

INTERNATIONAL MASTERCLASSES HANDS ON PARTICLE PHYSICS

Dziwność – sygnatura plazmy kwarkowo – gluonowej

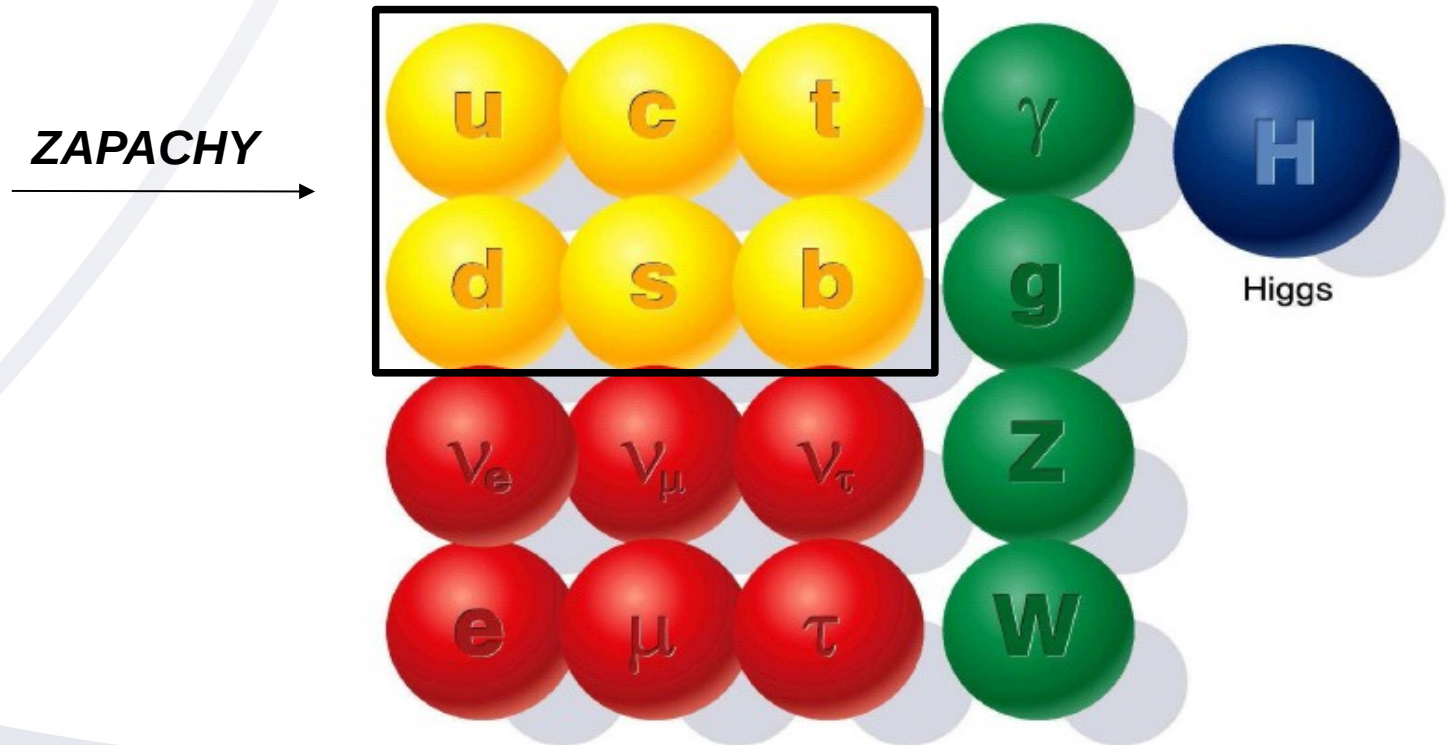
Hanna Zbroszczyk

Heavy Ion Reaction Group
Wydział Fizyki Politechniki Warszawskiej



Składniki materii

Kwarki i leptony to elementarne składniki 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	

Posiadają:

- masę,
- ładunek,
- spin

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	

Posiadają:

- masę,
- ładunek,
- spin (własny moment pędu w układzie, w którym nie wykonuje ruchu postępowego, własny - taki, który nie wynika z jej ruchu względem innych cząstek, ale z natury tej cząstki)

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	
					Gauge bosons

Posiadają:

- masę,
- ładunek,
- spin (własny moment pędu w układzie, w którym nie wykonuje ruchu postępowego, własny - taki, który nie wynika z jej ruchu względem innych cząstek, ale z natury tej cząstki)

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

Przykłady hadronów

Ładunek hadronów - całkowity,

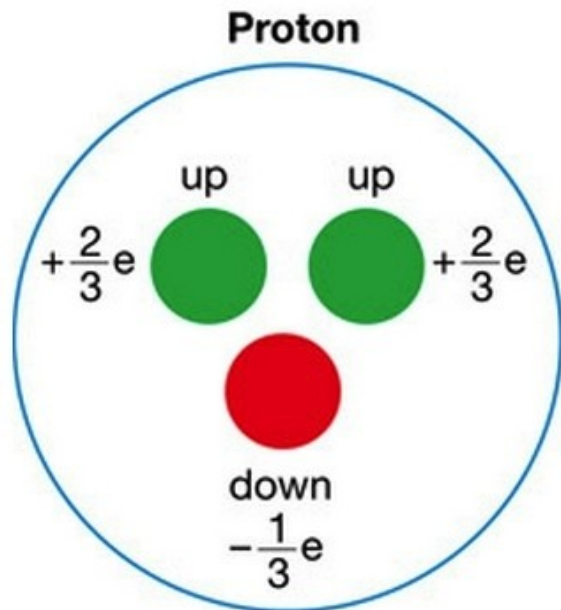
$$Q_{\text{hadron}} = \sum q_{\text{kwark}}$$



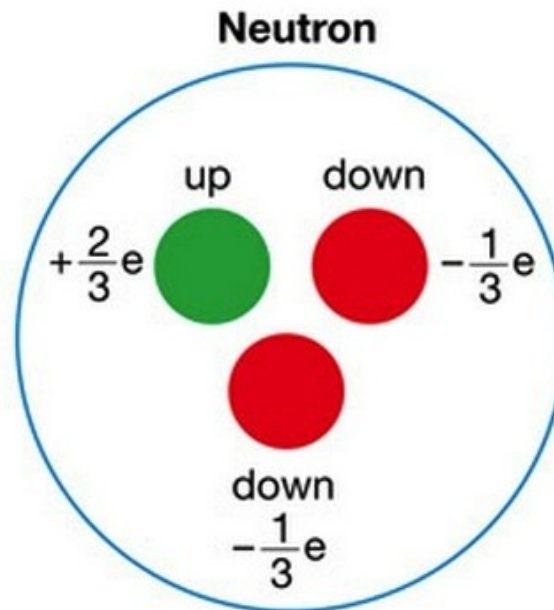
Przykłady hadronów

Ładunek hadronów - całkowity,

$$Q_{\text{hadron}} = \sum q_{\text{kwark}}$$

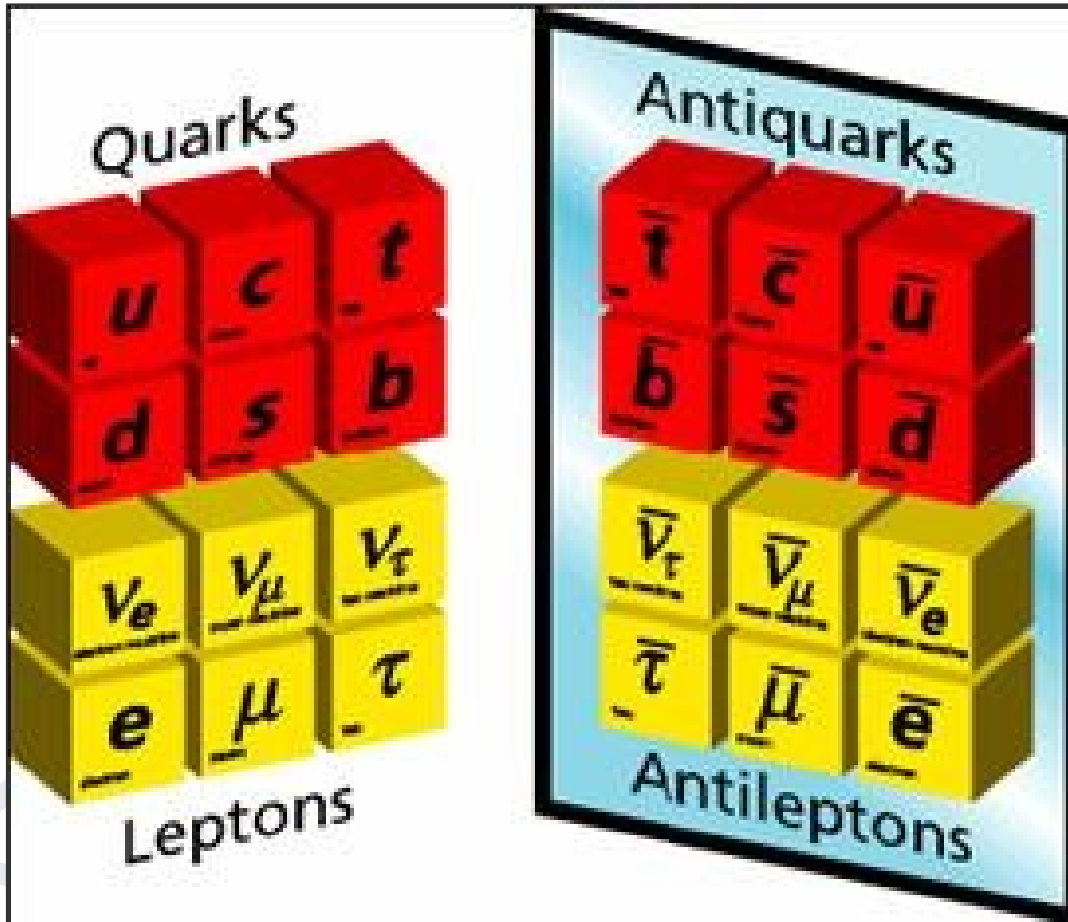


$$\frac{2}{3} + \frac{2}{3} - \frac{1}{3} = +1$$



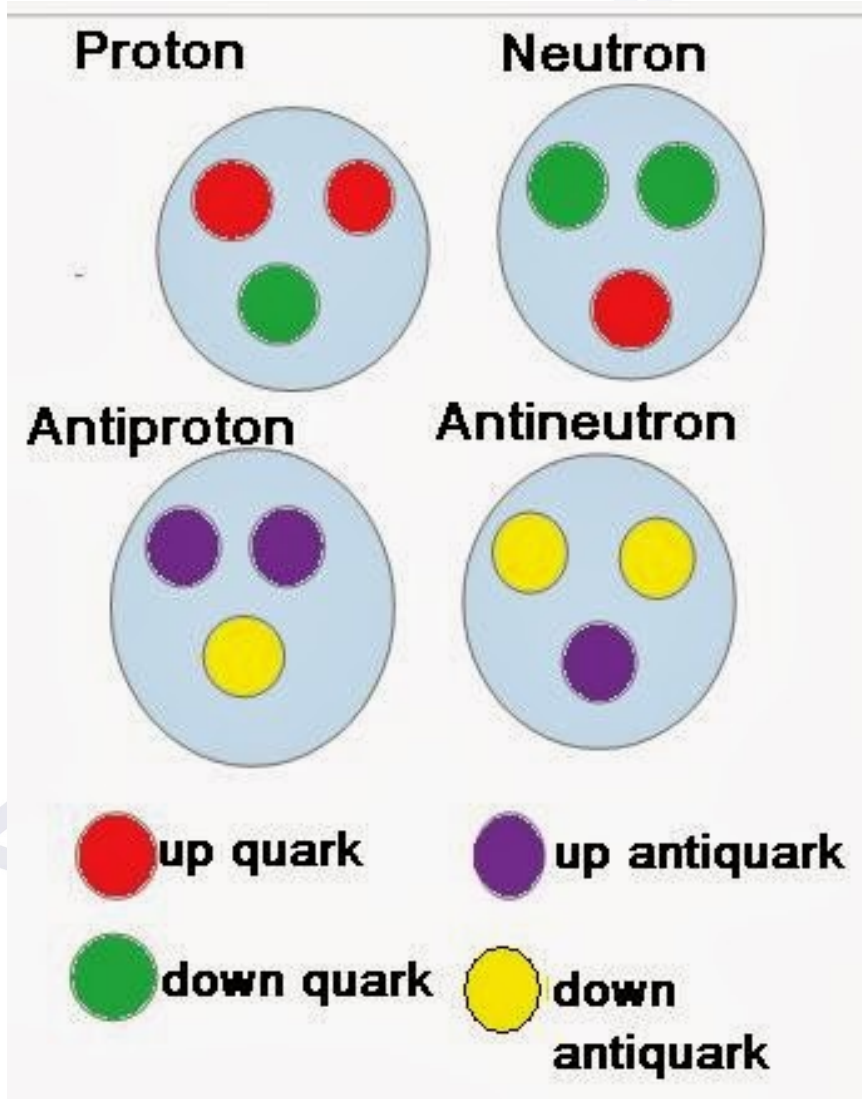
$$\frac{2}{3} - \frac{1}{3} - \frac{1}{3} = 0$$

