

# Wszechświat Cząstek Elementarnych dla Humanistów

## Oddziaływania silne

Aleksander Filip Żarnecki

Wykład ogólnouniwersytecki

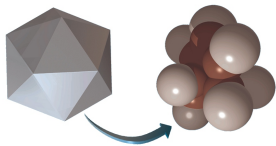


2 listopada 2021

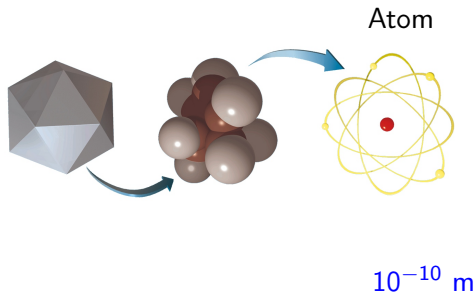
- 1 Budowa materii
- 2 Własności cząstek
- 3 Hipoteza kwarków
- 4 Model partonowy
- 5 Chromodynamika kwantowa

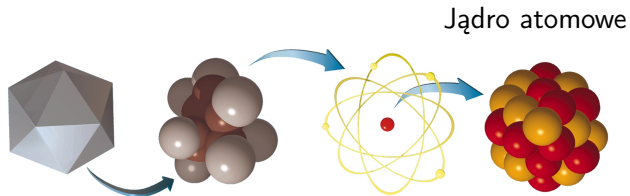
- 1 Budowa materii
- 2 Własności cząstek
- 3 Hipoteza kwarków
- 4 Model partonowy
- 5 Chromodynamika kwantowa

Cząsteczka



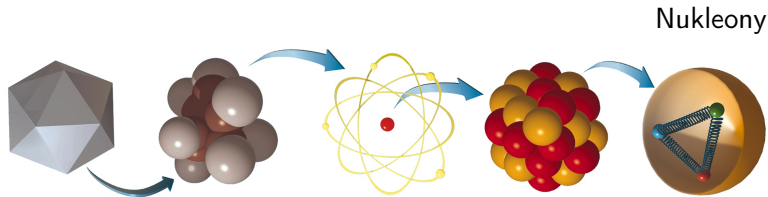
$10^{-9}$  m





$10^{-14}$  m

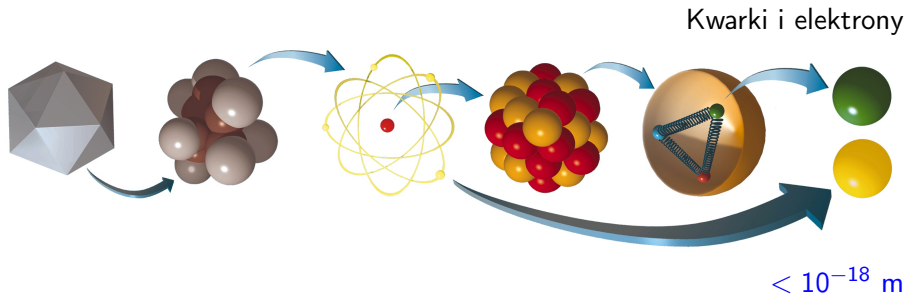
**Elektron** jest najbliższą cząstką naładowaną, zalicza się do tzw. leptonów



$10^{-15}$  m

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

**Nukleony**, czyli **protony i neutrony**,



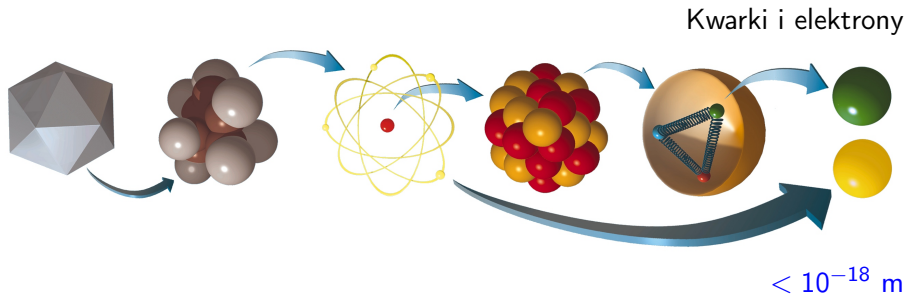
**Elektron** jest najlżejszą cząstką naładowaną, zalicza się do tzw. leptonów

