Katarzyna Grebieszkow
Wydział Fizyki Politechniki Warszawskiej
Zakład Fizyki Jądrowej
Pracownia Reakcji Ciężkich Jonów

Fizyka zderzeń ciężkich jonów

https://kgrebieszkow.fizyka.pw.edu.pl/HIP/hip.html
(https://www.if.pw.edu.pl/~kperl/HIP/hip.html)

semestr letni 2024/2025

Plan wykładu, literatura, zasady zaliczenia

A. Fizyka cząstek elementarnych (fizyka wysokich energii)
B. Akceleratory, detektory, układy detektorów (eksperymenty)
C. Fizyka zderzeń ciężkich jonów – podstawy
D. Sygnatury plazmy kwarkowo-gluonowej

Literatura:
1. *D. H. Perkins "Wstęp do fizyki wysokich energii" PWN 2004 (lub wydania angielskie)*
2. *J. Bartke "Introduction to Relativistic Heavy Ion Physics" World Scientific 2009*
3. *E. Skrzypczak, Z. Szefliński "Wstęp do Fizyki Jądrowej i Cząstek Elementarnych"*
4. *W. Florkowski "Phenomenology of Ultra-Relativistic Heavy-Ion Collisions" World Scientific 2010*
5. *F. Close "Kosmiczna Cebula"*
6. *https://www.ifj.edu.pl/przygoda (https://particleadventure.org)*
7. *publikacje na stronie:* ***https://kgrebieszkow.fizyka.pw.edu.pl/HIP/hip.html***

Zasady zaliczenia:
Egzamin pisemny w formie testu
Poprawa w formie egzaminu ustnego – losowane 3 pytania

Uwagi:
1. Brak jednego podręcznika do wykładu (za to sporo przeglądowych publikacji)
2. „Slang"; jest trochę zwrotów które nie będą tłumaczone bo na razie nie ma ich polskich odpowiedników a i angielskie zwroty lepiej znać

Prawa autorskie, literatura

1. Większość rysunków pochodzi z oficjalnie dostępnych publikacji poszczególnych eksperymentów (INSPIRE, arXiv)
https://inspirehep.net, https://arxiv.org

https://arxiv.org $\rightarrow$ *bardzo użyteczna strona z publikacjami tzw. pre-printy (można zapisać się na listy mailowe i dostawać wiadomości o nowych pracach; listy: hep-ex, hep-ph,* ***nucl-th, nucl-ex****)*

2. Baza rysunków na stronach eksperymentów NA49, NA61/SHINE, STAR, ALICE, etc. Szczególne podziękowania dla Marka Gaździckiego z NA49 i NA61/SHINE za udostępnienie obrazków

3. Początkowe wykłady zawierają rysunki prof. Andrzeja Kajetana Wróblewskiego z Instytutu Fizyki Doświadczalnej Uniwersytetu Warszawskiego (skrót: Rys. AKW) – gorące podziękowania!

4. Kolorowe “śmieszne” obrazki w większości pochodzą ze strony: https://www.ifj.edu.pl/przygoda (skrót: Rys. PA)

Katarzyna Grebieszkow
Wydział Fizyki Politechniki Warszawskiej
Zakład Fizyki Jądrowej
Pracownia Reakcji Ciężkich Jonów

”Fizyka zderzeń ciężkich jonów”

semestr letni 2024/2025

Wykład 1

1. Po co nam wysokie energie? Używane skale i jednostki.
2. Cząstki elementarne. Klasyfikacja cząstek.

1. Po co nam wysokie energie? Używane skale i jednostki.

- HEP (High Energy Physics) – fizyka wysokich energii / fizyka cząstek elementarnych – odpowiada na pytanie jak i z czego zbudowana jest materia w najmniejszych skalach odległości
- Początek fizyki cząstek elementarnych – odkrycie elektronu ponad 120 lat temu (1897)
- następne 50 lat – badania nad promieniowaniem kosmicznym (jedyne dostępne źródło wysokoenergetycznych cząstek)
- po 1950 roku – budowa akceleratorów, produkcja nowych cząstek $\rightarrow$ odsłonięcie kwarkowej struktury materii

Dlaczego wysokie energie?

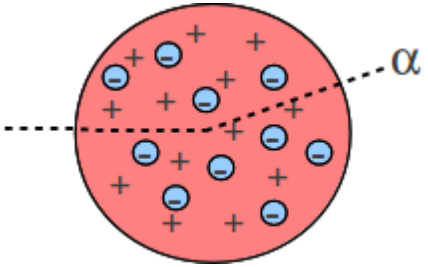
1. Zdolność rozdzielcza
2. Produkcja cząstek o dużych masach

1. Zdolność rozdzielcza

Szukamy „elementarnych” składników materii – cząstek pozbawionych struktury (punktowych). Na ile punktowe jest coś co jest punktowe?

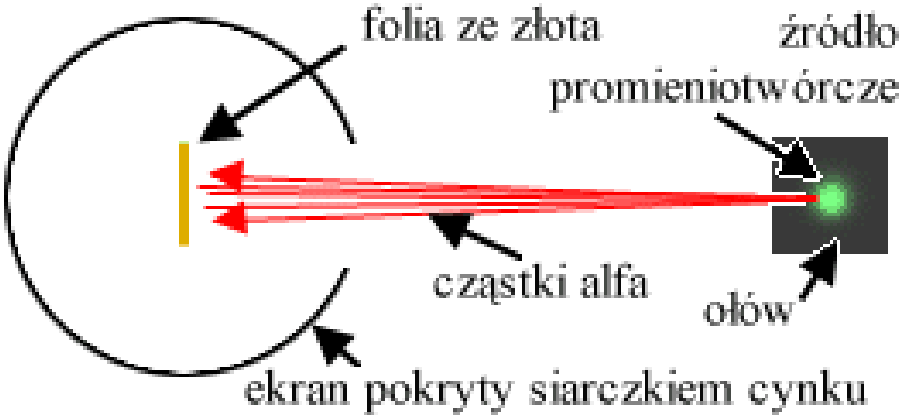
Przypomnienie: eksperyment Rutherforda – odkrycie jąder atomowych
do 1909 – atom jest gąbczastą, półprzepuszczalną kulką z drobinami ładunku rozproszonego wewnątrz (ciasto z rodzynkami – model J. J. Thomsona)

Atom – sfera o równomiernie rozłożonym ładunku dodatnim – „ciasto” (promień 10^{-8} m) a wewnątrz elektrony („rodzynki”)



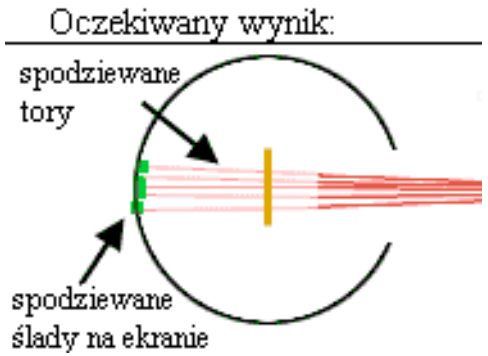
1909 – doświadczenie Rutherforda, czyli pierwsza próba zajrzenia do wnętrza obiektu, którego nie dało się obejrzeć pod mikroskopem

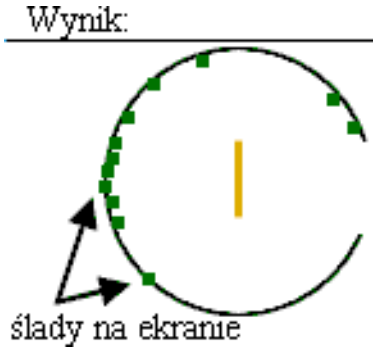
Przechodzące przez folię cząstki alfa, uderzając w ekran miały powodować na nim małe błyski światła (ekran – detektor)



Rys. PA

Oczekiwania (w przypadku przepuszczalnych, obojętnych kulek) i wyniki (rozpraszanie pod różnymi, nawet bardzo dużymi kątami)

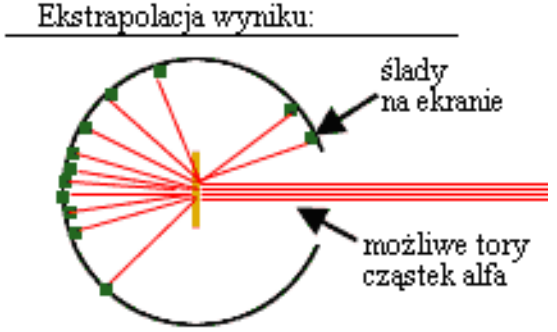


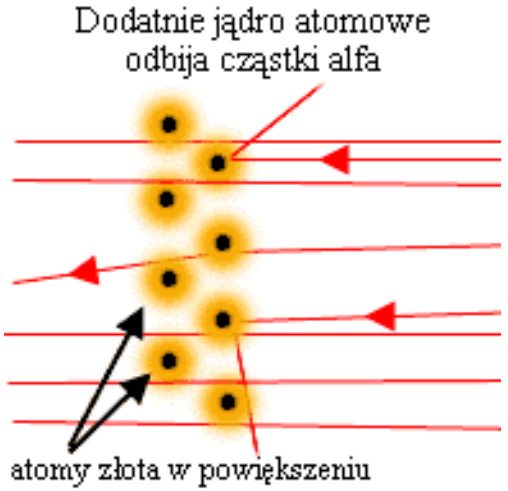


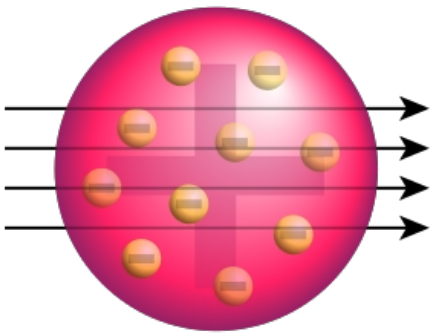
„To było tak jakbyście wystrzelili piętnastocalowy pocisk w kierunku kawałka bibułki, a on odbił się i was uderzył.”
Rutherford

Zgodnie z wcześniejszym modelem Thomsona (ciasto z rodzynkami) – rozproszenie pod bardzo dużymi kątami niezwykle mało prawdopodobne!

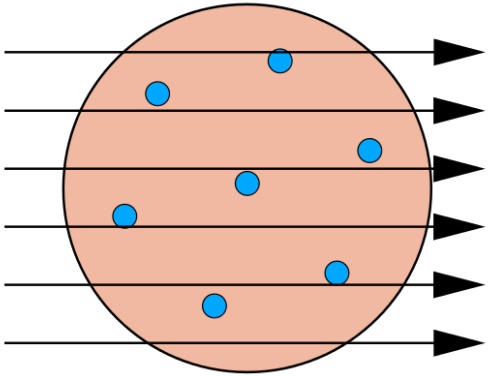
Wyjaśnienie: istnienie małych, ciężkich i naładowanych dodatnio **jąder atomowych**, powodujących rozpraszanie cząstek alfa



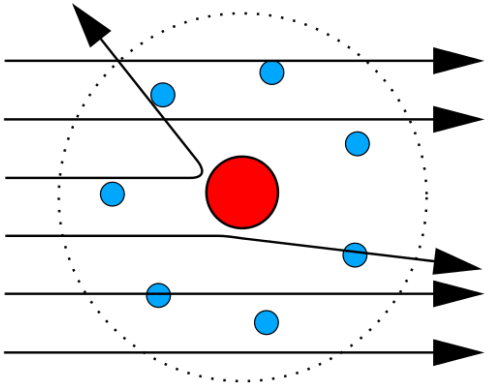


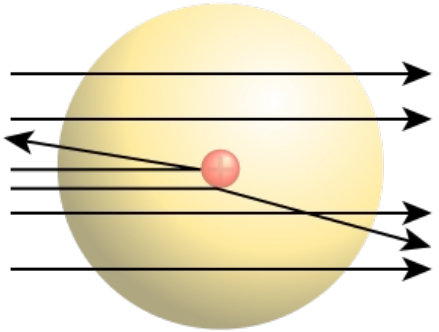


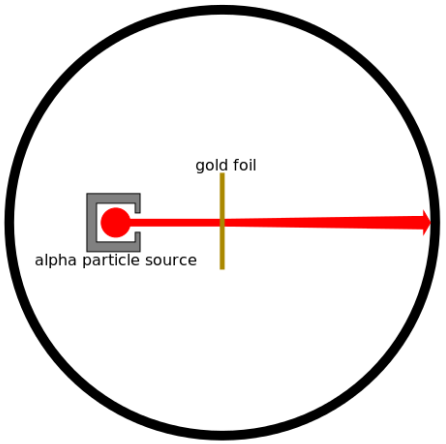
THOMSON MODEL

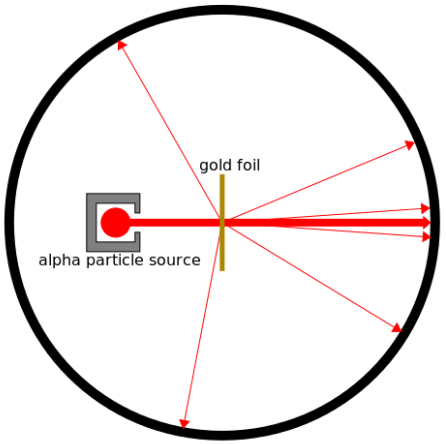


RUTHERFORD MODEL









observed result

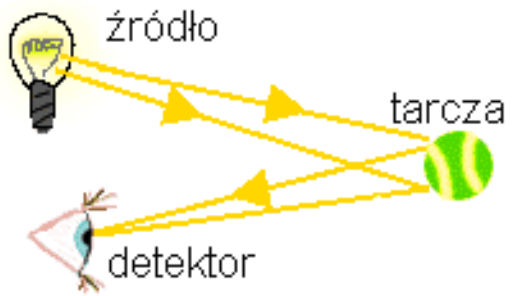
https://en.wikipedia.org/wiki/Geiger%E2%80%93Marsden_experiments

https://pl.wikipedia.org/wiki/Eksperyment_Rutherforda

Współczesne eksperymenty w fizyce cząstek elementarnych mają również:
1. wiązkę (cząstki alfa w doświadczeniu Rutherforda)
2. tarczę (folia z atomami złota u Rutherforda)
3. detektor (ekran pokryty siarczkiem cynku u Rutherforda)

Obserwacja struktury obiektów również odbywa się przy użyciu **wiązki cząstek!**

Eksperymenty codzienne (najprostszy układ źródło-tarcza-detektor):



Rys. PA

Do obserwacji: wiązka fotonów (własności korpuskularno-falowe)

żarówka → fotony → odbicie od piłeczki → oko (detektor);
z kierunku odbitych fotonów (kształt piłki) i ich długości fali (kolor piłki) docierających do oka mózg wytwarza wrażenie piłki tenisowej

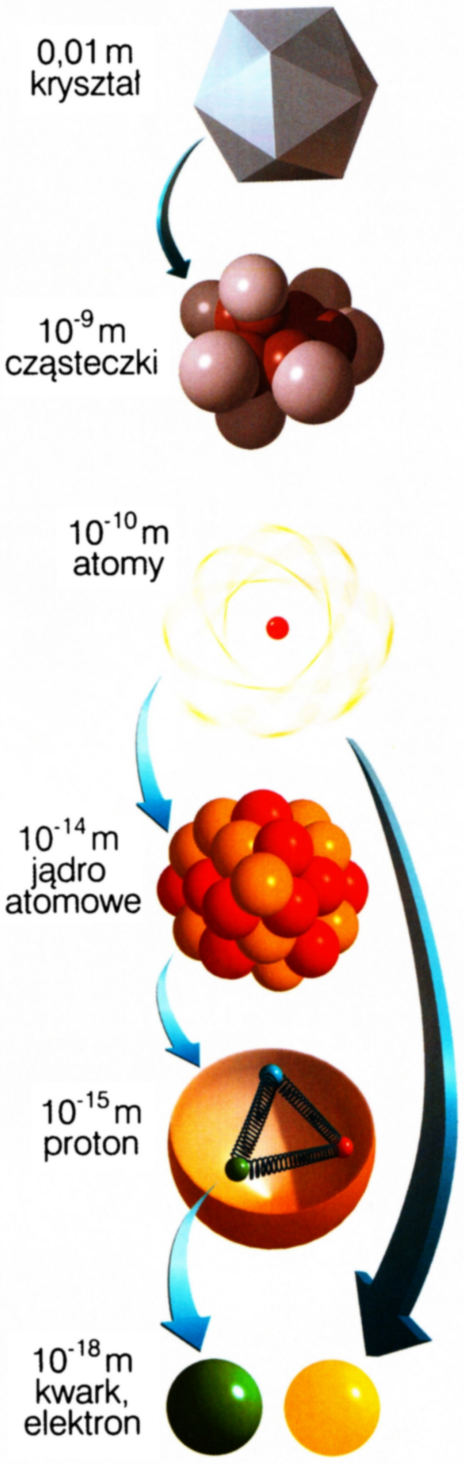
Różne rodzaje fal (nie tylko świetlne!) mogą być użyte do uzyskiwania informacji o obiektach np. emisja i rejestracja fal dźwiękowych (delfiny, nietoperze)

Uwaga: Problem z zastosowaniem fal do rejestrowania otaczającego nas świata to ograniczenie jakości obrazu poprzez długość zastosowanej fali

Światło widzialne – długość fali rzędu 500 nm, wystarczająco mała żeby nie martwić się o rozdzielczość (nie oglądamy przedmiotów tak małych na co dzień). Obiekty mniejsze od komórki, wirusy – wymagają mniejszych długości fal (mikroskopy elektronowe skaningowe → mogą pokazać tylko bardzo zamazany obraz atomu; ciekawostka: obrazowanie wewnątrzatomowej struktury elektronowej, zob. Phys. Rev. B 80 (2009), 165404)

Zdolność rozdzielcza jest równa **Δr** gdy można rozróżnić dwa punkty w obiekcie odległe o Δr
Jeśli wiązka używana do badania składa się z cząstek punktowych to jej zdolność rozdzielcza jest ograniczona długością fali de Broglie'a tych cząstek **λ=h/p**
Cząstki o wysokiej energii – małe długości fal, bardzo dobra zdolność rozdzielcza

Mikroskop optyczny:
$\Delta r \cong \lambda/\sin\theta$, θ – apertura kątowa wiązki światła
$\Delta r \cong \lambda/\sin\theta = h/(p \sin\theta) \cong h/q$ q – pęd przekazany fotonom lub cząstkom wiązki podczas ich rozpraszania na obiekcie
np. przekaz pędu qc=10 GeV (łatwo osiągalny współcześnie!) daje rozdzielczość przestrzenną hc/(qc) około 10^{-16} m
(10 x mniej niż promień rozkładu masy i ładunku w protonie)

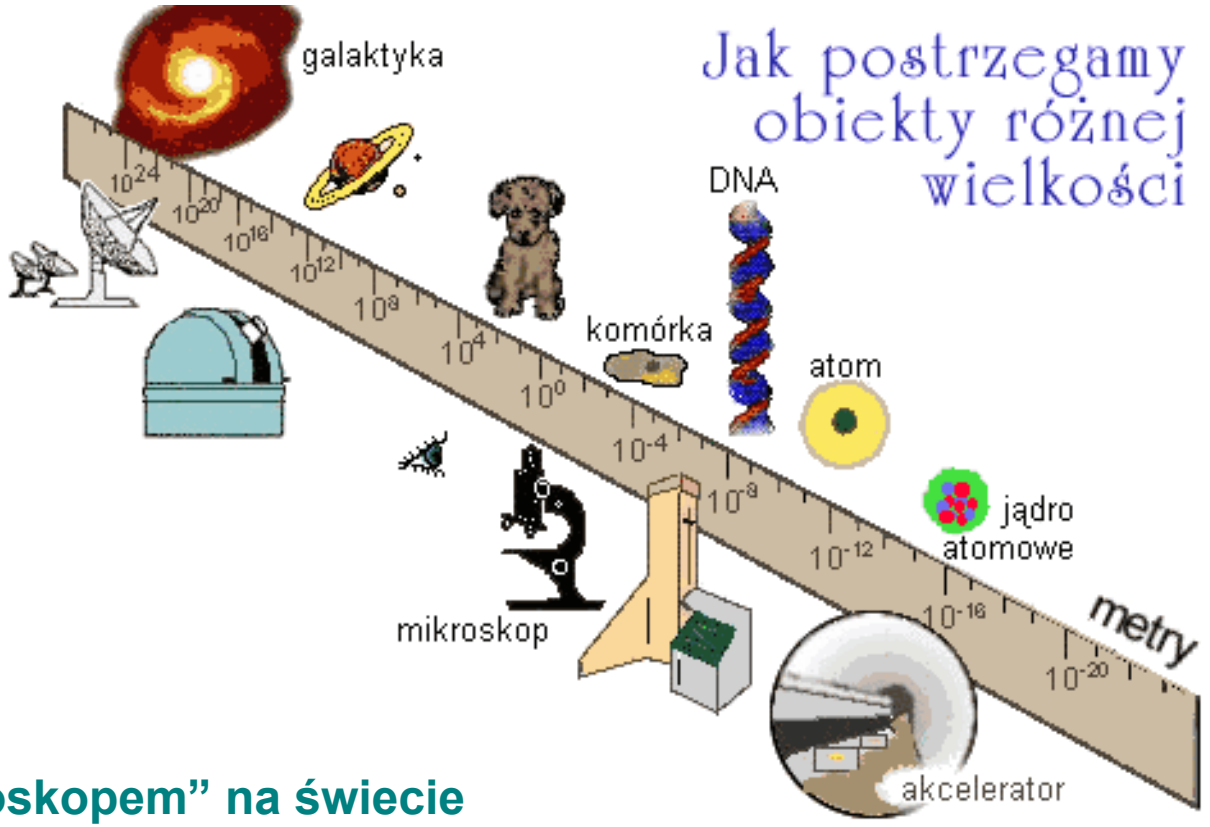


Cząstka (fala) może wysondować szczegóły obiektu o rozmiarach rzędu długości fali

Do badania struktur atomowych i subatomowych – nie fotony światła widzialnego ale dowolne cząstki (np. elektrony) o bardzo małej długości fali czyli ogromnym pędzie (prędkość bliska prędkości światła → akceleratory)

Ściślej: rolę sondy odgrywają **wirtualne kwanty pola** (wykład 2) emitowane przez te cząstki

Linijka:
różne metody obserwacji świata w zależności od rozmiaru oglądanego przedmiotu →
od teleskopów (Hubble)
po akceleratory

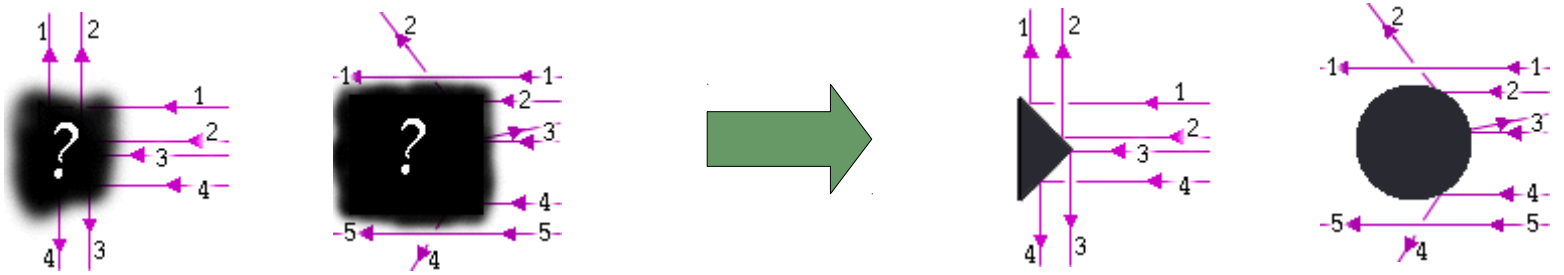


LHC jest najlepszym „mikroskopem” na świecie

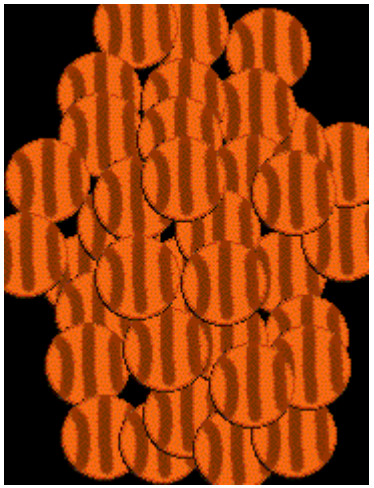
Rys. PA

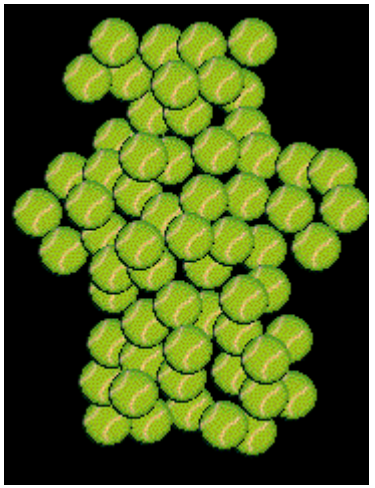
Dwa przykłady z witryny https://www.ifj.edu.pl/przygoda

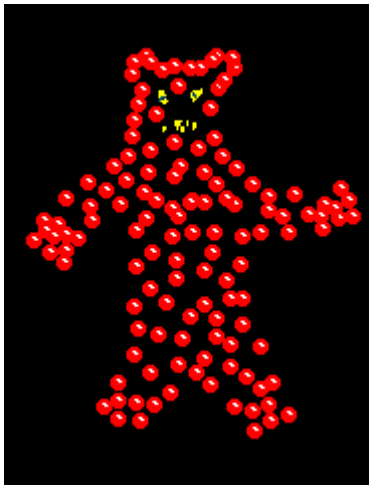
1. Identyfikacja kształtu tarczy



2. Wpadamy do ciemnej jaskini nie mając latarki, ale za to posiadając kosz świecących w ciemności piłek do koszykówki, piłeczek do tenisa i kamyczków do gry „marbles”. Ze środka słychać złowrogie pomruki... Rzucamy kolejnymi „sondami” w źródło pomruków:

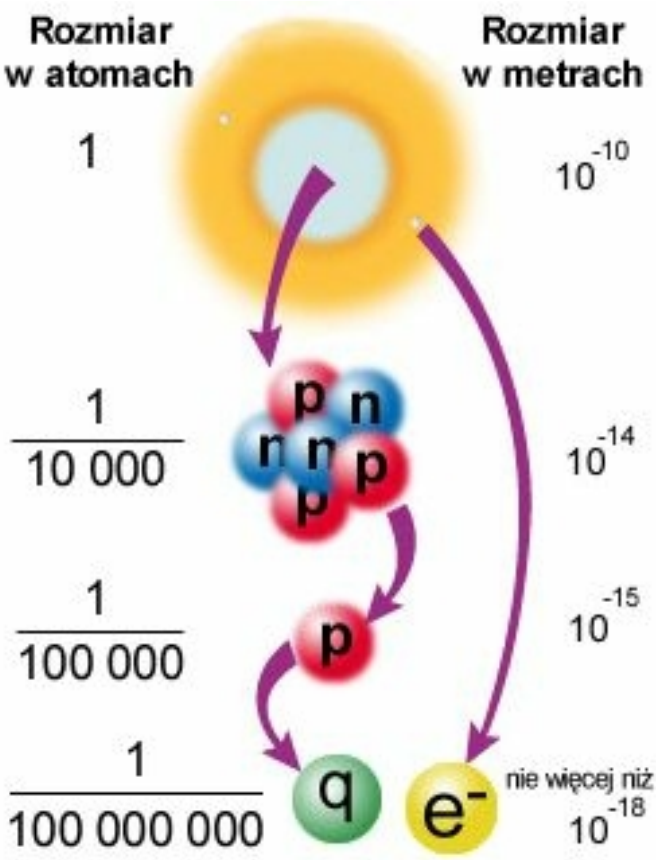






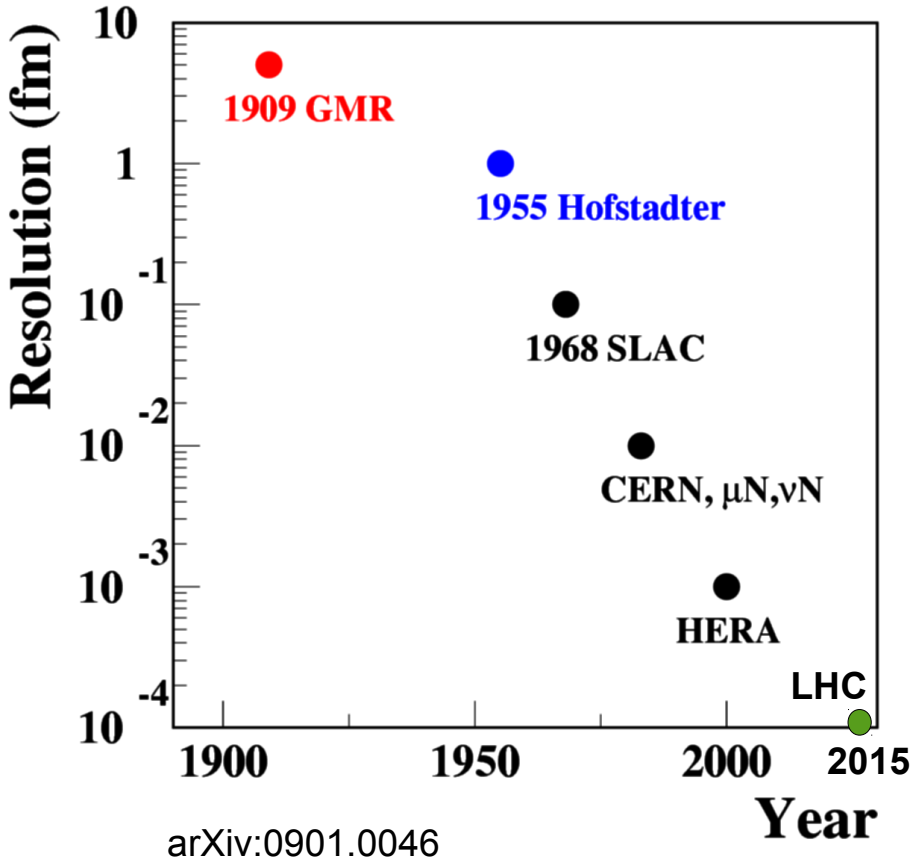
Najmniejsze obiekty sondujące dają najwięcej informacji o pomrukującym obiekcie

Jak w chwili obecnej wygląda model atomu



Początek XX wieku – wiązki cząstek o energii kilka MeV → mała zdolność rozdzielcza → protony i neutrony uważane za cząstki elementarne i punktowe

Na dzień dzisiejszy (!) za punktowe uważamy kwarki i leptony – brak dowodów na ich strukturę

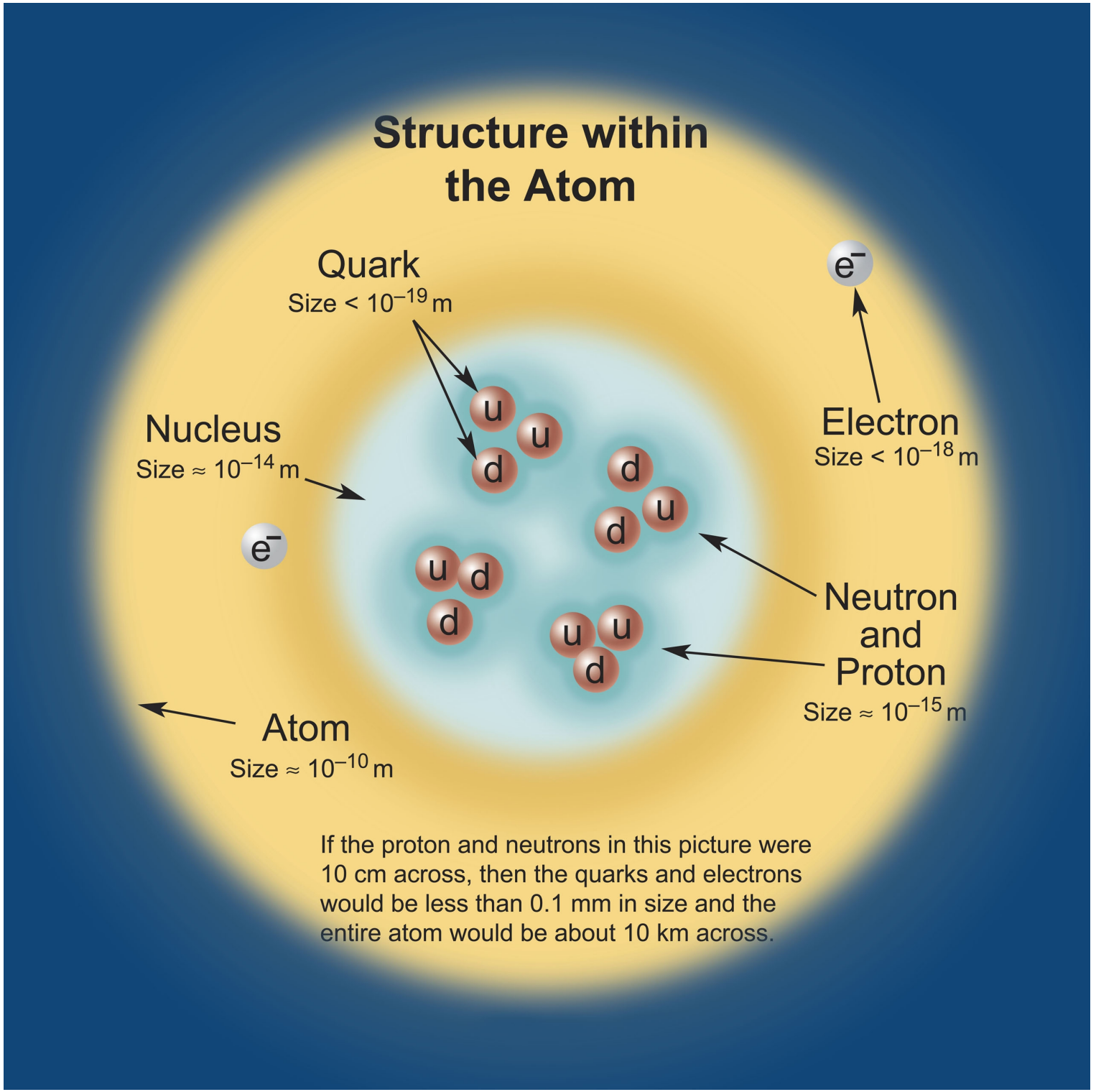


LHC √s = 13 TeV (2015)
to rozdzielczość rzędu 10^{-19} m

arXiv:0901.0046

GMR – Geiger-Marsden-Rutherford experiment

Rys. PA



https://www.cpepphysics.org/images/chart_details/Structure.jpg

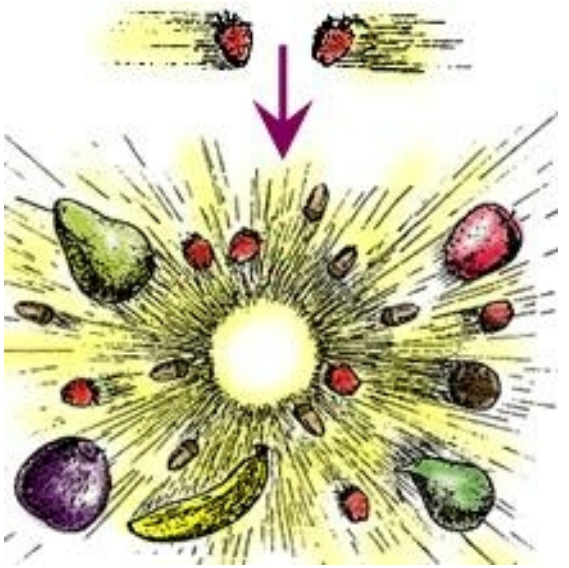
Po co nam wysokie energie cd.

2. Produkcja cząstek o dużych masach

Badanie masywnych, niestabilnych cząstek, żyjących bardzo krótko (np. bardzo ciężki kwark prawdziwy, dla kwarka 'top' mc^2 to około 173 GeV – prawie 200 x energia spoczynkowa protonu – a kwark ten musi być produkowany razem ze swoją antycząstką)

Einstein twierdził, że $E=mc^2$ czyli masa jest formą energii

1. cząstki o małej masie
2. akceleracja (duże prędkości)
3. zderzenie cząstek o małej masie ale dużej energii kinetycznej
4. produkcja m.in. cząstek o dużej masie z energii kinetycznej cząstek o małej masie



Rys. PA

Czyli akceleratory:
I zmniejszają długość fali do sondowania struktury materii
II pozwalają na wyprodukowanie ciężkich cząstek które chcemy badać

Skale i jednostki używane w fizyce wysokich energii.

typowe rozmiary przestrzenne 10^{-15} m a typowe masy rzędu 10^{-27} kg

w fizyce jądrowej:
jednostka energii (eV) = 1.602 x 10^{-19} J
jednostka pędu (eV/c)
jednostka masy (eV/c^2) = 1.783 x 10^{-36} kg
masa protonu mc^2 = 0.938 GeV

Większa precyzja podana w PDG

1fm = 10^{-15} m
1b = 10^{-28} m^2

dodatkowo w fizyce wysokich energii:
naturalny układ jednostek: $\hbar$ = c = 1 ($\hbar$ = h/2π)
c = 1 i jest bezwymiarowe tzn. c $\neq$ 1 m/s ale c $\equiv$ 1
$\Rightarrow$ [E] = [p] = [m] = eV

całkowita energia: $E^2 = (\mathbf{p}c)^2 + (mc^2)^2 \quad \rightarrow \quad E^2 = \mathbf{p}^2 + m^2$

Wszystkie wielkości mają wymiar energii ale w różnych potęgach
$M = E/c^2$; L (długość) = $\hbar c/E$; T (czas) = $\hbar/E$

Użyteczne związki (podane w przybliżeniu):
$\hbar c = 0.1973$ GeV·fm
$\hbar = h/2\pi = 6.582 \cdot 10^{-25}$ GeV·s

$1\ \text{GeV}^{-2} = 0.389$ mb
1 fm/c $= 3.3356 \cdot 10^{-24}$ s
długość $1\ \text{GeV}^{-1} = 0.1975$ fm
czas $1\ \text{GeV}^{-1} = 6.59 \cdot 10^{-25}$ s

stała struktury subtelnej (w oddziaływaniach EM), w jednostkach SI:
$\alpha = e^2/4\pi\varepsilon_0\hbar c \cong 1/137$

w jednostkach Heaviside'a-Lorentza $\varepsilon_0 = \mu_0 = \hbar = c = 1$

$\alpha = e^2/4\pi \cong 1/137$

Energia dostępna w układzie środka masy dwóch zderzanych cząstek (np. na produkcję nowych cząstek):

$$\sqrt{s} = \sqrt{\left(\Sigma E\right)^2 - \left(\Sigma \vec{p}\right)^2}$$

Skale w fizyce oraz jednostki

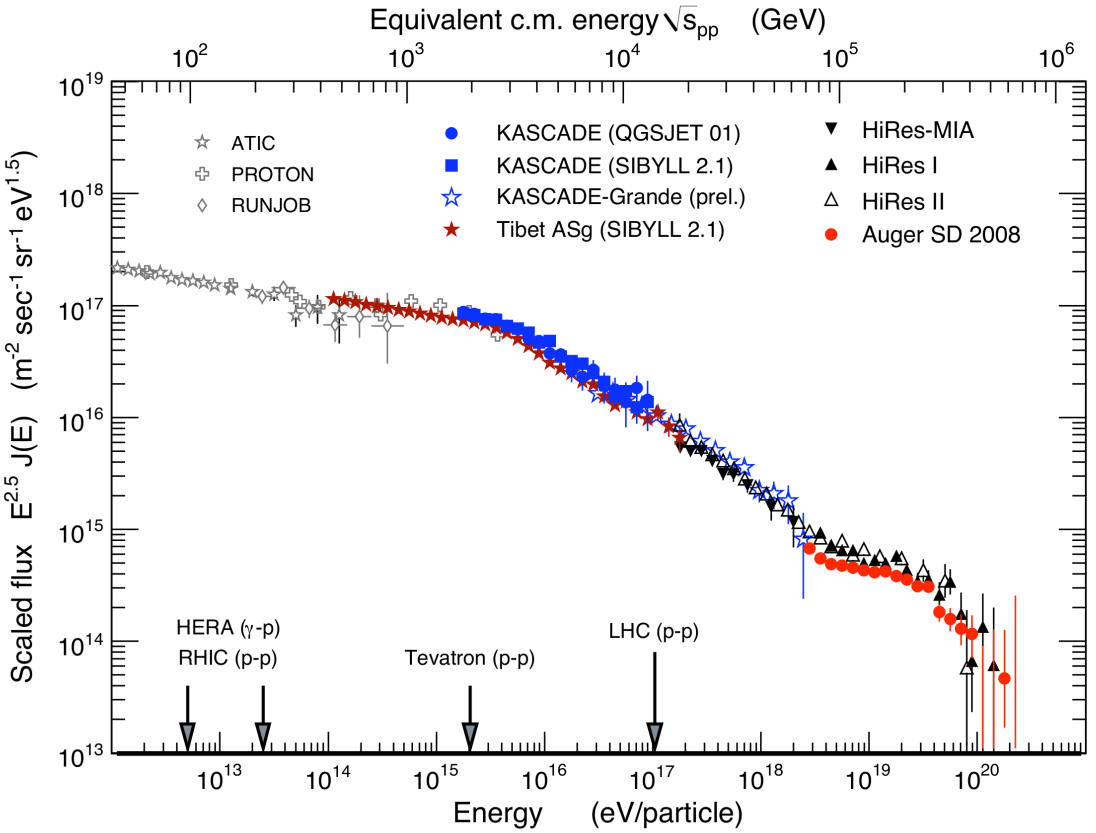
size(m)	object
10^{27}	Universe = age $\times$ $c = 2{\cdot}10^{10} yrs \times c$
10^{23}	Intergalactic distance $2{\times}10^{25} cm$
10^{20}	Galactic size $6{\times}10^{22} cm$
10^{15}	Nearest Star $2{\times}10^{17} cm$
10^{12}	Planetary Orbit $6{\times}10^{14} cm$ (Pluto)
10^{11}	Distance to sun $1.5{\times}10^{13} cm$
10^{4}	Satellite orbit
10^{-12}	Atomic radius
10^{-15}	Nucleon radius
10^{-18}	Range of weak force

1 parsec	$3{\times}10^{18} cm$
1 Angstrom	$10^{-10} m$
1 fm	$10^{-15} m$
1 MeV	$10^{6} eV$
1 GeV	$10^{9} eV$
1 TeV	$10^{12} eV$
1 PeV	$10^{15} eV$
1 barn	$10^{-24} cm^2$
1 millibarn (mb)	$10^{-27} cm^2$
1 nanobarn (nb)	$10^{-33} cm^2$
1 picobarn (pb)	$10^{-36} cm^2$
1 femtobarn (fb)	$10^{-39} cm^2$

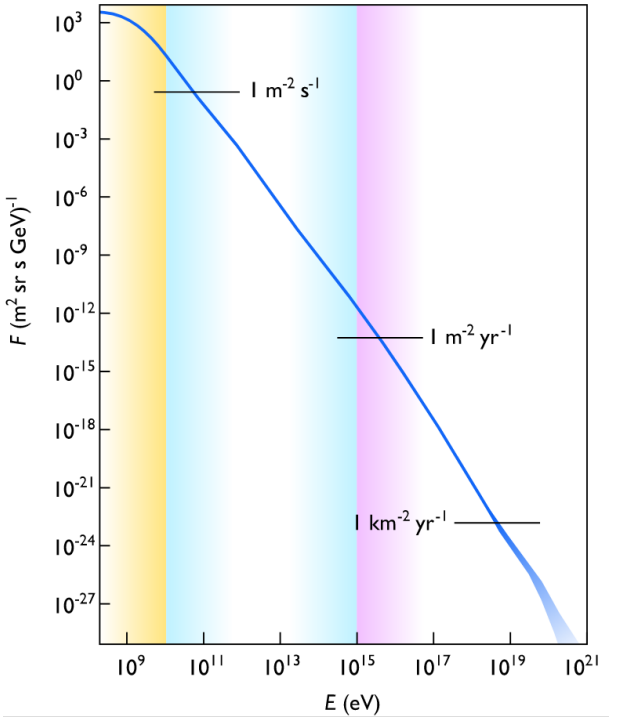
I jeszcze trochę o przeliczaniu wielkości