Antymateria



.. teŹ elementarne
składniki materii

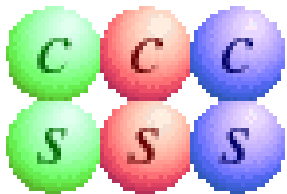
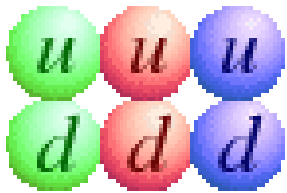
Przykłady hadronów



Kwarki i antykwarki tworzą cząstki

Kolor

Quarks



Antiquarks



Kwarki (antykwaraki) występują w **kolorach** (antykolorach):
(anty)zielonym,
(anty)czerwonym,
(anty)niebieskim.

Kolor

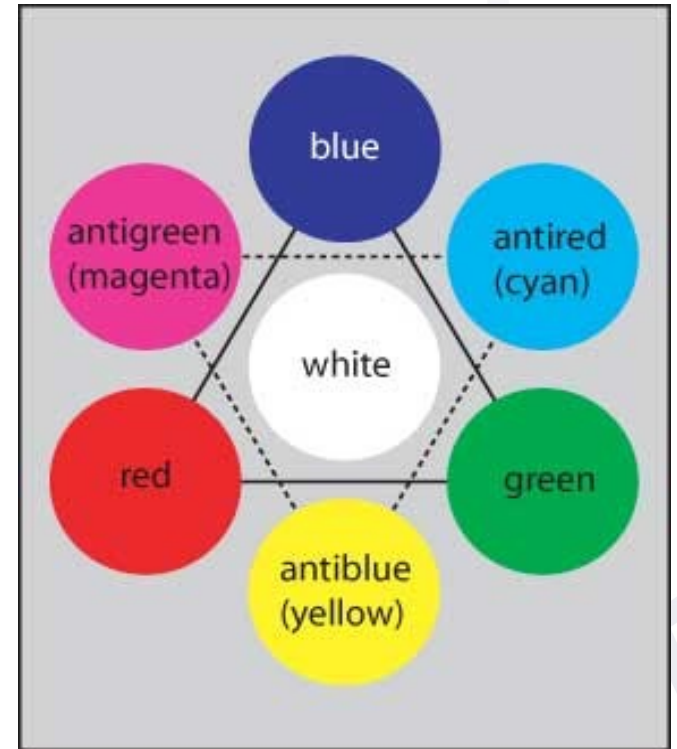
Cząstki są koloru białego.

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

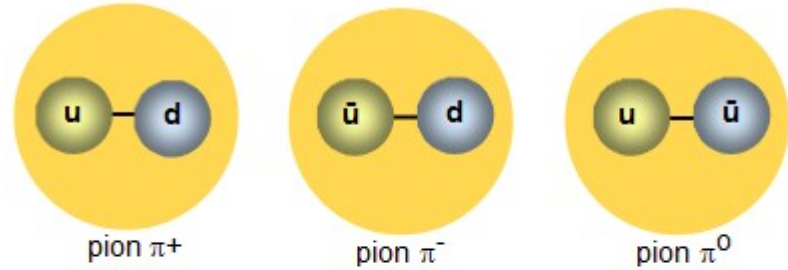


kaon⁰

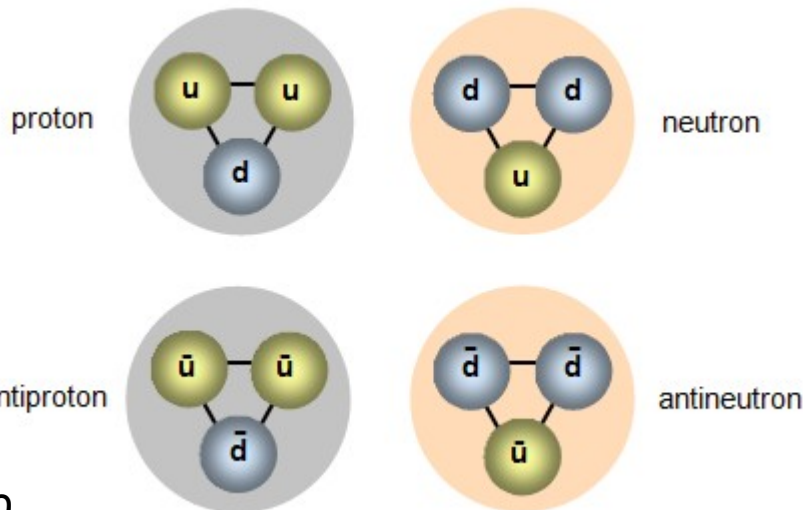
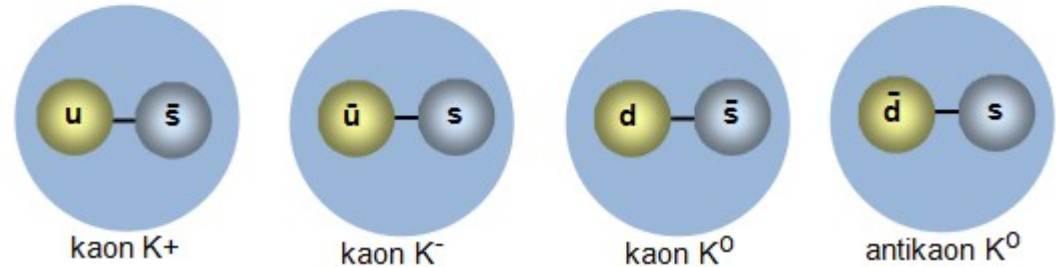
down & anti-strange

Przykłady hadronów (kwarki u , d , s)

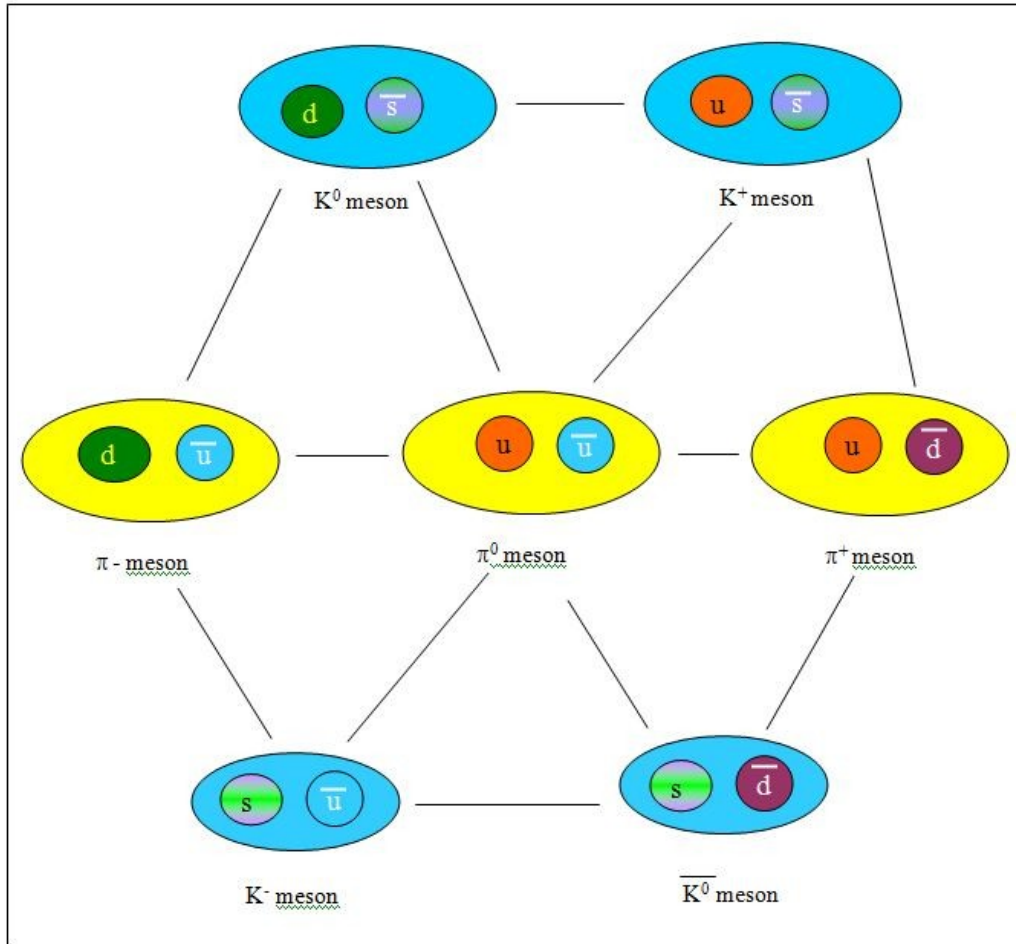
MEZONY



BARIONY



Przykłady mezonów (kwarki u , d , s)

