

INTERNATIONAL MASTERCLASSES HANDS ON PARTICLE PHYSICS

Dziwność – sygnatura plazmy kwarkowo – gluonowej

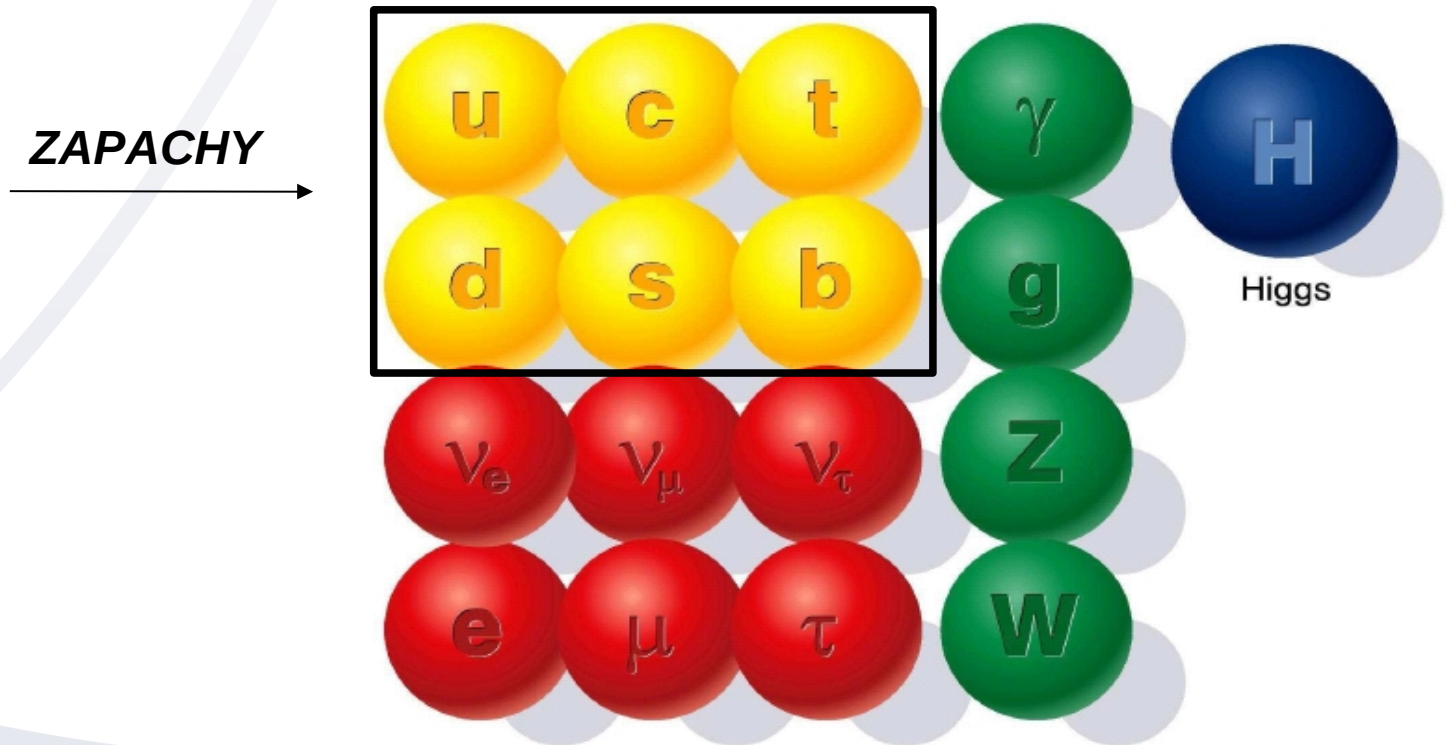
Łukasz Graczykowski

*Heavy Ion Reaction Group
Wydział Fizyki Politechniki Warszawskiej*



Składniki materii

Na poprzednich wykładach dowiedzieliśmy się, że kwarki i leptony są elementarnymi składnikami materii..



Składniki materii

Three generations of matter (fermions)

	I	II	III		
mass →	2.4 MeV/c ²	1.27 GeV/c ²	171.2 GeV/c ²	0	? GeV/c ²
charge →	2/3	2/3	2/3	0	0
spin →	1/2	1/2	1/2	1	0
name →	u up	c charm	t top	γ photon	H Higgs boson
Quarks	4.8 MeV/c ²	104 MeV/c ²	4.2 GeV/c ²	0	
	-1/3	-1/3	-1/3	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
	d down	s strange	b bottom	g gluon	
Leptons	<2.2 eV/c ²	<0.17 MeV/c ²	<15.5 MeV/c ²	91.2 GeV/c ²	
	0	0	0	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	Z⁰ Z boson	
	0.511 MeV/c ²	105.7 MeV/c ²	1.777 GeV/c ²	80.4 GeV/c ²	
	-1	-1	-1	±1	
	1/2	1/2	1/2	1	
	e electron	μ muon	τ tau	W[±] W boson	

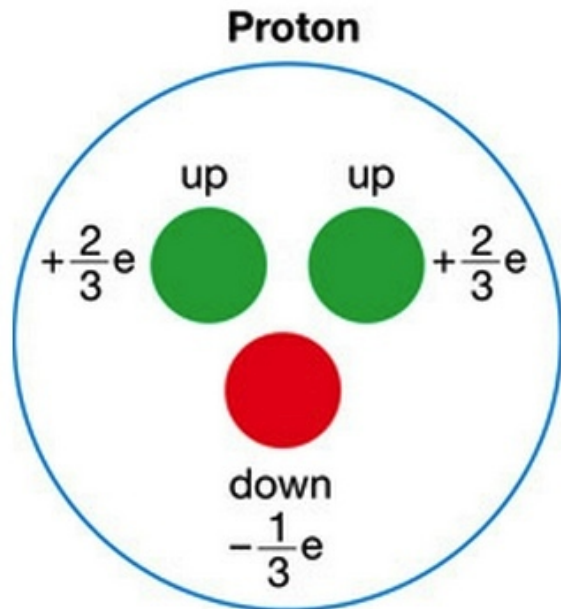
Elementarne składniki materii posiadają swoją:

- masę,
- ładunek,
- spin (moment własny pędu cząstki w układzie, w którym nie wykonuje ruchu postępowego, własny oznacza tu taki, który nie wynika z ruchu danej cząstki względem innych cząstek, lecz tylko z samej natury tej cząstki)

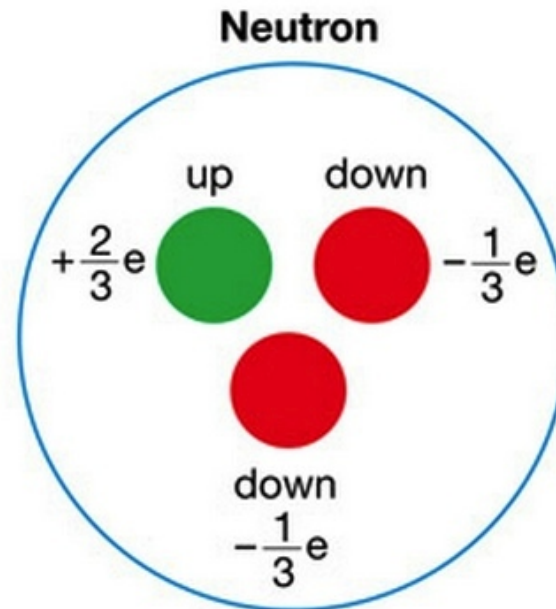
Kwarki nie istnieją samodzielnie, lecz są uwięzione **hadronach**.

Przykłady hadronów

Ładunek hadronów jest całkowity, składają się na niego ładunki występujących w nich kwarków.

