

# Wszechświat Cząstek Elementarnych dla Humanistów

## Oddziaływania silne

Aleksander Filip Żarnecki

Wykład ogólnouniwersytecki

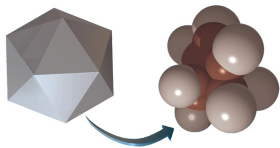


31 października 2023

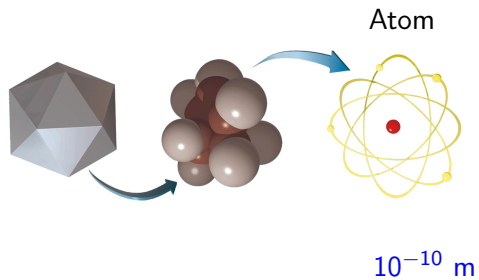
- 1 Budowa materii
- 2 Własności cząstek
- 3 Hipoteza kwarków
- 4 Model partonowy
- 5 Chromodynamika kwantowa

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

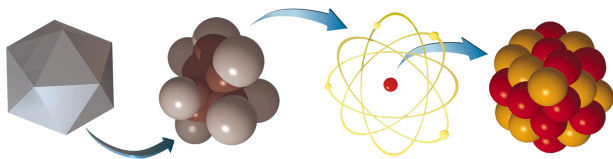
Cząsteczka



$10^{-9}$  m

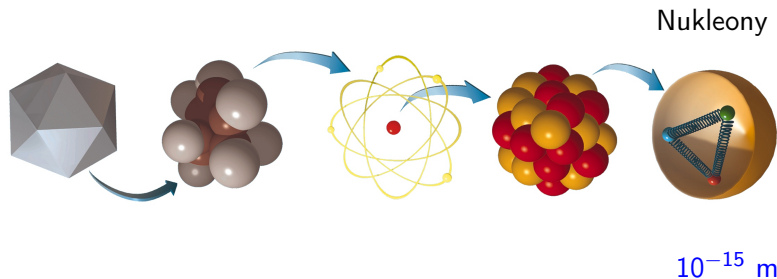


Jądro atomowe i elektrony



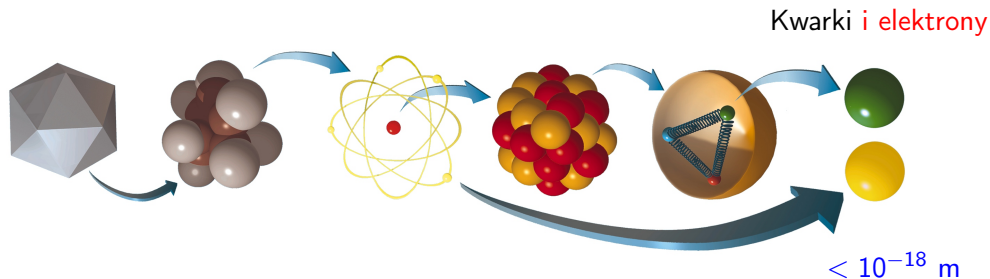
$10^{-14}$  m

**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**,



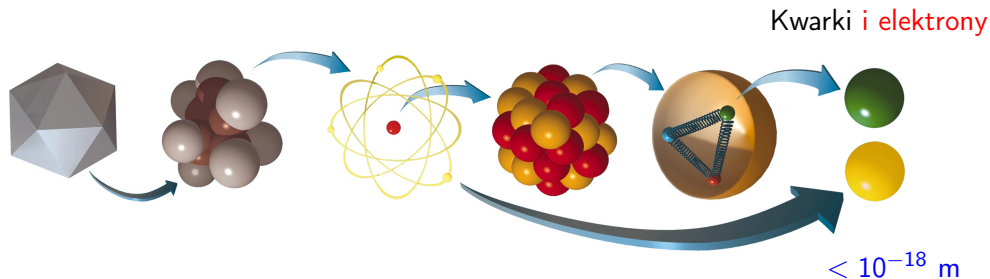
**Elektron** jest najlżejszą cząstką naładowaną, zalicza się do tzw. leptonów

**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             |                  |
|--|------------------------|--|--------------------|------------------|
|  | $e$<br><i>elektron</i> |  | $d$<br><i>down</i> | $u$<br><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             |
|--|------------------------|--------------------------------|--------------------|
|  | $e$<br><i>elektron</i> | $\nu_e$<br><i>neutrino el.</i> |                    |
|  |                        |                                | $d$<br><i>down</i> |
|  |                        |                                | $u$<br><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 | $e$<br><i>elektron</i> | $\nu_e$<br><i>neutrino el.</i>        | $d$<br><i>down</i>                      | $u$<br><i>up</i>                    |
| pokolenie 2 | $\mu$<br><i>mion</i>   | $\nu_\mu$<br><i>neutrino mionowe</i>  | $s$<br><i>strange</i>                   | $c$<br><i>charm</i>                 |
| pokolenie 3 | $\tau$<br><i>taon</i>  | $\nu_\tau$<br><i>neutrino taonowe</i> | $b$<br><i>beauty</i><br><i>(bottom)</i> | $t$<br><i>top</i><br><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 | $e$<br><i>elektron</i> | $\nu_e$<br><i>neutrino el.</i>        | $d$<br><i>down</i>                      | $u$<br><i>up</i>                    |
| pokolenie 2 | $\mu$<br><i>mion</i>   | $\nu_\mu$<br><i>neutrino mionowe</i>  | $s$<br><i>strange</i>                   | $c$<br><i>charm</i>                 |
| pokolenie 3 | $\tau$<br><i>taon</i>  | $\nu_\tau$<br><i>neutrino taonowe</i> | $b$<br><i>beauty</i><br><i>(bottom)</i> | $t$<br><i>top</i><br><i>(truth)</i> |
| ładunek [e] | -1                     | 0                                     | -1/3                                    | +2/3                                |

