

Wszechświat Cząstek Elementarnych dla Humanistów

Struktura materii i oddziaływania silne

Aleksander Filip Żarnecki

Wykład ogólnouniwersytecki

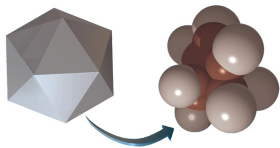


5 listopada 2024

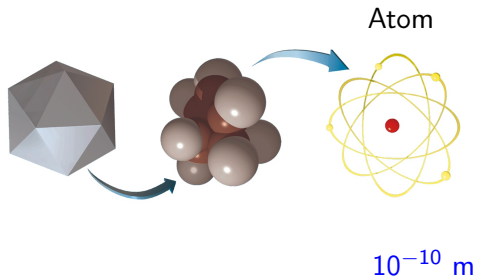
- 1 Budowa materii
- 2 Własności cząstek
- 3 Hipoteza kwarków
- 4 Model partonowy
- 5 Chromodynamika kwantowa

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

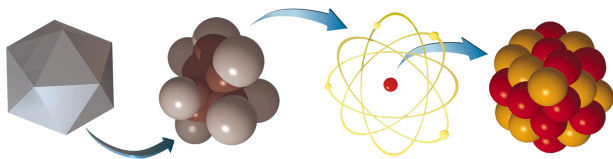
Cząsteczka



10^{-9} m

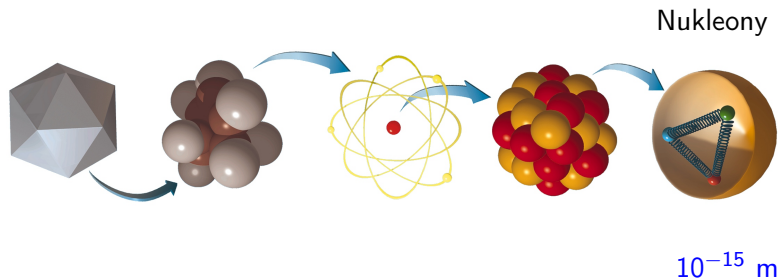


Jądro atomowe i elektrony



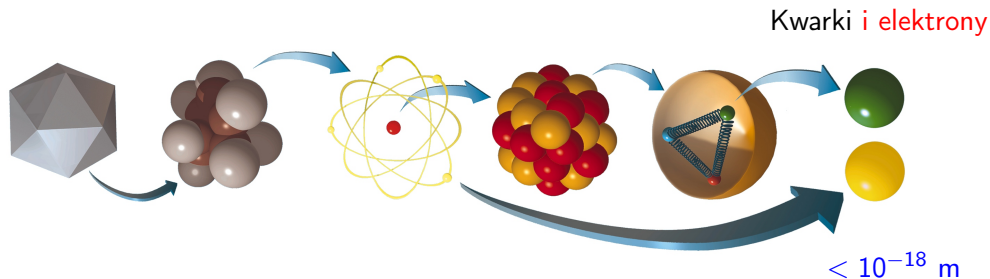
10^{-14} m

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



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

Nukleony, czyli **protony i neutrony**,

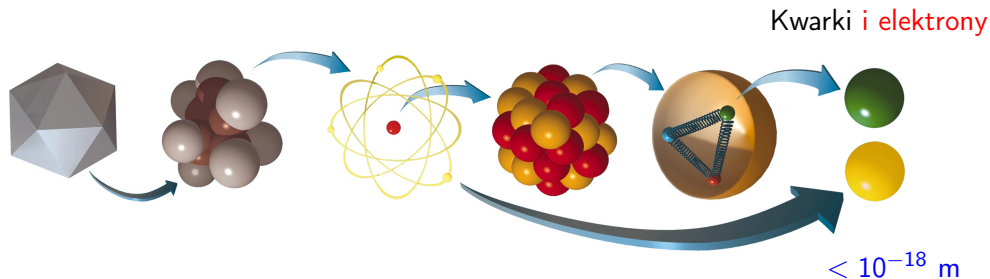


Elektron jest najlżejszą cząstką naładowaną, zalicza się do tzw. leptonów

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

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

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



Elektron jest najbliższą 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 dziś za najbardziej fundamentalne i niepodzielne cząstki materii...

Fermiony

Świat “codzienny” składa się z 3 “cegiełek” (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” składa się z 3 “cegielek” (elektron oraz kwarki u i d) + *neutrino*

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

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

Neutrino potrzebne do opisu rozpadów promieniotwórczych

Fermiony

Świat “codzienny” składa się z 3 “cegiełek” (elektron oraz kwarki u i d) + *neutrino*

Fizyka cząstek \Rightarrow 12 fundamentalnych “cegiełek” 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” składa się z 3 “cegielek” (elektron oraz kwarki u i d) + *neutrino*

Fizyka cząstek \Rightarrow 12 fundamentalnych “cegielek” 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” składa się z 3 “cegielek” (elektron oraz kwarki u i d) + *neutrino*

Fizyka cząstek \Rightarrow 12 fundamentalnych “cegielek” 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 zachodzą na **odległość**. Opisywaliśmy je analizując działające **siły** lub wprowadzając pojęcie **pol**a (grawitacyjnego, elektrycznego...)

Oddziaływania

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

W przypadku **zmiany rozkładu** masy (lub **ładunku**) pole grawitacyjne (elektryczne) zmieniało się **natychmiast w całej przestrzeni** ! Ale jest to sprzeczne z postulatem Einsteina, który mówi 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...)

