

ODDZIAŁYWANIA SILNE

Jakub Wojnarowski

ODDZIAŁYWANIA SILNE

- Oddziaływania silne odpowiedzialne są za budowę jąder atomowych, oddziaływania jądrowe, oraz wiązanie kwarków w hadrony
- Oddziaływania silne zachodzą poprzez wymianę gluonów, które są odpowiednikiem fotonów w oddziaływaniach elektromagnetycznych
- Ich zasięg jest bardzo mały (do ok. 10^{-15}m)
- W oddziaływaniach silnych odpowiednikiem ładunku elektrycznego jest ładunek kolorowy, który występuje w 3 rodzajach : **r**, **g**, **b**.
- Kwarki mają kolory: **r**, **g**, **b**.
- Antykwarki mają kolory: $\bar{\text{r}}$, $\bar{\text{g}}$, $\bar{\text{b}}$.
- Kolor jest zawsze zachowany w oddziaływaniach
- Wszystkie obserwowalne cząstki są neutralne kolorowo, więc kolory kwarków wchodzących w skład hadronów muszą mieć kombinacje:

$$\text{r} + \text{g} + \text{b} = 0$$

$$\text{r} + \bar{\text{r}} = 0, \text{g} + \bar{\text{g}} = 0, \text{b} + \bar{\text{b}} = 0$$

GLUONY

- Gluon opisuje się jako kombinacja jednego koloru i jednego antykoloru. Istnieje 9 takich kombinacji: $r\bar{r}$, $g\bar{g}$, $b\bar{b}$, $g\bar{r}$, $r\bar{g}$, $r\bar{b}$, $b\bar{r}$, $g\bar{b}$, $b\bar{g}$.
- Te kombinacje nie są równoznaczne z gluonami. Przede wszystkim gluonów jest 8, a nie 9.
- Oddziaływania silne są opisane przez grupę $SU(3)$ i z niej wynika postać gluonów.

GRUPA SU(3)

- W grupie SU(3) przejście z jednego stanu do drugiego jest opisane przez macierz transformacji

$$\begin{pmatrix} r' \\ g' \\ b' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r\bar{r} & r\bar{g} & r\bar{b} \\ g\bar{r} & g\bar{g} & g\bar{b} \\ b\bar{r} & b\bar{g} & b\bar{b} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r \\ g \\ b \end{pmatrix}$$

- Operacje na antykolorach opisywane są przez sprzężenie hermitowskie tej macierzy
- W ogólnym przypadku macierze transformacji są zespolone, czyli mają 18 niezależnych parametrów (są liniową kombinacją 18 macierzy elementarnych)
- Każda macierz elementarna odpowiada jednemu gluonowi
- Ale gluonów nie jest 18

GRUPA SU(3)

- Macierze transformacji muszą spełniać warunek:
$$UU^\dagger = 1$$
- Daje nam to 9 równań, więc ilość niezależnych elementów redukuje się do 9.
- Mamy 9 macierzy elementarnych

$$\lambda_1 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\lambda_2 = \begin{pmatrix} 0 & -i & 0 \\ i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\lambda_3 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\lambda_4 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -i \\ 0 & 0 & 0 \\ i & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\lambda_5 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\lambda_6 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -i \\ 0 & i & 0 \end{pmatrix}$$

$$\lambda_7 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\lambda_8 = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -2 \end{pmatrix}$$

$$\lambda_9 = a \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

GRUPA SU(3)

- To daje 9 gluonów:

$$\begin{array}{lll} (\bar{r}b + b\bar{r})/\sqrt{2} & (r\bar{g} + g\bar{r})/\sqrt{2} & (b\bar{g} + g\bar{b})/\sqrt{2} \\ -i(\bar{r}b - b\bar{r})/\sqrt{2} & -i(r\bar{g} + g\bar{r})/\sqrt{2} & -i(b\bar{g} + g\bar{b})/\sqrt{2} \\ (r\bar{r} - b\bar{b})/\sqrt{2} & (r\bar{r} + b\bar{b} - 2g\bar{g})/\sqrt{6} & (r\bar{r} + b\bar{b} + g\bar{g})/\sqrt{3} \end{array}$$

- To dalej za dużo gluonów, ale macierze grupy SU(3) mają jeszcze 1 warunek:

$$\det(U) = 0 \Rightarrow \text{tr}(U) = 0$$

- Dodatkowy warunek redukuje jeszcze 1 niezależny parametr, czyli zostaje nam 8.
- Żeby ten warunek był spełniony ślady wszystkich macierzy elementarnych muszą być równe 0.

GRUPA SU(3)

- Widzimy, że ślad macierzy λ_9 nie jest równy 0, więc musimy usunąć tę macierz.
- Zostaje nam 8 gluonów:

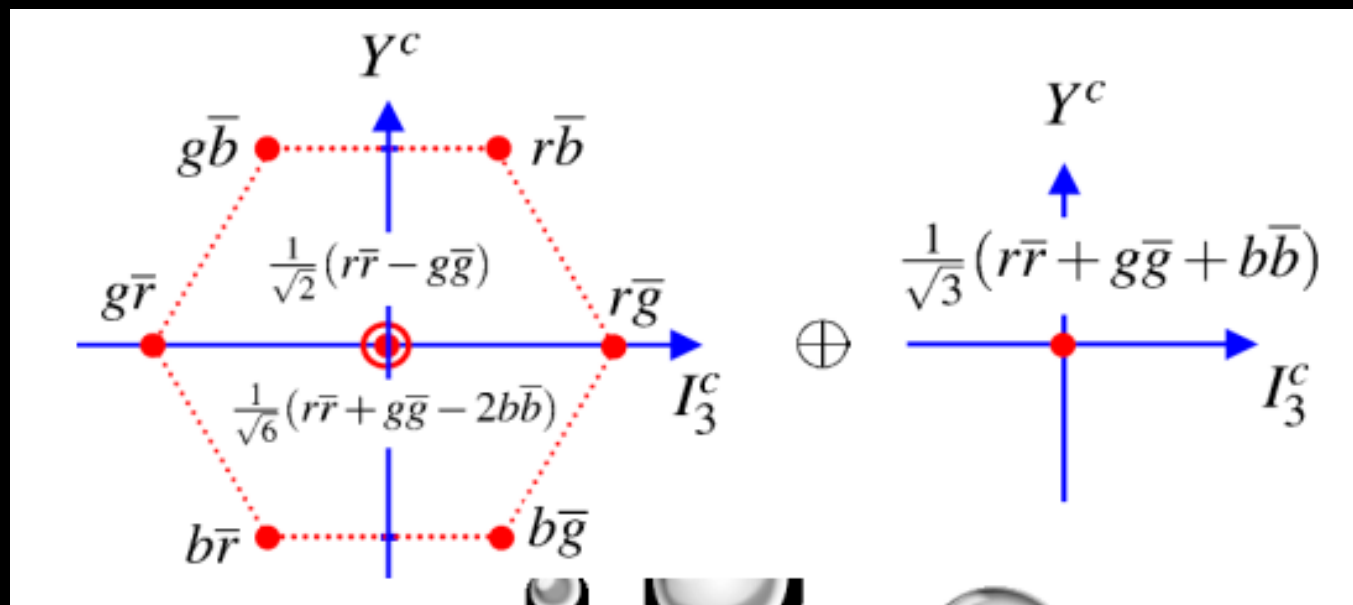
$$\begin{array}{ccc}
 (\bar{r}b + b\bar{r})/\sqrt{2} & (r\bar{g} + g\bar{r})/\sqrt{2} & (b\bar{g} + g\bar{b})/\sqrt{2} \\
 -i(\bar{r}b - b\bar{r})/\sqrt{2} & -i(r\bar{g} + g\bar{r})/\sqrt{2} & -i(b\bar{g} + g\bar{b})/\sqrt{2} \\
 (\bar{r}r - b\bar{b})/\sqrt{2} & (\bar{r}r + b\bar{b} - 2g\bar{g})/\sqrt{6} &
 \end{array}$$