+ anty-fermiony (kolejnych 12)

## 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 | $e$<br><i>elektron</i> | $\nu_e$<br><i>neutrino el.</i>        | $d$<br><i>down</i>                      | $u$<br><i>up</i>                    |
| pokolenie 2 | $\mu$<br><i>mion</i>   | $\nu_\mu$<br><i>neutrino mionowe</i>  | $s$<br><i>strange</i>                   | $c$<br><i>charm</i>                 |
| pokolenie 3 | $\tau$<br><i>taon</i>  | $\nu_\tau$<br><i>neutrino taonowe</i> | $b$<br><i>beauty</i><br><i>(bottom)</i> | $t$<br><i>top</i><br><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...)

## 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**

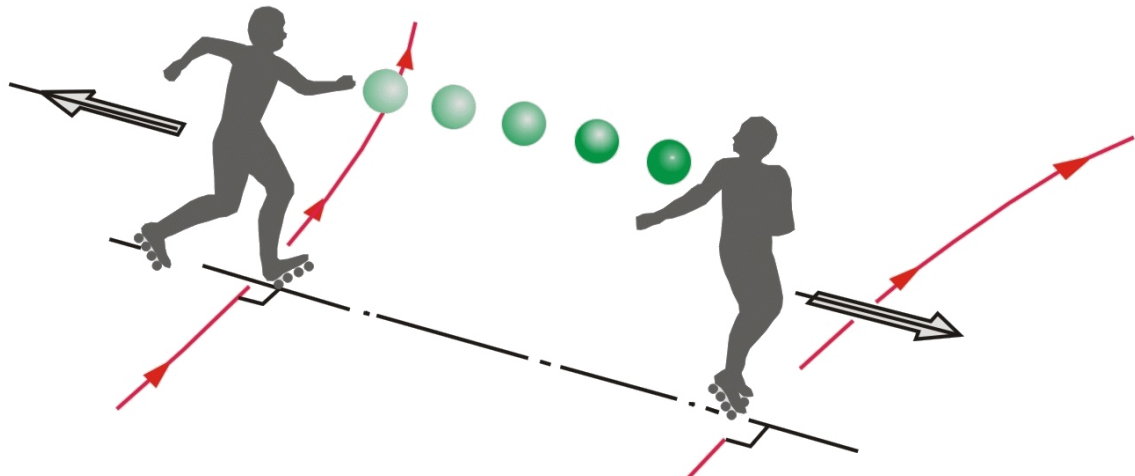
### Dwa rodzaje cząstek:

o spinie będziemy jeszcze mówić później

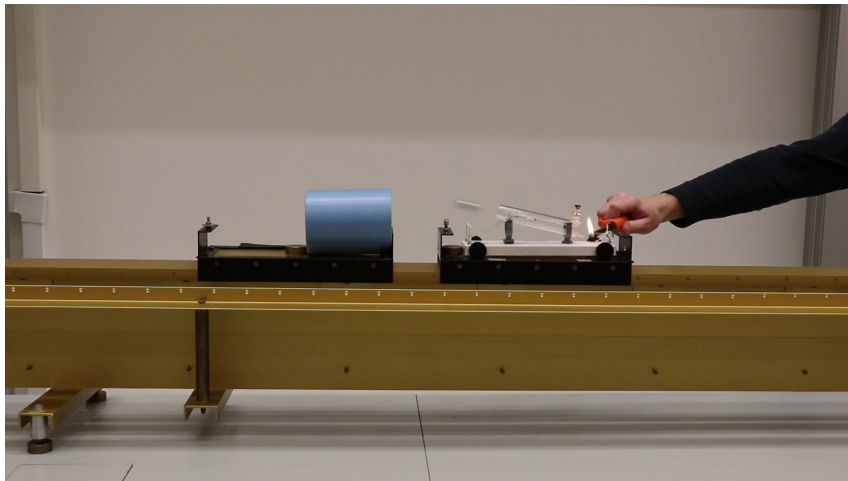
- cząstki materii - **fermiony** (cząstki o spinie  $\frac{1}{2}$ )
- nośniki oddziaływań - **bozony** (cząstki o spinie całkowitym)