**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	
$e$	$\nu_e$	$d$	$u$
<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>	$\nu_e$ <i>neutrino el.</i>	$d$ <i>down</i>	$u$ <i>up</i>
pokolenie 2	$\mu$ <i>mion</i>	$\nu_\mu$ <i>neutrino mionowe</i>	$s$ <i>strange</i>	$c$ <i>charm</i>
pokolenie 3	$\tau$ <i>taon</i>	$\nu_\tau$ <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>	$\nu_e$ <i>neutrino el.</i>	$d$ <i>down</i>	$u$ <i>up</i>
pokolenie 2	$\mu$ <i>mion</i>	$\nu_\mu$ <i>neutrino mionowe</i>	$s$ <i>strange</i>	$c$ <i>charm</i>
pokolenie 3	$\tau$ <i>taon</i>	$\nu_\tau$ <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>	$\nu_e$ <i>neutrino el.</i>	$d$ <i>down</i>	$u$ <i>up</i>
pokolenie 2	$\mu$ <i>mion</i>	$\nu_\mu$ <i>neutrino mionowe</i>	$s$ <i>strange</i>	$c$ <i>charm</i>
pokolenie 3	$\tau$ <i>taon</i>	$\nu_\tau$ <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 analizując działające **siły** lub wprowadzając pojęcie **poła**  
(**grawitacyjnego, elektrycznego, magnetycznego**)

## Oddziaływania

W fizyce klasycznej **oddziaływania** między ciałami zachodziły na **odległość**.  
Opisywaliśmy je analizując działające **siły** lub wprowadzając pojęcie **pola**  
(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...



## Oddziaływania

W fizyce klasycznej **oddziaływania** między ciałami zachodziły na **odległość**.  
Opisywaliśmy je analizując działające **siły** lub wprowadzając pojęcie **pola**  
(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**

## Oddziaływania

W fizyce klasycznej **oddziaływania** między ciałami zachodziły na **odległość**. Opisywaliśmy je analizując działające **siły** lub wprowadzając pojęcie **pola** (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...

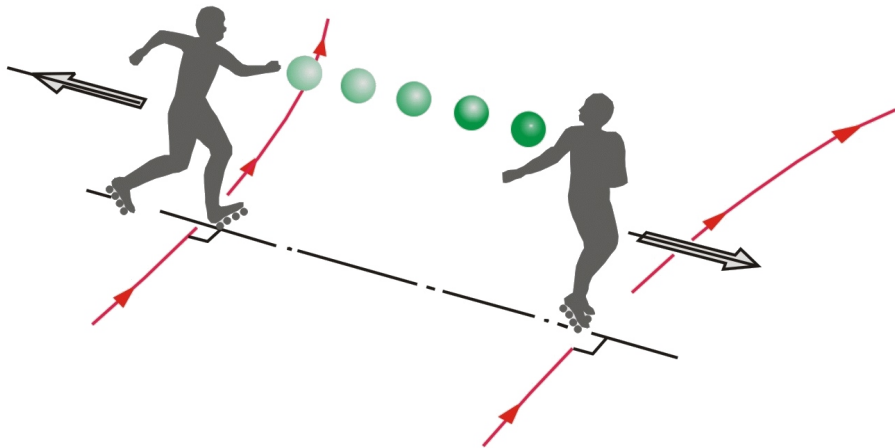
**W opisie oddziaływań między cząstkami rezygnujemy z pojęcia pola i siły!**  
Zamiast tego wprowadzamy (**równoważny, jak się okazuje**) opis poprzez wymianę **nośników oddziaływań**

**Dwa rodzaje cząstek:** o spinie będziemy jeszcze mówić później

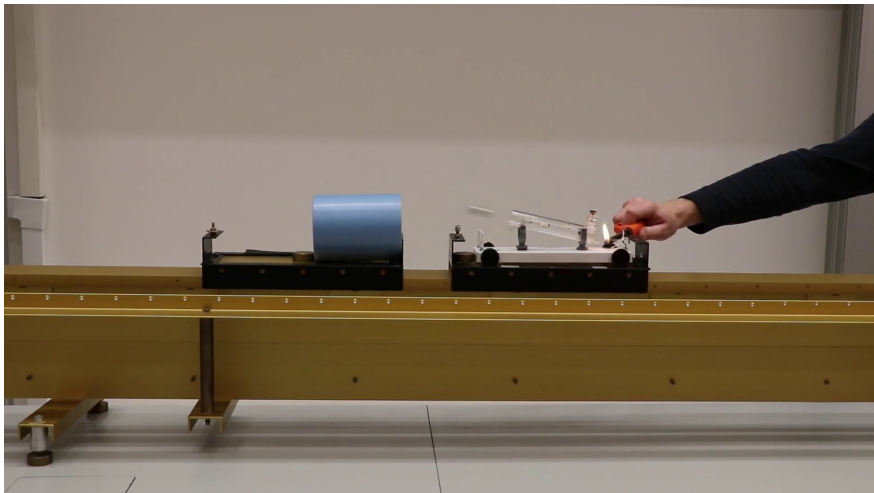
- cząstki materii - fermiony (cząstki o spinie  $\frac{1}{2}$ )
- nośniki oddziaływań - bozony (cząstki o spinie całkowitym)

