



CZĄSTKI ELEMENTARNE I ODDZIAŁYWANIA

IX ODDZIAŁYWANIA SILNE

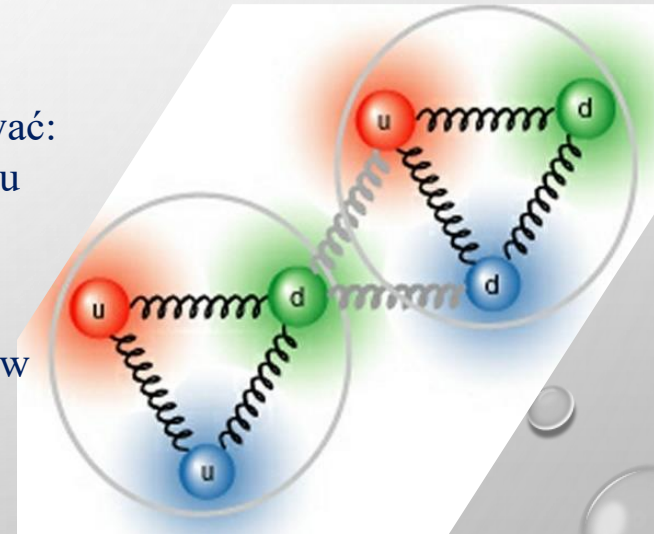
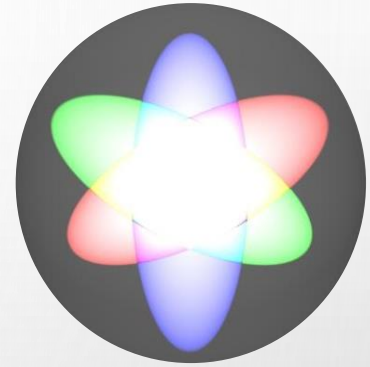
Agnieszka Obłąkowska-Mucha

<http://home.agh.edu.pl/~amucha/>
Katedra Oddziaływań i Detekcji Cząstek
D11 p. 106

Gdzie są oddziaływania silne?

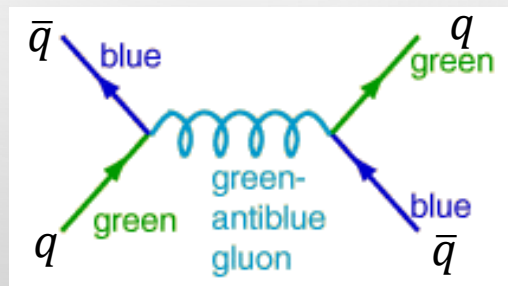
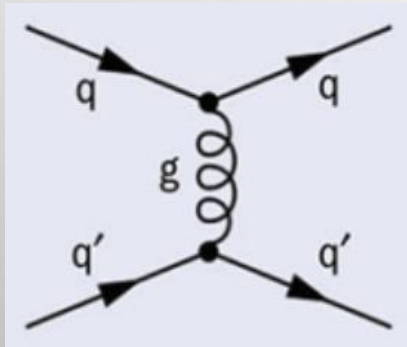
- Oddziaływania silne odpowiadają za budowę jądra atomowego, reakcje jądrowe i wiązania kwarków w hadronach (ale wiązanie neutralnych kolorowo nukleonów w jądrach to silne oddziaływanie resztkowe).
- Regularności w widmie mas hadronów i pomiary przekrojów czynnych N-N i pion-N były opisane przez statyczny model kwarków.
- Model partonowy – połowę pędu hadronu stanowią **gluony oraz kwarki morza** powstałe z kolorowego pola.
- Oddz. silne opisane są poprzez wymianę bozonu pośredniczącego (gluonu), którego własności muszą opisywać: krótkozasięgowość i zależność funkcji struktury od przekazu pędu.
- Gluony – odpowiednik fotonów w elektromagnetyzmie.
- Kolor – odpowiednik ładunku elektrycznego, ale istniejący w trzech wartościach {**r**, **g**, **b**}, takich, że:

$$\begin{aligned} r + \bar{r} &= 0 \\ g + \bar{g} &= 0 \\ b + \bar{b} &= 0 \end{aligned}$$



Ładunek kolorowy

- Ładunek kolorowy nie może być zmierzony – kwarki są zawsze obserwowane jako uwięzione w „białym” (neutralnym kolorowo) hadronie: $r + g + b = 0$.
- Funkcja falowa kwarka z uwzględnieniem koloru, to (znany nam) spinor Diraca z domniemanym (tzn. wiemy, że tam jest, ale nie piszemy go wprost) kolorem.
- Prawdopodobieństwo wystąpienia kwarka w każdym kolorze wynosi $1/3$.
- Oddziaływanie pomiędzy kwarkami zachodzi poprzez wymianę gluonu. Jakie te gluony mogą być?
- Każdy kolor występuje również jako anty-kolor, czyli mamy 9 kombinacji typu kolor-anty-kolor. $r\bar{r}, g\bar{g}, b\bar{b}, g\bar{r}, r\bar{g}, r\bar{b}, b\bar{r}, g\bar{b}, b\bar{g}$



Kwarki mają kolor r, g, b
Antykwarki mają antykolor: $\bar{r}, \bar{g}, \bar{b}$

$$r = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$g = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

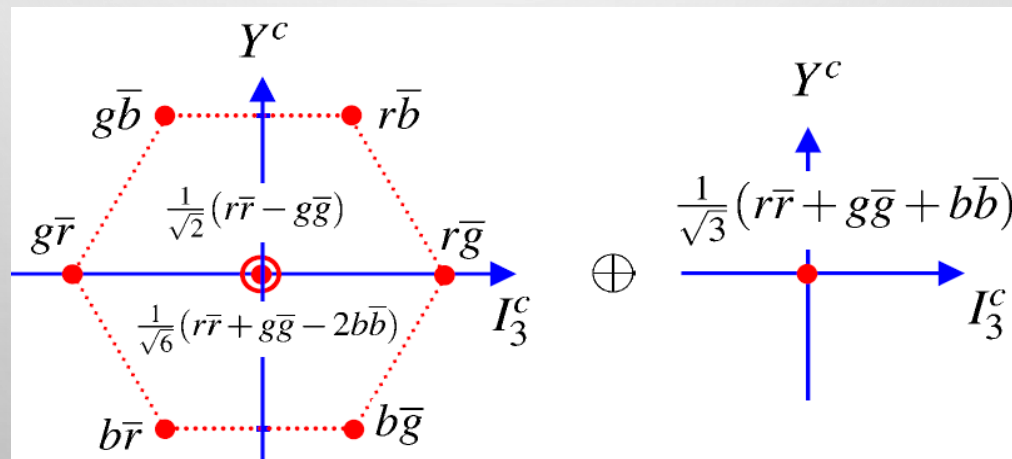
$$b = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Kolorowa funkcja falowa

- Skoro są 3 kolory i 3 antykolory, to powinno być 9 gluonów: $r\bar{r}, g\bar{g}, b\bar{b}, g\bar{r}, r\bar{g}, r\bar{b}, b\bar{r}, g\bar{b}, b\bar{g}$
- Kombinacje: $r\bar{r}, g\bar{g}, b\bar{b}$ są neutralne kolorowo. Neutralny gluon zachowywałby się jak foton, a oddziaływanie silne miałoby nieskończony zasięg.
- Zostaje 8 kolorowych gluonów, jakich?
- Konstrukcja „kolorowej” funkcji falowej oparta jest na wzorcu z symetrii zapachowej $\{u,d,s\}^*$, tzn zamieniamy:

$$\begin{aligned} u &\rightarrow r \\ d &\rightarrow g \\ s &\rightarrow b \end{aligned}$$

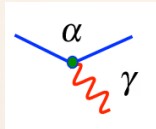
i mamy kolorowe: oktet i singlet



Oddziaływania elektromagnetyczne a silne

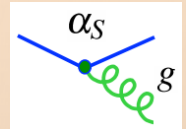
QED:

1. ładunek - elektryczny dodatni i ujemny
2. ładunek jest zachowany
3. foton jest bezmasowym bozonem
4. foton nie ma ładunku
5. potencjał $V(r) \sim \frac{1}{r}$



QCD:

1. ładunek silny – KOLOR w trzech rodzajach (r g b)
2. ładunek kolorowy jest zachowany
3. gluony są bezmasowymi bozonami
4. gluony mają kolor, czyli kolor jest wymieniany
np. rozpraszanie kwarka r na kwarku g
5. Część potencjału jest postaci $V(r) \sim \frac{1}{r}$

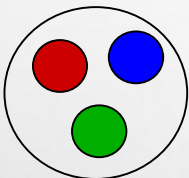


- Oddz. silne zależy tylko od koloru (nie zależy ani od zapachu kwarku ani od ład. elektrycznego).
- Kolor nie może być zmierzony – prawdopodob., że kwark będzie w stanie o danym kolorze = 1/3.
- Gluony niosą kombinację kolorów (porównać z mezonami zbudowanymi z kwarków u, d, s):

$$\begin{aligned}
 g_1 &\sim \bar{R}G & g_2 &\sim \bar{R}B & g_3 &\sim \bar{G}R & g_4 &\sim \bar{G}B & g_5 &\sim \bar{B}R \\
 g_6 &\sim \bar{B}G & g_7 &\sim R\bar{R} - G\bar{G} & g_8 &\sim R\bar{R} + G\bar{G} - 2B\bar{B}
 \end{aligned}$$

Kolor

- Rzeczywista cząstka jest neutralna kolorowo, czyli kwarki w mezonie muszą mieć przeciwne kolory (np. red- anty red), a w barionach muszą być we wszystkich kolorach.

