

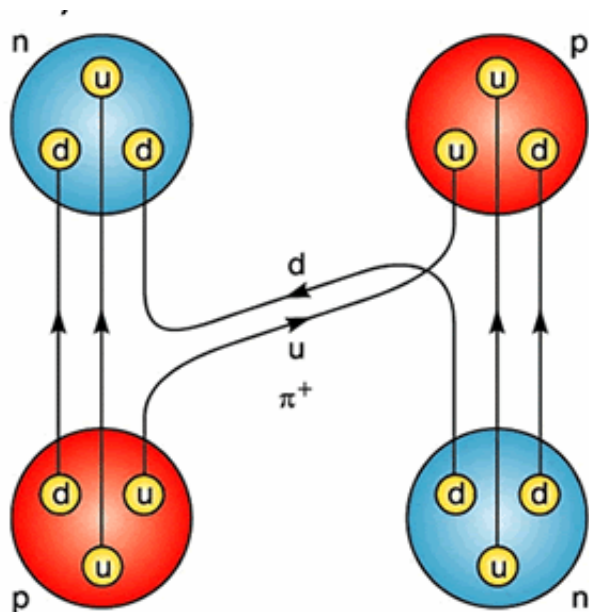
Oddziaływania silne

(chromodynamika kwantowa, dżety, gluony ...)

- **Wydarzenia ważne dla rozwoju teorii oddziaływań silnych**
- **Chromodynamika kwantowa (QCD)**
 - ▼ **Kolor kwarków i gluonów**
 - ▼ **Przekształcenia koloru w QCD**
 - ▼ **Samoodziaływanie gluonów**
 - ▼ **Asymptotyczna swoboda**
 - ▼ **Biegnąca stała sprzężenia oddziaływań silnych**
- **Porównanie własności QED i QCD**

- silnie oddziałują kwarki i gluony oraz zbudowane z nich hadrony
- oddziaływania silne odpowiadają za wiązania kwarków w hadronach, budowę jądra atomowego i reakcje jądrowe
 - ▶ wiązanie (neutralnych kolorowo) nukleonów w jądrach – **silne oddziaływanie reszkowe**, jest podobne do oddziaływań Van der Waalsa, które wiążą neutralne elektrycznie atomy w cząsteczki
- oddziaływania silne między hadronami (np. protonów z protonami, neutronami, pionami ...) wynikają z oddziaływań między ich składnikami, kwarkami i gluonami

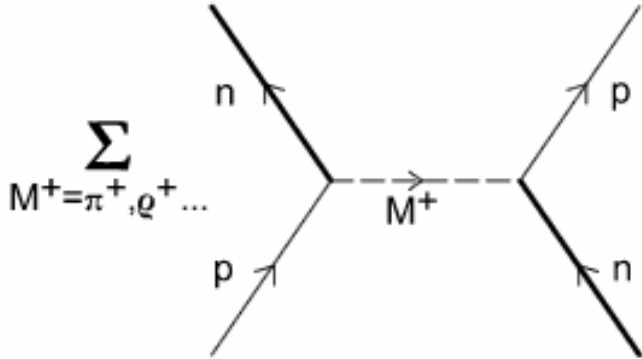
Oddziaływania hadronów przy małym przekazie czteropędu (czyli na dużych odległościach) można efektywnie opisać poprzez wymianę wirtualnych hadronów



Rozpraszanie $n + p \rightarrow p + n$ poprzez wymianę pionu

- para $u\bar{d}$ wymieniana m-dzy nukleonami ma liczby kwantowe najbliższego hadronu, mezonu π^+
(wymiana pionu – mechanizm odpowiedzialny za siły jądrowe w **teorii Yukawy**)
- opis jest bardziej skomplikowany : wymiana takiej pary kwark - antykwark odpowiada koherentnej sumie wymian wszystkich możliwych mezonów o tych samych liczbach kwantowych ($I = I_3 = +1$)
– $\pi^+, \rho^+, A^+, \dots \rightarrow$ wymiana trajektorii Reggego