## Bozony

Klasyczny obraz opisu oddziaływania poprzez wymianę cząstek-nośników



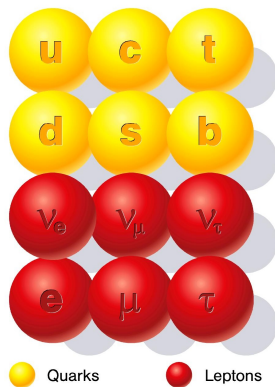
## Nośniki oddziaływań - pokaz



## Cząstki fundamentalne

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

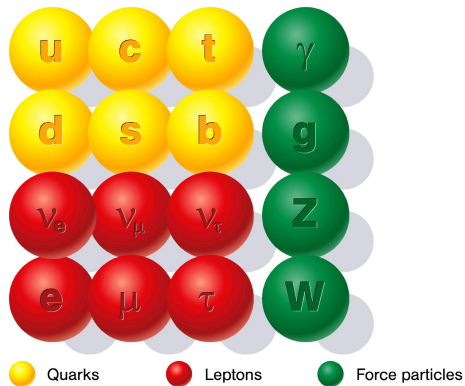
- cząstki materii  
kwarki i leptony



## Cząstki fundamentalne

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

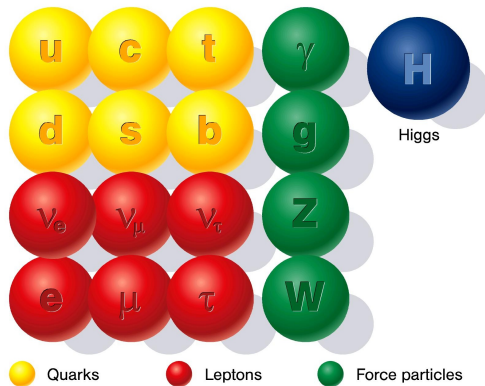
- cząstki materii  
kwarki i leptony
- nośniki oddziaływań  
 $\gamma$ ,  $g$ ,  $W^\pm$  i  $Z^0$



## Cząstki fundamentalne

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

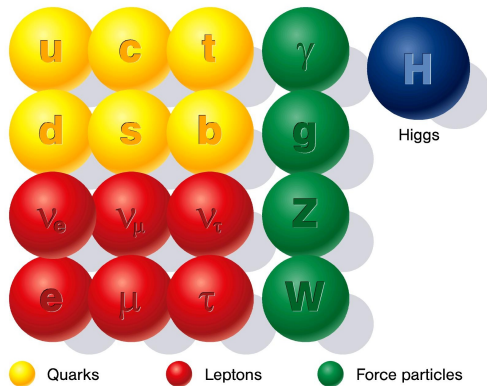
- cząstki materii  
kwarki i leptony
- nośniki oddziaływań  
 $\gamma$ ,  $g$ ,  $W^\pm$  i  $Z^0$
- bozon Higgsa  
konieczny dla spójności modelu  
"Nadaje masy" wszystkim cząstkom



## Cząstki fundamentalne

Cząstki, które obecnie uważamy za **fundamentalne** (punktowe i 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, 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  $c^2$ )

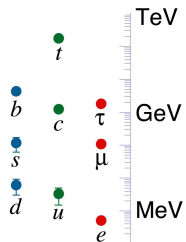
Zgodnie ze wzorem Einsteina:  $E = mc^2 \Rightarrow m = E/c^2$      $1 \text{ eV}/c^2 = 1.8 \cdot 10^{-36} \text{ kg}$

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

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

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

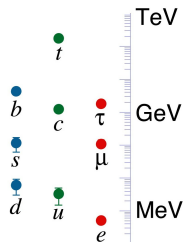
Elektron jest najlżejszą znaną cząstką naładowaną

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

Inne naładowane fermiony są znacznie (!) cięższe.

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





## Masy leptonów i kwarków

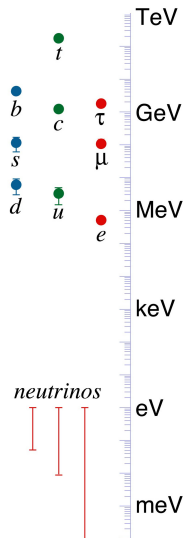
Elektron jest najlżejszą znaną cząstką naładowaną

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

Inne naładowane fermiony są znacznie (!) cięższe.

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

Masy kwarków są wyznaczone pośrednio, zależą od przyjętego modelu



## Masy leptonów i kwarków

Elektron jest najlżejszą znaną cząstką naładowaną

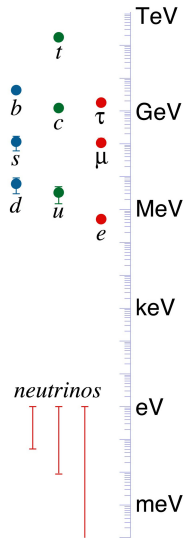
$$m_e \approx 0.5 \text{ MeV}/c^2$$

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, 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.

|                |         |        |          |                    |
|----------------|---------|--------|----------|--------------------|
| <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!

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.