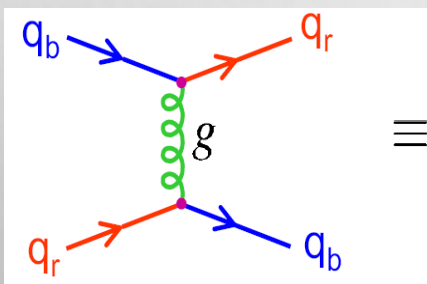


$$\underbrace{q\bar{q}}_{np} \rightarrow \pi^0 \equiv \frac{1}{\sqrt{18}}(u\bar{u} + u\bar{u} + u\bar{u} + d\bar{d} + d\bar{d} + d\bar{d})$$

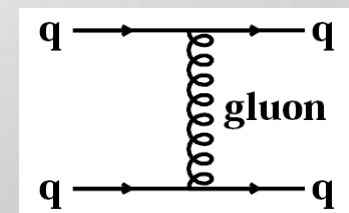
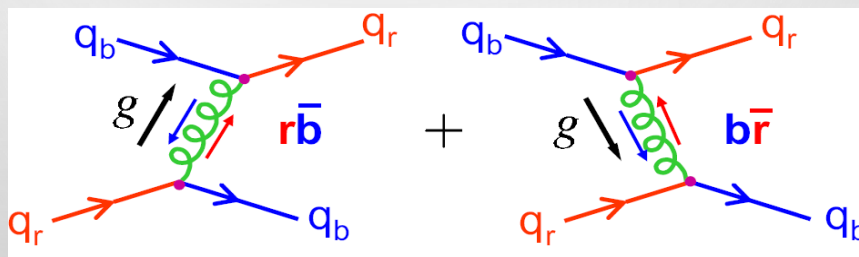
$$\underbrace{qqq}_{np} \equiv p \equiv \frac{1}{\sqrt{81}}(uud + uud + inne)$$

- Na diagramach nie pokazuje się kolorów – kolor jest w oddz. zachowany.

prof. M.A.Thomson



\equiv



wymieniany gluon ma ładunek $b\bar{r}$

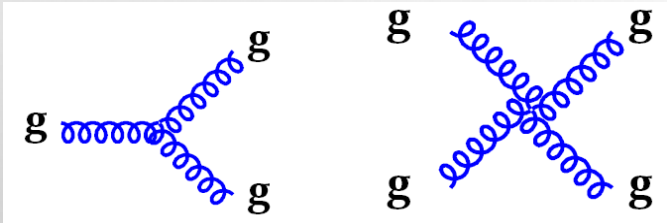
kwark r emituje gluon i zmienia ładunek na b ,
kwark b absorbuje gluon i zmienia ładunek na r

Samooddziaływanie gluonów

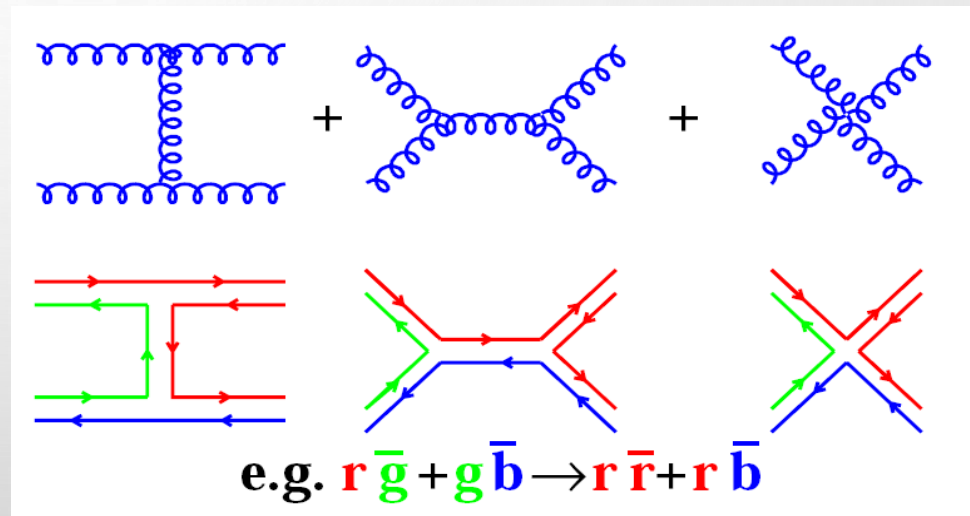
Podstawowa różnica pomiędzy QED a QCD – gluon przenosi ładunek „kolorowy” -

GLUON MOŻE ODDZIAŁYWAĆ Z INNYM GLUONEM

Kreacja pary gluonów przez gluon
(wierzchołek trójgluonowy):



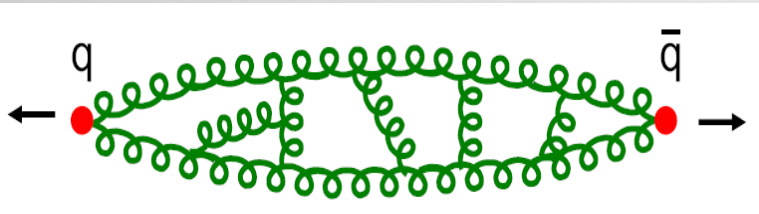
Rozpraszanie gluonów



Uwięzienie

Swobodne kwarki nie są **NIGDY** obserwowane! Nikt jeszcze nie zobaczył kwarka próbując rozbić proton.

1. kwarki są **ZAWSZE** uwięzione w hadronach,
 2. jest to konsekwencją silnego samooddziaływania gluonów
- Rozpatrzmy mezon – dwa kwarki i silne (kolorowe) pole pomiędzy nimi na odległości ok. 1 fm.
 - Gdy kwarki się trochę rozsuną – rośnie siła pomiędzy nimi – gluony przenoszące siłę są dodatkowym źródłem pola – przyciągają się.
 - Linie łączące kwarki stanowią napięte struny. Struna gromadzi energię, a oddzielenie od siebie kwarków wymaga siły. $V(r) \sim r$
 - Gdy rośnie odległość – zgromadzona energia jest na tyle duża, że powstaje para kwark-antykwarek i mamy nowy mezon.



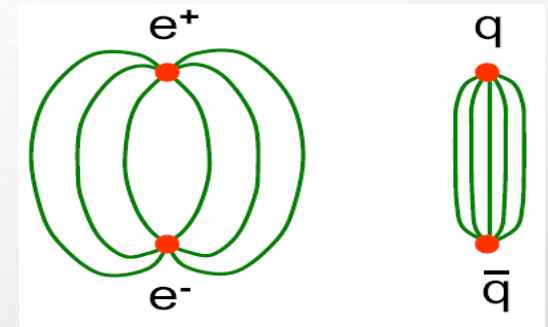
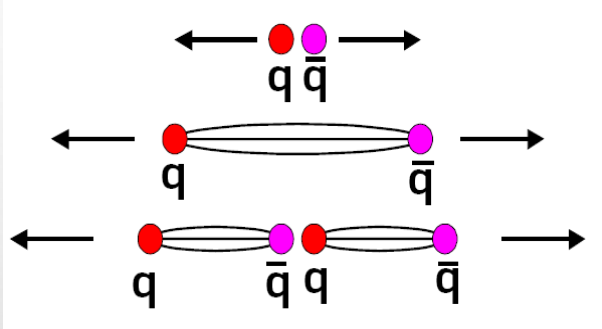
UWIEZIENIE KWARKÓW (confinement)

- mechanizm utrzymujący kwarki w hadronie
- konsekwencja oddziaływania gluonów ze sobą

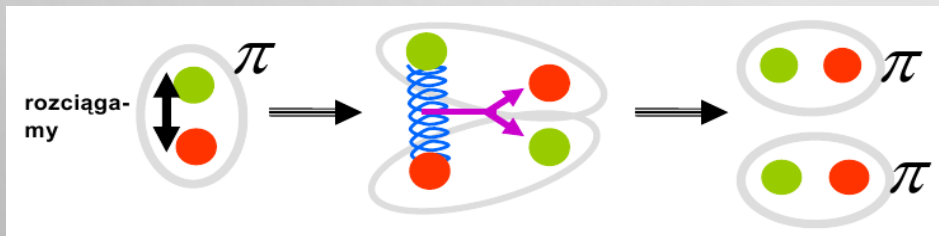
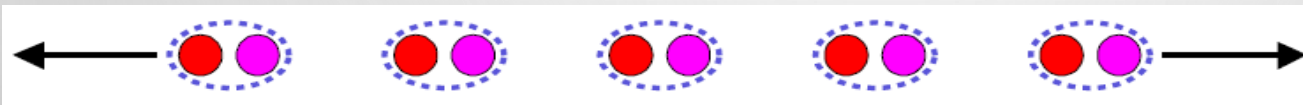
- Do rozdzielenia kwarków potrzebna nieskończona energia.

Pęki hadronowe

- Przy próbie rozdzielenia kwarków, energia zgromadzona w strunie rośnie liniowo z odległością.
- Gdy przekroczony zostanie próg na produkcję dwóch kwarków – kreacja pary:

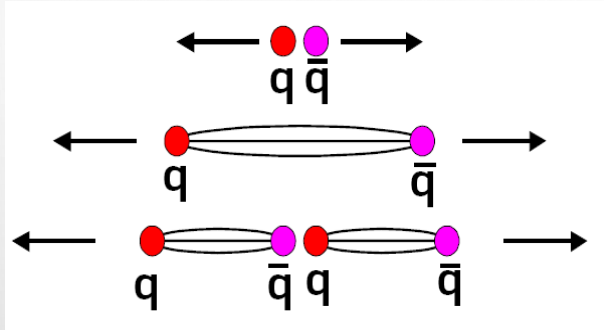


następnie „sparowane” kwarki się rozsuwają – powstają hadrony

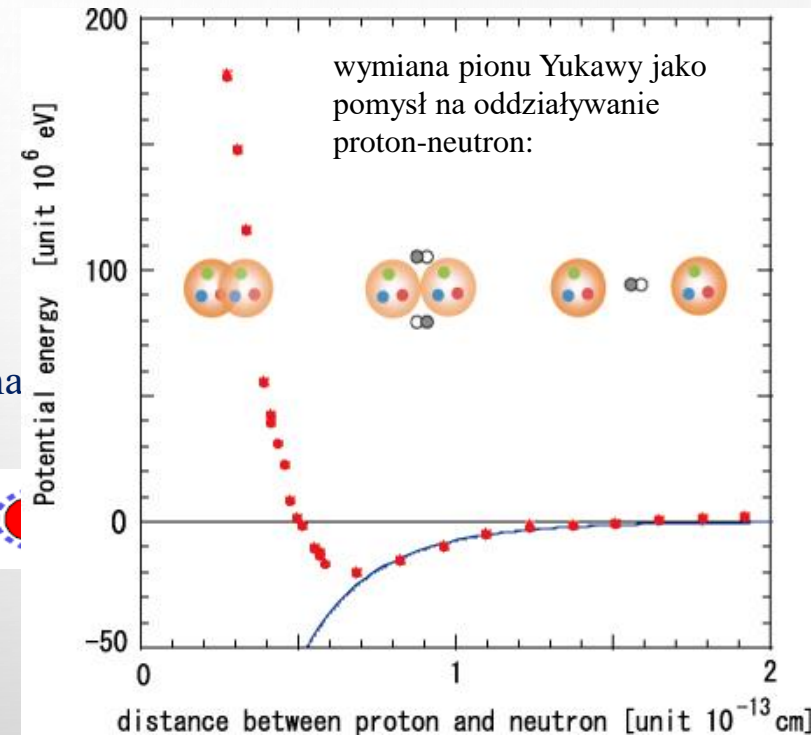
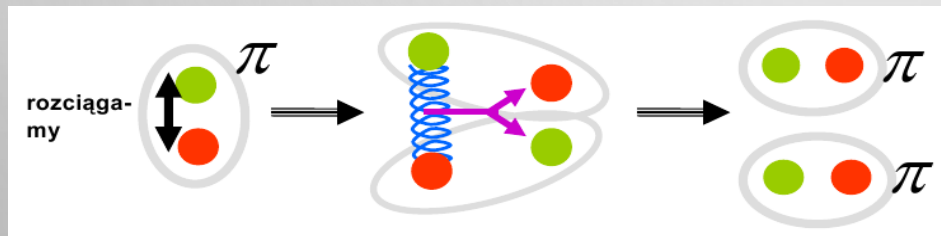
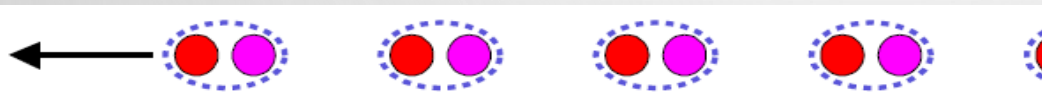