$n + p \rightarrow p + n$



Wymiana trajektorii Reggego

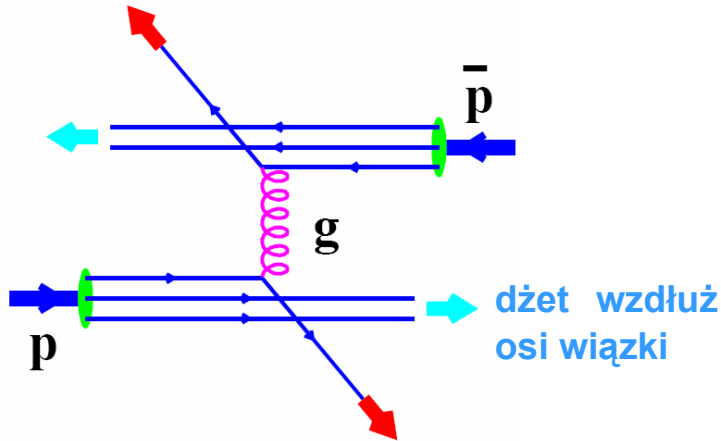
Przy małych energiach zderzających się cząstek amplituda rozpraszania jest sumą wkładów pochodzących od wymiany poszczególnych mezonów M^+ , główny wkład pochodzi od wymiany π^+ .

Przed powstaniem QCD teoria Reggego, bazująca na analitycznych własnościach amplitudy rozpraszania, była akceptowaną teorią oddziaływań silnych

Oddziaływania silne

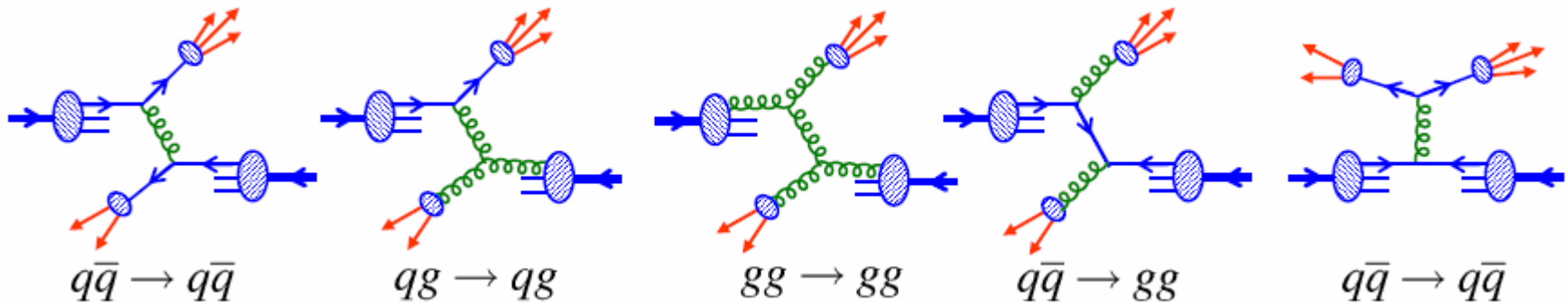
produkcja 2 dżetów o dużym pędzie poprzecznym w oddziaływaniach proton – antyproton

dżet w kierunku kwarka



oddziaływania hadronów przy dużych przekazach czteropędu – perturbacyjna QCD

Produkcja 2 dżetów w oddz. $p - \bar{p}$: wkłady od rozpraszania różnego typu partonów (kwarków, gluonów)



Trochę historii ...

- początek lat sześćdziesiątych – wiele obserwacji i pomiarów doświadczalnych (regularności w widmie mas dużej liczby odkrytych hadronowych cząstek "elementarnych", pomiary przekrojów czynnych na oddziaływanie hadronów : nukleon-nukleon, πN , KN)
 - brak powszechnie akceptowanego opisu teoretycznego oddziaływań silnych

wydarzenia ważne dla rozwoju teorii oddziaływań silnych

1961- 64 klasyfikacja hadronów w ramach zapachowej grupy $SU(3)$ (tylko 3 zapachy kwarków u, d i s) i jej kwarkowa interpretacja