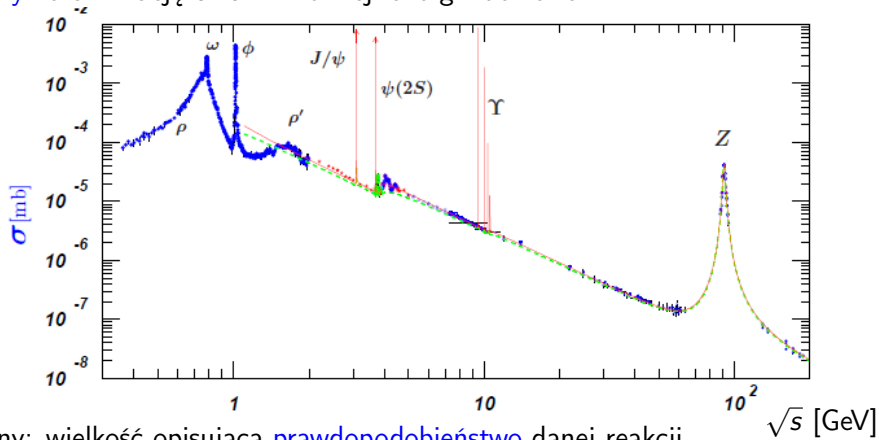
W przypadku produkcji rezonansowej musimy tak dobrać energie zderzających się wiązek (najczęściej elektronów i pozytonów), żeby spełniona była zależność:

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

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**

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...

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

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

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

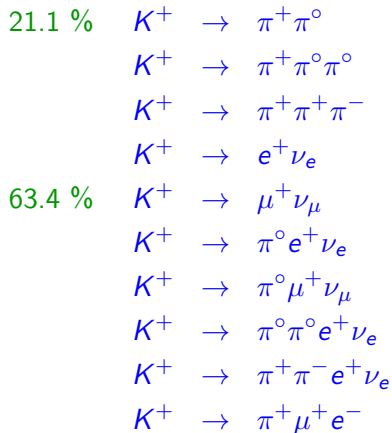
$$K^+ \rightarrow \pi^0 \pi^0 e^+ \nu_e$$

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

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

Przykład:

BR (prawdopodobieństwo rozpadu)



Przykład:

BR (prawdopodobieństwo rozpadu)

|        |       |               |                      |
|--------|-------|---------------|----------------------|
| 21.1 % | $K^+$ | $\rightarrow$ | $\pi^+\pi^0$         |
| 1.7 %  | $K^+$ | $\rightarrow$ | $\pi^+\pi^0\pi^0$    |
| 5.6 %  | $K^+$ | $\rightarrow$ | $\pi^+\pi^+\pi^-$    |
|        | $K^+$ | $\rightarrow$ | $e^+\nu_e$           |
| 63.4 % | $K^+$ | $\rightarrow$ | $\mu^+\nu_\mu$       |
| 4.9 %  | $K^+$ | $\rightarrow$ | $\pi^0e^+\nu_e$      |
| 3.3 %  | $K^+$ | $\rightarrow$ | $\pi^0\mu^+\nu_\mu$  |
|        | $K^+$ | $\rightarrow$ | $\pi^0\pi^0e^+\nu_e$ |
|        | $K^+$ | $\rightarrow$ | $\pi^+\pi^-e^+\nu_e$ |
|        | $K^+$ | $\rightarrow$ | $\pi^+\mu^+e^-$      |



Przykład:

BR (prawdopodobieństwo rozpadu)

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

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

0.0021 %  $K^+ \rightarrow \pi^0 \pi^0 e^+ \nu_e$

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 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** ( $\tau$ )

## 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** ( $\tau$ )

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 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** ( $\tau$ )

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

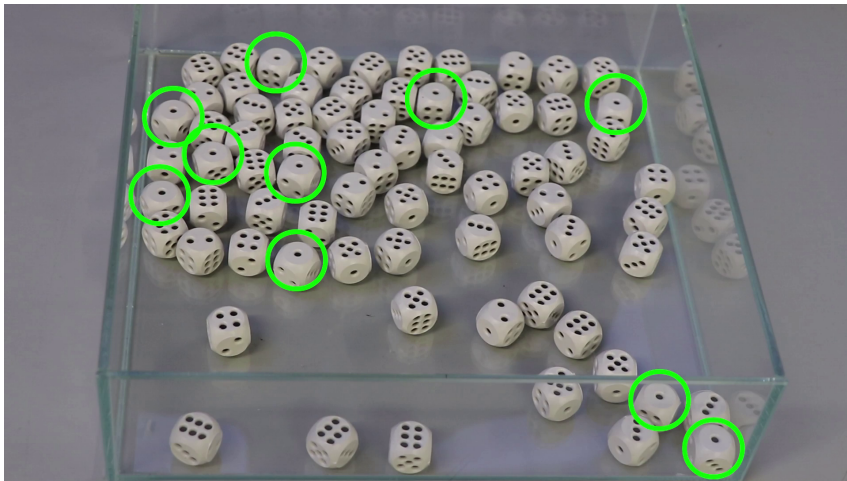
Kiedy nastąpi jej rozpad? Czy zaobserwujemy go przed końcem wykładu?