## Bozony

Klasyczny obraz opisu oddziaływania poprzez wymianę cząstek-nośników



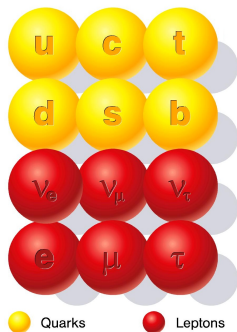
## Nośniki oddziaływań - pokaz



## Cząstki fundamentalne

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

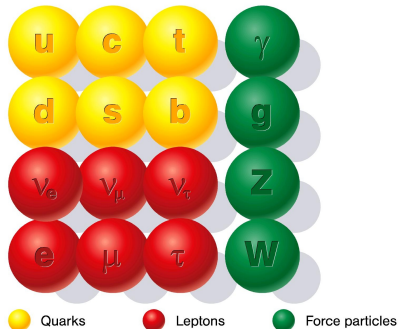
- cząstki materii  
    kwarki i leptony



## Cząstki fundamentalne

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

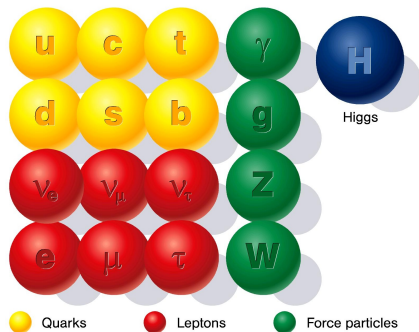
- cząstki materii  
kwarki i leptony
- nośniki oddziaływań  
 $\gamma$ ,  $g$ ,  $W^\pm$  i  $Z^0$



## Cząstki fundamentalne

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

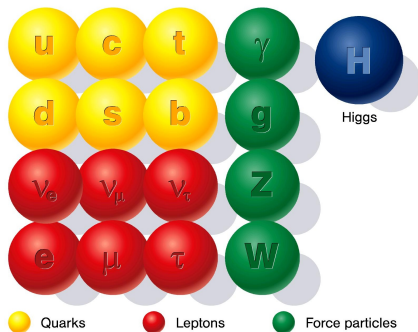
- cząstki materii  
kwarki i leptony
- nośniki oddziaływań  
 $\gamma$ ,  $g$ ,  $W^\pm$  i  $Z^0$
- bozon Higgsa  
konieczny dla  
spójności modelu  
"Nadaje masy" wszystkim cząstkom



## 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



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:

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

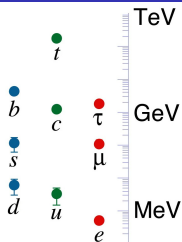
Jednostkę energii możemy też przyjąć za jednostkę masy (modulo  $c^2$ )

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 1 GeV...



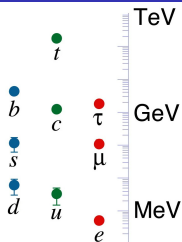
## Masy leptonów i kwarków

Elektron jest najlżejszą znaną cząstką naładowaną

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

Inne naładowane fermiony są znacznie (!) cięższe.

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



## Masy leptonów i kwarków

Elektron jest najlżejszą znaną cząstką naładowaną

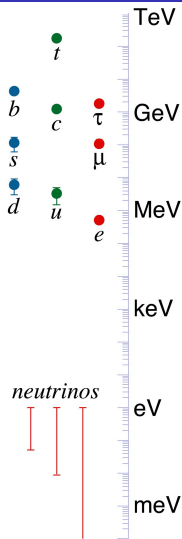
$$m_e \approx 0.5 \text{ MeV}/c^2$$

Inne naładowane fermiony są znacznie (!) cięższe.

Leptony	mion	$\mu$	106 MeV	
	taon	$\tau$	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.

<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.