Pęki hadronowe

- Przy próbie rozdzielenia kwarków, energia zgromadzona w strunie rośnie liniowo z odległością.
- Gdy przekroczony zostanie próg na produkcję dwóch kwarków – kreacja pary:



następnie „sparowane” kwarki się rozsuwają – powstają hadrony

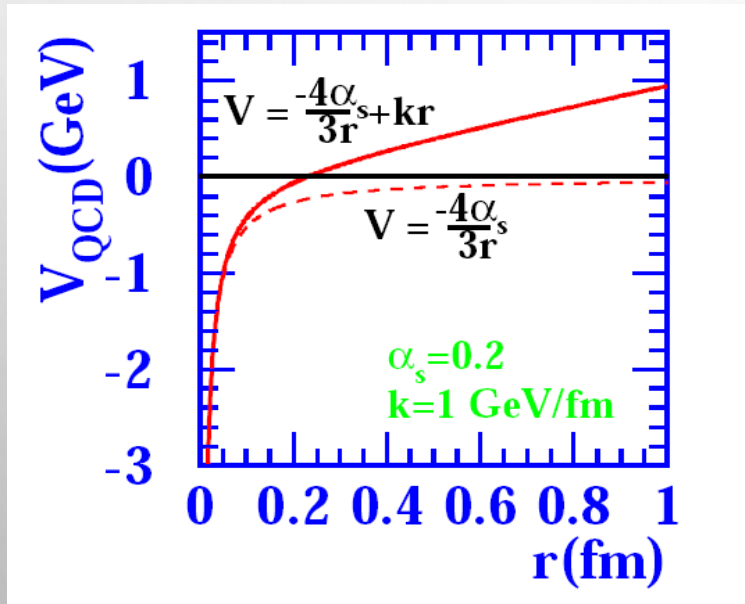


Silna stała

- Potencjał QCD ma dwie składowe:
 - samooddziaływanie gluonów daje składową długozasięgową: $V(r) = kr$,
 - na małych odległościach kwarki w mezonie silnie się przyciągają – na podobieństwo QED:

$$V_{QCD}(r) = -\frac{4}{3} \frac{\alpha_s}{r} + kr$$

ten potencjał bardzo dobrze opisuje czarmonia i bottomia



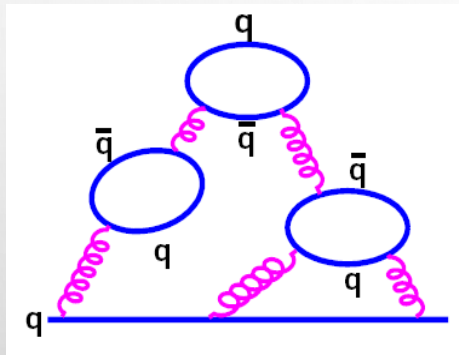
$$\begin{aligned} V_{QCD} &= -\frac{\alpha_s}{r} + kr \\ \text{with } k &\approx 1 \text{ GeV/fm} \\ F &= -\frac{dV}{dr} = \frac{\alpha_s}{r^2} + k \\ \text{at large } r \quad F &= k = \frac{1.6 \times 10^{-10}}{10^{-15}} \text{ N} \\ &= 160000 \text{ N} \end{aligned}$$

α_s określa siłę silnych oddziaływań.

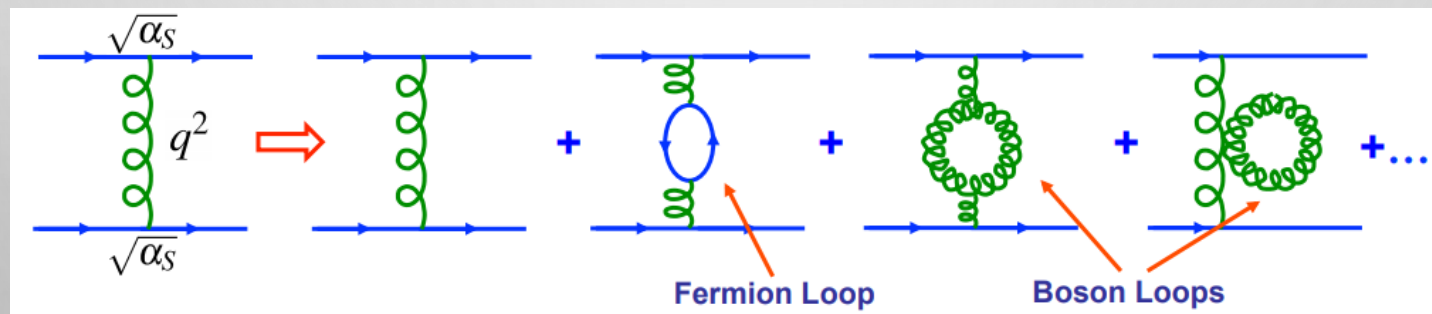
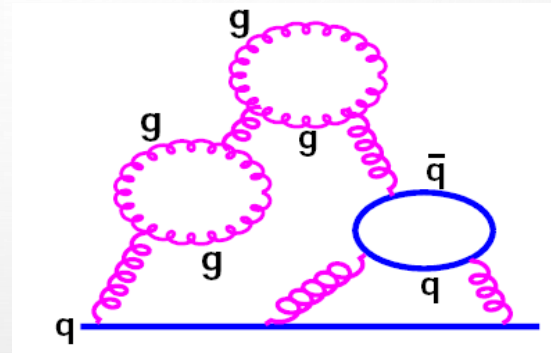
Ale (tak jak w QED) nie jest to wartość stała...

Silna stała

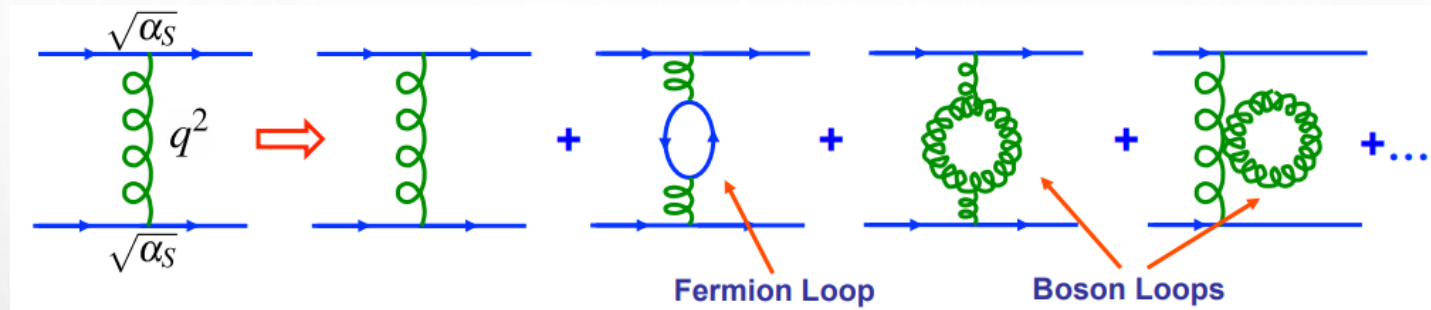
W QCD kwantowa fluktuacja próżni daje chmurę wirtualnych par kwarków:



ale (w przeciwieństwie do QED) – również chmurę samooddziaływających gluonów:



Silna stała



- Dodając kolejne amplitudy musimy brać pod uwagę efekty interferencyjne – w tym przypadku pętle bozonowe interferują destrukcyjnie i suma diagramów jest mniejsza niż diagram wejściowy, a silna stała sprzężenia:

$$\alpha_s(Q^2) = \frac{\alpha_s(Q_0^2)}{1 + B \alpha_s(Q_0^2) \ln(Q^2/Q_0^2)}$$

za ten „+” Nagroda Nobla 2004 (Gross, Politzer, Wilczek)

$$B = (11N_c - 2N_f)12\pi$$

$$N_c = 3 \text{ (kolory)}$$

$$N_f = 6 \text{ (flavoury)}$$

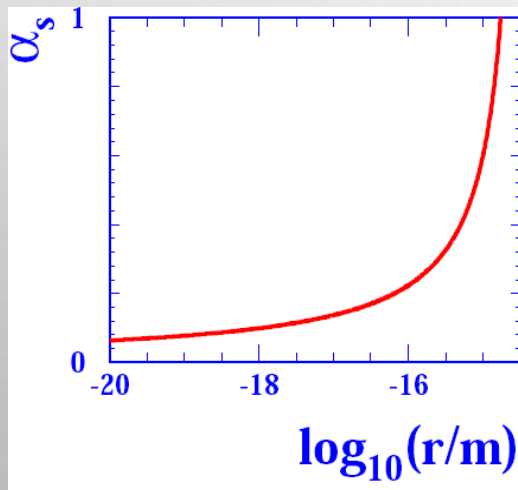
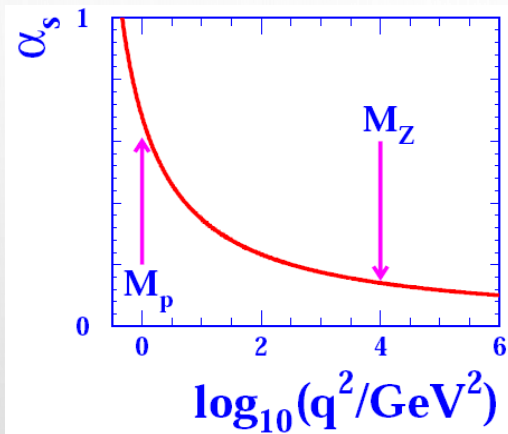
$$B > 0$$

α_s maleje ze wzrostem Q^2 !