- Jest to przykładowy sposób ich przedstawienia. Można to zrobić też na inne sposoby, np:

$$\begin{array}{cccccc}
 \bar{r}b & b\bar{r} & r\bar{g} & g\bar{r} & b\bar{g} & g\bar{b} \\
 (\bar{r}r - b\bar{b})/\sqrt{2} & & & (\bar{r}r + b\bar{b} - 2g\bar{g})/\sqrt{6} & &
 \end{array}$$

GRUPA SU(3)

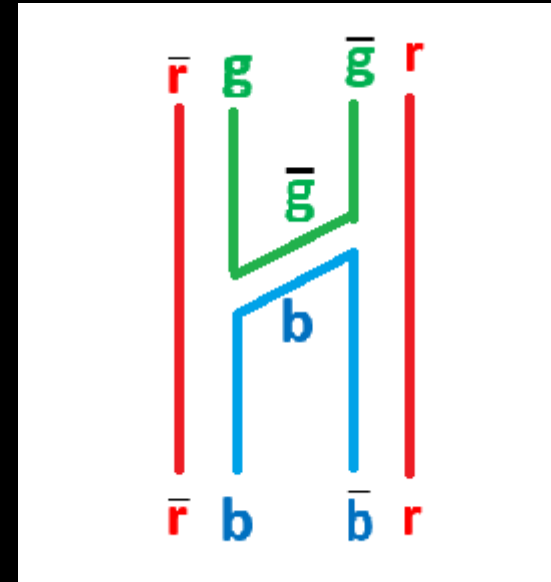
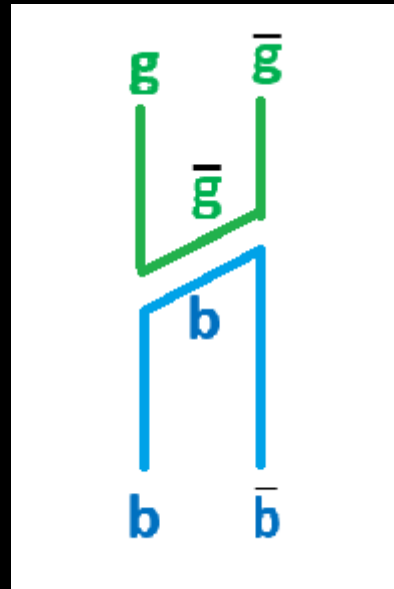
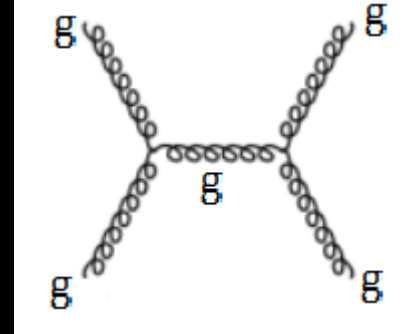
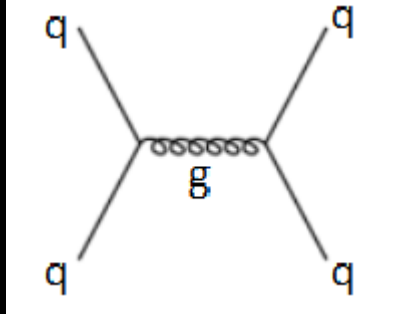
- Symetria gluonów jest oparta na tym samym wzorcu co symetria zapachów kwarków w mezonach
- Jeśli zastąpimy: $u \rightarrow r$, $d \rightarrow g$, $s \rightarrow b$, dostaniemy schemat:



9-TY GLUON

- Gluon $(r\bar{r} + b\bar{b} + g\bar{g})/\sqrt{3}$ byłby neutralny kolorowo, więc nie oddziaływałby z innymi gluonami i można by go było bezpośrednio zaobserwować.
- Miałby nieskończony zasięg, co spowodowałoby, że oddziaływania silne również były by nieograniczone zasięgowo.
- Taki gluon zachowywałby się jak foton.

PRZYKŁADY ODDZIAŁYWAŃ SILNYCH



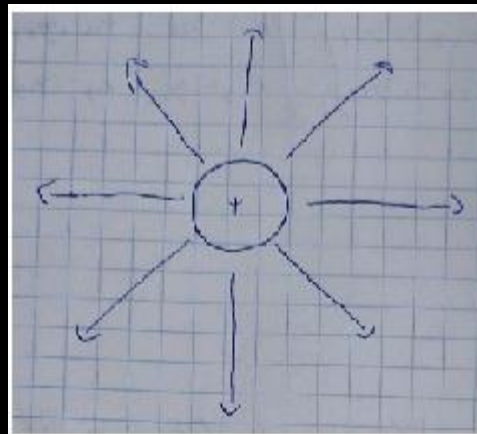
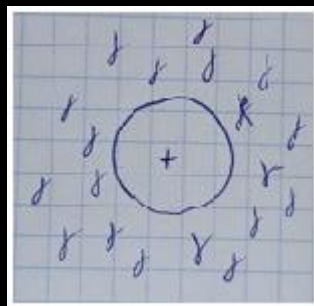
CZĄSTKI POWSTAJĄCE W ODDZIAŁYWANIACH SILNYCH