- Energy: $1\ \mathrm{GeV} = 1.6 \cdot 10^{-3}$ erg;
- Temperature: $1\ \mathrm{GeV} = 1.2 \cdot 10^{13}\ \mathrm{K}$, $\quad 1\ \mathrm{K} = 0.8 \cdot 10^{-13}\ \mathrm{GeV}$;
- Mass: $1\ \mathrm{GeV} = 1.8 \cdot 10^{-24}$ grams;
- Length: $1\ \mathrm{GeV}^{-1} = 2 \cdot 10^{-14}\ \mathrm{cm}$, $\quad 1\ \mathrm{cm} = 5 \cdot 10^{13}\ \mathrm{GeV}^{-1}$;
- Time: $1\ \mathrm{GeV}^{-1} = 6.6 \cdot 10^{-25}\ \mathrm{s}$, $\quad 1\ \mathrm{s} = 1.5 \cdot 10^{24}\ \mathrm{GeV}^{-1}$;

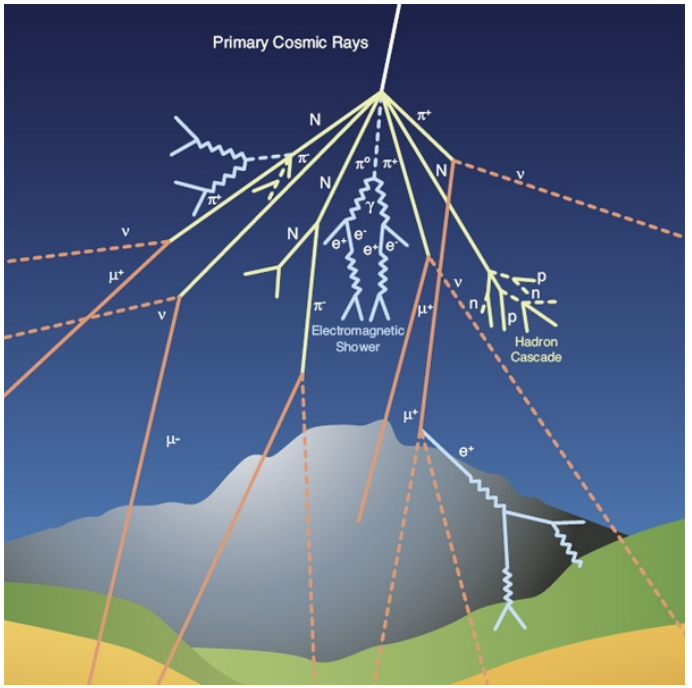
Rozkład energii cząstek promieniowania kosmicznego (głównie protony i jądra atomowe docierające do atmosfery Ziemi; mogą w niej produkować „*air showers*”)



Bluemer, Engel, Hoerandel, Prog. Part. Nucl. Phys. 63, 293, 2009 [arXiv:0904.0725]

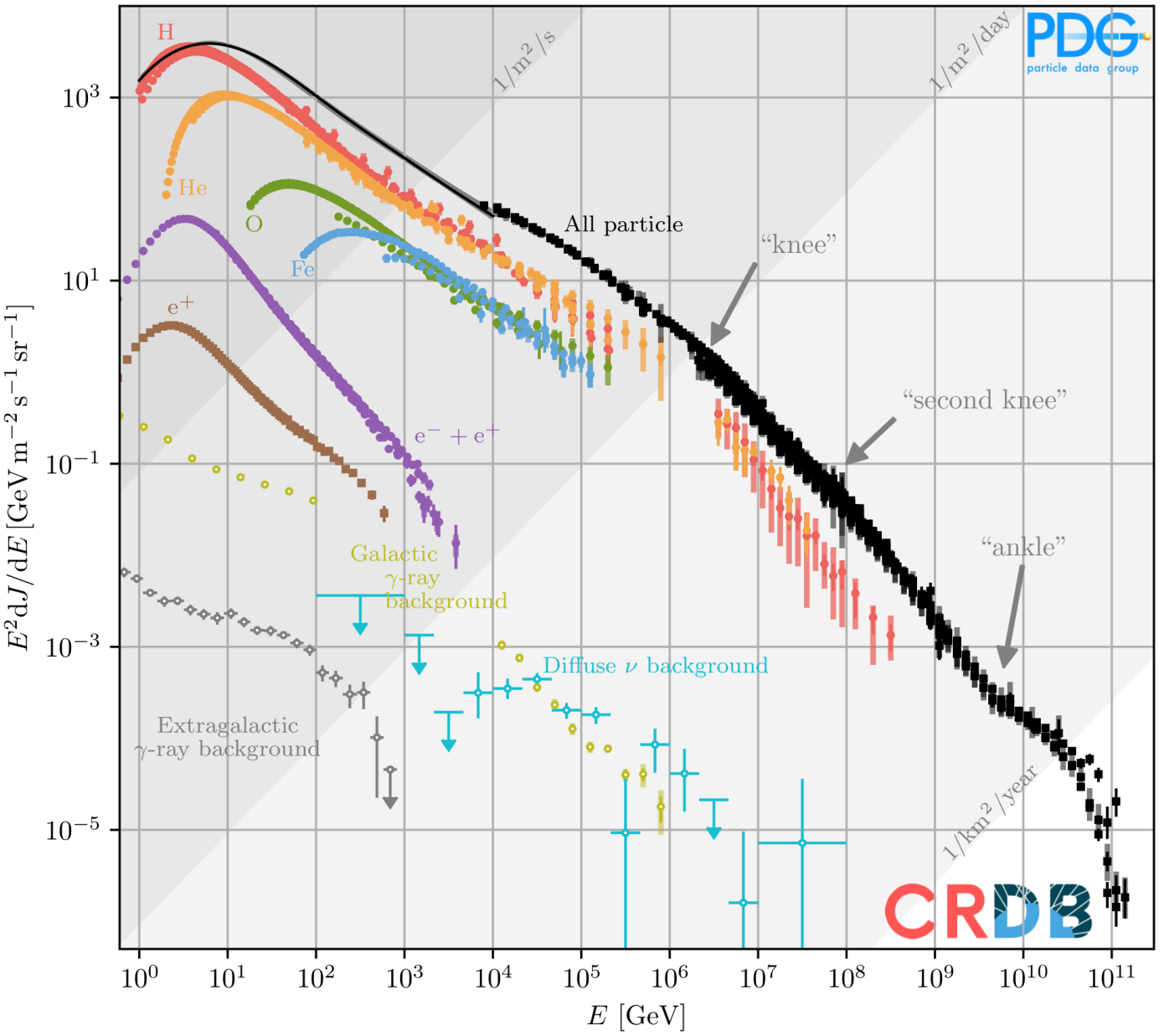


https://en.wikipedia.org/wiki/Cosmic_ray



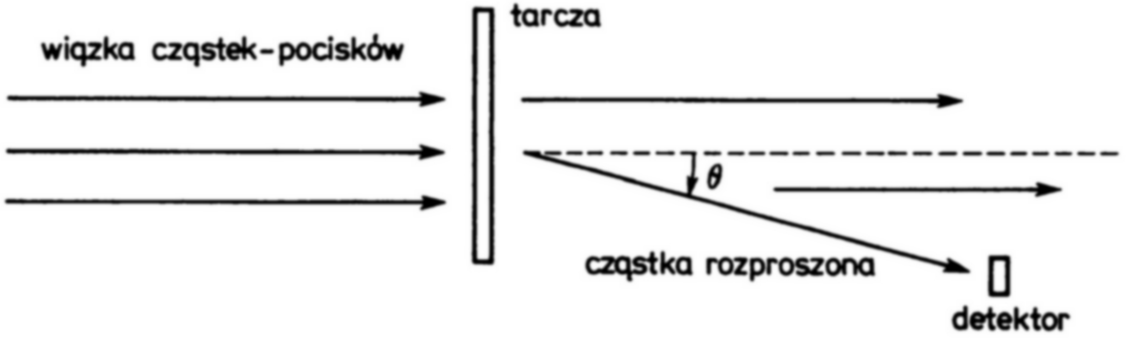
https://home.cern/science/physics/cosmic-rays-particles-outer-space

Rozkład energii cząstek promieniowania kosmicznego



PDG 2024

Przekrój czynny (bardzo pobieżnie)
cross section: 1b = 10^{-28} m^2
(dokładniej w D. H. Perkins)



- miara prawdopodobieństwa danej reakcji (intensywność oddziaływań określonego typu między dwiema cząstkami)
- liczbowo – szybkość danej reakcji na cząstkę tarczy na jednostkę strumienia cząstek padających
- **różniczkowy przekrój czynny** (*differential*) – prawdopodobieństwo reakcji względem jakiejś zmiennej kinematycznej np. $d\sigma/d\Theta$, $d^2\sigma/d\Theta\, dp_T$
- **całkowity przekrój czynny** (*total*) – wycałkowany po wszystkich zmiennych kinematycznych
- Złota reguła Fermiego dla procesu $|\, i \,\rangle \rightarrow |\, f \,\rangle$

$$\mathbf{d\sigma = N\, |M_{if}|^2\, dQ}$$

N – normalizacja stanów kwantowych
$\mathbf{|M_{if}|^2}$ – kwadrat elementu macierzowego, związane z dynamiką, amplituda M_{if} na proces i→f może być wyliczona z diagramów Feynmana (wykład 2)
dQ – przestrzeń fazowa (gęstość stanów kwantowych; liczba stanów dostępnych dla cząstek stanu końcowego w jednostkowym przedziale np. energii E_f, pędu p_f, etc.).
Przestrzeń fazowa dostępna w reakcji zależy od mas i pędów cząstek biorących udział w reakcji

Rezonanse

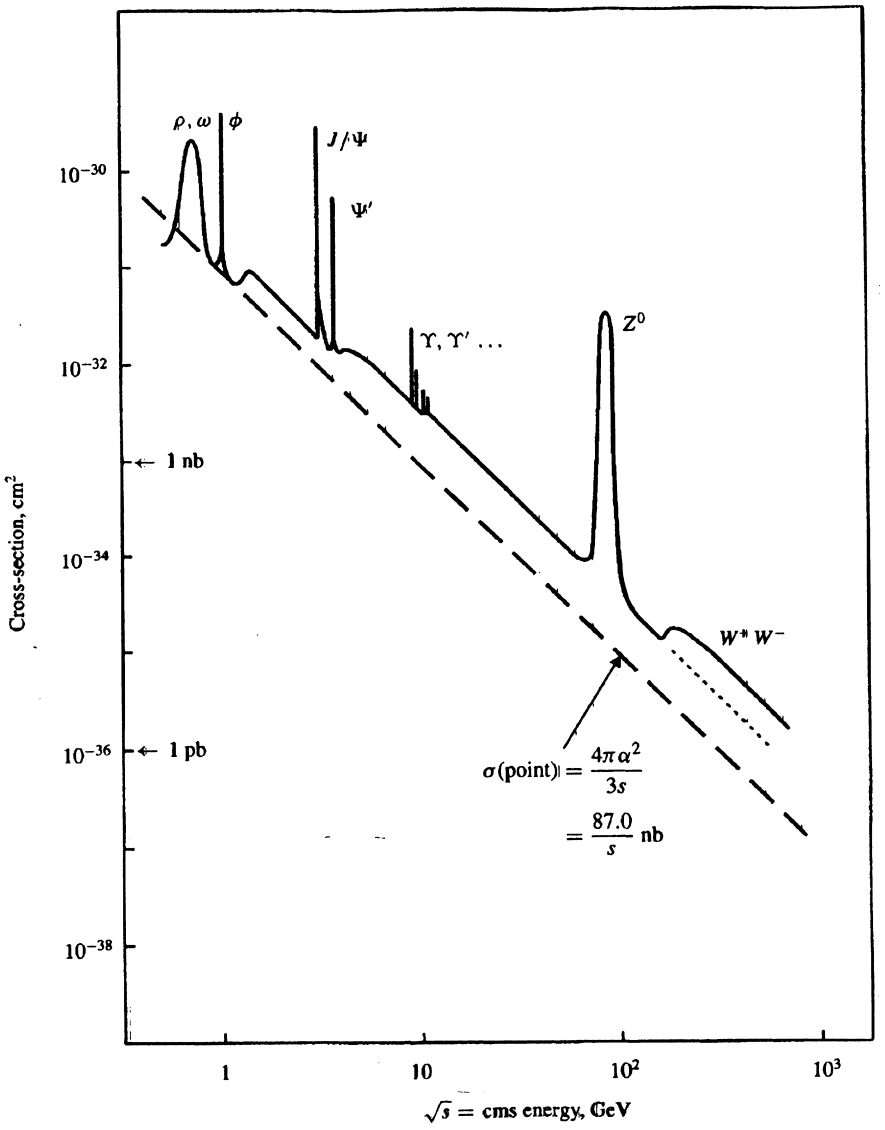
Jeśli narysować przekrój czynny (np. tutaj przekrój czynny dla anihilacji $\sigma(e^+e^- \rightarrow cokolwiek)$) w funkcji energii to w okolicy rezonansów (krótkożyciowych cząstek) pojawiają się maksima

Uwaga: tu $\sigma \sim 1/s$ co jest typowe dla procesu w którym biorą udział cząstki punktowe

Energia rezonansowa – wartość energii zderzenia przy której pocisk i tarcza formują krótkożyciowy stan związany który następnie się rozpada

Rezonanse rozpadające się w oddziaływaniach <u>silnych</u> mają czas życia rzędu 10^{-23} s i toru lotu takiego rezonansu oczywiście nie da się zaobserwować w żadnym detektorze (odległości rzędu fm)

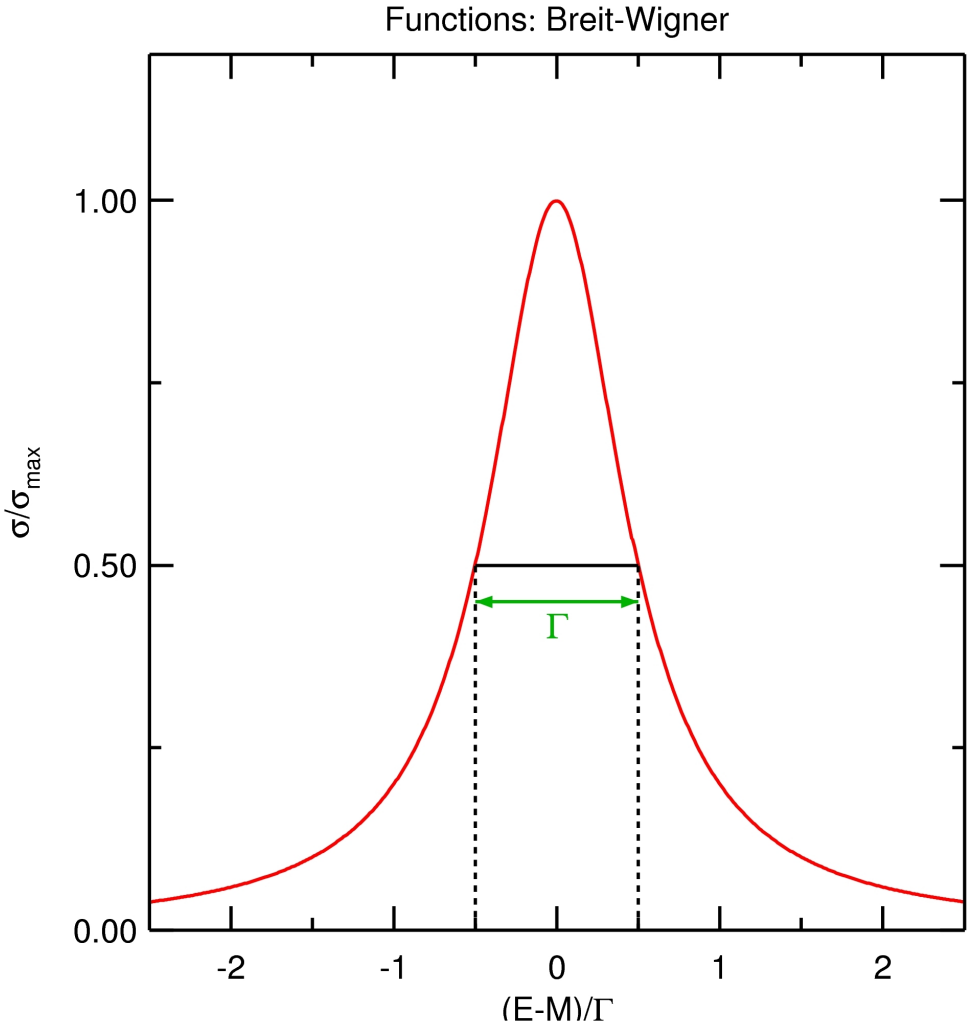
$$\sigma\left(e^+e^- \rightarrow cokolwiek\right)$$



$$\sigma\left(e^+e^- \rightarrow \gamma \rightarrow \mu^+\mu^-\right) = \frac{4}{3}\pi\frac{\alpha^2}{s}$$

Wzór Breita-Wignera
(parametryzacja kształu
krzywej rezonansowej)

$$\sigma(E) = \sigma_{max} \frac{\Gamma^2/4}{(E - E_R)^2 + \Gamma^2/4}$$



E_R – energia rezonansu, wartość średnia rozkładu BW (masa cząstki M_0)

Γ – szerokość rozkładu przy $\sigma/\sigma_{max} = 0.5$

$\tau = 1/\Gamma$ – czas życia rezonansu $(\tau = \hbar/\Gamma)$

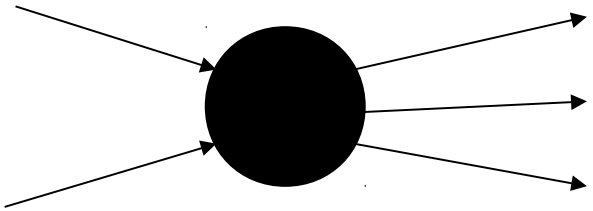
gdy istnieje kilka kanałów rozpadu danej cząstki to całkowita szerokość jest sumą szerokości cząstkowych dla poszczególnych kanałów

$$\Gamma = \sum_i \Gamma_i$$

Badając zależność przekroju czynnego od energii dostępnej w środku masy możemy odkrywać nowe cząstki (maksima przy konkretnej energii) – są to tzw. **eksperymenty formacji**

Jeśli wiemy czego szukamy robimy rozkład masy niezmienniczej układu cząstek produktów rozpadu (zwykle 2, 3 cząstki) – z niego określamy masę i szerokość cząstki–rodzica. Są to tzw. **eksperymenty produkcji**

Eksperyment formacji



badanie zależności
przekroju czynnego
od energii zderzenia

Rys. AKW

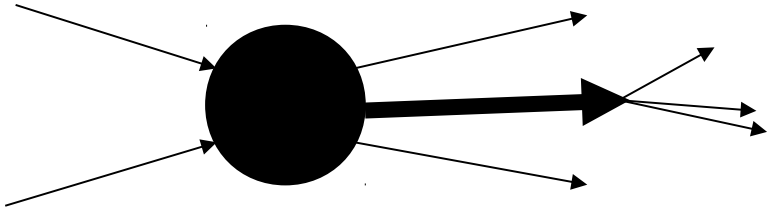
Masa niezmienniczna (w układzie c=1)

$$M_{inv} = \sqrt{\left(\Sigma E_i\right)^2 - \left(\Sigma \vec{p}_i\right)^2}$$

dla układu 2 cząstek w stanie końcowym:

$$M_{inv} = \sqrt{\left(E_1 + E_2\right)^2 - \left(\vec{p}_1 + \vec{p}_2\right)^2}$$

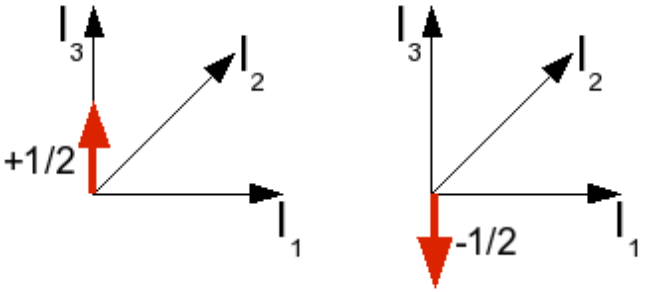
Eksperyment produkcji



badanie rozkładów
masy niezmienniczej
układów cząstek

Uzupełnienie (szczegóły na następnym wykładzie)

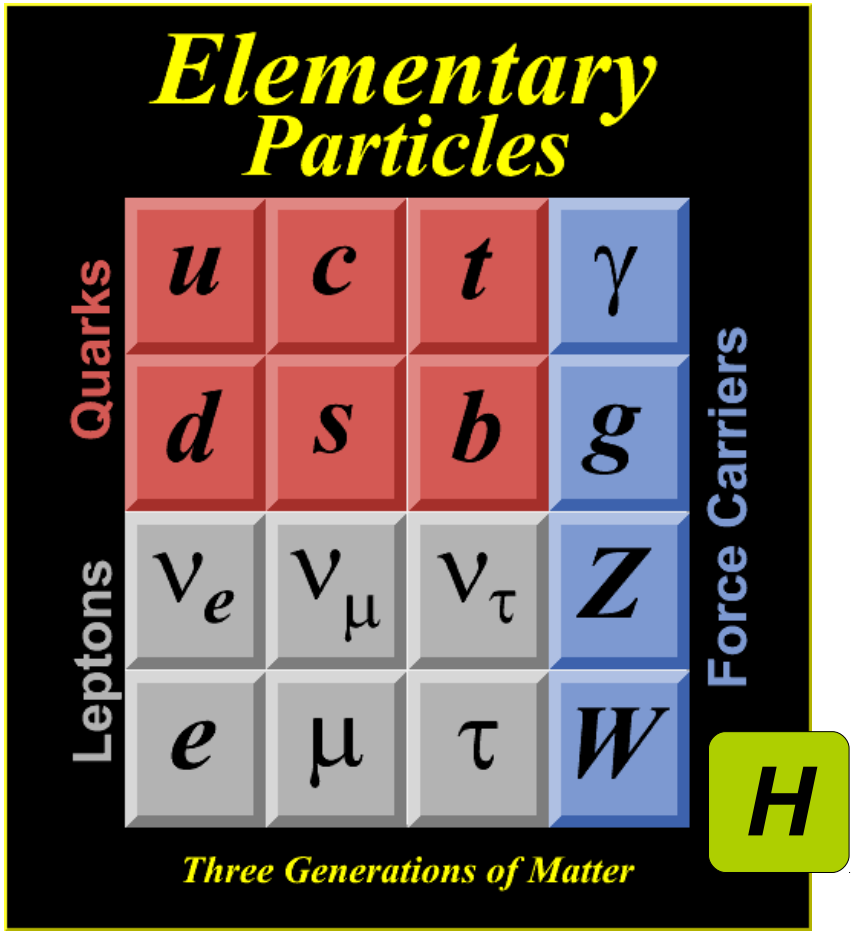
Izospin:
W 1932 roku po odkryciu neutronu Heisenberg zasugerował, żeby neutron i proton traktować jako taką samą cząstkę (**nukleon**) → są nierozróżnialne w oddziaływaniach silnych a jedynie w elektromagnetycznych. Przykłady izospinów hadronów:



singlet izospinowy (**I=0**): Ω^-, Λ
dublet izospinowy (**I=1/2**): p (I_3=1/2), n(I_3=-1/2)
dublet izospinowy (**I=1/2**): K^+ (I_3=1/2), K^0 (I_3=-1/2)
dublet izospinowy (**I=1/2**): antyK^0 (I_3=1/2), K^- (I_3=-1/2)
tryplet izospinowy (**I=1**): π^+ (I_3=+1), π^0 (I_3=0), π^- (I_3=-1)
tryplet izospinowy (**I=1**): Σ^+ (I_3=+1), Σ^0 (I_3=0), Σ^- (I_3=-1)
tryplet izospinowy (**I=1**): ρ^+ (I_3=+1), ρ^0 (I_3=0), ρ^- (I_3=-1)
kwartet izospinowy (**I=3/2**): Δ^{++} (I_3=+3/2), Δ^+ (I_3=+1/2), Δ^0 (I_3=-1/2), Δ^- (I_3=-3/2)
np. dla fotonu nie definiujemy izospinu bo nie jest hadronem

2. Cząstki elementarne. Klasyfikacja cząstek.

Cząstki elementarne – podstawowe cegiełki budujące materię
6 kwarków i 6 leptonów + 6 antykwarków i 6 antyleptonów (fermiony)
oraz bozony przenoszące oddziaływania



Rys. PA

I II III – generacje

u, c, t ładunek = + 2/3
d, s, b ładunek = - 1/3
neutrina ładunek = 0
e, μ, τ ładunek = - 1
antycząstki mają przeciwne ładunki

Nośniki oddziaływań:
foton – oddziaływania elektromagnetyczne
Z^0, W^+, W^- – oddziaływania słabe
gluon – oddziaływania silne
grawiton (nie odkryty!) – oddziaływania grawitacyjne

Higgs (ładunek = 0)
→ Masy cząstek elementarnych (nośników oddziaływań, kwarków, leptonów) generowane poprzez oddziaływanie z polem Higgsa

Bozon Higgsa – przez wiele lat był Świętym Graalem współczesnej fizyki cząstek elementarnych

"Theorists are getting Cold Feet.
The threat that the Higgs boson may soon be discovered, finally, has concentrated wonderfully the minds of theorists. They are busy concocting excuses in case it is not discovered, by finding reasons why the LHC may not discover a Standard-Model-like Higgs boson"

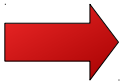
2009 rok, John Ellis "Physics Beyond Standard Model", arXiv:0902.0357

Bozon Higgsa – zaproponowany przez Petera Higgsa i innych

F. Englert and R. Brout, “Broken symmetry and the mass of gauge vector mesons”, Phys.Rev. Lett. 13 (1964) 321–323; P.W. Higgs, “Broken symmetries and the masses of gauge bosons”, Phys. Rev. Lett. 13 (1964) 508–509; G. Guralnik, C. Hagen, and T.W. B. Kibble, “Global conservation laws and massless particles”, Phys. Rev. Lett. 13 (1964) 585–587

Pytanie: czy masa jest fundamentalną cechą materii? Dlaczego np. mion (μ) mimo podobnych własności co elektron jest 200 razy od niego cięższy? Albo przykład masywnego bozonu Z oraz pozbawionego masy fotonu

A może masa nie jest dana raz na zawsze tylko zmienia się i w jakiś sposób zależy od reakcji obiektu z otoczeniem?

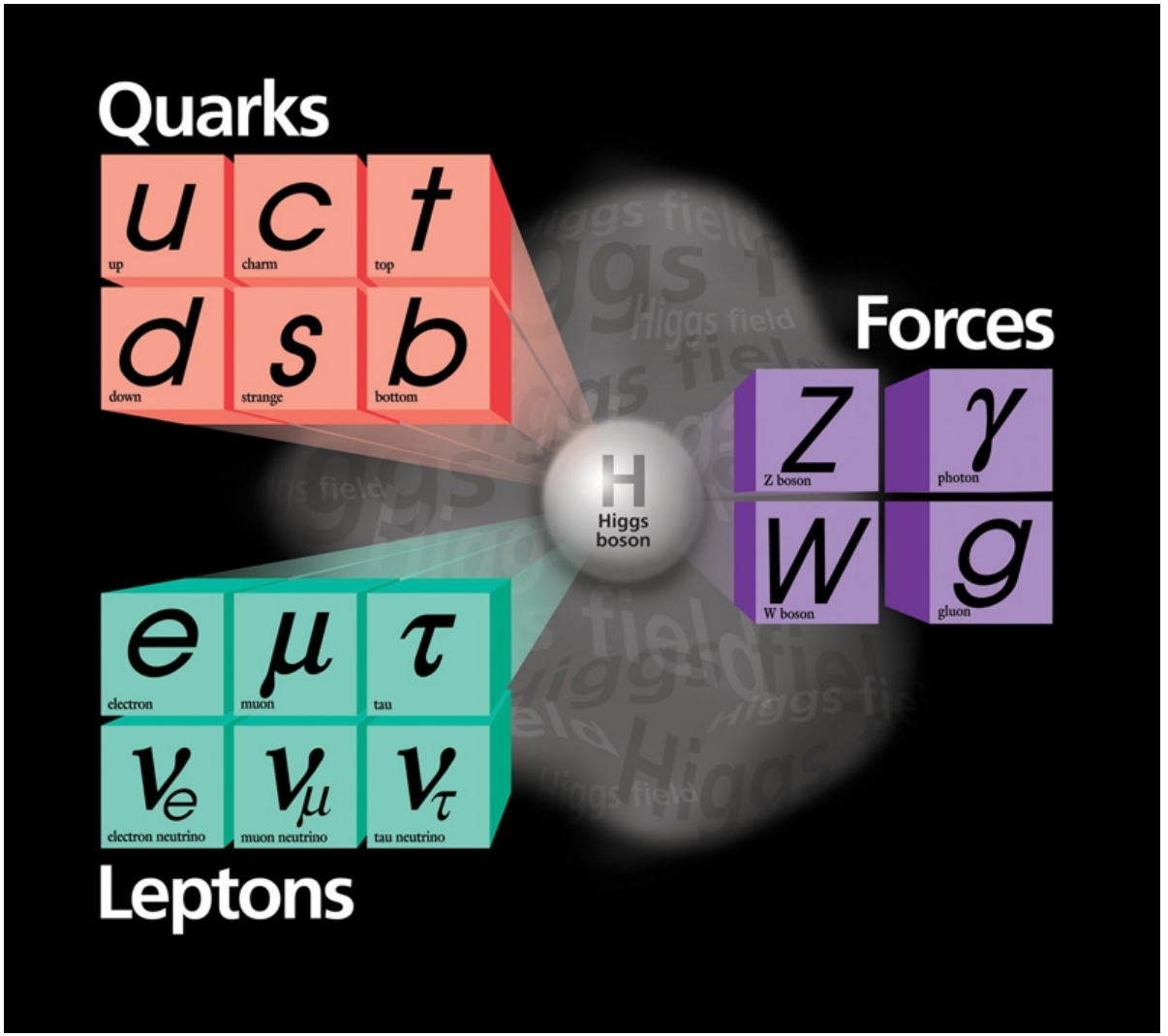


P. Higgs i inni: Musi istnieć oddziaływanie nadające cząstkom materii ich masę. Zaproponowali specjalne pole (**pole Higgsa) wypełniające przestrzeń** (niezerowa wartość (amplituda) pola Higgsa w próżni). **Różne masy cząstek byłyby wtedy miarą ich sprzęgania się z tym polem** (im silniejsze jest oddziaływanie z polem, tym większą masę uzyskuje cząstka)

Masa, którą cząstki otrzymują poprzez oddziaływanie z polem Higgsa jest tzw. masą gołą (zob. dalej)

Wpływ tego pola na materię przenosiłyby **bozony Higgsa (kwanty pola Higgsa)**, tak jak fotony przenoszą wpływ pola elektromagnetycznego

Różne masy cząstek byłyby miarą ich sprzęgania się z polem Higgsa (im silniejsze jest oddziaływanie z polem, tym większą masę uzyskuje cząstka)



Konsekwencją zaproponowanego mechanizmu (***Englert-Brout-Higgs-Guralnik-Hagen-Kibble mechanism***) generacji masy bozonów pośredniczących jest istnienie pola i skalarnej (spin 0) cząstki Higgsa

Oddziaływanie z polem Higsa pozwala również generować masę fermionów (kwarków i leptonów)

Każda cząstka „płynie” przez pole Higgsa. Niektóre cząstki nie mają masy (np. fotony) → nie oddziałują z polem Higgsa, nie „czują” tego pola

Masa **bozonu Higgsa w Modelu Standardowym** nie była przewidywana. Ograniczenie doświadczalne (PDG 2012):

H^0 Masa m > 115.5 GeV i wykluczony 127–600 GeV, CL=95% (stan na czerwiec 2012)

Aktualne PDG 2024: m = 125.20 ± 0.11 GeV (J=0) ($\Gamma = 3.7\ ^{+1.9}_{-1.4}$ MeV)

Uwaga: W rozszerzeniu supersymetrycznym Modelu Standardowego MSSM (minimal supersymmetric model, wykład 3) mamy zamiast jednego pięć różnych bozonów Higgsa:

Dwa skalarne H_1^0 oraz H_2^0 ($m(H_1^0)<m(H_2^0)$)
(oznaczane również jako h i H)

Pseudoskalarny A^0

Para naładowanych H^{+-}

13 grudnia 2011 – wyniki z eksperymentów ATLAS i CMS przy akceleratorze **L**arge **H**adron **C**ollider w CERN sugerują, że jeśli bozon Higgsa istnieje to ma masę **116–130 GeV (ATLAS)** lub **115–127 GeV (CMS)**. **Lipiec 2012** – pokazane **pierwsze rozkłady mas niezmienniczych** (zob. dalej)

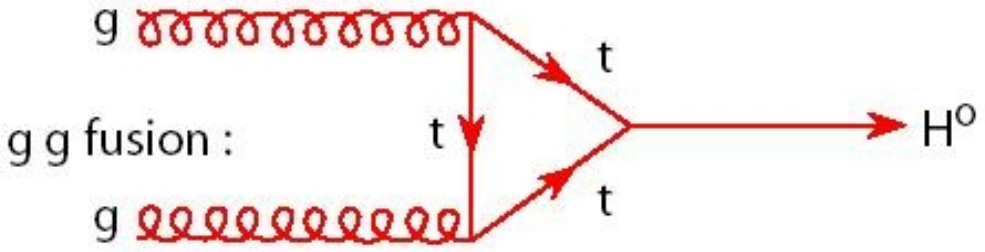
→ aktualne ograniczenia na masę H_2^0, A^0, H^+ w PDG

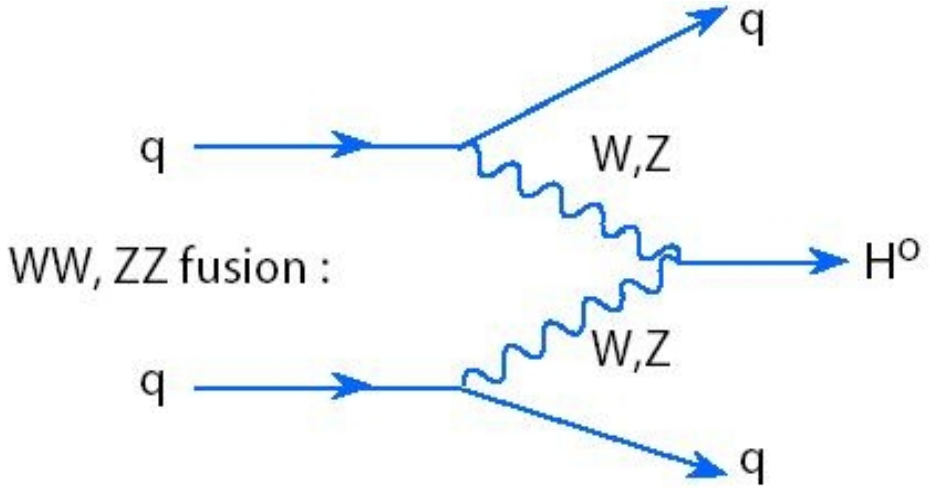
Zastosowanie praktyczne (na razie Science Fiction):
1. odkrywamy Higgsa(y) → uczymy się ekranować pole Higgsa (elektromagnetyczne już potrafimy; tzw. niewidzialność optyczna) → samochody potrafią przyspieszać do ogromnych prędkości w ułamkach sekund

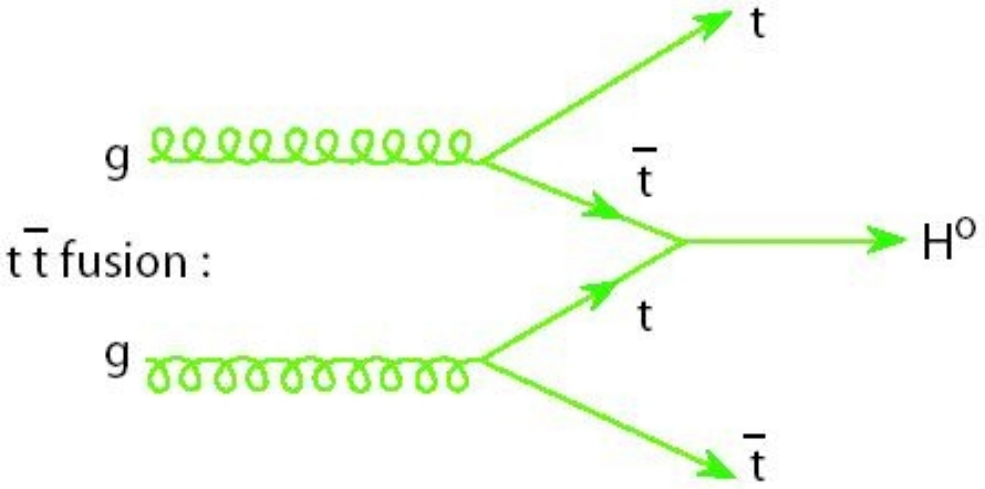
2. odkrywamy Higgsa(y) → wiemy/rozumiemy skąd się bierze masa → potrafimy kontrolować bezwładność → wypadki samochodowe/lotnicze przestają być groźne bo wyeliminujemy obrażenia związane z gigantycznymi przeciążeniami

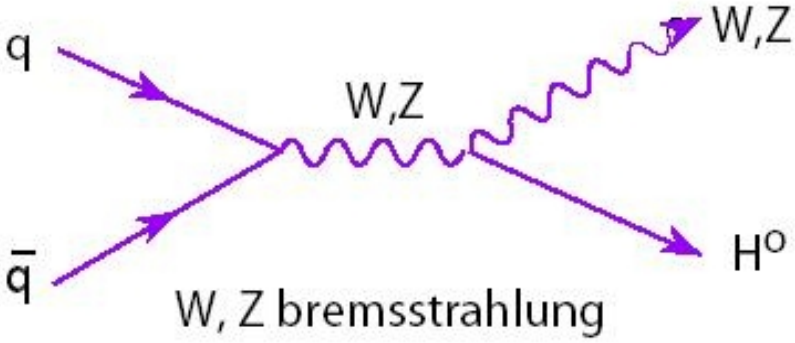
Przykłady diagramów Feynmana w których tworzona jest cząstka Higgsa:
(rys. CMS przy LHC)

Szczegóły diagramów Feynmana na następnym wykładzie









Jak „złapać” Higgsa w detektorze?

Przewidywane kanały rozpadu cząstki Higgsa zależą od jego masy

Dla mas poniżej 130 GeV/c² Higgs rozpada się głównie na parę b anty-b

Dla wyższych mas Higgsa jego rozpad jest głównie poprzez procesy H→WW*/WW oraz H→ZZ*/ZZ

* oznacza cząstkę wirtualną (patrz wykład 2)

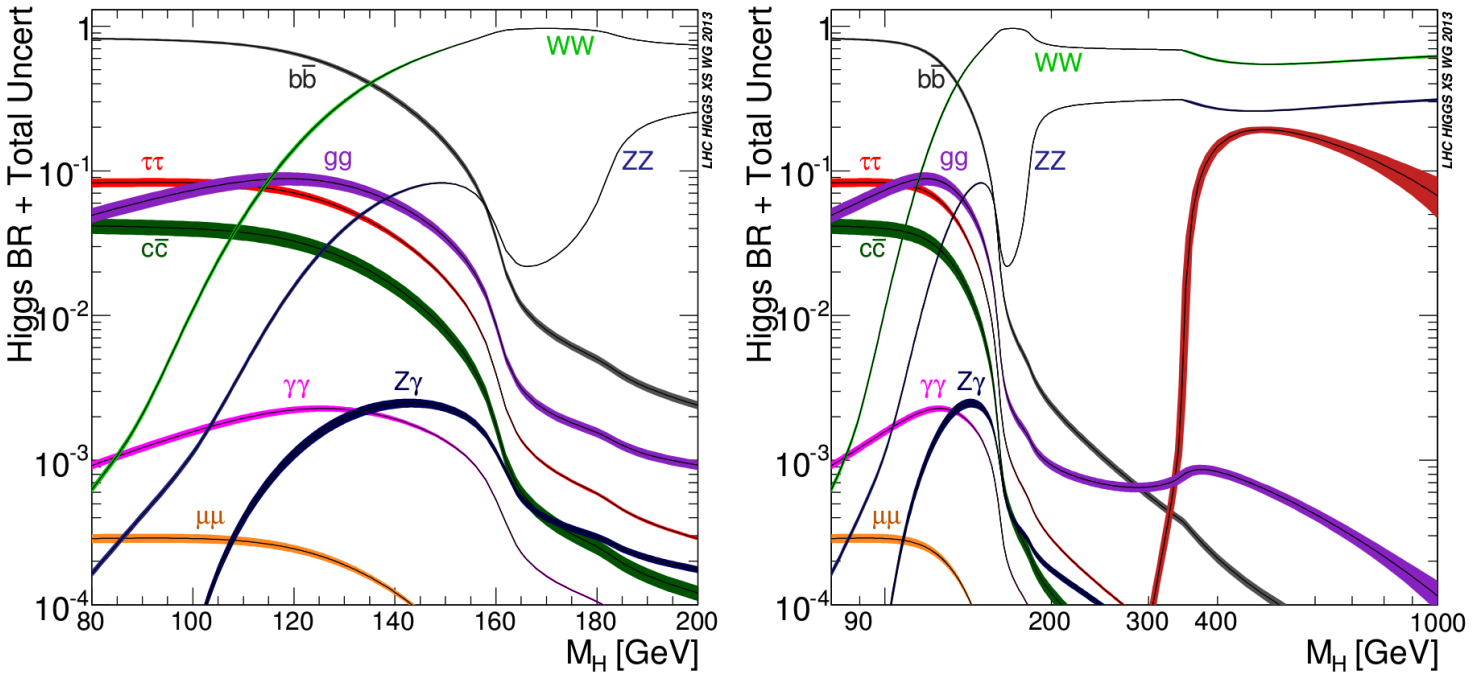
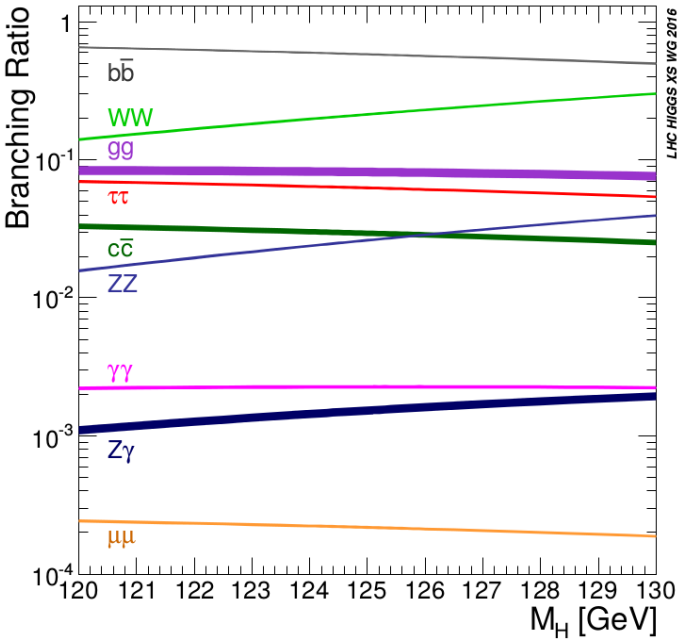


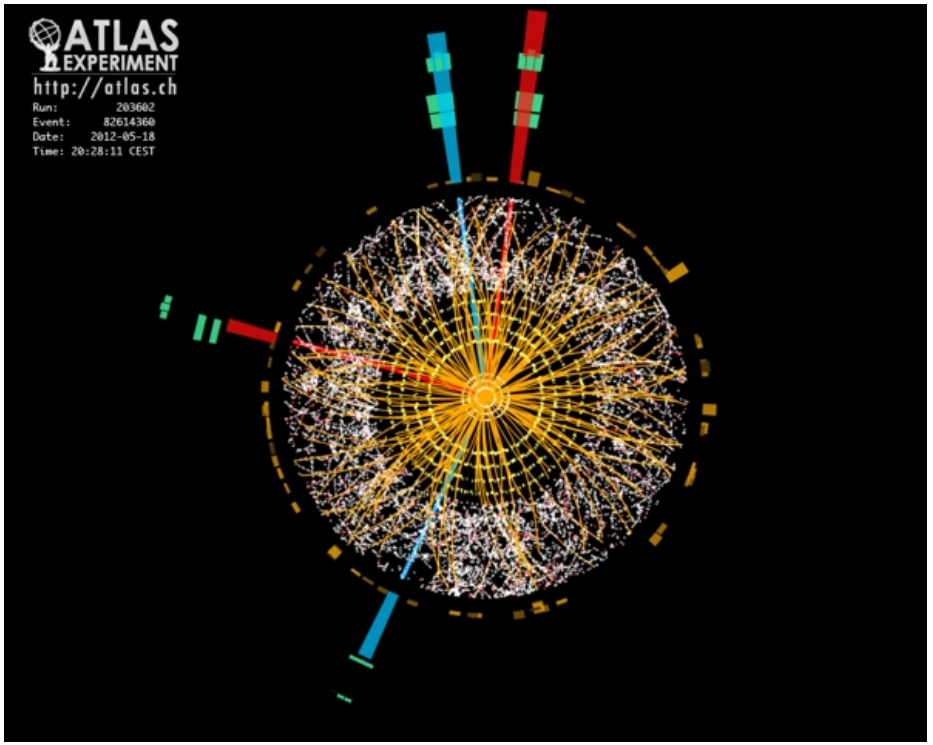
Fig. 2: Higgs branching ratios and their uncertainties for the low mass range (left) and for the full mass range (right).