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

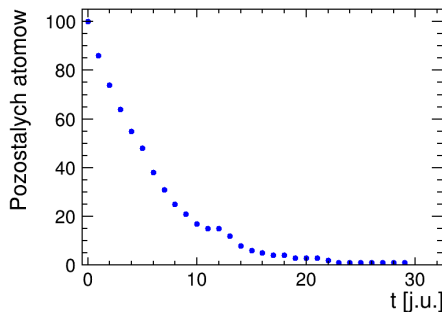
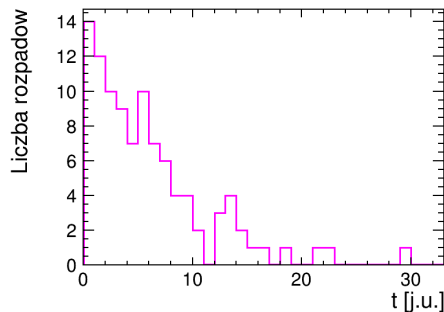
## Czas życia - pokaz



## 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

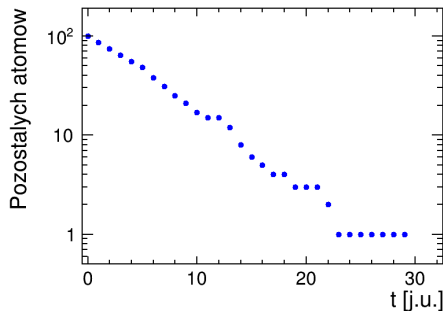
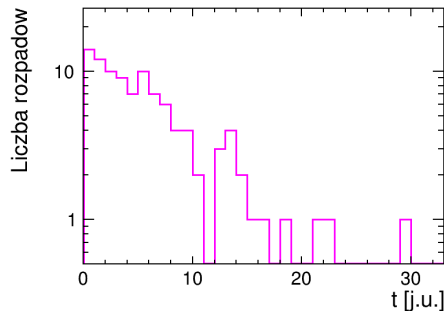
Po każdej turze liczba kości powinna zmniejszyć się średnio o czynnik  $5/6$

“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

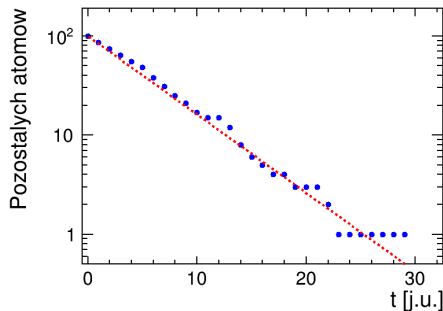
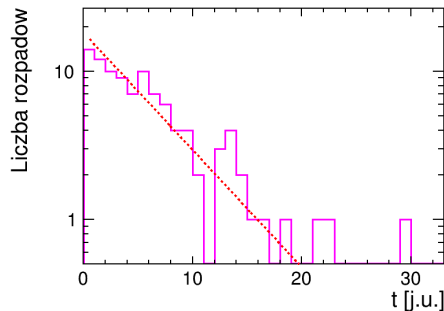
Po każdej turze liczba kości powinna zmniejszyć się średnio o czynnik  $5/6$

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 ( $\tau$ ).

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 ( $\tau$ ).

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

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

$\Rightarrow$  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 potrafimy też przewidzieć kiedy to nastąpi.

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

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

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

$\Rightarrow$  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 potrafimy też przewidzieć kiedy to nastąpi.

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

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

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

$\Rightarrow$  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)

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

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

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

$c\tau$  - czas życia przeliczony na 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 (!).

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 identycznym stanie, czyli stanie opisanym przez **ten sam zestaw liczb kwantowych**.  $\Rightarrow$  **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 identycznym stanie, czyli stanie opisanym przez **ten sam zestaw liczb kwantowych**.  $\Rightarrow$  **Zakaz Pauliego**

Ale obserwowano po dwa elektrony  $\Rightarrow$  potrzebne było wprowadzenie nowej **liczby kwantowej**. Jest nią liczba określająca orientację spinu - **własnego moment pędu** elektronu.

Mechanika kwantowa przewiduje, że rzut spinu elektronu  $s$  może przyjąć tylko dwie wartości:

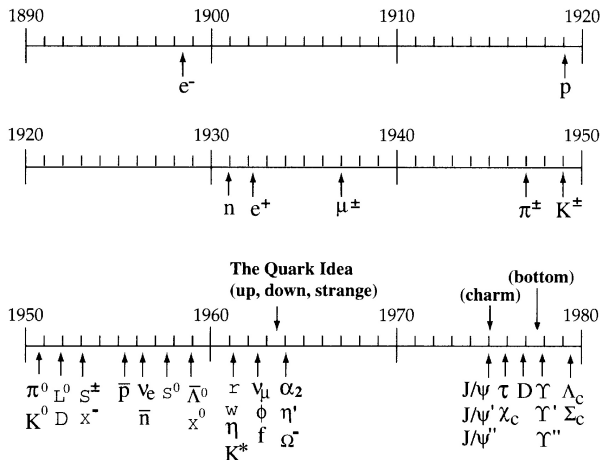
$$\text{(dla dowolnego kierunku osi Z)} \quad s_z = +\frac{1}{2}\hbar \quad \text{lub} \quad s_z = -\frac{1}{2}\hbar$$