- Mezony ($q\bar{q}$) np. K^+ ($u\bar{s}$)
- Bariony (qqq) np. p (uud)
- Tetrakwark ($q\bar{q}q\bar{q}$) np. $Z(4430)$ ($c\bar{c}d\bar{u}$)
- Pentakwark ($q\bar{q}qqq$) np. $P(4380)_c^+$ ($uudc\bar{c}$)
- Hexakwark ($qqqqq\bar{q}, q\bar{q}q\bar{q}q\bar{q}$) np. $d^*(2380)$ ($uuuddd$)
- Heptakwark ($qqqqq\bar{q}q\bar{q}$) nie odkryto takiej cząstki
- Glueball (gg, ggg) np. ($g\bar{r} r\bar{g}$) np. $f_0(1370)$ (kandydat)
- Stany zmieszane (qqg) np. ($q\bar{q} r\bar{b}$) np. $\pi(1800)$ może być takim stanem zmieszanym

UWIEŹENIE KOLORU

Elektromagnetyzm:

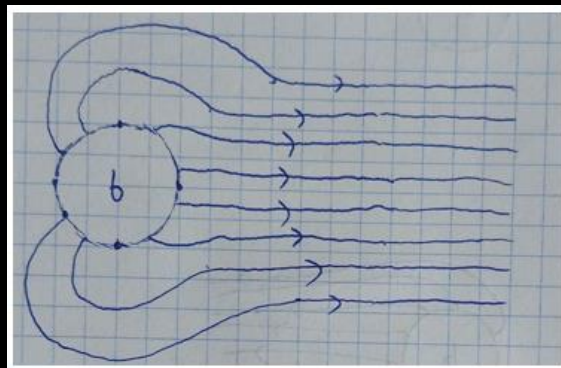
- Cząstka naładowana elektrycznie wytwarza wokół siebie pole wirtualnych fotonów. Energia tego pola zawiera się w energii cząstki.
- Możemy to pole przedstawić jako linie pola wychodzące z cząstki.
- Natężenie pola jest proporcjonalne do odległości między liniami pola w danej odległości od źródła.
- Jeśli cząstka jest niezwiązana linie pola rozchodzą się do nieskończoności i energia cząstki musi zawierać energie całego tego pola
- Fotony ze sobą nie oddziałują, więc linie pola rozchodzą się niezależnie od siebie (im dalej od źródła tym linie są od siebie bardziej oddalone)



UWIEZIENIE KOLORU

Oddziaływania silne:

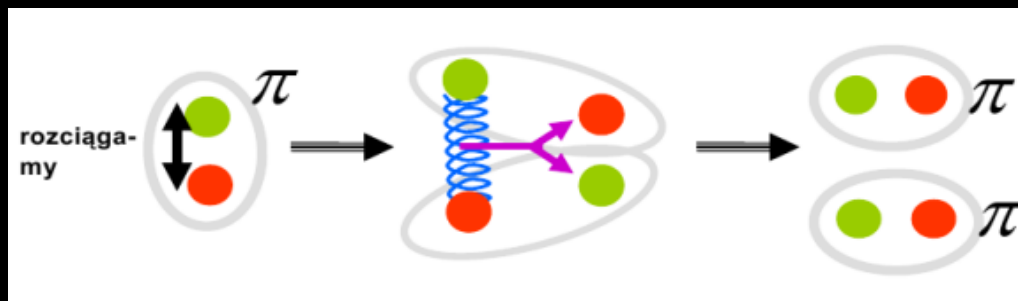
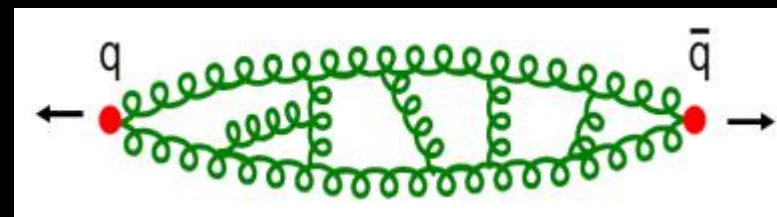
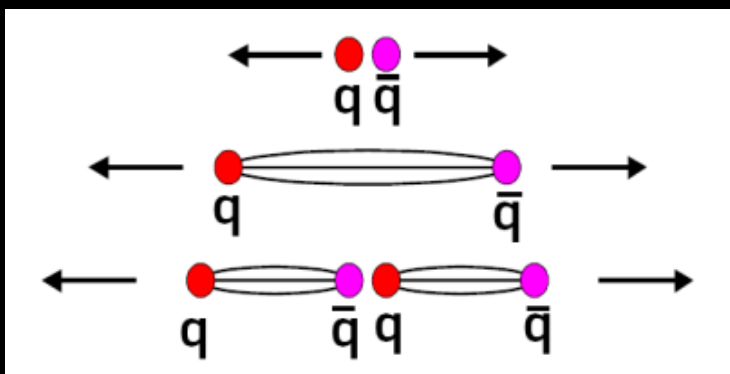
- W oddziaływaniach silnych wszystko jest tak samo, oprócz tego, że gluony ze sobą oddziałują i linie pola nie rozchodzą się niezależnie od siebie. Schodzą się one ze sobą w kształt przypominający tubę



- Linie pola są do siebie równoległe i odległość między nimi nie maleje z odległością od źródła, co oznacza, że natężenie pola jest stałe niezależnie od tego jak daleko od źródła się znajdujemy i energia pola rośnie z odległością
- Niezwiązana cząstka z ładunkiem kolorowym musiałaby mieć nieskończoną energię
- Dodatkowym źródłem pola są gluony

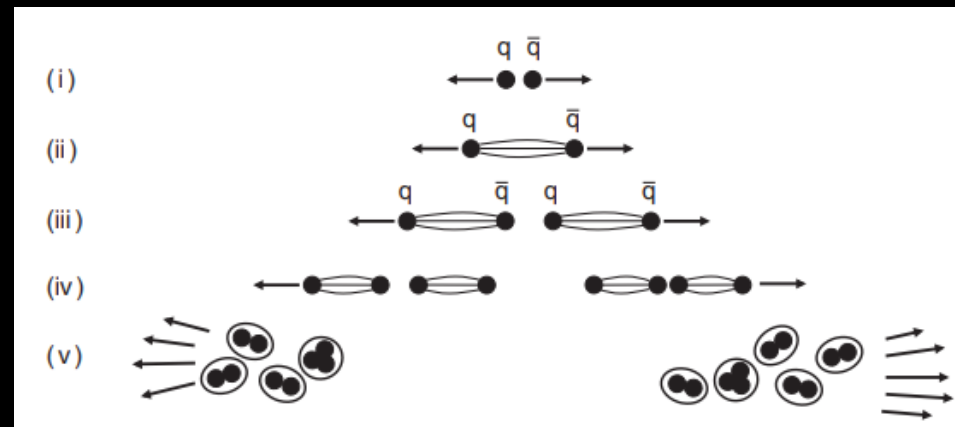
UWIEŻENIE KOLORU

- Jeśli spróbujemy rozdzielić od siebie kwarki energia wiązania będzie rosła liniowo z odległością dopóki nie zostanie przekroczony próg na kreacje pary kwarków. Wtedy jeden z wyprodukowanych kwarków złączy się z jednym z oryginalnych, a drugi wyprodukowany z drugim oryginalnym i w efekcie dostaniemy dwie obojętne kolorowo cząstki.