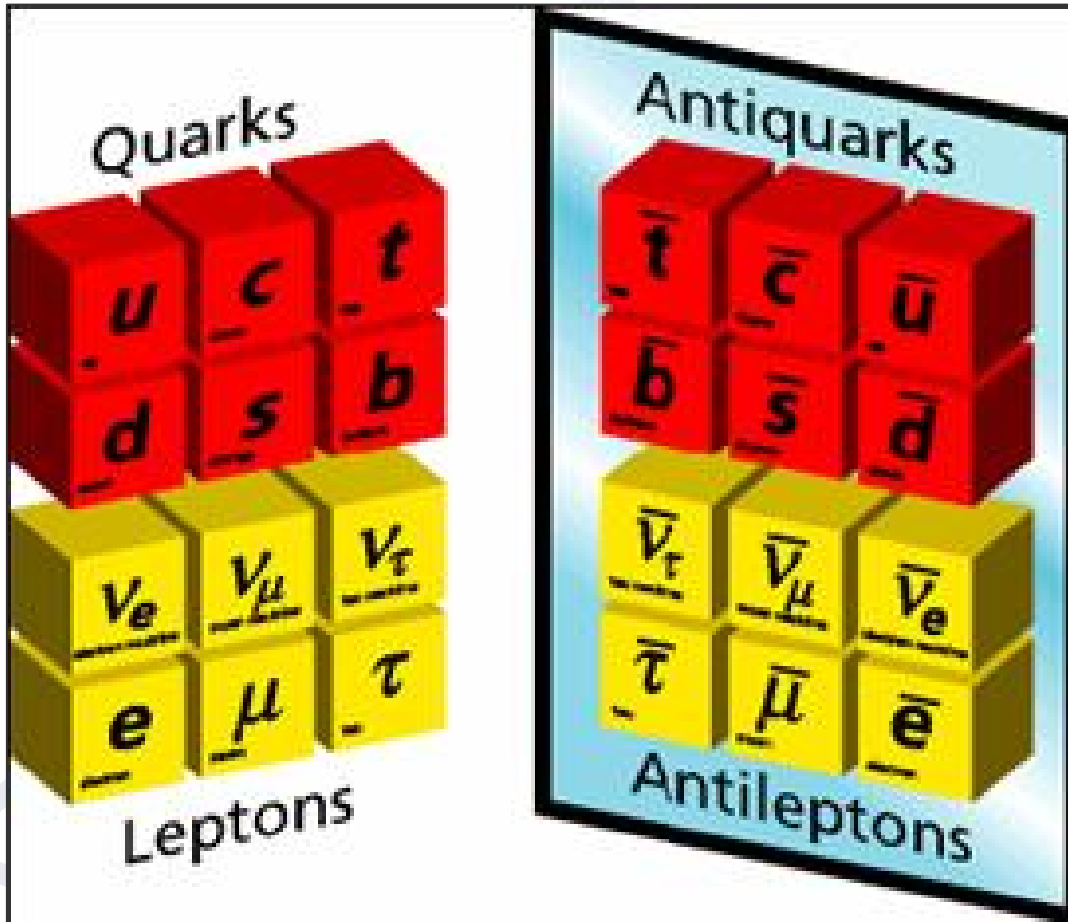


$$\frac{2}{3} + \frac{2}{3} - \frac{1}{3} = +1$$



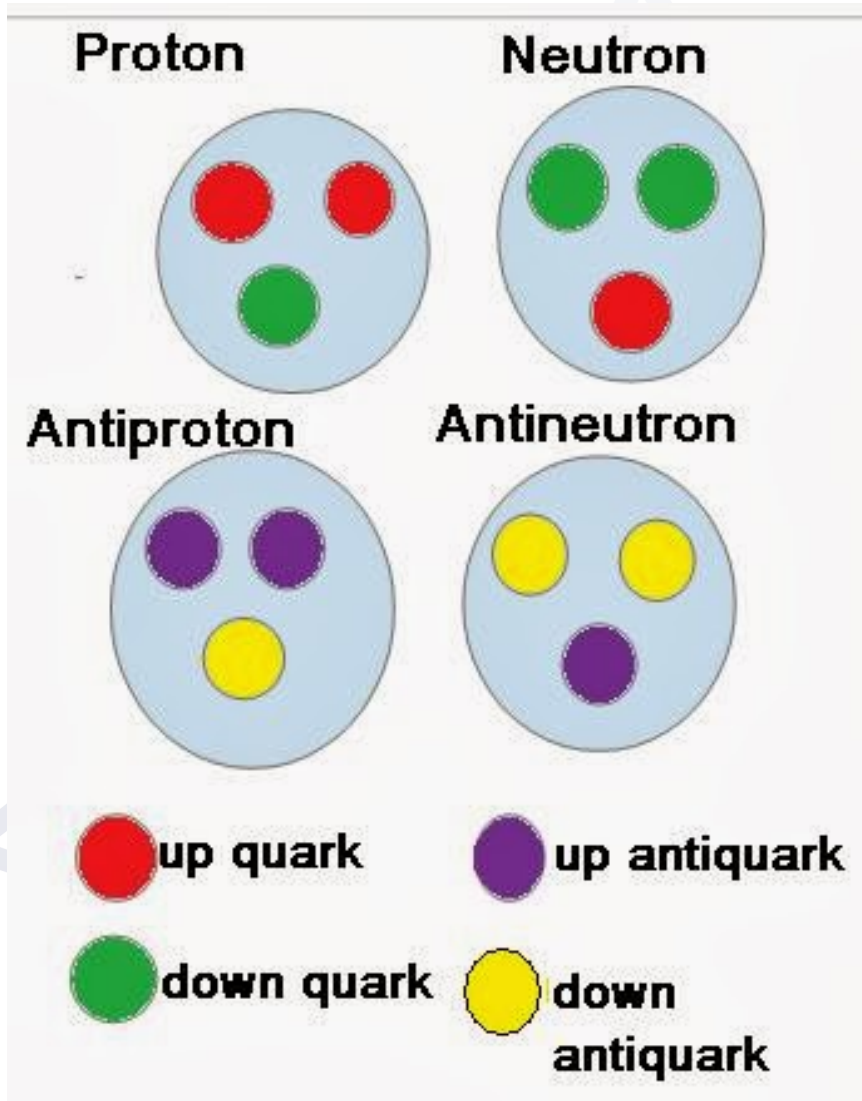
$$\frac{2}{3} - \frac{1}{3} - \frac{1}{3} = 0$$

Antymateria



Elementarne składniki materii to także antymateria..

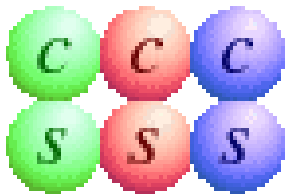
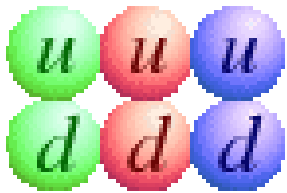
Przykłady hadronów



*Kwarki i antykwarki
tworzą cząstki*

Kolor

Quarks



Antiquarks



Kwarki (antykwaraki) występują w jednym z trzech **kolorów** (antykolorów): (anty)zielonym, (anty)czerwonym, (anty)niebieskim.

Kolor

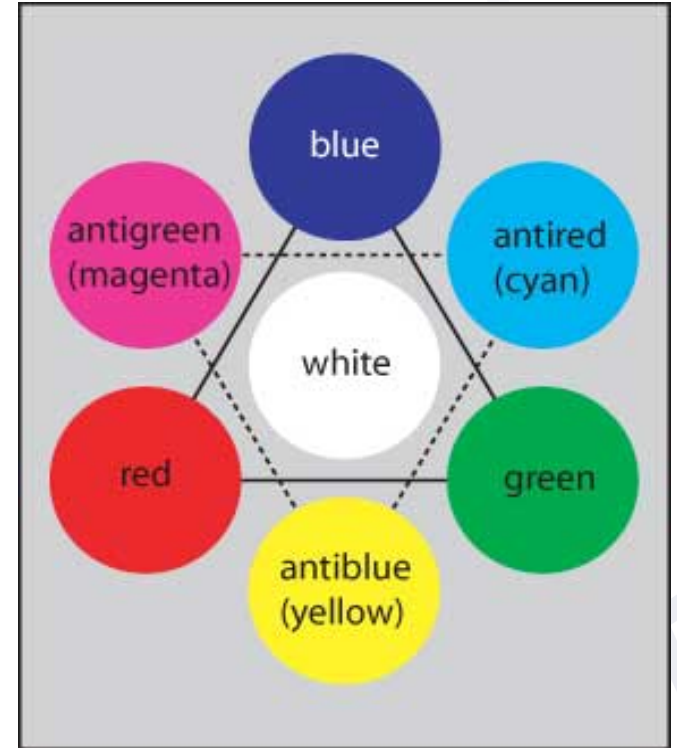
Cząstki, na które składają się kwarki i antykwarki są koloru białego.

Kombinacje kwarków i antykwarków:

QQQ - *bariony*

$\bar{Q}\bar{Q}\bar{Q}$ - *antybariony*

$Q\bar{Q}$ - *mezony*



Przykłady barionów i mezonów

baryons



proton

up, up, down



neutron

up, down, down

mesons



pion

up & anti-down

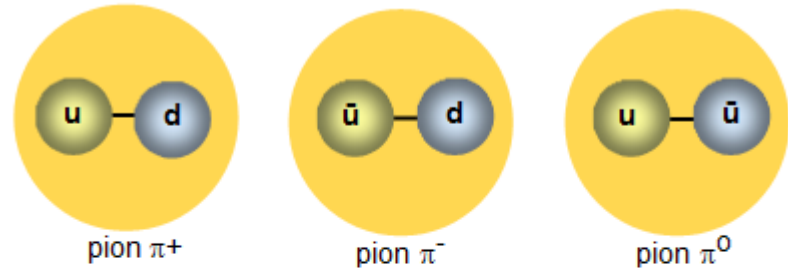


kaon⁰

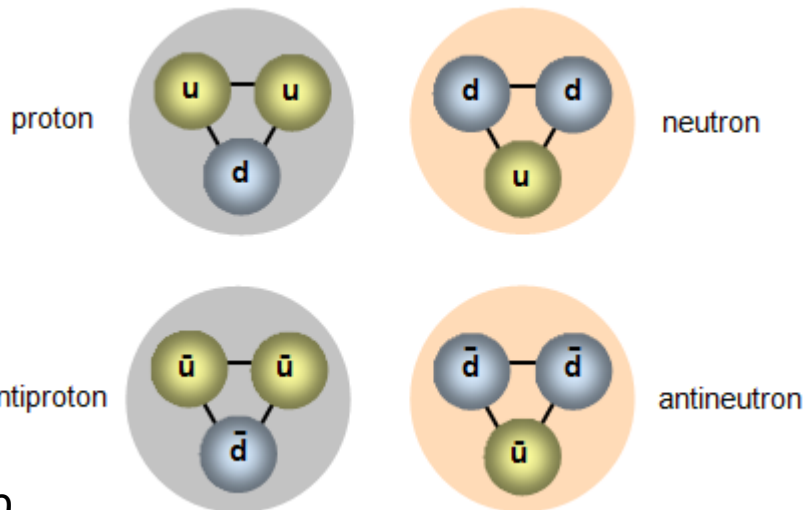
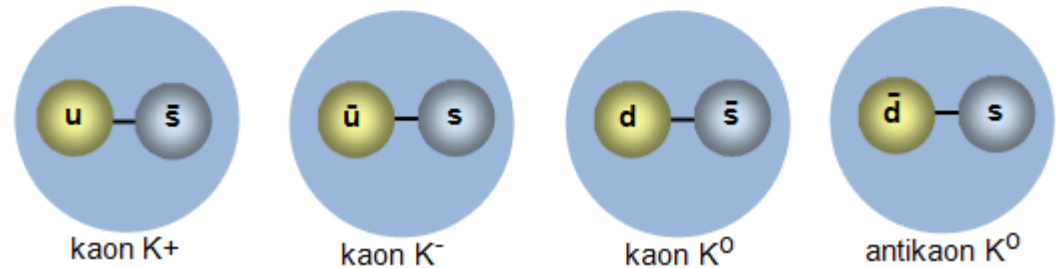
down & anti-strange