1964 koncepcja koloru kwarków

kwark dowolnego zapachu może występować w 3 różnych kolorach (umownie czerwony, zielony i niebieski; ang. red, green, blue)

kolor, dodatkowy stopień swobody dla kwarków, rozwiązuje kłopoty modelu kwarkowego ze statystyką Fermiego (problem rezonansu Δ^{++})

statyczny model kwarków

- hadrony , cząstki oddziałujące silnie, składają się z kwarków
- obserwowane stany fizyczne hadronów są singletami kolorowej grupy $SU(3)$ (są "białe") **barion = qqq , mezon = kwark-antykwar** → uwięzienie koloru

Fundamentalną reprezentacją grupy $SU(3)_{\text{kolor}}$ jest tryplet kwarków (q_R, q_G, q_B)

W modelu kwarkowym Gell-Manna i Zweiga kwarki są obiektami matematycznymi, służącymi w spektroskopii hadronów do klasyfikacji cząstek w ramach zapachowej symetrii $SU(3)$.

wydarzenia ważne dla rozwoju teorii oddziaływań silnych

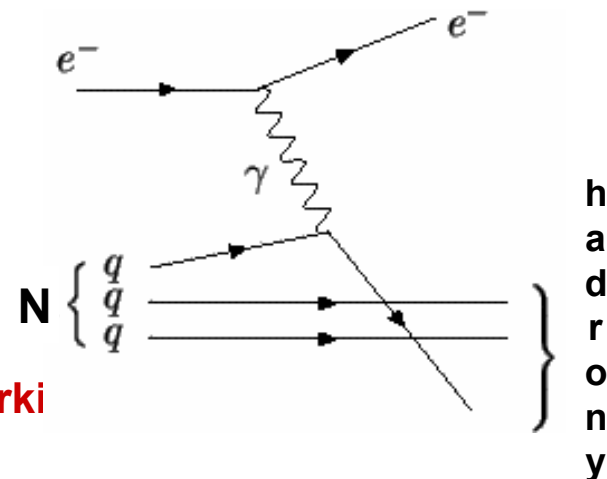
- **Eksp. z głęboko nieelastycznym rozpraszaniem (Deep Inelastic Scattering, DIS) leptonów na nukleonach**

procesy rozbitcia protonu zachodzące przy dużych energiach i przekazach czteropędu

1968, SLAC, $e + p \rightarrow e + X$ ($E_e = 20 \text{ GeV}$)

Model kwarkowo-partonowy (Quark Parton Model, QPM)

elektron rozprasza się niekoherentnie na punktowych, swobodnych składnikach protonu - partonach; **partony \equiv kwarki**
ulepszony model QPM : **partony \equiv kwarki i gluony**



- **1973 – odkrycie asymptotycznej swobody (Gross, Politzer i Wilczek)**

siła oddziaływania m-dzy kwarkami i gluonami maleje przy dużych przekazach czteropędu, czyli na małych odległościach, oraz rośnie dla dużych odległości

Powstanie teorii oddz. kwarków i gluonów – chromodynamiki kwantowej (QCD),
kwantowej teorii pola z cechowaniem nieabelowym

- **1975 – obserwacja struktury dwudżetowej w anihilacji $e^+e^- \rightarrow$ hadrony**
 $e^+e^- \rightarrow q\bar{q} \rightarrow$ hadrony (2 dżety kwarkowe); potwierdzenie słuszności modelu QPM
- **1979 – odkrycie dżetów gluonowych w laboratorium DESY w Hamburgu**
rejestracja, zgodnie z przewidywaniami QCD, przypadków trójdżetowych :
 $e^+ + e^- \rightarrow q + \bar{q} + g \rightarrow$ hadrony (2 dżety kwarkowe + 1 dżet gluonowy)

Chromodynamika kwantowa

Chromodynamika kwantowa (Quantum Chromodynamics, QCD) – współczesna teoria oddziaływań silnych opisująca oddziaływania pomiędzy kwarkami i gluonami :

- kwantowa teoria pola z cechowaniem nieabelowym oparta na grupie symetrii SU(3) koloru
- zawiera fermionowe pola kwarkowe i bozonowe pola cechowania
nośnikami sił między kolorowymi kwarkami (fermiony o ułamkowych ładunkach elektrycznych) jest osiem bezmasowych, obojętnych elektrycznie i naładowanych kolorowo gluonów (ang. glue) o spinie i parzystości $J^P = 1^-$
- Podstawową cechą oddziaływań QCD jest asymptotyczna swoboda