HADRONIZACJA

- Hadronizacja polega na tym, że kiedy w interakcji zostaną wyprodukowane kwarki (na początku są one niezwiązane (kwazi-swobodne)) to są one obserwowane jako dżety bezkolorowych cząstek. Zjawisko to można podzielić na 5 etapów:
- Wysokoenergetyczny kwark i antykwark są produkowane podczas interakcji.
- Kwarki oddalają się od siebie. Pole kolorowe jest skoncentrowane w „tubie” o gęstości energii równej około $1 \frac{\text{GeV}}{\text{fm}}$.
- Kwarki oddalają się dalej i energia zawarta w polu kolorowym jest dostatecznie duża, by wytworzyć kolejną parę kwark-antykwark.
- Proces powtarza się z kolejnymi wyprodukowanymi parami kwarków.
- Ostatecznie kwarki mają na tyle małą energię, żeby połączyć się w hadrony.



SILNA STAŁA

- Potencjał oddziaływań silnych ma 2 składowe.
- Pierwsza jest podobna do potencjału w oddziaływaniach elektromagnetycznych.
- Druga pochodzi od samo oddziaływania gluonów.

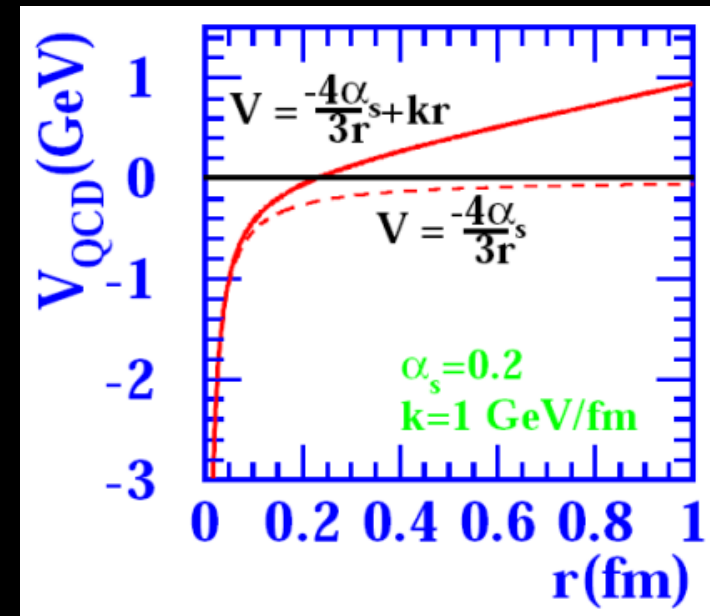
$$V_{QCD} = -\frac{4}{3} \frac{\alpha_s}{r} + kr$$

- Można obliczyć siłę oddziaływań pomiędzy dwoma kwarkami dla dużych r :

$$F = -\frac{\partial V}{\partial r} = \frac{4}{3} \frac{\alpha_s}{r^2} + k, \quad k \approx 1 \frac{\text{GeV}}{\text{fm}}$$

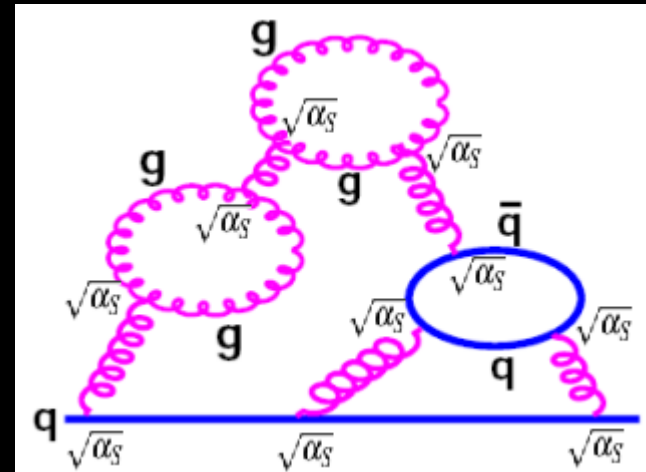
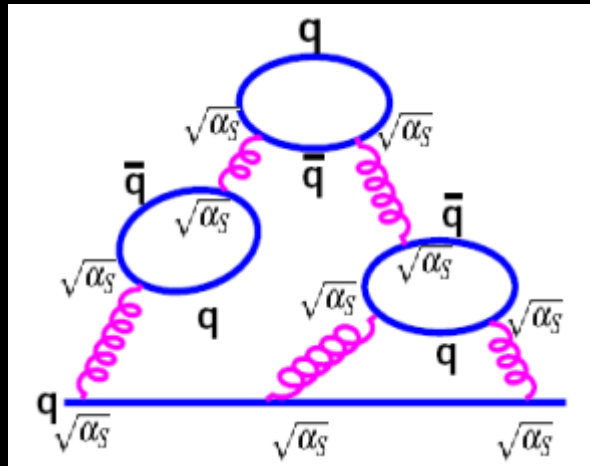
$$F \approx \frac{1.6 \cdot 10^{-10}}{10^{-15}} = 160000 \text{ N}$$

- α_s określa siłę oddziaływań silnych
- α_s nie jest stałą
- Model dobrze opisuje stany związane ciężkich kwarków (c i b)



SILNA STAŁA

- Fluktuacje kwantowe w oddziaływaniach silnych tworzą nie tylko chmurę wirtualnych kwarków, ale też chmurę gluonów:



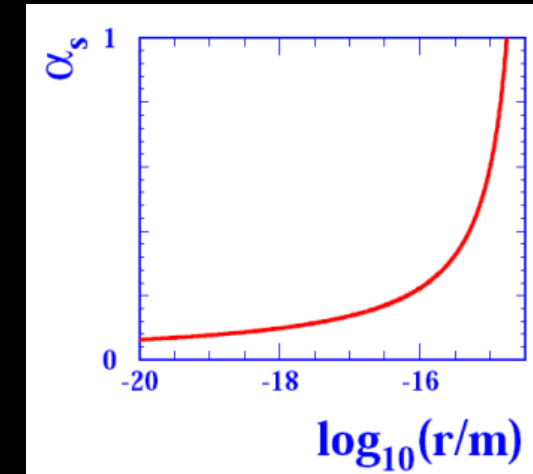
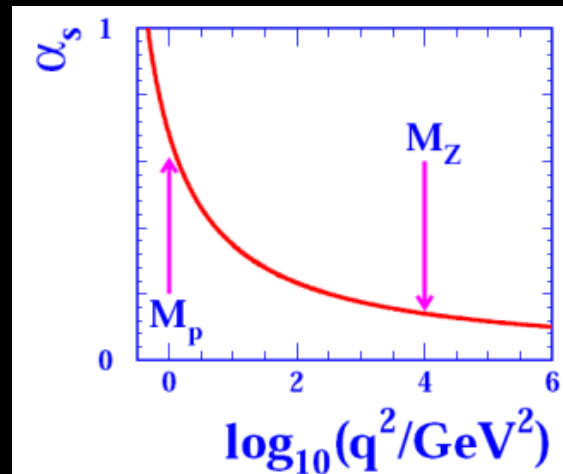
- Po wysumowaniu po diagramach otrzymujemy wzór na α_s :

$$\alpha_s(q^2) = \frac{\alpha_s(q_0^2)}{1 + B\alpha_s(q_0^2)\ln\left(\frac{q^2}{q_0^2}\right)}, \quad B = (11N_c - 2N_f) \cdot 12\pi$$

- N_c - liczba kolorów ($N_c = 3$)
- N_f - liczba smaków ($N_f = 6$)

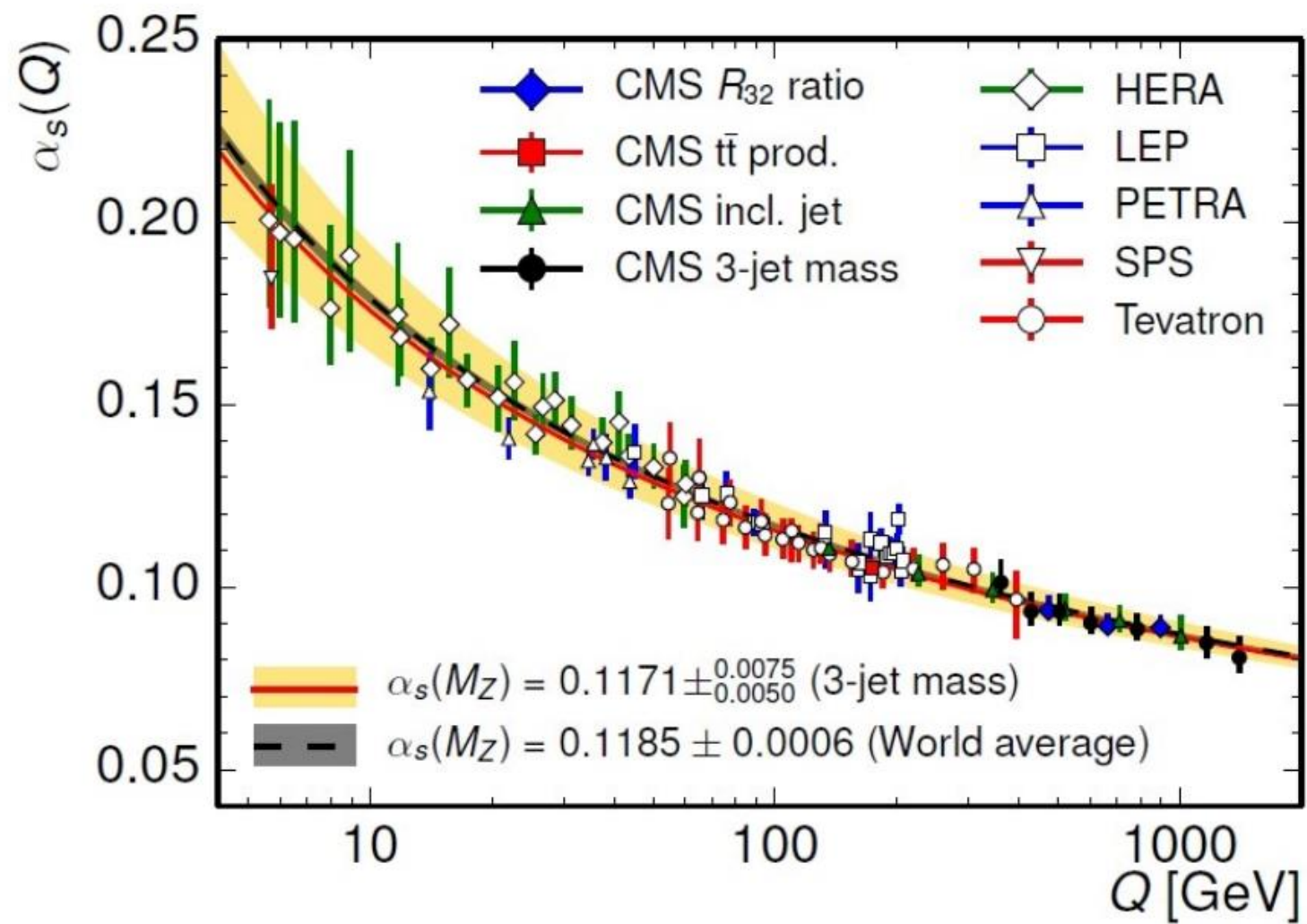
BIEGNAĆCA SILNA STAŁA

- α_s maleje ze wzrostem Q^2 , czyli mamy do czynienia ze zjawiskiem przeciwnym do ekranowania.
- Dla niskich energii (i odpowiadających jej dużych odległości) $\alpha_s = 1$ i nie można wtedy stosować do obliczeń rachunku perturbacyjnego
- Wraz ze wzrostem energii (i zmniejszaniem się odległości) wartość α_s maleje i przy masie M_Z (masa bozonu Z) osiąga wartość 0.12 i jest na tyle mała, że można stosować rachunek perturbacyjny.
- Definiujemy granicę $\Lambda_{QCD} = 332 \text{ MeV}$ powyżej której można stosować rachunek perturbacyjny.



SWOBODNE KWARKI

- Zmniejszanie wartości α_s wraz z energią powoduje, że dla odpowiednio dużych energii i małych dystansów kolor jest coraz słabiej uwięziony (dlatego w procesie hadronizacji możemy traktować dwa powstałe kwarki jako do pewnego stopnia swobodne).
- W normalnych warunkach uwięzienie koloru obowiązuje tylko na odpowiednio dużych dystansach (w praktyce niezbyt dużych). Głęboko wewnątrz hadronów na odległościach $\ll 1$ fm kwarki i gluony zachowują się jak cząstki swobodne.
- Zmniejszanie wartości α_s oznacza zmniejszanie prawdopodobieństwa na oddziaływanie, w związku z tym samo oddziaływanie gluonów jest coraz słabsze i coraz łatwiej jest odciągać od siebie 2 kwarki, co powoduje, że zachowują się one jak swobodne na coraz większych dystansach.
- W temperaturach powyżej $1.7 \cdot 10^{12}$ K kwarki mogą istnieć całkowicie swobodnie (ładunek kolorowy nie jest uwięziony). Taki stan nazywamy plazmą kwarkowo-gluonową.