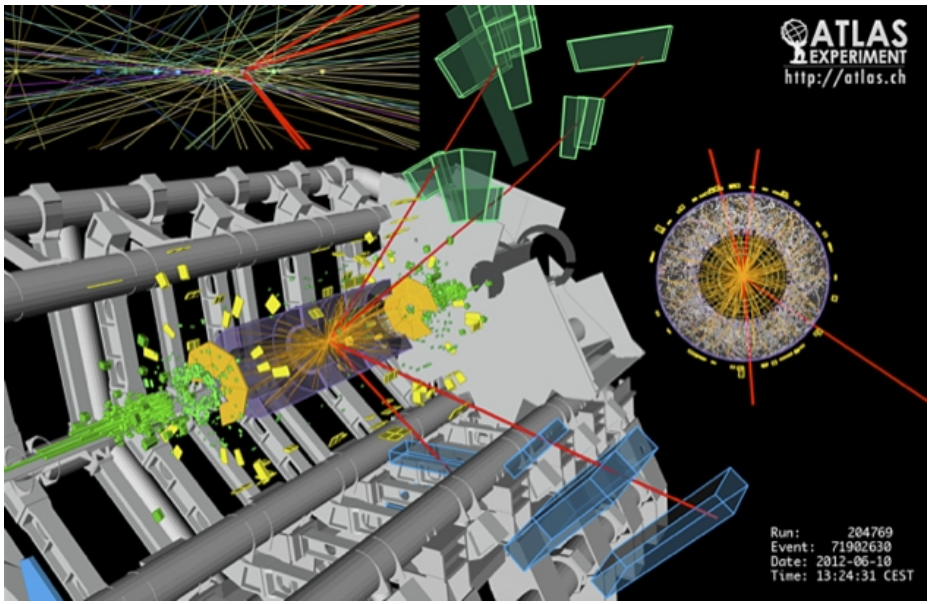
Rys. górny: arXiv:1307.1347



Rys. prawy: PDG 2018/20/22/24
(obszar w okolicy m_H = 125 GeV)

04.07.2012 – konferencja prasowa w CERN, gdzie pokazano **sygnał od bozonu w okolicy masy 125–126 GeV** (dane ze zderzeń p+p przy energii w środku masy 7 TeV i 8 TeV). Najcięższy dotychczas znaleziony bozon. **Higgs?** **Rys. kandydaci na Higgsa w eksperymencie ATLAS – rozpad cząstki na 4 elektrony (lewy) oraz na 4 miony (prawy)**





Bozon początkowo ostrożnie nazywano ***Higgs-like particle***

Na konferencji prasowej pokazano m.in. pierwsze rozkłady niezmienniczej układu dwóch fotonów i czterech leptonów. Od tamtej pory wyników jest coraz więcej (różne kanały rozpadów), statystyka też jest lepsza (zob. też kolejne strony)

„We call it Higgs-like because we like Higgs" **– Rolf Heuer, CERN, 2012**

Uwaga: Później również CDF i D0 przy Tevatronie widziały nadwyżki w okolicach mas niezm. zgodnych z obserwacjami Higgsa w LHC (arXiv:1207.6436, 1303.0823, 1303.6346, 1404.2951, 1409.4208, **1409.5043**)

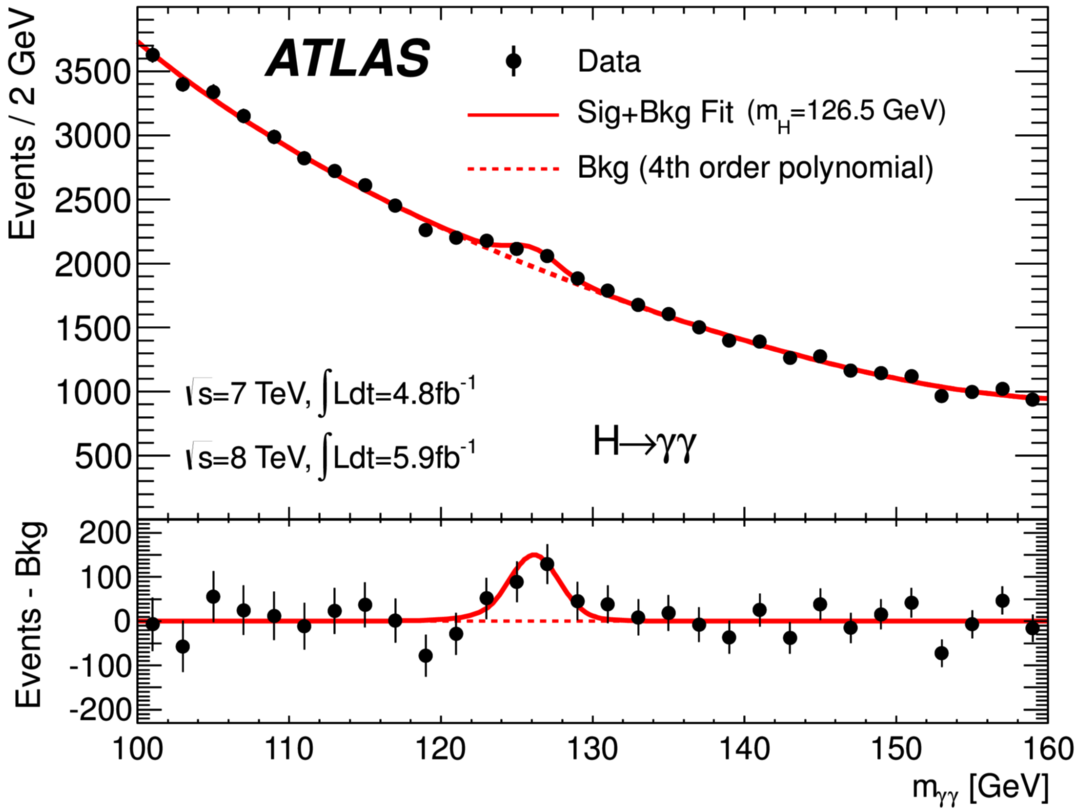
ATLAS

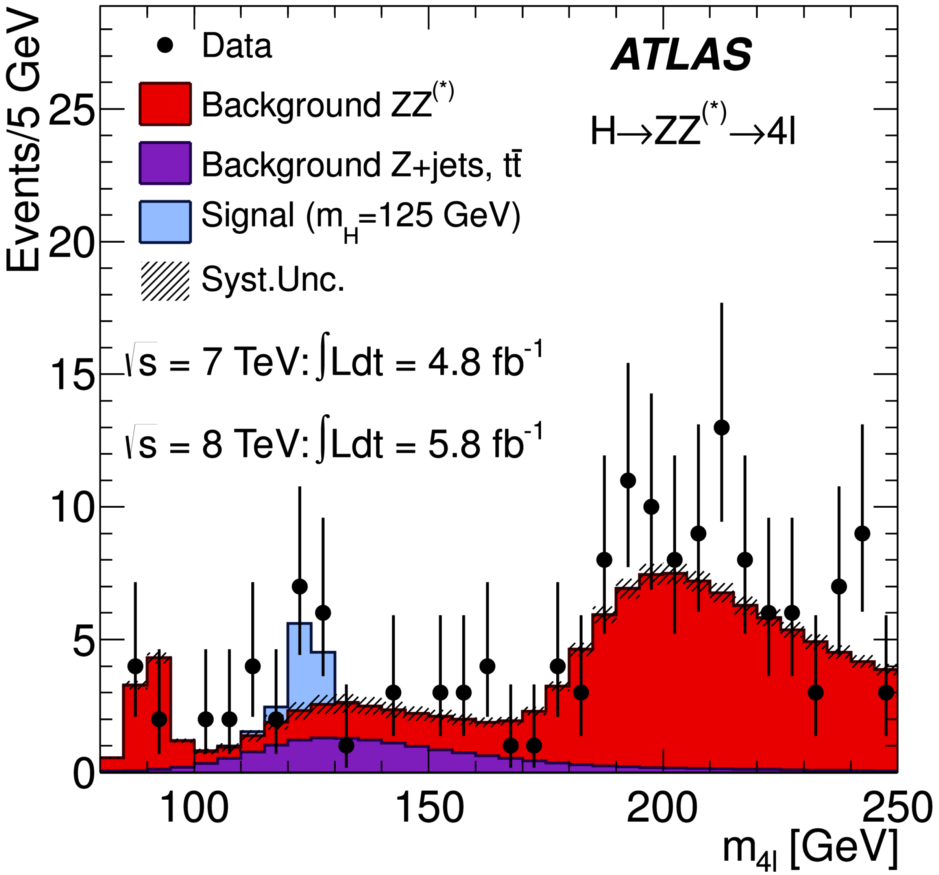
* oznacza cząstkę wirtualną (patrz wykład 2)

Analizowane **kanały rozpadu Higgsa** w ATLAS:

1. $H \rightarrow ZZ^{(*)} \rightarrow 4l$ (cztery leptony)
2. $H \rightarrow \gamma\gamma$
3. $H \rightarrow WW^{(*)} \rightarrow e\nu\ \mu\nu$
4. $H \rightarrow b\ \mathrm{bar}(b)$
5. $H \rightarrow \tau^+\ \tau^-$

Rysunki mas niezmienniczych (pary fotonów oraz czterech leptonów) wzięte z arXiv:1301.2802. Wyniki pojawiły się jako pierwsze w arXiv:1207.7214 (Phys. Lett. B716, 1 (2012))





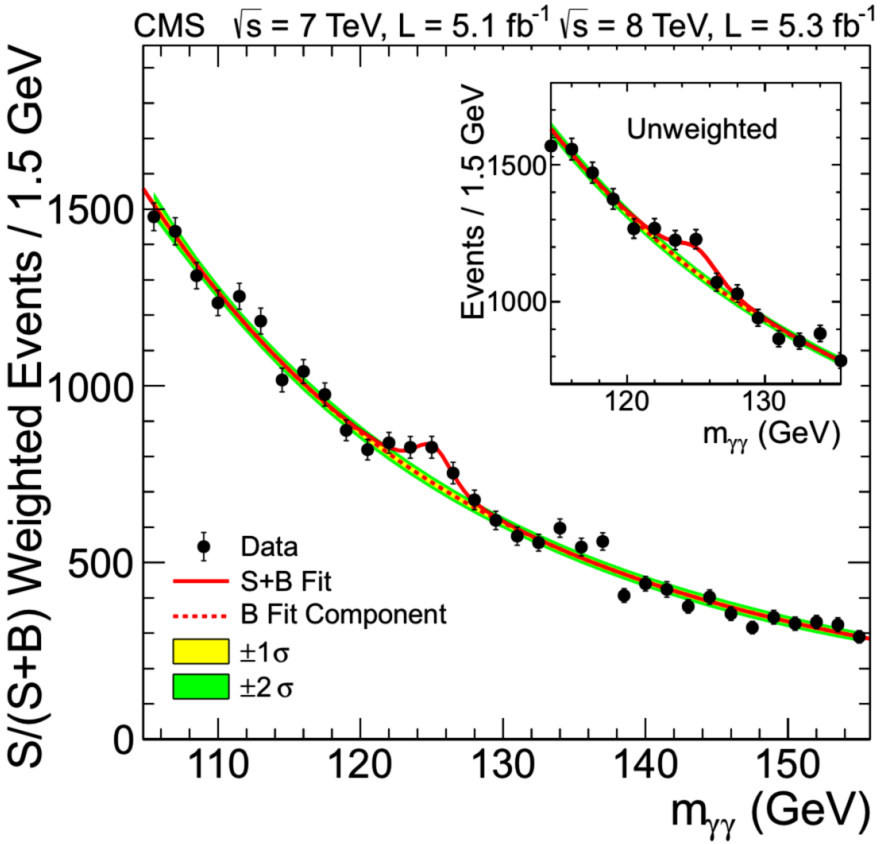
Tu najlepszy fit dawał masę
126.0 ± 0.4 (stat) ± 0.4 (sys) GeV

Pokazane również oczekiwane tło oraz oczekiwany sygnał przy założeniu masy Higgsa m_H = 125 GeV

CMS

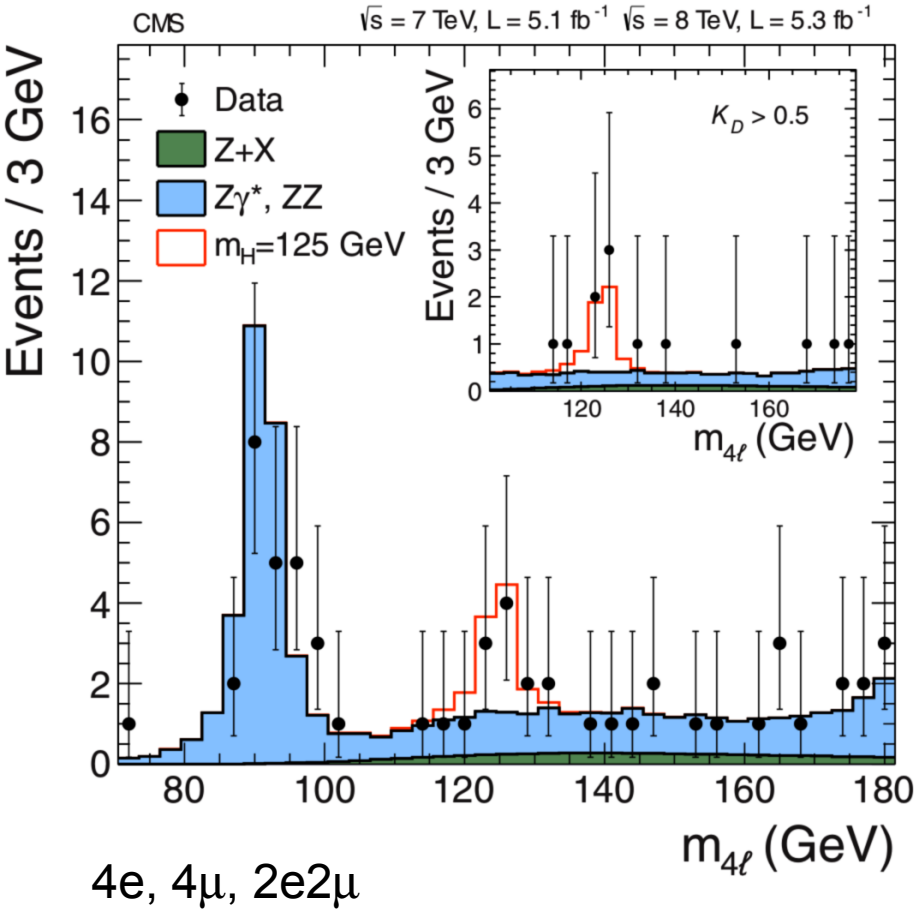
Analizowane **kanały rozpadu Higgsa** w CMS:

1. $H \rightarrow ZZ^{(*)} \rightarrow 4l$ (cztery leptony)
2. $H \rightarrow \gamma\gamma$
3. $H \rightarrow WW^{(*)} \rightarrow 2l\ 2\nu$
4. $H \rightarrow b\ bar(b)$
5. $H \rightarrow \tau^+\ \tau^-$



Tu najlepszy fit dał masę
125.3 ± 0.4 (stat) ± 0.5 (sys) GeV

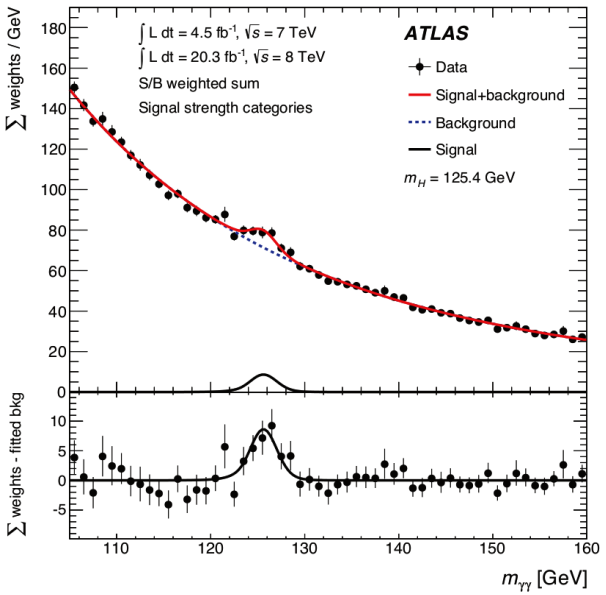
Rysunki mas niezmienniczych (pary fotonów oraz czterech leptonów) wzięte z arXiv:1301.3405. Wyniki pojawiły się jako pierwsze w arXiv:1207.7235 (Phys. Lett. B716, 30 (2012))

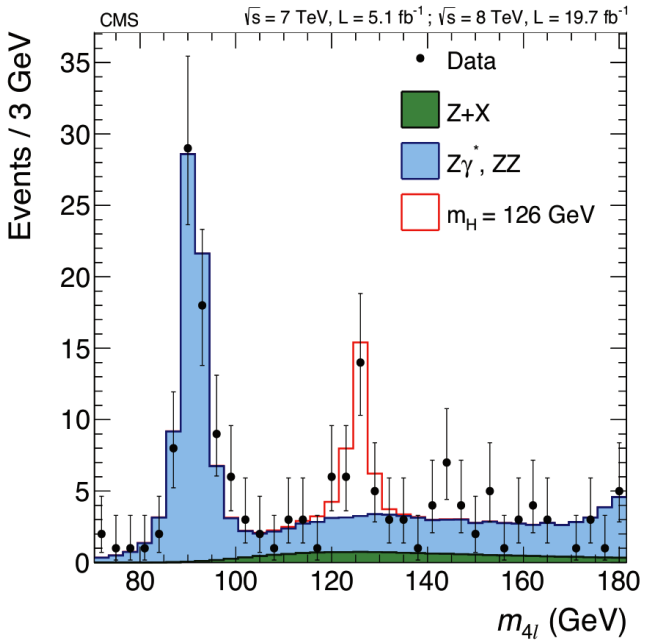


4e, 4μ, 2e2μ

Pokazane również oczekiwane tło (niebieskie) oraz oczekiwany sygnał nałożony na tło (czerwony) przy założeniu masy Higgsa m_H = 125 GeV

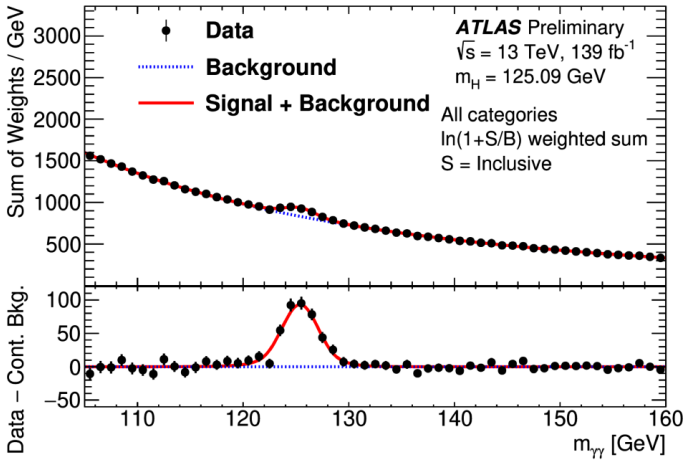
Późniejsze wyniki (lepsza statystyka danych p+p ale nadal przy **7–8 TeV** tzw. Run 1)

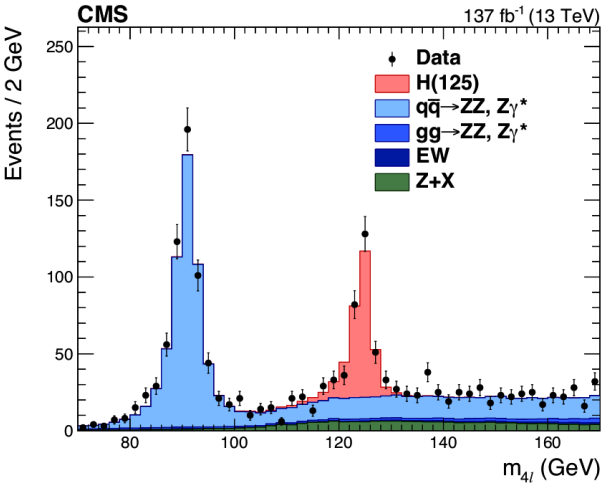




PDG 2016

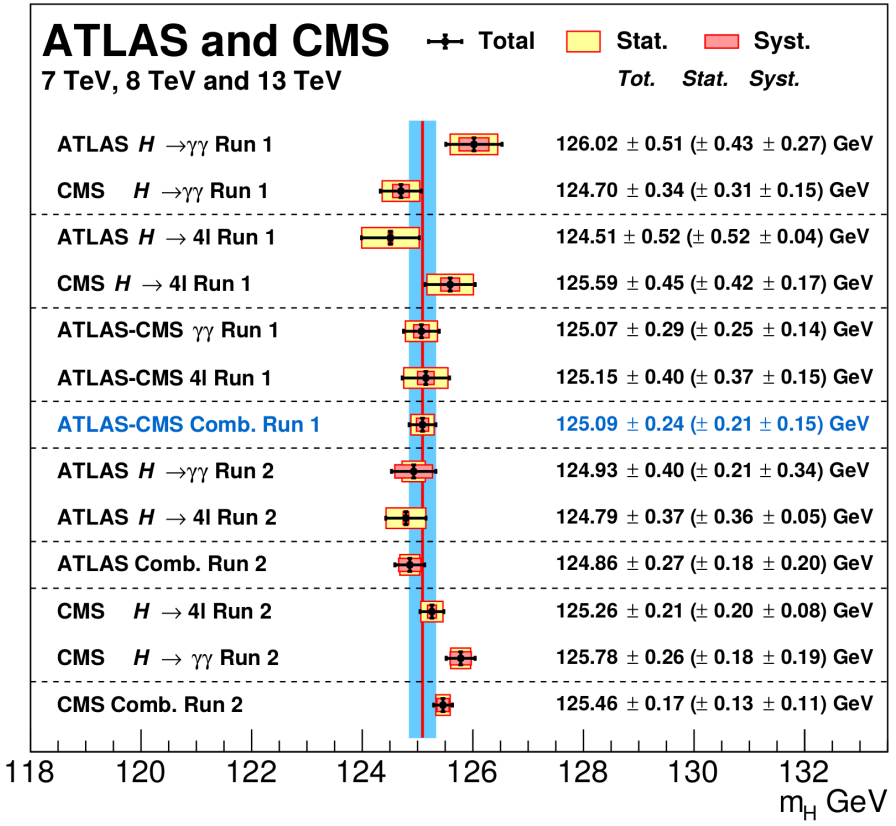
Wyniki **CMS** i **ATLAS** również dla **13 TeV** (Run 2)





PDG 2022

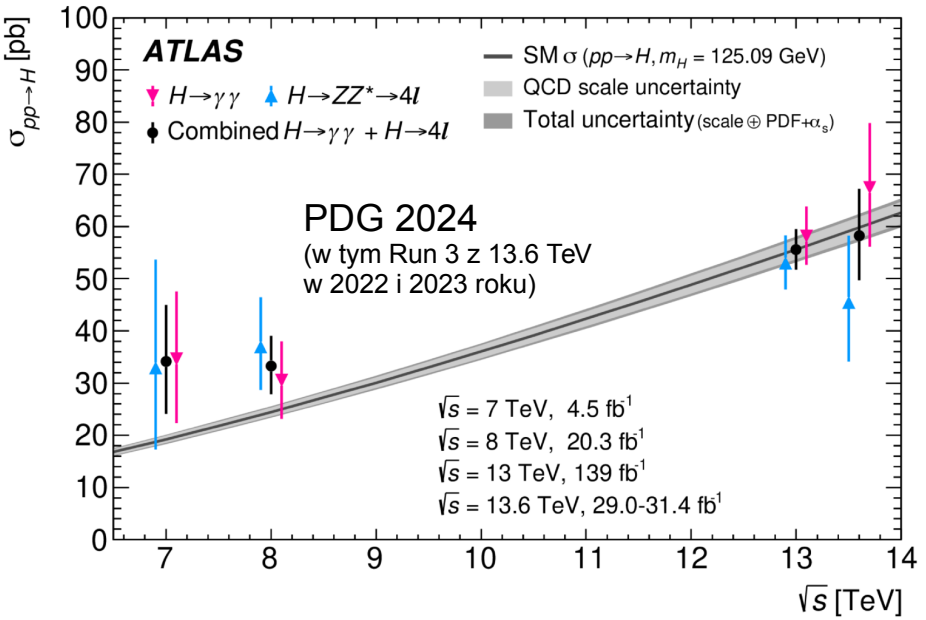
Prace przeglądowe na temat Higgsa → CMS, Nature 607 (2022) 7917, 60-68 [arXiv:22.07.00043];
→ ATLAS, Nature 607 (2022) 7917, 52-59, Nature 612 (2022) 7941, E24 (erratum) [arXiv:2207.00092]



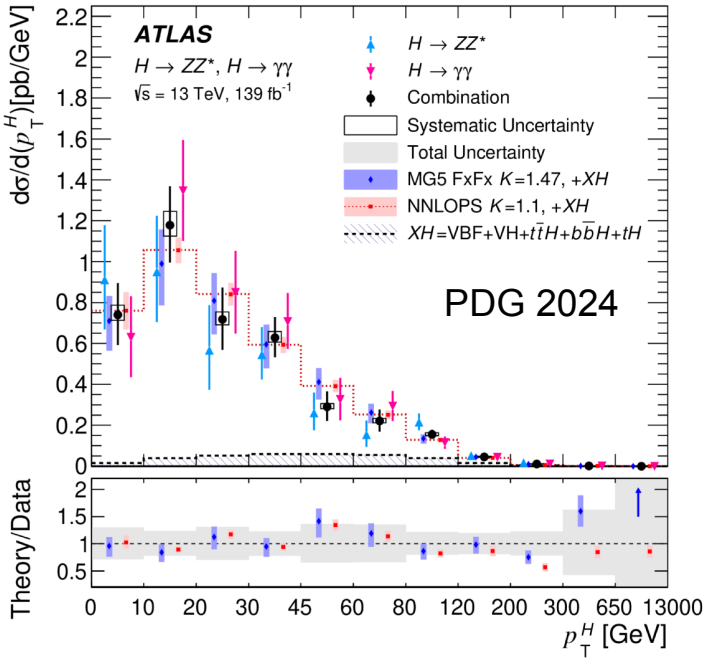
PDG 2020

Inne kanały rozpadów → zob. przegląd
w PDG 2016/18/20/22/24

Bardziej szczegółowe analizy sugerują spin cząstki Higgsa równy zero (skalar)
$J^{PC} = 0^{++}$ (zob. arXiv:1310.0025, PDG 2014, PDG 2016, PDG 2018, PDG 2020, PDG 2022, PDG 2024, arXiv:2207.00043, arXiv:2207.00092)



Poniżej pokazano rozkład pędu poprzecznego Higgsa

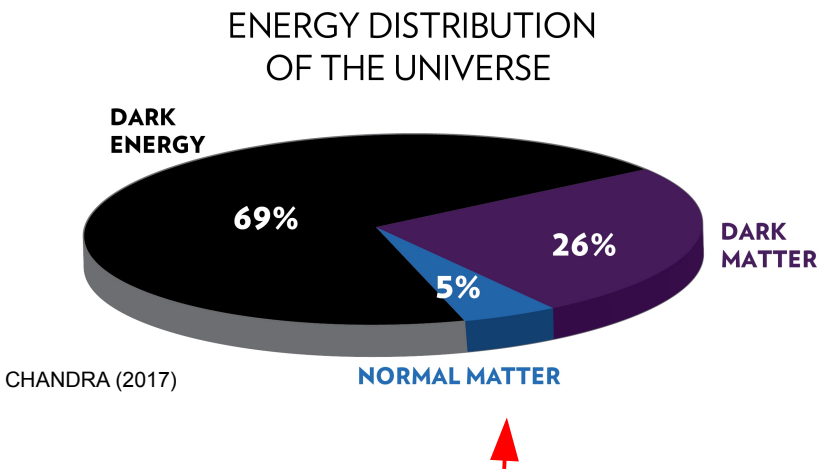


Nagroda Nobla 2013

François Englert oraz Peter W. Higgs

"za teoretyczne odkrycie mechanizmu, który przyczynia się do zrozumienia pochodzenia mas cząstek elementarnych, i który został niedawno potwierdzony poprzez odkrycie przewidywanej cząstki elementarnej dokonane przez grupy ATLAS i CMS w LHC (CERN)"

Konsekwencją zaproponowanego mechanizmu generacji masy bozonów pośredniczących jest istnienie pola i skalarnej (spin 0) cząstki Higgsa



CHANDRA (2017)

Oddziaływanie z polem Higgsa może wyjaśnić mniej niż 1–2% (tzw. masa goła kwarków u i d) z tych 5% masy/energii we Wszechświecie

PRESSMEDDELANDE
Press release

8 October 2013

The Nobel Prize in Physics 2013

The Royal Swedish Academy of Sciences has decided to award the Nobel Prize in Physics for 2013 to

François Englert
Université Libre de Bruxelles, Brussels, Belgium

Peter W. Higgs
University of Edinburgh, UK

"for the theoretical discovery of a mechanism that contributes to our understanding of the origin of mass of subatomic particles, and which recently was confirmed through the discovery of the predicted fundamental particle, by the ATLAS and CMS experiments at CERN's Large Hadron Collider"

Here, at last!

François Englert and Peter W. Higgs are jointly awarded the Nobel Prize in Physics 2013 for the theory of how particles acquire mass. In 1964, they proposed the theory independently of each other (Englert together with his now deceased colleague Robert Brout). In 2012, their ideas were confirmed by the discovery of a so called *Higgs particle* at the CERN laboratory outside Geneva in Switzerland.

The awarded theory is a central part of the Standard Model of particle physics that describes how the world is constructed. According to the Standard Model, everything, from flowers and people to stars and planets, consists of just a few building blocks: *matter particles*. These particles are governed by forces mediated by *force particles* that make sure everything works as it should.

The entire Standard Model also rests on the existence of a special kind of particle: the Higgs particle. This particle originates from an invisible field that fills up all space. Even when the universe seems empty this field is there. Without it, we would not exist, because it is from contact with the field that particles acquire mass. The theory proposed by Englert and Higgs describes this process.

On 4 July 2012, at the CERN laboratory for particle physics, the theory was confirmed by the discovery of a Higgs particle. CERN's particle collider, LHC (Large Hadron Collider), is probably the largest and the most complex machine ever constructed by humans. Two research groups of some 3,000 scientists each, ATLAS and CMS, managed to extract the Higgs particle from billions of particle collisions in the LHC.

Even though it is a great achievement to have found the Higgs particle – the missing piece in the Standard Model puzzle – the Standard Model is not the final piece in the cosmic puzzle. One of the reasons for this is that the Standard Model treats certain particles, neutrinos, as being virtually massless, whereas recent studies show that they actually do have mass. Another reason is that the model only describes visible matter, which only accounts for one fifth of all matter in the cosmos. To find the mysterious dark matter is one of the objectives as scientists continue the chase of unknown particles at CERN.

François Englert, Belgian citizen. Born 1932 in Etterbeek, Belgium. Ph.D. 1959 from Université Libre de Bruxelles, Brussels, Belgium. Professor Emeritus at Université Libre de Bruxelles, Brussels, Belgium.
www.ulb.ac.be/sciences/physth/people_FEnglert.html

Peter W. Higgs, UK citizen. Born 1929 in Newcastle upon Tyne, UK. Ph.D. 1954 from King's College, University of London, UK. Professor emeritus at University of Edinburgh, UK.
www.ph.ed.ac.uk/higgs/

Nobel Prize® is a registered trademark of the Nobel Foundation.

Prize amount: SEK 8 million, to be shared equally between the Laureates.
Further information: http://kva.se and http://nobelprize.org
Contacts: Perina Stjernlöf, Press Officer, Phone +46 8 673 95 44, +46 70 673 96 50, perina.stjernlof@kva.se
Annika Moberg, Editor, Phone +46 8 673 95 22, +46 70 325 32 18, annika.moberg@kva.se

The Royal Swedish Academy of Sciences, founded in 1739, is an independent organization whose overall objective is to promote the sciences and strengthen their influence in society. The Academy takes special responsibility for the natural sciences and mathematics, but endeavours to promote the exchange of ideas between various disciplines.

BOX 50005, SE-104 05 STOCKHOLM, SWEDEN
TEL +46 8 673 95 00, FAX +46 8 15 56 70, INFO@KVA.SE ⋆ HTTP://KVA.SE
BESÖK/VISIT: LILLA FRESCATIVÄGEN 4A, SE-114 18 STOCKHOLM, SWEDEN

KUNGL. VETENSKAPS-AKADEMIEN
THE ROYAL SWEDISH ACADEMY OF SCIENCES

Mimo tak wielu cząstek elementarnych stabilna materia Wszechświata (atomy) składa się z kwarków u i d oraz elektronów

Tablica kwarków

PDG 2024

zapach	*u (up) I generacja*	*d (down) I generacja*	*s (strange) II generacja*	*c (charmed) II generacja*	*b (bottom) III generacja*	*t (top) III generacja*
m (masa)	2.16 ± 0.07 MeV	4.70 ± 0.07 MeV	93.5 ± 0.8 MeV	1.2730 ± 0.0046 GeV	4.183 ± 0.007 GeV	172.57 ± 0.29 GeV
Q (ładunek)	+ 2/3 e	-1/3 e	-1/3 e	+ 2/3 e	-1/3 e	+ 2/3 e
I (izospin)	1/2	1/2	0	0	0	0
I_3 (izospin 3.)	1/2	-1/2	0	0	0	0
J (spin)	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2
B (l.barionowa)	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3
S (dziwność)	0	0	-1	0	0	0
C (powab)	0	0	0	1	0	0
b (piękno)	0	0	0	0	-1	0
t (prawda)	0	0	0	0	0	1

odpowiednie antykwarki oznaczane $\bar{u}, \bar{d}, \bar{s}, \bar{c}, \bar{b}, \bar{t}$ mają addytywne liczby kwantowe z przeciwnym znakiem np. anty-s ma Q = +1/3, B = -1/3, S = +1

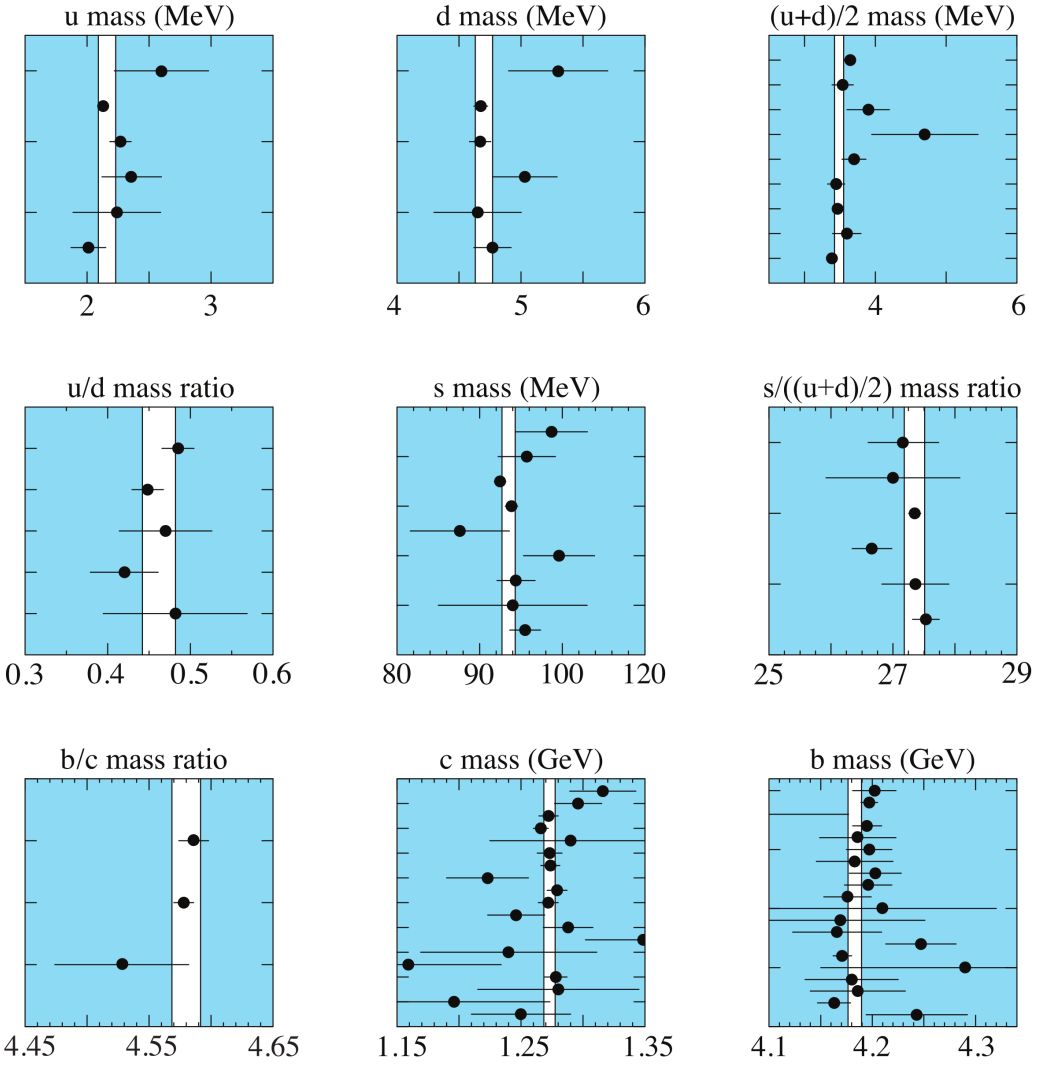
kwarki i antykwarki są fermionami o spinie 1/2
d, u – dublet izospinowy I=1/2, pozostałe kwarki to singlety I=0

Masa kwarków (tablica) – kwarki są obiektami związanymi i ich masa ma charakter masy efektywnej (podobnie jak np. masa elektronów w ciele stałym) i zależy od modelu obliczeń. Rysunek z Particle Data Group 2024

Goła masa (*bare*) → na rysunku obok (z kwantowej teorii pola). Odpowiadałaby samotnej cząstce podążającej przez czasoprzestrzeń bez "wirtualnej chmury" (→ wykł. 2, 7)
$m_{u,\,d}$ < 10 MeV, m_s ~ 100 MeV

Masa konstytuentna (*constituent, dressed*) → dedukowana (jedynie oszacowana) z mas hadronów jako obiektów złożonych z kwarków
$m_u = m_d \approx 310$ MeV, $m_s \approx 500$ MeV
$m_c \cong 1.6$ GeV, $m_b \cong 4.6$ GeV, $m_t \cong 180$ GeV

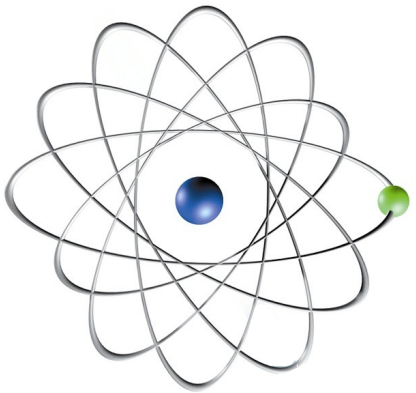
Inne przykłady z życia: swobodny neutron podlega rozpadowi β ale gdy jest związany w jądrze jego czas życia jest praktycznie nieskończony (uwaga! rozszczepienie ciężkich jąder)



dla kwarków **u** i **d** różnica między masą gołą i konstytuentną jest duża, mniejsza dla kwarka **s** a dla cięższych (**c**, **b**, **t**) praktycznie nie ma różnic

Masa systemów złożonych:

atom
10^{-10} m

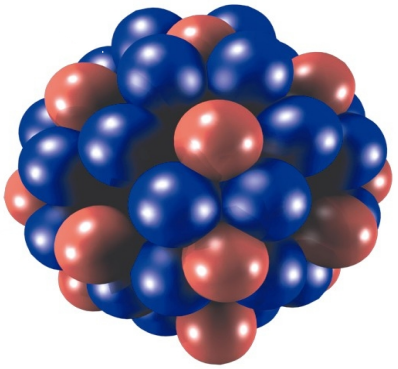


$M \approx \Sigma m_i$

efekt energii
wiązania ≈ 10^{-8}

jądro atomowe

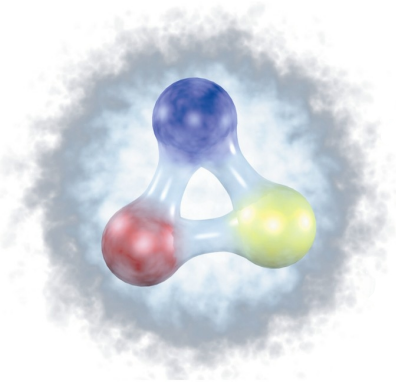
10^{-14} m



$M \approx \Sigma m_i$

efekt energii
wiązania ≈ 10^{-3} do 10^{-2}

nukleon
10^{-15} m



$M \gg m_i$

Rys. Volker Metag

Energia wiązania w jądrze na nukleon zmienia się z *A* ale nawet dla najcięższych jąder nie przekracza 8–9 MeV na jeden nukleon (nukleon ma około 938 MeV)

Nukleon: masa **nie** jest zdeterminowana poprzez sumę składowych mas; „mass without mass“ (F. Wilczek)

Masa dana poprzez energię zmagazynowaną w ruchu kwarków i energię w kolorowych polach gluonowych

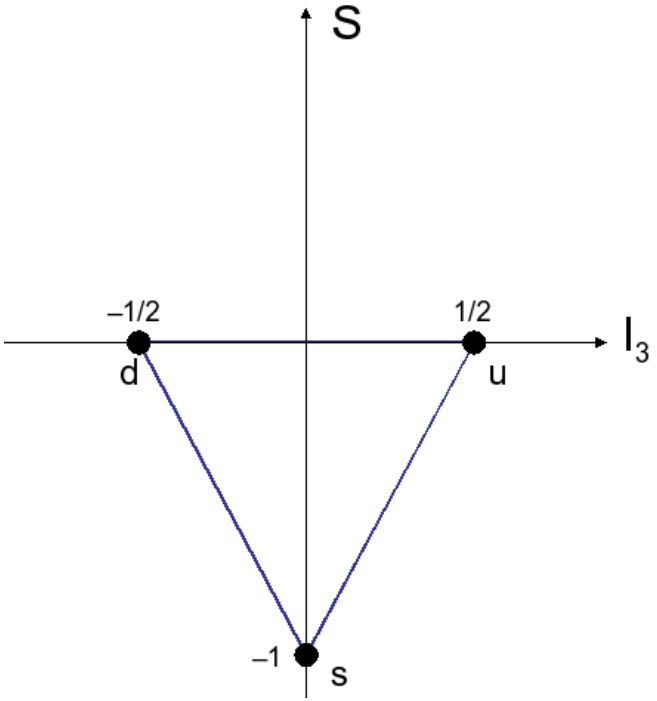
Twarde oddziaływania z dużymi przekazami czteropędu (zob. wykład 2) takie jak głęboko nieelastyczne rozpraszanie (DIS) leptonów na nukleonach i nukleonów na nukleonach (wykł. 2) pokazują nam kwarki i gluony jako (prawie) bezmasowe i punktowe obiekty

Miękkie oddziaływania (z małymi przekazami czteropędu) z kolei sugerują, że nukleony i mezony składają się z kwarków konstytuentnych o masie (kwarki u i d) rzędu 0.3 GeV/c^2

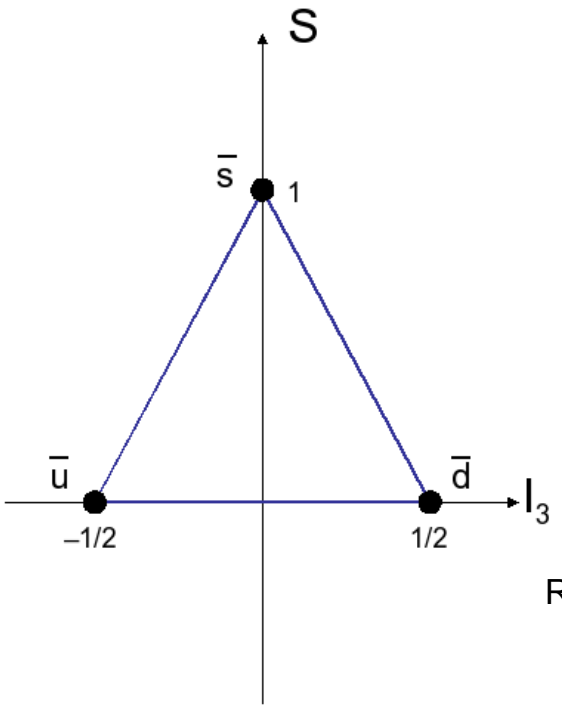
Uważa się, że **goła masa kwarków jest generowana przez oddziaływanie Higgsa** w sektorze elektrosłabym Modelu Standardowego. Dla lekkich kwarków *u* i *d* ta masa jest 2–5 MeV/c^2 czyli więcej niż 98–99% masy nukleonu jest generowane dynamicznie przez oddziaływania silne

Kwarki i antykwarki można przedstawić na diagramie liczby dziwności i trzeciej składowej izospinu:

kwarki u, d, s



antykwarki $\bar{u}$, $\bar{d}$, $\bar{s}$

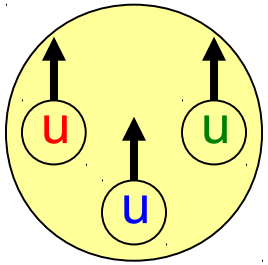


Rys. AKW

Każdy rodzaj “zapachu” kwarków istnieje w trzech “kolorach” – czerwony (R), zielony (G), niebieski (B) – nie ma to nic wspólnego z kolorem optycznym

Kolor – dodatkowy stopień swobody, widoczny jedynie na poziomie kwarkowym. Wszystkie cząstki nie-elementarne są kolorowo obojętne (białe)

Po co nam kolor ?