ANTYEKTRANOWANIE!
kamufaż...

Biegająca silna stała

- Przy niskich energiach $Q^2 = 1 \text{ GeV}^2$ (dużych odległościach) $\alpha_s = 1$ – problem z rachunkiem zaburzeń (obszar nieperturbacyjny)



Przy wysokich energiach - α_s małe – kwarki są swobodnymi cząstkami – asymptotyczna swoboda, obszar perturbacyjny:

$$\text{przy } Q_0^2 = M_Z^2: \alpha_s = 0.12$$

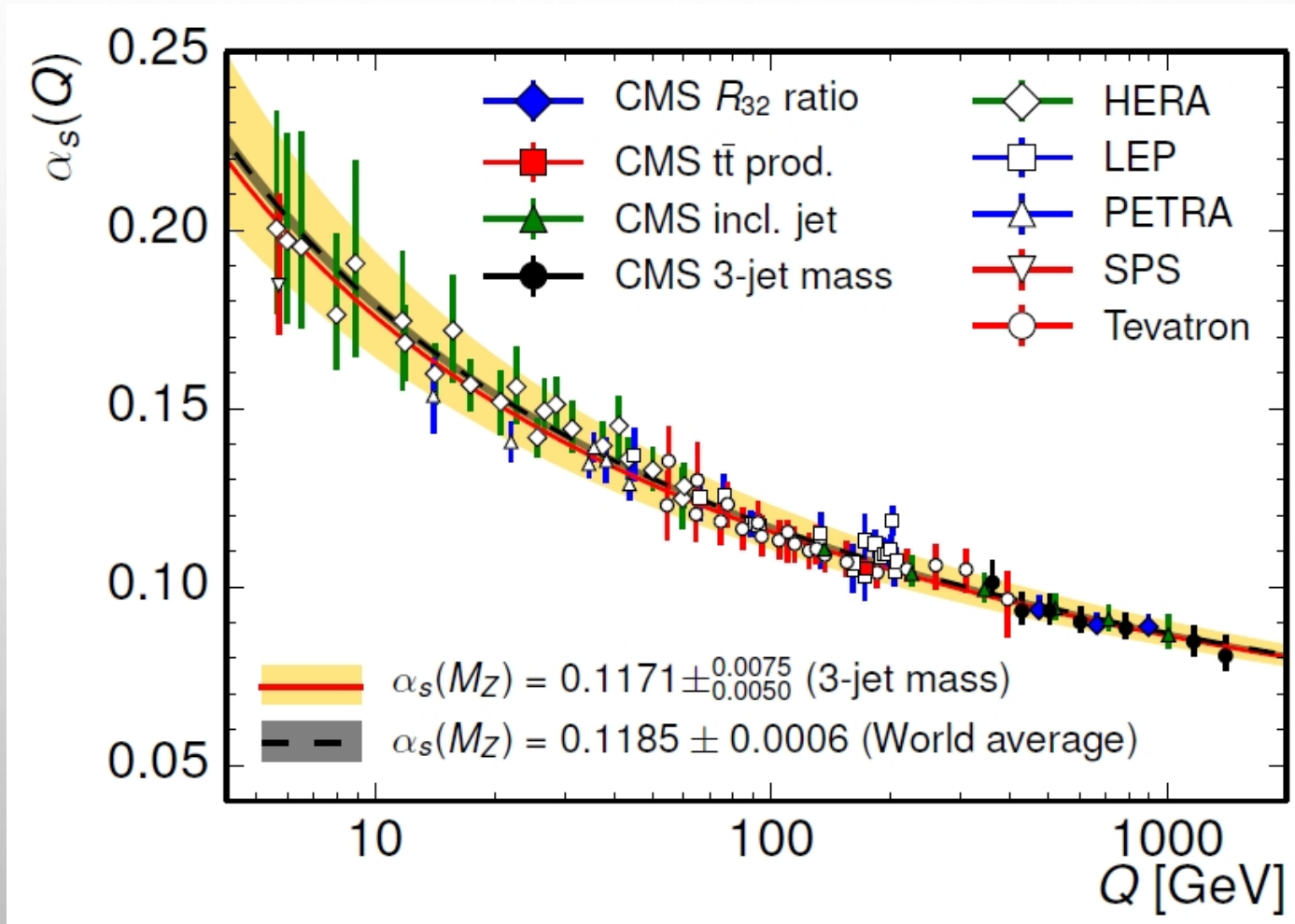
- Z powodu oddziaływania między gluonami – goły kolorowy ładunek jest ekranowany,
- ale ta kwantowa chmura niesie ze sobą **KOLOR** i efektywny ładunek kolorowy **ZWIĘKSZA** się z odległością!

Definiujemy skalę: $\Lambda_{QCD} = 200\text{-}300 \text{ MeV}$,

dla $E < \Lambda_{QCD}$ - stała α_s jest duża – obszar nieperturbacyjny (lekkie kwarki!),

dla $E > \Lambda_{QCD}$ - α_s mała – rach. zaburzeń.

Biegająca silna stała (2015)

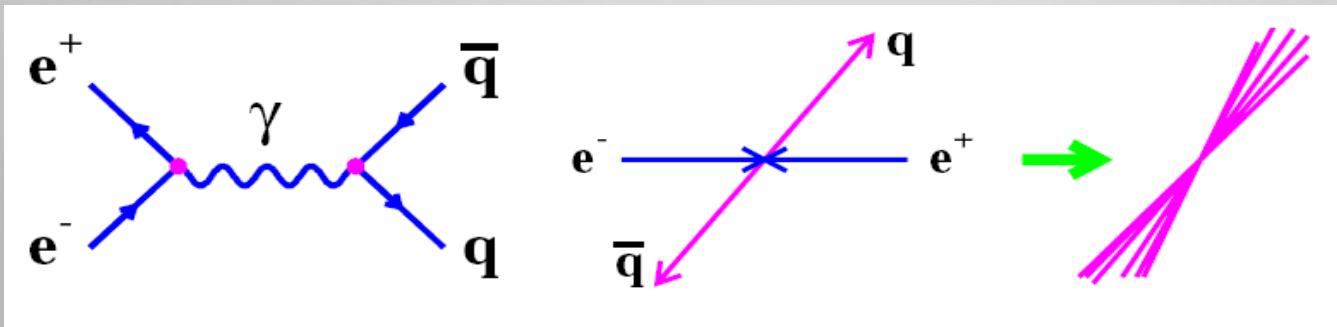
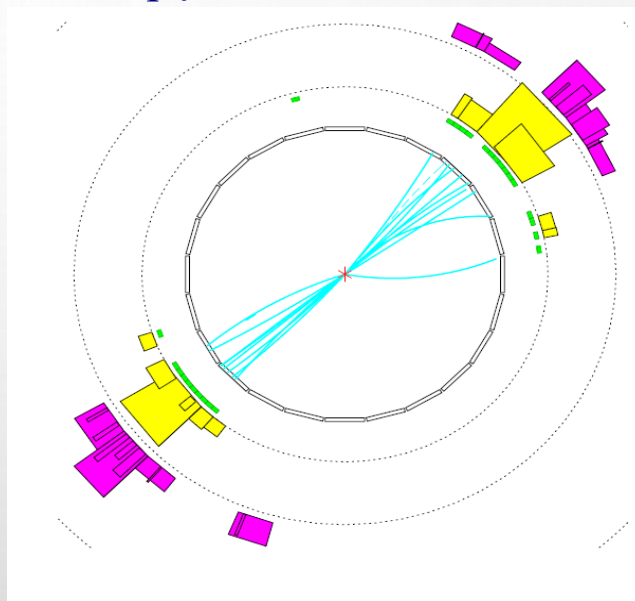
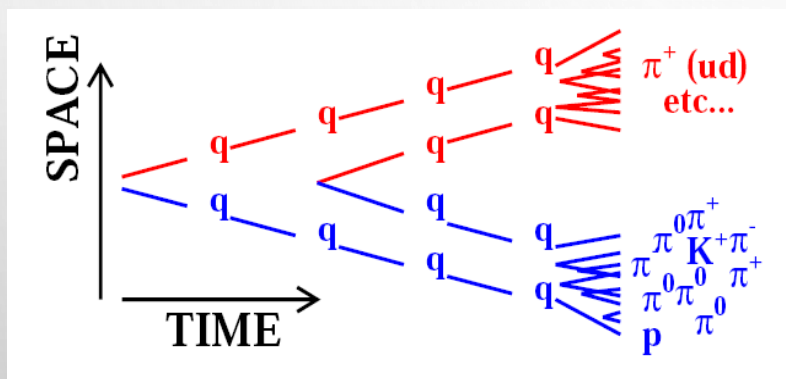


Hadronizacja

- Ze wzrostem energii powstaje coraz więcej kwarków (z kolorowego pola) – HADRONIZACJA.

Obserwuje się skolimowane PEKI HADRONOWE:

kierunek pęków – kierunek kwarków



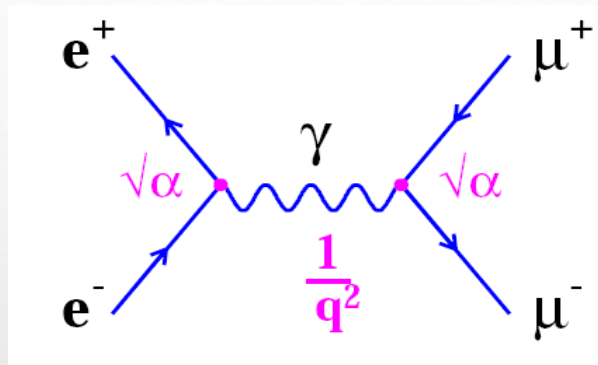
Kolor - dowody

- Istnienie koloru potwierdzone jest doświadczalnie.