DOWODY NA ISTNIENIE KOLORU

- Możemy zweryfikować istnienie koloru porównując przekroje czynne na produkcję pary mionów i pary kwarków przy anihilacji elektron-pozyton

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

- Jeśli pominiemy masy, to stany końcowe różnią się tylko ładunkiem elektrycznym
- Przekrój czynny na produkcję pary mionów obliczamy ze wzoru:

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

- Przekrój czynny na produkcję jednego kwarka (bez koloru) obliczamy ze wzoru:

$$\sigma(e^+e^- \rightarrow q\bar{q}) = \frac{4\pi\alpha^2}{3s} Q_q^2$$

DOWODY NA ISTNIENIE KOŁORU

- Poprzedni wzór jest przekrojem czynnym na produkcję konkretnego kwarka np. u. Żeby dostać przekrój czynny na produkcję dowolnego kwarka trzeba wysumować kwadraty ładunków wszystkich kwarków:

$$\bullet \sigma(e^+e^- \rightarrow q\bar{q}) = \frac{4\pi\alpha^2}{3s} \sum_i Q_i^2$$

- Kiedy uwzględnimy, że każdy kwark może występować w 3 kolorach przekrój czynny wynosi:

$$\sigma(e^+e^- \rightarrow q\bar{q}) = 3 \cdot \frac{4\pi\alpha^2}{3s} \sum_i Q_i^2$$

- Dostajemy wartość R:

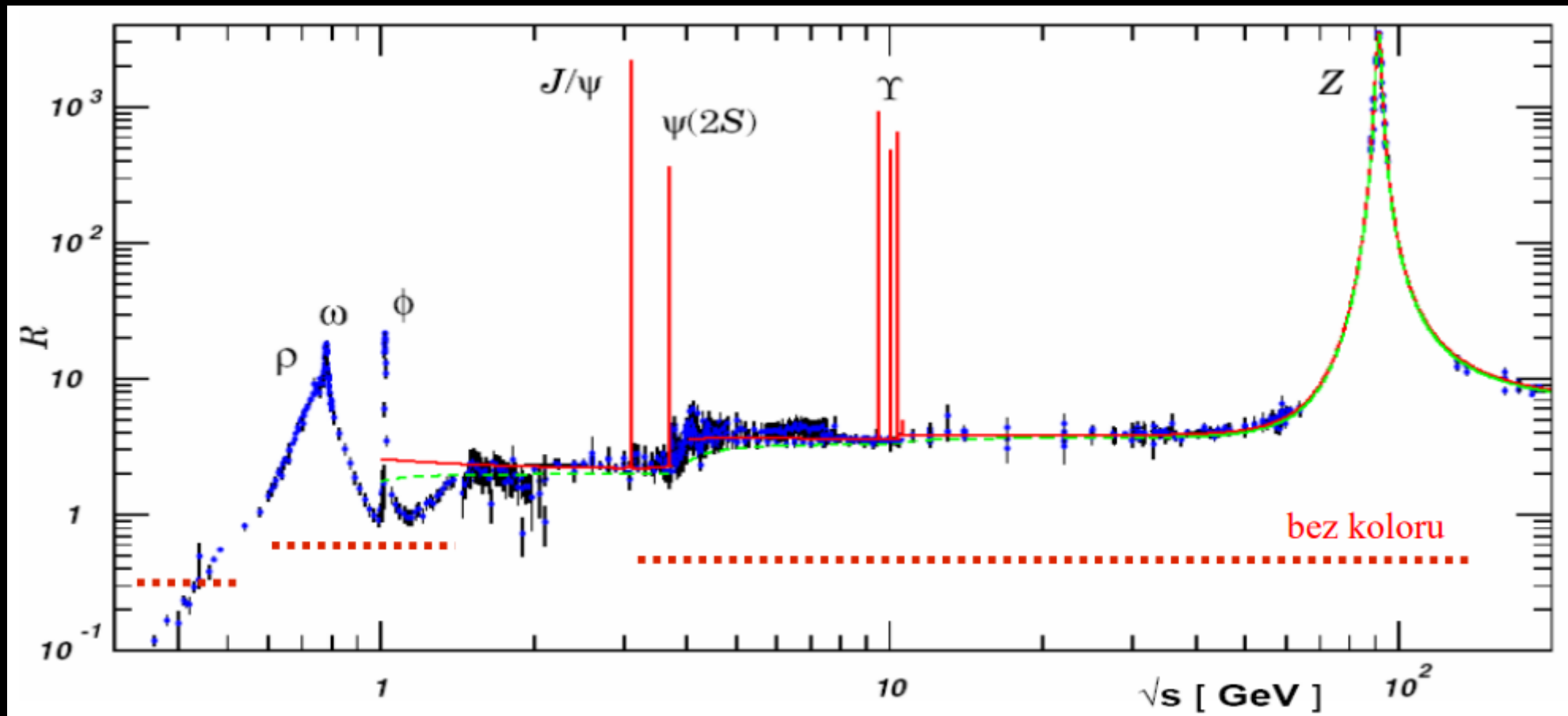
$$R_\mu = 3 \cdot \sum_i Q_i^2$$

- Należy pamiętać, że sumując po kwadratach ładunków bierzemy pod uwagę tylko kwarki dostępne przy danej energii w układzie środka masy.

DOWODY NA ISTNIENIE KOŁORU

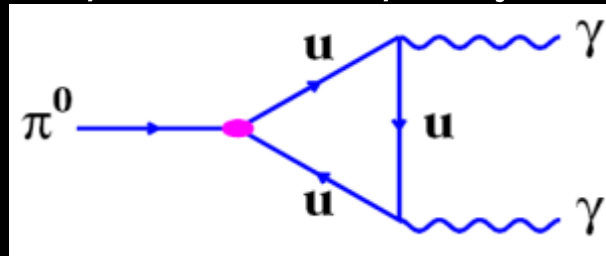
| Energy | Ratio R |
|----------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $\sqrt{s} > 2m_s \sim 1 \text{ GeV}$ | $3\left(\frac{4}{9} + \frac{1}{9} + \frac{1}{9}\right) = 2$ u,d,s |
| $\sqrt{s} > 2m_c \sim 4 \text{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

DOWODY NA ISTNIENIE KOLORU



DOWODY NA ISTNIENIE KOLORU

- Innym sposobem weryfikację istnienia koloru jest pomiar szerokości rozpadu $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$.
- Obliczenia są zgodne z eksperymentem tylko jeśli uwzględnimy 3 kolory.