W przypadku **zmiany rozkładu** masy (lub **ładunku**) pole grawitacyjne (elektryczne) zmieniało się **natychmiast w całej przestrzeni** ! Ale jest to sprzeczne z postulatem Einsteina, który mówi że nic nie może przemieszczać się szybciej od prędkości światła, także oddziaływanie...

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

Oddziaływania

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

W przypadku **zmiany rozkładu** masy (lub ładunku) pole grawitacyjne (elektryczne) zmieniało się **natychmiast w całej przestrzeni** ! Ale jest to sprzeczne z postulatem Einsteina, który mówi że nic nie może przemieszczać się szybciej od prędkości światła, także oddziaływanie...

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

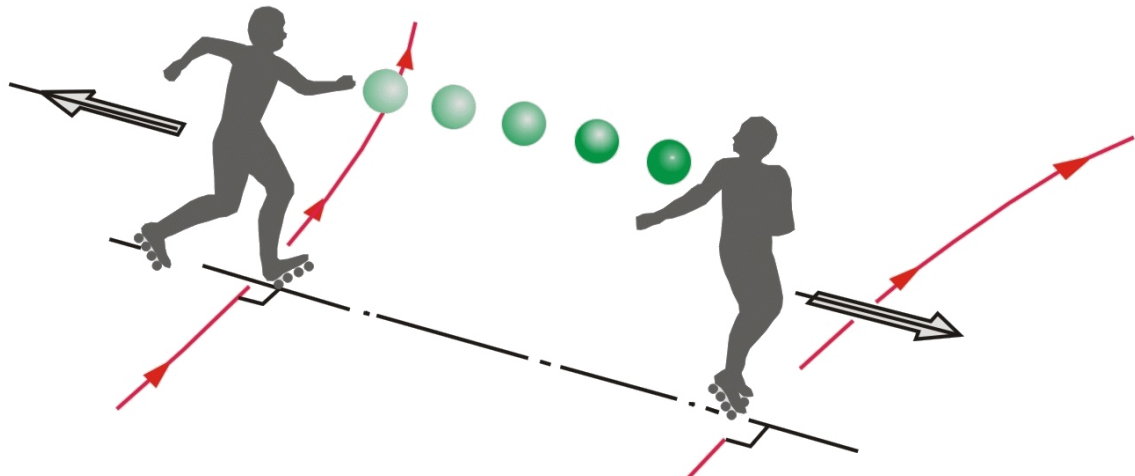
Dwa rodzaje cząstek:

- cząstki materii - **fermiony** (cząstki o spinie półowkowym)
- nośniki oddziaływań - **bozony** (cząstki o spinie całkowitym)

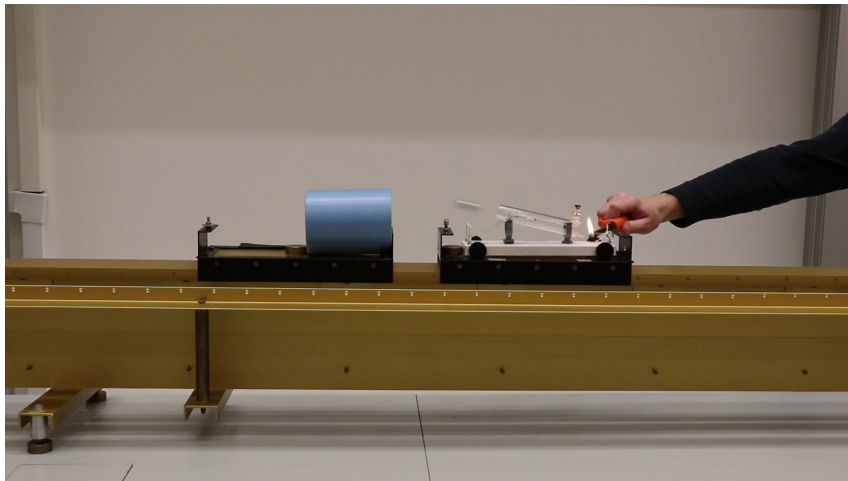
O spinie powiemy więcej za tydzień...

Bozony

Klasyczny obraz opisu oddziaływania poprzez wymianę cząstek-nośników



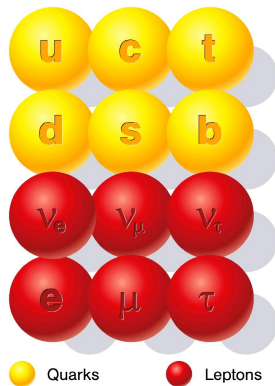
Nośniki oddziaływań - pokaz



Cząstki fundamentalne

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

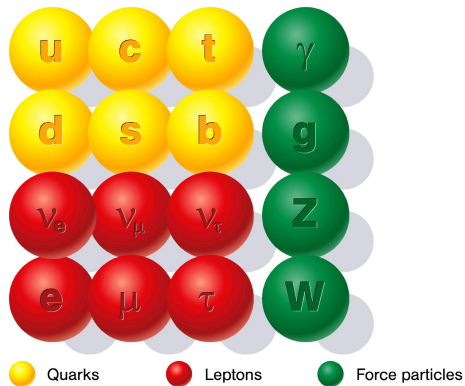
- cząstki materii
kwarki i leptony



Cząstki fundamentalne

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

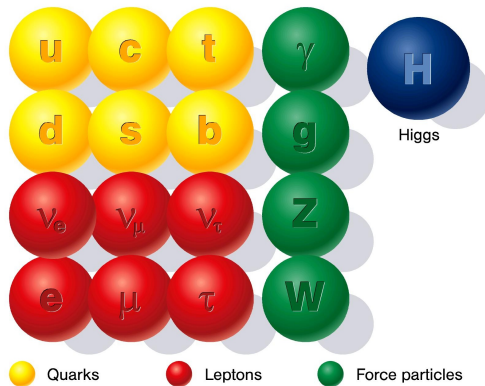
- cząstki materii
kwarki i leptony
- nośniki oddziaływań
 γ , g , W^\pm i Z^0