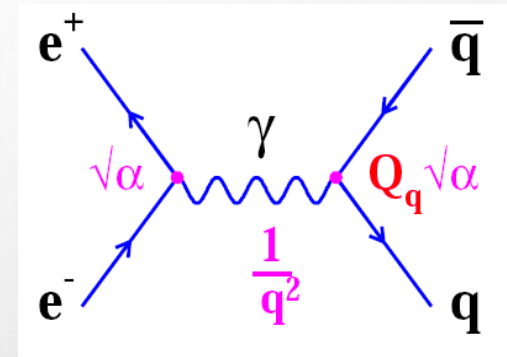
1. Porównanie przekrojów czynnych na powstanie hadronów i pary mionów anihilacji elektron - pozyton

$$R_\mu = \frac{\sigma(e^+ e^- \rightarrow q\bar{q})}{\sigma(e^+ e^- \rightarrow \mu^+ \mu^-)}$$

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



$$e^+ e^- \rightarrow q\bar{q}$$



Jeżeli pominiemy masy kwarków, stany końcowe różnią się tylko wartością ładunku elektrycznego:

$$R(e^+ e^- \rightarrow q\bar{q}) = 3 \sum_{i=u,d,s,\dots} Q_i^2$$

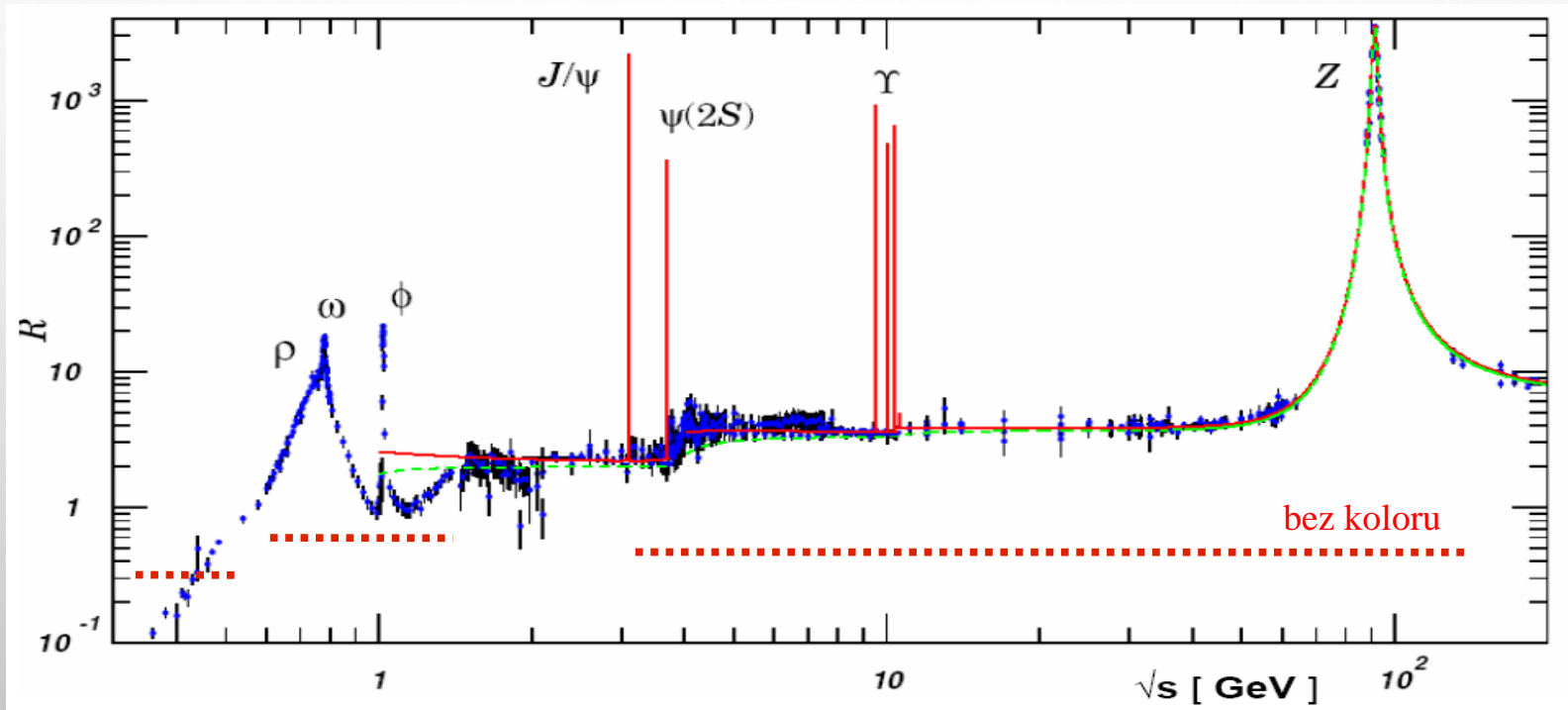
$$R(e^+e^- \rightarrow q \bar{q})$$

- Dla kwarka jednego rodzaju (np u) i w jednym kolorze: $R = Q_u^2$.
- Ale pęki hadronów mają również inne kwarki ($i = u, d, s, c, b, t$) i raczej powinno być: $R = \sum Q_i^2$
 - a gdyby jeszcze uwzględnić kolor: $R = 3 \sum Q_i^2$
 - suma uwzględnia kwarki, które są kinematycznie dostępne dla osiągniętych energii

Energy	Ratio R
$\sqrt{s} > 2m_s \sim 1 \text{ GeV}$	$3\left(\frac{4}{9} + \frac{1}{9} + \frac{1}{9}\right) = 2$ u,d,s
$\sqrt{s} > 2m_c \sim 4 \text{ GeV}$	$3\left(\frac{4}{9} + \frac{1}{9} + \frac{1}{9} + \frac{4}{9}\right) = 3\frac{1}{3}$ u,d,s,c
$\sqrt{s} > 2m_b \sim 10 \text{ GeV}$	$3\left(\dots + \frac{1}{9}\right) = 3\frac{2}{3}$ u,d,s,c,b
$\sqrt{s} > 2m_t \sim 350 \text{ GeV}$	$3\left(\dots + \frac{4}{9}\right) = 5$ u,d,s,c,b,t

R doświadczalne

Wyniki doświadczalne pochodzące z eksperymentów z anihilacją elektron-pozyton dla energii E_{CM} do 40 GeV:



dla $\sqrt{s} < 1$ GeV – formacja ρ, ω, ϕ ;

dla $\sqrt{s} > 1$ GeV – stany J/ψ ;

dla $\sqrt{s} \approx 10$ GeV – spektrum Υ .

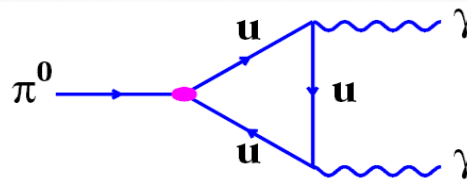
R rośnie skokowo z \sqrt{s} ;

pomiary zgodne z przewidywaniami, przy założeniu, że **kwarki mają ułamkowy ładunek i są obdarzone kolorem.**

Kolor, kolor, kolor

2. Pomiar szerokości rozpadu $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$

- obliczenia teoretyczne zgodne z doświadczeniem , tylko gdy w rachunkach QCD **uwzględni się 3 kolory.**



$$\Gamma(\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma) \propto N_{colour}^2$$

EXPT : $N_{colour} = 2.99 \pm 0.12$

3. Istnienie barionu $\Omega^-(sss)$

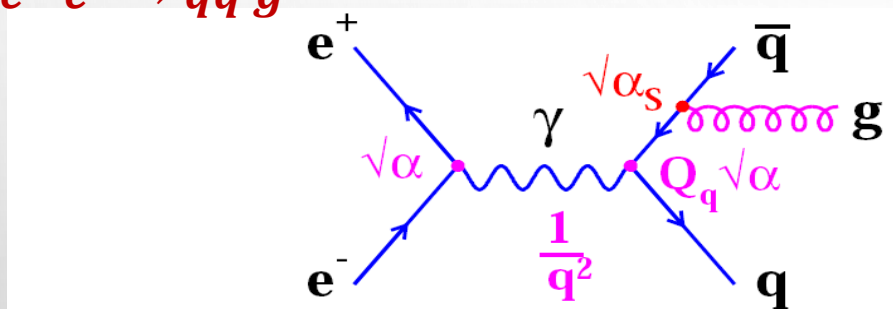
- jest to barion o spinie $J=3/2$ ($L=0$) o spinach **ustawionych równolegle: $s \uparrow s \uparrow s \uparrow$**
- jego funkcja falowa: $\psi(\Omega^-)$ = (zapach) – jest **symetryczna** wzgl. zamiany dwóch dowolnych kwarków (a fermiony wymagają **antysymetrycznej f.falowej**)
- dodatkowy czynnik: $\psi_{colour} = \frac{1}{\sqrt{6}}(rgb + gbr + brg - grb - rbg - bgr)$

kolorowa część f-cji falowej barionu musi być antisymetryczna

Gluony - dowody

1. Gluony potwierdzone są doświadczalnie.
 - W QED elektron może emitować foton.
 - W QCD kwark może emitować gluon:

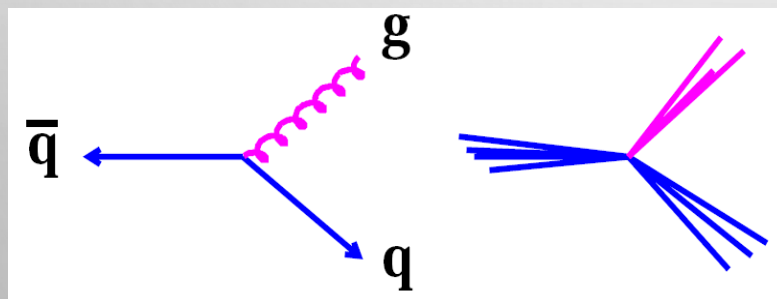
$$e^+ e^- \rightarrow q \bar{q} g$$



w elemencie macierzowym mamy dodatkowy czynnik $\sqrt{\alpha_s}$,
a w przekroju czynnym α_s

Fotony można rejestrować, natomiast gluony hadronizują w pęki.