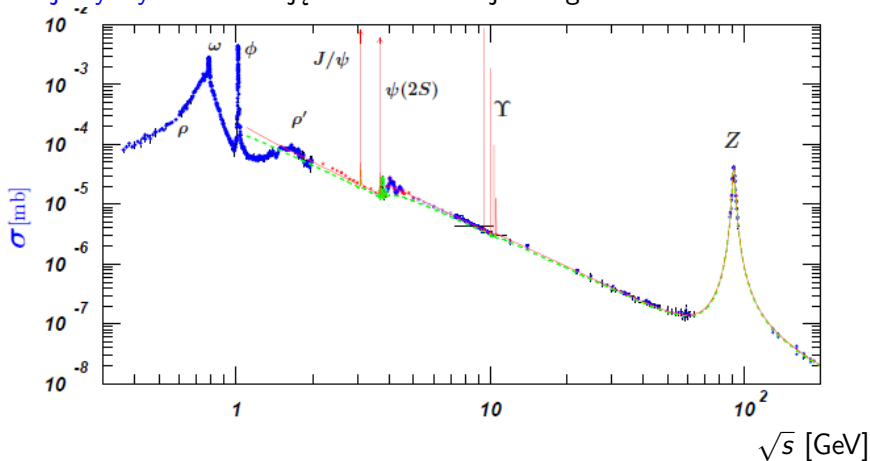
W przypadku produkcji rezonansowej musimy tak dobrać energie zderzających się wiązek (najczęściej elektronów i pozytonów), żeby spełniona była zależność:

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

⇒ 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:

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

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

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

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 %

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

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

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

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

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

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

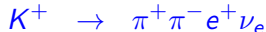
Przykład:

BR

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?

## Czas życia

Jedne rozpady zachodzą chętniej, częściej, a inne rzadziej.

Podobnie jest też z samymi cząstkami: jedne rozpadają się “chętniej”, czasami natychmiast po powstaniu, a na rozpady innych trzeba czekać...

Opisujemy to wprowadzając dla każdej cząstki jej **średni czas życia** ( $\tau$ )

Przyjmijmy, że dokładnie o 15:15 wyprodukowaliśmy cząstkę o  $\tau = 1$  h.  
Kiedy nastąpi jej rozpad? Czy zaobserwujemy go przed końcem wykładu?



## Czas życia

Jedne rozpady zachodzą chętniej, częściej, a inne rzadziej.

Podobnie jest też z samymi cząstkami: jedne rozpadają się “chętniej”, czasami natychmiast po powstaniu, a na rozpady innych trzeba czekać...

Opisujemy to wprowadzając dla każdej cząstki jej **średni czas życia** ( $\tau$ )

Przyjmijmy, że dokładnie o 15:15 wyprodukowaliśmy cząstkę o  $\tau = 1$  h.  
Kiedy nastąpi jej rozpad? Czy zaobserwujemy go przed końcem wykładu?

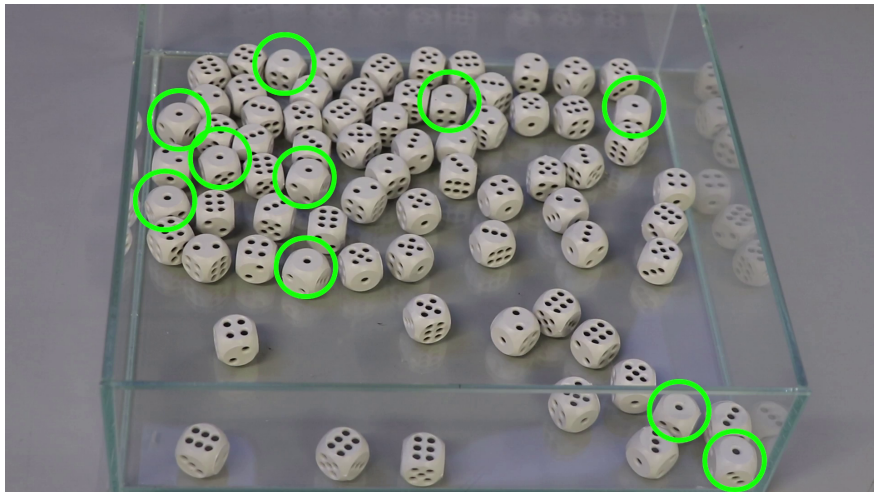
Okazuje się, że takie **pytanie** jest **źle postawione**.

**Zachowanie cząstek**, także w przypadku rozpadów jest **niedeterministyczne!**

Nie możemy przewidzieć kiedy cząstka się rozpadnie. Możemy tylko określić jakie jest **prawdopodobieństwo rozpadu** w danym przedziale czasu.