Cząstki fundamentalne

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

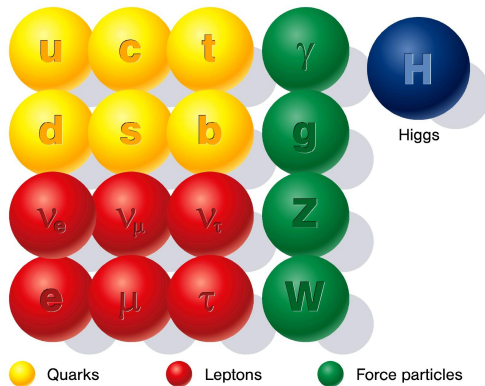
- cząstki materii
kwarki i leptony
- nośniki oddziaływań
 γ , g , W^\pm i Z^0
- bozon Higgsa
konieczny dla spójności modelu
"Nadaje masy" wszystkim cząstkom



Cząstki fundamentalne

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

- cząstki materii
kwarki i leptony
- nośniki oddziaływań
 γ , g , W^\pm i Z^0
- bozon 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, wyniki 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, wyniki 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, wyniki 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 (z dokładnością do czynnika 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 | $0.5 \text{ MeV}/c^2$ |

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 (z dokładnością do czynnika c^2)

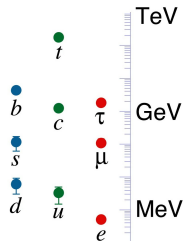
Zgodnie ze wzorem Einsteina: $E = mc^2 \Rightarrow m = E/c^2$ $1 \text{ eV}/c^2 = 1.8 \cdot 10^{-36} \text{ kg}$

$$\text{masa protonu: } 1.7 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \quad \Rightarrow \quad 938 \text{ MeV}/c^2 \quad \approx 1 \text{ GeV}/c^2$$

$$\text{masa elektronu: } 9.1 \cdot 10^{-31} \text{ kg} \quad \Rightarrow \quad 511 \text{ keV}/c^2 \quad \approx 0.5 \text{ MeV}/c^2$$

Fizycy często “zapominają” o czynniku c^2 i mówią, że masa protonu to 1 GeV.

Oznacza to przyjęcie specyficznego układu jednostek, w którym czas mierzymy w metrach światła ($c=1$)



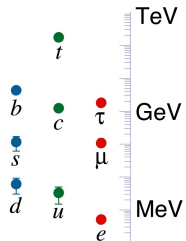
Masy leptonów i kwarków

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

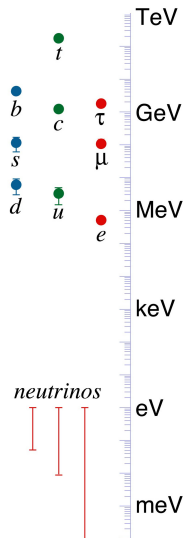
Elektron jest najlżejszą znaną cząstką naładowaną

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

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

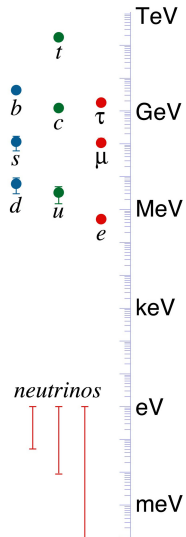
$$m_e \approx 0.5 \text{ MeV}/c^2$$

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, zaniedbywalne..



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!

Może nastąpić produkcja dwóch, trzech, ale też (praktycznie dowolnie) dużej liczby cząstek.

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!

Może nastąpić produkcja dwóch, trzech, ale też (praktycznie dowolnie) dużej liczby cząstek.

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!

Może nastąpić produkcja dwóch, trzech, ale też (praktycznie dowolnie) dużej liczby cząstek.

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

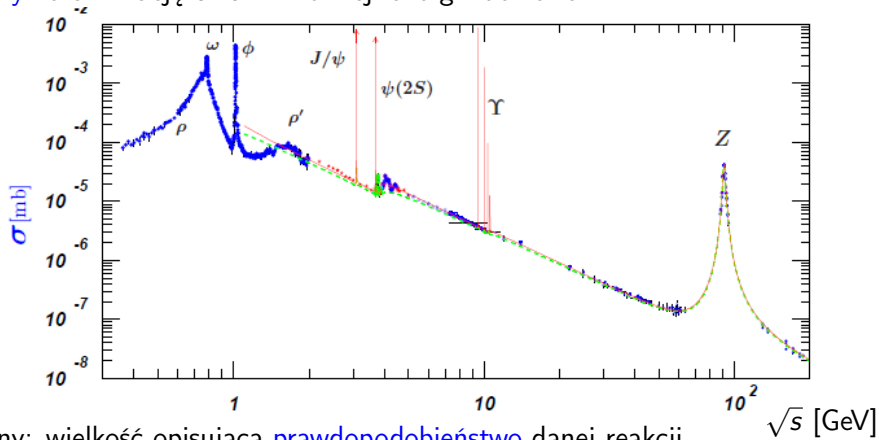
W przypadku produkcji rezonansowej musimy tak dobrać energie zderzających się wiązek (najczęściej elektronów i pozytonów), żeby spełniona była zależność:

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

Musimy dokładnie “wcelować się” energią zderzenia we właściwą wartość (masę cząstki)
⇒ tak odkryto wiele nowych cząstek

Produkcja rezonansowa

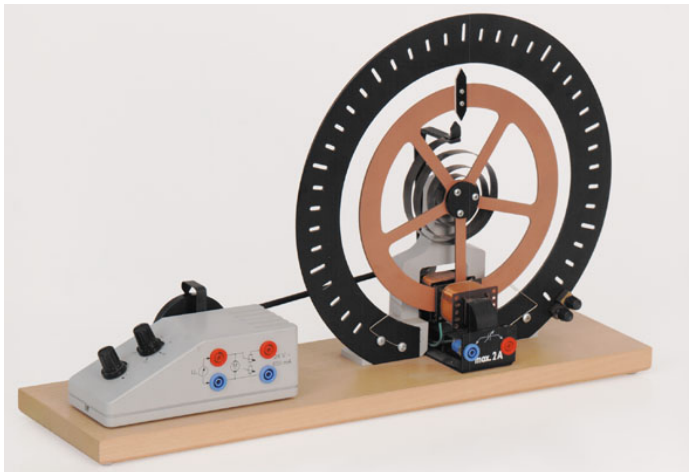
Przekrój czynny na anihilację e^+e^- w funkcji energii zderzenia



Przekrój czynny: wielkość opisująca **prawdopodobieństwo** danej reakcji

Klasycznie odpowiada **polu powierzchni poprzecznej obszaru oddziaływania**

Zjawisko rezonansu - pokaz wahadło torsyjne Pohla



www.leybold-shop.com

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

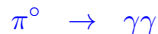
$$K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^+ \pi^-$$

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

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

Ważne: to nie jest rozpad cząstki złożonej na jej składniki! K^+ nie składa się z trzech pionów...

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



Ważne: to nie jest rozpad cząstki złożonej na jej składniki! 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 (“dostępnych”) kanałów rozpadu

Nie można z góry określić, który kanał wybierze rozpadająca się cząstka! Tylko prawdopodobieństwo...

Czas życia

Jedne rozpady promieniotwórcze zachodzą chętniej (częściej, szybciej), a inne rzadziej (wolniej).

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** (τ)

Czas życia

Jedne rozpady promieniotwórcze zachodzą chętniej (częściej, szybciej), a inne rzadziej (wolniej).

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** (τ)

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 promieniotwórcze zachodzą chętniej (częściej, szybciej), a inne rzadziej (wolniej).

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** (τ)

Przyjmijmy, że dokładnie o 15:15 wyprodukowaliśmy cząstkę o $\tau = 1$ h.

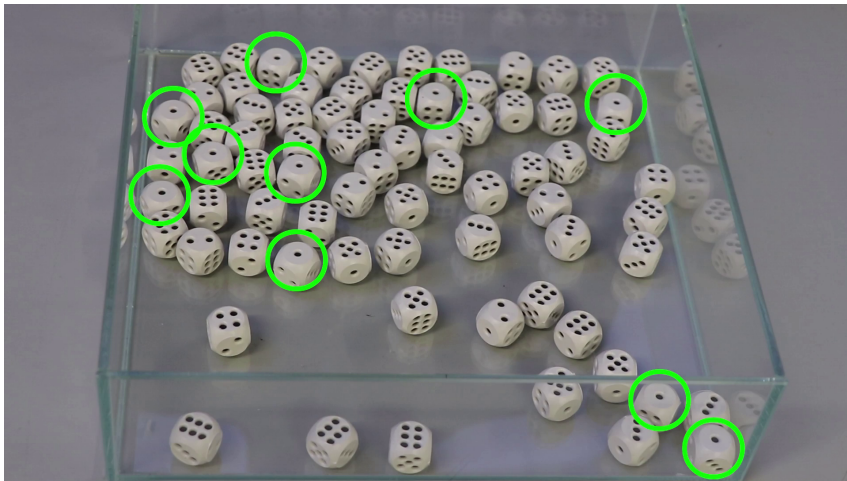
Kiedy nastąpi jej rozpad? Czy zaobserwujemy go przed końcem wykładu?

Okazuje się, że takie **pytanie** jest **źle postawione**. **Zachowanie cząstek**, jest **niedeterministyczne!**

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

W naszym przykładzie mamy 53% szansy zaobserwować rozpad cząstki o $\tau = 1$ h w pierwszej godzinie (45m) wykładu, 83% w ciągu całego wykładu (1h45m)...