W powyższym procesie oprócz dwóch pęków od kwarków – mamy trzeci – od gluonu:

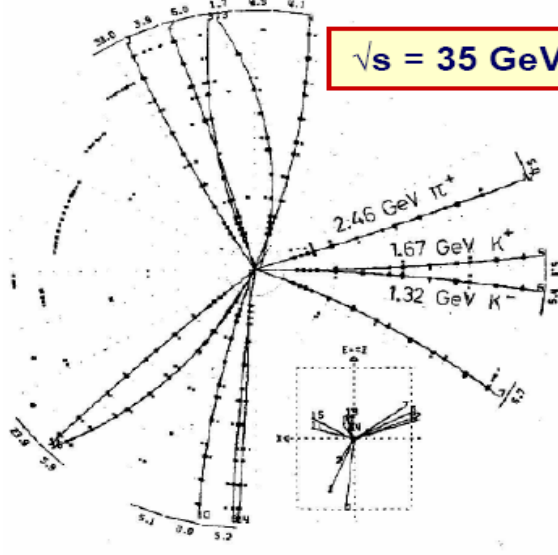


Gluony mają spin – rozkład kątowy „jetów”

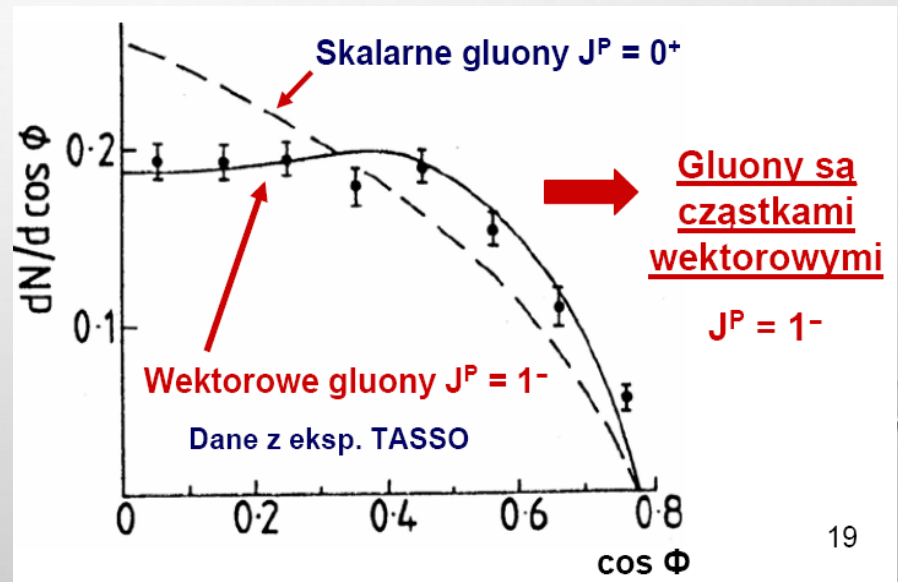
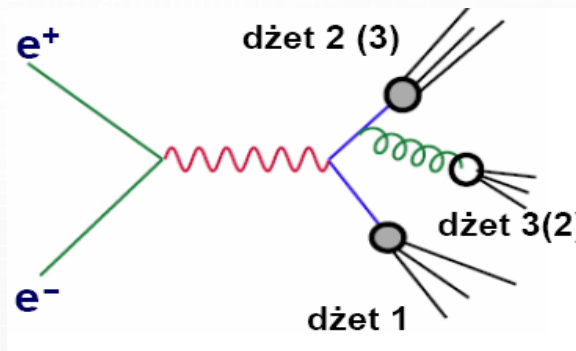
Wyniki doświadczalne

Eksperyment JADE

$\sqrt{s} = 35 \text{ GeV}$



$e^+e^- \rightarrow q\bar{q}g \rightarrow 3 \text{ dżety}$

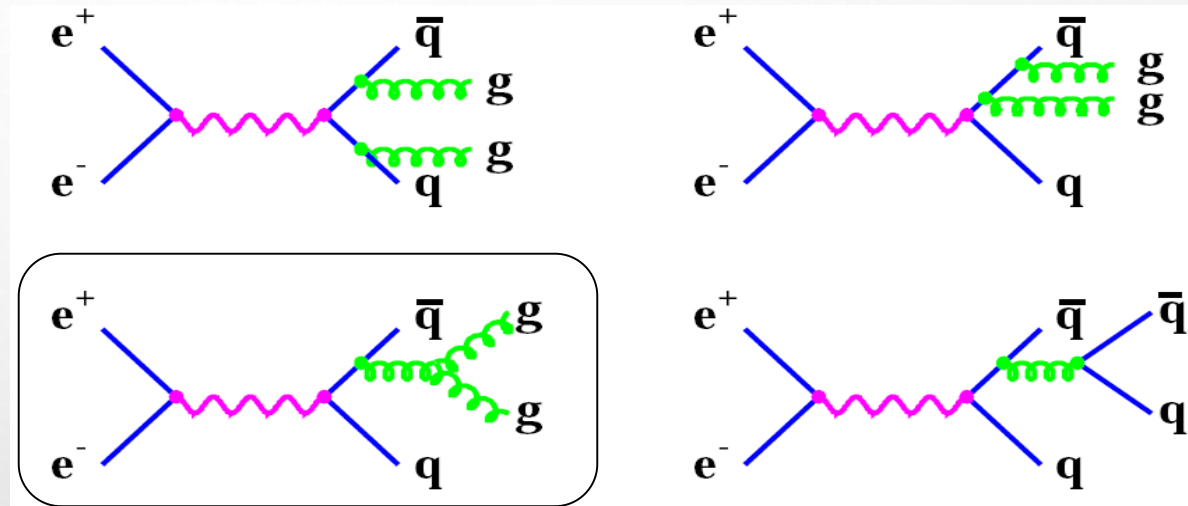
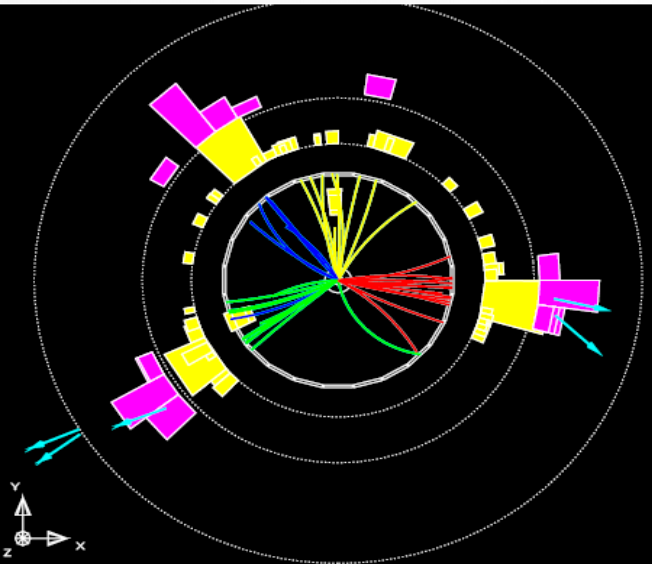


Rozkład kątowy pęków zależy od spinu -
porównanie danych i hipotezy $s(g) = 1$

Cztery pęki hadronowe

- Przypadek z 4 pękami hadronów.

Możliwe procesy:



Rozkłady kątowe rozstrzygają, czy jest to przypadek z 3-gluonowym wierzchołkiem (3 cząstki o spinie $s = 1$).

Taki przypadek jest dowodem na **samooddziaływanie** gluonów.

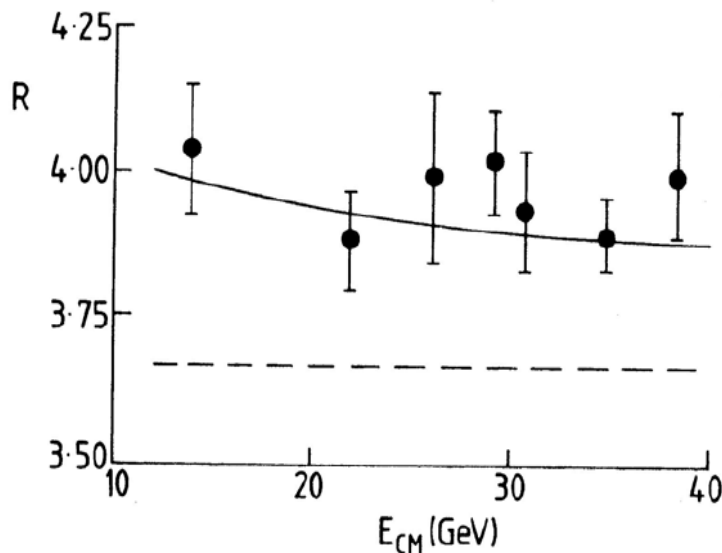
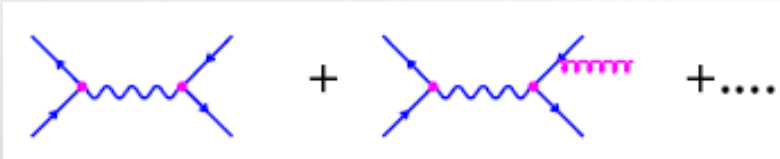
Pomiar α_s (1)

- Rozróżnienie przypadków z 2 i 3 pękami hadronów pozwala na wyznaczenie α_s
 - popatrzmy znowu na stosunek R:

$$R = 3 \sum Q_q^2$$

- ale po emisji dodatkowego gluonu, przekrój czynny dostaje poprawkę:

$$R = 3 \sum Q_q^2 \frac{\alpha_s}{\pi}$$



$$\sum_q Q_q^2 = 3\frac{2}{3}$$

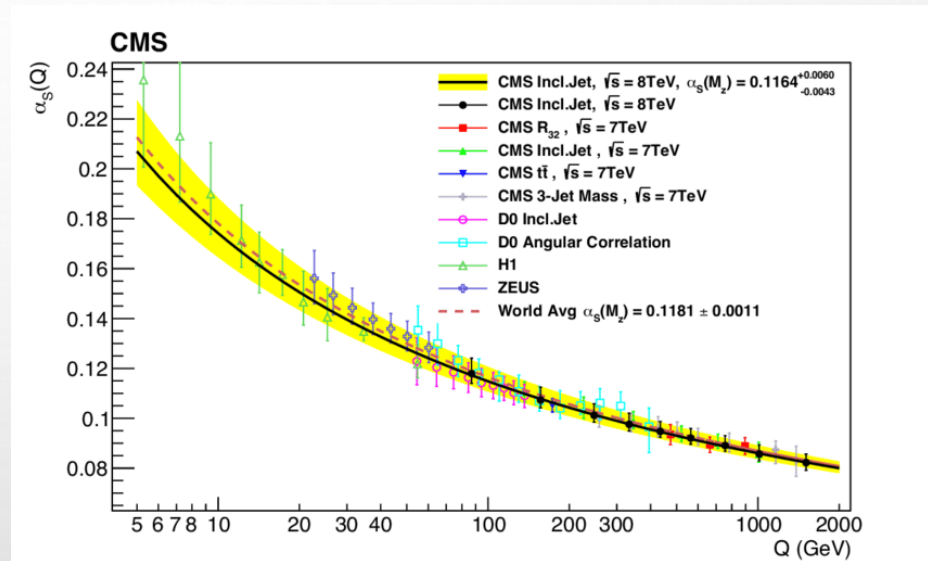
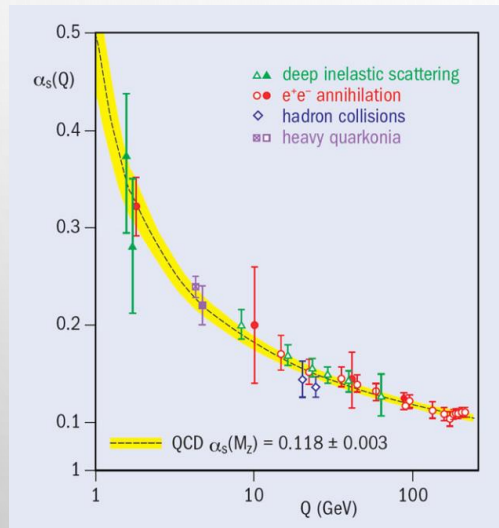
$$(1 + \frac{\alpha_s}{\pi}) \approx \frac{3.9}{3.66}$$

$$\alpha_s(q^2 = 25^2) \approx 0.20$$

Pomiar α_s (1)

