hipoteza kwarków
- 4 Model partonowy
- 5 Chromodynamika kwantowa**

Problem

Istnienie cząstki Ω^- 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 spin 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 Ω^- 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 spin 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: **czerwony (R)**, **zielony (G)** i **niebieski (B)**.

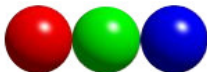
Każdy kwark w Ω^- ma inny kolor ⇒ nie jest naruszony zakaz Pauliego.

Składanie kolorów - pokaz



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

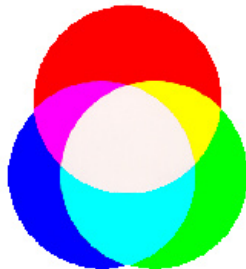
Jako swobodne mogą istnieć tylko cząstki nie niosące netto ładunku kolorowego

(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

Kolor

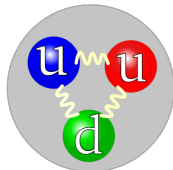
Szczególną cechą oddziaływań silnych jest to, że bezmasowe nośniki oddziaływań, **gluony**, też niosą **ładunek kolorowy** (odpowiadający kombinacji kolor+antykolor).

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

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

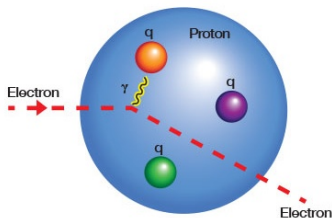
Oddziaływanie silne wiążące kwarki **przypomina** sprężynki łączące kulki:

- 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:



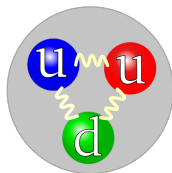
Przez **bardzo krótki czas zderzenia** kwark zachowuje się jakby był swobodny, wpływ pozostałych kwarków (i gluonów) w protonie można zaniedbać.

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

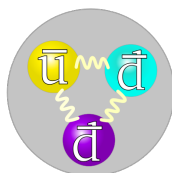
Oddziaływania silne wciąż pozostają bardzo istotne, ale na kolejnym etapie. Gdy z rozbitego protonu powstaje wiele nowych cząstek...

Uwięzienie kwarków

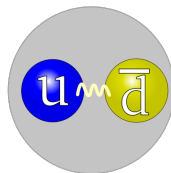
Gdy oddziaływania są “miękkie” (małe Q^2) to siły kolorowe zmuszają kwarki do łączenia się w “białe” układy.



barion



antybarion

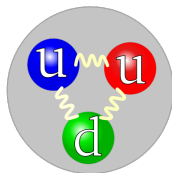


mezon

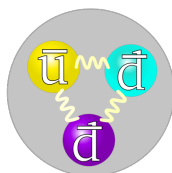
Tylko takie układy kwarków mogą się dodać od siebie na duże odległości.

Uwięzienie kwarków

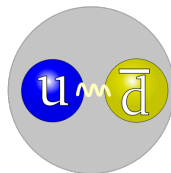
Gdy oddziaływania są “miękkie” (małe Q^2) to siły kolorowe zmuszają kwarki do łączenia się w “białe” układy.



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!