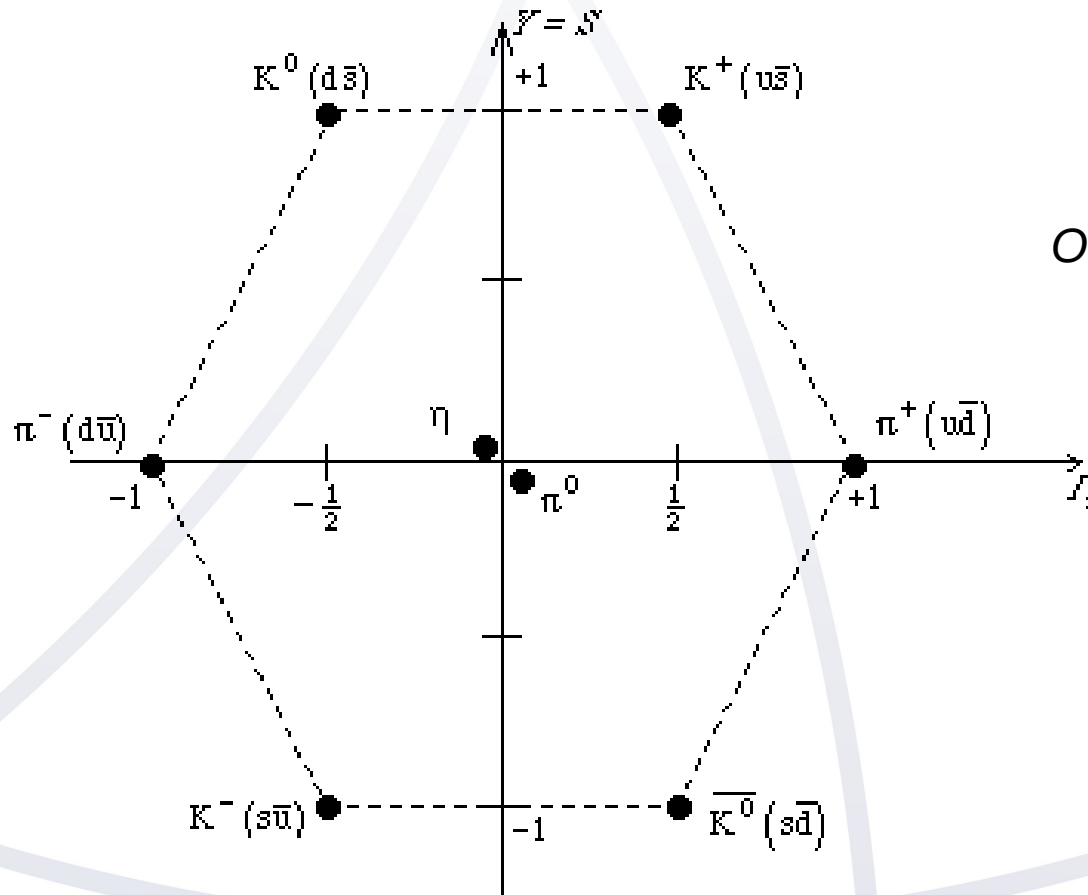


Kwark anty-dziwny

Bez kwarku dziwnego

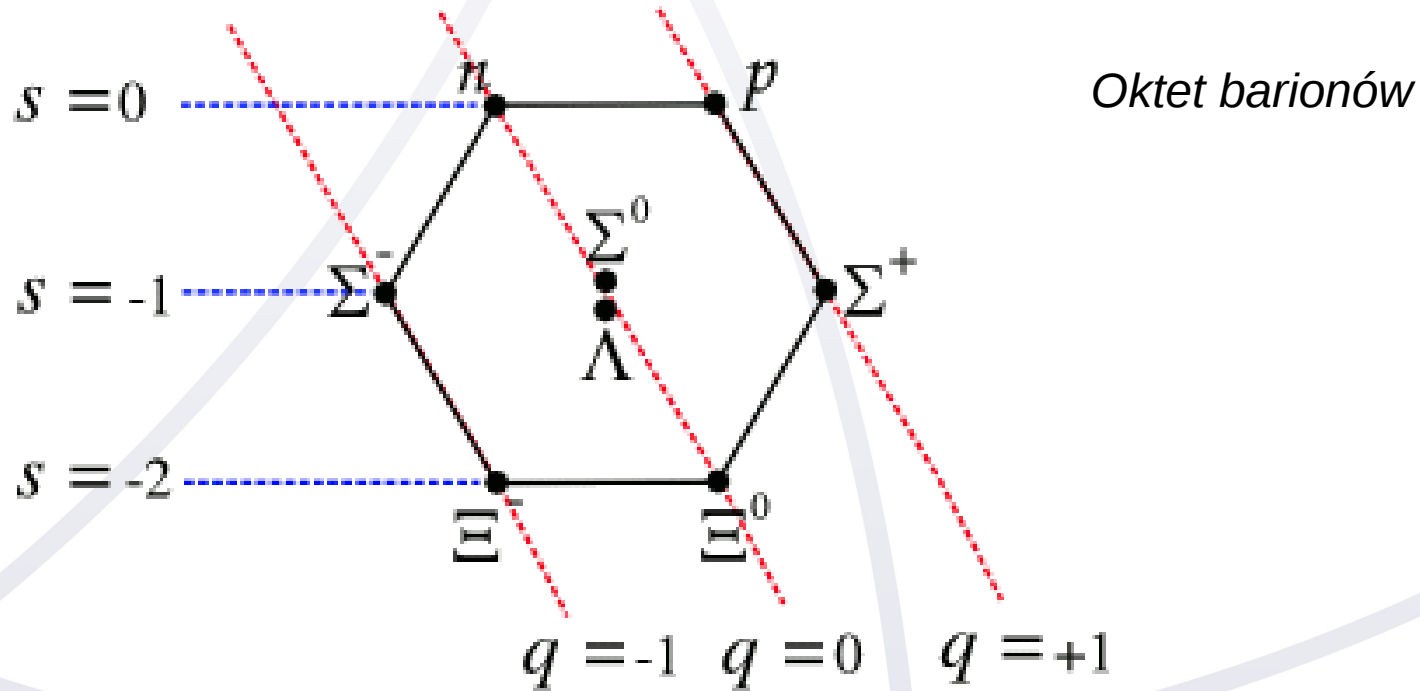
Kwark dziwny

Przykłady mezonów (kwarki u , d , s)



Oktet mezonów

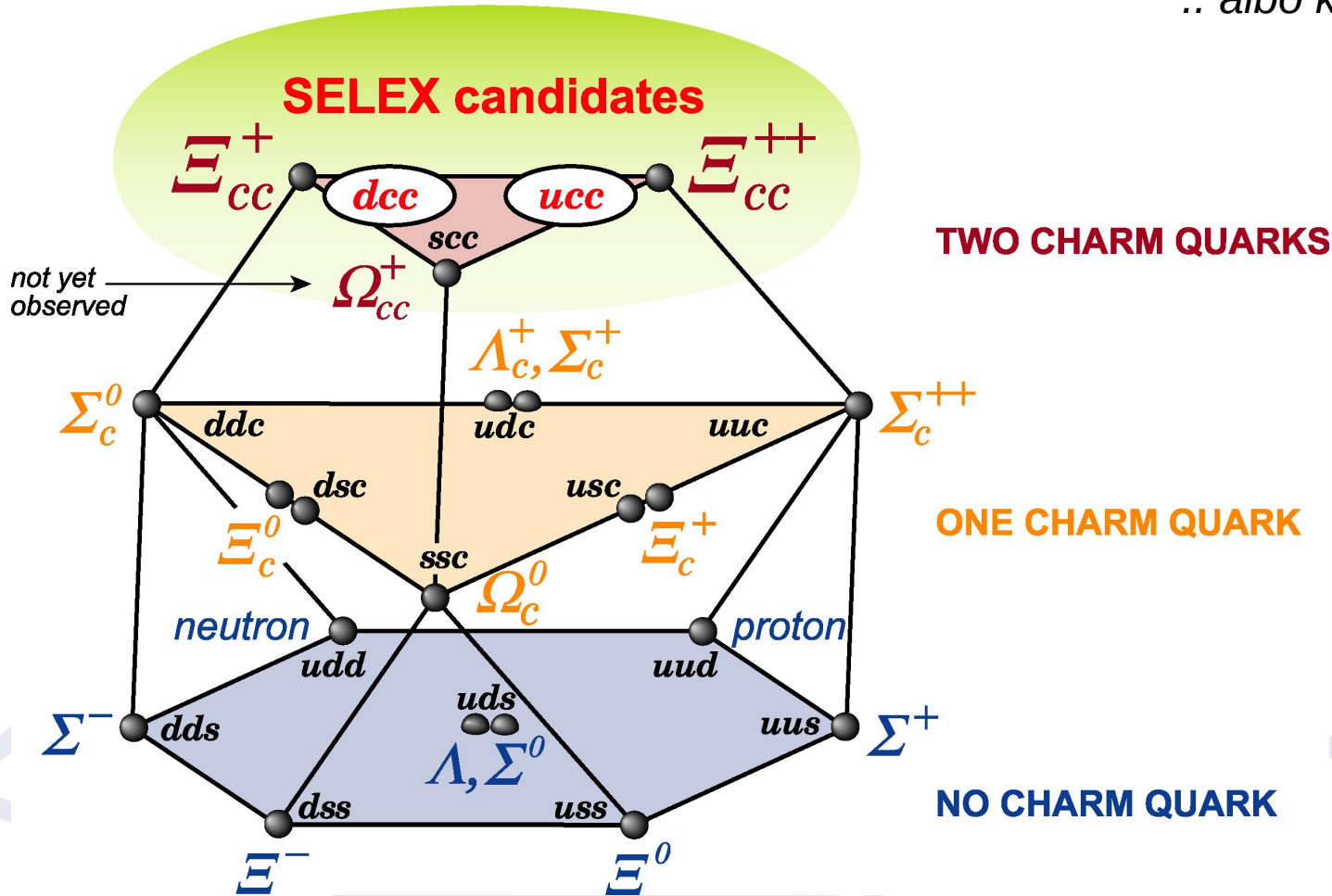
Przykłady barionów (kwarki u, d, s)



A jeśli dodamy jeszcze jeden kwark..

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

.. albo kwark c ..



Stabilność cząstek

- Większość cząstek jest niestabilna
- Każda cząstka posiada swój czas życia τ :



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



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



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

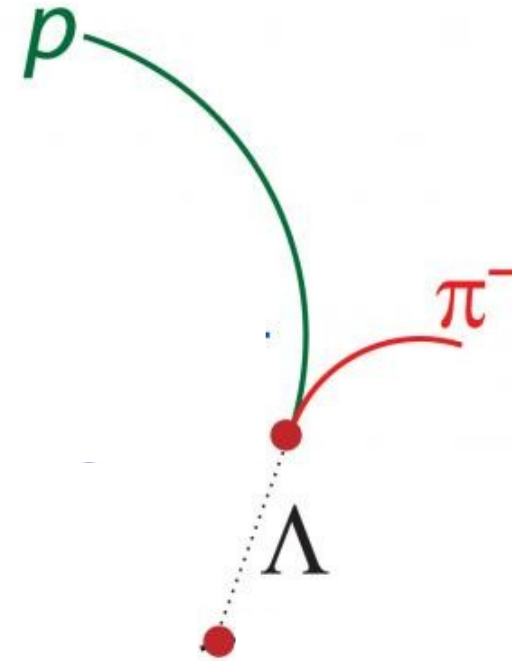
Λ : $\tau = (2,632 \pm 0,020) \times 10^{-10}$ s



Rozpady cząstek

Rozpad cząstki -

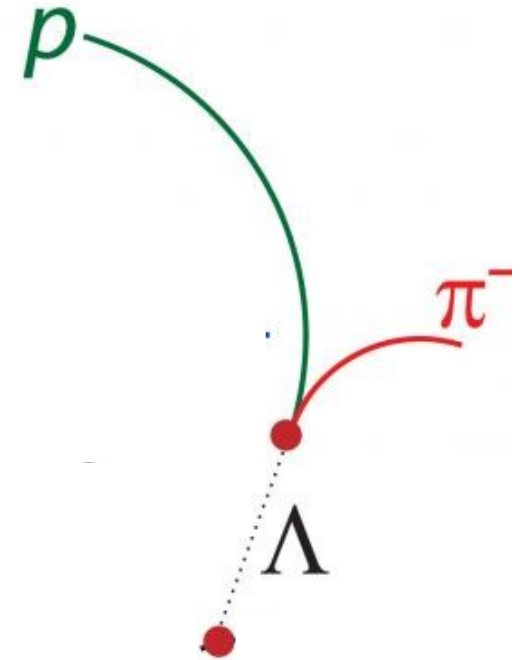
- spontaniczny proces, w wyniku którego cząstka przekształca się w inne cząstki;



Rozpady cząstek

Rozpad cząstki -

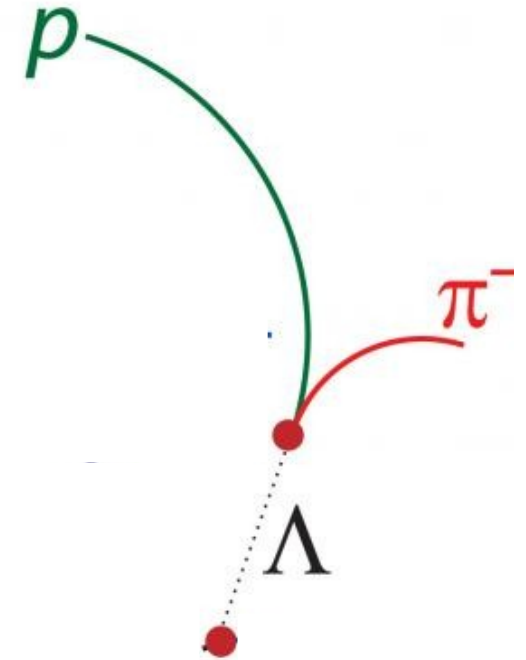
- spontaniczny proces, w wyniku którego cząstka przekształca się w inne cząstki;
- powstają cząstki o mniejszych masach;



Rozpady cząstek

Rozpad cząstki -

- spontaniczny proces, w wyniku którego cząstka przekształca się w inne cząstki;
- powstają cząstki o mniejszych masach;
- jeśli w trakcie procesu powstanie cząstka niestabilna, proces rozpadu zachodzi dalej.