- Rozróżnienie przypadków z więcej niż dwoma pękami hadronów:

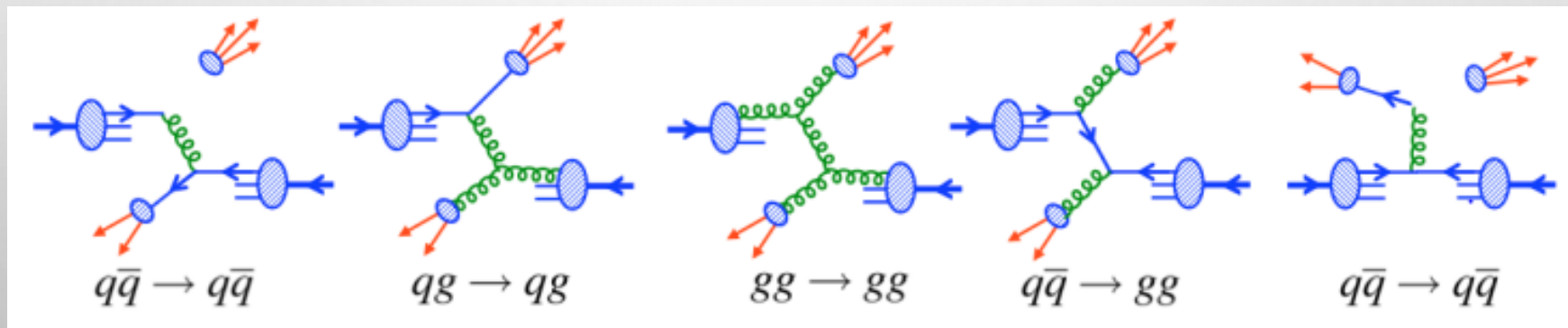
$$\frac{\sigma(3 \text{ jets})}{\sigma(2 \text{ jets})} = \frac{\sigma(e^+ e^- \rightarrow q\bar{q}g)}{\sigma(e^+ e^- \rightarrow q\bar{q})} \propto \alpha_s$$



- Zależność silnej stałej α_s od przekazu pędu przy różnych skalach energii jest najważniejszym testem QCD.
- Przy oddz. protonów wartość α_s zależy od funkcji rozkładu partonów w protonie (PDF)
- Umownie przyjmuje się masę Z^0 za skalę, w której obliczana jest α_s

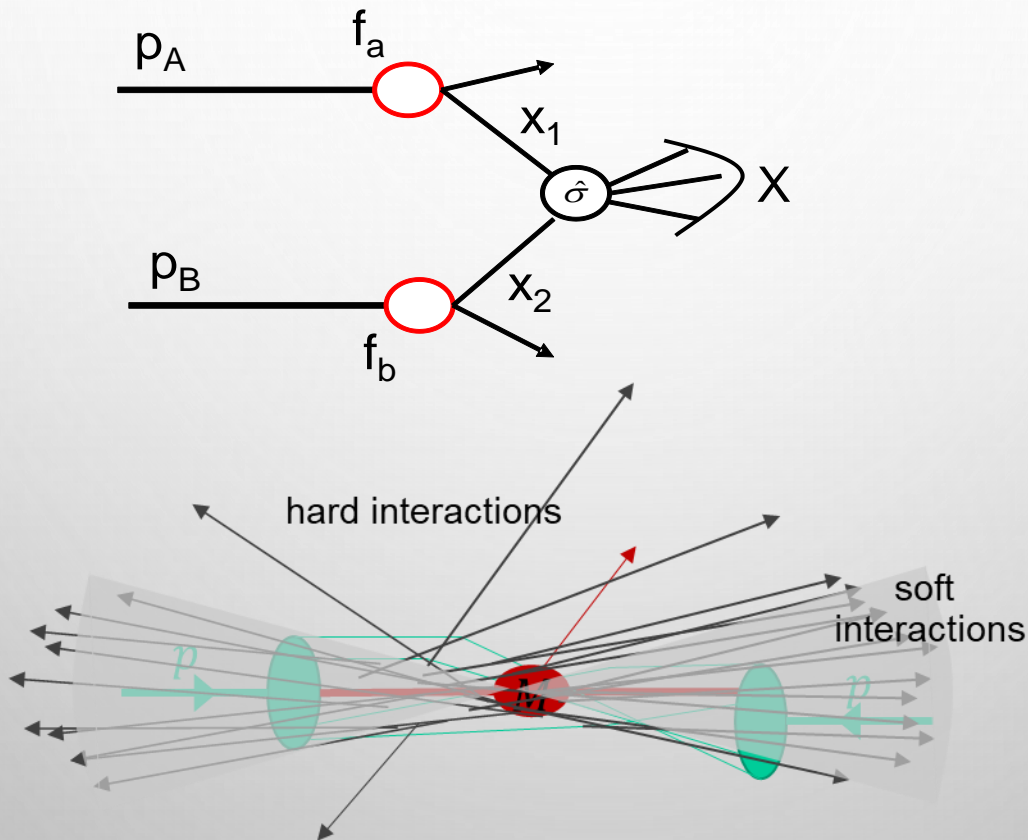
QCD @ LHC

- Obszar kinematyczny dostępny w zderzeniach proton-proton przy energiach 3-7-14 TeV obejmuje najszerze przedziały przekazów pędu Q^2 i x .
- Wszystkie procesy na LHC pochodzą z oddziaływania gluonów i kwarków morza, zarówno „miękkich” (małe p_T), jak i „twardych” (duże pędy poprzeczne, QCD)

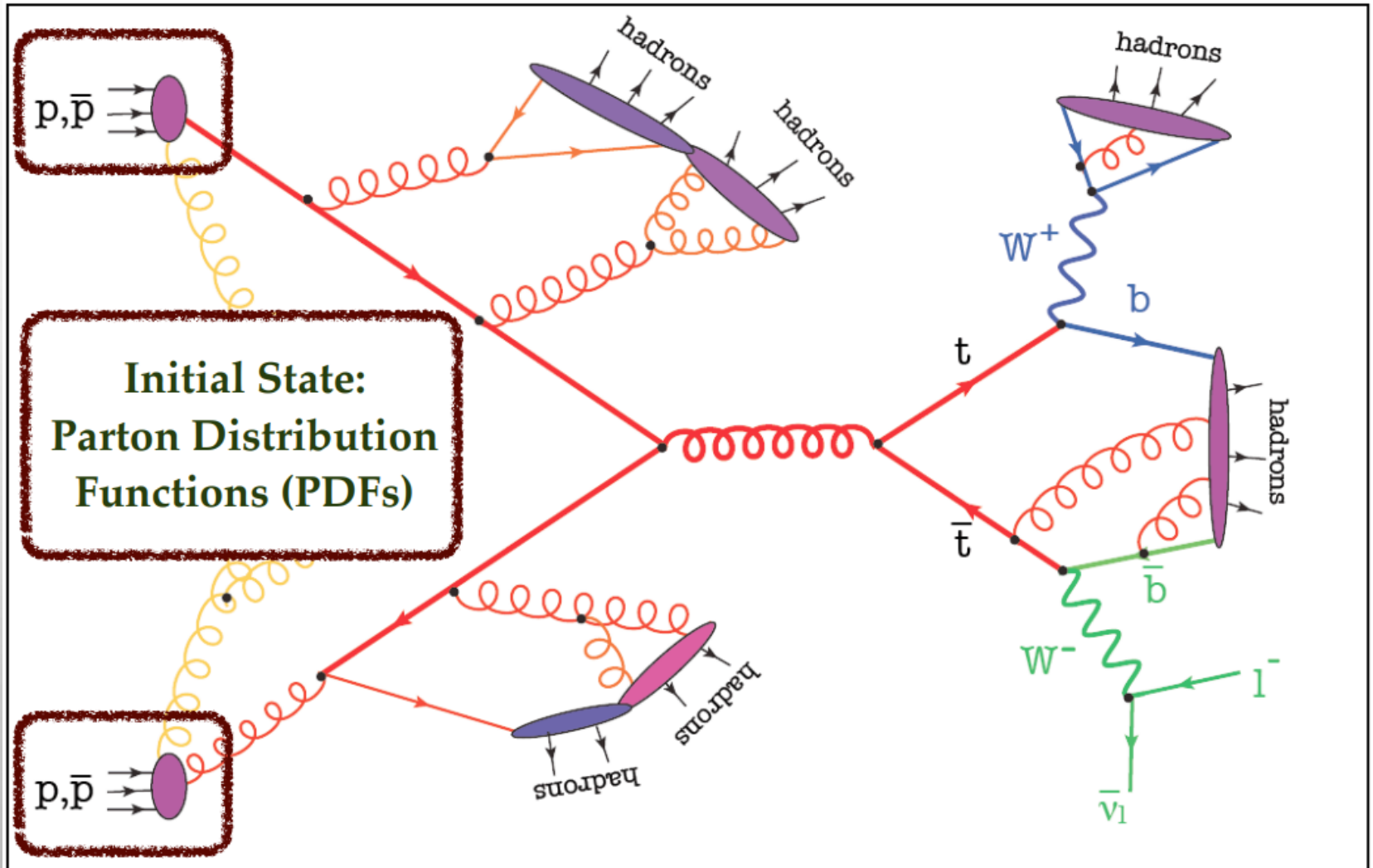


QCD @ LHC

- Jakiegokolwiek odkrycie stanu X jest rezultatem wyznaczenia i zrozumienia postaci PDFu