Siła oddziaływania między kwarkami i gluonami
maleje na małych odległościach

Kolor kwarków i gluonów

• **Kolor (ładunek silny, ładunek kolorowy)** jakim są obdarzone kwarki i gluony w QCD jest odpowiednikiem ładunku elektrycznego w QED

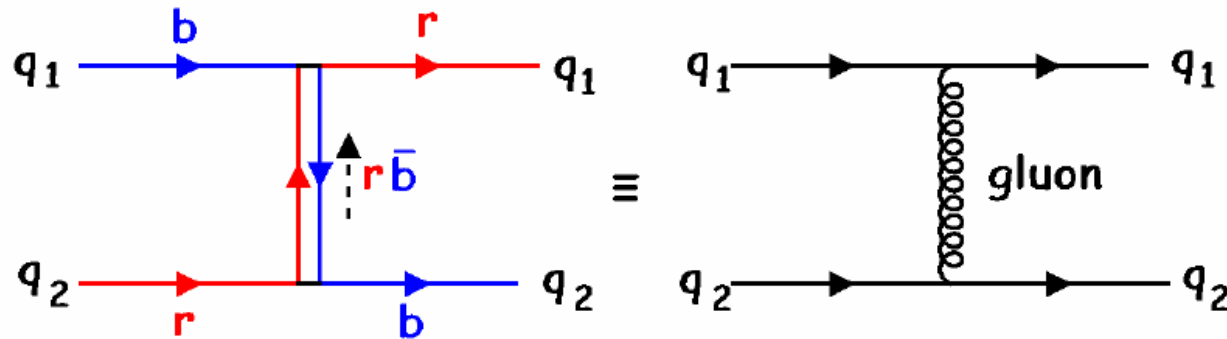
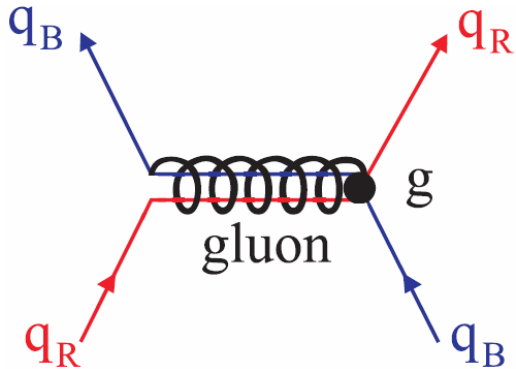
• W QCD istnieje 6 typów ładunków silnych :

kwark może znajdować się w jednym z 3 podstawowych kolorów (R, G, B), antykwark niesie odpowiednie antykolory (\bar{R} , \bar{G} , \bar{B})

	R	G	B	\bar{R}	\bar{G}	\bar{B}	
u	●	●	●	●	●	●	\bar{u}
d	●	●	●	●	●	●	\bar{d}
c	●	●	●	●	●	●	\bar{c}
s	●	●	●	●	●	●	\bar{s}
t	●	●	●	●	●	●	\bar{t}
b	●	●	●	●	●	●	\bar{b}

• **Gluony** przenoszące oddz. silne m-dzy kwarkami również mają ładunek kolorowy (!)

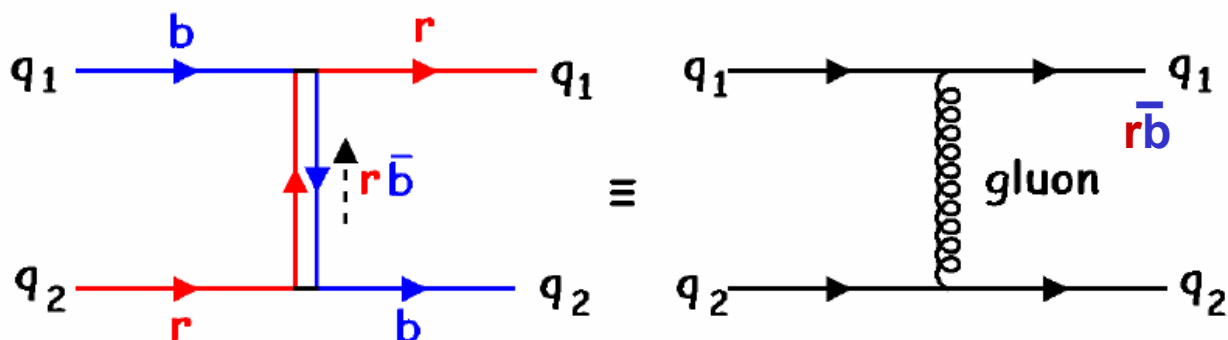
Gluony są równoważne parom $q\bar{q}$, np. $r\bar{b}$, $g\bar{r}$