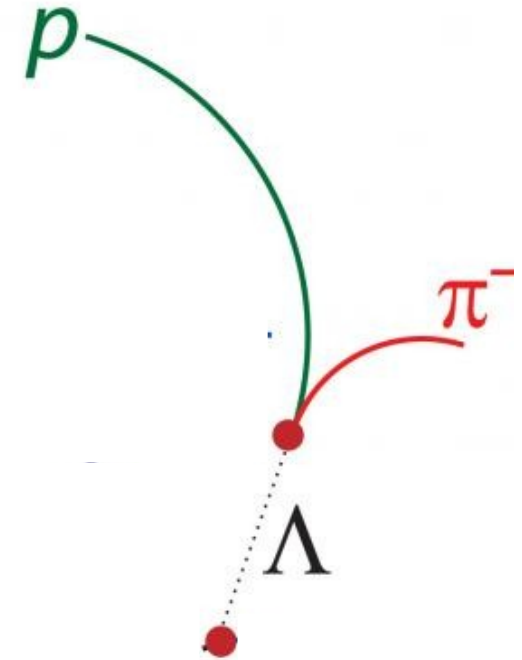


Rozpady cząstek

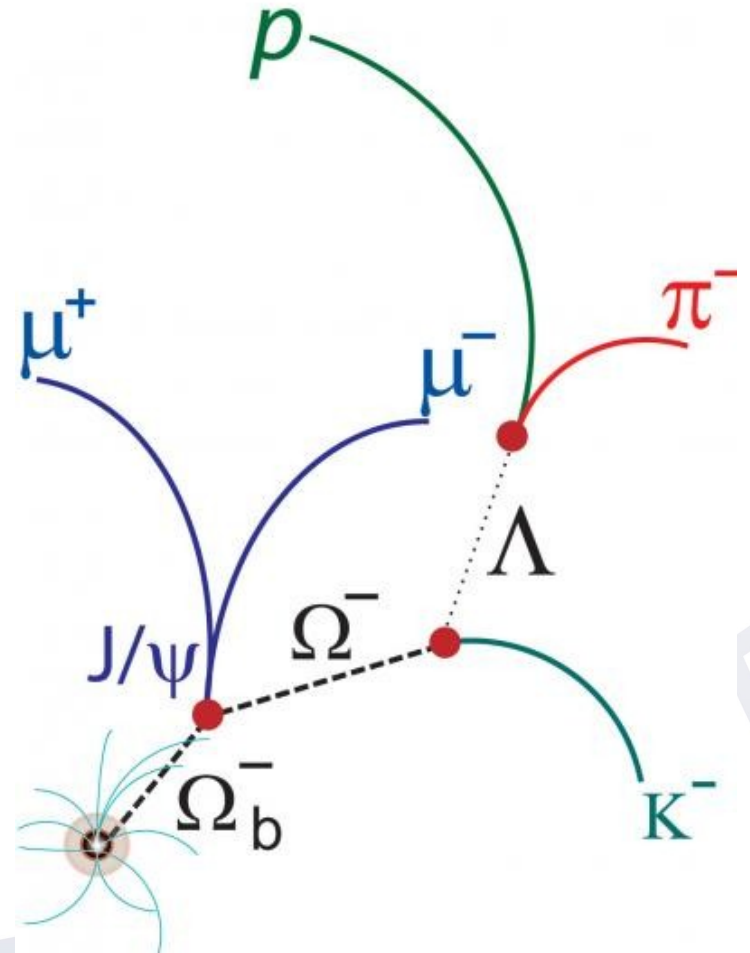
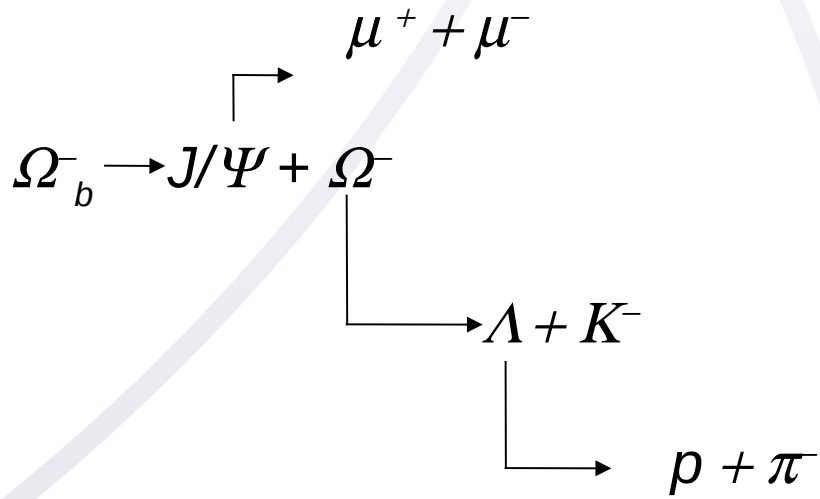
Rozpad cząstki -

- spontaniczny proces, w wyniku którego cząstka przekształca się w inne cząstki;
- powstają cząstki o mniejszych masach;
- jeśli w trakcie procesu powstanie cząstka niestabilna, proces rozpadu zachodzi dalej.

Mogą dotyczyć także radioaktywnym rozpadom jądrowym, kiedy 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: 10^{-8} s - 10^{-10} s)



Rozpady cząstek

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

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

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

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

Rozpady cząstek

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

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

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

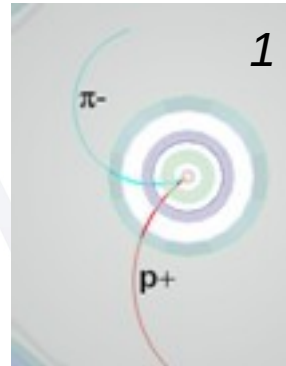
3. $\bar{\Lambda} \rightarrow \pi^+ + \bar{p}$

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

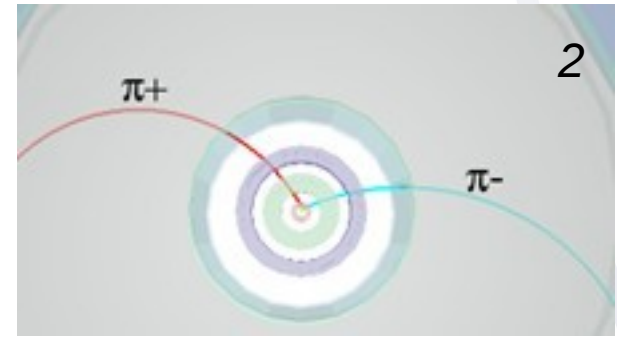


Przykłady rozpadów słabych

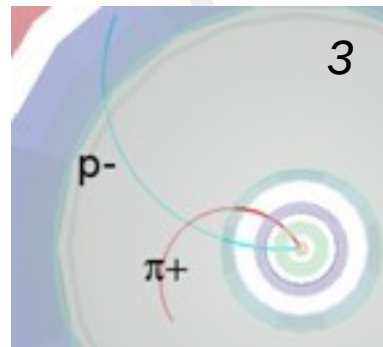
1. $\Lambda \rightarrow p + \pi^-$



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



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



Cząstki dziwne

*Cząstki dziwne - zawierają
przynajmniej jeden kwark lub antykwark dziwny.*



Cząstki dziwne

*Cząstki dziwne - zawierają
przynajmniej jeden kwark lub antykwark dziwny.*

Kwark dziwny: liczba kwantowa – dziwność ($S = -1$)

Antykwark dziwny: liczba kwantowa – dziwność ($S = 1$)



Cząstki dziwne

Cząstki dziwne - zawierają
przynajmniej jeden kwark lub antykwark dziwny.

Kwark dziwny: liczba kwantowa – dziwność ($S = -1$)

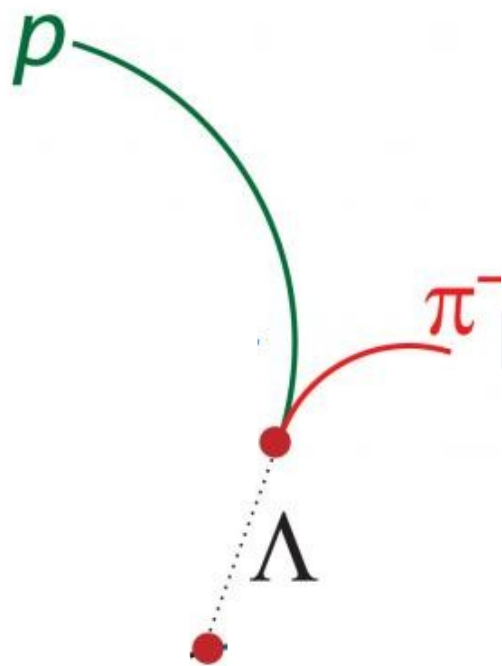
Antykwark dziwny: liczba kwantowa – dziwność ($S = 1$)

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

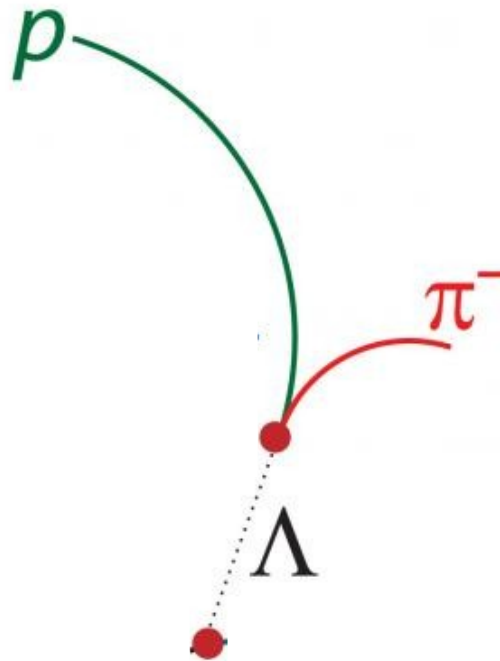
Najlżejszy (ok. **1115 MeV**) neutralny dziwny barion: Λ (kwarki: uds)



Cząstki dziwne



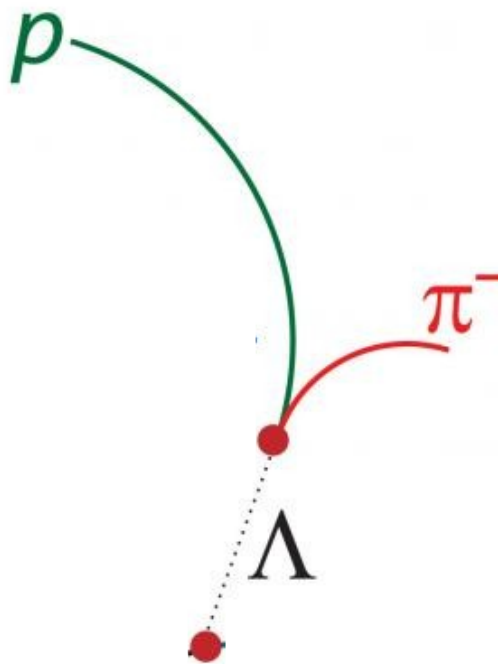
Cząstki dziwne



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.