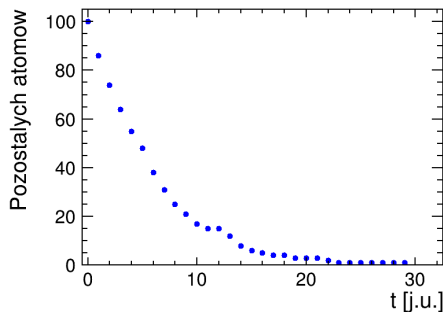
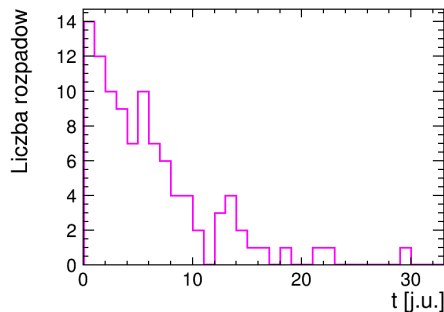
Czas życia - pokaz



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

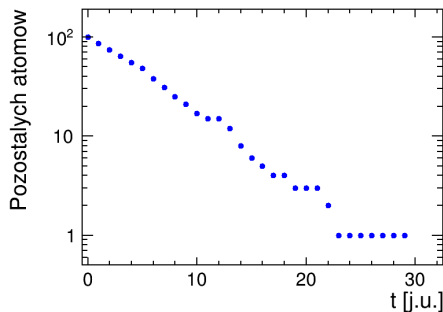
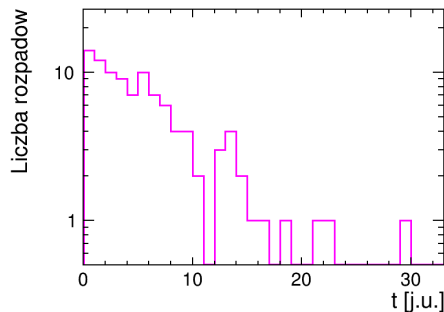
Po każdej turze liczba kości powinna zmniejszyć się średnio o czynnik $5/6$

“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

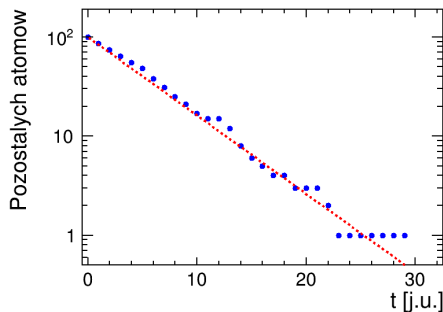
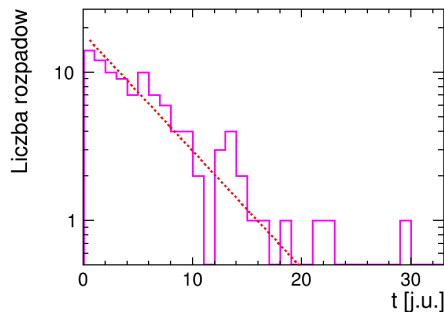
Po każdej turze liczba kości powinna zmniejszyć się średnio o czynnik $5/6$

W skali logarytmicznej obie te zależności to linia prosta \Rightarrow 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 to linia prosta \Rightarrow opisuje je **funkcja wykładnicza**

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

Możemy tylko zmierzyć ile średnio trzeba na ten rozpad czekać \Rightarrow średni czas życia cząstki (τ).

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

Możemy tylko zmierzyć ile średnio trzeba na ten rozpad czekać \Rightarrow średni czas życia cząstki (τ).

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

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

\Rightarrow 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 potrafimy też przewidzieć kiedy to nastąpi.

Możemy tylko zmierzyć ile średnio trzeba na ten rozpad czekać \Rightarrow średni czas życia cząstki (τ).

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

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

\Rightarrow 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 potrafimy też przewidzieć kiedy to nastąpi.

Możemy tylko zmierzyć ile średnio trzeba na ten rozpad czekać \Rightarrow średni czas życia cząstki (τ).

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

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

\Rightarrow 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)

Cząstki stabilne (nie rozpadające się): proton (antyproton), elektron (pozyton) i neutrino.

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

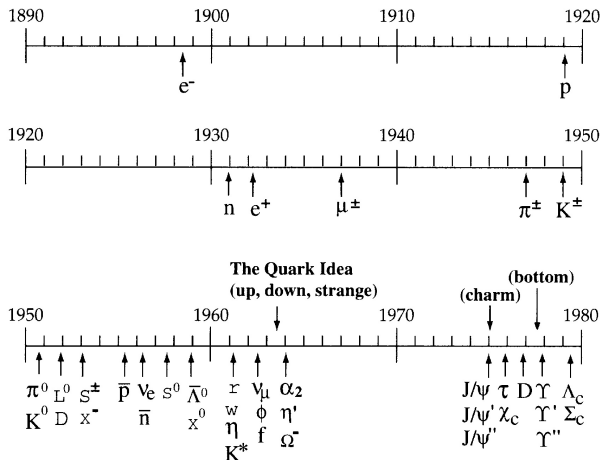
| | | τ | $c\tau$ |
|--------|-----------|--------------------------------|------------------|
| mion | μ | $2.2 \cdot 10^{-6} \text{ s}$ | 660 m |
| kaon | K^{\pm} | $1.2 \cdot 10^{-8} \text{ s}$ | 3.7 m |
| lambda | Λ | $2.6 \cdot 10^{-10} \text{ s}$ | 7.9 cm |
| mezon | B^{\pm} | $1.7 \cdot 10^{-12}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

$c\tau$ - czas życia przeliczony na jednostki odległości \sim odległość jaką może pokonać cząstka

Wartość szacunkowa! Pokazuje rząd wielkości. W konkretnym przypadku trzeba to przemnożyć przez czynnik uwzględniający prędkość cząstki i dylatację czasu (!).