Oddz. QCD m-dzy kolorowymi kwarkami poprzez kolorowy gluon $R\bar{B}$

Kwark czerwony oddziałuje z kwarkiem niebieskim wymieniając gluon czerwono-antyniebieski

$$q_1 + q_2 \rightarrow q_1 + q_2$$



Oddziaływanie kwark - kwark zachodzące poprzez wymianę kolorowego gluonu

Kwark q_1 w kolorze "b" absorbuje gluon $r\bar{b}$ i zamienia się w kwark q_1 w kolorze "r"

Kwark q_2 w kolorze "r" emituje gluon " $r\bar{b}$ " i zamienia się w kwark q_2 w kolorze "b"

Oddziaływania m-dzy kwarkami :

emisja / absorpcja gluonu nie powoduje zmiany zapachu kwarka,
wymiana gluonu powoduje zmianę koloru kwarków

Oddziaływania silne zachowują ładunek kolorowy !!

(podobnie jak w oddz. elektromagnetycznych zachowany jest ładunek elektryczny)

Kolor kwarków i gluonów

Gluony przenoszą jednostkę koloru i jednostkę antykoloru $(r, g, b) \times (\bar{r}, \bar{g}, \bar{b})$

→ $3^2 = 9$ kombinacji kolor-antykolor (oktet + singlet)

$r\bar{b}$

$r\bar{g}$

$r\bar{r}$

Kombinacje $r\bar{r}$, $g\bar{g}$ i $b\bar{b}$ mogą się mieszać tworząc jedną kombinację „białą” będącą singletem koloru

$g\bar{r}$

$g\bar{b}$

$g\bar{g}$

$b\bar{g}$

$b\bar{r}$

$b\bar{b}$

Singlet kolorowy

$$\frac{r\bar{r} + b\bar{b} - 2g\bar{g}}{\sqrt{6}}$$

$$\frac{r\bar{r} - b\bar{b}}{\sqrt{2}}$$

$$\frac{r\bar{r} + b\bar{b} + g\bar{g}}{\sqrt{3}}$$

Kombinacja ”biała” i symetryczna względem zamiany koloru $r \rightarrow b \rightarrow g$, nieoddziałująca kolorowo



8 aktywnych oddziałujących stanów gluonu

QED : klasyczna symetria cechowania w przestrzeni ładunku elektrycznego
niezmienniczość kwantowej teorii elektronu ze względu na lokalne
zmiany fazy jego funkcji falowej → istnienie pola elektromagnetycznego,
którego kwantem jest bezmasowy elektrycznie obojętny foton ($J^P = 1^-$)

odpowiednie przekształcenia pola elektromagnetycznego (pola cechowania) kompensują
lokalne zmiany fazy funkcji falowej elektronu

Przekształcenia fazy w QED tworzą abelową (przemianną) unitarną grupę $U(1)$

QCD : teoria z cechowaniem nieabelowym oparta na grupie symetrii $SU(3)$ koloru
niezmienniczość kwantowej teorii kwarków względem lokalnych przekształceń
(obrotów) w przestrzeni koloru → istnienie ośmiu pól cechowania,
których kwantami są kolorowe bezmasowe gluony ($J^P = 1^-$)

odpowiednie przekształcenia bozonowych pól cechowania kompensują przekształcenia
pól kwarkowych