Przykłady hadronów (kwarki u , d , s)

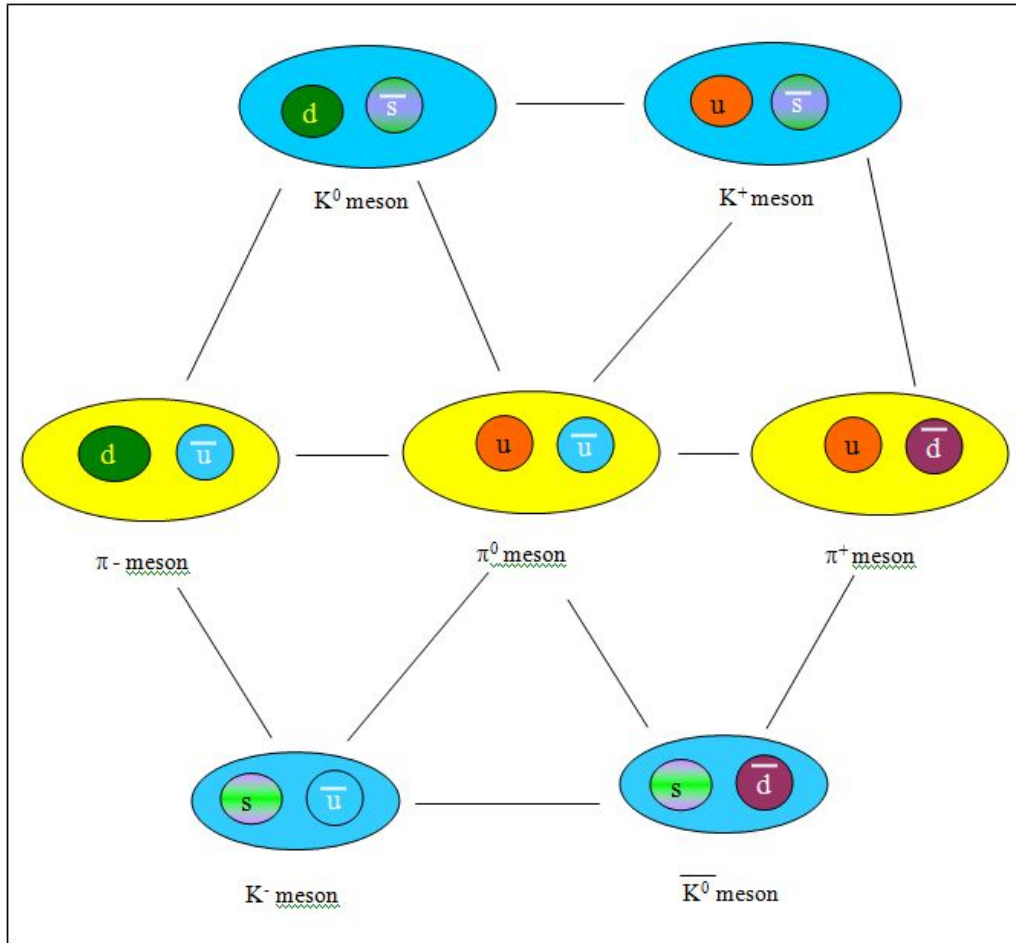
MEZONY



BARIONY



Przykłady mezonów (kwarki u, d, s)

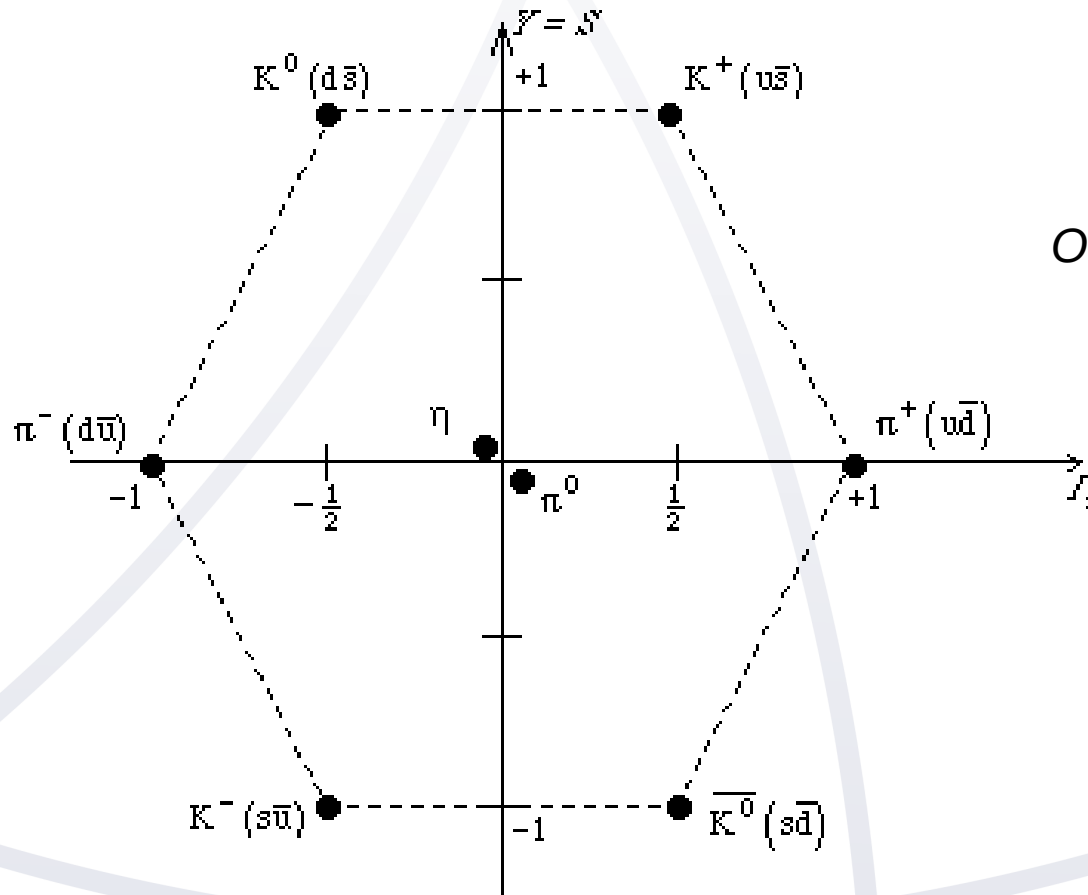


Kwark anty-dziwny

Bez kwarku dziwnego

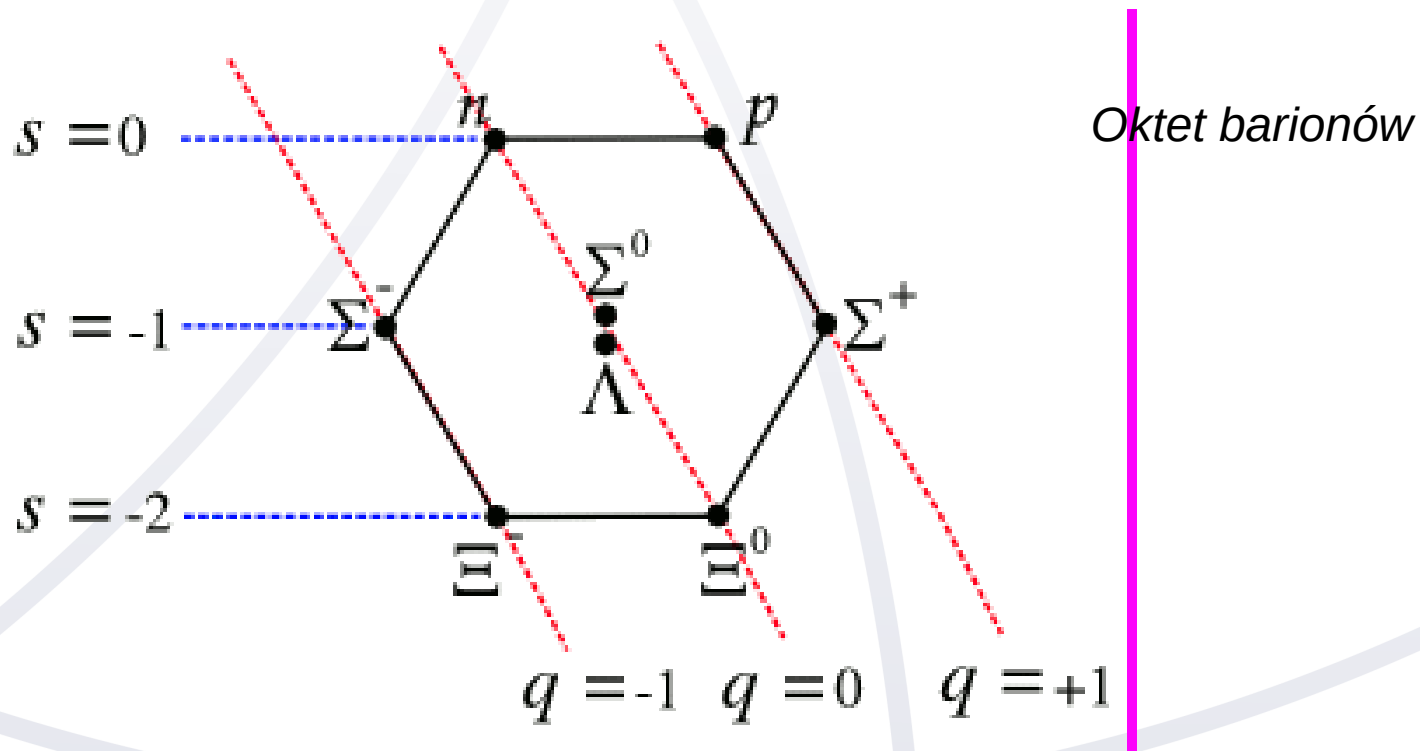
Kwark dziwny

Przykłady mezonów (kwarki u , d , s)