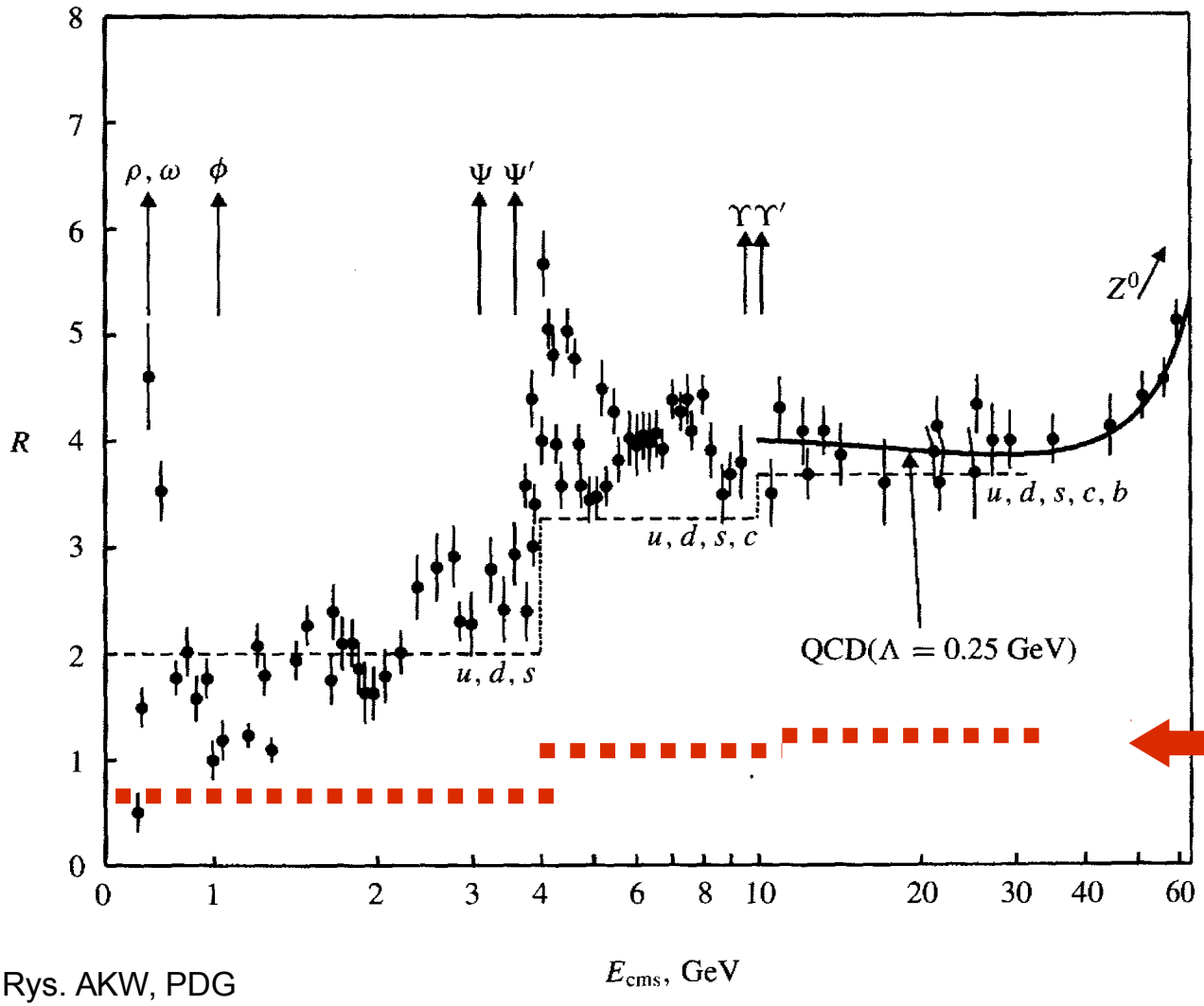
przykład: rezonans Δ^{++} o spinie 3/2
spiny trzech kwarków u muszą być ustawione tak samo – byłoby to niezgodne z zasadą Pauliego.
Inny przykład: hiperon Ω^- (sss) o spinie 3/2

przypomnienie: **zasada Pauliego** – w układzie złożonym z identycznych cząstek o spinie połówkowym nie może być 2 cząstek znajdujących się w tym samym stanie kwantowym
(bez zasady Pauliego wszystkie elektrony w atomie spadałyby na stan podstawowy)

Przykład: produkcja hadronów w oddziaływaniach elektron+pozyton (potwierdzenie nie tylko koloru kwarków ale i ich ładunków ułamkowych)

$$R=\frac{\sigma\left(e^+e^-\rightarrow hadrony\right)}{\sigma\left(e^+e^-\rightarrow \mu^+\mu^-\right)}=\sum e_{q_i}^2(\text{brak koloru})=3\sum e_{q_i}^2(\text{kolor})$$

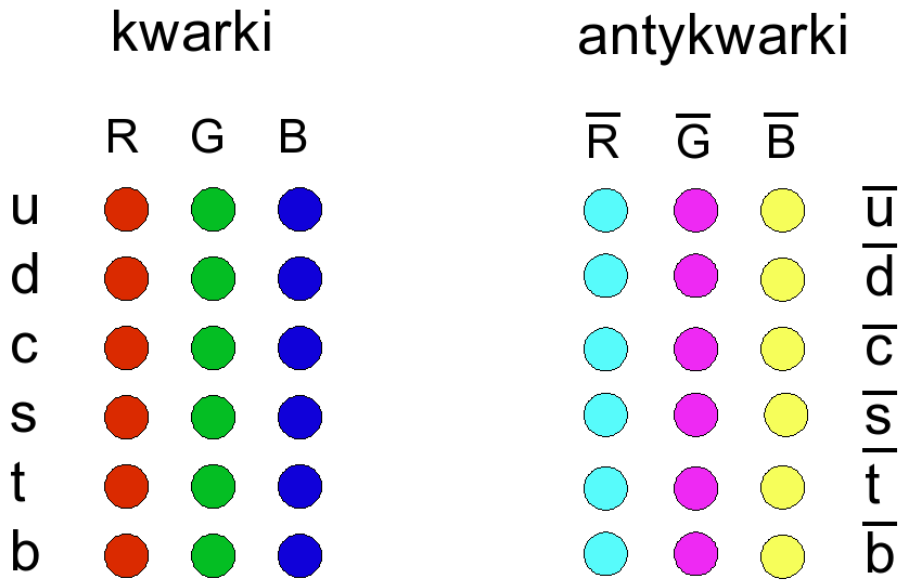
$$\sum e_{q_i}^2=\left(\frac{1}{9}+\frac{4}{9}+\frac{1}{9}+\frac{4}{9}+\frac{1}{9}+\frac{4}{9}\right)\rightarrow \text{dla d, u, s, c, b, t}$$



bez koloru

Rys. AKW, PDG

Kwarki niosą kolor a antykwarki antykolor



Rys. AKW

Hadrony
(cząstki oddziałujące silnie; kolorowo obojętne)

mezony $q_i \bar{q}_j$

bariony $q_i q_j q_k$

antybariony $\bar{q}_i \bar{q}_j \bar{q}_k$

ww. skład to tzw. kwarki walencyjne (*valence quarks*), oprócz tego istnieją także kwarki „morza” (*sea quarks*) czyli mnóstwo par kwark-antykwark (o tym samym zapachu) – zarówno w mezonach jak i barionach

$$proton = u\,u\,d + \text{dużo}\; u\,\bar{u} + \text{dużo}\; d\,\bar{d} + \text{dużo}\; s\,\bar{s}\,\ldots$$

Model budowy hadronów nie wyklucza innych składów kwarkowych np. pentakwarki, tetrakwarki (byle całość była kolorowo obojętna)

$$\text{glubole}\,(ggg, gg),\ \text{mezony hybrydowe}\,(\bar{q}\,gq),\ \text{stany multikwarkowe}\,(qq\,\bar{q}\,\bar{q}, qqqq\,\bar{q}, qqq\,\bar{q}\,\bar{q}\,\bar{q}, \ldots)$$

rok 2003 – pierwsze doniesienia o odkryciu tzw. **pentakwarków** (zob. slajdy dodatkowe);
zob. też pracę przeglądową na temat poszukiwania gluboli → D. Vadacchino, arXiv:2305.04869

Oryginalna praca w której zaproponowano kwarki (niezależnie od **M. Gell-Manna** model kwarkowy zaproponował **G. Zweig**; Zweig nazwał je asami)

Inne kombinacje np. pentakwarki nie były w modelu zabronione

Volume 8, number 3 PHYSICS LETTERS 1 February 1964

A SCHEMATIC MODEL OF BARYONS AND MESONS *

M. GELL-MANN
California Institute of Technology, Pasadena, California

Received 4 January 1964

If we assume that the strong interactions of baryons and mesons are correctly described in terms of the broken "eightfold way" [1-3], we are tempted to look for some fundamental explanation of the situation. A highly promised approach is the purely dynamical "bootstrap" model for all the strongly interacting particles within which one may try to derive isotopic spin and strangeness conservation and broken eightfold symmetry from self-consistency alone [4]. Of course, with only strong interactions, the orientation of the asymmetry in the unitary space cannot be specified; one hopes that in some way the selection of specific components of the F-spin by electromagnetism and the weak interactions determines the choice of isotopic spin and hypercharge directions.

Even if we consider the scattering amplitudes of strongly interacting particles on the mass shell only and treat the matrix elements of the weak, electromagnetic, and gravitational interactions by means of dispersion theory, there are still meaningful and important questions regarding the algebraic properties of these interactions that have so far been discussed only by abstracting the properties from a formal field theory model based on fundamental entities [3] from which the baryons and mesons are built up.

ber $n_t - n_{\bar{t}}$ would be zero for all known baryons and mesons. The most interesting example of such a model is one in which the triplet has spin $\frac{1}{2}$ and $z = -1$, so that the four particles d^-, s^-, u^0 and b^0 exhibit a parallel with the leptons.

A simpler and more elegant scheme can be constructed if we allow non-integral values for the charges. We can dispense entirely with the basic baryon b if we assign to the triplet t the following properties: spin $\frac{1}{2}$, $z = -\frac{1}{3}$, and baryon number $\frac{1}{3}$. We then refer to the members $u^{\frac{2}{3}}$, $d^{-\frac{1}{3}}$, and $s^{-\frac{1}{3}}$ of the triplet as "quarks" [6] q and the members of the anti-triplet as anti-quarks $\bar{q}$. Baryons can now be constructed from quarks by using the combinations (qqq), $(qqq\bar{q})$, etc., while mesons are made out of $(q\bar{q})$, $(qq\bar{q}\bar{q})$, etc. It is assuming that the lowest baryon configuration (qqq) gives just the representations **1**, **8**, and **10** that have been observed, while the lowest meson configuration $(q\bar{q})$ similarly gives just **1** and **8**.

A formal mathematical model based on field theory can be built up for the quarks exactly as for p, n, Λ in the old Sakata model, for example [3] with all strong interactions ascribed to a neutral vector meson field interacting symmetrically with the three particles. Within such a framework, the electromagnetic current (in units of e) is just

Praca z propozycją kwarków przyjęta do druku w Physics Letters tylko dlatego ze autorem był Gell-Mann! Redaktor (Harry Lipkin) pomyślał: *"ta praca jest zwariowana ale jeśli ją zaakceptujemy i okaże się nonsensem to blamaż spadnie na Gell Mann'a a nie na Phys. Lett. Jeśli jednak ja odrzucimy a okaże się prawdziwa to będą się z nas naśmiewać."*

Jeszcze kilka słów o własnościach hadronów:

1. Wszystkie bariony, z wyjątkiem protonów, są niestabilne i rozpadają się na protony i leptony (proton jest najlżejszym barionem)

2. **Model Standardowy nie przewiduje możliwości rozpadu protonu** (**brak oddziaływań zamieniających barion w mezon lub lepton**), mimo tego:
* poszukiwania rozpadu protonu trwają
* poszukiwania tzw. leptokwarków również

3. W przypadku hadronów złożonych z lekkich kwarków tylko bardzo niewielka część ich masy pochodzi od samych kwarków

proton (uud)
$M_{u+u+d} = 0.00216 + 0.00216 + 0.00470$ GeV
$M_{protonu} \approx 0.938$ GeV

Większość masy pochodzi z energii kinetycznej i potencjalnej. Energie te zamieniane są na masę hadronu zgodnie ze wzorem $E=mc^2$

"Ubrana masa" >> "goła masa" (jesteśmy zbudowani z niemal czystej energii)

Wzór Gell-Manna-Nishijimy: $Q = I_3 + B/2 + S/2 = I_3 + Y/2$

B – liczba barionowa
S – dziwność
Y – hiperładunek

Uogólnienie na pozostałe liczby kwantowe (zapachy kwarków):
$Q = I_3 + B/2 + S/2 + C/2 + b/2 + t/2$

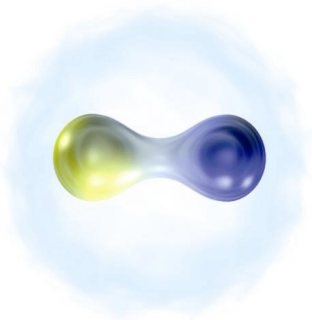
Konstrukcja multipletów mezonowych i barionowych

* próba klasyfikacji cząstek – podobnie jak zrobił to Mendelejew dla pierwiastków
* multiplety pozwalają przewidzieć istnienie nowych cząstek przed ich odkryciem

Mezony (kwarkonia, *quarkonium*)

$\mathbf{J^P}$ lub $^{2S+1}\mathbf{L}_{J=L+S}$ (notacja spektroskopowa)

J – spin
P – parzystość $\mathbf{P=(-1)(-1)^L}$
to pierwsze (-1) to tzw. parzystość wewn. pary fermionów



Całk. spin mezonu **J=L+S**
L – moment orbitalny 0, 1, 2,...
S – spin 0 lub 1

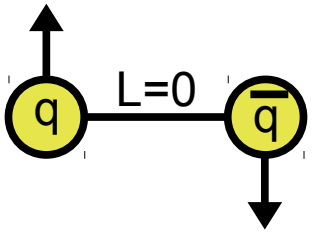
$\mathbf{0^-}$ mezony pseudoskalarne ($^1\mathbf{S}_0$), L=0, S=0, J=0

$\mathbf{1^-}$ mezony wektorowe ($^3\mathbf{S}_1$), L=0, S=1, J=1

$\mathbf{2^+}$ mezony tensorowe ($^3\mathbf{P}_2$), L=1, S=1, J=2

Multiplet $J^P = 0^-$

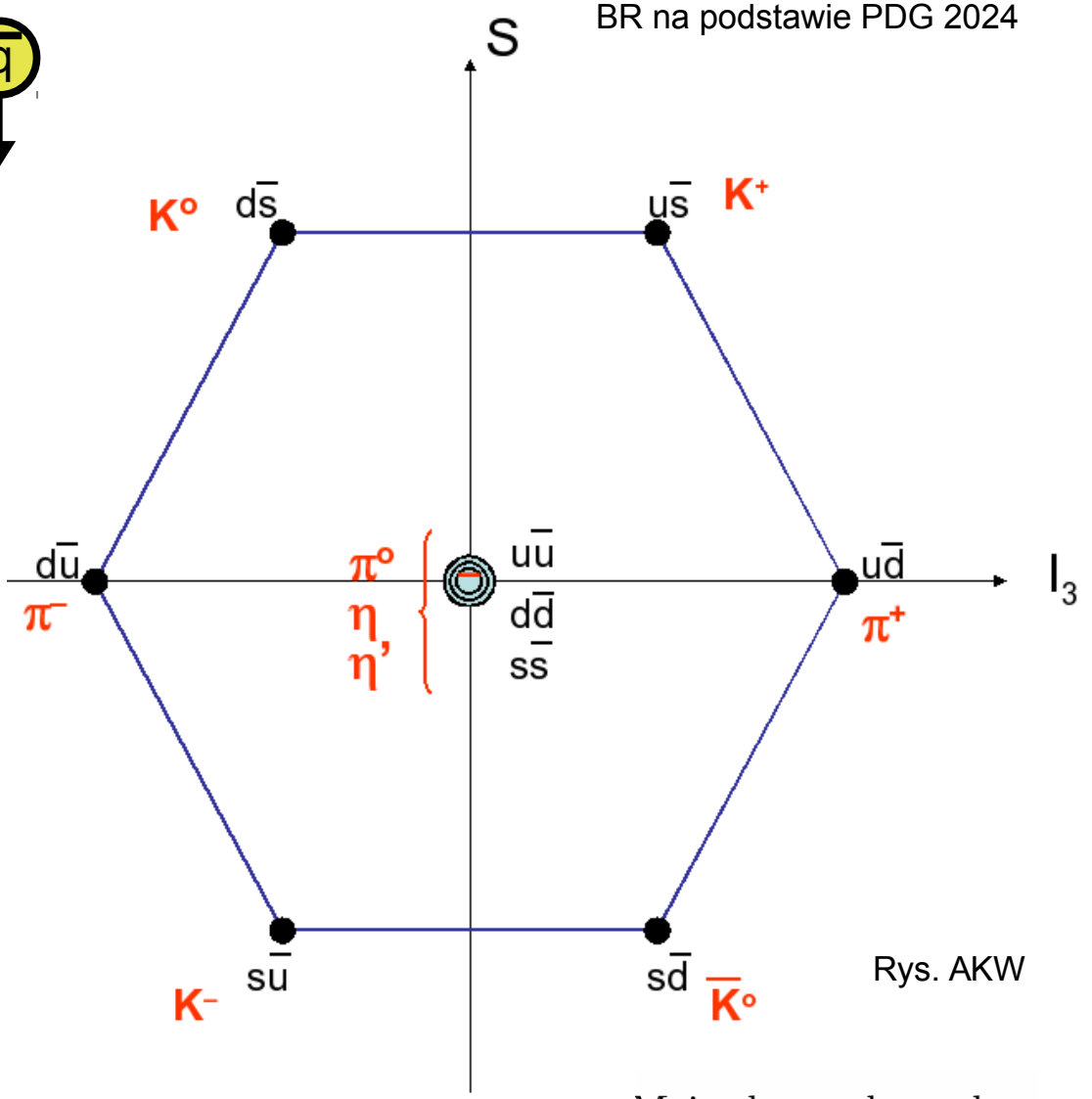
mezony pseudoskalarne



Masy:

π^+ π^-	139.6 MeV
π^0	135 MeV
K^0 anty-K^0	497.6 MeV (rozpady na wykł. 2)
K^+ K^-	493.7 MeV
η	547.9 MeV
η'	957.8 MeV

Podane przybliżone masy, czasy i BR na podstawie PDG 2024



Rys. AKW

Najczęstsze kanały rozpadów:

$\pi^+ \to \mu^+ \nu_\mu$ BR = 99.99%

$\tau = 2.6 \cdot 10^{-8}$ s $c\tau$ = 7.8 m

$\pi^0 \to \gamma\gamma$ BR = 98.82%

$\tau = 8.4 \cdot 10^{-17}$ s $c\tau$ = 25.3 nm

$K^{+/-}$ ($\tau = 1.24 \cdot 10^{-8}$ s $c\tau$ = 3.7 m)

$K^+ \to \mu^+ \nu_\mu$ BR = 63.6%

$K^+ \to e^+ \nu_e \pi^0$ BR = 5.1%

$K^+ \to \mu^+ \nu_\mu \pi^0$ BR = 3.4%

$K^+ \to \pi^+ \pi^0$ BR = 20.7%

$K^+ \to \pi^+ \pi^+ \pi^-$ BR = 5.6%

BR – *branching ratio*
(współczynnik rozgałęzienia)
czasami Γ_i/Γ_{tot}

Main decay channels:

$\eta \to \gamma\gamma$	39%
$\eta \to \pi^\circ\pi^\circ\pi^\circ$	33%
$\eta \to \pi^+\pi^-\pi^\circ$	23%
$\eta \to \pi^+\pi^-\gamma$	4.28%

Multiplet $J^P = 1^-$ mezony wektorowe

Masy:

$\rho^+ \rho^-$ 775.1 MeV ($\Gamma_{tot} \approx 149$ MeV)

ρ^0 775.3 MeV ($\Gamma_{tot} \approx 147$ MeV)

K^{*0} anty-K^{*0} 895.6 MeV ($\Gamma_{tot} \approx 47$ MeV)

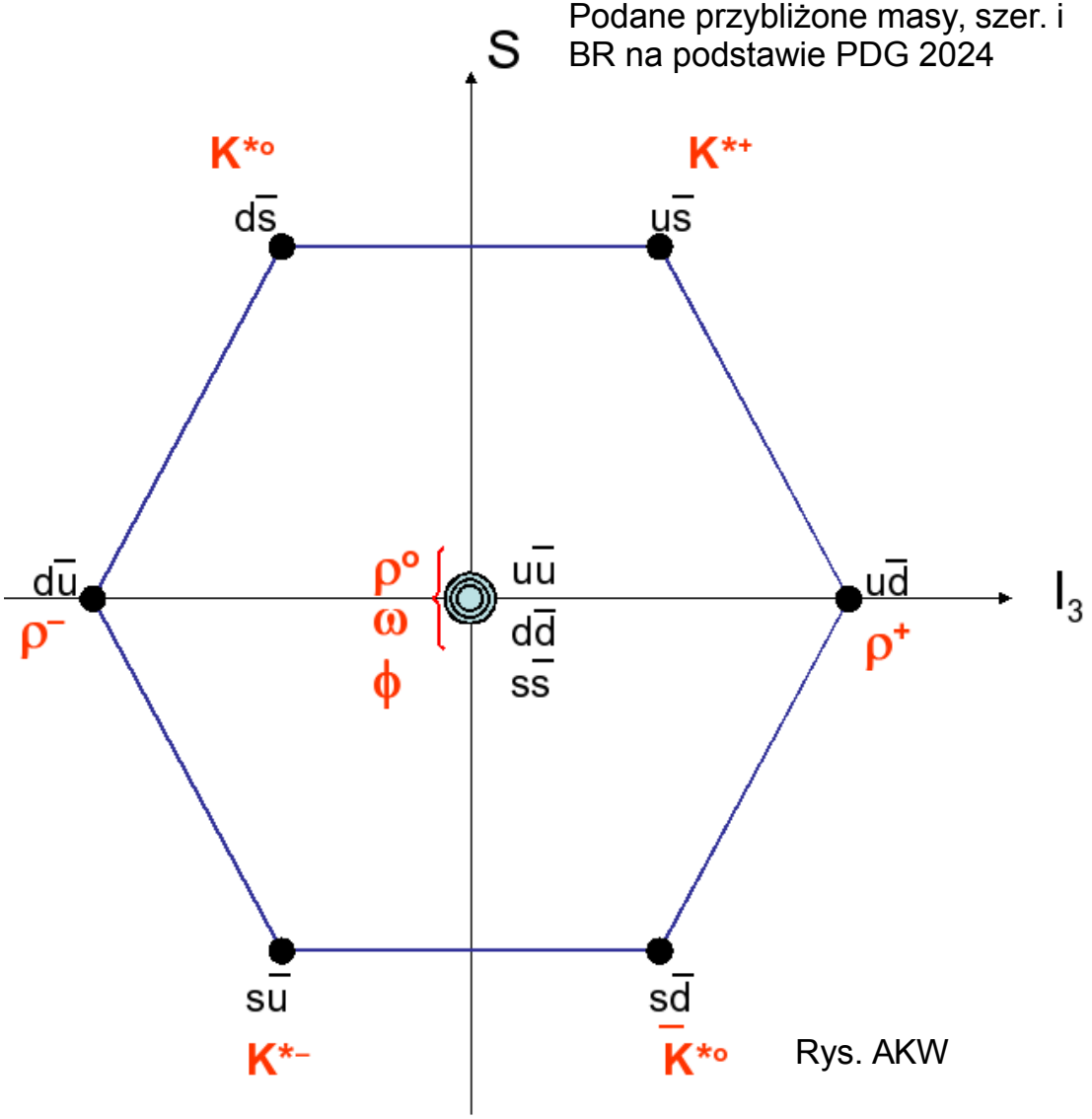
K^{*+} K^{*-} 891.7 MeV ($\Gamma_{tot} \approx 51$ MeV)

$\Rightarrow K^*$ mają czasy życia rzędu 1.3×10^{-23} s

ω 782.7 MeV ($\Gamma_{tot} = 8.7$ MeV)

ϕ 1019.5 MeV ($\Gamma_{tot} = 4.25$ MeV)

Podane przybliżone masy, szer. i BR na podstawie PDG 2024



Rys. AKW

Najczęstsze kanały rozpadów:

$\omega \to \pi^+ \pi^- \pi^0$ BR (Γ_i/Γ_{tot}) = 89.2%

$\omega \to \pi^0 \gamma$ BR = 8.35%

$\rho \to \pi \pi$ BR około 100%

$K^* \to K \pi$ BR około 100%

dwa ww. – kombinacje żeby zachować ładunek

$\phi \to K^+ K^-$ BR = 49.1%

$\phi \to K^0_S K^0_L$ BR = 33.9%

$\phi \to \rho\pi$ (znaki!) $\pi^+ \pi^- \pi^0$ BR = 15.4%

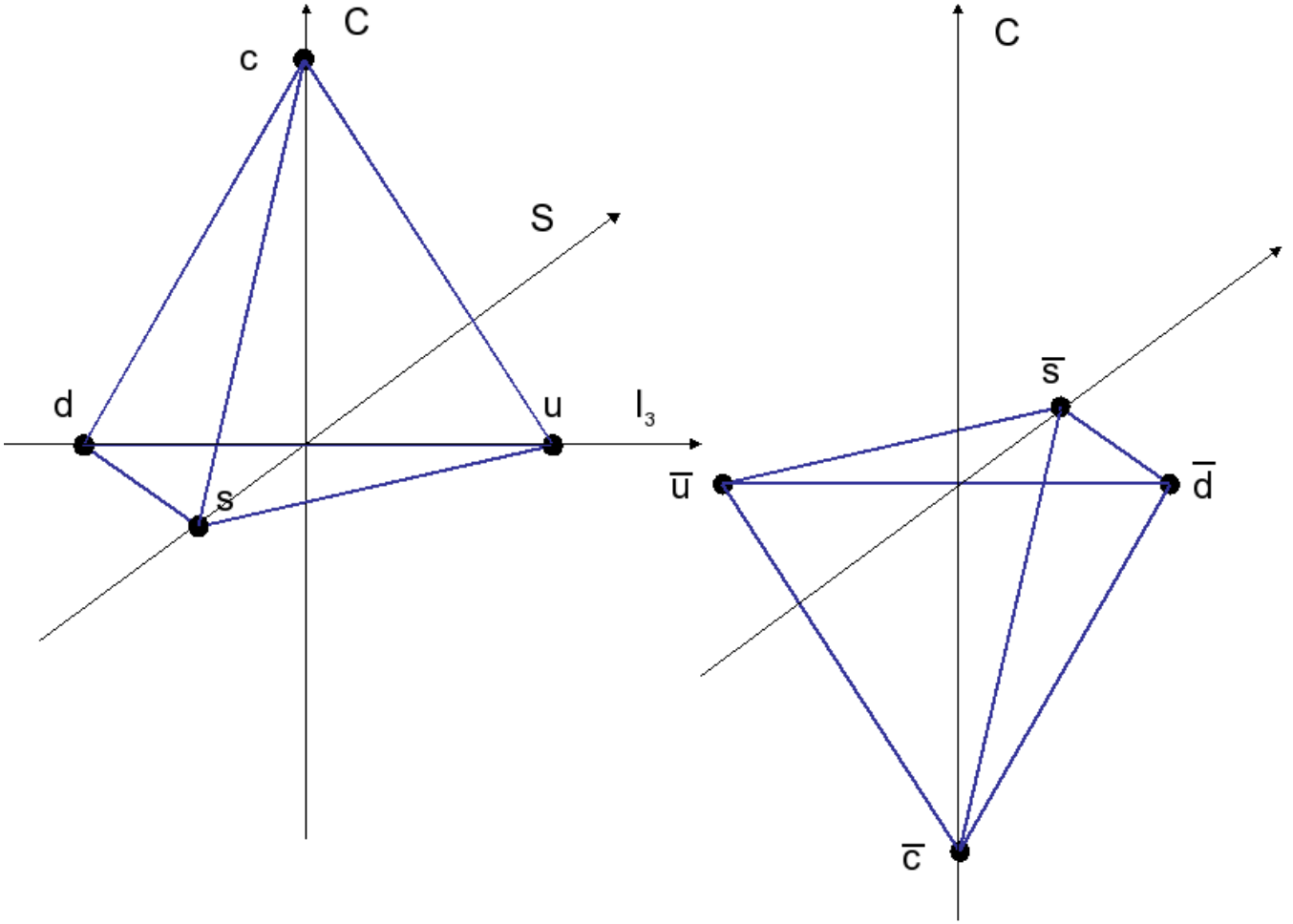
$\phi \to \eta \gamma$ BR = 1.3%

Dla cząstek o krótkich cz. życia

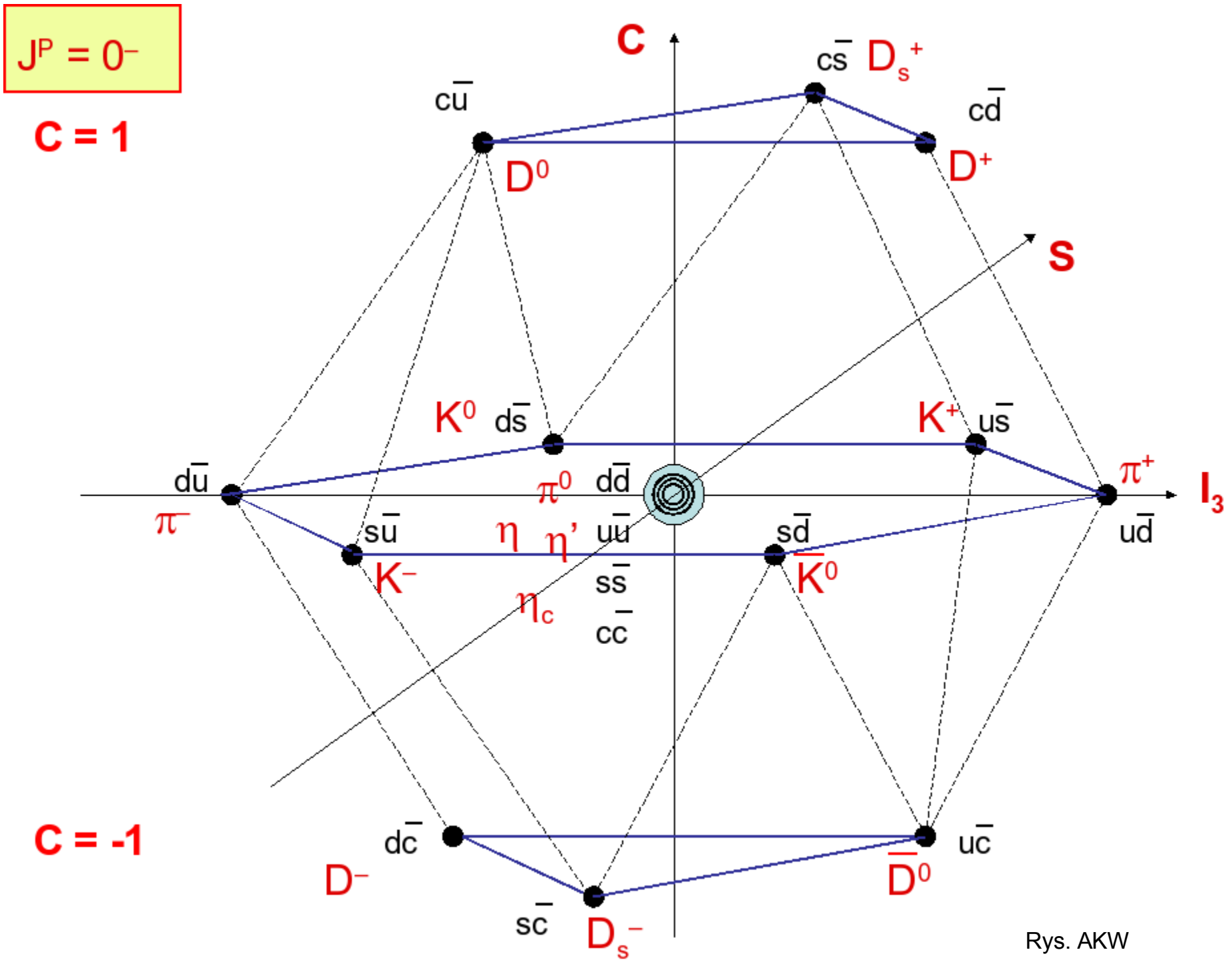
zamiast τ mamy $\Gamma = \dfrac{h/(2\pi)}{\tau}$

$\hbar \equiv h/(2\pi) \approx 6.582 \cdot 10^{-22}$ MeV·s

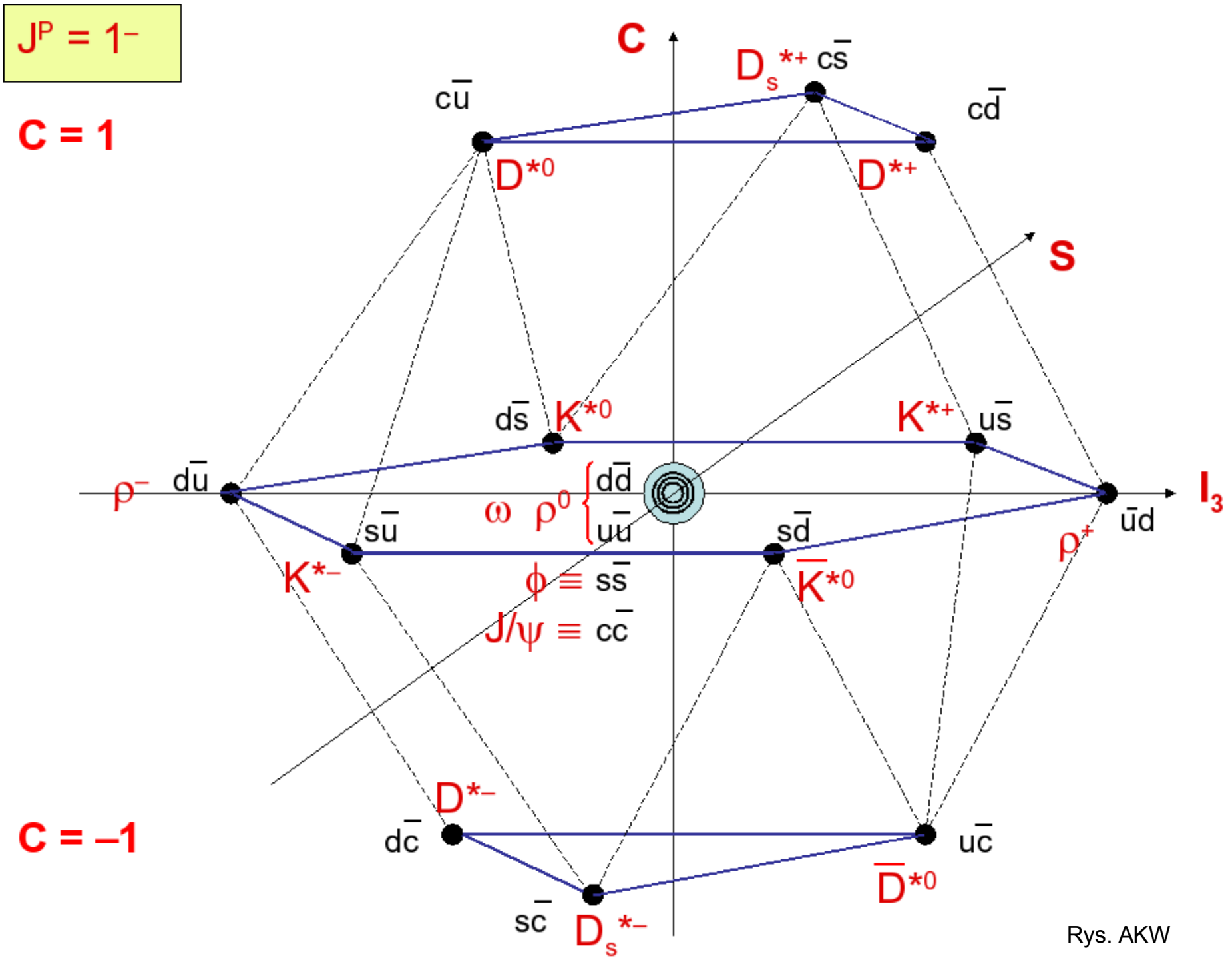
Dotychczas było prosto bo tylko 3 kwarki: u, d, s
A co jeśli dołożymy jeszcze jeden kwark (c) ?
W przestrzeni 3D



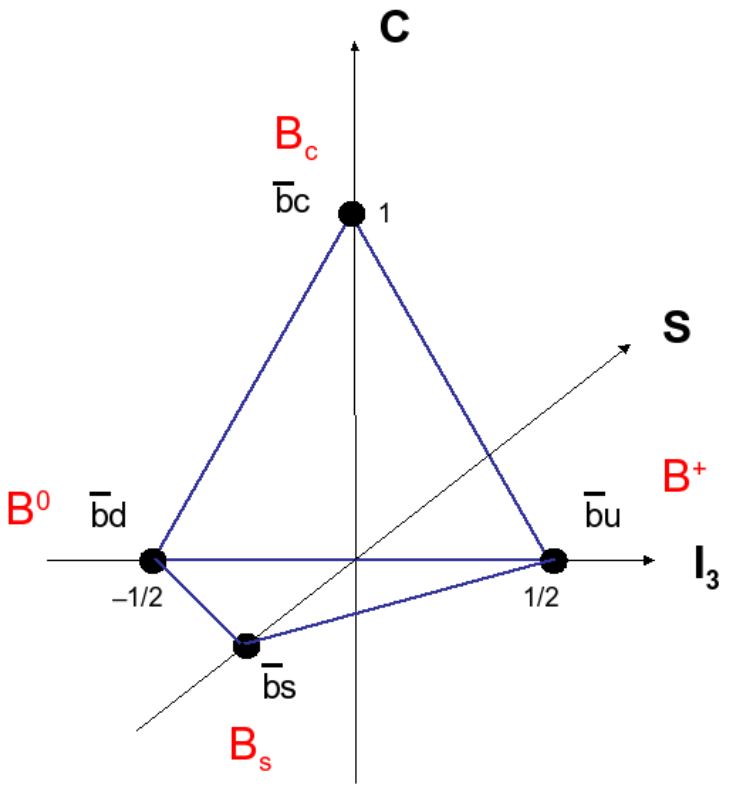
Rys. AKW


$J^P = 0^-$
C = 1
C = -1
C
S
I_3
$c\bar{u}$
$c\bar{s}$
D_s^+
$c\bar{d}$
D^0
D^+
K^0
$d\bar{s}$
K^+
$u\bar{s}$
$d\bar{u}$
π^-
π^0
$d\bar{d}$
π^+
$s\bar{u}$
η
η'
$u\bar{u}$
$s\bar{d}$
$u\bar{d}$
K^-
$s\bar{s}$
$\bar{K}^0$
η_c
$c\bar{c}$
$d\bar{c}$
$u\bar{c}$
D^-
$\bar{D}^0$
$s\bar{c}$
D_s^-

Rys. AKW


$J^P = 1^-$
C = 1
C = –1
C
S
I_3
D_s^{*+} $c\bar{s}$
$c\bar{u}$
$c\bar{d}$
D^{*0}
D^{*+}
$d\bar{s}$
K^{*0}
K^{*+}
$u\bar{s}$
ρ^-
$d\bar{u}$
ω ρ^0 $d\bar{d}$ $u\bar{u}$
$\bar{u}d$
$s\bar{u}$
$s\bar{d}$
ρ^+
K^{*-}
$\phi \equiv s\bar{s}$
$\bar{K}^{*0}$
$J/\psi \equiv c\bar{c}$
D^{*-}
$d\bar{c}$
$u\bar{c}$
$\bar{D}^{*0}$
$s\bar{c}$
D_s^{*-}
Rys. AKW

Po dołożeniu kwarka b nie da się narysować nawet jako bryły (byłaby to bryła 4D) – tak więc rzutujemy na przestrzeń 3D



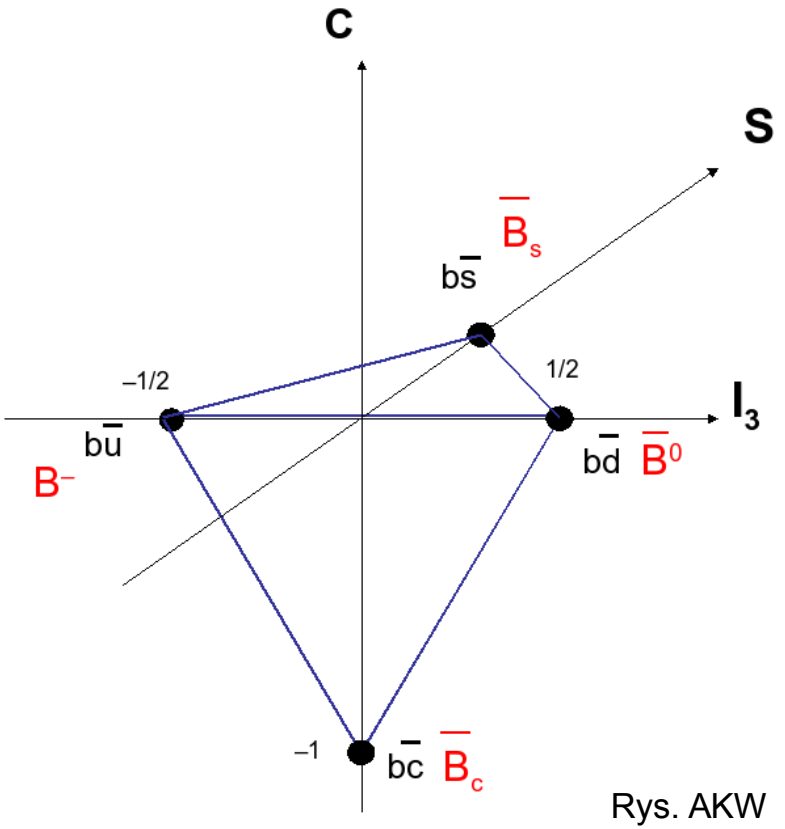
Rzut B = +1

C = 1 C = 1

C = 0 C = 0

C = –1 C = -1

Rzut B = -1



Rys. AKW

Rzut B = 0 ● $b\bar{b}$ ← mezony $\Upsilon(1^-)$ i $\chi_b(0^+)$ (masy około 10 GeV)

Lista interesujących nas mezonów zawierających ciężkie kwarki c i b:

(podane przybliżone masy i czasy na podstawie PDG 2024)

$D^{\pm}$ masa: 1869.7 MeV τ = 1.03 ps, $c\tau$ = 309.8 μm

D^{0} masa: 1864.8 MeV τ = 0.41 ps, $c\tau$ = 123.0 μm

$D_s^{\pm}$ masa: 1968.4 MeV τ = 0.50 ps, $c\tau$ = 150.3 μm

ww. mezony D rozpadają się najczęściej na cząstki zawierające kwark 's' (rozpady słabe)

D* rezonanse, rozpady silne (liczba kwantowa 'powabu' zachowana)

$B^{\pm}$ masa: 5279.3 MeV τ = 1.64 ps

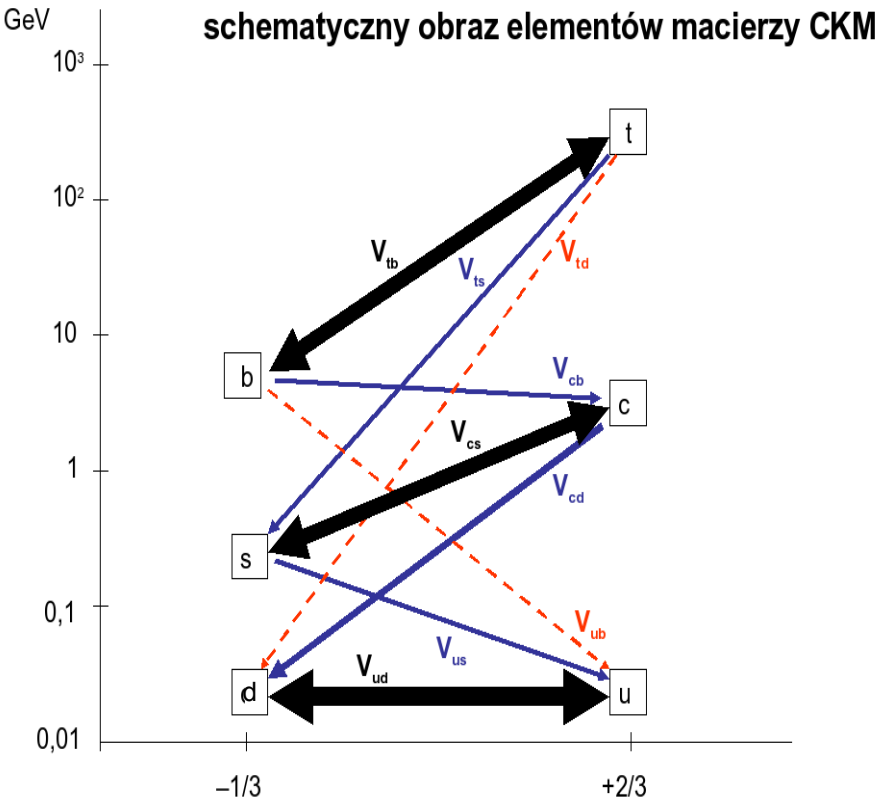
B^{0} masa: 5279.7 MeV τ = 1.52 ps

B_s^{0} masa: 5366.9 MeV τ = 1.52 ps

$B_c^{\pm}$ masa: 6274.5 MeV τ = 0.51 ps

W oddział. słabych mezony B rozpadają się najczęściej na cząstki zawierające kwark 'c' a te dalej na cząstki zawierające 's'

prawdopodobieństwa przejść między poszczególnymi zapachami kwarków, np. t → b, c → s (dot. oddział. słabych!) dane elementami tzw. macierzy CKM → (im grubsza kreska tym bardziej prawdop.)