W naszym przykładzie mamy 78% szansy zaobserwować rozpad cząstki o  $\tau = 1$  h w ciągu 1.5 h wykładu...

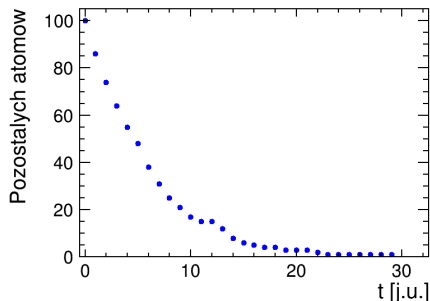
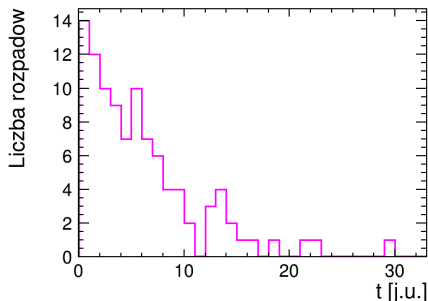
## Czas życia - pokaz



## 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

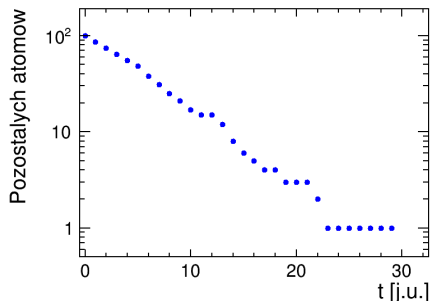
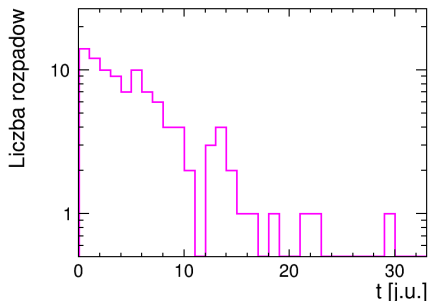
Po każdej turze liczba kości powinna zmniejszyć się średnio o czynnik  $5/6$

“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  $5/6$

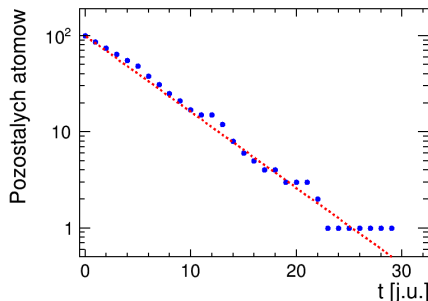
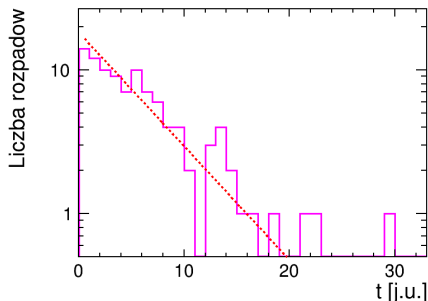
W skali logarytmicznej obie te zależności przedstawia linia prosta

⇒ 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 ( $\tau$ ).

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.

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

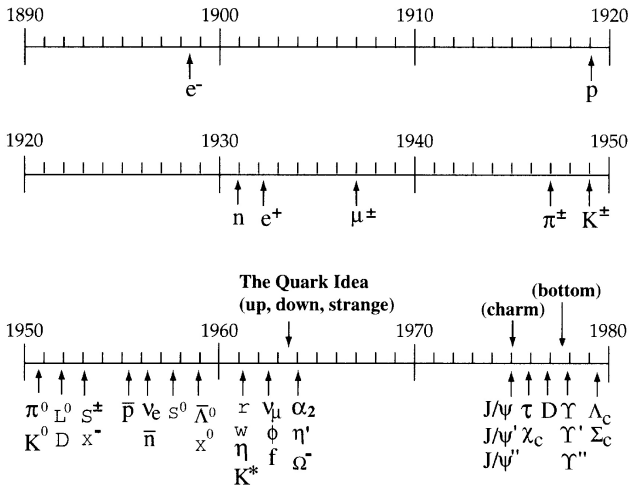
Mechanika kwantowa przewiduje, że dla dowolnie wybranego kierunku  $Z$  rzut spinu elektronu  $s$  może przyjąć tylko dwie wartości:

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

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)

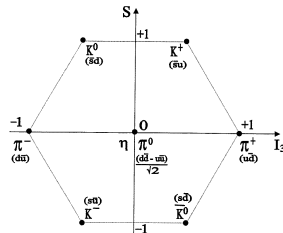
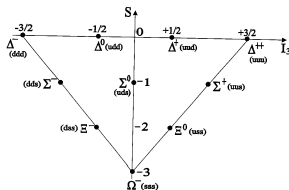
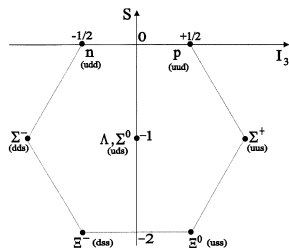


W latach 50 i 60 XX w. lawinowo odkrywano nowe cząstki.