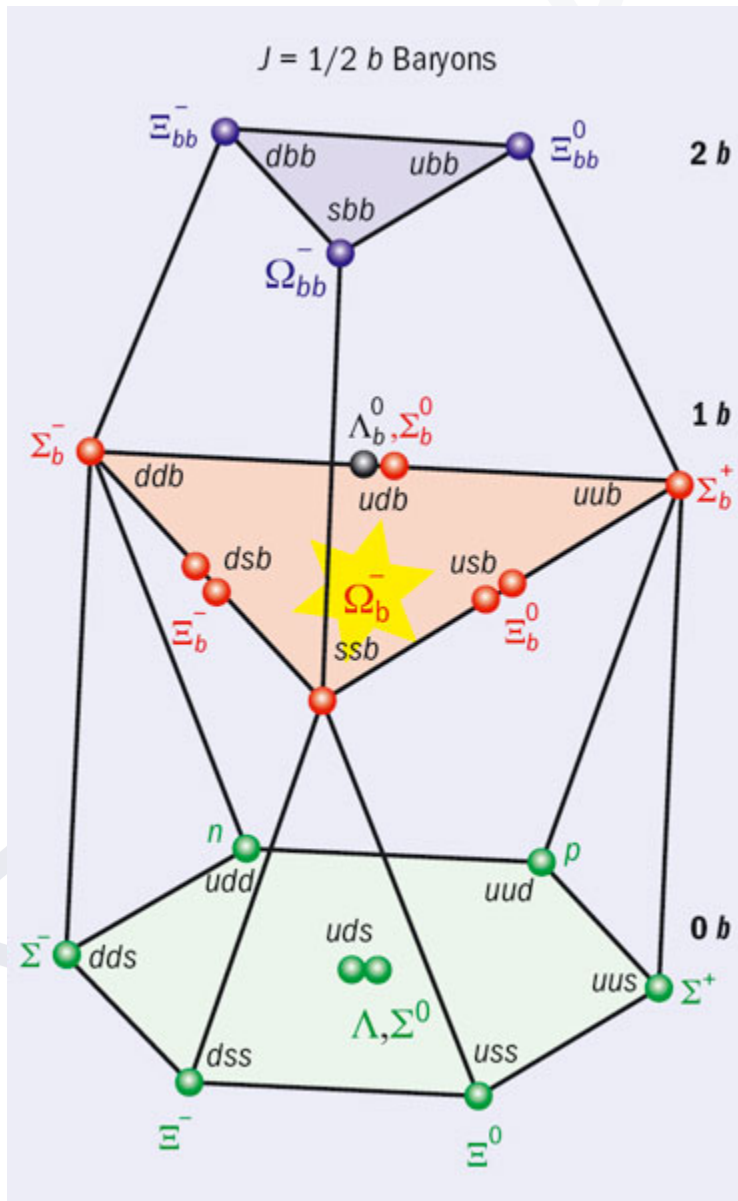


Oktet mezonów

Przykłady barionów (kwarki u , d , s)



A jeśli dodamy jeszcze jeden kwark..

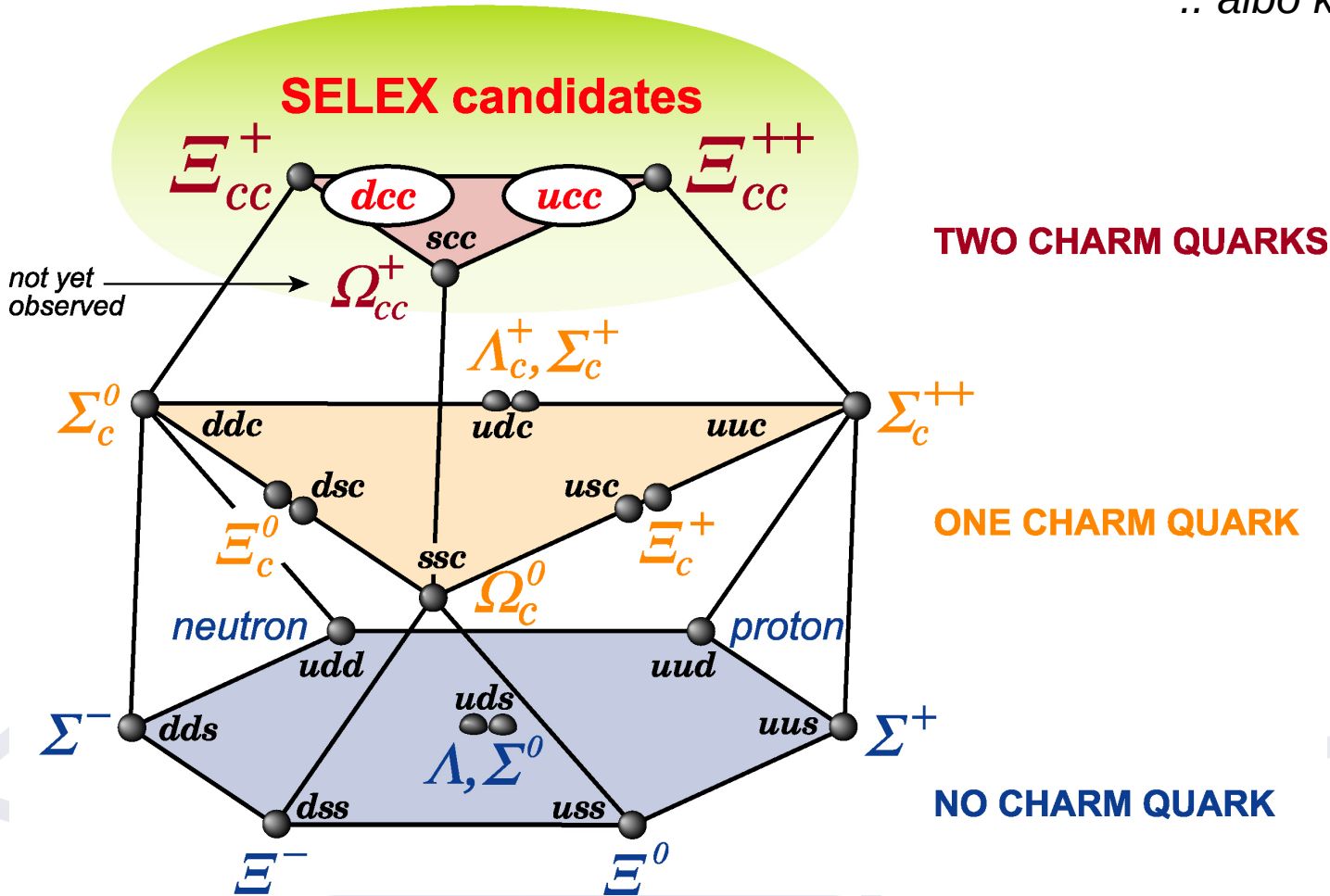


.. i tym kwarkiem będzie kwark **b**..

A jeśli dodamy jeszcze jeden kwark..

BARYONS WITH LOWEST SPIN ($J = 1/2$)

.. albo kwark c ..



Stabilność cząstek

Większość cząstek jest niestabilna

Każda cząstka posiada swój czas życia τ :

p: $\tau > 10^{31}$ lat

n: $\tau = 880,1 \pm 1,1$ s

naładowane π : $\tau = (2,6033 \pm 0,0005) \times 10^{-8}$ s

naładowane K: $\tau = (1,2380 \pm 0,0021) \times 10^{-8}$ s

K_0^S : $\tau = (0,8954 \pm 0,0004) \times 10^{-10}$ s

Λ : $\tau = (2,632 \pm 0,020) \times 10^{-10}$ s



Rozpady cząstek

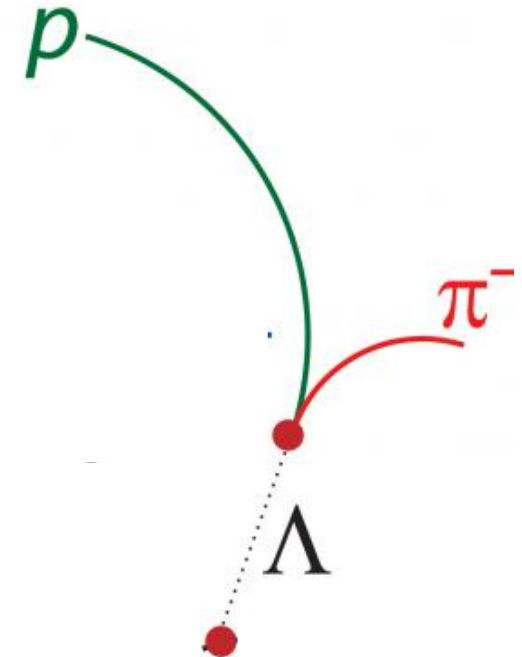
Rozpad cząstki -

- spontaniczny proces, w wyniku którego cząstka przekształca się w inne cząstki.