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

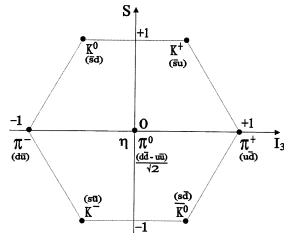
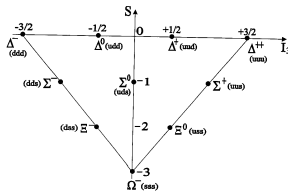
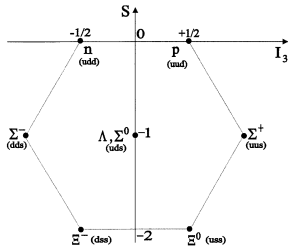
W latach 50 i 60 XX w. lawinowo odkrywano nowe cząstki.  
 (m.in. dzięki wynalezieniu komory pęcherzykowej i synchrotronu)



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

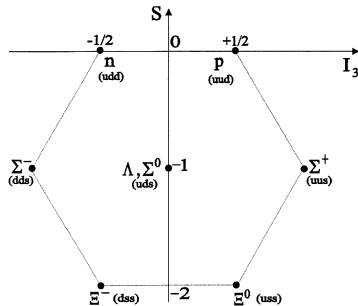
W połowie lat 60 obserwowana **symetria** w świecie znanych **cząstek** elementarnych doprowadziła ich do hipotezy istnienia **kwarków**

Trzy kwarki tworzyłyby bariony:

$$p = (uud)$$

$$n = (udd)$$

$$\Lambda = (uds)$$

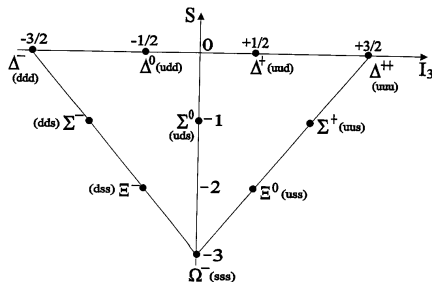


## Model Gell-Mann'a i Zweig'a

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

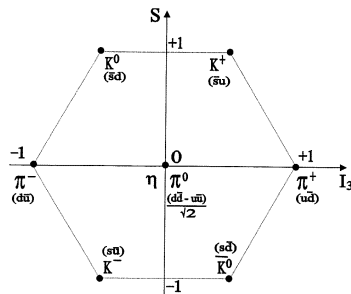
W połowie lat 60 obserwowana **symetria** w świecie znanych **cząstek** elementarnych doprowadziła ich do hipotezy istnienia **kwarków**

Trzy kwarki tworzyłyby bariony:

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

Para kwark-antykwarik mezony:

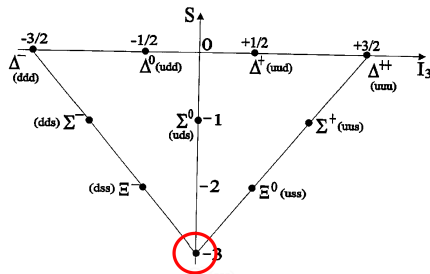
$$\begin{aligned}
 K^+ &= (u\bar{s}) \\
 \pi^+ &= (u\bar{d})
 \end{aligned}$$



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

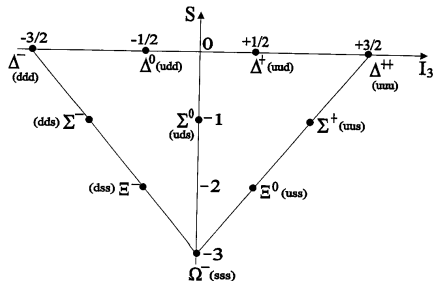
## Model Gell-Mann'a i Zweig'a

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

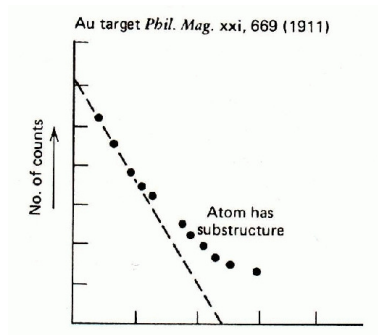
## Istota pomiaru

Rozpraszanie cząstek  $\alpha$  na cienkiej złotej folii



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

Obserwowany rozkład kątów:



**kąt rozproszenia  $\theta \rightarrow$**

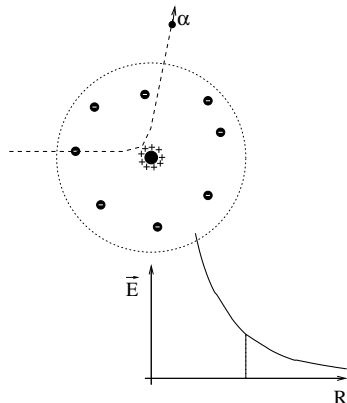
odbiegał od przewidywań modelu rozciągniętego rozkładu ładunku w atomie (linia przerywana)

## Istota pomiaru

Rozpraszanie cząstek  $\alpha$  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**,  $\Delta E$  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  $\theta$  “pocisku”:

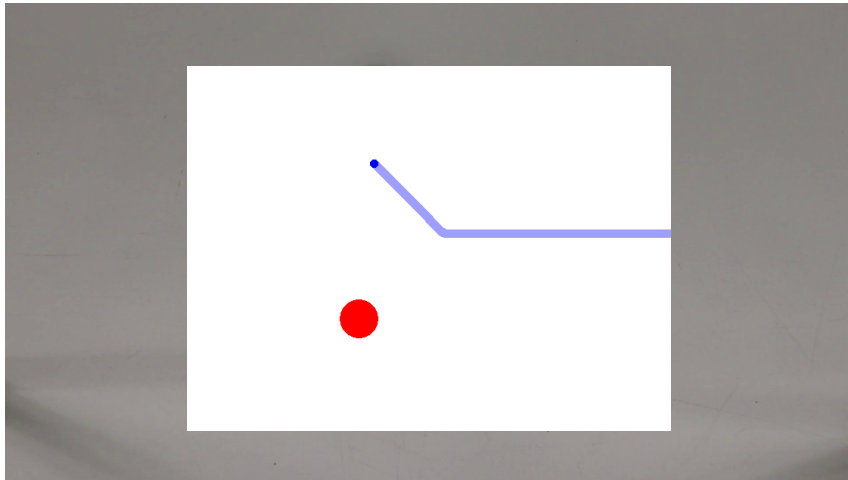
$$Q^2 = 2 E E' (1 - \cos \theta)$$

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

## Rozpraszanie elastyczne - pokaz



## Rozpraszanie elastyczne - pokaz i model

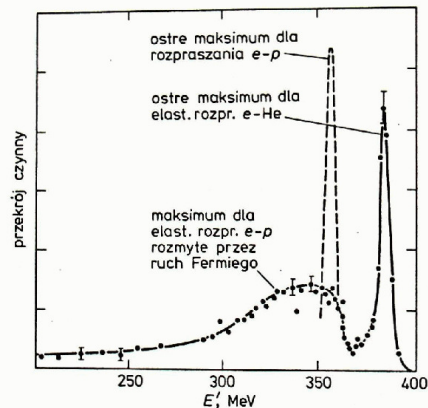


## Rozpraszanie $e$ $He$

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

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

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





## Rozpraszanie $e$ $He$

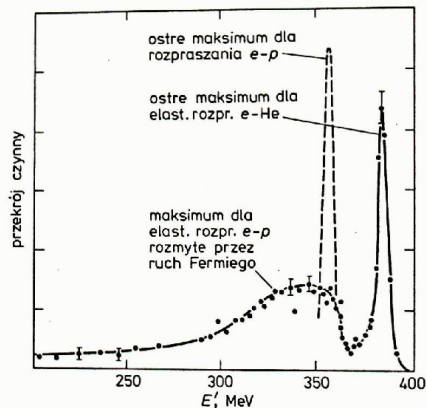
Jeśli oddziaływanie jest elastyczne to **energia** rozproszonego pocisku jest **jednoznacznie określona** przez energię początkową, kąt rozproszenia i **masę tarczy ( $M$ )**. Łączy je relacja

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

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

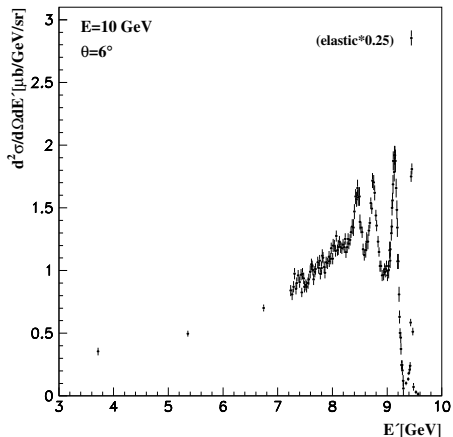
Oprócz elastycznego rozpraszania  $e - He$  ( $M = M_{He}$ ) widoczne jest rozpraszanie  $e - p$  ( $M = m_p$ )

$\Rightarrow$  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

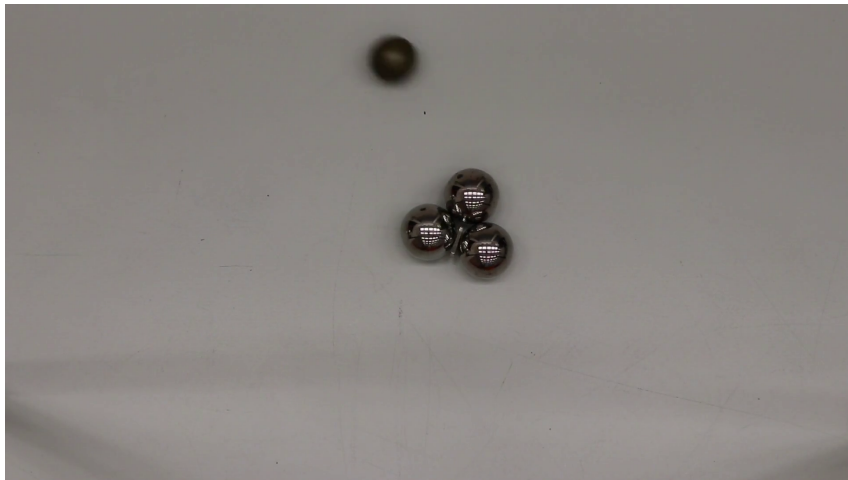
$\Rightarrow$  dominuje małe  $Q^2$ , "miękkie" oddziaływanie