Cząstki dziwne

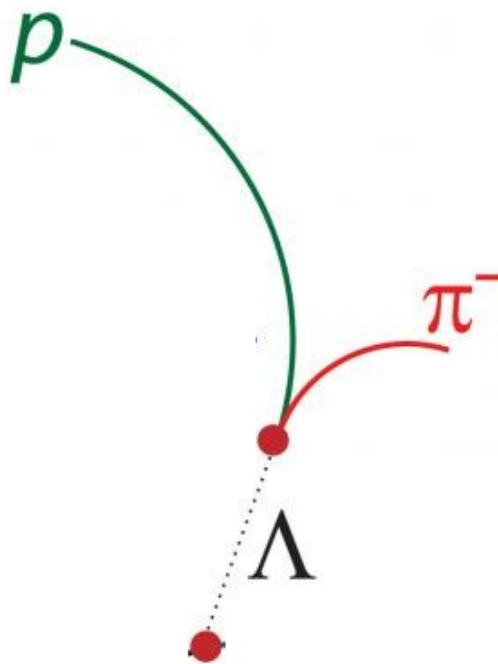


Cząstki przemieszczają się z $v \approx c$,
Produkty rozpadów (słabych) cząstek
obserwowane są w detektorze
w **odległości kilku cm** od punktu produkcji
cząstki rozpadającej się.

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



Cząstki dziwne



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



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

Cząstki dziwne

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).

Cząstki dziwne

mesons



pion

up & anti-down



kaon 0

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 - jedna z sygnatur rejestracji plazmy kwarkowo-gluonowej (ang. **Q**uark-**G**luon **P**lasma)*

Kwarki dziwne nie występują w otaczającej nas materii.

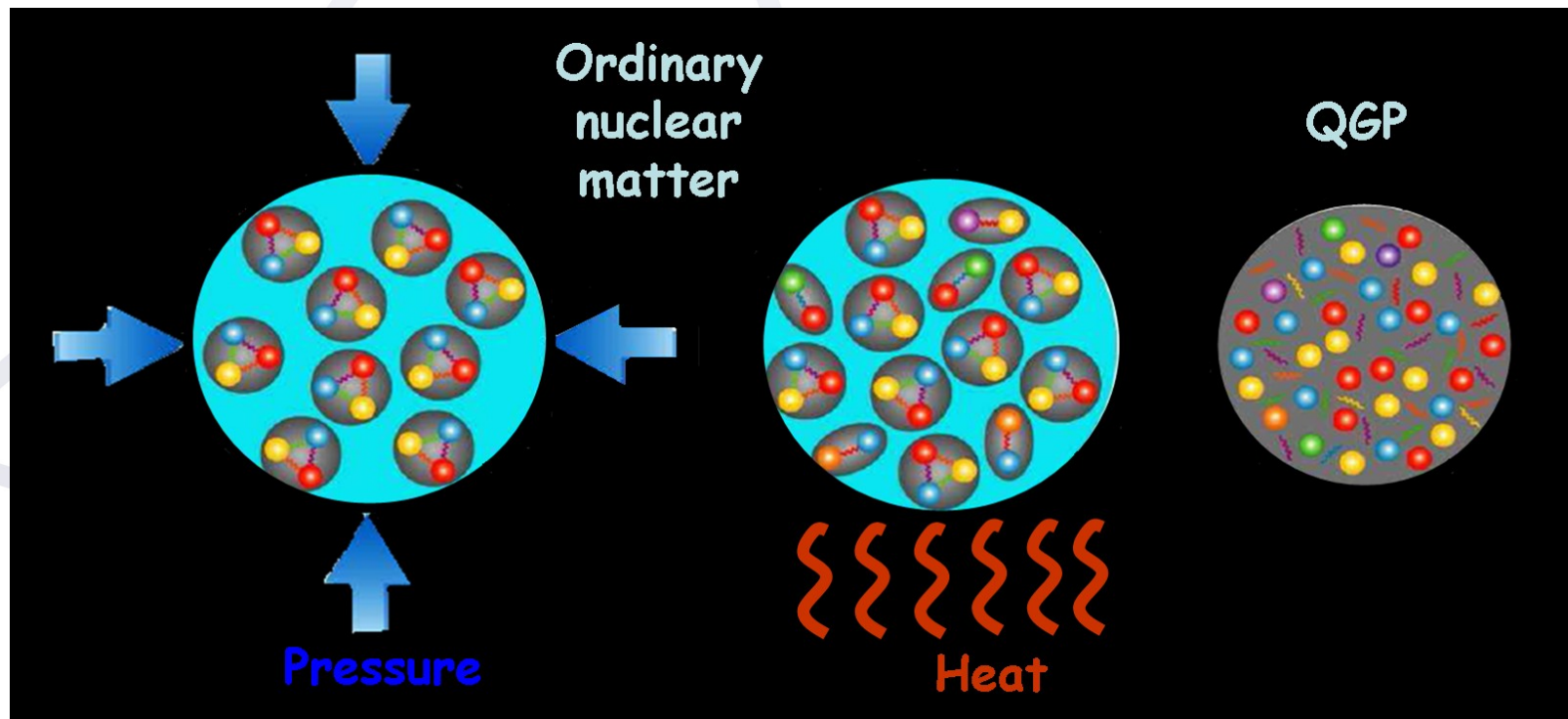


Produkcja dziwności

Wzmożona produkcja dziwności - 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**



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!



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 ?

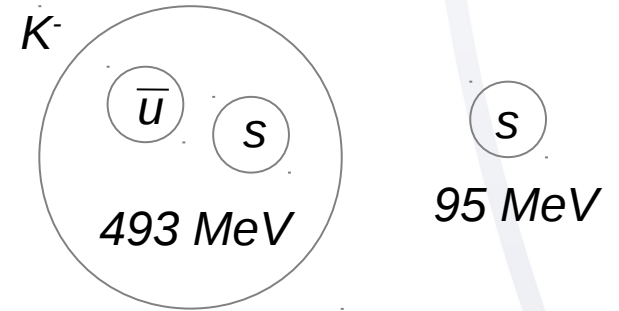


Produkcja dziwności

- 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**



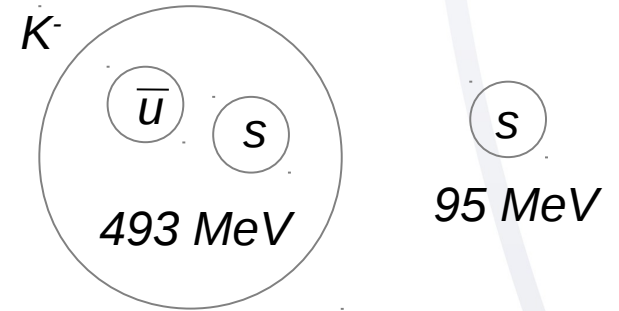
Produkcja dziwności

- 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 plaźmie kwarkowo-gluonowej kwarki **mogą** istnieć samodzielnie, więc koszt ich produkcji jest znacznie niższy!

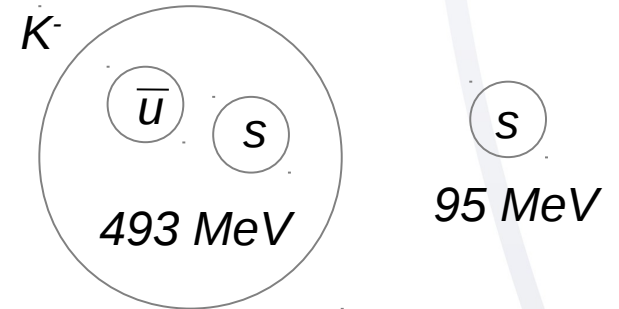


Produkcja dziwności

- 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**

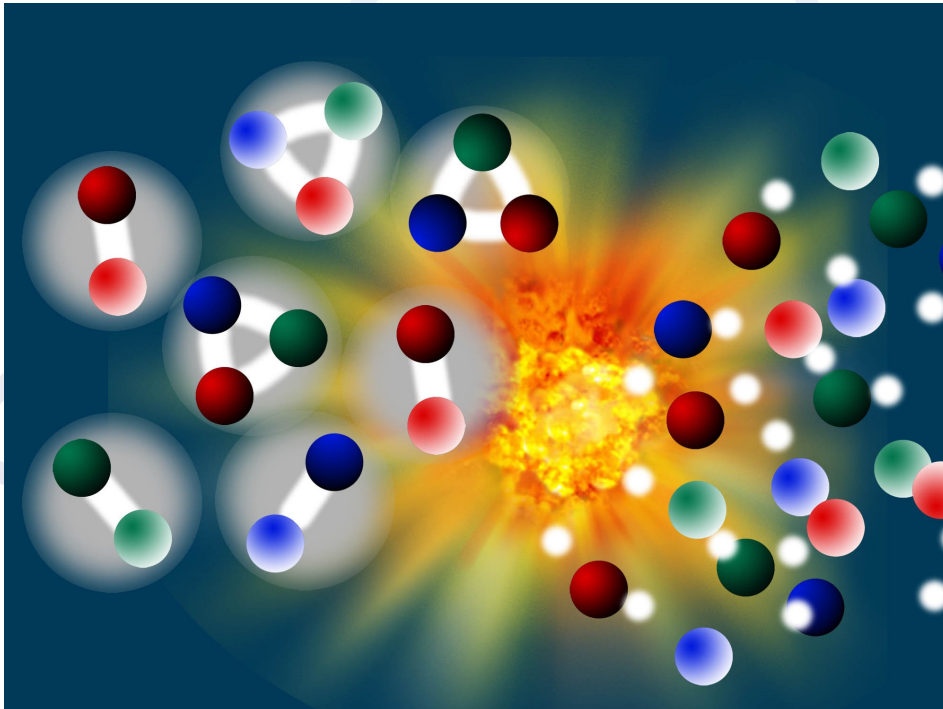
.. a pojedynczy kwark s to „koszt” ok. **95 MeV**



- W plaźmie 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

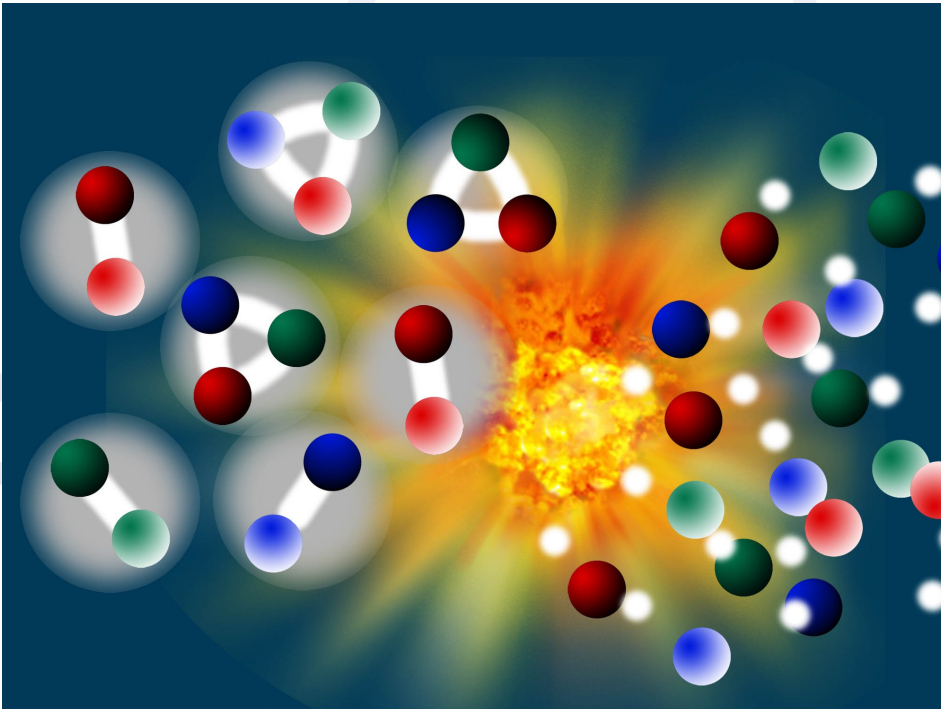
Kwarki i antykwarki dziwne, zgodnie z $E = mc^2$ są wyprodukowane z E_k zderzanych jonów.



Produkcja dziwności

Kwarki i antykwarki dziwne, zgodnie z $E = mc^2$ są wyprodukowane z E_k 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

Wzmożona produkcja cząstek dziwnych (zawierających przynajmniej jeden kwark lub antykwark dziwny)? GQP?