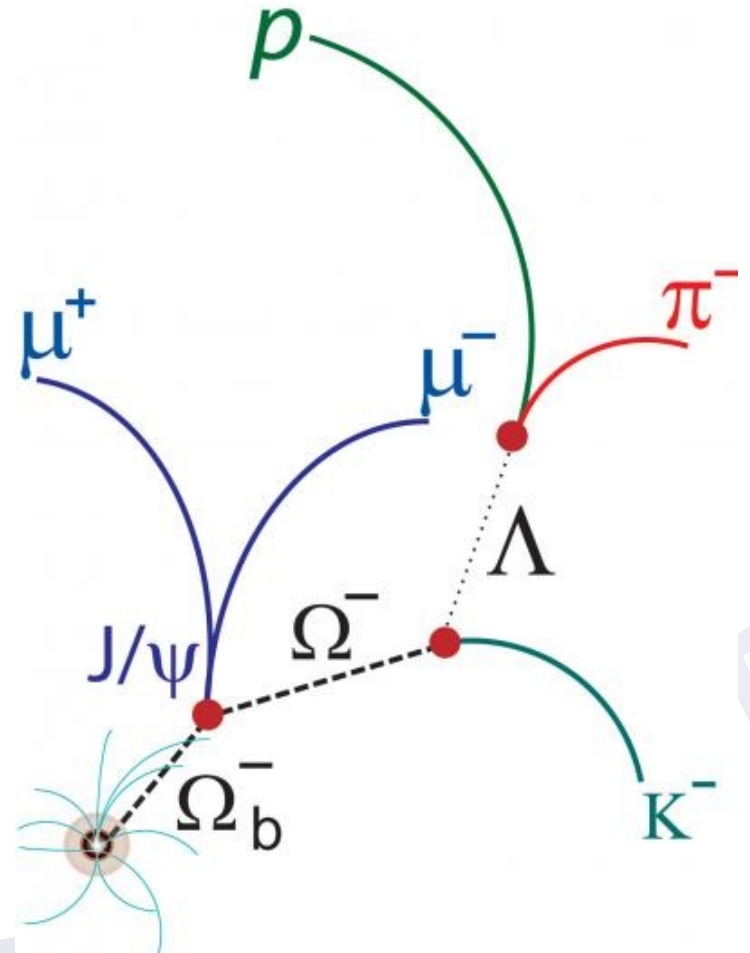
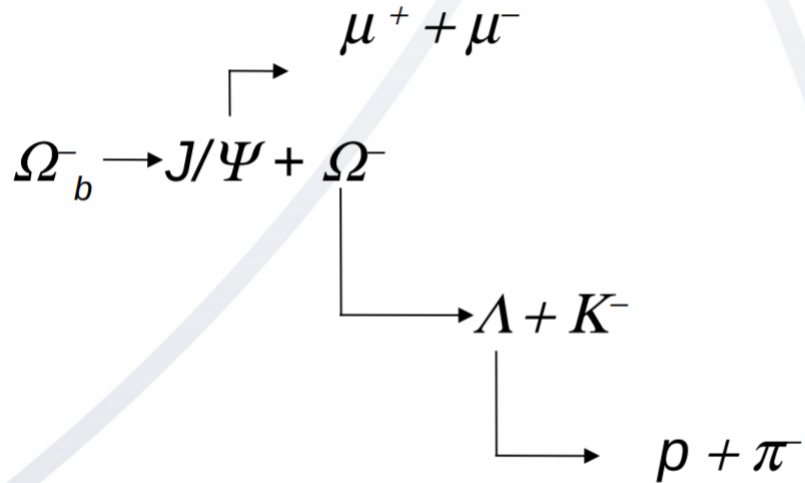
W wyniku tej przemiany powstają cząstki o mniejszych masach.

Jeśli w trakcie procesu powstanie cząstka niestabilna, proces rozpadu zachodzi dalej.

Rozpady cząstek mogą dotyczyć także radioaktywnych rozpadów jądrowych, w trakcie których niestabilne jądro atomowe przekształca się w lżejsze jądro, przemianie tej towarzyszy emisja cząstek.



Rozpady cząstek



Rozpady cząstek

Rozpady słabe – zachodzące wskutek oddziaływań słabych, średni czas życia τ cząstki rozpadającej się jest pomiędzy 10^{-8} s oraz 10^{-10} s)

1. $\Lambda \rightarrow p + \pi^-$

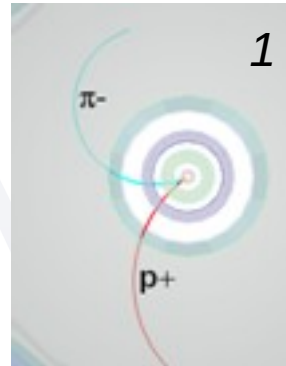
2. $K_s^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$

3. $\bar{\Lambda} \rightarrow \pi^+ + \bar{p}$

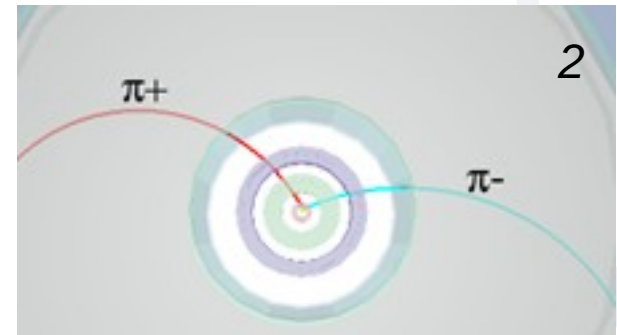
Rozpady silne – zachodzące wskutek oddziaływań silnych, średni czas życia τ cząstki rozpadającej się wynosi 10^{-23} s

Przykłady rozpadów słabych

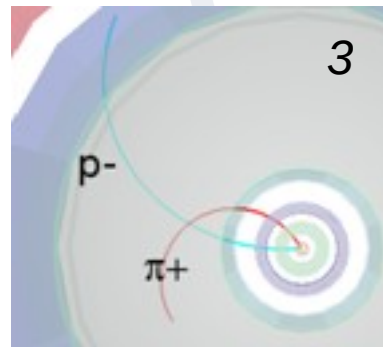
1. $\Lambda \rightarrow p + \pi^-$



2. $K_s^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$



3. $\bar{\Lambda} \rightarrow \pi^+ + \bar{p}$



Cząstki dziwne

Cząstki dziwne to takie, które zawierają
przynajmniej jeden kwark lub antykwark dziwny.

Kwark dziwny posiada liczbę kwantową – dziwność (**S = -1**)

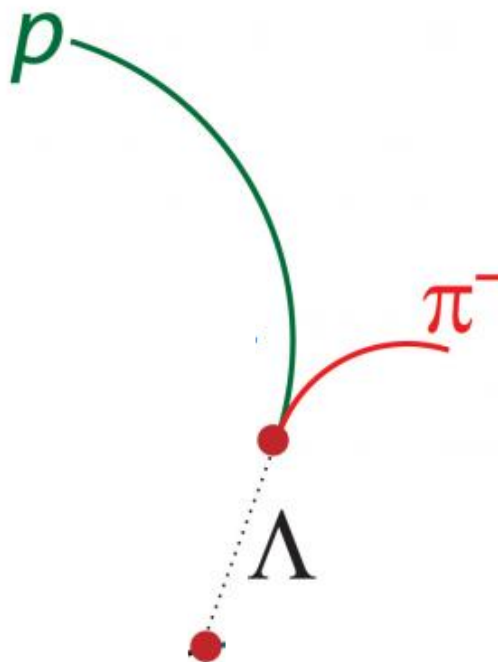
Antykwark dziwny posiada liczbę kwantową – dziwność (**S = 1**)

Najłżejszy (ok. **498 MeV**) neutralny dziwny mezon: K^0 (kwarki: $d\bar{s}$)

Najłżejszy (ok. **1115 MeV**) neutralny dziwny barion: Λ (kwarki: uds)



Cząstki dziwne



Kiedy cząstki przemieszczają się z $v \approx c$, produkty rozpadów (słabych) cząstek obserwowane są w detektorze w **odległości kilku cm** od punktu produkcji cząstki rozpadającej się.

Założmy, że $v = 0,5 c = 1,5 * 10^8 \text{ m/s}$
 $c = 3 * 10^8 \text{ m/s}$
 $t = 2,6 * 10^{-10} \text{ s}$



$$s = v * t$$
$$s = 1,5 * 10^8 * 2,6 * 10^{-10} [\text{m/s} * \text{s}]$$
$$s = 3,9 * 10^{-2} \text{ m}$$
$$s = \mathbf{3,9 \text{ cm}}$$

Cząstki dziwne

baryons



proton

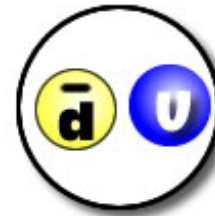
up, up, down



neutron

up, down, down

mesons



pion

up & anti-down



kaon⁰

down & anti-strange

W rozpadach słabych dziwność nie musi być zachowana (produkty rozpadu nie zawierają ani kwarków, ani antykwarków dziwnych, występują jedynie kwarki i antykwarki górne i dolne).