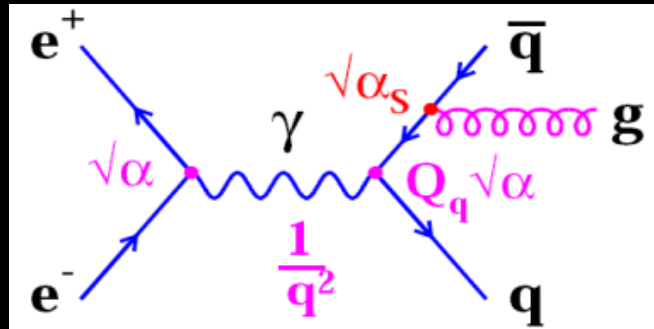


$$\Gamma(\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma) \propto N_c^2$$
$$N_c = 2.99 \pm 0.12$$

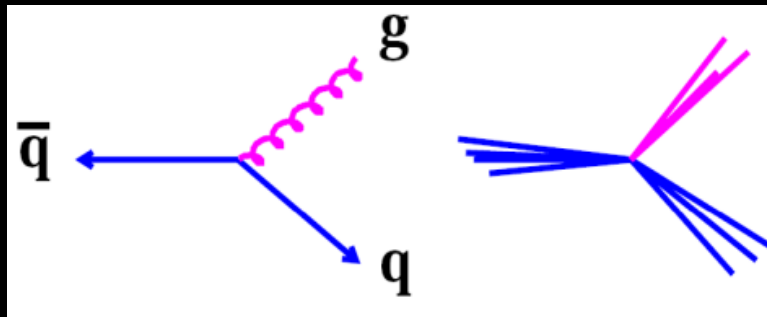
- Kolejnym dowodem istnienia koloru jest istnienie barionu $\Omega^-(sss)$.
- Jest to barion w którym wszystkie spiny kwarków są ustawione do góry.
- Łamie to zakaz Pauliego, gdyż wszystkie 3 kwarki znajdują się w tym samym stanie kwantowym. Dodatkowo funkcja falowa jest symetryczna.
- Chyba, że istnieje dodatkowa liczba kwantowa. Jeśli uwzględnimy istnienie 3 kolorów, to zakaz Pauliego nie jest złamany i funkcja falowa jest antysymetryczna.
- Funkcja falowa koloru to : $\psi_c = (rgb + gbr + brg - grb - rbg - bgr)/\sqrt{6}$

DOWODY NA ISTNIENIE GLUONÓW

- Istnienie gluonów można badać analizując proces anihilacji elektron-pozyton, a następnie kreacji pary kwark-antykwarek.
- Tak samo jak elektron mógł emitować foton, to kwark może emitować gluon.



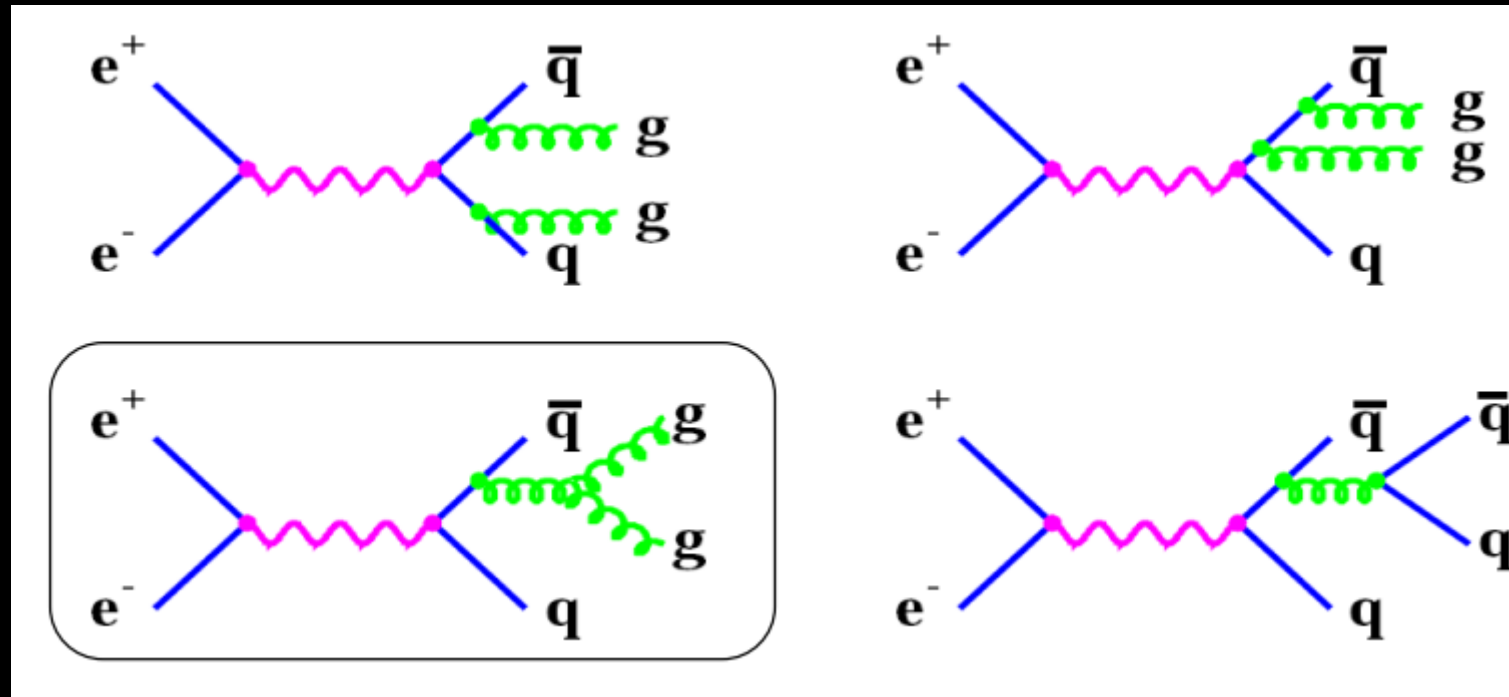
- Powstały gluon, podobnie jak kwarki będzie tworzył dżet w procesie hadronizacji.



- Z rozkładu kątownego dżetów możemy wywnioskować, że gluon ma spin równy 1.