Rys. AKW

Podane przybliżone masy, szerokość i BR na podstawie PDG 2024

Mezony szczególnie nas interesujące (powab ukryty i piękno ukryte):

$J^{PC} = 1^{--}$ $\psi(1S) \equiv J/\psi$ M = 3097 MeV

(**c anty-c**) $\psi(2S)$ M = 3686 MeV

następne (słabo widoczne) mają masy (MeV):
3774, 4040, 4191, 4222, 4374, 4415, 4641
(do nich nie ma już notacji spektroskopowej 1S, 2S itp.)

Kanały rozpadów $J/\Psi(1S)$

$\Gamma_{tot} = 93$ keV (mało!)

$J/\Psi \rightarrow hadrons$	BR = 87.7 %
$J/\Psi \rightarrow e^+ e^-$	BR = 5.97 %
$J/\Psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$	BR = 5.96 %

$J^{PC} = 1^{--}$ $\Upsilon(1S)$ M = 9460 MeV

(**b anty-b**) $\Upsilon(2S)$ M = 10023 MeV

$\Upsilon(3S)$ M = 10355 MeV

$\Upsilon(4S)$ M = 10579 MeV

następne (słabo widoczne) mają masy (MeV): (?)10753, 10885, 11000

Uwaga: kwark **t** (masa około 173 GeV) nie tworzy układów związanych

Dla porównania **kilka stanów mezonu ρ:**

$J^{PC} = 1^{--}$ ρ M = 775.3 MeV

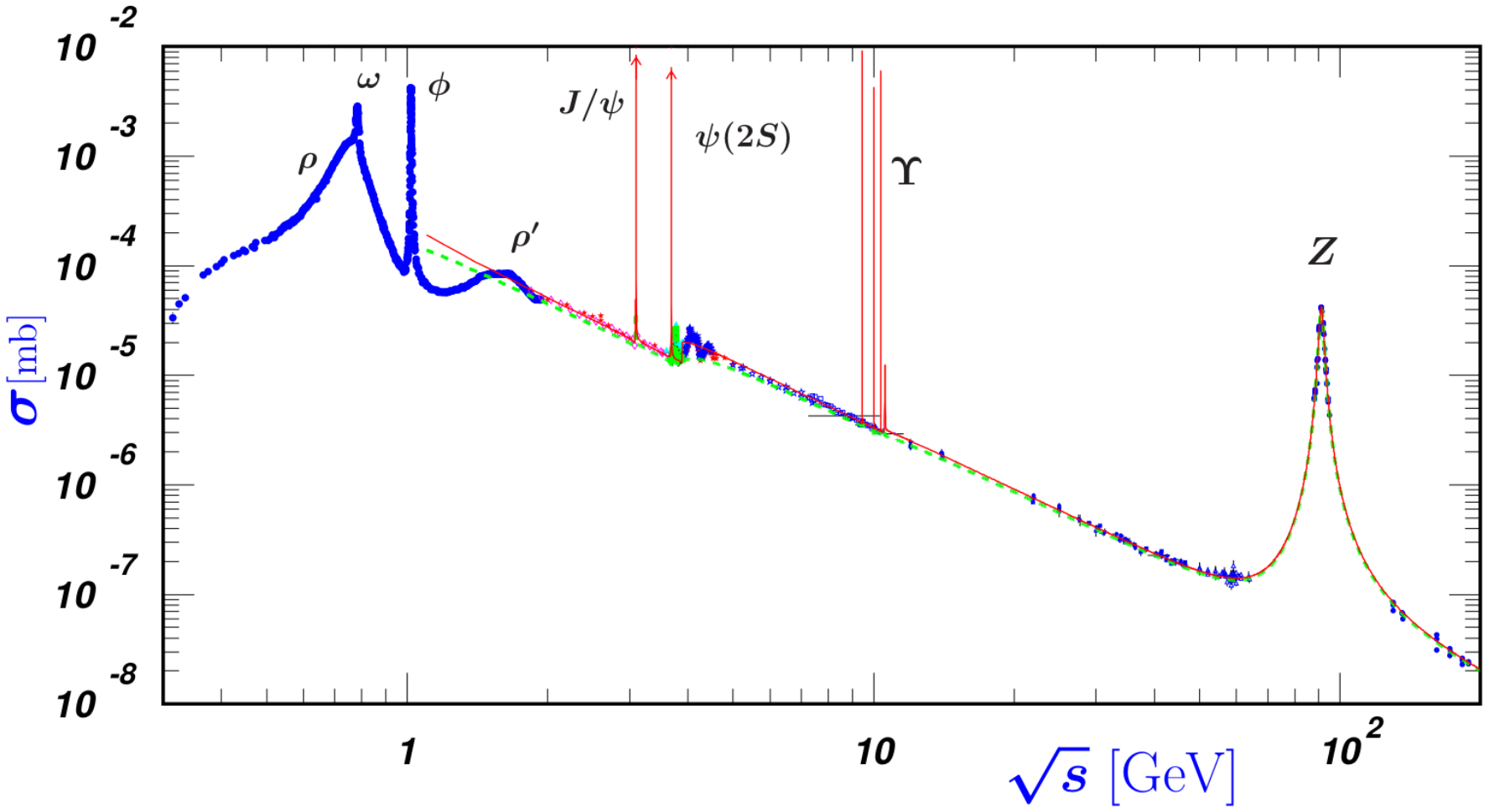
ρ M = 1465 MeV

ρ M = 1570 MeV

ρ M = 1720 MeV

Kilka stanów o różnych masach to tzw. **wzbudzenia radialne** (radial excitations) – odpowiednik różnych wartości głównej liczby kwantowej dla potencjału Coulombowskiego

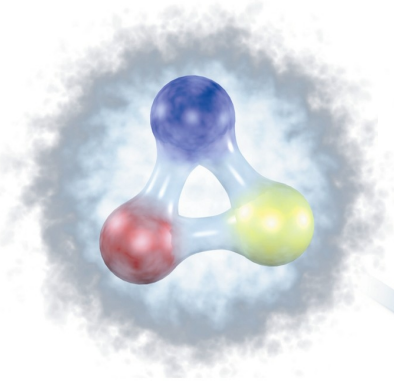
Gdzie umiejscowione są te stany (ich masy) – rysunek z PDG 2022 (usunięty z PDG 2024)



całkowity przekrój czynny

$$\sigma\left(e^{+}e^{-} \rightarrow hadrony\right)$$

Bariony



Nazewnictwo barionów:

Z trzema kwarkami pierwszej generacji

N I = 1/2 (w tej grupie również proton i neutron)

Δ I = 3/2

Z dwoma kwarkami pierwszej generacji

Λ I = 0

Σ I = 1

Z jednym kwarkiem pierwszej generacji

Ξ I = 1/2

Bez kwarków pierwszej generacji

Ω I = 0

Zawartość kwarków c, b, t dana wskaźnikiem

Na przykład: Λ_c, Σ_c, Λ_b, Ξ_c, Ξ_{cb}, Ω_c, Ω_{ccc}

Multiplet $J^P = 1/2^+$

Masy:

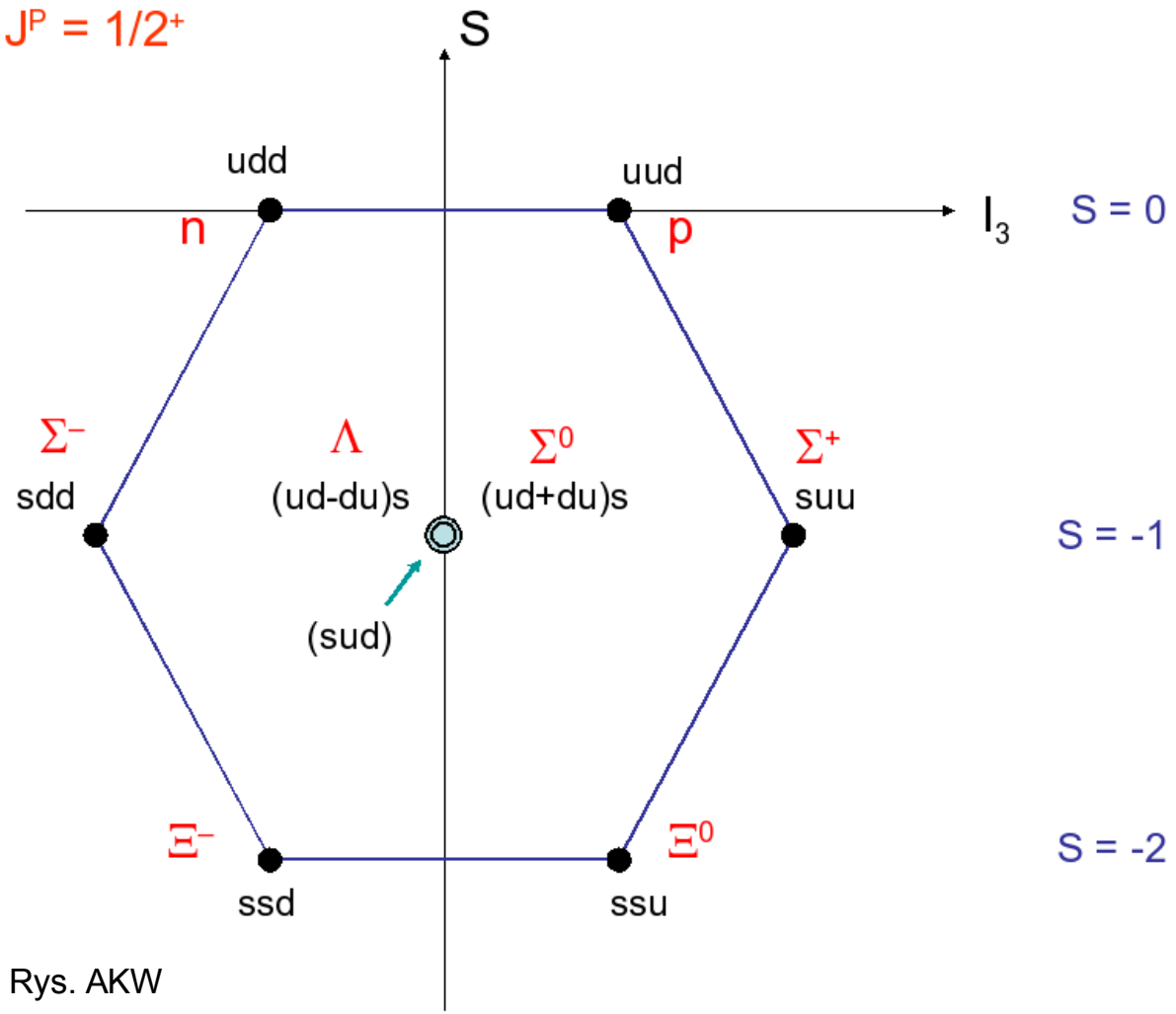
p (938.3 MeV) n (939.6 MeV)

Λ (1115.7 MeV)

Σ^0 (1193 MeV) Σ^- (1197 MeV) Σ^+ (1189 MeV)

Ξ^0 (1315 MeV) Ξ^- (1322 MeV)

PDG 2024 (podane przybliżone wartości); Super-Kamiokande τ_p/BR ($p \to e^+\pi^0$ oraz $p \to \mu^+\pi^0$)



Rys. AKW

Najczęstsze kanały rozpadów:

p (stabilny: $\tau/BR > 10^{34}$ lat), anty-p też

$n \to p\ e^-\ \text{anti-}\nu_e$ BR około 100%

τ = 878 s $c\tau = 2.6 \cdot 10^8$ km

Λ: $\tau = 2.6 \cdot 10^{-10}$ s $c\tau$ = 7.8 cm

$\Lambda \to p\ \pi^-$ BR = 64.1%

$\Lambda \to n\ \pi^0$ BR = 35.9%

Σ^+: $\tau = 0.8 \cdot 10^{-10}$ s $c\tau$ = 2.4 cm

$\Sigma^+ \to p\ \pi^0$ BR = 51.5%

$\Sigma^+ \to n\ \pi^+$ BR = 48.4%

Σ^-: $\tau = 1.5 \cdot 10^{-10}$ s $c\tau$ = 4.4 cm

$\Sigma^- \to n\ \pi^-$ BR = 99.8%

Σ^0: $\tau = 7.4 \cdot 10^{-20}$ s $c\tau = 2.2 \cdot 10^{-11}$ m

$\Sigma^0 \to \Lambda\ \gamma$ (EM!) BR = 100%

Ξ^0: $\tau = 2.9 \cdot 10^{-10}$ s $c\tau$ = 8.7 cm

$\Xi^0 \to \Lambda\ \pi^0$ BR = 99.5%

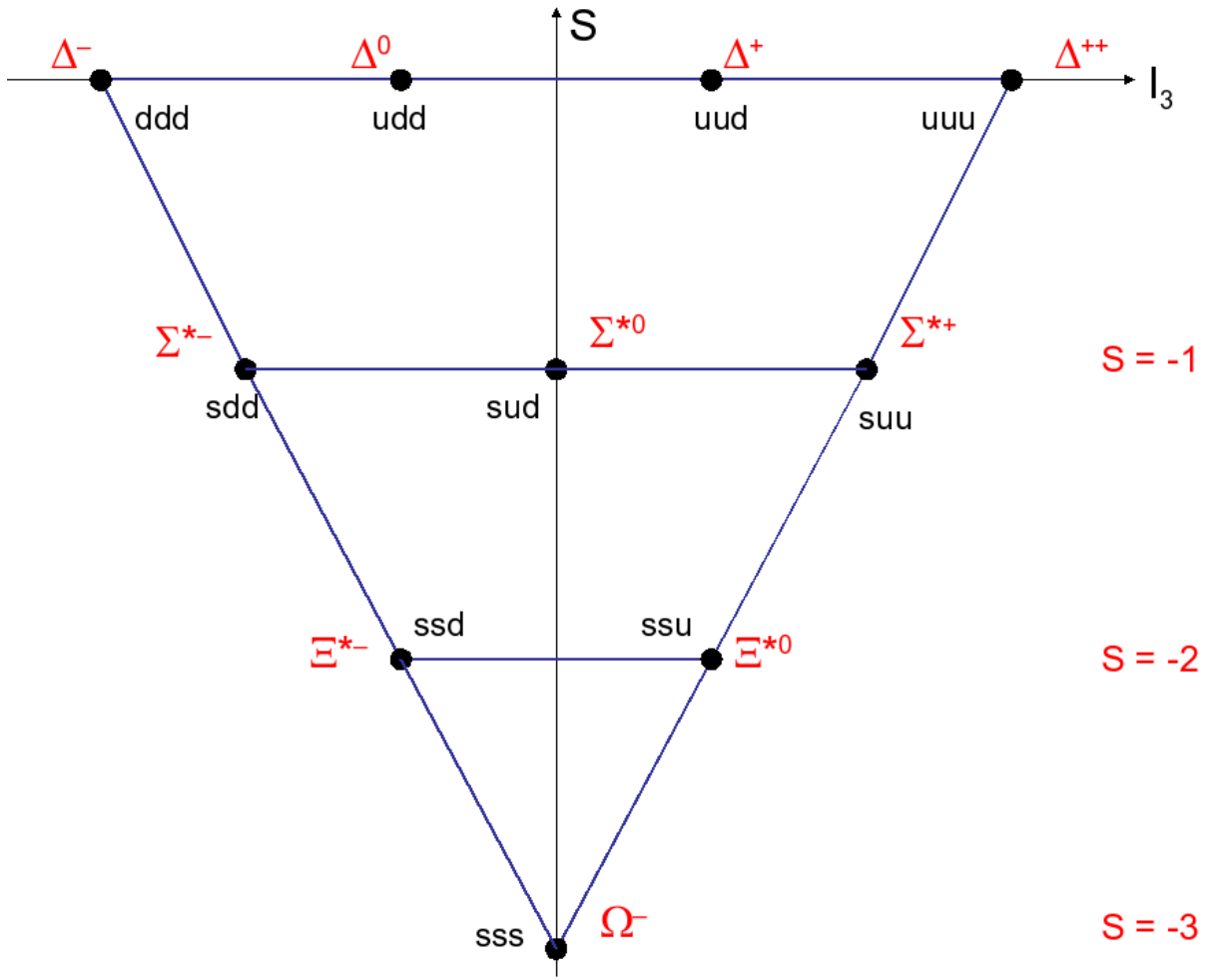
Ξ^-: $\tau = 1.6 \cdot 10^{-10}$ s $c\tau$ = 4.9 cm

$\Xi^- \to \Lambda\ \pi^-$ BR = 99.9%

Multiplet $J^P = 3/2^+$

Masy:

Δ	1230–1234 MeV
Σ^{*0}	1384 MeV
Σ^{*+}	1383 MeV
Σ^{*-}	1387 MeV
Ξ^{*0}	1532 MeV
Ξ^{*-}	1535 MeV
Ω^-	1672 MeV



Rys. AKW

Najczęstsze kanały rozpadów:

$\Delta \rightarrow N\,\pi$ BR = 99.4%

Ω^-: $\tau = 0.8 \cdot 10^{-10}$ s $c\tau = 2.5$ cm

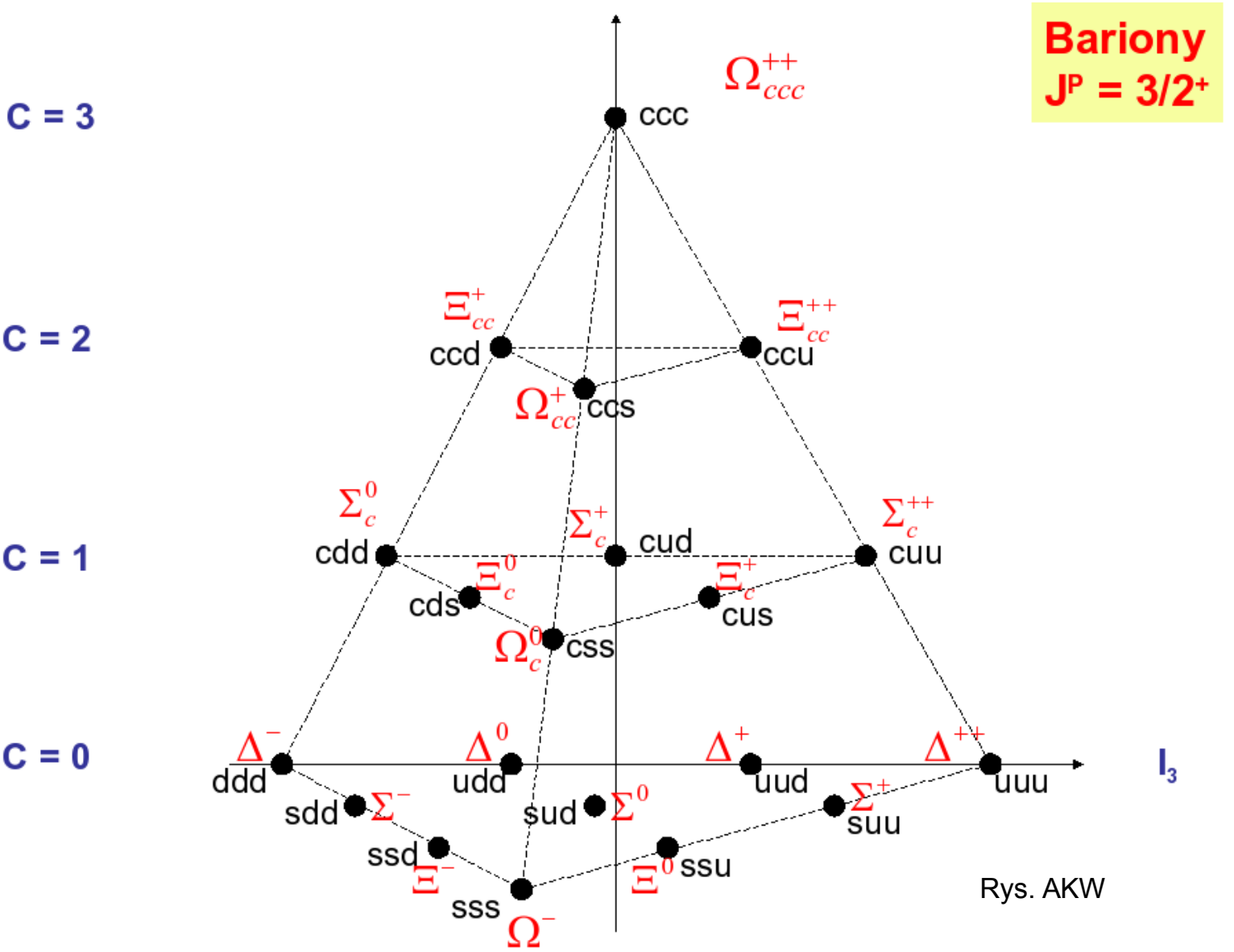
$\Omega^- \rightarrow \Lambda\, K^-$ BR = 67.7%

$\Omega^- \rightarrow \Xi^0\, \pi^-$ BR = 24.3%

$\Omega^- \rightarrow \Xi^-\, \pi^0$ BR = 8.6%

Podane przybliżone masy, czas i BR na podstawie PDG 2024

Dokładamy jeszcze jeden kwark (c)



Rys. AKW

Tablica leptonów

PDG 2024

	e^-	μ^-	τ^-	ν_e	ν_μ	ν_τ
m (masa)	≈ 0.511 MeV	≈ 105.66 MeV	1776.93 ± 0.09 MeV	< 0.8 eV	< 0.19 MeV	< 18.2 MeV
τ	> 6.6 x 10^{28} lat	≈ 2.197 μs	290.3 ± 0.5 fs			
Q (ładunek)	-1	-1	-1	0	0	0
J (spin)	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2
L_e	1	0	0	1	0	0
L_μ	0	1	0	0	1	0
L_τ	0	0	1	0	0	1

odpowiednie antyleptony oznaczane $e^+, \mu^+, \tau^+, \bar{\nu}_e, \bar{\nu}_\mu, \bar{\nu}_\tau$ mają addytywne liczby kwantowe z przeciwnym znakiem np. e^+ ma Q = 1, L_e = -1

Kanały rozpadów mionu i taonu:

$\mu^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\mu$ BR = około 100%

Q neutrina < $4 \cdot 10^{-35}$ e
(PDG 2024)

$\tau^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu \nu_\tau$ BR = około 17.4 %

$\tau^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\tau$ BR = około 17.8 %

$\tau^- \rightarrow \nu_\tau$ *hadrons*

Eksperyment KATRIN w publikacji z 2022 roku podaje ograniczenie:

$m(\text{anti-}\nu_e) < 0.8$ eV 90% CL

Nature Physics 18 (2022) 160-166 [arXiv:2105.08533]

KATRIN – Karlsruhe Tritium Neutrino experiment; spektrometr 23 m x 10 m; zbiera dane od 2019 roku; rozpad beta trytu $T_2 \rightarrow {}^3HeT^+ + e^- + \text{anti-}\nu_e$

Eksperyment KATRIN w publikacji z 2025 roku podaje ograniczenie:

$m(\text{anti-}\nu_e) < 0.45$ eV 90% CL

Science 388 (2025) 180-185 [arXiv:2406.13516]

„KATRIN's huge spectrometer travels through the German town of Eggenstein-Leopoldshafen in 2006 on its way to the Karlsruhe Institute of Technology. (Credit: Karlsruhe Institute of Technology)"

https://physicsworld.com/wp-content/uploads/2022/02/KATRIN-small.jpg

Tablica bozonów pośredniczących (bozony cechowania)

PDG 2024
+ dod. źródła

kwant pola	*grawiton*	*foton (γ)*	*$W^{+/-}$*	*Z*	*gluon (g)*
m (masa)	0 (prawdop.)	0 ($< 10^{-18}$ eV)	$\approx$ 80.4 GeV	$\approx$ 91.2 GeV	0 (teoria)
Q (ładunek el.)	0	0 ($< 10^{-35}$ e)	+/- 1e	0	0
ładunek kol.	nie	nie	nie	nie	tak (kol.+antyk.)
J^P (spin parzystość)	$2^{(+)}$	1^-	$1^{(-)}$	$1^{(+)}$	1^-
czas życia / Γ		stabilny	$\Gamma \approx 2.1$ GeV	$\Gamma \approx 2.5$ GeV	stabilny

Dla cząstek o krótkich czasach życia zamiast τ używamy szerokości Γ

Γ - tzw. naturalne rozmycie energii stanu niestabilnego $\quad \Gamma = \frac{h/2\pi}{\tau}$

Uwaga: bozon Higgsa nie jest bozonem cechowania, nie przenosi siły (oddziaływania)

Związek między czasem życia a szerokością stanu niestabilnego wynika z zasady nieoznaczoności: $\Delta E \, \Delta t \cong \hbar$ $\quad (\hbar = h/2\pi)$

Kanały rozpadów W^+

$W^+ \rightarrow e^+ \nu_e$ $\quad$ BR = 10.71 %

$W^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$ $\quad$ BR = 10.63 %

$W^+ \rightarrow \tau^+ \nu_\tau$ $\quad$ BR = 11.38 %

$W^+ \rightarrow hadrons$ $\quad$ BR = 67.41 %

Wyprodukowane rezonanse W i Z rozpadają się w wyniku oddział. słabych ale z b. krótkimi czasami życia ~$10^{-24/25}$ s

niepewności w PDG

Kanały rozpadów Z^0

$Z^0 \rightarrow e^+ e^-$ $\quad$ BR = 3.3632 %

$Z^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ $\quad$ BR = 3.3662 %

$Z^0 \rightarrow \tau^+ \tau^-$ $\quad$ BR = 3.3696 %

$Z^0 \rightarrow invisible$ $\quad$ BR = 20.000 %

$Z^0 \rightarrow hadrons$ $\quad$ BR = 69.911 %

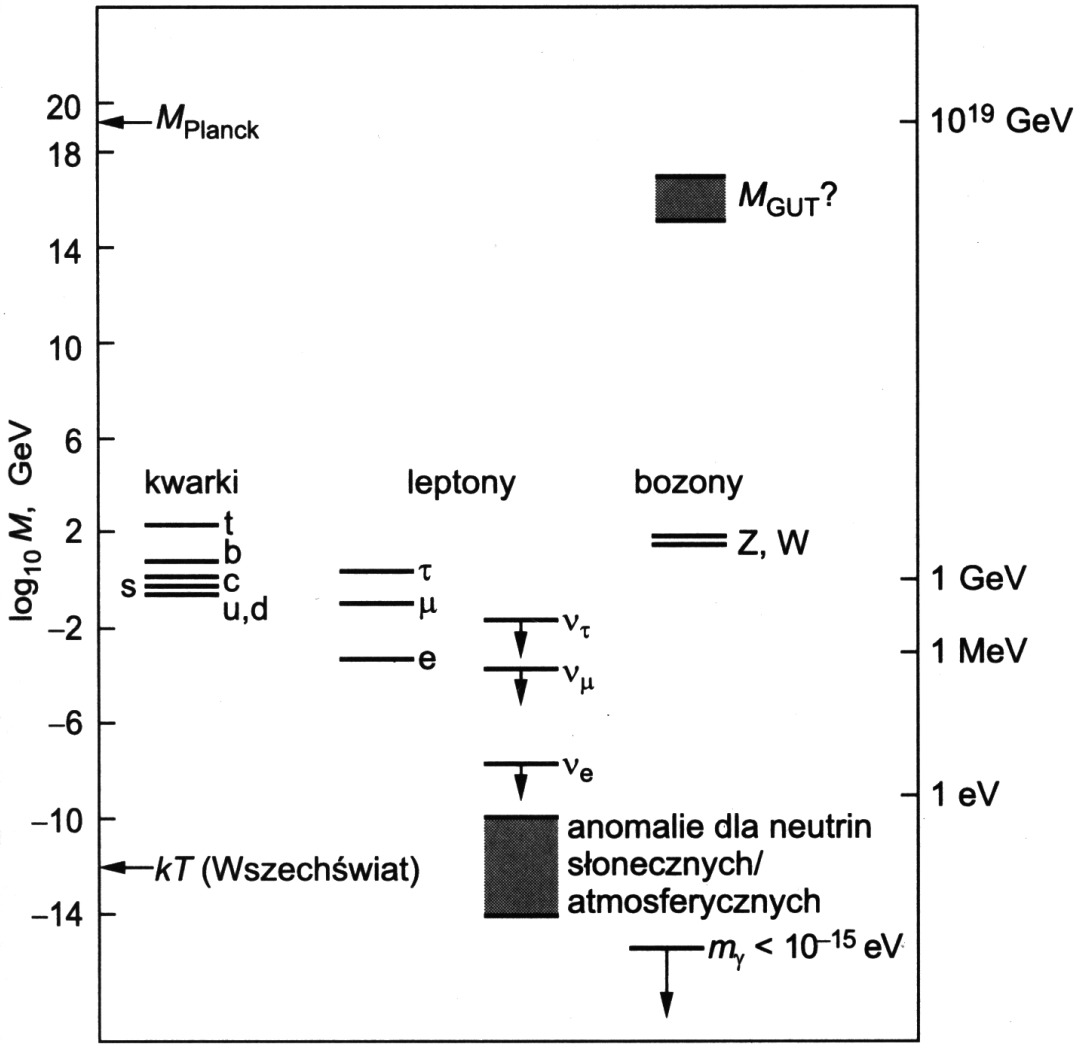
Podsumowanie: **skala mas w fizyce cząstek elementarnych**

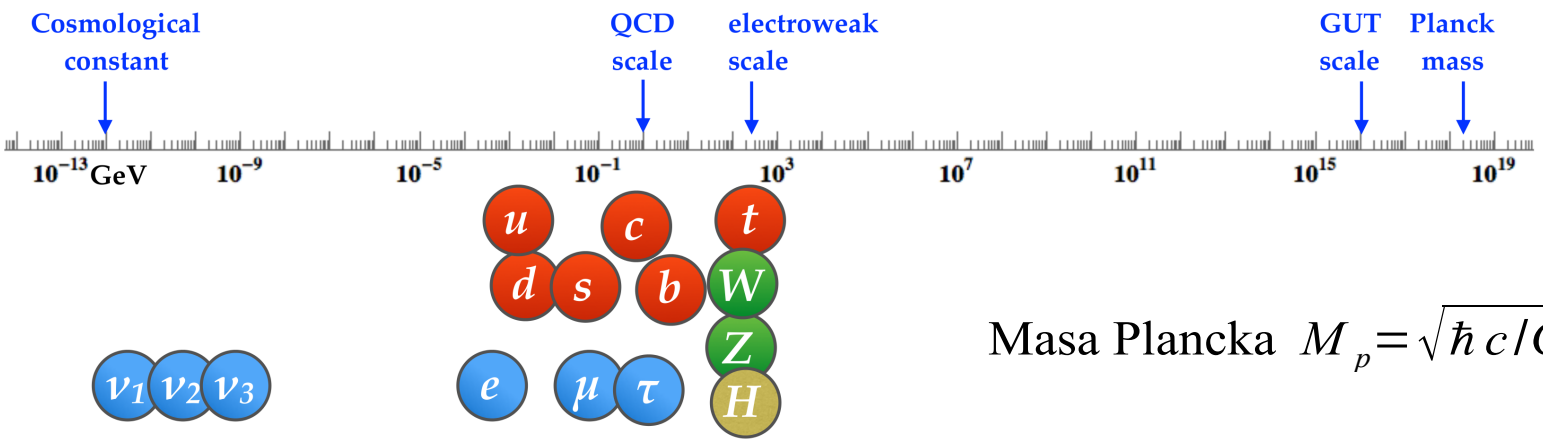
Rys. prawy: D.H. Perkins, 2004;
Rys. dolny: arXiv:1903.05062

Masa neutrin znana tylko jako górne ograniczenie chociaż to że muszą mieć masę (mają różnice mas) zostało już udowodnione

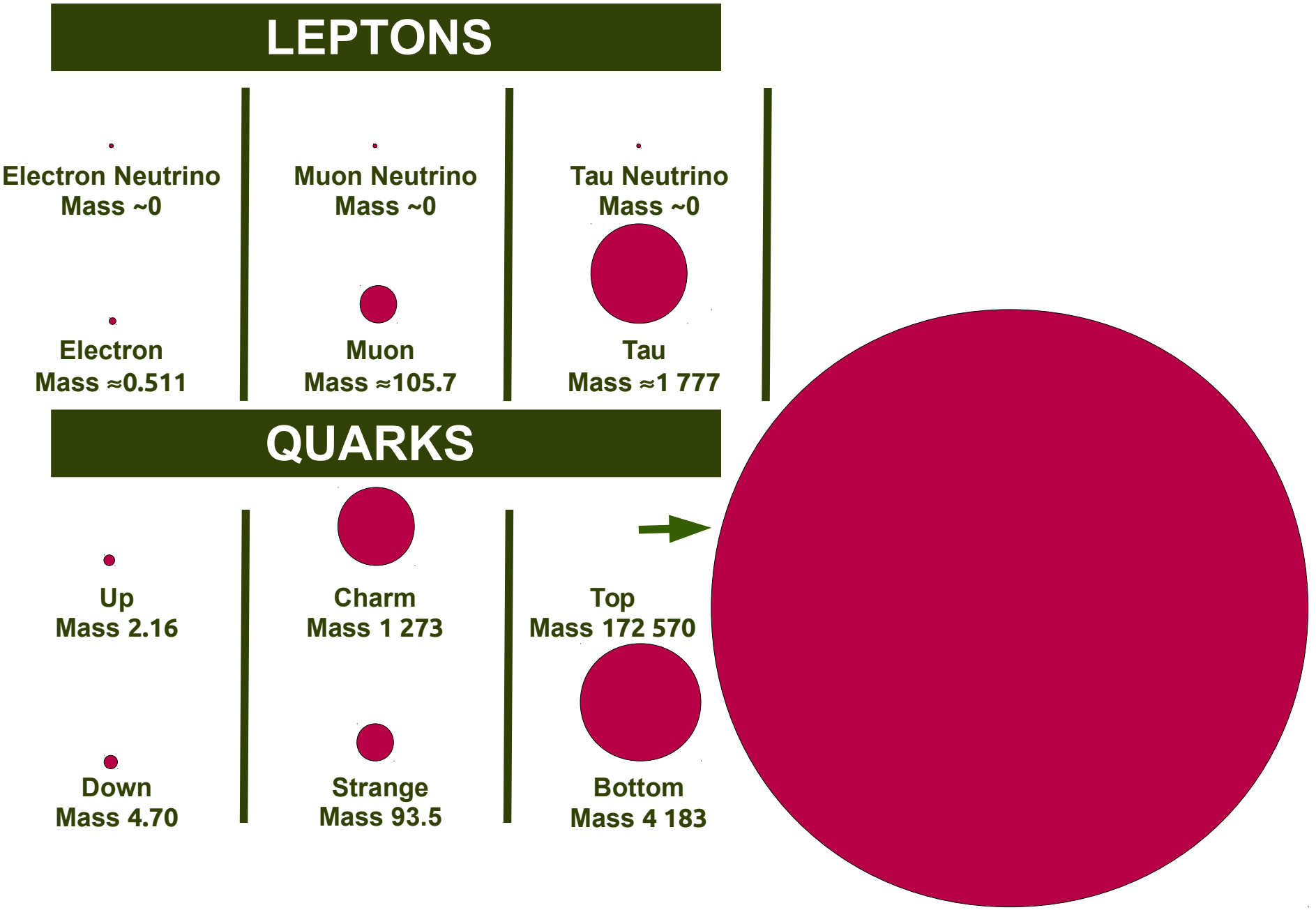
Masa Plancka – przy energiach tego rzędu oddział. grawit. mogą stać się silne

kT około 1 meV, odpowiada promieniowaniu reliktowemu o T=2.7 K





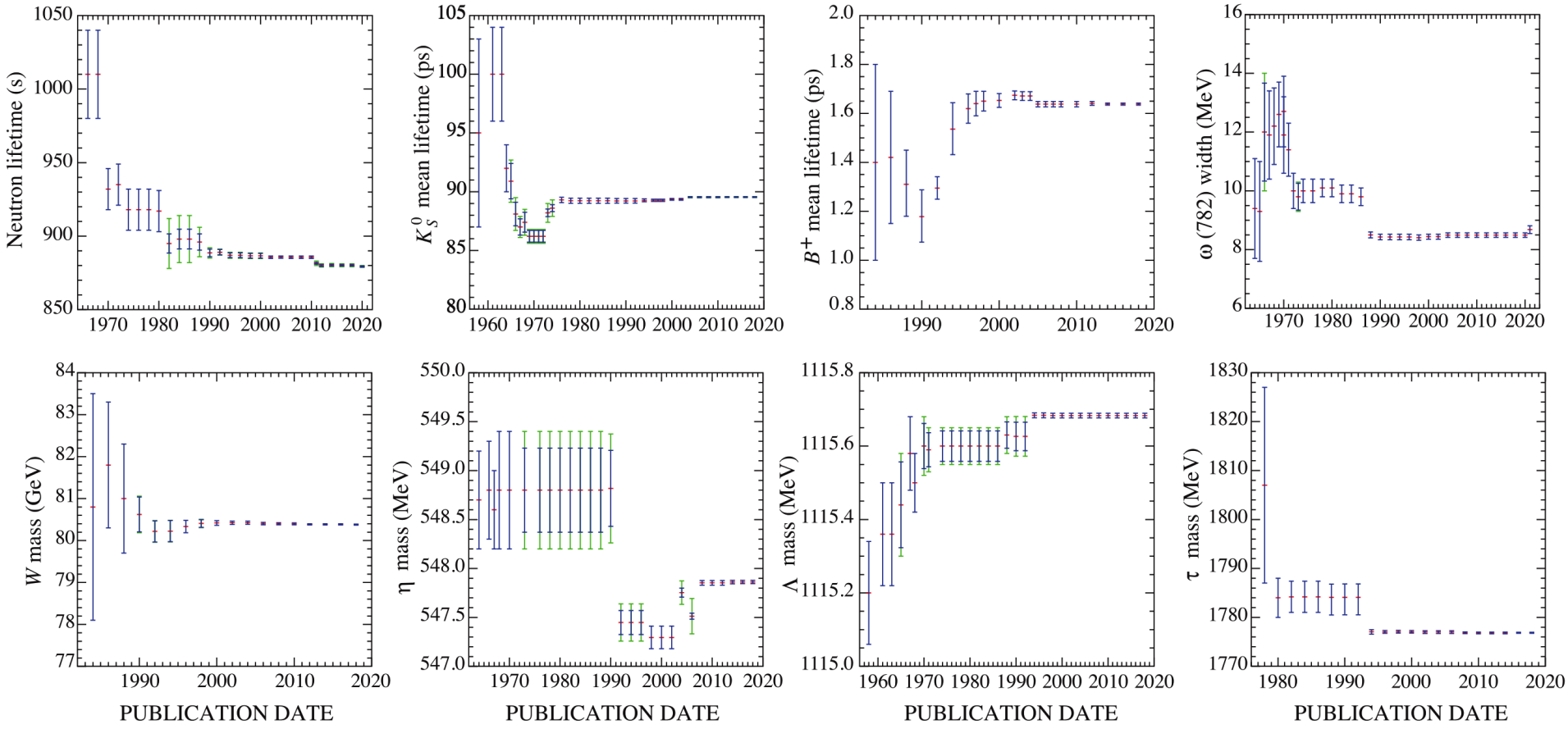
Masa Plancka $M_p = \sqrt{\hbar c / G_N} = 1.22 \cdot 10^{19}\,\mathrm{GeV}$