(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

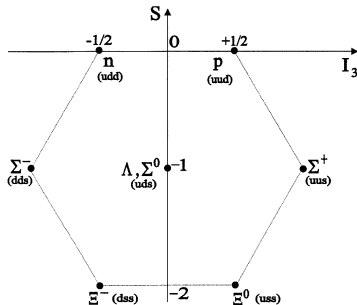
W połowie lat 60 obserwowana **symetria** w świecie znanych **cząstek** elementarnych doprowadziła ich do hipotezy istnienia **kwarków**

Trzy kwarki tworzyłyby bariony:

$$p = (uud)$$

$$n = (udd)$$

$$\Lambda = (uds)$$

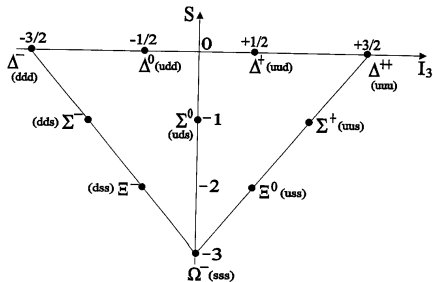


## Model Gell-Mann'a i Zweig'a

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:

$$p = (uud)$$

$$n = (udd)$$

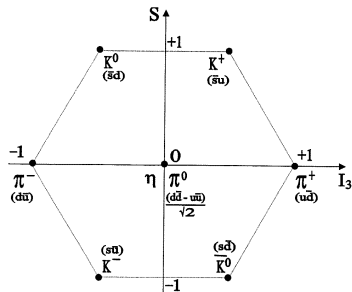
$$\Lambda = (uds)$$

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

Para kwark-antykwar kwark mezony:

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

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

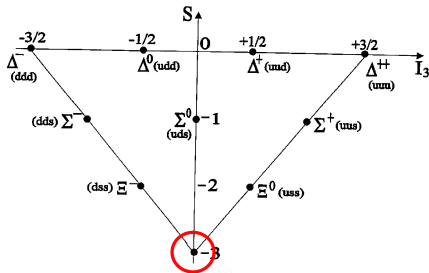


Gell-Mann i Zweig zakładali, że kwarki są bardzo masywne i **silnie związane**

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

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

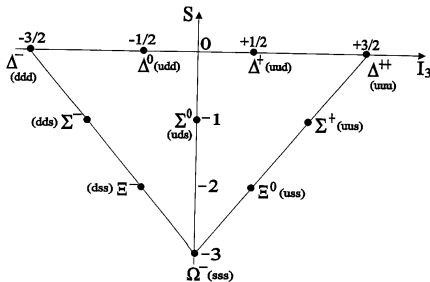
Ale okazało się, że nie wszystkie miejsca w multipletach były zajęte!



## 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

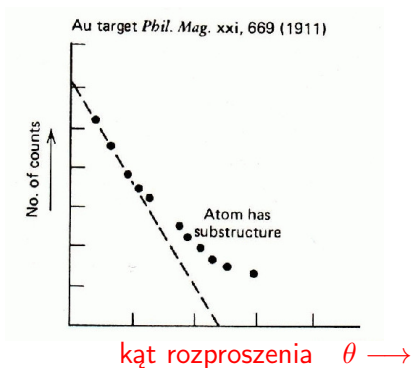
## Istota pomiaru

Rozpraszanie cząstek  $\alpha$  na cienkiej złotej folii



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

Obserwowany rozkład kątów:



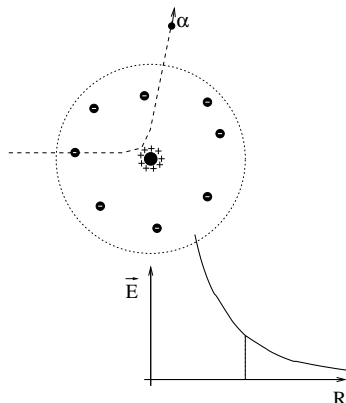
odbiegał od przewidywań modelu rozciągniętego rozkładu ładunku w atomie (linia przerywana)

## Istota pomiaru

Rozpraszanie cząstek  $\alpha$  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.