Obserwowane są zmiany dziwności: $\Delta S=0$ lub $\Delta S=1$

$$1. \Lambda \rightarrow p + \pi^-$$

$$(uds) \rightarrow (uud) + (\bar{u}d)$$

$$2. K_s^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$$

$$(d\bar{s}) \rightarrow (u\bar{d}) + (\bar{u}d)$$

$$3. \bar{\Lambda} \rightarrow \pi^+ + \bar{p}$$

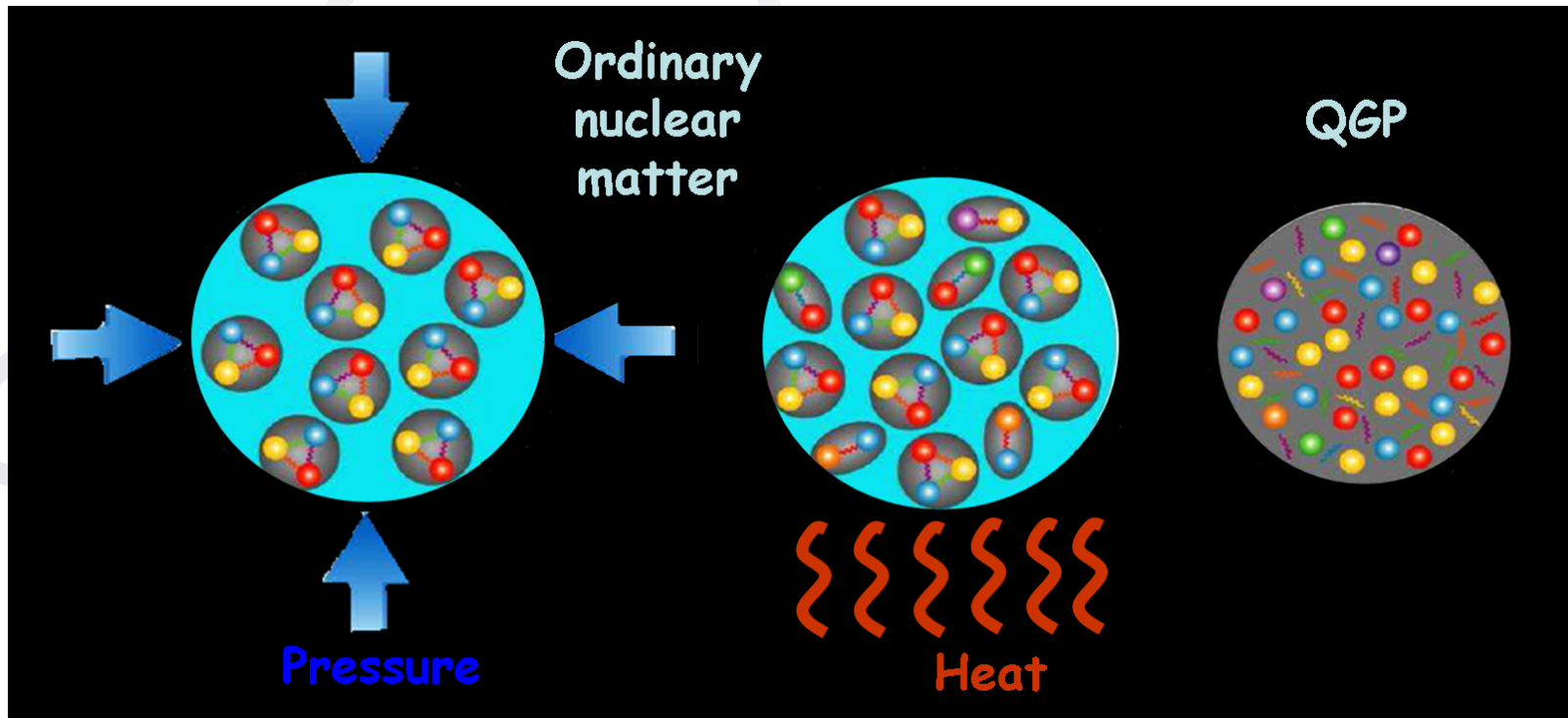
$$(\bar{u}\bar{d}\bar{s}) \rightarrow (\bar{u}\bar{u}\bar{d}) + (u\bar{d})$$

Produkcja dziwności

Wzmożona produkcja dziwności to jedna z sygnatur rejestracji plazmy kwarkowo-gluonowej (ang. *Quark-Gluon Plasma*)

Kwarki dziwne nie występują w otaczającej nas materii.

W eksperymentach realizowanych na kolajderach ciężko-jonowych biorą udział jedynie protony i neutrony pochodzące ze zderzanych jąder.



Produkcja dziwności

1. Masa protonu wynosi ok. **938 MeV**
 2. Masa cząstki lambda wynosi ok. **1115 MeV**
 3. Masa neutralnego kaonu wynosi ok. **498 MeV**
- .. a masy pojedynczych kwarków są znacznie mniejsze!

Masa cząstek pochodzi nie tylko masy kwarków je tworzących, lecz także od oddziaływania między kwarkami!

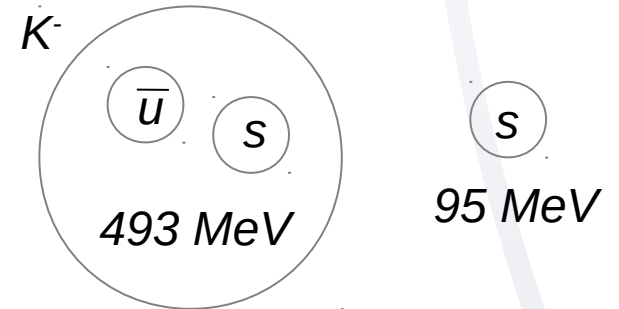


Produkcja dziwności

- Ile „kosztuje” stworzenie nowego kwarku s ?
- W normalnych warunkach **nie** możemy stworzyć samego kwarku, lecz całą cząstkę.
- W przypadku kaonu naładowanego:

musimy „zapłacić” ok. **493 MeV**

.. a pojedynczy kwark s to „koszt” ok. **95 MeV**

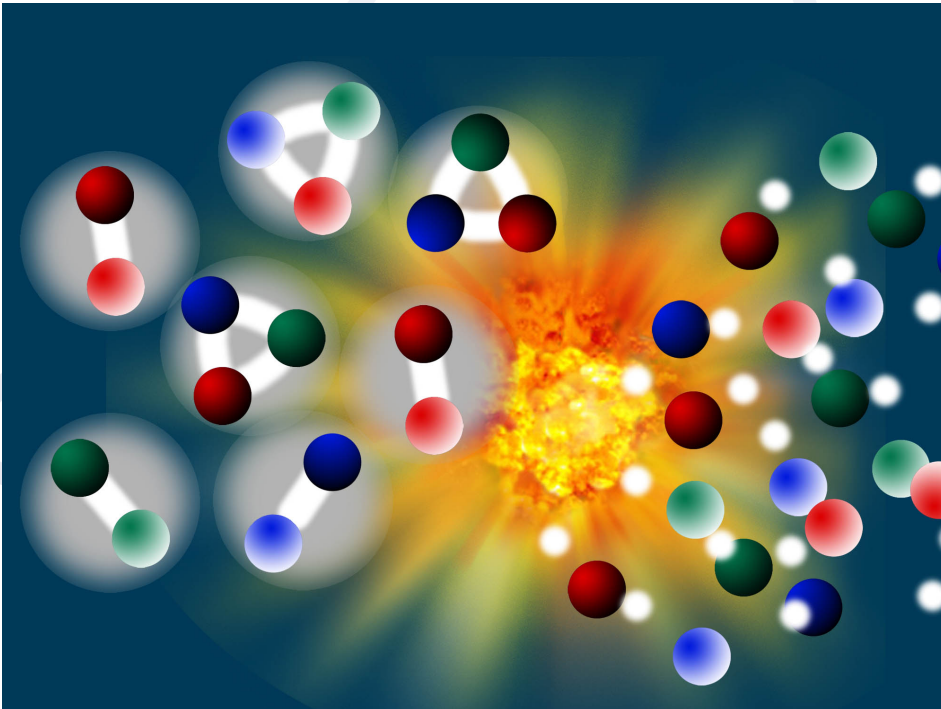


- W plazmie kwarkowo-gluonowej kwarki **mogą** istnieć samodzielnie, więc koszt ich produkcji jest znacznie niższy!
- Dzięki temu obserwujemy **więcej kwarków dziwnych**, tworzących potem rejestrowane przez nas cząstki dziwne!

Produkcja dziwności

Kwarki i antykwarki dziwne, zgodnie z einstein'owską formułą $E = mc^2$ są wyprodukowane z energii kinetycznej zderzanych jonów.

Masa kwarków i antykwarków dziwnych (zakładając $c=1$) jest ekwiwalentną do temperatury i energii, w jakiej protony, neutrony oraz inne hadrony ulegają „rozpuszczeniu” do kwarków swobodnych – mamy stan plazmy QGP.