Masy (w MeV lub MeV/c^2) zgodne z PDG 2024

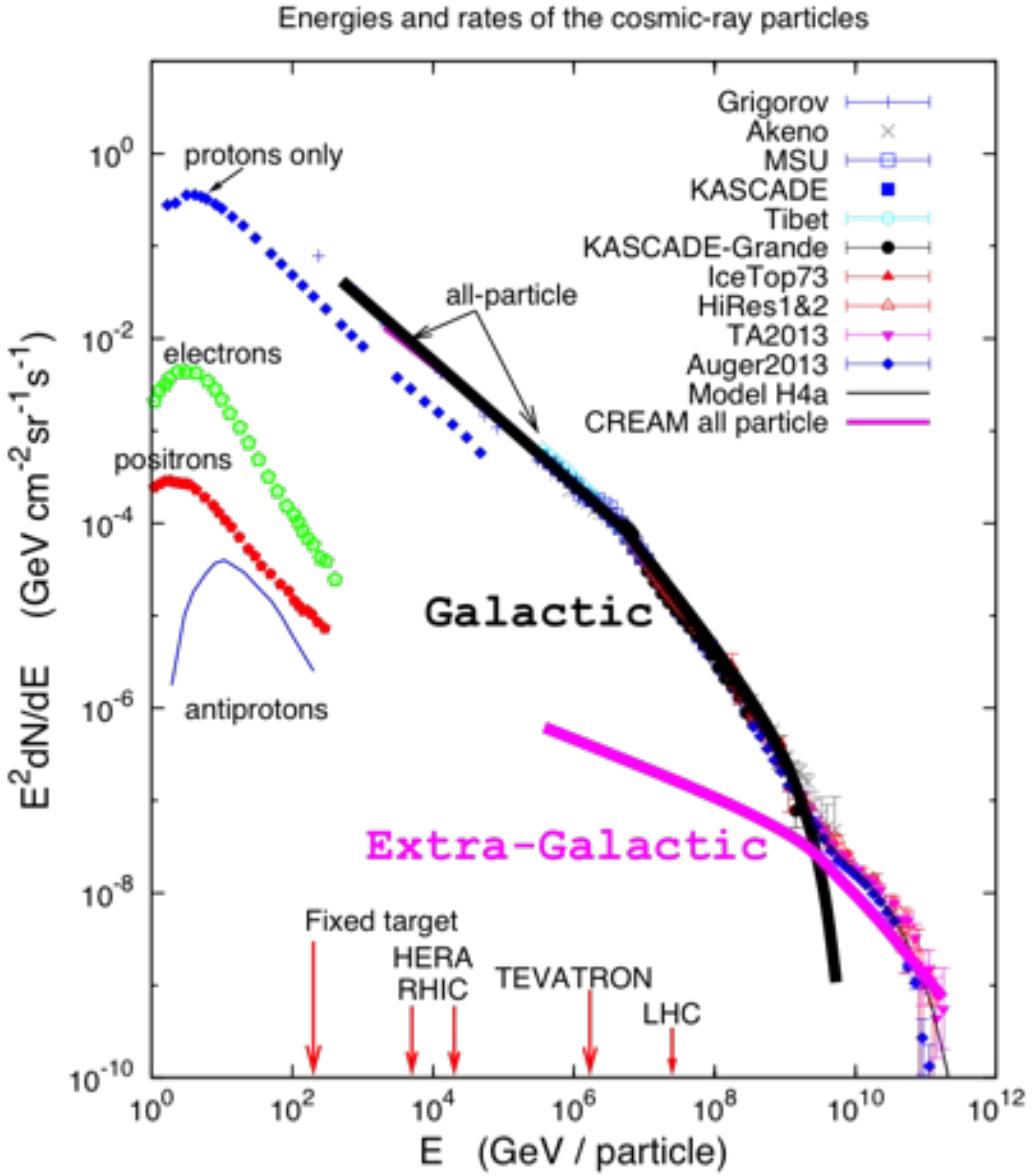
Obecne czasy – etap pomiarów precyzyjnych

Rys. Historyczna perspektywa wartości kilku wybranych własności cząstek pokazywanych w Particle Data Group



PDG 2024

Slajdy dodatkowe
(dla zainteresowanych)



„Cosmic rays include particles such as electrons, protons, and heavier nuclei. Their sources are not yet known, but we expect them to be both galactic and extragalactic. The energy spectrum of cosmic rays, which is how the rate changes with increasing energy, has been measured by many detectors, including IceTop. Extragalactic sources are expected to be more abundant as energy increases and to be the only ones responsible for very high energy cosmic rays."

https://masterclass.icecube.wisc.edu/en/analyses/cosmic-ray-energy-spectrum

Rys. z art. przeglądowych arXiv:1507.01250, 1708.00794
(oryginalnie z CMS Collab., Eur. Phys. J. C 75 (2015) 5, 212)

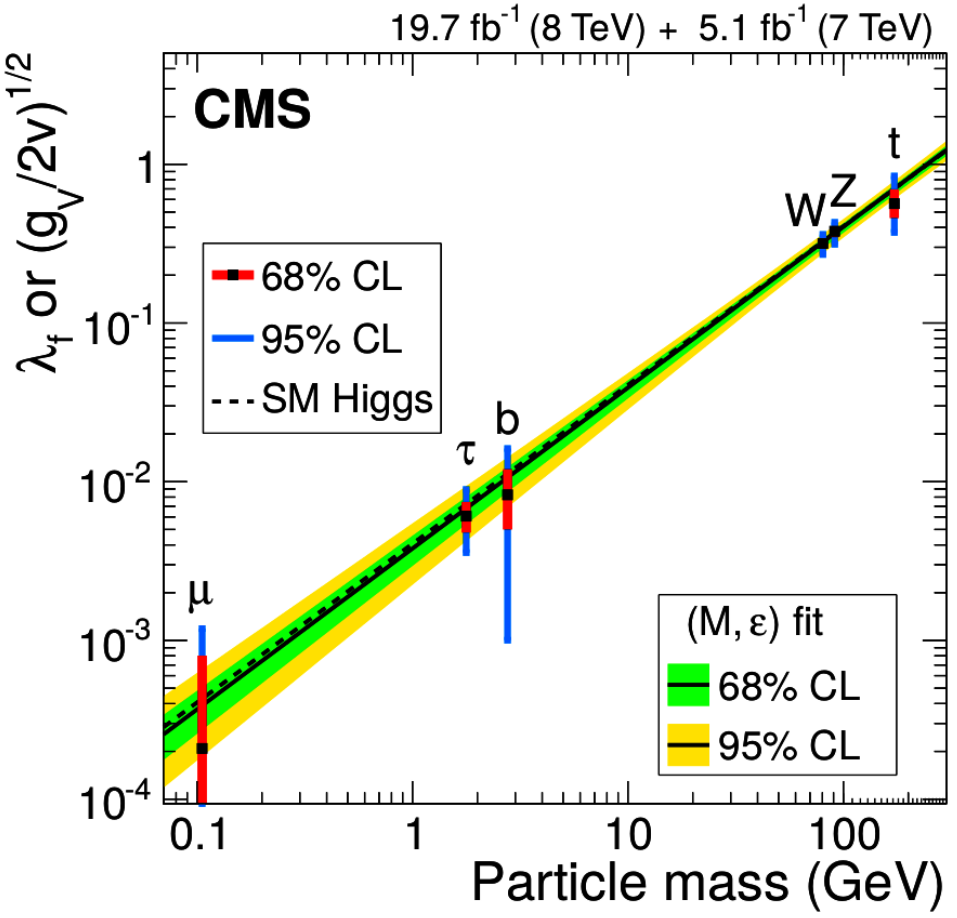
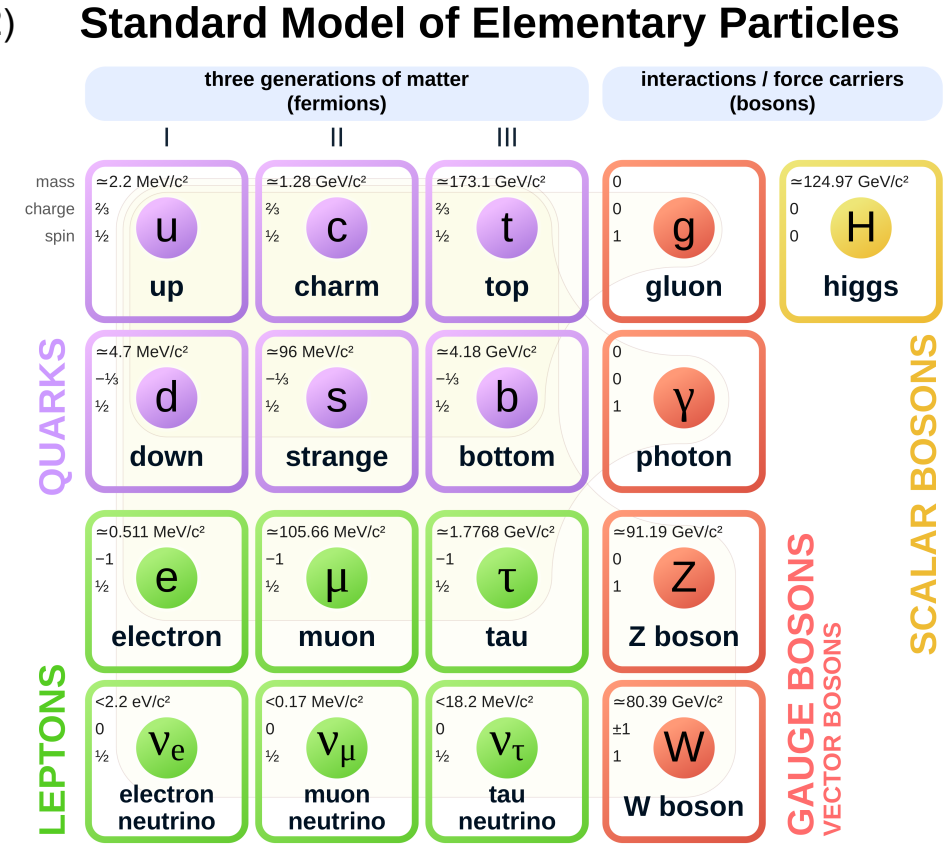


Figure 1: Higgs couplings to different particles [10].

Zob. też ATLAS, Nature 607 (2022) 7917, 52-59, Nature 612 (2022) 7941, E24 (erratum) [arXiv:2207.00092]

Rys. z arXiv:1912.08717



H DECAY MODES		Fraction (Γ_i/Γ)	Confidence level	p (MeV/c)
WW^*	PDG 2024	(25.7 ± 2.5) %		–
ZZ^*		(2.80 ± 0.30) %		–
$\gamma\gamma$		$(2.50 \pm 0.20) \times 10^{-3}$		62600
$b\bar{b}$		(53 ± 8) %		–
e^+e^-		$< 3.0 \times 10^{-4}$	95%	62600
$\mu^+\mu^-$		$(2.6 \pm 1.3) \times 10^{-4}$		62600
$\tau^+\tau^-$		$(6.0\ ^{+0.8}_{-0.7})$ %		62575
$Z\gamma$		$(3.4 \pm 1.1) \times 10^{-3}$		29392
$Z\rho(770)$		< 1.21 %	95%	29384
$Z\phi(1020)$		$< 3.6 \times 10^{-3}$	95%	29378
ZJ/ψ		$< 1.9 \times 10^{-3}$	95%	29267

8.1 "Neutral-flavor" mesons

The naming of mesons is based on their quantum numbers. Although we use names established within the naive quark model, the name does *not* necessarily designate a (predominantly) $q\overline{q}$ state. In other words, the name provides information on the quantum numbers of a given state and not about its dominant component, which might well be $q\overline{q}$ (if allowed) or tetraquark, molecule, etc. In many cases, exotic states will be difficult to distinguish from $q\overline{q}$ states and will likely mix with them, and we make no attempt to, e.g., distinguish those that are "mostly gluonium" from those that are "mostly $q\overline{q}$."

Table 8.1: Symbols for mesons with strangeness and heavy-flavor quantum numbers equal to zero. States that do not yet appear in the RPP are listed in parentheses.

$J^{PC} = \left\{ \right.$	0^{-+}	1^{+-}	1^{--}	0^{++}
	2^{-+}	3^{+-}	2^{--}	1^{++}
	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
Minimal quark content				
$u\bar{d}, u\bar{u} - d\bar{d}, d\bar{u}$ $(I = 1)$	π	b	ρ	a
$d\bar{d} + u\bar{u}$ and/or $s\bar{s}$ $(I = 0)$	η,η'	h,h'	ω,ϕ	f,f'
$c\bar{c}$	η_c	h_c	ψ^*	χ_c
$b\bar{b}$	η_b	h_b	Υ	χ_b
$I = 1$ with $c\bar{c}$	(Π_c)	Z_c	R_c	(W_c)
$I = 1$ with $b\bar{b}$	(Π_b)	Z_b	(R_b)	(W_b)

PDG 2020

*The J/ψ remains the J/ψ.

Table 8.1 shows the names for mesons having strangeness and all heavy-flavor quantum numbers equal to zero. The rows of Table 8.1 give the minimal $q\overline{q}$ content. The columns give the possible parity/charge-conjugation states,

$$PC = -+,\ +-,\ --, \text{ and } ++\ .$$

Kilka(naście) słów o pentakwarkach:

Nagłówki artykułów w lipcu 2003

USA TODAY · TUESDAY, JULY 1, 2003 · 7D

Physics team goes where no quark has gone before

By Dan Vergano
USA TODAY

atoms with high-energy X-rays to make the pentaquarks.
Determining why the penta-

then reviewed data from similar

A glimpse at a possible feature of the early universe.

experiments at the Thomas Jefferson National Accelerator Facility in Newport News, Va., and again

Scientists find fleeting form of basic matter

JOHN MANGELS
Plain Dealer Science Writer

Teams of scientists in Japan and t
States have confirmed the existence of
unknown kind of matter, a strange,
atomic particle that has been th
30-year search.

PARTICLE
FROM A1

Scientists find unknown form of basic matter

Scientists had to duplicate
those conditions in the lab by fir-
ing powerful energy beams into
targets of carbon or hydrogen at-
oms. Even then, it took months
for them to analyze the data, rec-
ognize what they had done, and

Quarks

Five alive!

An odd, new subatomic particle, the "pentaquark", has been found

JAMES JOYCE would have been delighted. Quarks, one of the basic building-blocks of matter, were named in the 1960s after a line from his novel "Finnegans Wake"—three quarks for Muster Mark!—because they were then thought to come in three types (the number is now known to be six). Protons and neutrons, however, do consist of three quarks each. And physicists have now discovered a particle that is made of five quarks—a bit of a promotion for Muster Mark.

The pentaquark, which has been dubbed "theta-plus", was found by a collaboration at the SPring-8 accelerator in Hyogo, Japan, which reports its results in the latest issue of *Physical Review Letters*. The collaborators found the particle in three-year old data, after they were told what to look for by Dmitri Diakonov, a the-

NEW YORK TIMES **INTERNATIONAL** *TUESDAY, JULY 1, 2003*

A Subatomic Discovery Emerges From Experiments in Japan

By KENNETH CHANG

Slamming high-energy particles of light into carbon atoms, physi-

the experiments, Dr. Takashi Nakano, of the Research Center for Nuclear Physics at Osaka Univer-

would consist of two up quarks, two down quarks and one known as an anti-strange quark.

prohibit five-quark particles, but no one had seen any in three decades of searching, so physicists won-

Gdzie pierwotnie odkryto pentakwarki:

1. zespół Takashi Nakano (eksperyment LEPS) przy akceleratorze SPring-8 w pobliżu Kobe (Japonia)

– dane pokazane na konferencji w 2002 roku

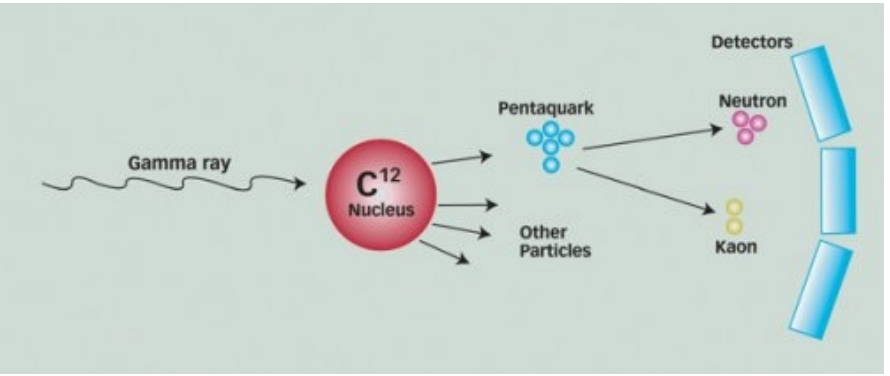
– publikacja 4 VII 2003 w Phys. Rev. Letters

2. zespół Kena Hicksa (eksperyment CLAS) przy akceleratorze CEBAF w Newport News (USA)

3. inne eksperymenty (m.in. NA49)

Jak powstaje przykładowy pentakwark:

- Reakcja: „twarde” kwanty gamma + ^{12}C
- Odłamki niektórych zderzeń to 5-cio kwarkowe obiekty
- Rozpadają się na K^+ oraz neutron
- Maksimum w masie niezmienniczej – nazwane cząstką Θ^+

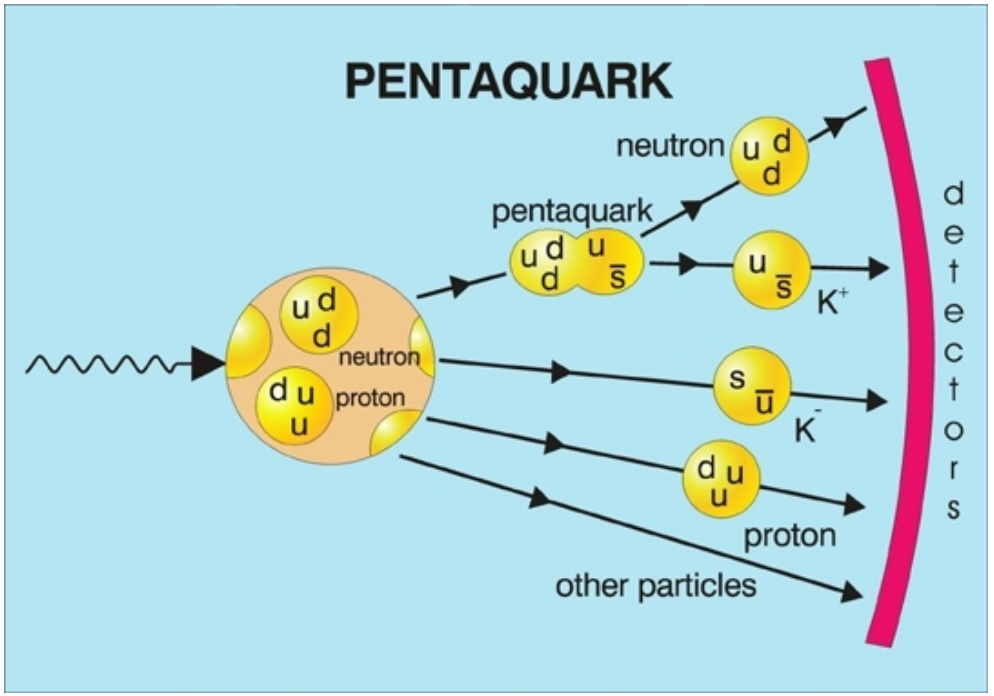


Przypomnienie:

masa niezmienniczna (w układzie c=1)

$$M_{inv} = \sqrt{\left(\Sigma E_i\right)^2 - \left(\Sigma \vec{p}_i\right)^2}$$

Co to są pentakwarki i jak powstają?



'To zupełnie nowa klasa cząstek materii. Nasze odkrycie można porównać do znalezienia w biologii przedstawiciela nieznanego dotąd królestwa zwierząt'

K. Hicks

Zupełnie NOWE stany barionowe gdzie zawartość kwarkowa to 5: (**qqqq anty-q**)

„nie-egzotyczne" pentakwarki – antykwark ma ten sam zapach co jeden z kwarków

„egzotyczne" pentakwarki – antykwark ma inny zapach niż pozostałe 4 kwarki; liczby kwantowe są różne niż dla znanych 3-kwarkowych barionów. Czyli **dla niektórych pentakwarków ich własności (ładunek, l. dziwności) NIE da się odtworzyć żadną kombinacją 3-kwarkową !** Przykład na rysunku (Θ^+ czas życia 10^{-20} s, masa 1.54 GeV) ma skład (uudd anty_s) czyli liczba barionowa B=1/3+1/3+1/3+1/3-1/3=1, dziwność S=0+0+0+0+1=+1. Bariony z S=+1 nie mogą być utworzone z kombinacji (qqq)!!

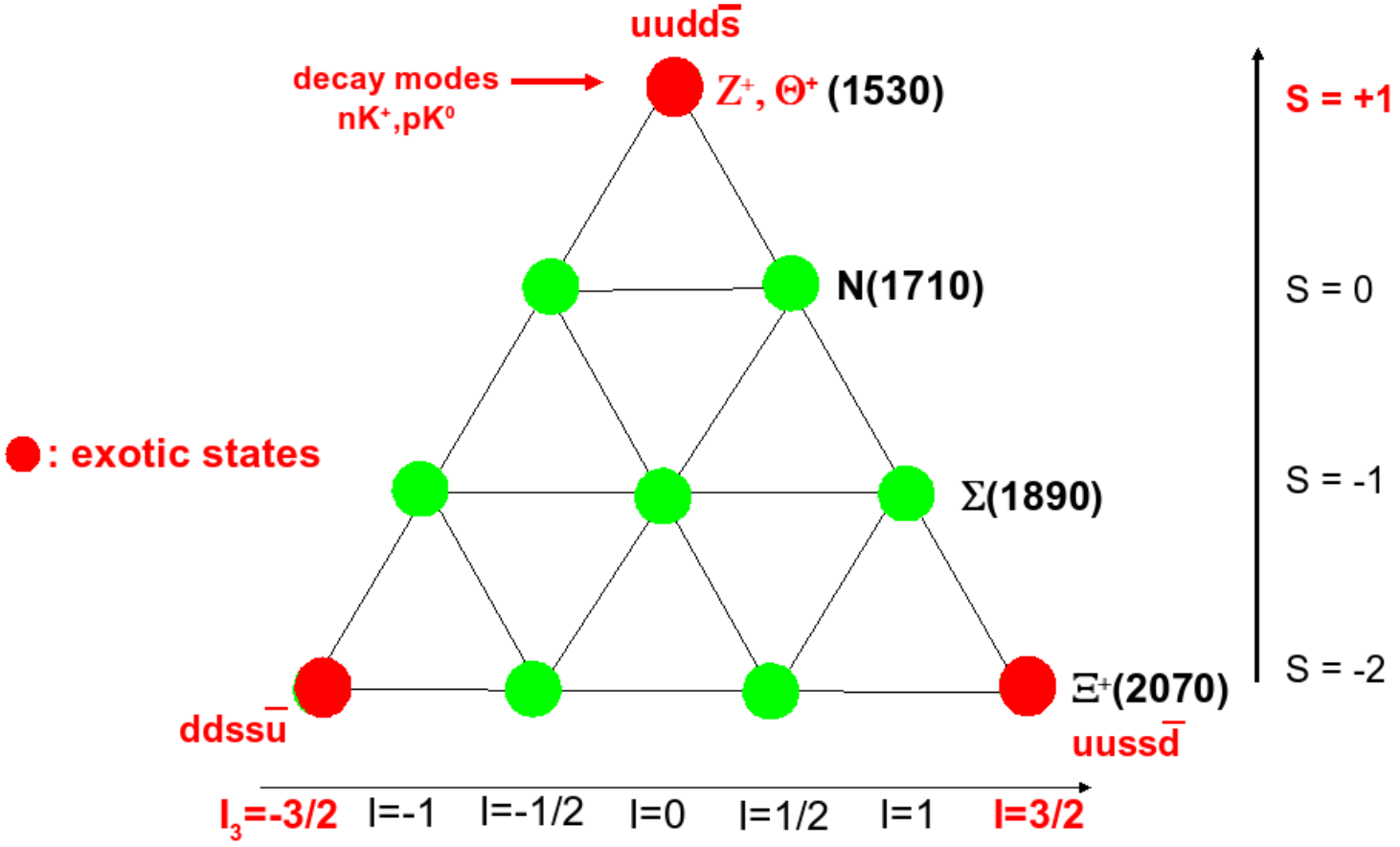
Pentakwarki mogły istnieć zaraz po Wielkim Wybuchu

Przewidywania teoretyczne

- (uud) = (uud + u ubar + d dbar + s sbar + ...) – kwarki walencyjne oraz kwarki morza
- W tym sensie kombinacje 5-cio kwarkowe (qqqq qbar) są wymieszane ze standardową 3 kwarkową (qqq)
- **w ogólności mogłyby istnieć kombinacje więcej niż 5 kwarków...** (nie jest to zabronione przez żadne zasady)
- Czy 5-cio kwarkowa kombinacja może istnieć jeśli antykwark ma inny zapach (nie może anihilować) np. (uudd sbar)? Prace teoretyczne od późnych lat 70-tych
- M. Chemtob, Nucl. Phys. 256, 600 (1985) – na podstawie chiralnego modelu solitonowego przewidział istnienie anty-dekupletu barionów
- M. Praszałowicz, World Scientific (1987), 112 – oszacował masę (najlżejsza cząstka) jako 1.530 GeV/c^2
- D. Diakonov et al., Z. Phys. A 359, 305 (1997) – szerokość $\Theta^+ < 0.015$ GeV/c^2, przewidywania dotyczące cięższych członków anty-dekupletu

Anty-dekuplet barionów ($J^P=1/2^+$)

przewidywania w "chiral soliton model" Diakonov, Petrov, Polyakov, Z. Physics A359, 305 (1997)



Egzotyczne bariony (pozostałe da się odtworzyć używając kombinacji 3-kwarkowych)

od góry: singlet izospinowy (Y=2, S=1), dublet (Y=1, S=0), tryplet (Y=0, S=-1), kwartet (Y=-1, S=-2)

M_N= 1710 MeV/c^2 (input) znany rezonans nukleonowy (input) pozwolił w modelu na przewidywania mas i szerokości pozostałych członków anty-dekupletu barionów

Zaproponowane (w pracach teoretycznych) reakcje

Gdzie szukać cząstki Θ^+ (dawna nazwa to Z^+)?

1. Rozpraszanie K^0 p lub K^+ n (problemy z energią wiązek)

2. nukleon + nukleon

$p\ n \rightarrow \Lambda\ Z^+ \rightarrow \Lambda\ K^+\ n$ lub $\Lambda\ K^0\ p$, $p_{lab} > 2.60$ GeV/c

$p\ p \rightarrow \Sigma^+\ Z^+ \rightarrow \Sigma^+\ K^+$ lub $\Sigma^+\ K^0\ p$, $p_{lab} > 2.8$ GeV/c

3. foton + nukleon

$\gamma\ p \rightarrow \text{anty-}K^0\ Z^+ \rightarrow \text{anty-}K^0\ K^+\ n$ lub $\text{anty-}K^0\ K^0\ p$, $p_{lab} > 1.7$ GeV/c

$\gamma\ n \rightarrow K^-\ Z^+ \rightarrow K^-\ K^+\ n$ lub $K^-\ K^0\ p$, $p_{lab} > 1.7$ GeV/c

4. pion + nukleon

$\pi^-\ p \rightarrow K^-\ Z^+ \rightarrow K^-\ K^+\ n$ lub $K^-\ K^0\ p$, $p_{lab} > 1.7$ GeV/c

$\pi^+\ n \rightarrow \text{anty-}K^0\ Z^+ \rightarrow \text{anty-}K^0\ K^+\ n$ lub $\text{anty-}K^0\ K^0\ p$, $p_{lab} > 1.7$ GeV/c

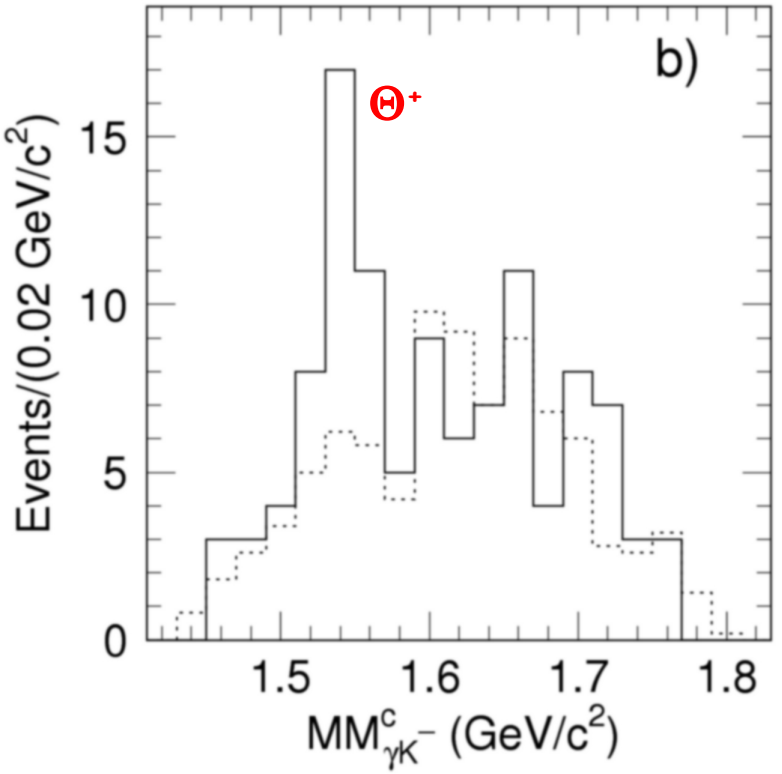
Eksperymenty, które donosiły o odkryciu pentakwarków:

1. LEPS przy akceleratorze SPring-8 w Japonii
2. CLAS przy akceleratorze CEBAF w USA
3. DIANA przy akceleratorze ITEP w Rosji
4. SAPHIR przy akceleratorze ELSA w Niemczech
5. NA49 przy akceleratorze SPS w Szwajcarii ...

Eksperyment LEPS przy akceleratorze SPring-8 (Japonia)

$$\gamma\, n \rightarrow K^- \Theta^+ \rightarrow K^- K^+ n$$

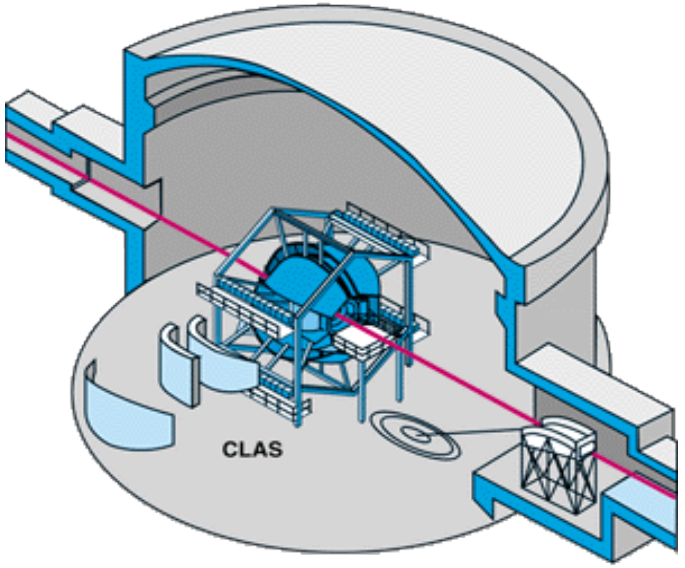
- Poprawiony rozkład brakującej masy (kreskowane – tło)
- Sygnał - tło = 19 przypadków, sygnał na poziomie 4.6 σ
- Widmo w obszarze 1.47 – 1.61 GeV/c^2 porównane z symulacjami MC (+ Breit-Wigner) daje masę: 1.54 $\pm$ 0.01 GeV/c^2
- Szerokość (Γ) mniejsza niż 25 MeV/c^2



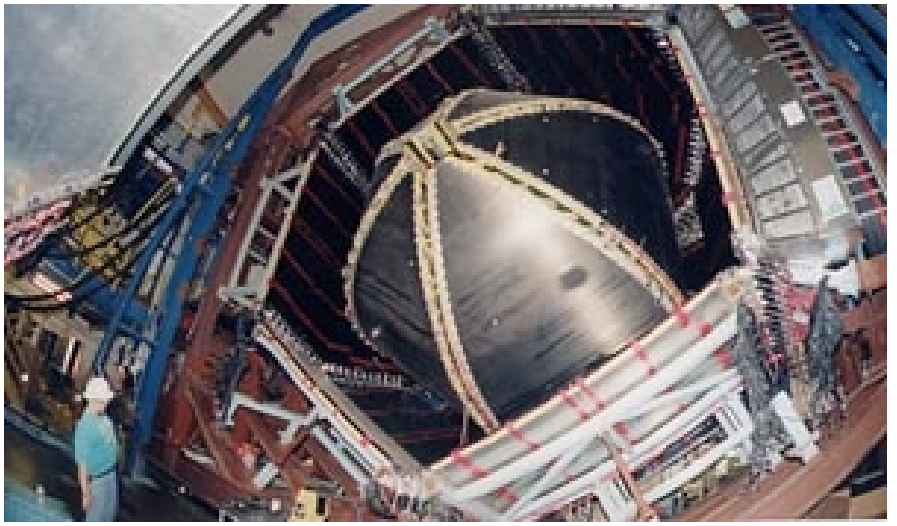
Statistical significance
w okolicy maksimum:
Poziom tła = 17
Sygnał = Liczba przypadków powyżej tła = 19
(czyli całość - tło)
Gaussian significance = 19/$\sqrt{17}$ = 4.6

Eksperyment CLAS przy akceleratorze CEBAF w

Jefferson Lab (USA)



- Wiązka fotonów → elektrony z CEBAF zderzane z tarczą, promieniowanie hamowania
- Przepływ fotonów 4 x 10^6 /s
- Identyfikacja: pęd i ładunek w komorach dryfowych + TOF



CLAS – 2 sposoby na pentakwarki:

Fotoprodukcja na deuterze

$\gamma\, d \rightarrow p\, K^- K^+ n$

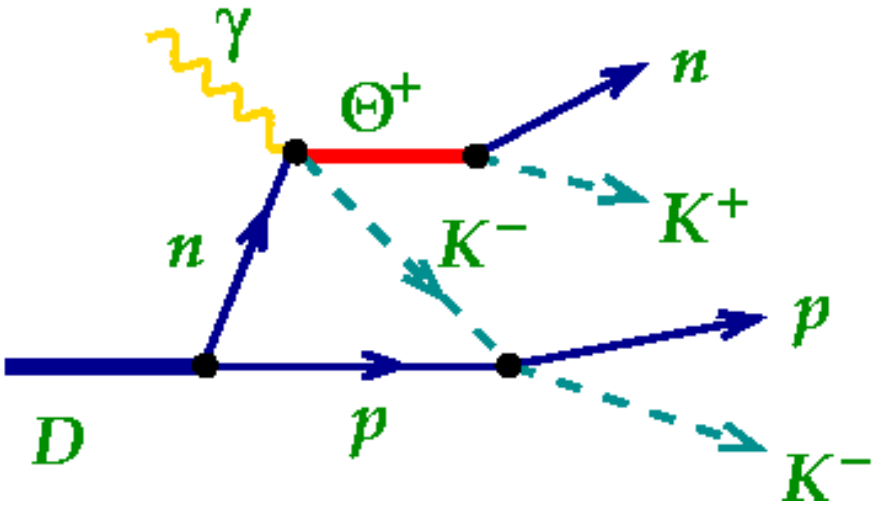
Mechanizm podobny do LEPS

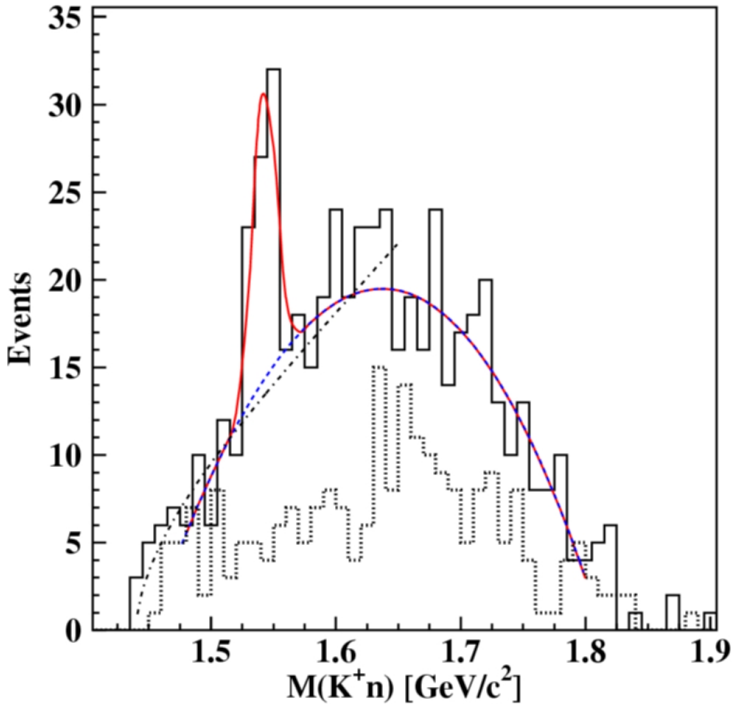
Fotoprodukcja na protonach

Tarcza z ciekłego wodoru

$\gamma\, p \rightarrow \pi^+ K^- K^+ n$

CLAS: $\gamma\, d \rightarrow p\, K^-\, \Theta^+ \rightarrow p\, K^-\, K^+\, n$





- Pomiar: widmo układu cząstek K^+ n
- Rekonstrukcja neutronu – z brakującej energii i pędu

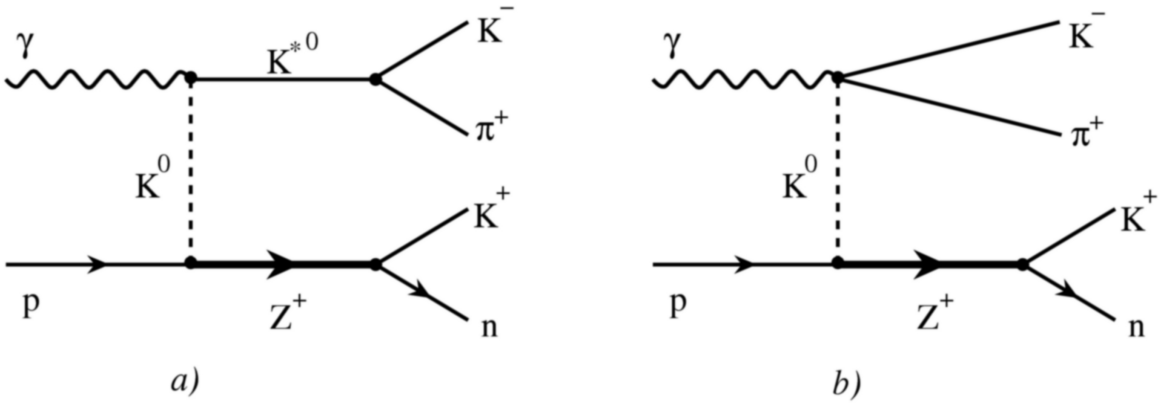
- Kreskowane tło – przypadki wyrzucone cięciem na $\Lambda^*(1520)$
- Maksimum w pobliżu 1.543 GeV/c^2
- Szerokość FWHM = 22 MeV/c^2 (zgodna z rozdzielczością CLAS)
- Sygnał na poziomie 5.4σ
- Sygnał pozostaje po zmianie cięć

Przypomnienie:

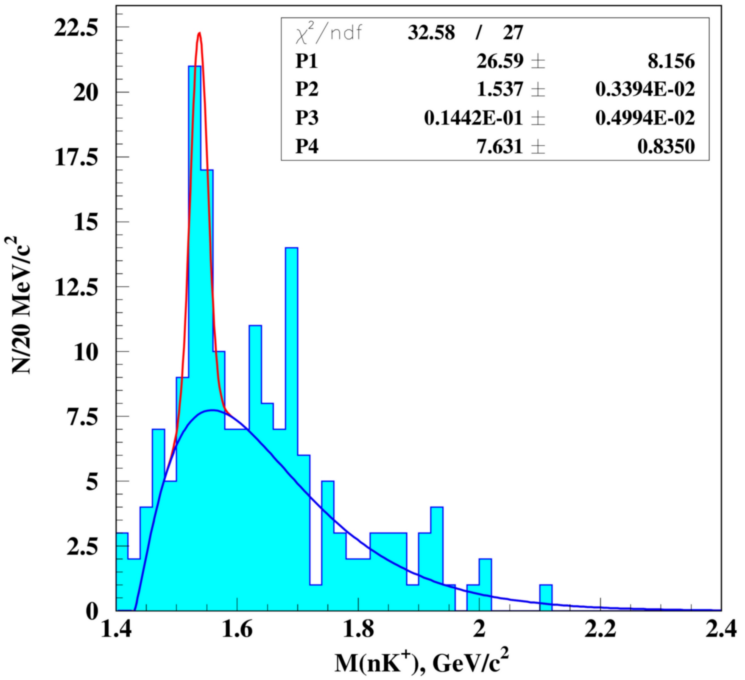
masa niezmienniczna (w układzie c=1)

$$M_{inv} = \sqrt{\left(\Sigma E_i\right)^2 - \left(\Sigma \vec{p}_i\right)^2}$$

CLAS: $\gamma p \rightarrow \pi^+ K^- \Theta^+ \rightarrow \pi^+ K^- K^+ n$



- Wiązka fotonów o energiach 3–5.25 GeV
- Pomiar: widmo układu cząstek $K^+ n$
- Rekonstrukcja neutronu z brakującej energii i pędu

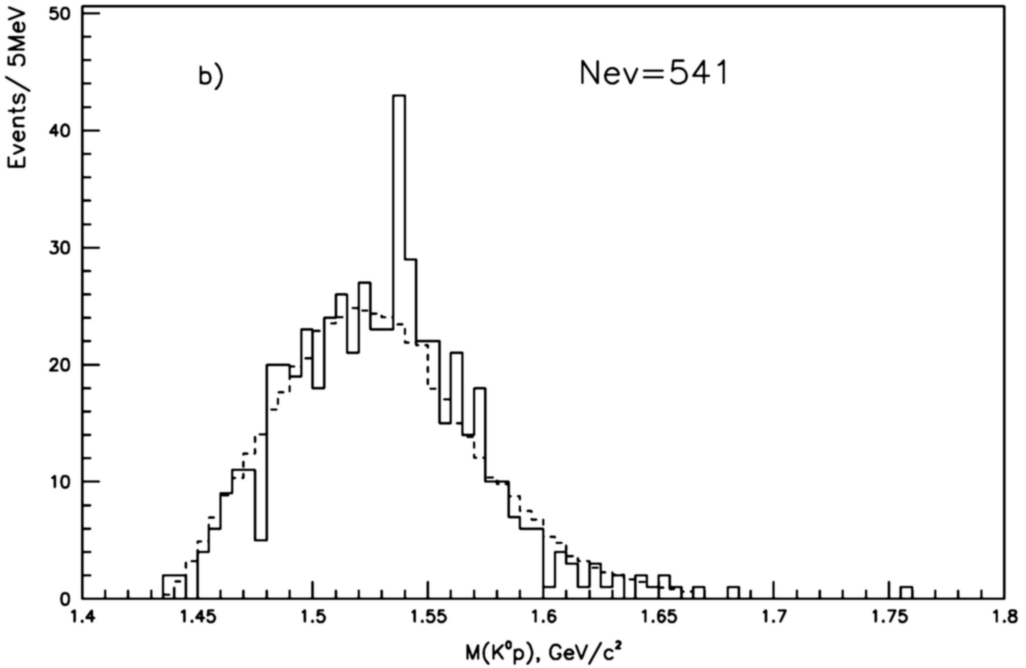


- Masa: 1.54 ± 0.01 GeV/c^2
- Szerokość FWHM = 32 MeV/c^2
- Sygnał na poziomie $4.8 \pm 0.4\ \sigma$

Eksperyment DIANA przy synchrotronie protonowym w ITEP (Rosja)

$$K^+ n(Xe) \rightarrow \Theta^+ (Xe') \rightarrow K^0 p\ (Xe')$$

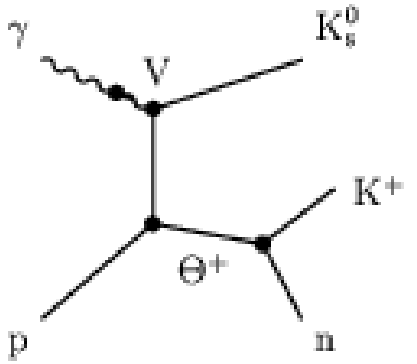
- Dane z komory pęcherzykowej (wymiary 70 x 70 x 140 cm^3 wypełnienie: ciekły Xe, monitorowana przez kamery fotograficzne; brak pola magnetycznego; identyfikacja cząstek – straty jonizacyjne, pęd cząstek – zasięg w Xe)
- $K^+ n \rightarrow K^0 p$, gdzie n jest związany a jądrze Xe
- Badane widmo masy układu $K^0 p$
- Reakcja nisko-energetyczna (wiązka K^+ o pędzie 850 MeV/c z synchrotronu)



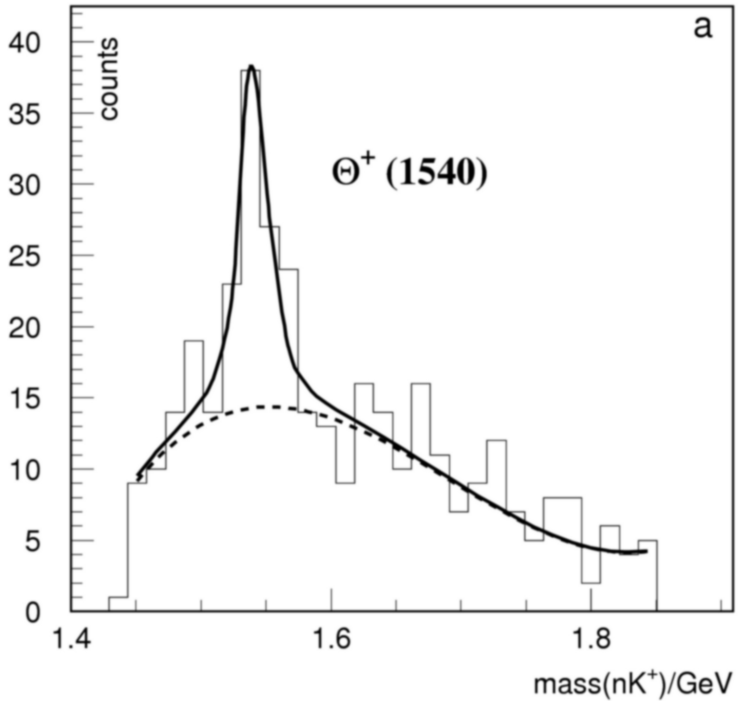
- Masa: 1.539 ± 0.002 GeV/c^2
- Szerokość $\Gamma \leqslant 9$ MeV/c^2
- Sygnał na poziomie 4.4σ

Eksperyment SAPHIR przy akceleratorze ELSA (Niemcy)

$$\gamma\, p \rightarrow \Theta^{+}\ K^{0}_{s} \rightarrow n\, K^{+}\ \pi^{+}\pi^{-}$$



- Spektrometr magnetyczny
- Wiązka elektronów z akceleratora ELSA (w analizie o energii 2.8 GeV); wiązka fotonów – promieniowanie hamowania na miedzianej foli
- Tarcza z ciekłego wodoru w środku centralnej komory dryfowej
- Pomiar pędu i ładunku – pole magnetyczne; ściany scyntylatorów TOF



- Ciągła linia – dopasowanie używając funkcji Breit-Wigner'a + symulacji Monte Carlo
- Masa: $1.540 \pm 0.004 \pm 0.002$ GeV/c^2
- Szerokość $\Gamma < 25$ MeV/c^2
- Sygnał na poziomie 4.8σ

Podsumowanie wyników dla cząstki Θ^+

Rezonans barionowy o składzie kwarkowym (uudd sbar), najlżejszy członek anty-dekupletu barionów I = 0 (izoskalar), S = +1

Stan na rok 2014

TABLE I. Experiments with positive signals for the Θ^+.