DOWODY NA ISTNIENIE GLUONÓW

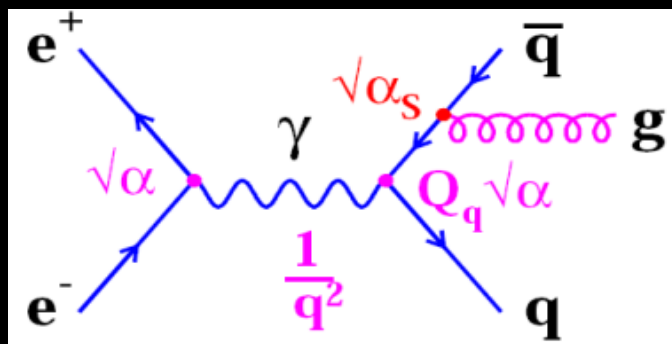
- Możemy oczywiście obserwować więcej niż 3 dzety. Możliwe są też procesy:



POMIAR α_s

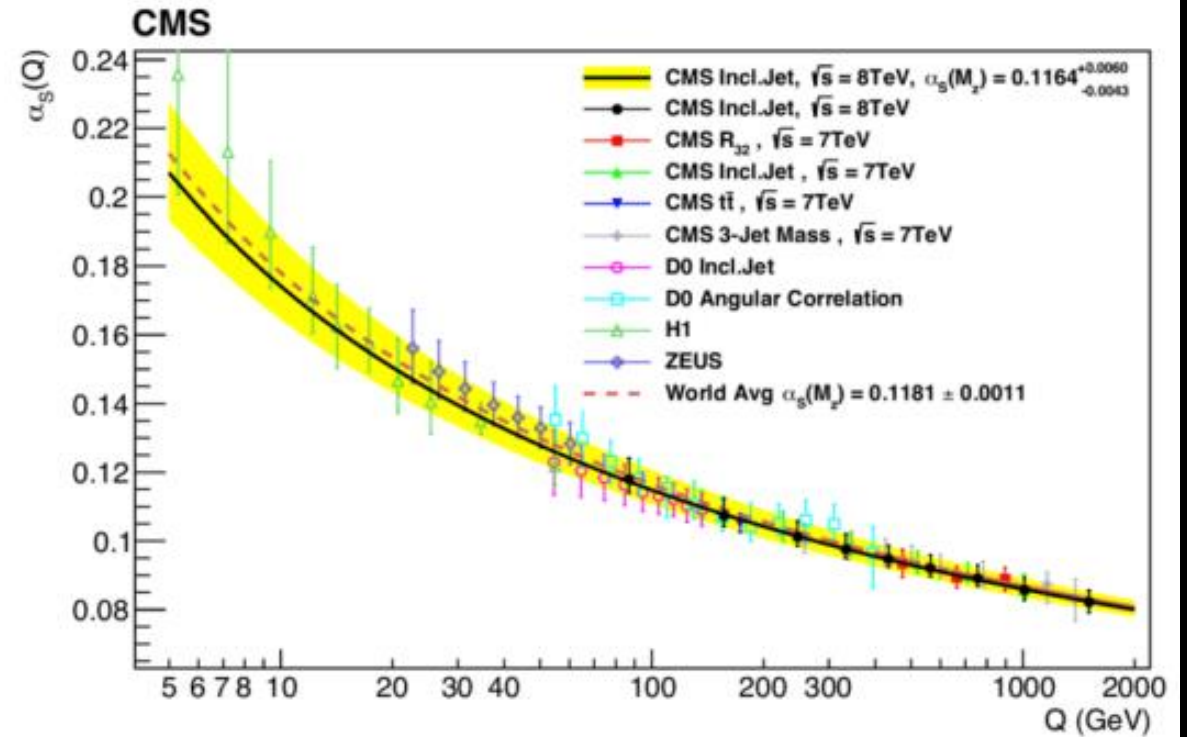
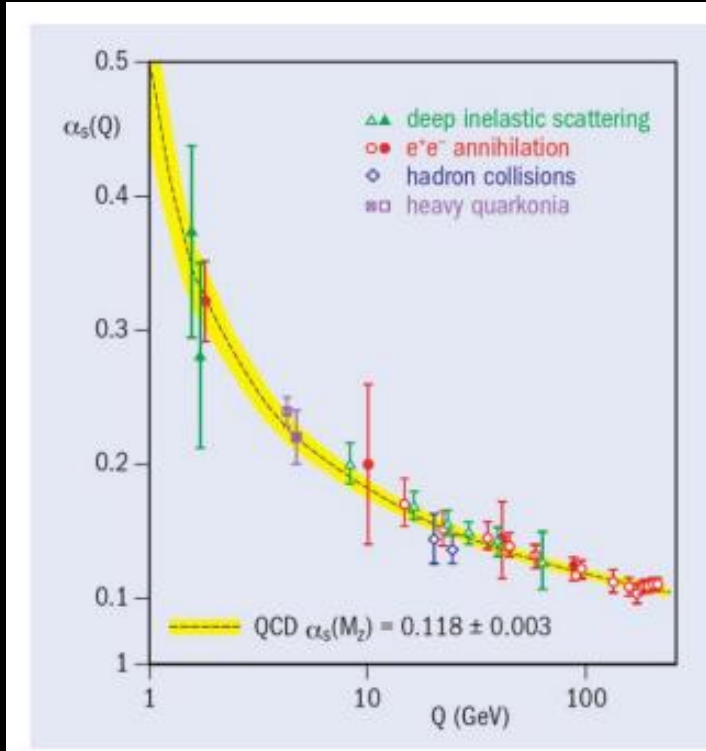
- α_s można zmierzyć badając procesy z większą ilością pęków hadronowych

$$\frac{\sigma(e^+e^- \rightarrow q\bar{q}g)}{\sigma(e^+e^- \rightarrow q\bar{q})} \propto \alpha_s$$



- Emisja gluonu przez kwark tworzy na schemacie dodatkowy węzeł oddziaływań silnych, więc prawdopodobieństwo takiego stanu będzie dodatkowo proporcjonalne do stałej oddziaływań silnych

POMIAR α_s



PODSUMOWANIE

- Oddziaływania silne są widoczne tylko na małych dystansach.
- Teoria oddziaływań silnych jest podobna do elektromagnetycznych, ale:
 - posiada 3 rodzaje ładunku (kolory)
 - posiada 8 bozonów pośredniczących, które mają ładunek silny (kolor) i oddziałują ze sobą
- Wszystkie obserwowalne cząstki są neutralne kolorowo.
- Gluony mogą tworzyć cząstki.
- Kwarki i gluony obserwujemy w detektorze jako dżety bezkolorowych cząstek.
- Przy niskich energiach stała silna ma wartość 1 i nie można stosować rachunku perturbacyjnego, ale wraz ze wzrostem energii wartość stałej maleje i użycie rachunku perturbacyjnego staje się możliwe.
- Istnienia koloru i gluonów można dowieść między innymi badając przekroje czynne na kreacje par po anihilacji elektron-pozyton.



KONIEC