Produkcja dziwności

Wzmożona produkcja cząstek dziwnych (zawierających przynajmniej jeden kwark lub antykwark dziwny)? QGP?

Wzmożona produkcja cząstek dziwnych, gdy:

$$\frac{N_s}{N_{\bar{s}}} > \frac{N_s}{N_{\bar{s}}}$$

QGP

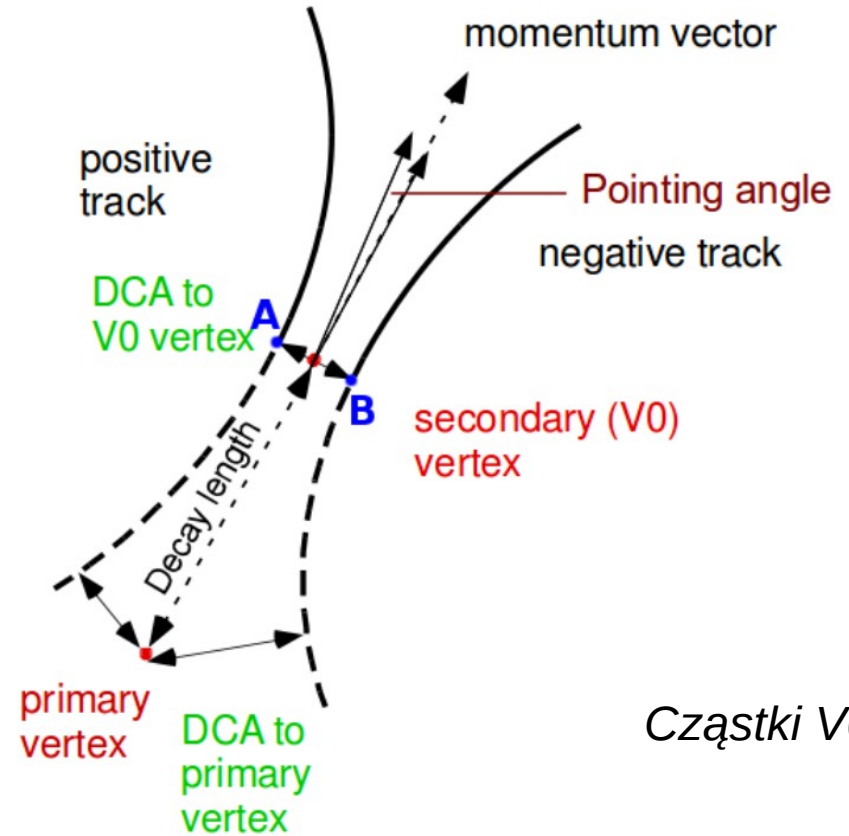
bez QGP

N_s - liczba wyprodukowanych cząstek dziwnych;

$N_{\bar{s}}$ - liczba cząstek nie zawierających kwarków dziwnych



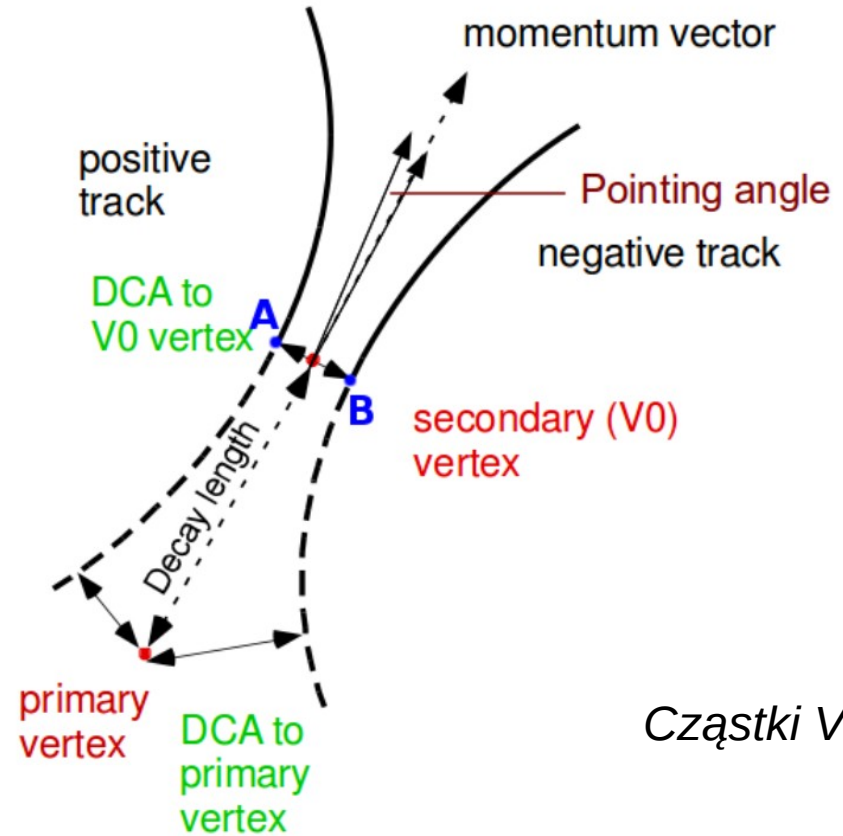
Rekonstrukcja cząstek dziwnych



Cząstki V0

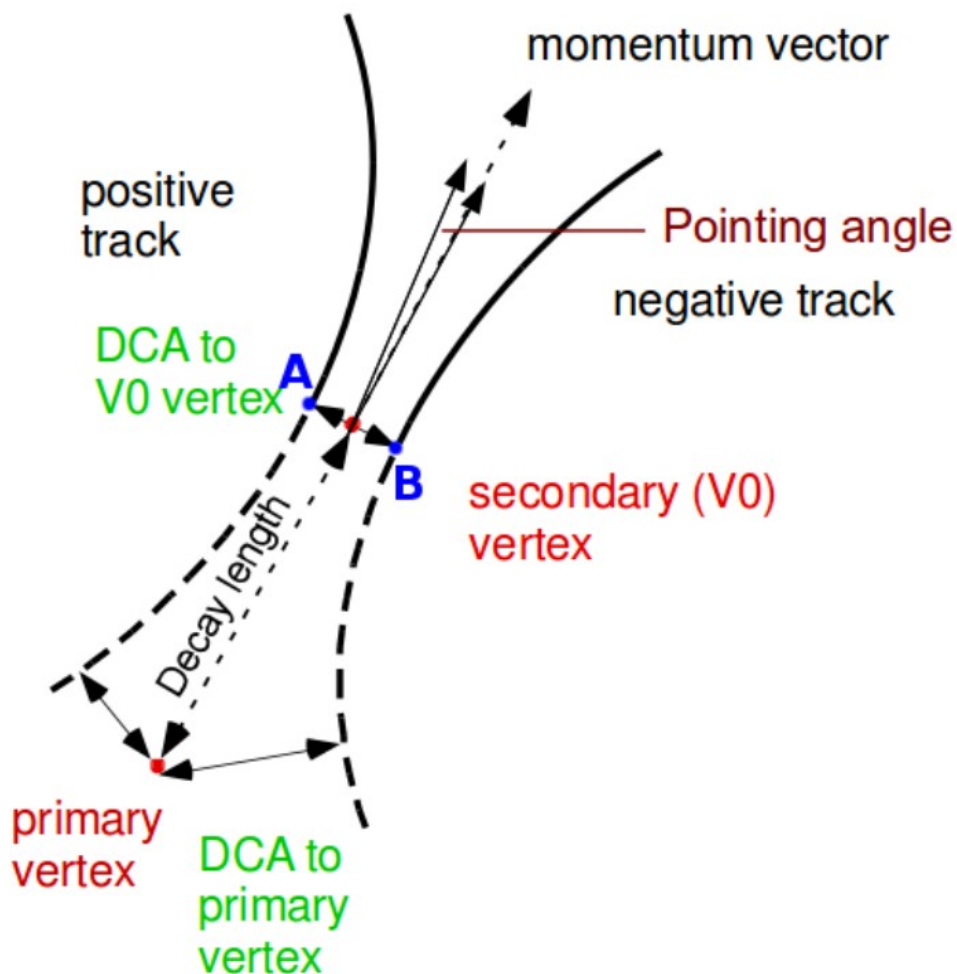
Rekonstrukcja cząstek dziwnych

Cząstki dziwne nie są stabilne, żyją krótko, zdążają w detektorze przemierzyć **odległość kilku centymetrów** (mierzoną od punktu, w jakim zostały wyprodukowane (Punkt Interakcji – ang. *Interaction Point*; Wierzchołek Pierwotny – ang. *Primary Vertex*) do punktu, w jakim uległy rozpadowi (Wierzchołek Wtórny – ang. *Secondary Vertex*)).