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

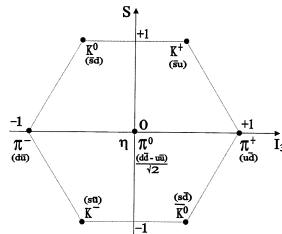
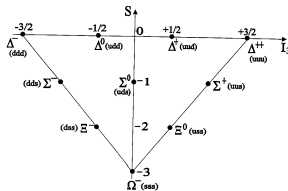
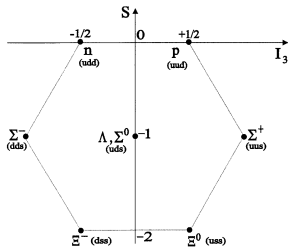
W latach 50 i 60 XX w. lawinowo odkrywano nowe cząstki.
 (m.in. dzięki wynalezieniu komory pęcherzykowej i synchrotronu)



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

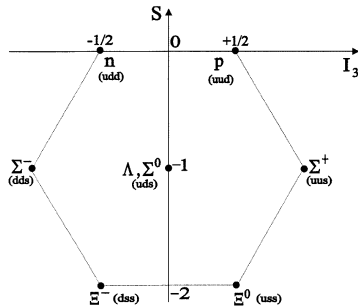
W połowie lat 60 obserwowana **symetria** w świecie znanych **cząstek** elementarnych doprowadziła ich do hipotezy istnienia **kwarków**

Trzy kwarki tworzyłyby bariony:

$$p = (uud)$$

$$n = (udd)$$

$$\Lambda = (uds)$$

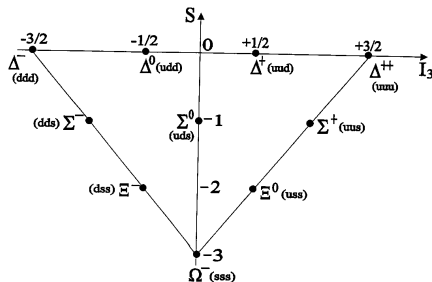


Model Gell-Mann'a i Zweig'a

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

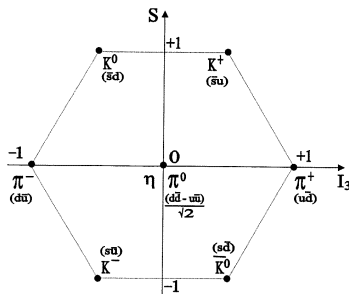
W połowie lat 60 obserwowana **symetria** w świecie znanych **cząstek** elementarnych doprowadziła ich do hipotezy istnienia **kwarków**

Trzy kwarki tworzyłyby bariony:

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

Para kwark-antykwarik mezony:

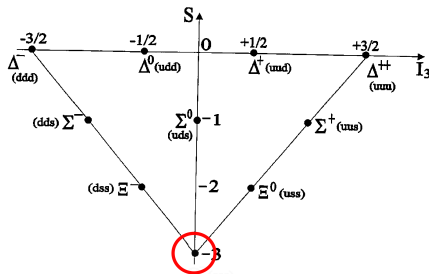
$$\begin{aligned}
 K^+ &= (u\bar{s}) \\
 \pi^+ &= (u\bar{d})
 \end{aligned}$$



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

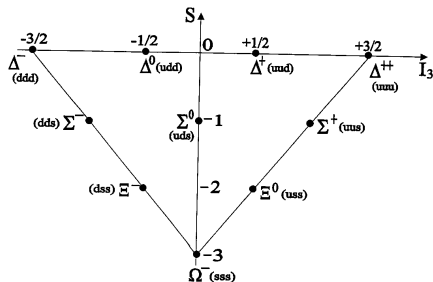
Model Gell-Mann'a i Zweig'a

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

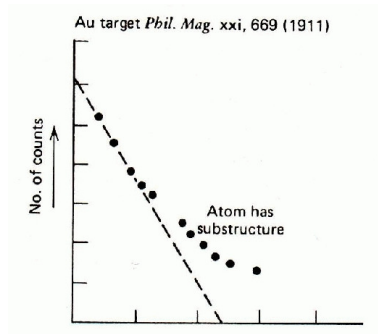
Istota pomiaru

Rozpraszanie cząstek α na cienkiej złotej folii



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

Obserwowany rozkład kątów:



kąt rozproszenia $\theta \rightarrow$

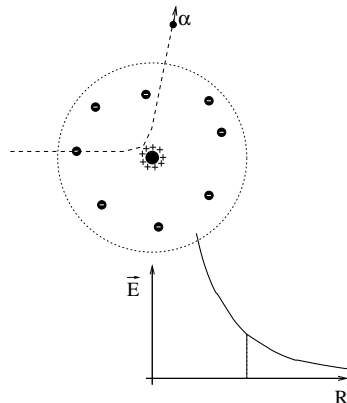
odbiegał od przewidywań modelu rozciągniętego rozkładu ładunku w atomie (linia przerywana)

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**, ΔE i **przekaz pędu**, $\Delta \vec{p}$. Najczęściej opisujemy to wprowadzając zmienną

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

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

Przekaz czteropędu Q^2 można wyznaczyć mierząc energię E' i kąt rozproszenia θ “pocisku”:

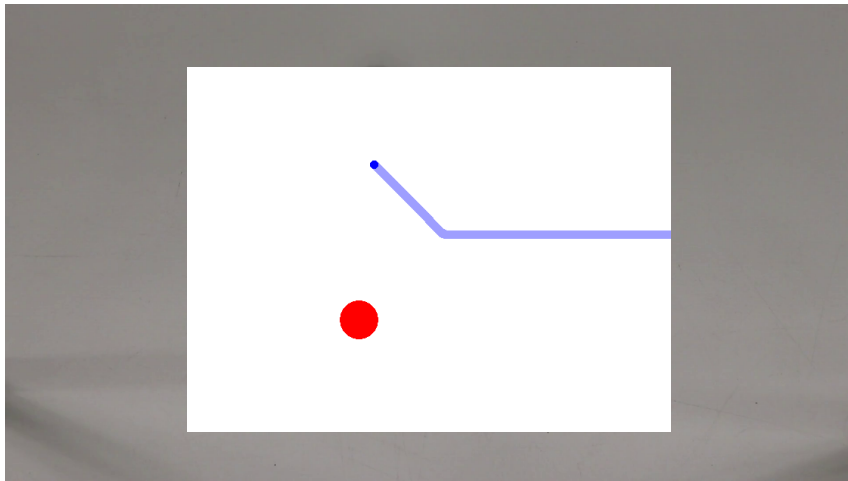
$$Q^2 = 2 E E' (1 - \cos \theta)$$

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

Rozpraszanie elastyczne - pokaz



Rozpraszanie elastyczne - pokaz i model

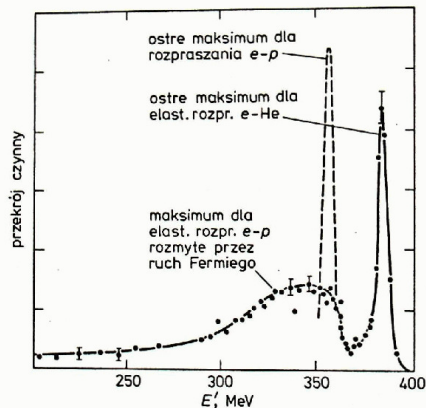


Rozpraszanie e He

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

$$2 M (E - E') = Q^2$$

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



Rozpraszanie e He

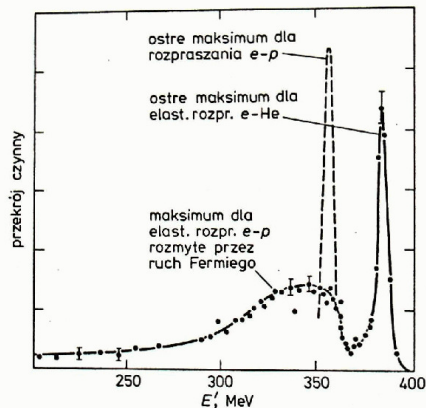
Jeśli oddziaływanie jest elastyczne to **energia** rozproszonego pocisku jest **jednoznacznie określona** przez energię początkową, kąt rozproszenia i **masę tarczy (M)**. Łączy je relacja

$$2 M (E - E') = Q^2$$

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

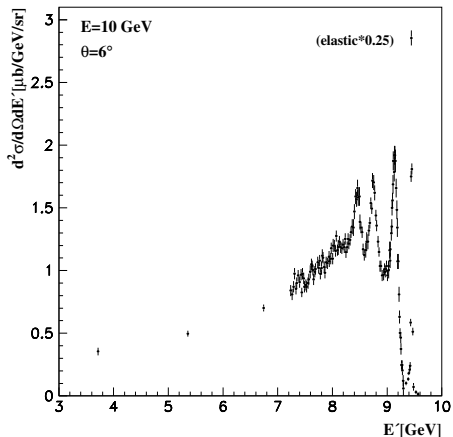
Oprócz elastycznego rozpraszania $e - He$ ($M = M_{He}$) widoczne jest rozpraszanie $e - p$ ($M = m_p$)

\Rightarrow widoczna podstruktura jądra



Rozpraszanie $e p$

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



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

Rozpraszanie elastyczne

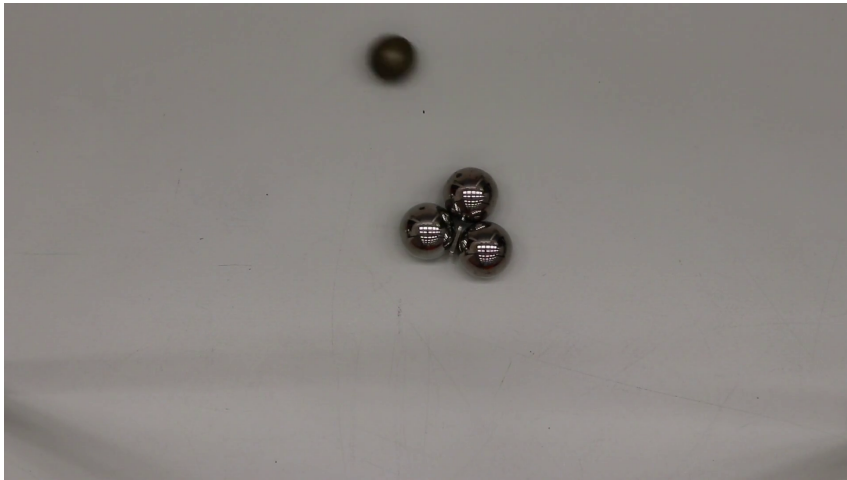
\Rightarrow dominuje małe Q^2 , "miękkie" oddziaływanie