Lokalne przekształcenia fazy w QCD są bardziej skomplikowane niż w QED
(podstawowy tryplet ładunków kolorowych $q = (q_R, q_G, q_B)$) i tworzą
nieabelową nieprzemianną grupę $SU(3)$

Podstawowa różnica : 8 gluonów - foton jest jeden

z QED

gluony mają ładunki kolorowe - foton jest elektrycznie obojętny

Przekształcenia koloru w QCD

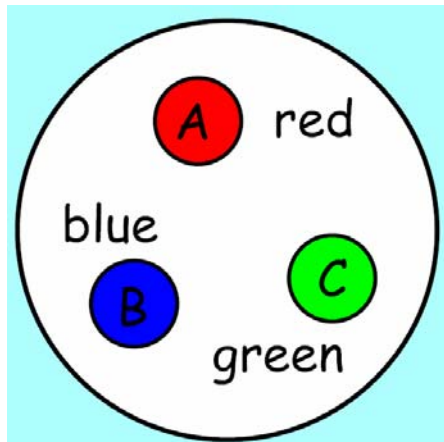
Oddziaływania m-dzy kwarkami są niezmiennicze względem zamiany koloru

Transformacje cechowania w QCD:

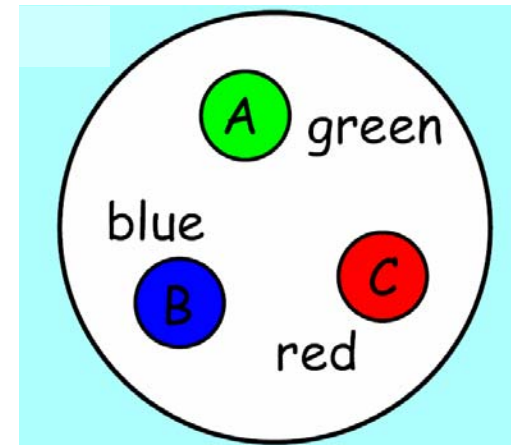
Rozważamy proton zbudowany z 3 kwarków :

czernego (red), **zielonego** (green) i **niebieskiego** (blue)

Globalne przekształcenia koloru : **red** \leftrightarrow **green**
(wszystkie kwarki zmieniają kolor)



”biały” hadron
(singlet koloru)

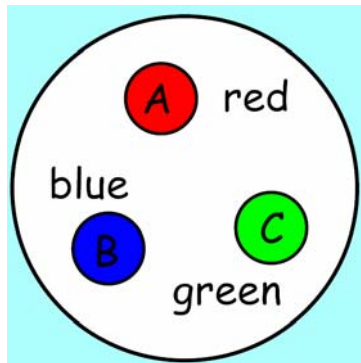


”biały” hadron
(singlet koloru)

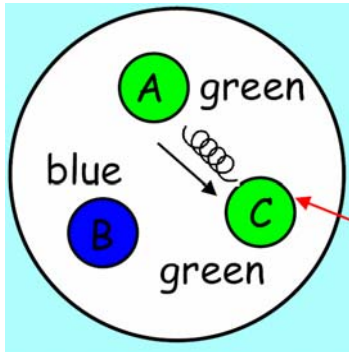
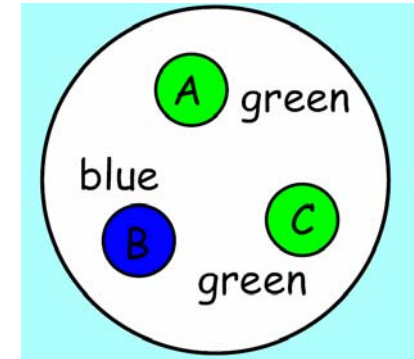
Lokalna transformacja koloru w QCD

Lokalna transformacja koloru : **red** ↔ **green**, zamiana koloru tylko dla jednego kwarka

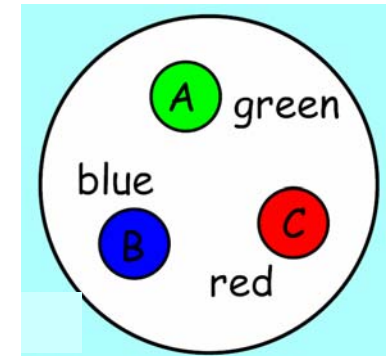
"biały" hadron
(singlet koloru)