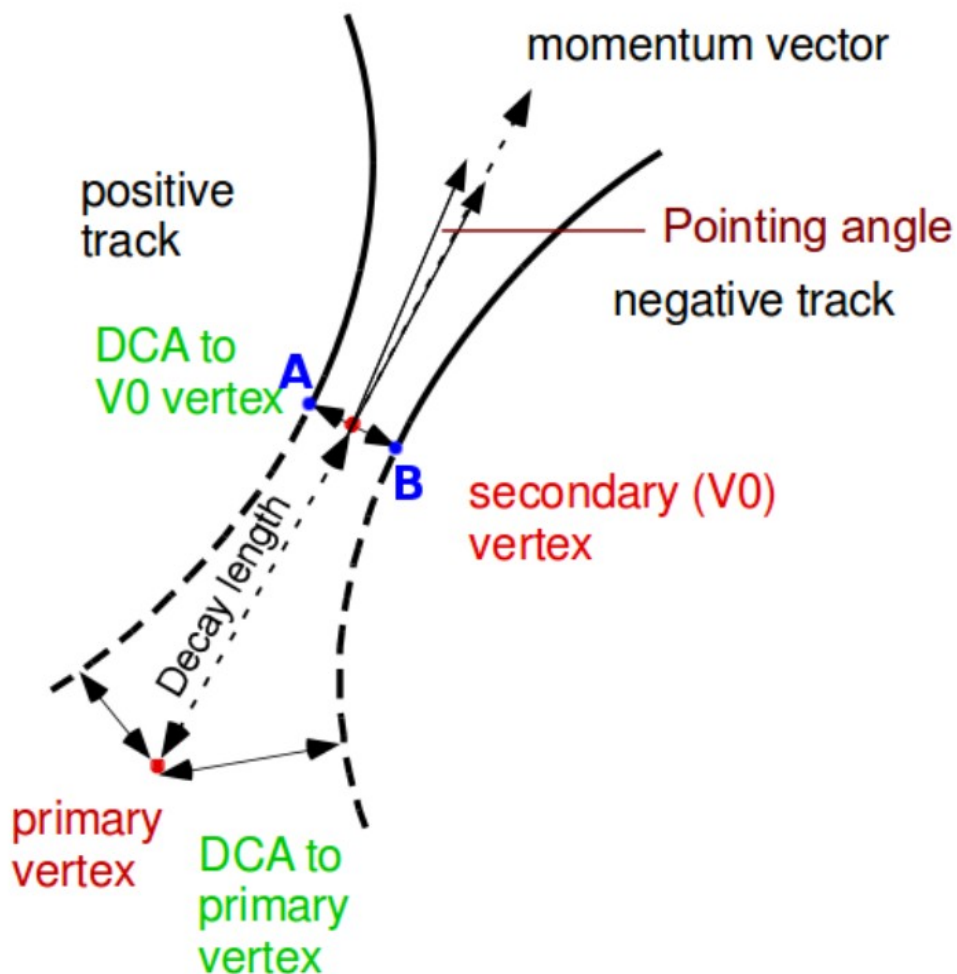


Rekonstrukcja produktów rozpadu

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



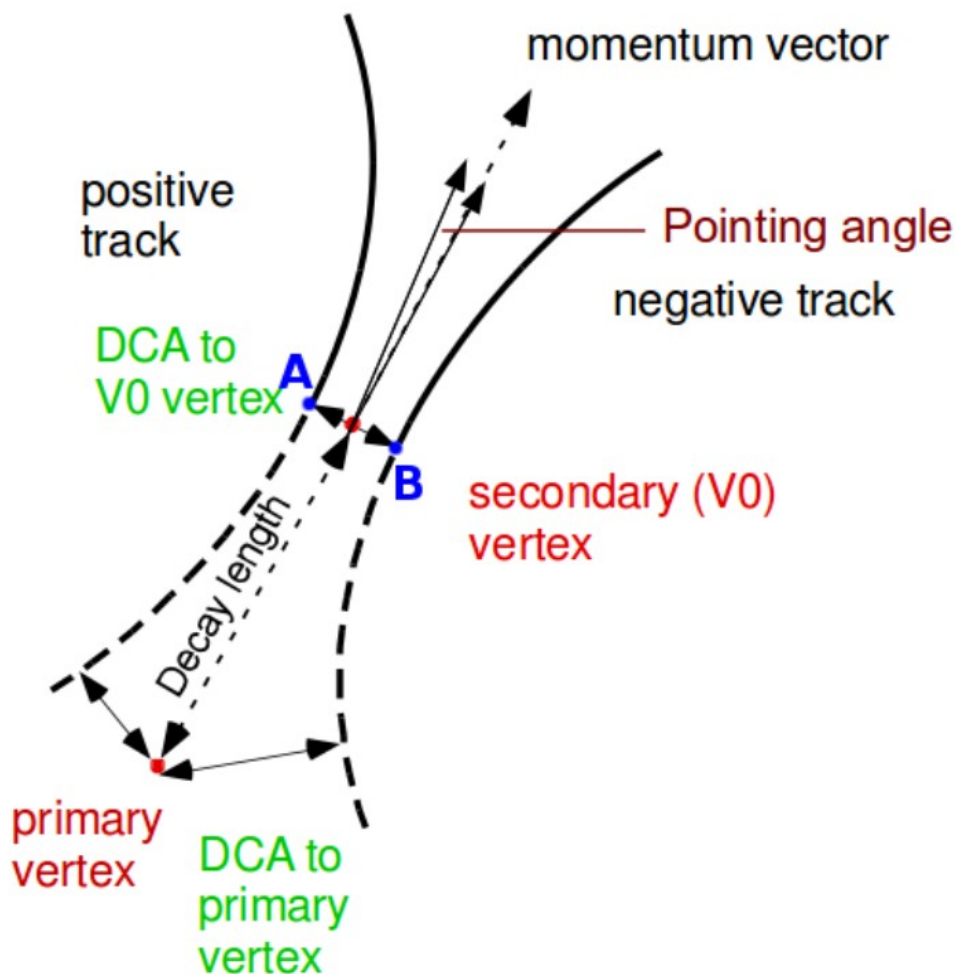
Rekonstrukcja produktów rozpadu



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

1) identyfikacja wierzchołka wtórnego i wyznaczenie jego współrzędnych

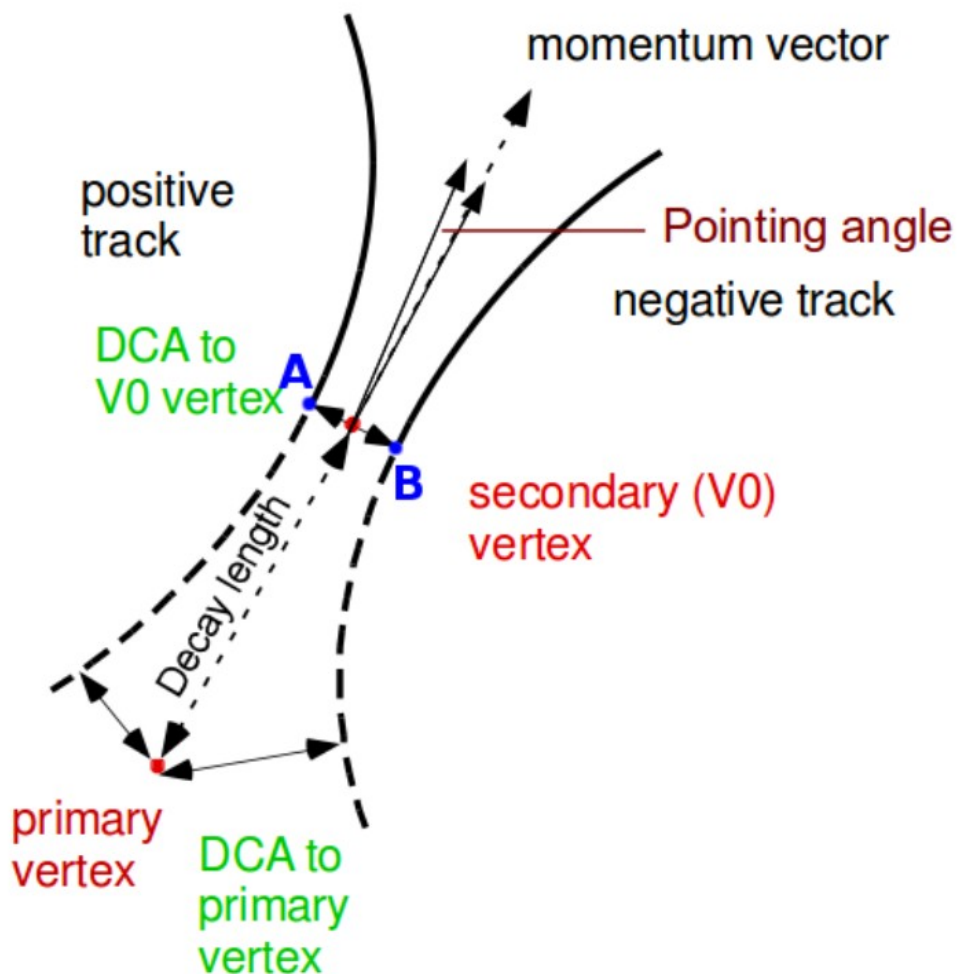
Rekonstrukcja produktów rozpadu



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

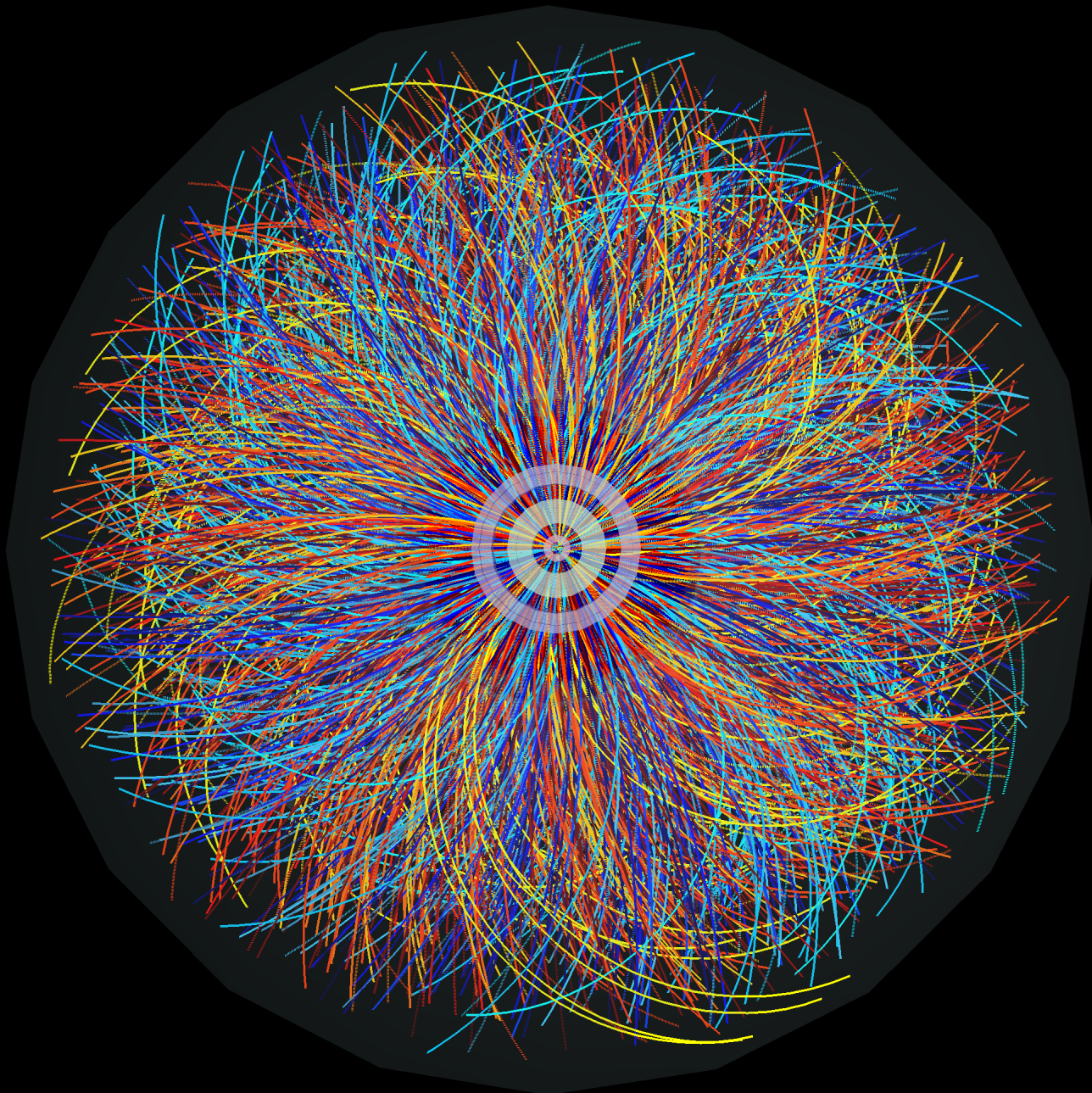
- 1) identyfikacja wierzchołka wtórnego i wyznaczenie jego współrzędnych
- 2) identyfikacja obu cząstek wtórnych i określenie wektorów ich pędów