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



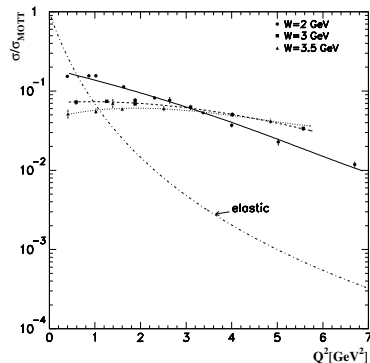
Rozpraszanie nieelastyczne (duże Q^2) - pokaz



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



Rozpraszanie $e p$

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

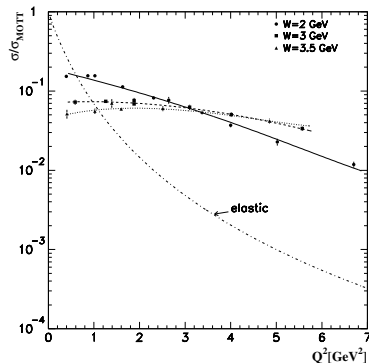


Ta sama zależność od Q^2 !!!
stosunek w przybliżeniu jest stały

Model zaproponowany przez **Feynman'a** w 1969 roku:

elastyczne rozpraszanie na punktowych **partonach** w protonie

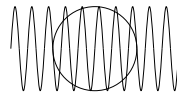
Według Feynmana partony powinny być **lekkie** i **quasi-swobodne** (ich oddziaływania są słabe w porównaniu z rozproszeniem)



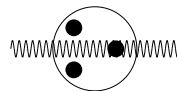
Dlaczego dopiero doświadczenia w SLAC pozwoliły nam dostrzec partony?

Ze wzrostem przekazu czteropędu Q^2 maleje długość fali wymienianego fotonu:

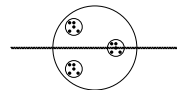
“miękki” foton, małe Q^2 : rozpraszanie na jądrze



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.

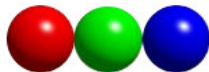
“Kolor” kwarków nie jest “prawdziwy”
to tylko analogia z barwami światła !!!

Składanie kolorów - pokaz



Kolor

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

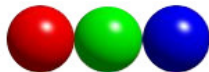


Anty-kwarki mają odpowiednie anty-kolory (kolory "ujemne"): \bar{B} , \bar{R} , \bar{G}



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}



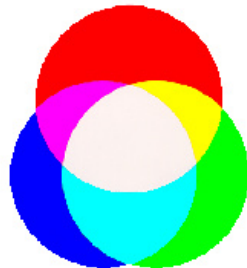
Hadrony

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+antykwar)

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

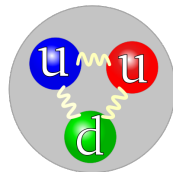
Szczególną cechą oddziaływań silnych jest to, że bezmasowe nośniki oddziaływań, **gluony**, też niosą **ładunek kolorowy** (odpowiadający kombinacji kolor+antykolor).

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

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

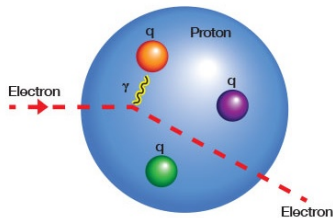
Oddziaływanie silne wiążące kwarki **przypomina** sprężynki łączące kulki:

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



Asymptotyczna swoboda

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



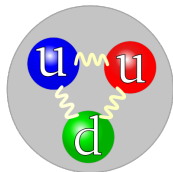
Przez **bardzo krótki czas zderzenia** kwark zachowuje się jakby był swobodny, wpływ pozostałych kwarków (i gluonów) w protonie można zaniedbać.

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

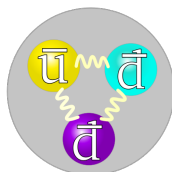
Oddziaływania silne wciąż pozostają bardzo istotne, ale na kolejnym etapie. Gdy z rozbitego protonu powstaje lawina nowych cząstek...

Uwięzienie kwarków

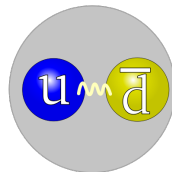
Gdy oddziaływania są “miękkie” (małe Q^2) to siły kolorowe zmuszają kwarki do łączenia się w “białe” układy.



barion



antybarion

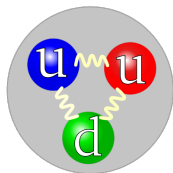


mezon

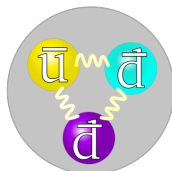
Tylko takie układy kwarków mogą się dodać od siebie na duże odległości.

Uwięzienie kwarków

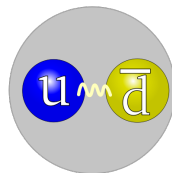
Gdy oddziaływania są “miękkie” (małe Q^2) to siły kolorowe zmuszają kwarki do łączenia się w “białe” układy.



barion



antybarion



mezon

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

Co się dzieje gdy próbujemy wyrwać kwark z protonu?

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

Nigdy nie obserwujemy swobodnego kwarku!