Kombinacja
kwarków nie
jest już "biała"



Aby uzyskać kombinację "białych" kwarków zielony kwark A powinien wyemitować gluon $\bar{r}g$, który zostanie pochłonięty przez kwark C. Absorpcja przez zielony kwark C tego gluonu zamienia kwark C w kwark czerwony $g + \bar{r}g \rightarrow r$ (anihilacja $g\bar{g}$ i zamiana koloru kwarka na czerwony)



Kombinacja kwarków w hadronie
jest ponownie "biała"

Lokalna transformacja koloru → **wymiana gluonów m-dzy kwarkami**
(oddziaływania m-dzy kwarkami)

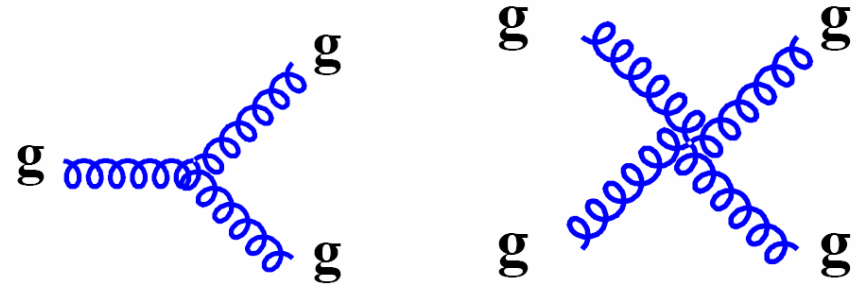
Oddziaływania m-dzy kwarkami są niezmiennicze względem zamiany koloru

Samoodziaływanie gluonów

QCD – kwantowa teoria pola z cechowaniem nieabelowym

- kwanty pola cechowania, gluony, są obdarzone ładunkiem kolorowym
- **Gluony mogą ze sobą wzajemnie oddziaływać !!**

Wierzchołki 3 i 4 – gluonowe w QCD

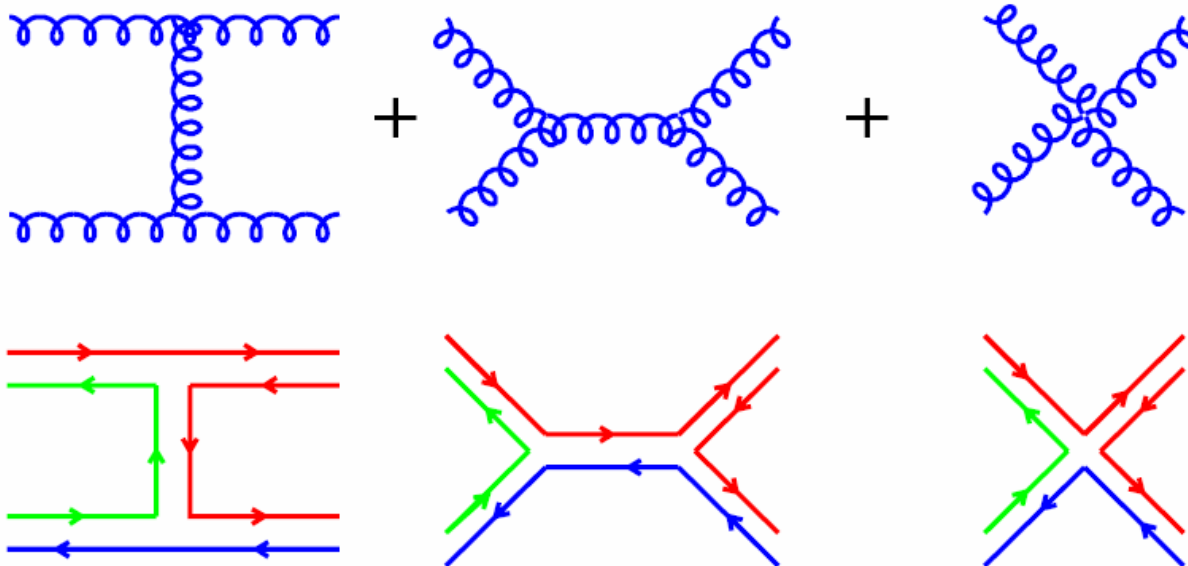


W **QCD**, kwantowej teorii pola z cechowaniem nieabelowym, **gluony**, kwanty pola chromodynamicznego **mogą ze sobą oddziaływać**, w przeciwieństwie do abelowej teorii pola **QED**, gdzie kwanty pola elektromagnetycznego, **fotony**, nie posiadają ładunku i **nie oddziałują ze sobą** (w rzędzie wiodącym)