Rekonstrukcja produktów rozpadu

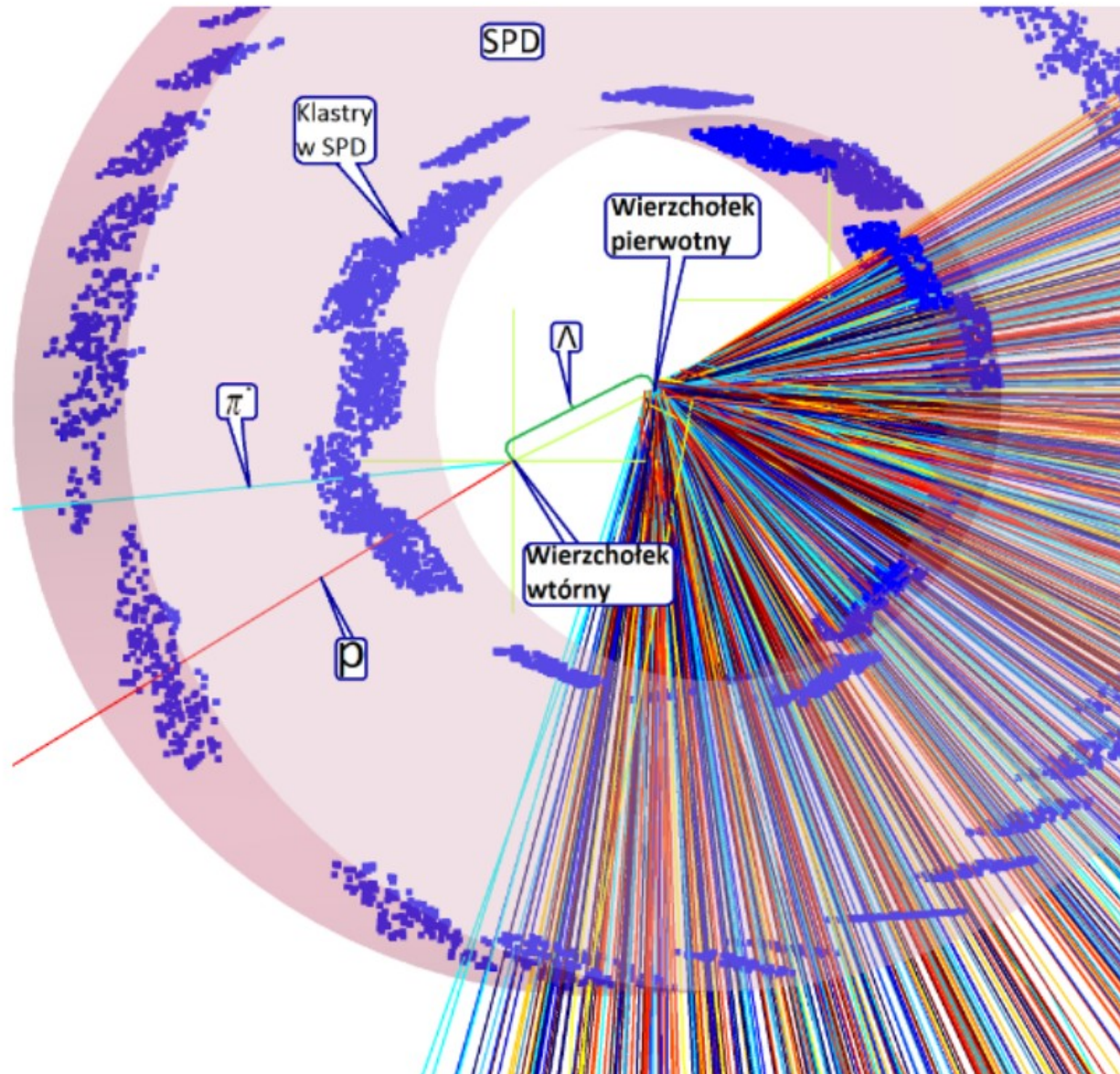


Proces rekonstrukcji rozpadu i identyfikacji neutralnej cząstki dziwnej rozpadającej się na parę cząstek naładowanych:

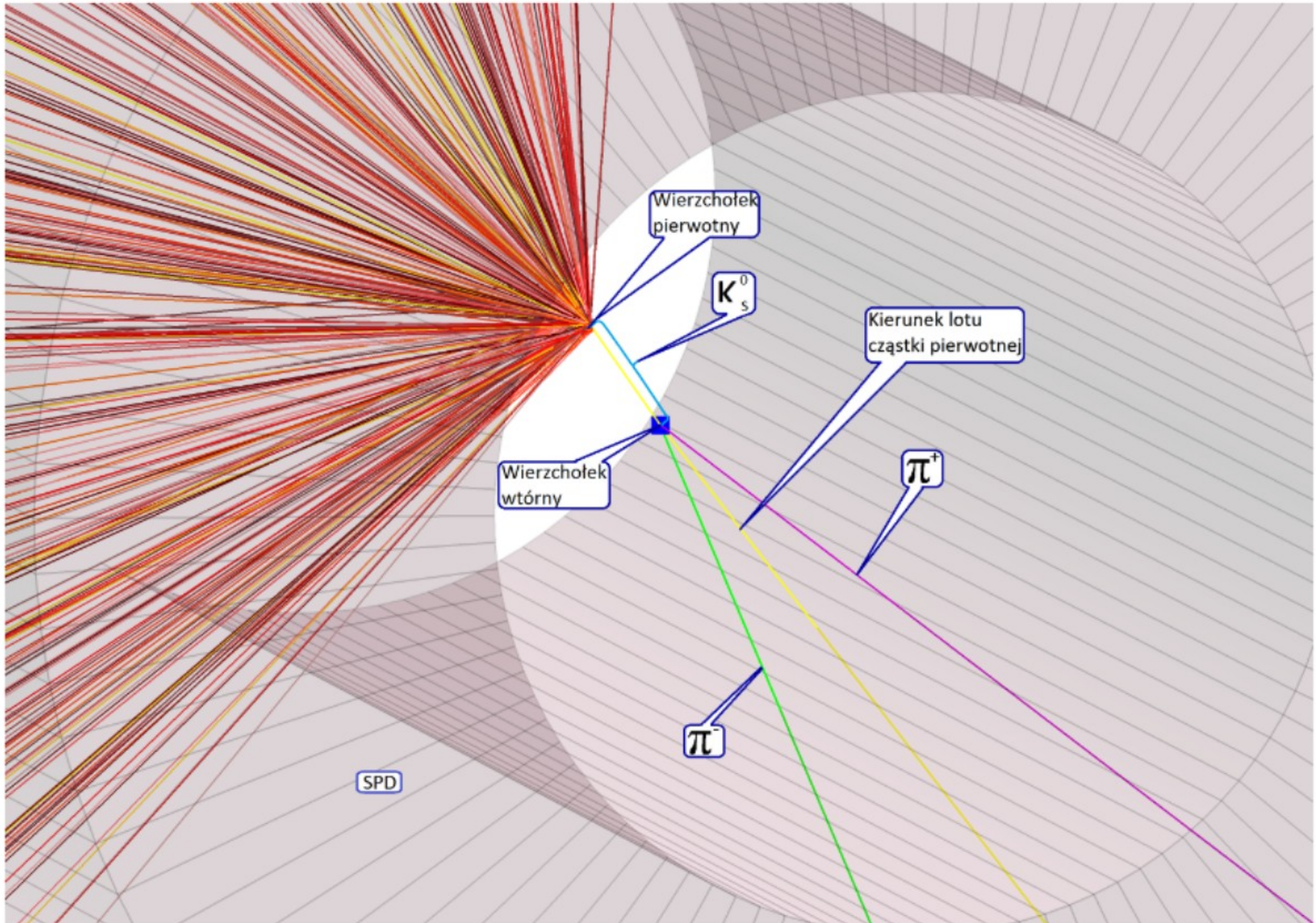
- 1) identyfikacja wierzchołka wtórnego i wyznaczenie jego współrzędnych
- 2) identyfikacja obu cząstek wtórnych i określenie wektorów ich pędów
- 3) weryfikacja kinematycznych zależności rozpadu cząstki neutralnej (*policzenie masy niezmienniczej*)



Przykłady rozpadów słabych



Przykłady rozpadów słabych



Masa niezmiennicza

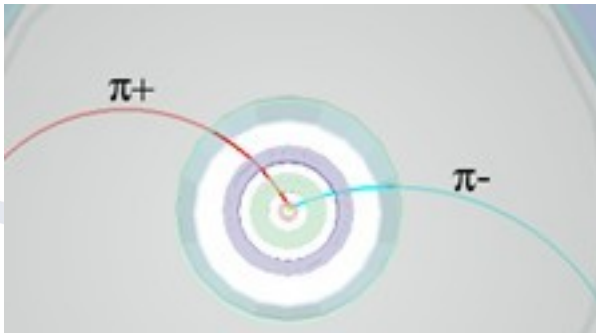
Masa niezmiennicza – masa inwariantna m_{inv}



Masa niezmiennicza

Masa niezmiennicza – masa inwariantna m_{inv}

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



Masa niezmiennicza

Masa niezmiennicza – masa inwariantna m_{inv}

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

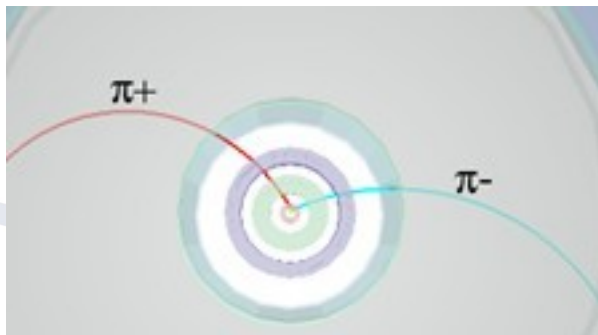
każda z cząstek jest opisana poprzez swój czterowektor pędu (p_x, p_y, p_z, E) i masę m .

K_0^S :

E – całkowita energia

\mathbf{p} – wektor pędu

m - masa



Masa niezmiennicza

Masa niezmiennicza – masa inwariantna 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

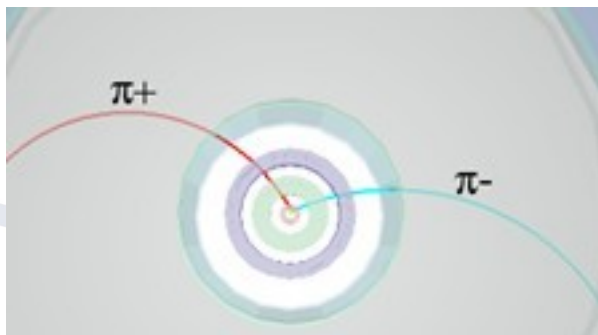
m_1 - masa

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)



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)

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

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



Masa niezmiennicza

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

$$m^2 = E^2 - p^2 = (E_1 + E_2)^2 - (p_1 + p_2)^2$$

$$m^2 = E_1^2 + 2E_1E_2 + E_2^2 - p_1p_1 - 2p_1p_2 - p_2p_2 \quad (6)$$

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

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

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

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

Masa niezmiennicza

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

$$m^2 = E^2 - p^2 = (E_1 + E_2)^2 - (p_1 + p_2)^2$$
$$m^2 = E_1^2 + 2E_1E_2 + E_2^2 - p_1p_1 - 2p_1p_2 - p_2p_2 \quad (6)$$

p_1p_2 - iloczyn skalarny p_1 oraz p_2

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

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

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

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

Masa niezmiennicza

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

$$m^2 = E^2 - p^2 = (E_1 + E_2)^2 - (p_1 + p_2)^2$$
$$m^2 = E_1^2 + 2E_1E_2 + E_2^2 - p_1p_1 - 2p_1p_2 - p_2p_2 \quad (6)$$

p_1p_2 - iloczyn skalarny p_1 oraz p_2

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

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

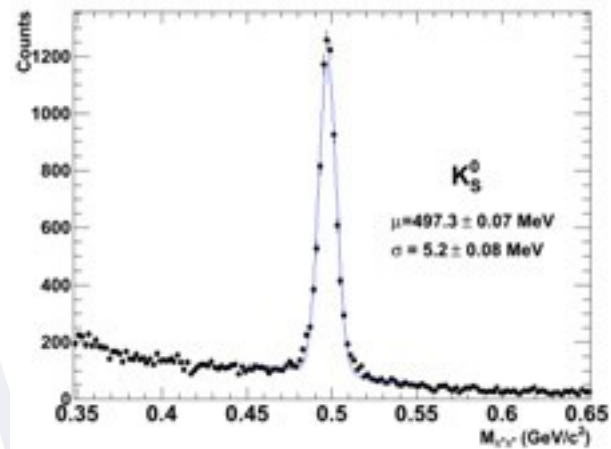
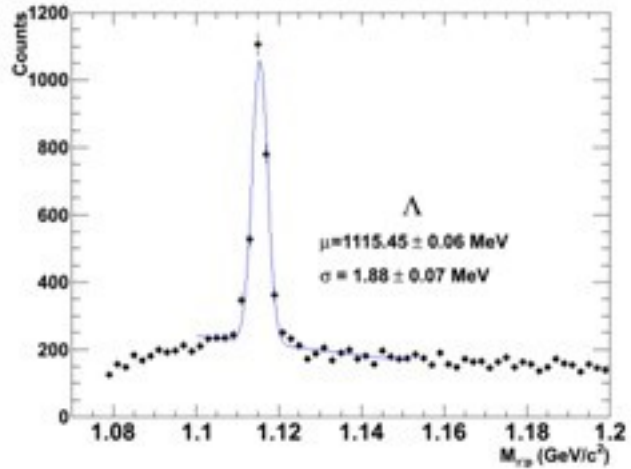
$$p_2p_2 = p_{2x}p_{2x} + p_{2y}p_{2y} + p_{2z}p_{2z} = p_2^2 \quad (9)$$

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

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



Masa niezmiennicza



Przykładowe rozkłady mas niezmienniczych

Dziękuję za uwagę!

Hanna Zbroszczyk