Group	Reaction	Mode	Signals	Mass (MeV)	Width (MeV)	Significance	Reference
LEPS	$\gamma C \to K^+K^-X$	K^+n	19	1540	< 25	4.6σ	[11]
LEPS	$\gamma d \to K^+K^-np$	K^+n	116	1524	12.7	5.1σ	[59]
DIANA	$K^+Xe \to K^0pXe'$	K^0p	29	1539	< 9	4.4σ	[48]
DIANA	$K^+Xe \to K^0_Spx$	K^0_Sp	85	1538	0.36	6.3σ	[60–62]
CLAS	$\gamma p- > \pi^+K^+K^-n$	K^+n	41	1555	< 26	7.8σ	[68]
SVD	$pA \to pK^0_SX$	K^0_Sp	50	1526	< 24	5.6σ	[49]
SVD	$pA \to pK^0_SX$	K^0_Sp	118, 187	1522, 1523.6	< 14	$9.2, 6.0\sigma$	[63]
HERMES	$\gamma d \to pK^0_SX$	K^0_Sp	52-74	1528	17	$4.2\text{-}6.3\sigma$	[50]
SAPHIR	$\gamma p \to nK^+K^0_S$	K^+n	55	1540	< 25	4.8σ	[51]
ITEP	$\nu_\mu(\bar\nu_\mu)A \to K^0_SpX$	K^0_Sp	32	1532.2	< 12	7.1σ	[52, 53]
ZEUS	$e^\pm p \to e^\pm p(\bar p)K^0_SX$	K^0_Sp	221	1521.5	8	$3.9\text{-}4.6\sigma$	[54]
JINR	$np \to npK^+K^-$	K^+n	27	1541	8	6.8σ	[55]
JINR	$pC_3H_8 \to pK^0_SX$	K^0_Sp	88	1540	9.2	5.5σ	[56]
E522	$\pi^-p \to K^-X$	–	183	1530	9.8	2.7σ	[57]
OBELIX	$\bar pHe \to pK^0_SX$	K^0_Sp	46, 59	1560.0	narrow	2.7σ	[58]

Int. J. Mod. Phys. A29 (2014) no.13, 1430020 (2014) [arXiv:1403.4455]

ale z drugiej strony: ...

długa lista eksperymentów które cząstki cząstki Θ^+ nie zaobserwowały

Stan na rok 2014

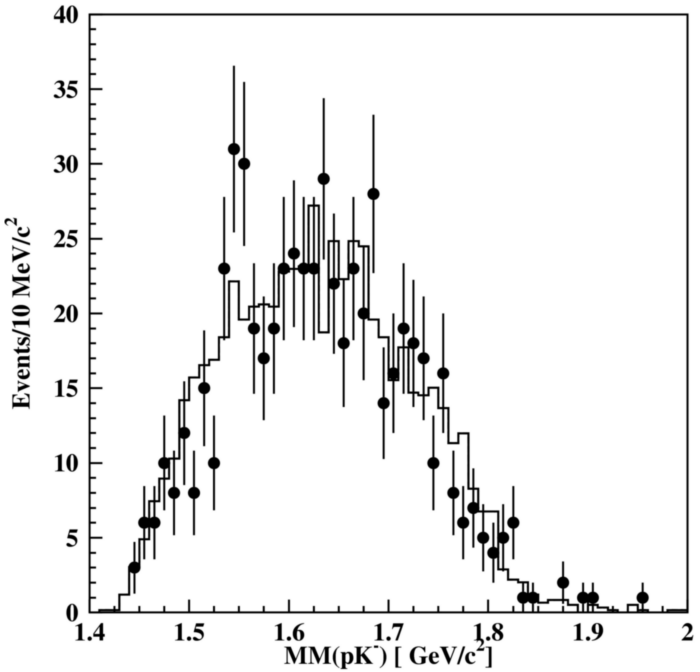
TABLE II. Experiments with negative results for the Θ^+.

Group	Reaction	Mode	Upper limit	Confidence	Reference
CLAS	$\gamma d \to pK^-K^+n$	K^+n	$\sigma < 0.3$ nb	95%	[64, 66]
	$\gamma d \to \Lambda K^+n$	K^+n	$\sigma < 5$ nb	95%	[71]
	$\gamma p \to \overline{K}^0K^+n$	K^+n	$\sigma < 0.8$ nb	95%	
			$N(\Theta^+)/N(\Lambda(1520)) < 0.22\%$	95%	[69, 70]
	$\gamma p \to \overline{K}^0K^0p$	K^0_Sp	$\sigma < 1.5$ nb	95%	
COSY-TOF	$pp \to \Sigma^+K^0p$	K^0_Sp	$\sigma < 0.15$ μb	95%	[65, 67]
FOCUS	γBeO $\to pK^0_SX$	K^0_Sp	$\sigma(\Theta^+)\mathcal{B}(pK^0_S)/\sigma(K(892)^+) < 0.13\%$	95%	
			$\sigma(\Theta^+)\mathcal{B}(pK^0_S)/\sigma(\Sigma(1385)^\pm) < 2.3\%$	95%	[72]
NOMAD	$\nu_\mu A \to K^0_SpX$	K^0_Sp	$N(\Theta^+)/N_{\rm events} < 2.13 \times 10^{-3}$	90%	[73]
BES	$\psi(2S), J/\psi$ decays	K^+n, K^0_Sp	see Eq.(2)	90%	[74]
BaBar	$e^+e^- \to \Upsilon(4S) \to pK^0_SX$	K^0_Sp	$N(\Theta^+)/N_{\rm events} < 1.8 \times 10^{-4}$	95%	
	$e^+e^- \to q\bar{q} \to pK^0_SX$	K^0_Sp	$N(\Theta^+)/N_{\rm events} < 5.0 \times 10^{-5}$	95%	[75]
	$B^0 \to p\bar{p}K^0_S$	K^0_Sp	$\mathcal{B}(\Theta^+) \cdot \mathcal{B}(pK^0_S) < 0.5 \times 10^{-7}$	95%	[77]
Belle	$B^0 \to p\bar{p}K^0_S$	K^0_Sp	$\mathcal{B}(\Theta^+) \cdot \mathcal{B}(pK^0_S) < 2.3 \times 10^{-7}$	90%	[76]
	$KN \to pK^0_SX$	K^0_Sp	$N(\Theta^+)/N(\Lambda(1520)) < 2.5\%$	90%	
	$K^+n \to pK^0_S$	K^0_Sp	$\Gamma < 0.64$ MeV	90%	[93]
ALEPH	$Z \to pK^0_SX$	K^0_Sp	$N(\Theta^+)/N_{\rm events} < 2.5 \times 10^{-3}$	95%	[78]
DELPHI	$Z \to pK^0_SX$	K^0_Sp	$N(\Theta^+)/N_{\rm events} < 2.0 \times 10^{-3}$	95%	[79]
L3	$\gamma\gamma \to p(\bar{p})K^0_SX$	K^0_Sp	$N(\Theta^+)/N_{\rm events} < 4.7 \times 10^{-3}$	95%	[80]
H1	$ep \to ep(\bar{p})K^0_S$	K^0_Sp	$\sigma < 120 - 360$ pb	95%	[81]
COSY-Jülich	$pp \to pK^0\pi^+\Lambda$	K^0p	$\sigma < 58$ nb	95%	[82]
NA49	$pp \to pK^0_SX$	K^0_Sp	not observed	–	[83]
CDF	$p\bar{p} \to pK^0_SX$	K^0_Sp	$N(\Theta^+) < 89,76$	90%	[84]
HERA-B	pC $\to pK^0_SX$	K^0_Sp	$N(\Theta^+)/N(\Lambda(1520)) < 2.7\%$	95%	[85]
SPHINX	$pN \to nK^+K^0_SN$	K^+n	$\sigma < 26$ nb	90%	
	$pN \to pK^0_SK^0_LN$	K^0_Sp	$\sigma < 42$ nb	90%	
	$pN \to pK^0_LK^0_SN$	K^0_Lp	$\sigma < 39$ nb	90%	
	$pN \to pK^0_SK^0_SN$	K^0_Sp	$\sigma < 52$ nb	90%	[86]
PHENIX	dAu $\to K^-\bar{n}X$	$K^-\bar{n}$	not observed	–	[87]
HyperCP	$p(\pi^+, K^+)$Cu $\to p(\bar{p})K^0_SX$	K^0_Sp	$N(\Theta^+)/N_{\rm events} < 0.3\%$	90%	[88]
LASS	$K^+p \to K^+n\pi^+$	K^+n	no narrow resonance	–	[90]
WA89	Σ^-C(Cu) $\to pK^0_S$	K^0_Sp	$\sigma < 7.2$ μb	99%	[89]
E559	$K^+p \to \pi^+X$	–	$d\sigma/d\Omega < 3.5$ μb/sr	90%	[91]
J-PARC	$\pi^-p \to K^-X$	–	$d\sigma/d\Omega < 0.26$ μb/sr	90%	[92]

Int. J. Mod. Phys. A29 (2014) no.13, 1430020 (2014) [arXiv:1403.4455]

Stan na 2007/08 rok, eksperymenty, które odwołują swoje wcześniejsze (2003 w górę) „odkrycia”: CLAS, COSY-TOF (niedoszacowanie tła), NOMAD, ...

Przyczyny problemu:
1. „psychological bias”
2. arbitrarnie wybierane cięcia kinematyczne i na przypadki; sygnał widziany tylko w niektórych przedziałach pędu a w innych nie
3. Poziom sygnału zawyżony ze względu na niedokładną znajomość kształtu tła
4. Przewidywania teoretyczne: przekrój czynny na produkcje Θ^+ może być tłumiony przy wysokich energiach i specyficznych procesach (np. anihilacja elektron+pozyton)



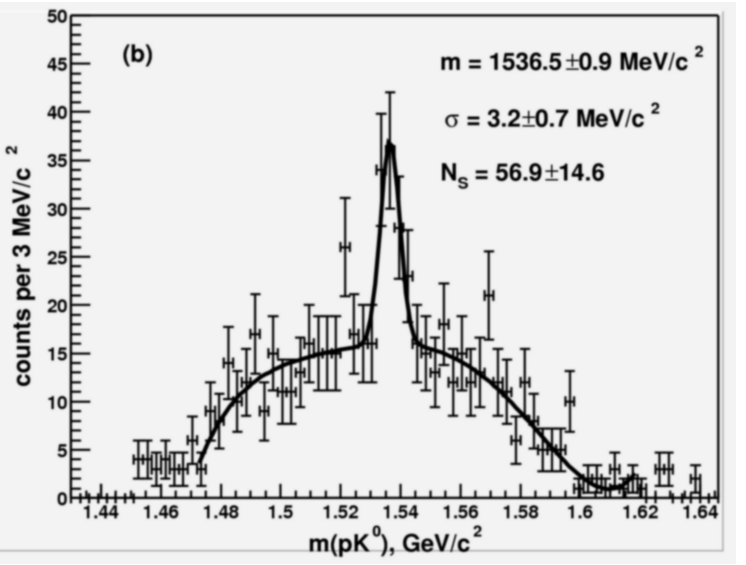
Rys. arXiv:0704.3531v2
poprzednie (punkty) i obecne (histogram) wyniki CLAS

LEPS – po ponownych analizach nie tylko nie odwołał ale ale zwiększył znaczenie piku!
(arXiv:0812.1035)

DIANA – również potwierdza wcześniejsze wyniki

SVD-2 – najsilniejszy sygnał!

Jedynie eksperymenty z dużą statystyką mogą potwierdzić / zaprzeczyć odkryciu pentakwarków



Rys. arXiv:0704.3531v2
nowsze wyniki z eks. DIANA

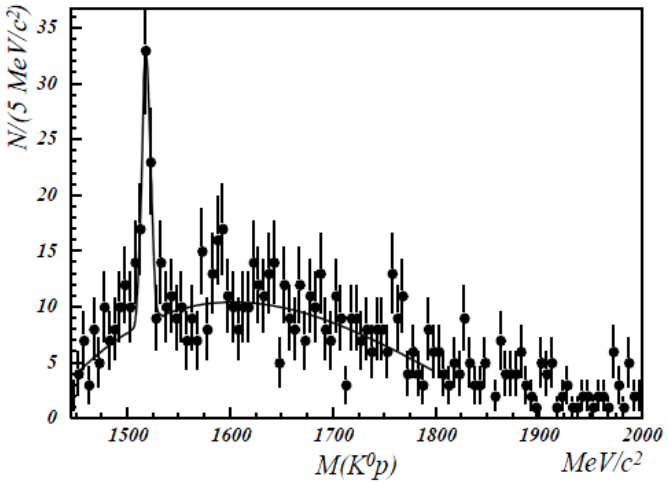
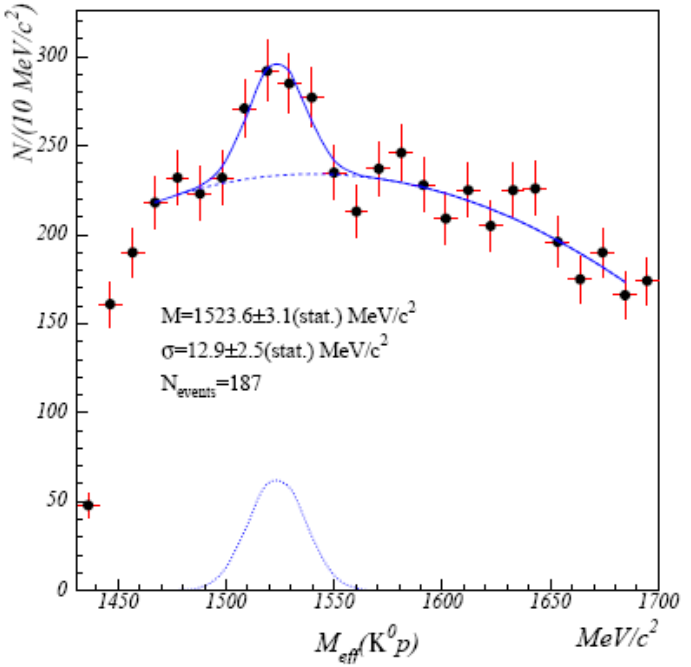


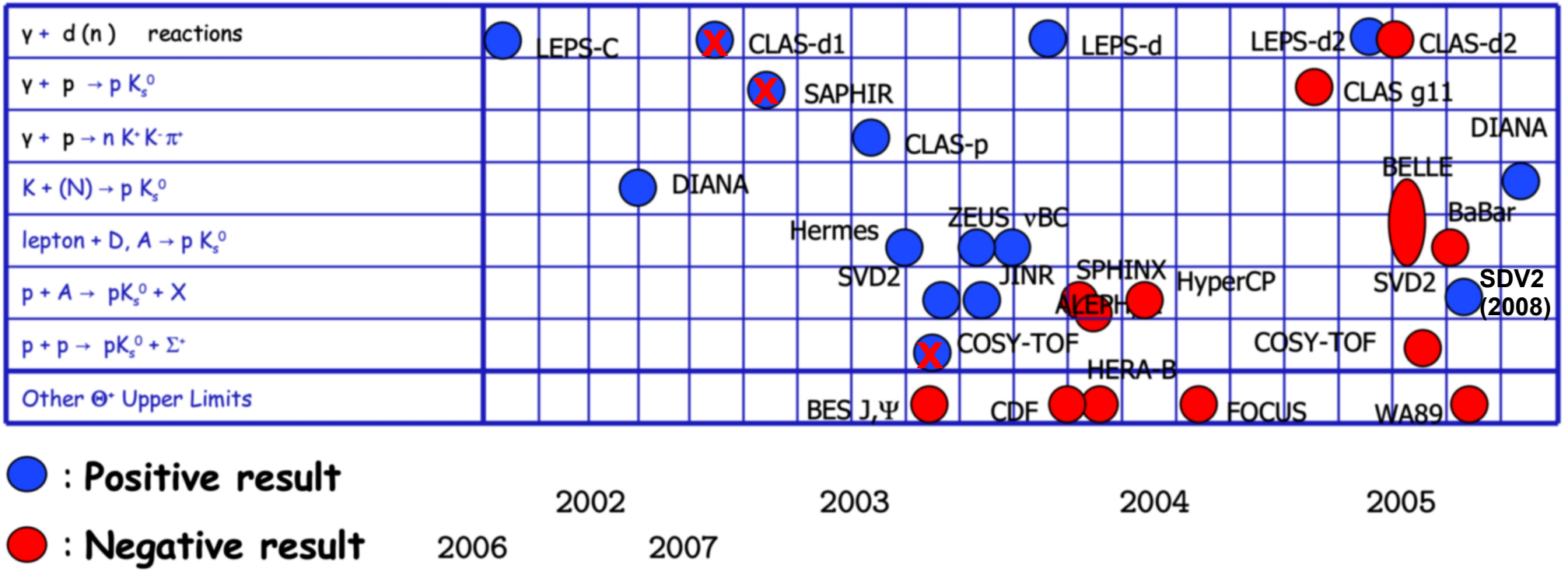
Fig. 3. Sample I: The (pK_s^0) invariant mass spectrum for K_s^0 decaying inside the vertex detector with additional quality cuts explained in text.

Nowe wyniki **SVD-2**, dwie niezależne próbki K^0_s (res. lewy i prawy)

pN→ K^0_spX



Time dependent experimental status of Θ^+

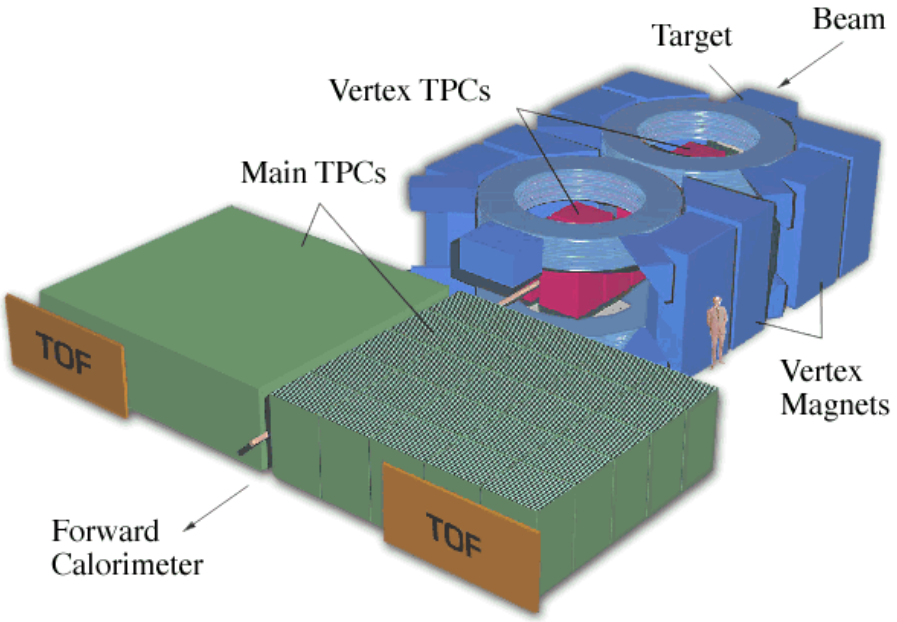


Rys. M. Praszalowicz (XII 2008)

Θ^+ NIE obserwowana w większości eksperymentów (brak pozytywnego wyniku z eksperymentów *dedykowanych* CLAS γp, γd; COSY-TOF pp (KEK-PS)) ale nadal obserwowane w DIANA, LEPS

Odkryto (??) najlżejszy składnik anty-dekupletu
A co z pozostałymi cząstkami anty-dekupletu barionów?
Poszukajmy najcięższych... →

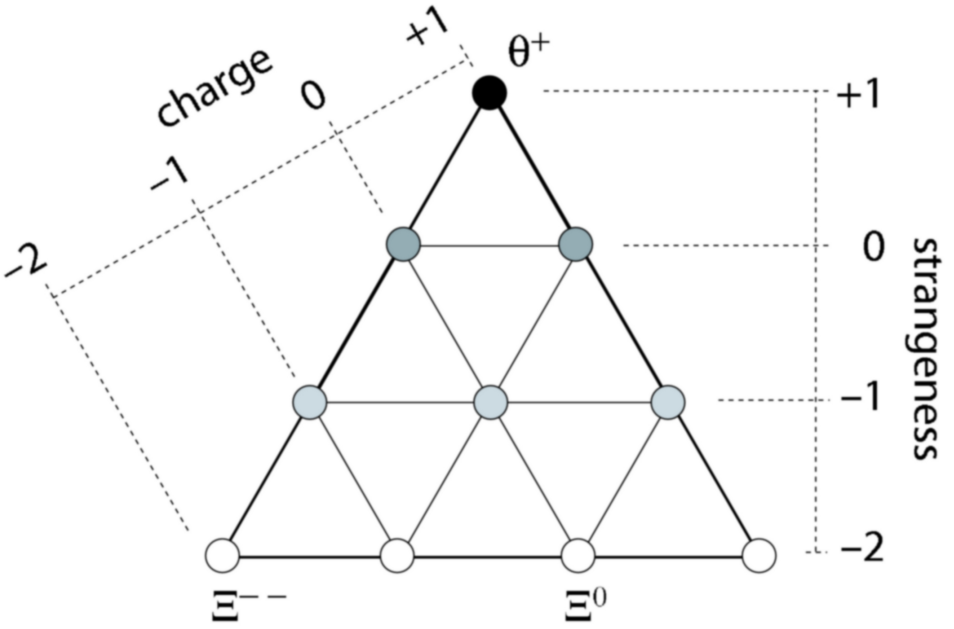
Eksperyment **NA49** przy akceleratorze SPS w CERN (Szwajcaria)



- Spektrometr hadronowy
- m.in. p+p, pęd pocisku 158 GeV/c ($\sqrt{s}$ = 17.3 GeV); tarcza to cylinder z ciekłym wodorem
- VTPC1 (w polu), VTPC2 (w polu) oraz MTPCR, MTPCL – komory projekcji czasowej
- Pomiar pędu – w polu magnetycznym, identyfikacja – dE/dx (lub/i TOF)

NA49: poszukiwanie członków kwartetu izospinowego $\Xi_{3/2}$

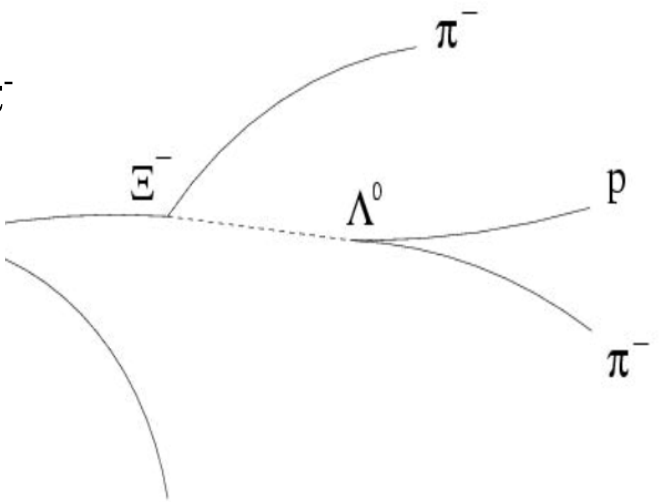
(obserwowane w eksperymencie $\Xi^{--}_{3/2}$ oraz $\Xi^{0}_{3/2}$)

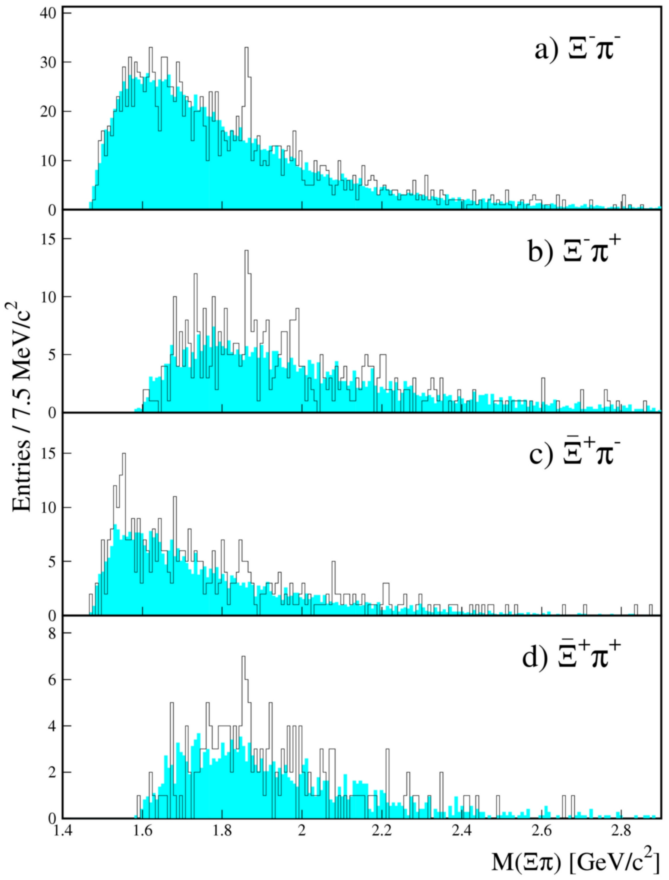


- Multiplet o dziwności S = -2
- Przewidywana masa 2.070 GeV/c^2 i szerokość rozpadu na $\Xi\,\pi$ 0.040 GeV/c^2 (D. Diakonov, V. Petrov, M. Polyakov)
- Skład: $\Xi^{--}_{3/2}$(egz. dsds ubar) $\Xi^{-}_{3/2}$(dsus ubar) $\Xi^{0}_{3/2}$ (dsus dbar) $\Xi^{+}_{3/2}$(egz. usus dbar)
- Przewidywana masa około 1.750 GeV/c^2 i szerokość 1.5 x szerokość Θ^+ (R. Jaffe, F. Wilczek)

Poszukiwanie w kanale $\Xi^-\pi^-$

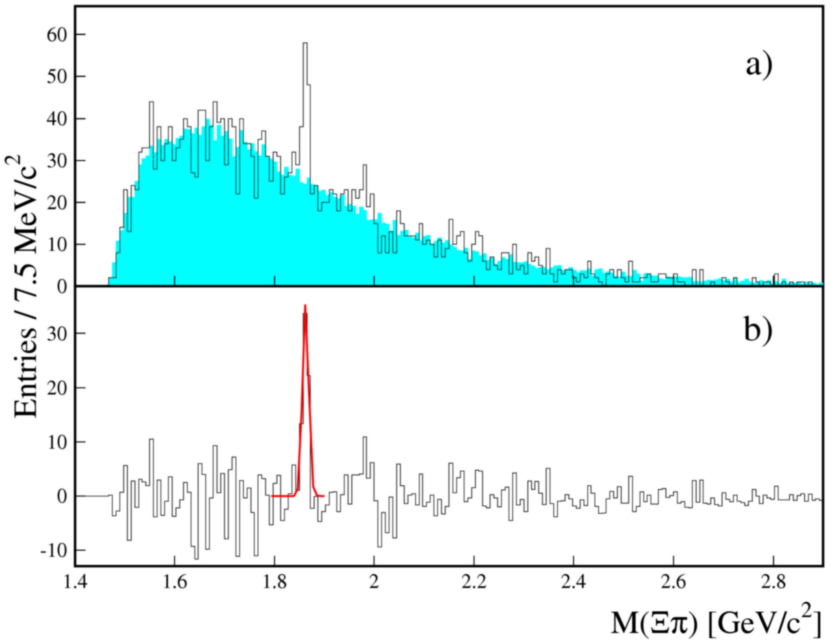
- Pomiar masy niezmienniczej układu
- Badanie widm układów: $p\pi^-$, $\Lambda^0\pi^-$, $\Xi^-\pi^-$ (bardzo ciężka analiza!)
- Analogicznie dla antycząstek

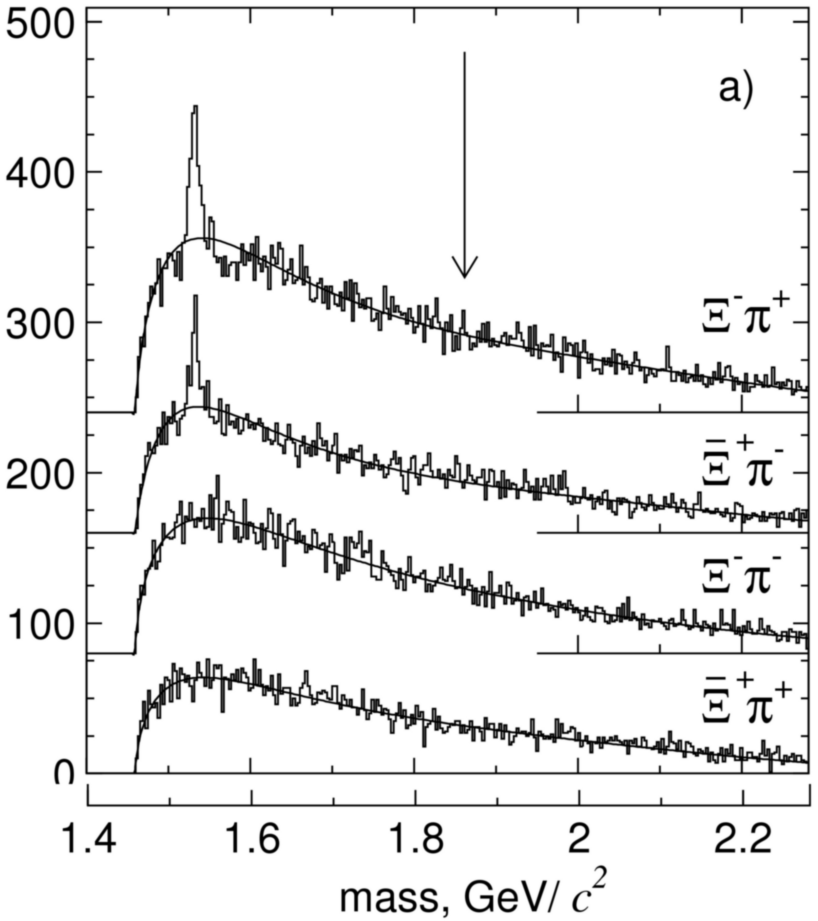




- a) **kandydat na $\Xi^{--}_{3/2}$**; sygnał na poz. 4.0 σ
- b) **kandydat na $\Xi^{0}_{3/2}$**
- c) i d) to odpowiednie antybariony
- Niebieskie tło – od przypadków mieszanych (kombinowanie par $\Xi\pi$ pochodzących z różnych przypadków)
- Fit do a) i d) daje 1.862 ± 0.002 GeV/c^2
- Fit do b) i c) daje 1.864 ± 0.005 GeV/c^2

- Suma 4 poprzednich rozkładów
- Sygnał na poziomie 5.6 σ
- Fit do sygnału (czerwony) 1.862 ± 0.002 GeV/c^2
- FWHM = 0.017 GeV/c^2
- Sygnał stabilny ze względu na cięcia

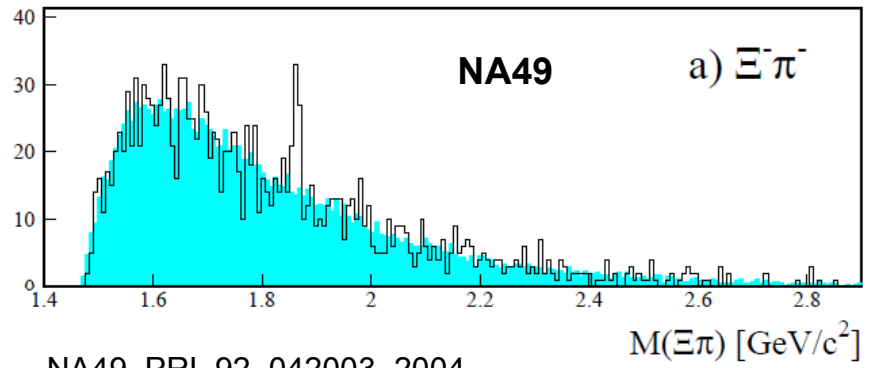




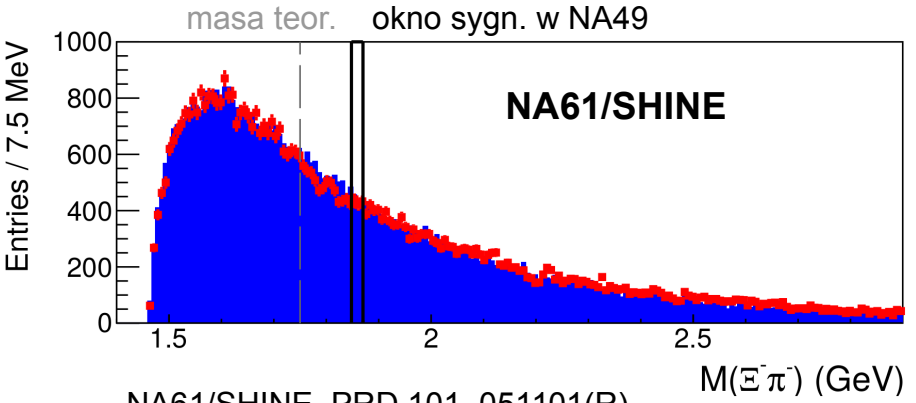
- Znów bądźmy adwokatami diabła...
- Wyniki z HERA-B nie są zgodne NA49 mimo dużo lepszej statystyki !
- 8 razy więcej hiperonów Ξ^-
- lepsza rozdzielczość w masie
- 2 razy wyższa energia w środku masy

- Eksperyment E690 – poszukiwanie w tym samym procesie co NA49 (p+p) ale 2 razy wyższa energia – **nie znaleziono sygnału**
- Eksperyment WA89 – 300 razy więcej hiperonów Ξ^- – **nie znaleziono sygnału**
- ALEPH, BaBar, CDF, COMPASS, FOCUS, ZEUS – **nie znaleziono sygnału**

Eksperyment **NA61/SHINE** przy akceleratorze SPS w CERN (Szwajcaria)
Ta sama energia co w NA49 (p+p, pęd wiązki 158 GeV/c),
detektor odziedziczony po NA49 (+ upgrady)



NA49, PRL 92, 042003, 2004



NA61/SHINE, PRD 101, 051101(R)
[arXiv:1912.12198]

NA49:
- 6.5M events (3.75M after cuts)
- resonance with mass of 1.862 ± 0.002 GeV/c²
- width below the detector resolution
- significance estimated to be 4.0 sigma

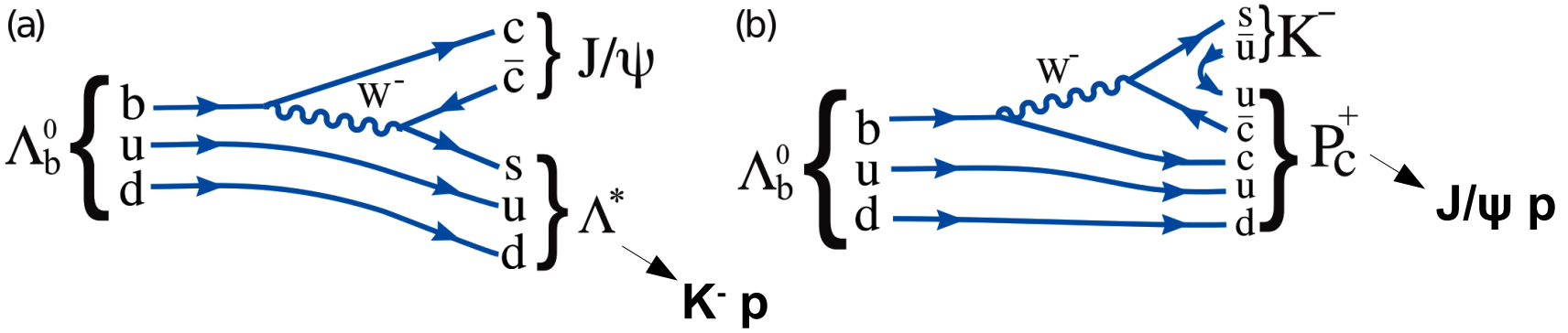
NA61/SHINE:
- 53M events (26M after cuts)
- same analysis as in NA49
- **no Ξ⁻⁻(1860) pentaquark signal**
- Ξ(1530) well visible

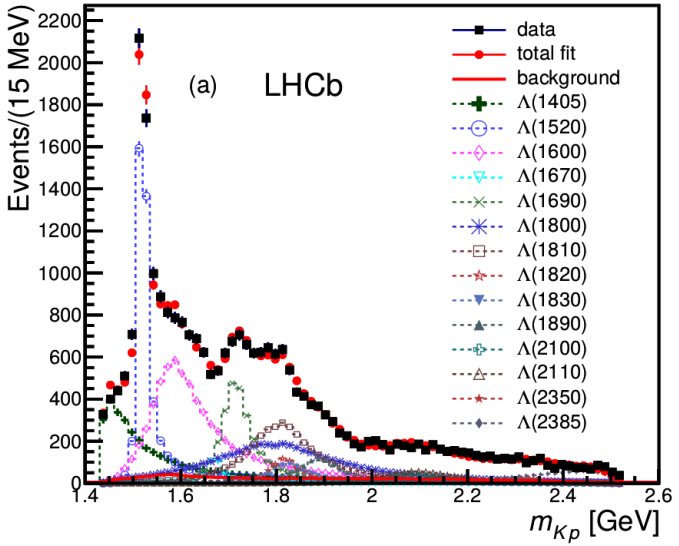
Prace przeglądowe na temat poszukiwania pentakwarków oraz innych **egzotycznych stanów** (m.in. tetrakwarki, glubole): arXiv:1403.4455, arXiv:1403.1254, arXiv:1411.5997, arXiv:1606.08593, arXiv:1611.07920, arXiv:1702.00486, arXiv:1706.00610, arXiv:1808.04153, arXiv:1903.11976, arXiv:2201.04885, arXiv:2204.02649, arXiv:2305.04869, arXiv:2403.04051, arXiv:2410.06923

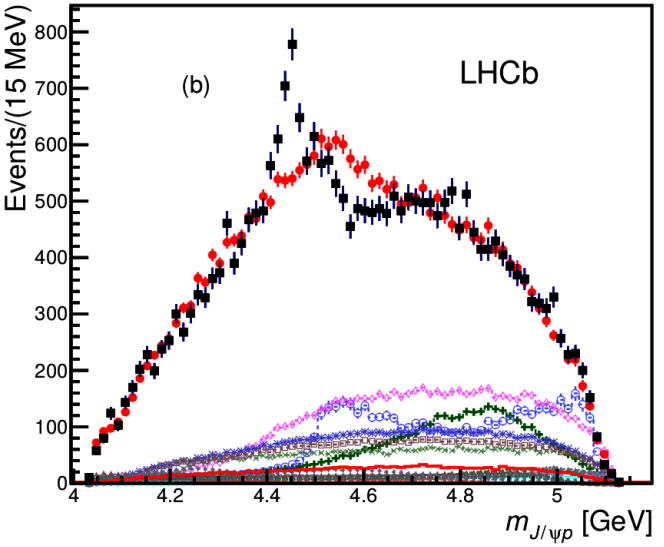
Pentakwarki w LHCb

Rezonans J/ψ p obserwowany w kanale rozpadu $\Lambda^0_b \to J/\psi\, K^- p$

arXiv:1507.03414 (PRL 115, 072001 (2015))







Bez pentakwarków

Figure 6: Results for (a) m_{Kp} and (b) $m_{J/\psi p}$ for the extended Λ^* model fit without P_c^+ states. The data are shown as (black) squares with error bars, while the (red) circles show the results of the fit. The error bars on the points showing the fit results are due to simulation statistics.

Z dwoma pentakwarkami (w nawiasie preferowany spin i parzystość J^P):

State	mass (MeV)	width (MeV)
P(3/2)$^-$	4380 ± 8 ± 29	205 ± 18 ± 86
P(5/2)$^+$	4449.8±1.7±2.5	39 ± 5 ± 19

arXiv:1507.03414

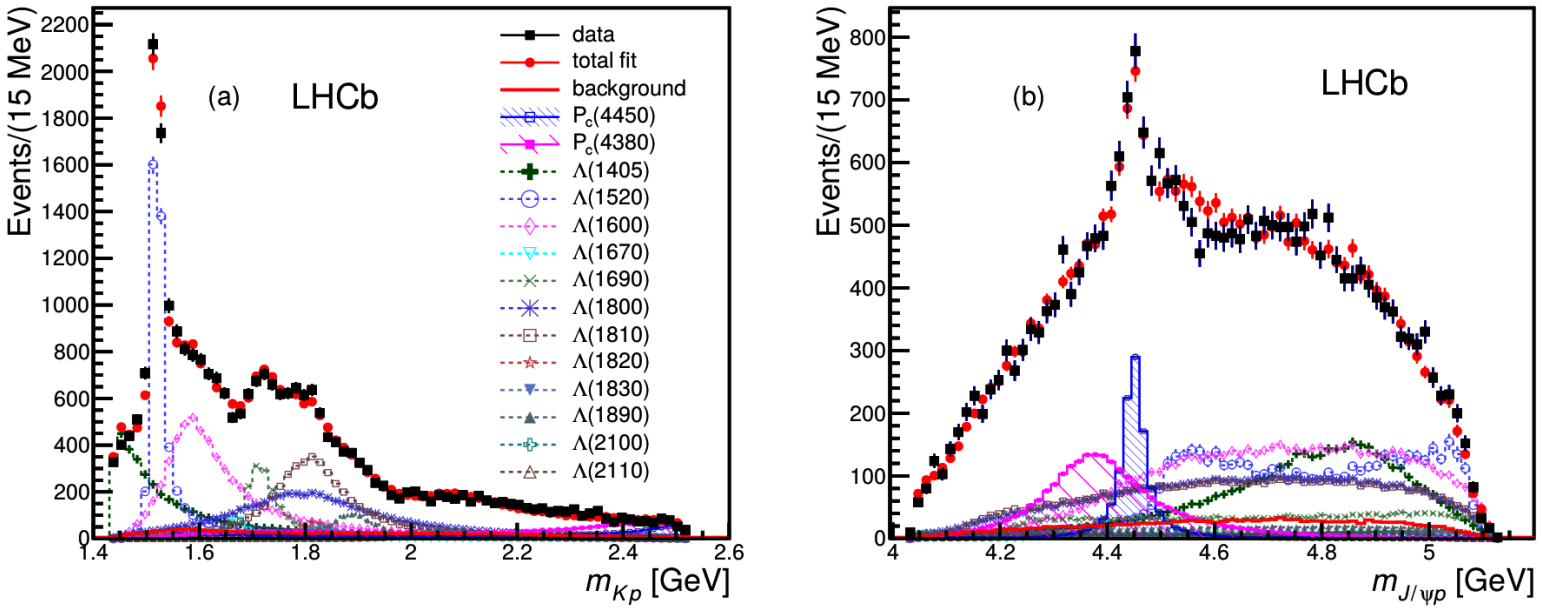


Figure 3: Fit projections for (a) m_{Kp} and (b) $m_{J/\psi p}$ for the reduced Λ^* model with two P_c^+ states (see Table 1). The data are shown as solid (black) squares, while the solid (red) points show the results of the fit. The solid (red) histogram shows the background distribution. The (blue) open squares with the shaded histogram represent the $P_c(4450)^+$ state, and the shaded histogram topped with (purple) filled squares represents the $P_c(4380)^+$ state. Each Λ^* component is also shown. The error bars on the points showing the fit results are due to simulation statistics.