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:

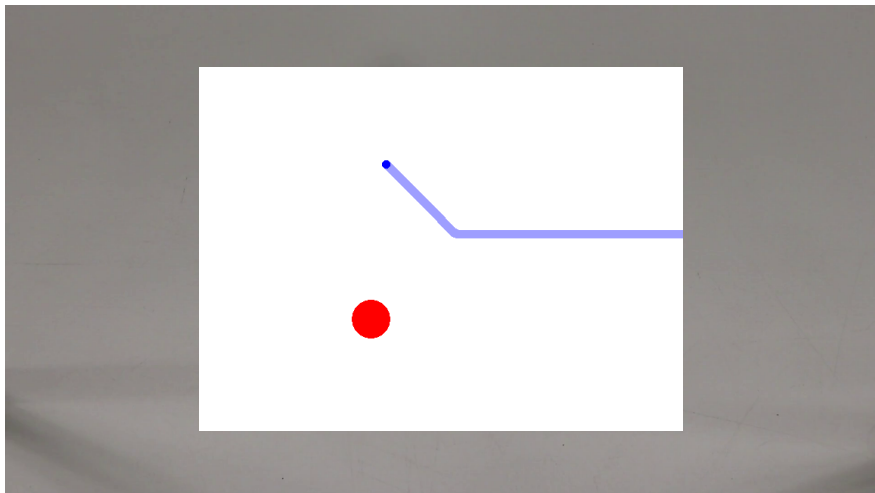
$$Q^2 = 2 E E' (1 - \cos\theta)$$

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

## Rozpraszanie elastyczne - pokaz



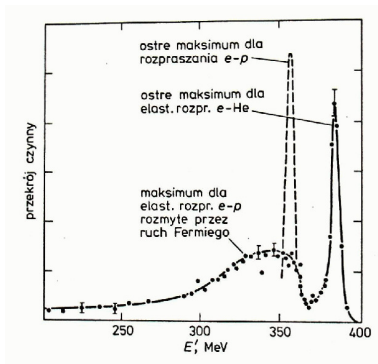
## Rozpraszanie elastyczne - pokaz i model



## Rozpraszanie $e$ $He$

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

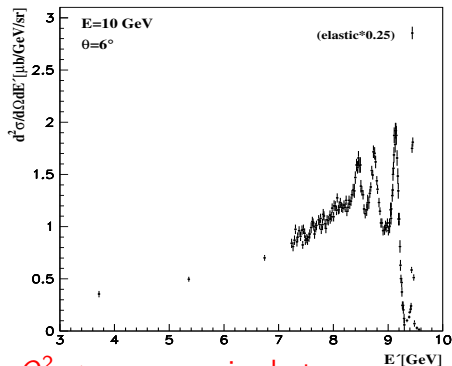
Rozkład energii elektronów o energii 400 MeV, rozproszonych na jądrach  $He$  pod kątem  $45^\circ$ :



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**:



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

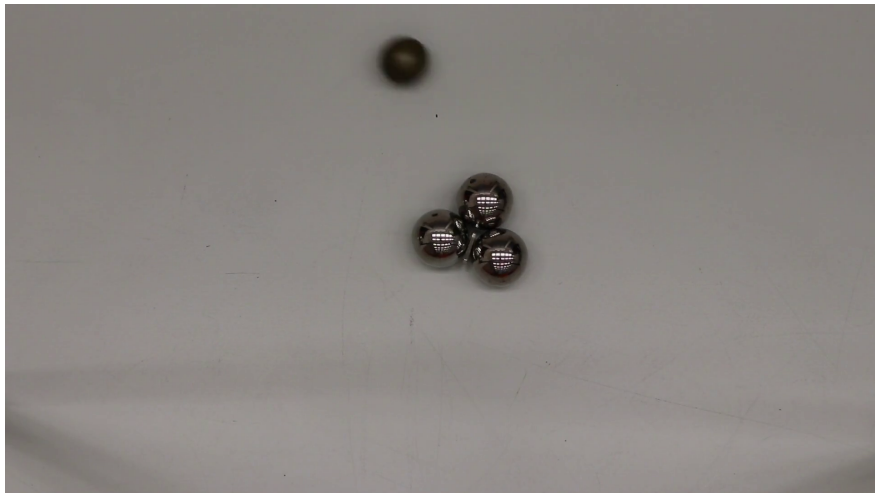
Oczekiwana dla rozpraszania elastycznego:  $E' = 9.45$  GeV

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

$\Rightarrow$  rozpraszanie nieelastyczne !  
Proton ulega rozbiciu!