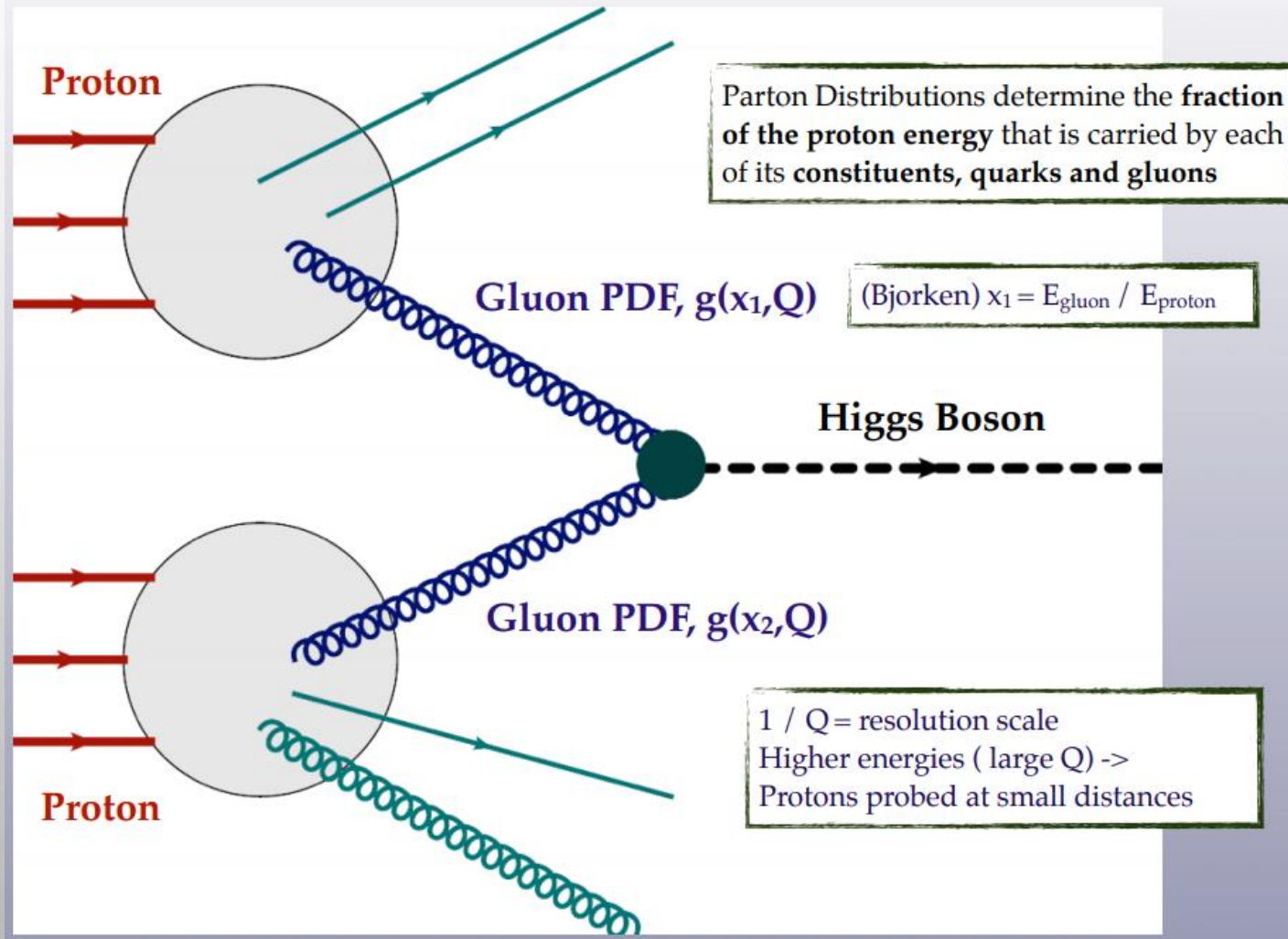


QCD @ LHC



Drawing by K. Hamilton

Parton Distribution Functions - I

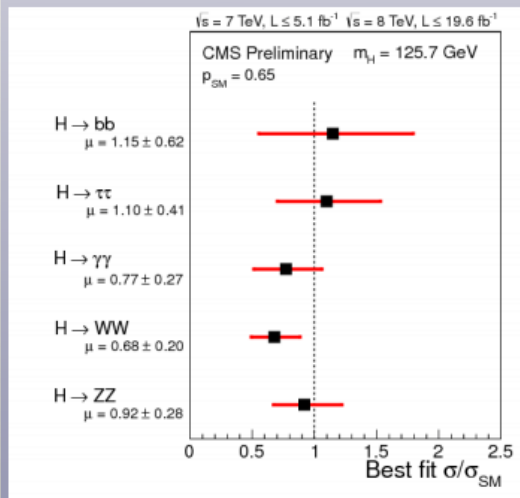


Parton Distribution Functions - II

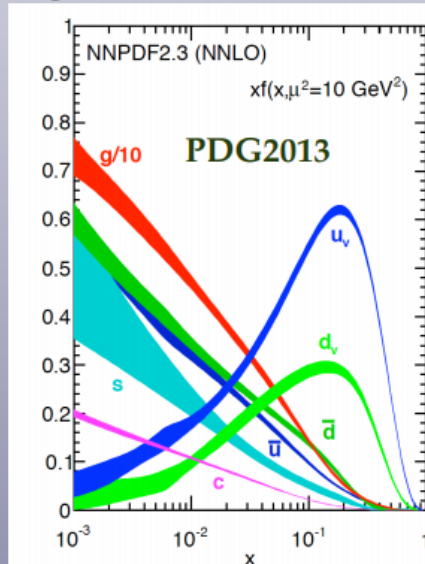
LHC cross-sections can be written as a convolution of **Parton Distributions** and **partonic cross-sections**:

$$\sigma_X(s, M_X^2) = \sum_{a,b} \int_{x_{\min}}^1 dx_1 dx_2 f_{a/h_1}(x_1, M_X^2) f_{b/h_2}(x_2, M_X^2) \hat{\sigma}_{ab \rightarrow X}(x_1 x_2 s, M_X^2)$$

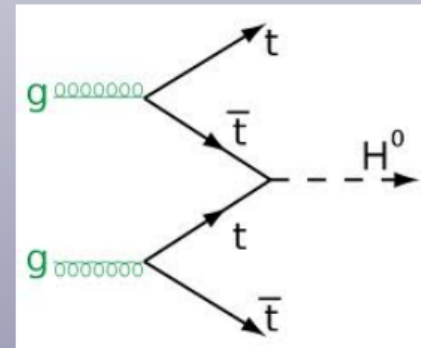
Hadronic cross-section to be compared with exp data eg Higgs coupling extraction



Parton Distributions are intrinsically non-perturbative quantities to be extracted from experimental data

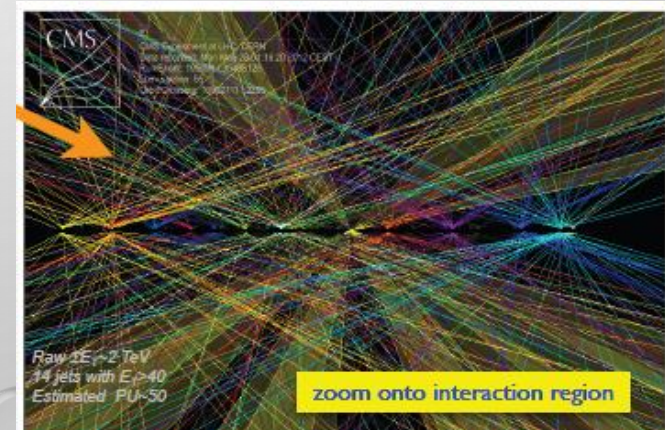
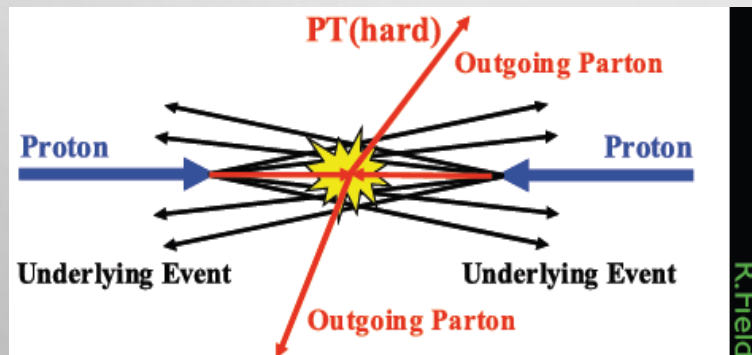


Partonic cross-sections: perturbatively calculable as an expansion in the QCD and electroweak couplings



Czy było oddziaływanie?

- Teoria oddziaływań silnych: chromodynamika kwantowa (QCD) podobna do QED ale:
 - kwarki są uwięzione,
 - gluony mają ładunek silny (kolor) i oddziałują ze sobą.
- Kwarki, gluony i ładunek kolorowy – potwierdzone doświadczalnie.
- Przy niskich energiach – stała silna jest duża i nie można stosować teorii perturbacyjnej (modele),
- Przy wysokich energiach – stała jest mała i kwarki są swobodne (asymptotycznie), a teoria perturbacyjna bardzo dobrze opisuje wyniki.
- Przewidywania QCD (biegnąca silna stała sprzężenia) potwierdzone w oddziaływaniach protonów przy energiach do 4 TeV (LHC).
- Wyznaczenie partonowej funkcji gęstości jest kluczowe w opisie produkcji nowych stanów na LHC.



Podsumowanie

1. Oddziaływania silne – widoczne przede wszystkim w siłach wiążących nukleony.
2. Oddziaływania silne zachodzą pomiędzy kwarkami.
3. Oddziaływania silne zachodzą pomiędzy kwarkami, cząstkami obdarzonymi ładunkiem kolorowym.
4. Oddziaływania silne przenoszone są przez bezmasowe gluony. Gluony również mają kolor.
5. Z powodu samooddziaływania gluonów kwarki są uwięzione w hadronach, a silna stała sprzężenia ROŚNIE ze wzrostem odległości między kwarkami.
6. Jakże mamy na to dowody eksperymentalne?