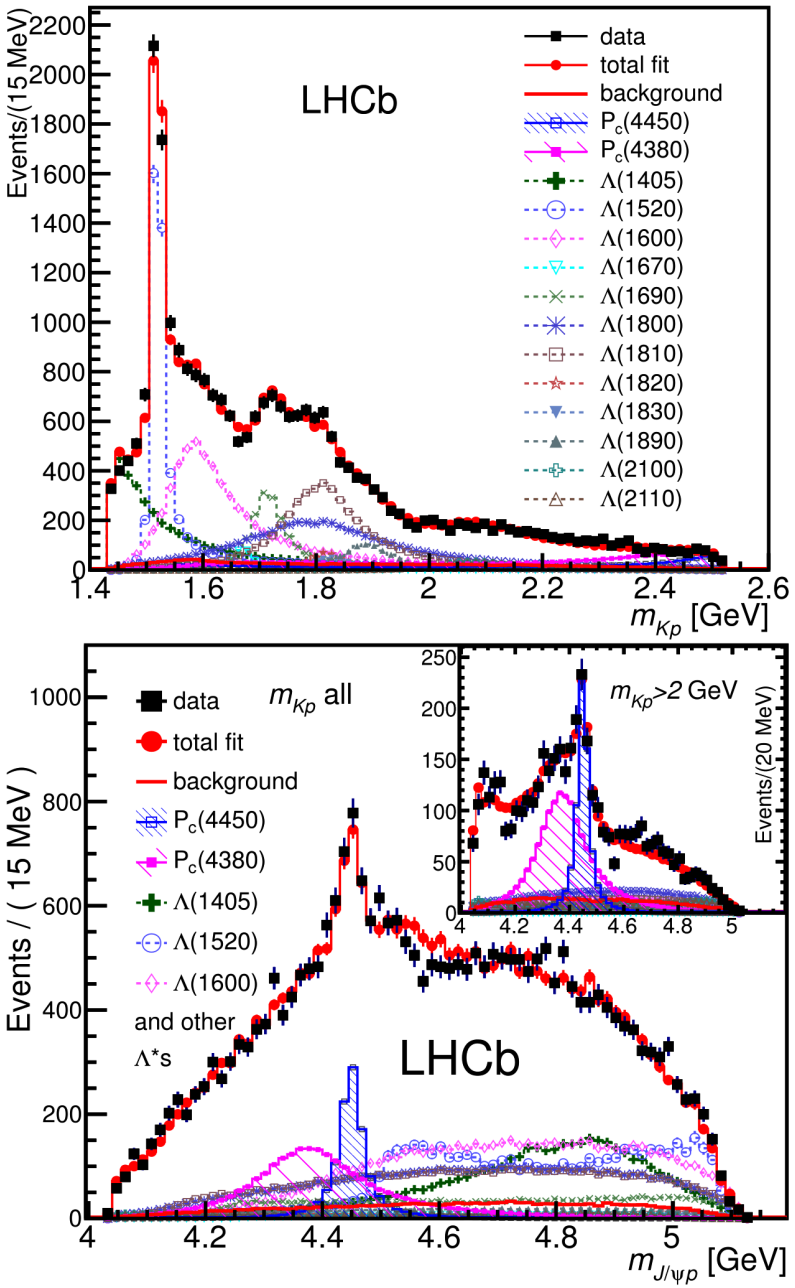


Figure 2: Projections of the amplitude fits with $P_c(4380)^+$ and $P_c(4450)^+$ states to the $\Lambda_b^0 \to J\psi p K^-$ data onto the invariant mass distributions of m_{Kp} (top) and $m_{J\psi p}$ (bottom).

Oprócz pracy: arXiv:1507.03414 (PRL 115, 072001 (2015)) zob. też późniejszą pracę LHCb: arXiv:1604.05708 (PRL 117, 082002 (2016)). Na ich podstawie PDG 2018 podawał wartości:

$P_c(4380)^+$ m=4380±8±29 MeV; Γ_{tot}=205±18±86 MeV

$P_c(4450)^+$ m=4449.8±1.7±2.5 MeV; Γ_{tot}=39±5±19 MeV

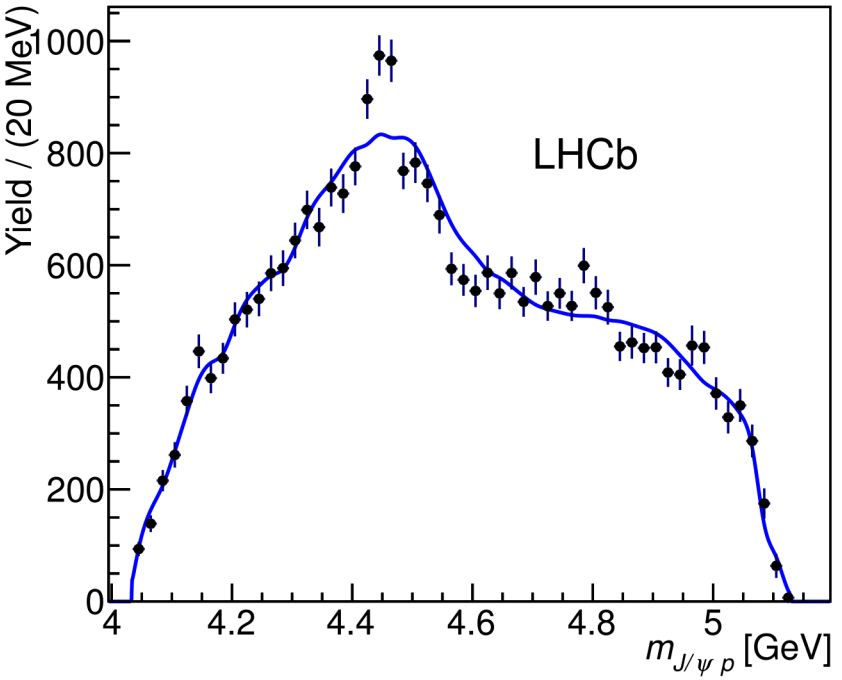


Figure 4: The efficiency-corrected and background-subtracted distribution of $m_{J\psi p}$ for the data (black points with error bars), with the reflection of K^-p mass distribution and of the moments of the K^-p helicity angle, which can be accommodated by any plausible K^-p contribution (solid blue line) superimposed. The data and the reflection are inconsistent at $> 9\sigma$ level.

Alternatywne wyjaśnienia – **stany molekularne**

Rys. z arXiv:1509.04051

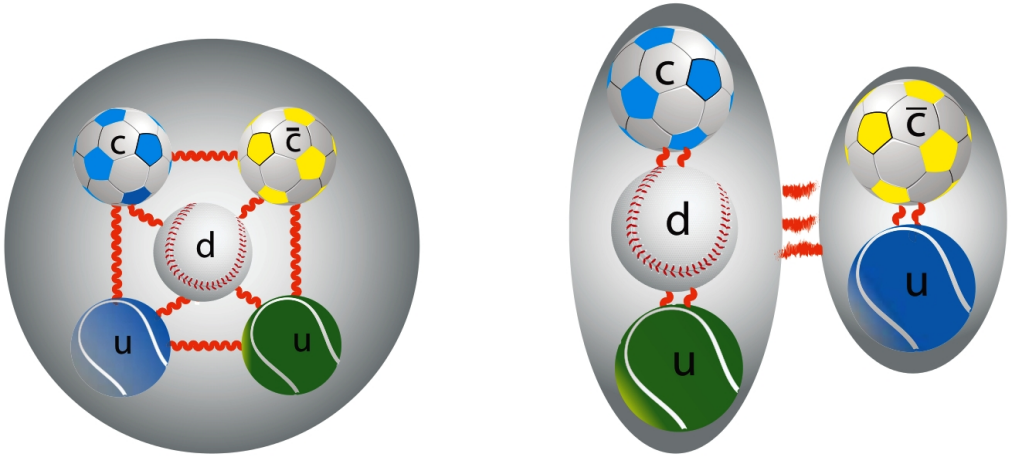


Figure 14: (left) Illustration of a tightly bound P_c^+ state, and (right) a molecularly bound state.

Nowsze wyniki:

- Poszukiwanie sygnałów **$P_c(4380)^+$** oraz **$P_c(4450)^+$**. Rezonans **J/ψ p** poszukiwany również w innym kanale rozpadu tj. **$\Lambda^0_b \rightarrow$ J/ψ p π^-**

PRL 117 (2016) no.8, 082003
Addendum: PRL 117 (2016) no.10, 109902
Addendum: PRL 118 (2017) 119901

- Poszukiwanie sygnału **$P_c(4450)^+$**. Rezonans **$\chi_{c(1,2)}$ p** poszukiwany również w innym kanale rozpadu tj. **$\Lambda^0_b \rightarrow \chi_{c(1,2)}$ p K^-**

PRD 92 (2015) 071502 oraz PRL 119 (2017) no.6, 062001

- Poszukiwanie innych stanów **pentakwarkowych** w kanale rozpadu **$\Xi^-_b \rightarrow$ J/ψ Λ K^-**

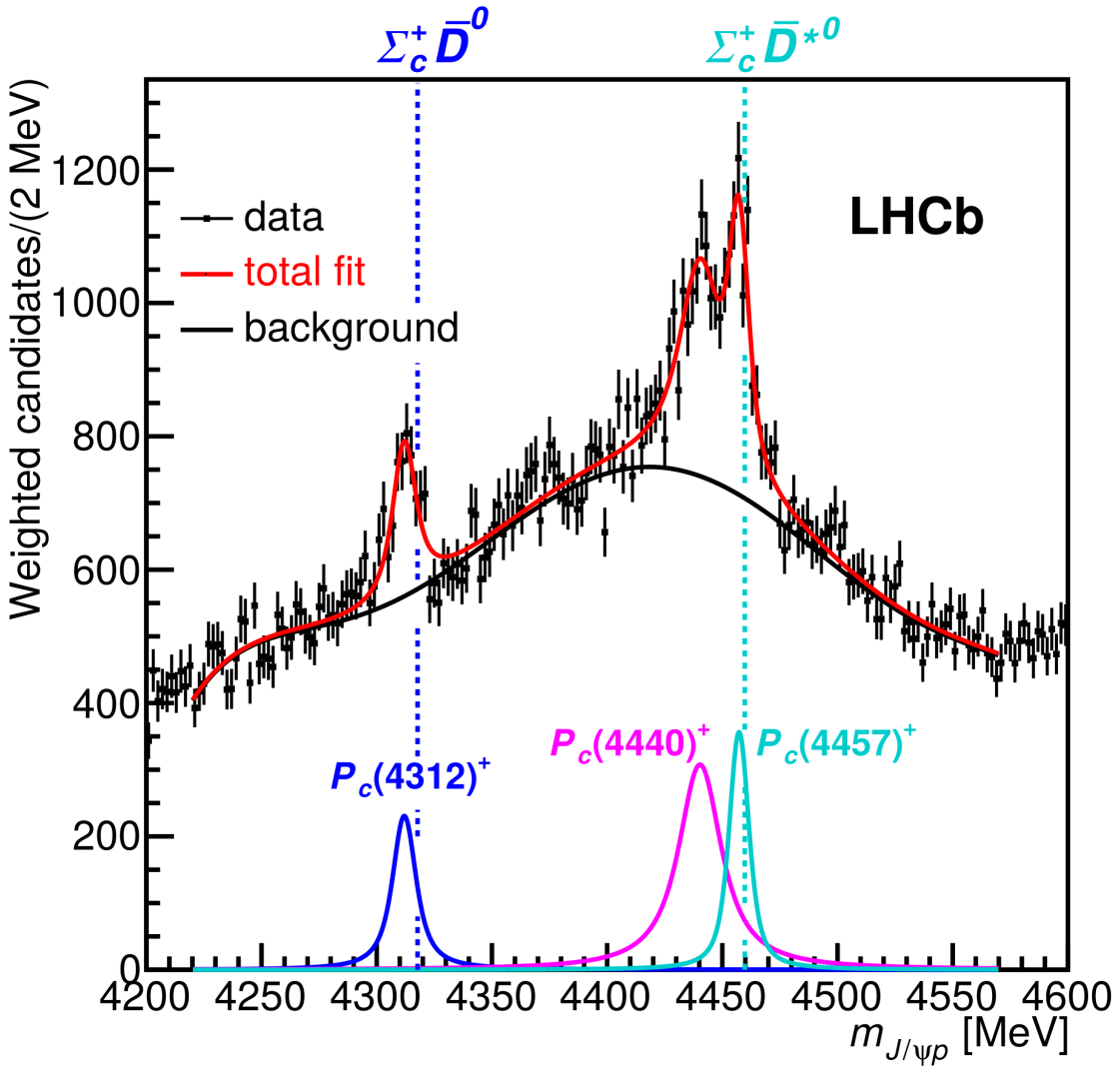
→ zob. PL B772 (2017) 265-273

wnioski: potrzebne są lepsze statystyki → Run II (√s = 13 TeV, lata 2015–2018)

26 March 2019: Observation of new pentaquarks.

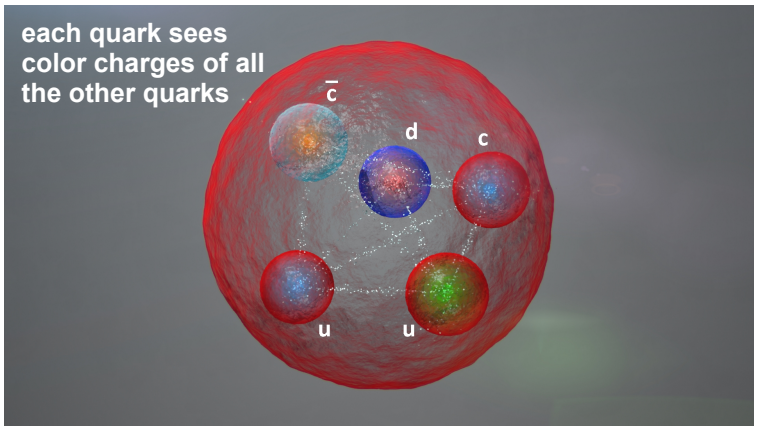
$m(P_c^+(4312)) = 4311.9 \pm 0.7^{+6.8}_{-0.6}$ MeV, $\Gamma = 9.8 \pm 2.7^{+3.7}_{-4.5}$ MeV
$m(P_c^+(4440)) = 4440.3 \pm 1.3^{+4.1}_{-4.7}$ MeV, $\Gamma = 20.6 \pm 4.9^{+8.7}_{-10.1}$ MeV
$m(P_c^+(4457)) = 4457.3 \pm 0.6^{+4.1}_{-1.7}$ MeV, $\Gamma = 6.4 \pm 2.0^{+5.7}_{-1.9}$ MeV

Z większą statystyką danych LHCb teraz w miejscu $P_c(4450)^+$ widzi dwa pentakwarki: 4440 oraz 4457 MeV

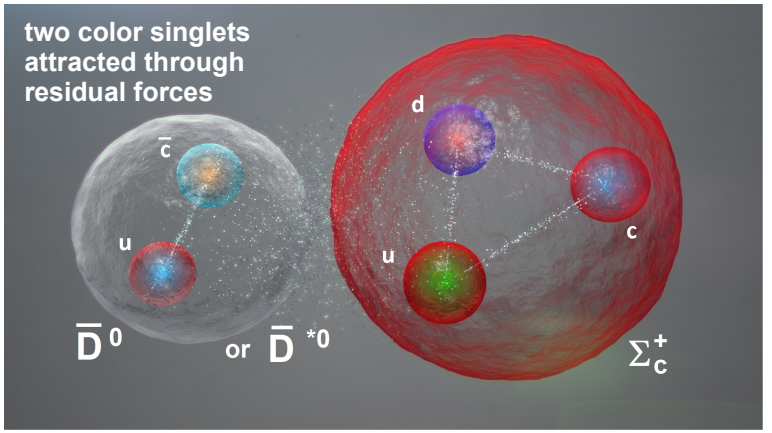


Rys. z LHCb, arXiv:1904.03947

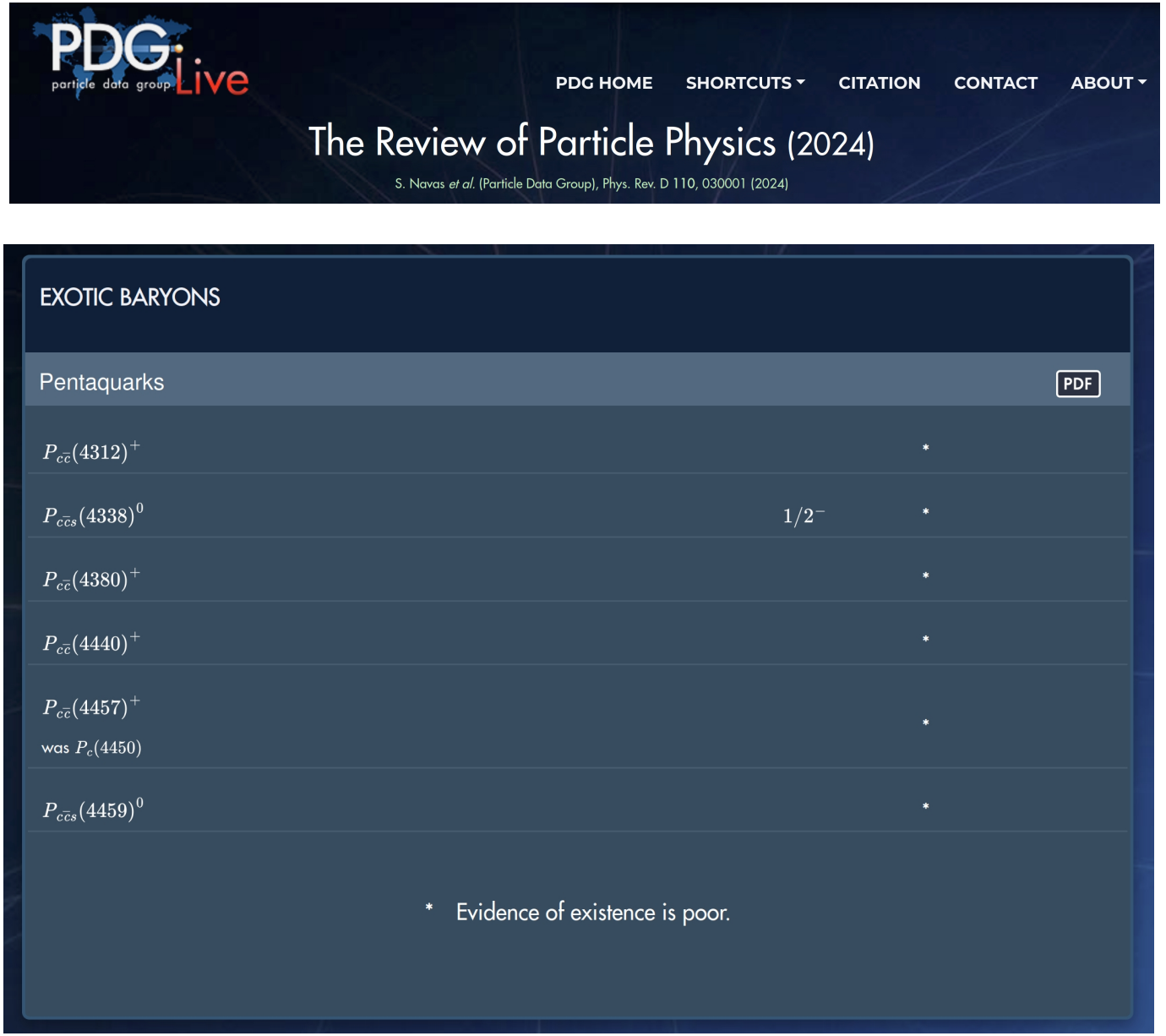
Pentakwarki?



Czy stany molekularne?



Uwaga: sygnał od sumy $P_c(4440)$ oraz $P_c(4457)$ (wzmocnienie w masie niezm. J/ψ p) widziany również przez eksp. D0 przy Tevatronie → arXiv:1910.11767



← *„Experimental searches for pentaquark hadrons comprised of light flavors have a long and vivid history. No undisputed candidates had been found in 50 years.”*

Wyniki dla poszukiwania pentakwarków i innych stanów egzotycznych w LHCb
→ zob. LHCb, arXiv:2101.05331, arXiv:2111.14360

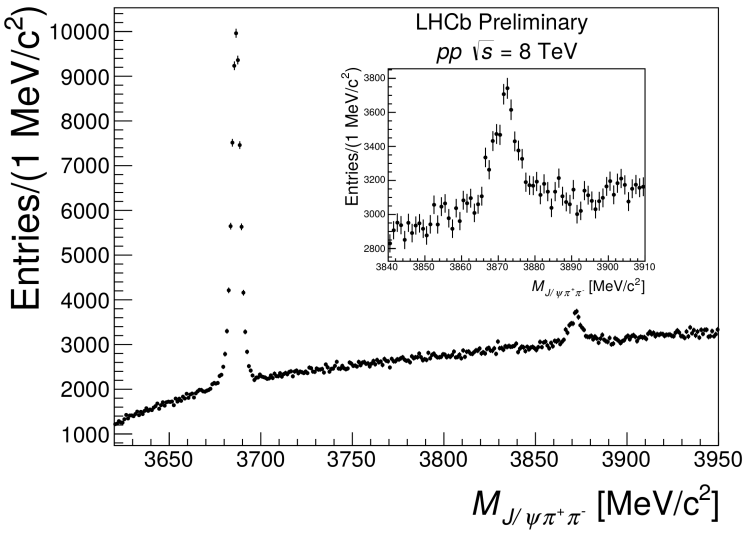
Tetrakwarki

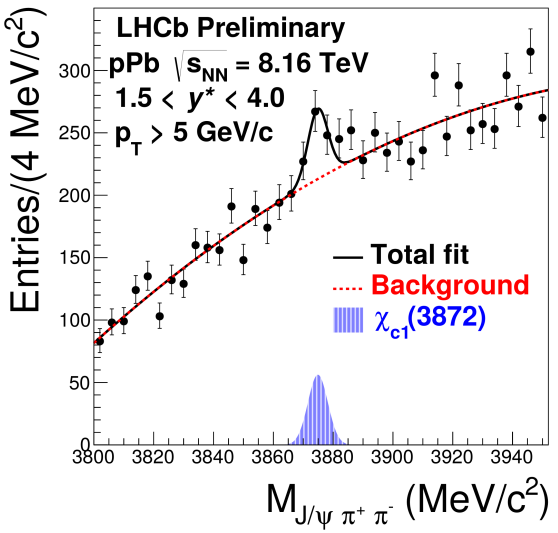
- Poszukiwanie tetrakwarków w **LHCb** → zob. PRL 118 (2017) 022003; wyniki w kanale **$B^+ \to J/\psi\, \phi\, K^+$** zgodne z **czterema egzotycznymi stanami X^0 (4140, 4274, 4500, 4700)**; masa znalezionego stanu **X(4140)** zgodna z wynikami eksperymentów CDF, D0, CMS ale szerokość większa

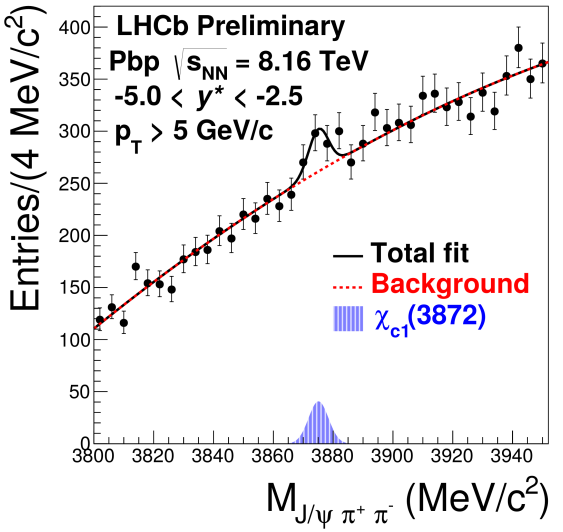
- Inne stany egzotyczne w **LHCb – tetrakwark $Z(4430)^-$** obserwowany również przez kolaboracje Belle → zob. np. arXiv:1509.04051. Rezonans **$\psi'\pi$** obserwowany w kanale rozpadu **$B^0 \to \psi'\pi\, K^+$**

- Jeszcze inne **tetrakwarki** (m.in. **$Z_c(3900)$, $Z_c(4020)$**) zauważone zostały w eksperymencie **BESIII** → zob. np. arXiv:1509.04746

- Tetrakwark **$\chi_{c1}(3872)$** jest widziany przez **LHCb** w zderzeniach p+Pb oraz wysokiej krotności p+p → zob. arXiv:2002.01551 (rys. poniżej)







LHCb discovers a new type of tetraquark at CERN

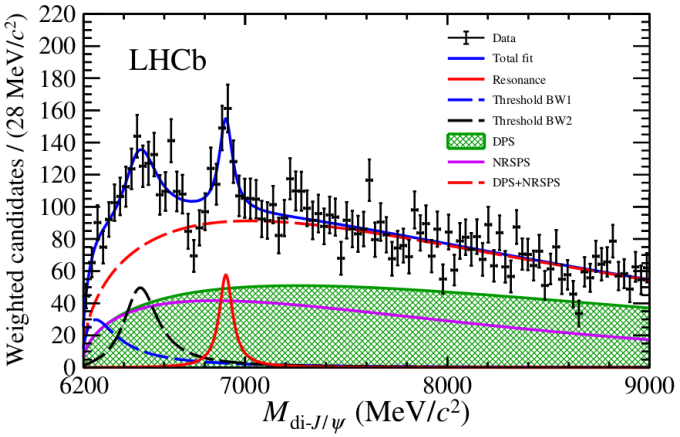
https://home.cern/news/news/physics/lhcb-discovers-new-type-tetraquark-cern?fbclid=IwAR2WStat8vkRAId6m1Ne5YDmIX76QGPPOqZWf9_KFr_O

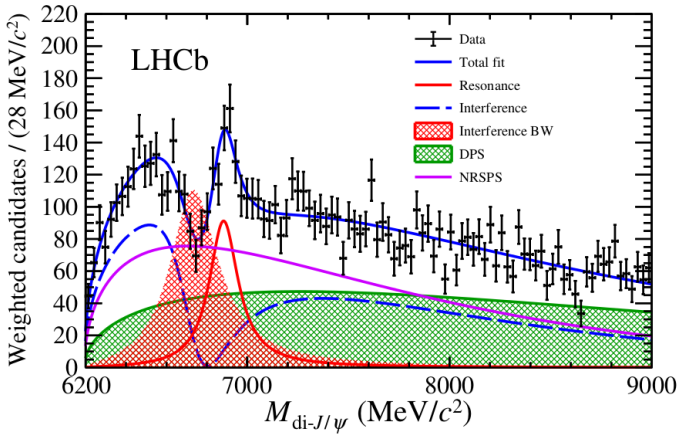
The LHCb collaboration has observed an exotic particle made up of four charm quarks for the first time

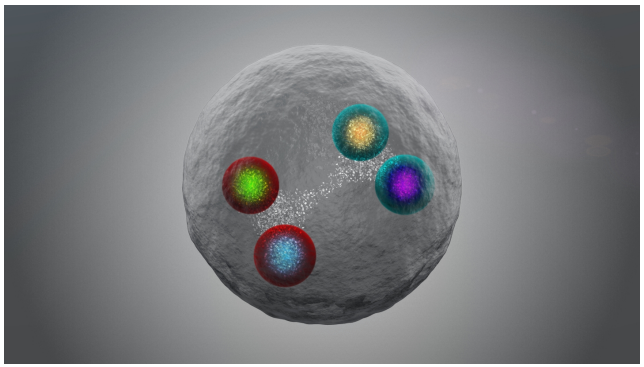
1 JULY, 2020

„... the researchers detected a bump in the mass distribution of a pair of J/ψ particles, which consist of a charm quark and a charm antiquark. The bump has a statistical significance of more than five standard deviations, the usual threshold for claiming the discovery of a new particle, and it corresponds to a mass at which particles composed of four charm quarks are predicted to exist.

As with previous tetraquark discoveries, it is not completely clear whether the new particle is a "true tetraquark", that is, a system of four quarks tightly bound together, or a pair of two-quark particles weakly bound in a molecule-like structure. Either way, the new tetraquark will help theorists test models of quantum chromodynamics, the theory of the strong interaction."







Dwa modele dają:

m[X(6900)] = 6905 ± 11 ± 7 MeV/c² (lewy rys.)

Γ[X(6900)] = 80 ± 19 ± 33 MeV

oraz

m[X(6900)] = 6886 ± 11 ± 11 MeV/c² (prawy rys.)

Γ[X(6900)] = 168 ± 33 ± 69 MeV

LHCb, Science Bulletin 65 (2020) 1983
[arXiv:2006.16957]

LHCb discovers first “open-charm” tetraquark

https://home.cern/news/news/physics/lhcb-discovers-first-open-charm-tetraquark

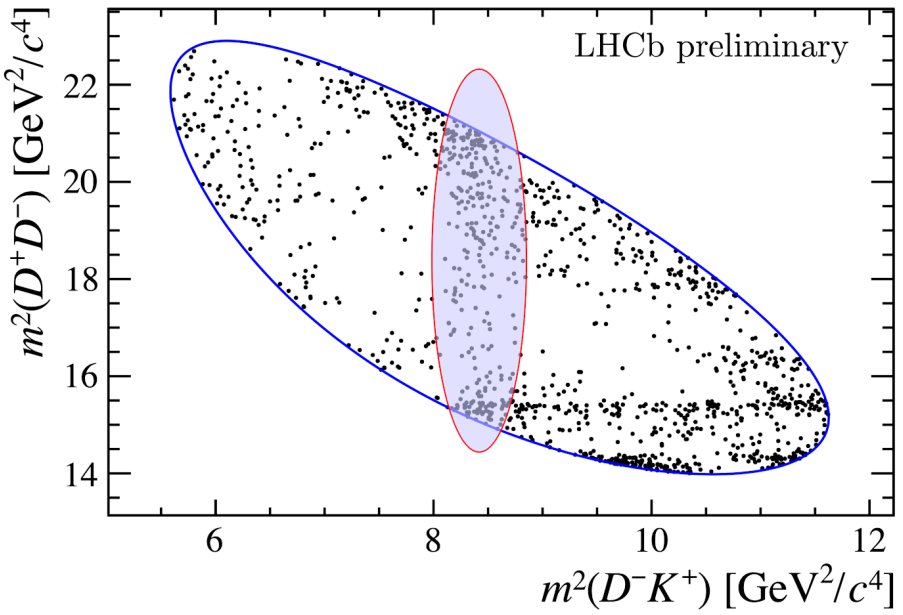
The particle, which has been called X(2900), was detected by analysing all the data LHCb has recorded so far from collisions at CERN’s Large Hadron Collider

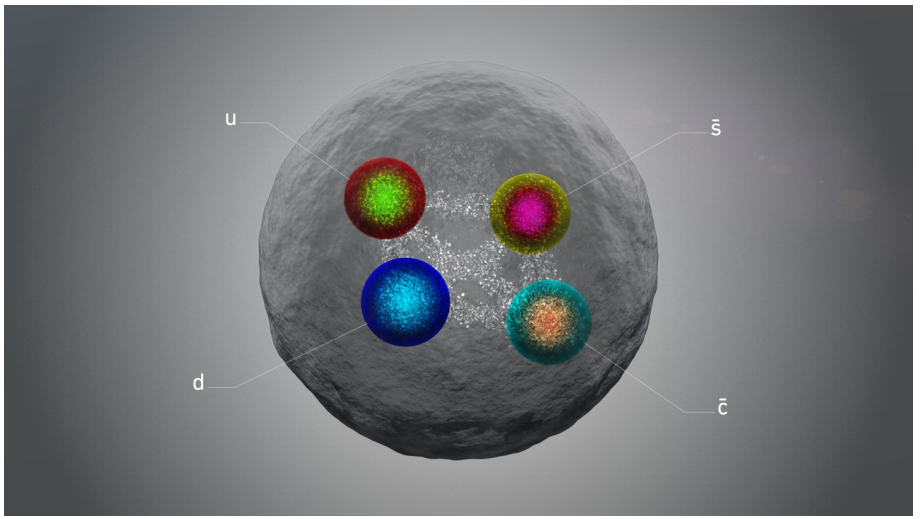
21 AUGUST, 2020

„... LHCb scientists observed signs of the new tetraquark in one such decay, in which the positively charged B meson transforms into a positive D meson, a negative D meson and a positive kaon: $B^+ \to D^+ D^- K^+$.

The well-established quark model predicts that some of the D^+D^- pairs in this transformation could be the result of intermediate particles – such as the ψ(3770) meson – that only manifest momentarily: $B^+ \to \psi(3770) K^+ \to D^+ D^- K^+$. However, theory does not predict meson-like intermediaries resulting in a $D^- K^+$ pair. LHCb were therefore surprised to see a clear band in their data corresponding to an intermediate state transforming into a $D^- K^+$ pair at a mass of around 2.9 GeV/c², or around three times the mass of a proton.

The data have been interpreted as the first sign of a new exotic state of four quarks: an anticharm, an up, a down and an antistrange ($\bar{c}ud\bar{s}$). All previous tetraquark-like states observed by LHCb always had a charm–anticharm pair, resulting in net-zero “charm flavour”. The newly observed state is the first time a tetraquark containing a sole charm has been seen, which has been dubbed an “open-charm” tetraquark.”





← *so-called Dalitz plot, invented in order to study particle decays into three particles*

I kolejne rezonanse...

arXiv:2103.01803v1 [hep-ex] 2 Mar 2021

Observation of new resonances decaying to $J/\psi K^+$ and $J/\psi\phi$

LHCb collaboration[†]

Abstract

The first observation of exotic states with a new quark content $c\bar{c}u\bar{s}$ decaying to the $J/\psi K^+$ final state is reported with high significance from an amplitude analysis of the $B^+ \to J/\psi\phi K^+$ decay. The analysis is carried out using proton-proton collision data corresponding to a total integrated luminosity of $9\,\text{fb}^{-1}$ collected by the LHCb experiment at centre-of-mass energies of 7, 8 and 13 TeV. The most significant state, $Z_{cs}(4000)^+$, has a mass of $4003 \pm 6\,^{+\,4}_{-14}\,\text{MeV}$, a width of $131 \pm 15 \pm 26\,\text{MeV}$, and spin-parity $J^P = 1^+$, where the quoted uncertainties are statistical and systematic, respectively. A new 1^+ $X(4685)$ state decaying to the $J/\psi\phi$ final state is also observed with high significance. In addition, the four previously reported $J/\psi\phi$ states are confirmed and two more exotic states, $Z_{cs}(4220)^+$ and $X(4630)$, are observed with significance exceeding five standard deviations.

Twice the charm: long-lived exotic particle discovered

Discovery of a new exotic hadron containing two charm quarks and an up and a down antiquark

29 JULY, 2021

https://home.cern/news/news/physics/twice-charm-long-lived-exotic-particle-discovered

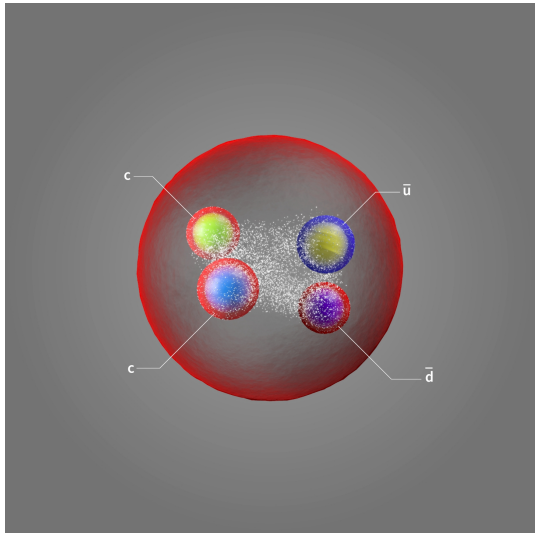
https://cerncourier.com/a/new-tetraquark-a-whisker-away-from-stability

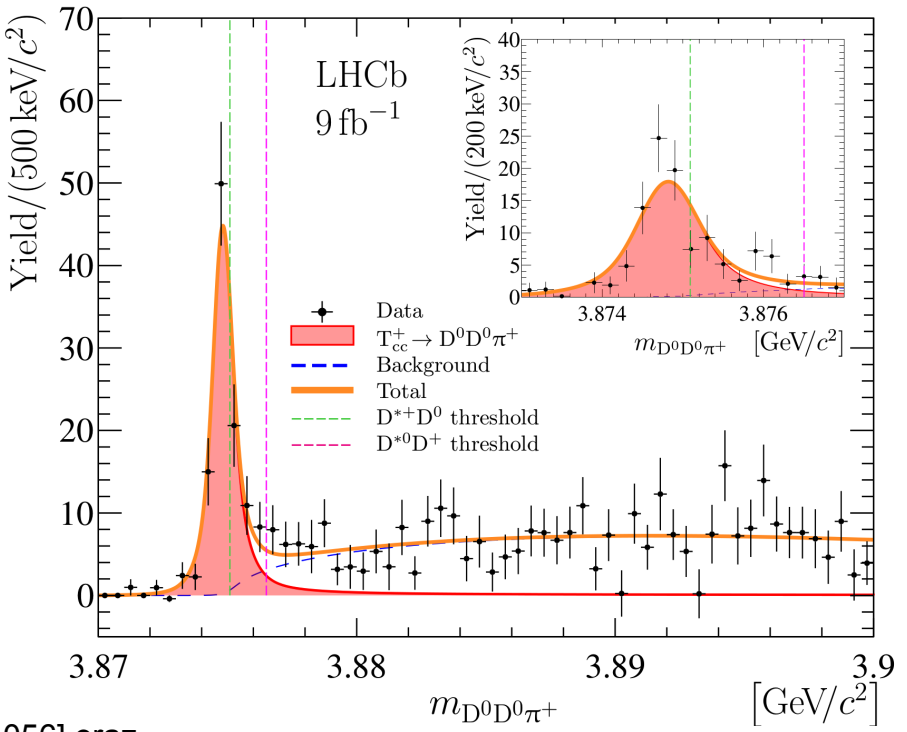
https://lhcb-public.web.cern.ch/Welcome.html#Tcc

„... the LHCb experiment at CERN is presenting a new discovery at the European Physical Society Conference on High Energy Physics (EPS-HEP). The new particle discovered by LHCb, labelled as T_{cc}^{+}, is a tetraquark – an exotic hadron containing two quarks and two antiquarks. It is the longest-lived exotic matter particle ever discovered, and the first to contain two heavy quarks and two light antiquarks."

„The new particle contains two charm quarks and an up and a down antiquark. (...) this is the first one that contains two charm quarks, without charm antiquarks to balance them. Physicists call this "open charm" (in this case, "double open charm")."

"We have discovered a cc anti-u anti-d tetraquark with a mass just below the $D^{*+}D^{0}$ threshold which, according to most models, indicates that it is a bound state," says LHCb analyst Ivan Polyakov (Syracuse University). "It still decays to D mesons via the strong interaction, but much less intensively than other exotic hadrons."





Zob. też LHCb, Nature Commun. 13 (2022) 1, 3351 [arXiv:2109.01056] oraz
LHCb, Nature Phys. 18 (2022) 7, 751-754 [arXiv:2109.01038 ← stąd rys. prawy]

I kolejne nowe rezonanse...

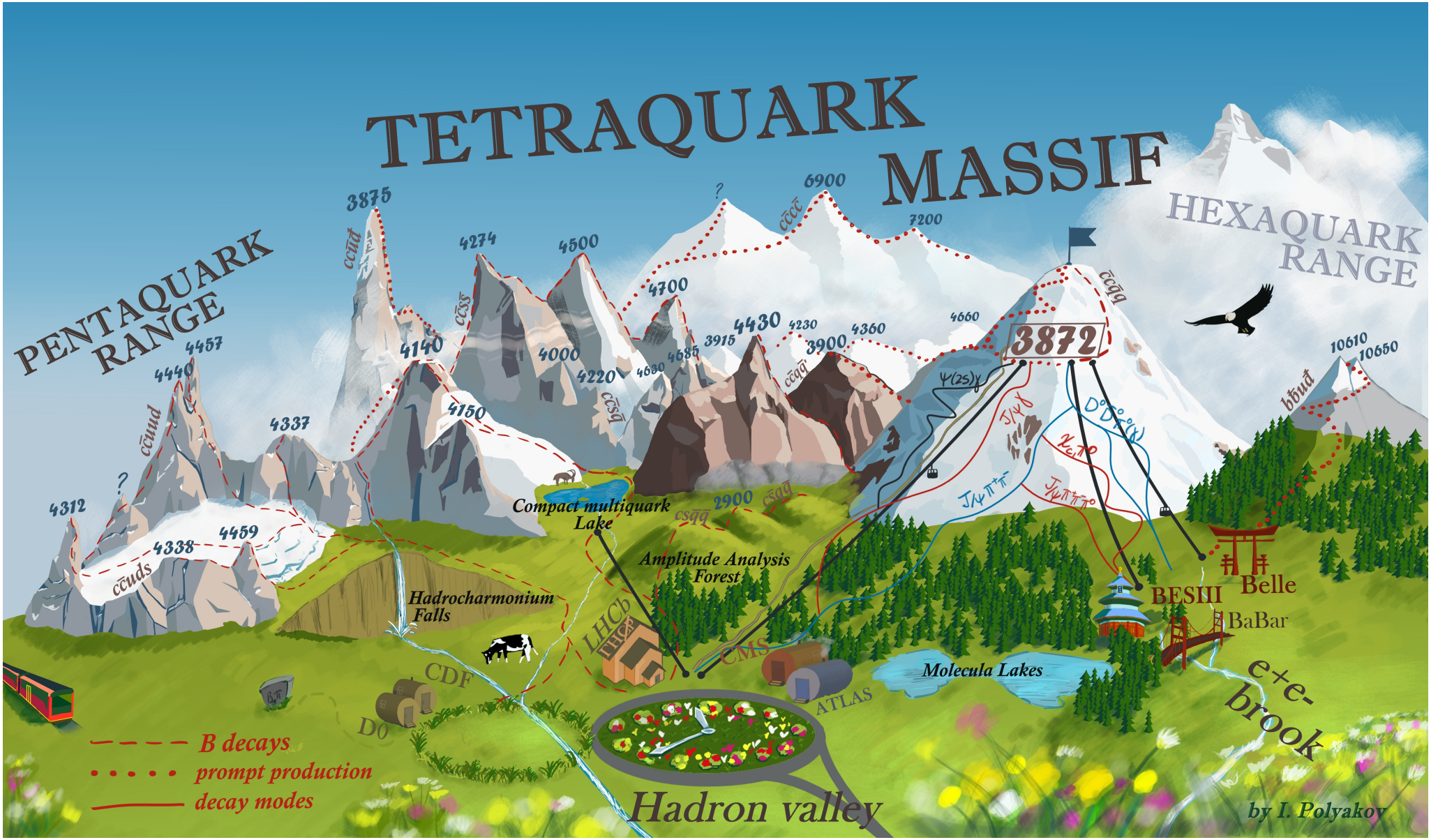
arXiv:2212.02716v1 [hep-ex] 6 Dec 2022

First observation of a doubly charged tetraquark and its neutral partner

LHCb collaboration

Abstract

A combined amplitude analysis is performed for the decays $B^0 \to \overline{D}{}^0 D_s^+ \pi^-$ and $B^+ \to D^- D_s^+ \pi^+$, which are related by isospin symmetry. The analysis is based on data collected by the LHCb detector in proton-proton collisions at center-of-mass energies of 7, 8 and 13 TeV. The full data sample corresponds to an integrated luminosity of $9\,\text{fb}^{-1}$. Two new resonant states with masses of $2.908 \pm 0.011 \pm 0.020\,\text{GeV}$ and widths of $0.136 \pm 0.023 \pm 0.011\,\text{GeV}$ are observed, which decay to $D_s^+\pi^+$ and $D_s^+\pi^-$ respectively. The former state indicates the first observation of a doubly charged open-charm tetraquark state with minimal quark content $[c\bar{s}u\bar{d}]$, and the latter state is a neutral tetraquark composed of $[c\bar{s}\bar{u}d]$ quarks. Both states are found to have spin-parity 0^+, and their resonant parameters are consistent with each other, which suggests that they belong to an isospin triplet.



Rys. z pracy: N. Hüsken, E. Norella, I. Polyakov, arXiv:2410.06923