Produkcja dziwności

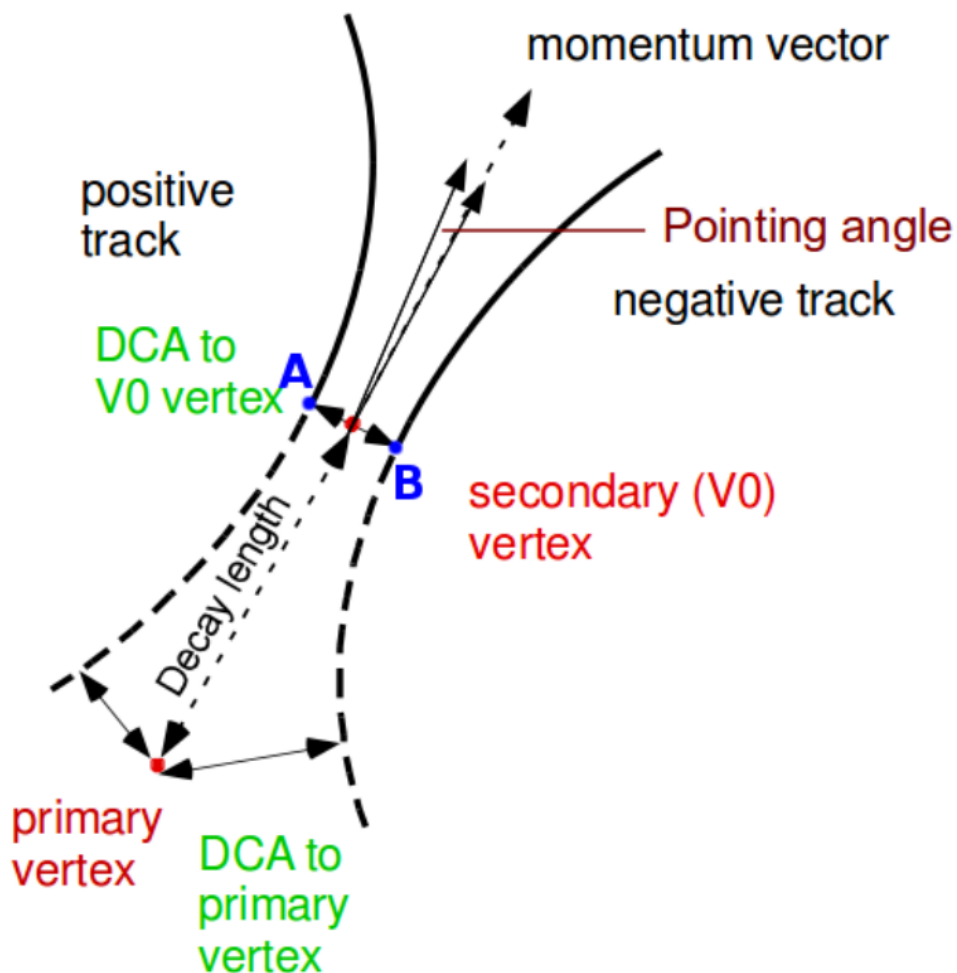
Rejestracja wzmożonej produkcji cząstek dziwnych (zawierających przynajmniej jeden kwark lub antykwark dziwny) może świadczyć o zaistnieniu stanu GQP.

*Wzmożona produkcja cząstek dziwnych występuje wtedy, gdy **stosunek liczby wyprodukowanych cząstek dziwnych do liczby cząstek nie zawierających kwarków dziwnych** jest wyższy niż ten, jaki znamy z przewidywań teoretycznych lub wyników eksperymentalnych, gdzie stan QGP nie jest rejestrowany.*

Dla zderzeń jonów ołowiu liczba cząstek dziwnych jest weryfikowana w oparciu o liczbę nukleonów uczestniczących podczas zderzenia i porównane z analogicznym wynikiem ze zderzeń proton – proton0 (gdzie wiemy, że QGP nie jest rejestrowany).

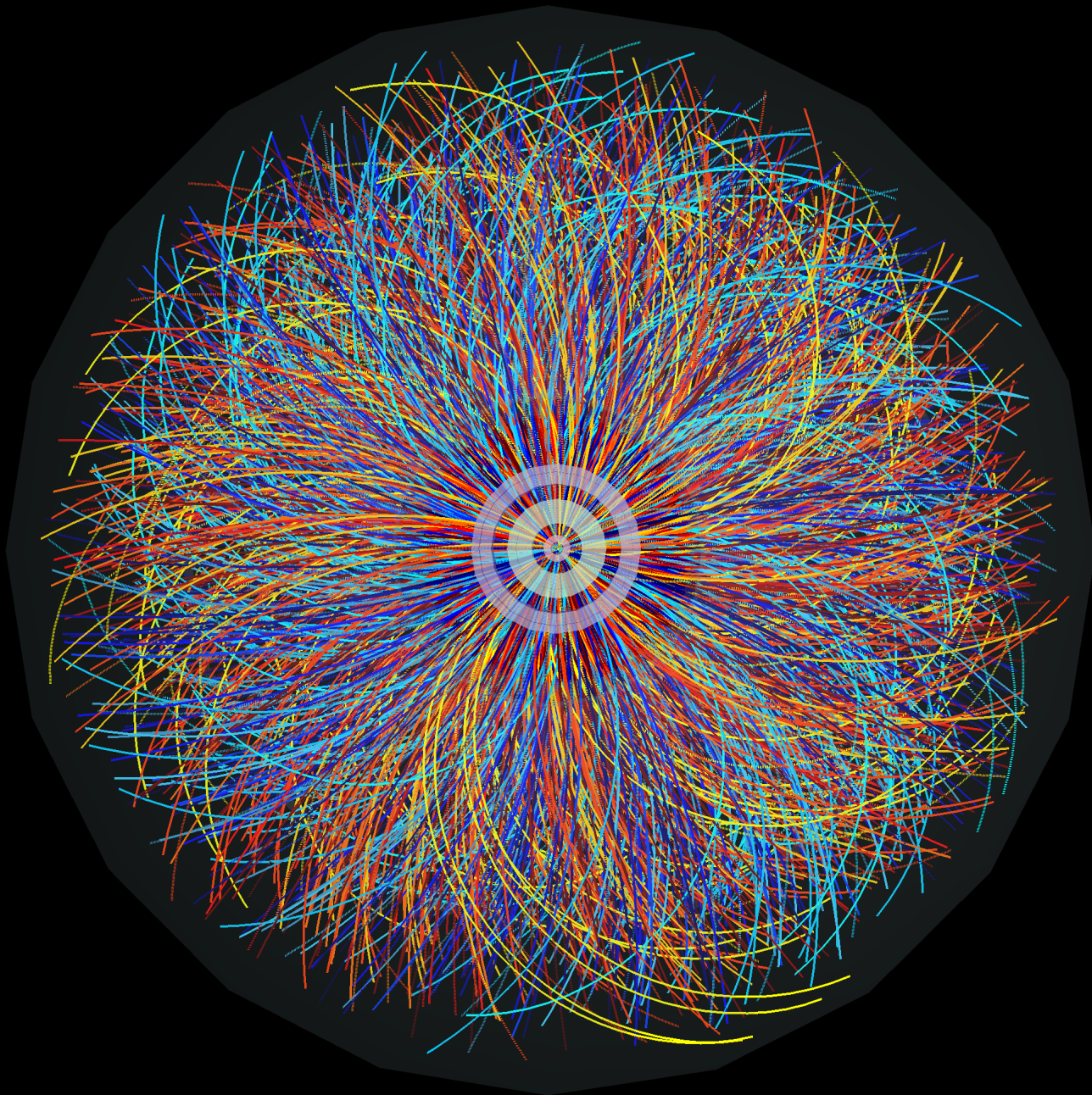


Rekonstrukcja produktów rozpadu

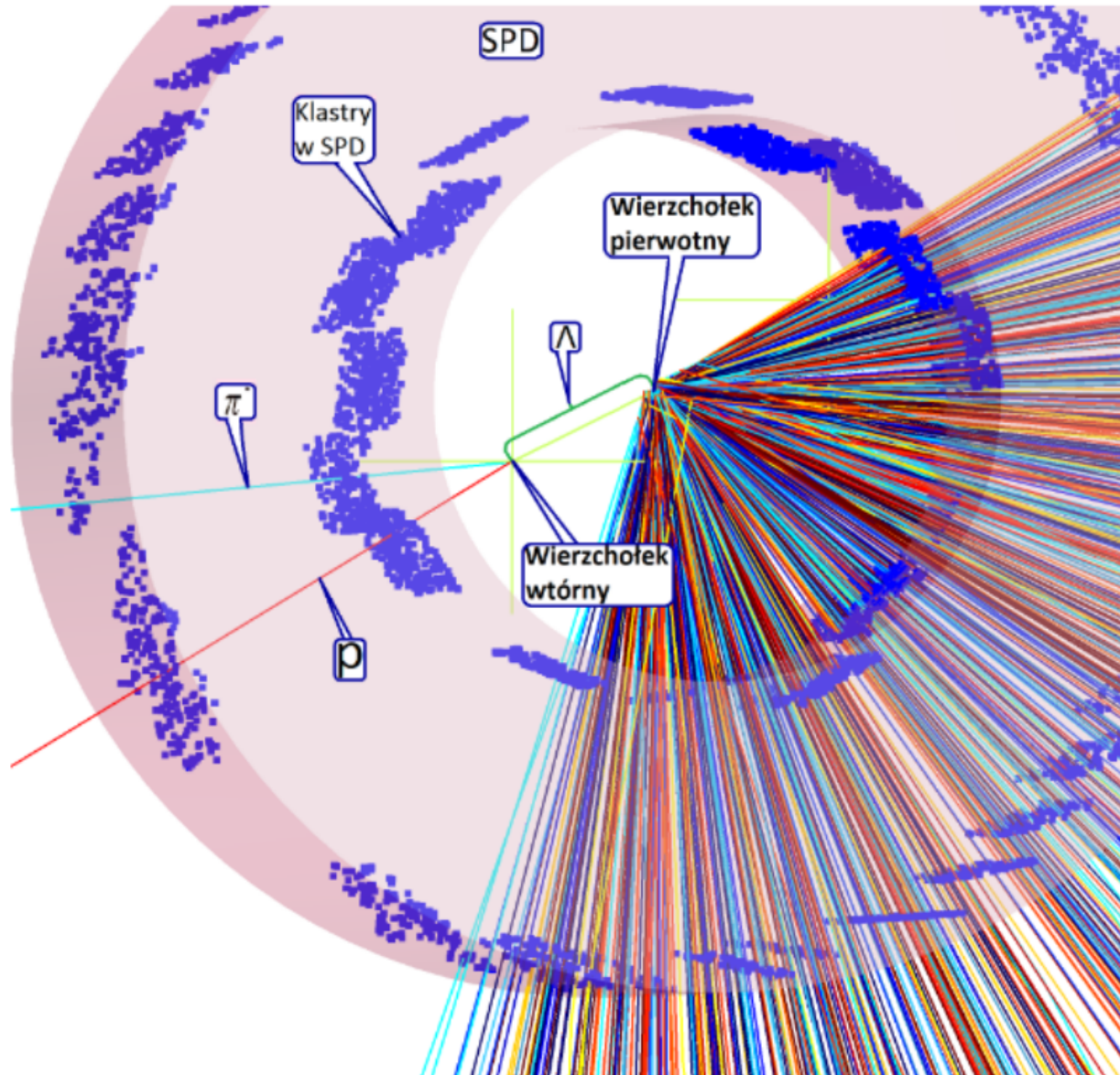


Proces rekonstrukcji rozpadu i identyfikacji neutralnej cząstki dziwnej rozpadającej się na parę cząstek naładowanych:

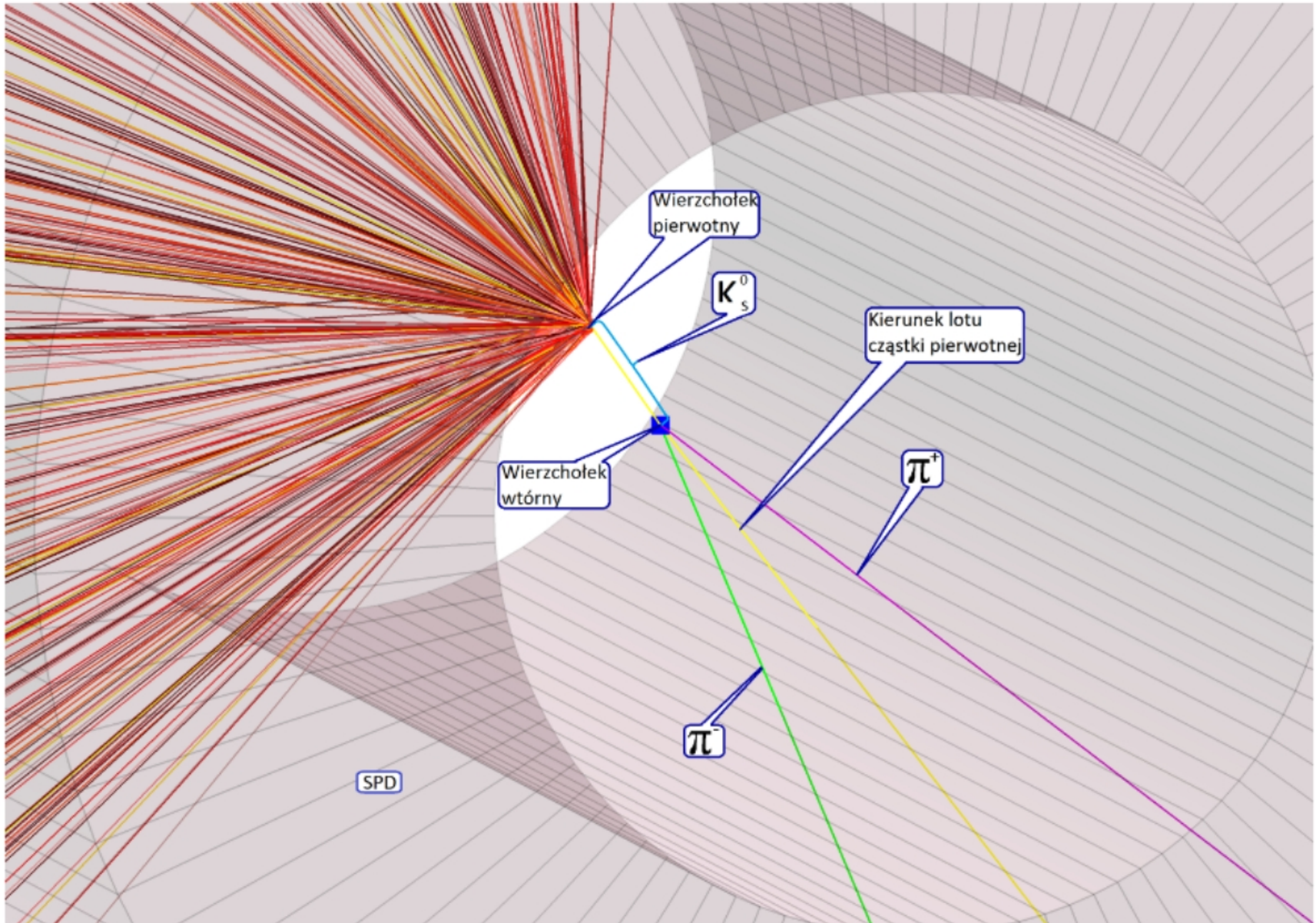
- 1) identyfikacja wierzchołka wtórnego i wyznaczenie jego współrzędnych
- 2) identyfikacja obu cząstek wtórnych i określenie wektorów ich pędów
- 3) weryfikacja kinematycznych zależności rozpadu cząstki neutralnej (*policzenie masy niezmienniczej*)



Przykłady rozpadów słabych



Przykłady rozpadów słabych



Masa niezmiennicza

Masa niezmiennicza – masa inwariantna (spoczynkowa) m_{inv}

Rozpatrujemy rozpad: $K_0^S \rightarrow \pi^+ \pi^-$

każda z cząstek jest opisana poprzez swój czterowektor pędu (p_x, p_y, p_z, E) i masę m .

K_0^S :

E – całkowita energia

\mathbf{p} – wektor pędu

m - masa

π^+ :

E_1 – całkowita energia

\mathbf{p}_1 – wektor pędu

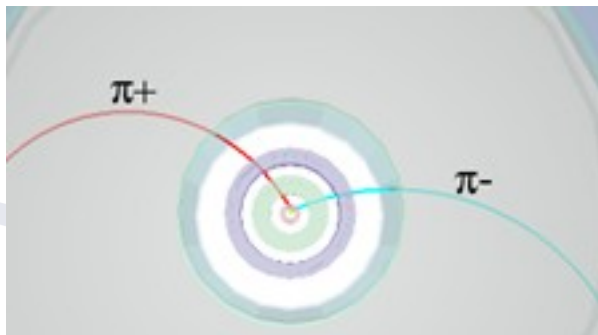
m_1 - masa

π^- :

E_2 – całkowita energia

\mathbf{p}_2 – wektor pędu

m_2 - masa



Masa niezmiennicza

Zasada zachowania energii: $E = E_1 + E_2$ (1)

Zasada zachowania pędu: $p = p_1 + p_2$ (2)

Zakładając $c = 1$: $E^2 = p^2 + m^2$ (3)

gdzie: $p = |p|$ - długość wektora pędu)

$$E_1^2 = p_1^2 + m_1^2 \quad (4)$$

$$E_2^2 = p_2^2 + m_2^2 \quad (5)$$

gdzie $p_1 = |p_1|$ and $p_2 = |p_2|$ - długości wektorów p_1 oraz p_2

Masa niezmiennicza

$$E^2 = p^2 + m^2$$

$$\begin{aligned} m^2 &= E^2 - p^2 = (E_1 + E_2)^2 - (p_1 + p_2)^2 \\ m^2 &= E_1^2 + 2E_1E_2 + E_2^2 - p_1p_1 - 2p_1p_2 - p_2p_2 \end{aligned} \quad (6)$$

p_1p_2 - iloczyn skalarny p_1 oraz p_2

$$p_1p_2 = p_{1x}p_{2x} + p_{1y}p_{2y} + p_{1z}p_{2z} \quad (7)$$

$$p_1p_1 = p_{1x}p_{1x} + p_{1y}p_{1y} + p_{1z}p_{1z} = p_1^2 \quad (8)$$

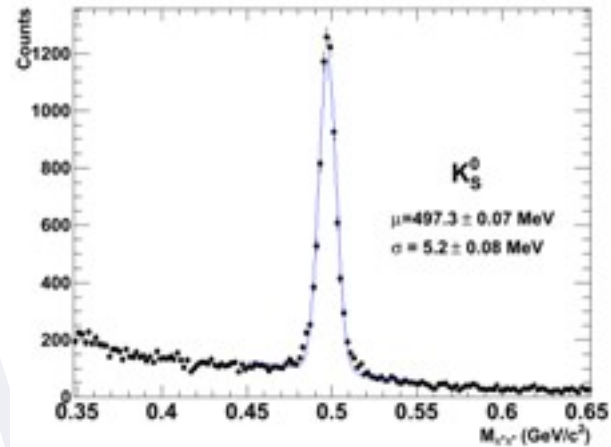
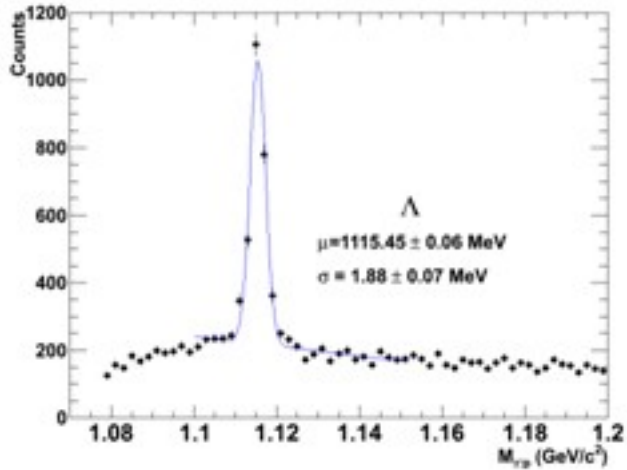
$$p_2p_2 = p_{2x}p_{2x} + p_{2y}p_{2y} + p_{2z}p_{2z} = p_2^2 \quad (9)$$

$$m^2 = E_1^2 + 2E_1E_2 + E_2^2 - p_1^2 - 2p_1p_2 - p_2^2$$

$$m^2 = m_1^2 + m_2^2 + 2E_1E_2 - 2p_1p_2$$



Masa niezmiennicza



Przykładowe rozkłady mas niezmienniczych

Dziękuję za uwagę!

Łukasz Graczykowski