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

## Rozpraszanie elastyczne (małe $Q^2$ ) - pokaz



## Rozpraszanie nieelastyczne (duże $Q^2$ ) - pokaz





## Rozpraszanie $e p$

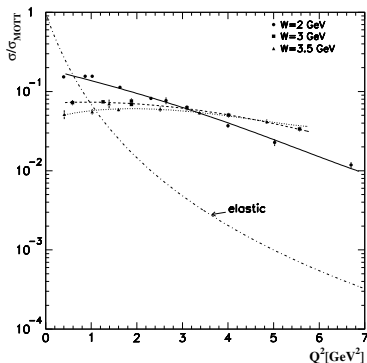
Stosunek przekroju czynnego na rozpraszanie **nieelastyczne** do **oczekiwanego** przekroju czynnego na rozpraszanie elastyczne **na ładunku punktowym** ( $\sigma_{Mott}$ )  $\Rightarrow$

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

Model zaproponowany przez Feynman'a w 1969 roku:

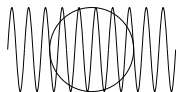
**elastyczne** rozpraszanie na punktowych **partonach** w protonie

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

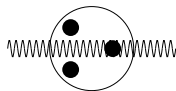


Dlaczego dopiero doświadczenia w SLAC pozwoliły nam dostrzec partony?  
 Ze **wzrostem** przekazu czteropędu  $Q^2$  **maleje długość fali** wymienianego w oddziaływaniu fotonu:

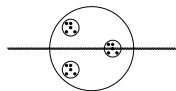
“miękki” foton, małe  $Q^2$ : rozpraszanie na jądrze



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  $\Omega^-$  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 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  $\Omega^-$  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 spin cząstki:  $\frac{3}{2} = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} + \frac{1}{2}$ ).

$\Rightarrow$  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  $\Rightarrow$  nie jest naruszony zakaz Pauliego.

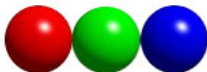
## Składanie kolorów - pokaz





## 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

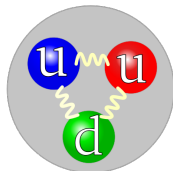
Szczególną cechą oddziaływań silnych jest to, że bezmasowe nośniki oddziaływań, **gluony**, też niosą **ładunek kolorowy** (odpowiadający kombinacji kolor+antykolor).

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

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

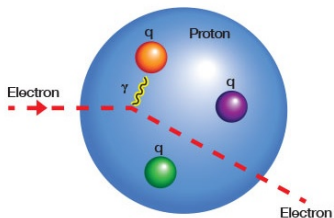
Oddziaływanie silne wiążące kwarki **przypomina** sprężynki łączące kulki:

- 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:



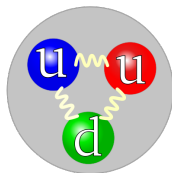
Przez **bardzo krótki czas zderzenia** kwark zachowuje się jakby był swobodny, wpływ pozostałych kwarków (i gluonów) w protonie można zaniedbać.

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

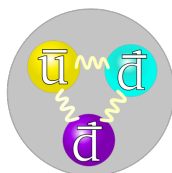
Oddziaływania silne wciąż pozostają bardzo istotne, ale na kolejnym etapie. Gdy z rozbitego protonu powstaje wiele nowych cząstek...

## Uwięzienie kwarków

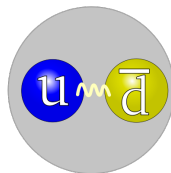
Gdy oddziaływania są “miękkie” (małe  $Q^2$ ) to siły kolorowe zmuszają kwarki do łączenia się w “białe” układy.



barion



antybarion

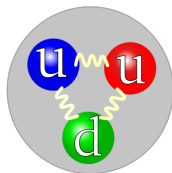


mezon

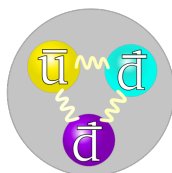
Tylko takie układy kwarków mogą się dodać od siebie na duże odległości.

## Uwięzienie kwarków

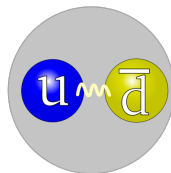
Gdy oddziaływania są “miękkie” (małe  $Q^2$ ) to siły kolorowe zmuszają kwarki do łączenia się w “białe” układy.



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!