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

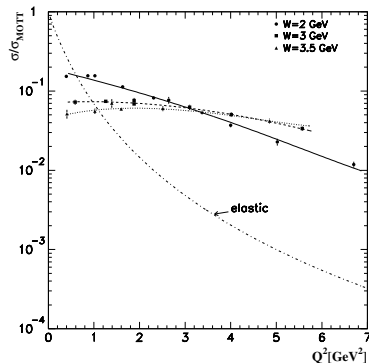


## Rozpraszanie $e p$

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



**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** ( $\sigma_{Mott}$ )

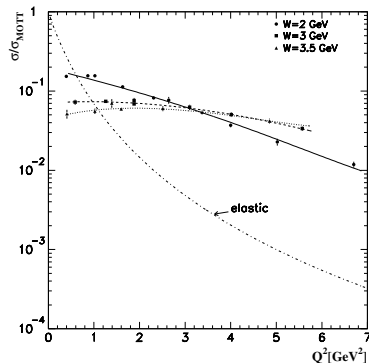


**Ta sama zależność od  $Q^2$  !!!**  
stosunek w przybliżeniu jest stały

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

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

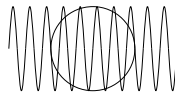
Według Feynmana partony powinny być **lekkie** i **quasi-swobodne** (ich oddziaływania są słabe w porównaniu z rozproszeniem)



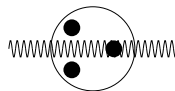
Dlaczego dopiero doświadczenia w SLAC pozwoliły nam dostrzec partony?

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

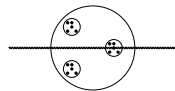
“miękki” foton, małe  $Q^2$ : rozpraszanie na jądrze



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

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

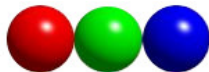
“Kolor” kwarków nie jest “prawdziwy”  
to tylko analogia z barwami światła !!!

## Składanie kolorów - pokaz

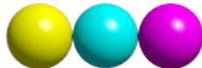


## Kolor

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

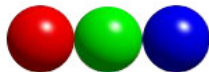


Anty-kwarki mają odpowiednie anty-kolory (kolory "ujemne"):  $\bar{B}$ ,  $\bar{R}$ ,  $\bar{G}$

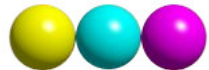


## Kolor

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+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

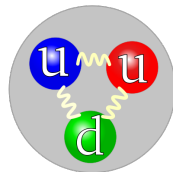
Szczególną cechą oddziaływań silnych jest to, że bezmasowe nośniki oddziaływań, **gluony**, też niosą **ładunek kolorowy** (odpowiadający kombinacji kolor+antykolor).

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

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

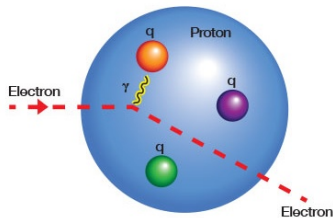
Oddziaływanie silne wiążące kwarki **przypomina** sprężynki łączące kulki:

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



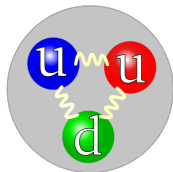
Przez **bardzo krótki czas zderzenia** kwark zachowuje się jakby był swobodny, wpływ pozostałych kwarków (i gluonów) w protonie można zaniedbać.

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

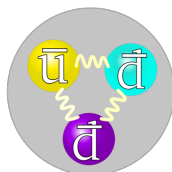
Oddziaływania silne wciąż pozostają bardzo istotne, ale na kolejnym etapie. Gdy z rozbitego protonu powstaje lawina nowych cząstek...

## Uwięzienie kwarków

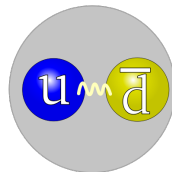
Gdy oddziaływania są “miękkie” (małe  $Q^2$ ) to siły kolorowe zmuszają kwarki do łączenia się w “białe” układy.



barion



antybarion

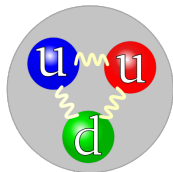


mezon

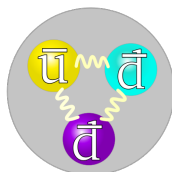
Tylko takie układy kwarków mogą się dodać od siebie na duże odległości.

## Uwięzienie kwarków

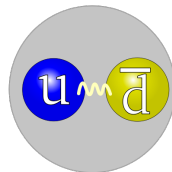
Gdy oddziaływania są “miękkie” (małe  $Q^2$ ) to siły kolorowe zmuszają kwarki do łączenia się w “białe” układy.



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!