Samoodziaływanie gluonów

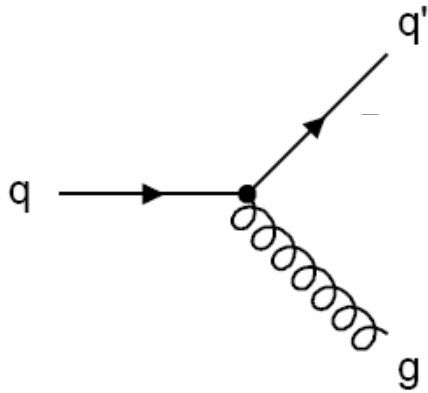
Przykład : rozpraszanie gluonów na gluonach

$$g + g \rightarrow g + g$$

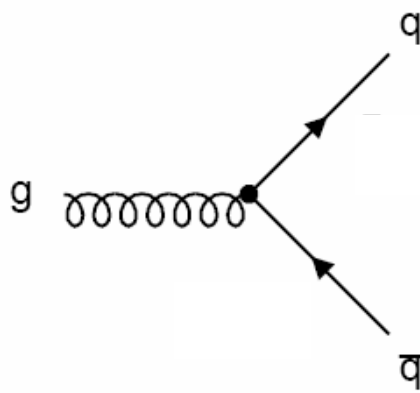


np. $r \bar{g} + g \bar{b} \rightarrow r \bar{r} + r \bar{b}$

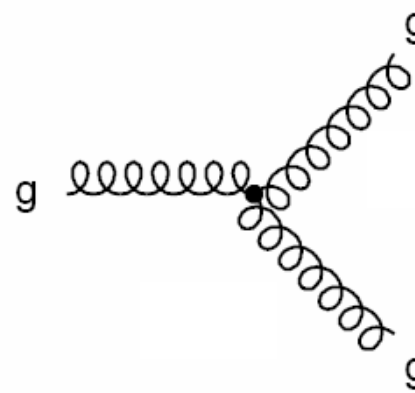
Wierzchołki oddziaływania w chromodynamice kwantowej :



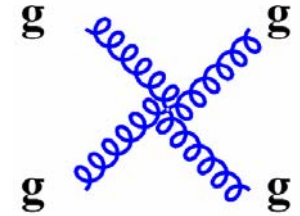
wypromieniowanie gluonu przez kwark



rozszczenie gluonu na parę kwark-antykwar



rozszczenie gluonu na parę gluonów



wierzchołek 4-gluonowy

Nowe wierzchołki oddziaływania w porównaniu z QED

Większe prawdopodobieństwo emisji gluonu przez gluon niż przez kwark

Asymptotyczna swoboda

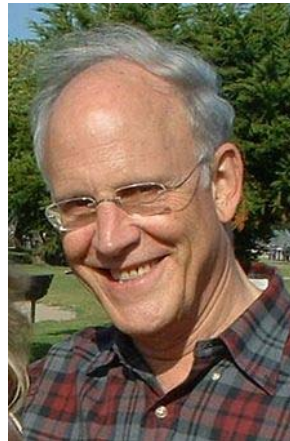
Koncepcyjne problemy prostego modelu kwarkowo-partonowego :

- swobodne kwarki nie występują w naturze → **duża siła wzajemnego oddziaływania kwarków** prowadzi do ich uwięzienia w hadronach
- interpretacja danych głęboko nieelastycznego rozpraszania leptonów na nukleonach → **kwarki** wewnątrz nukleonów zachowują się jak **swobodne cząstki** (tzw. asymptotyczna swoboda)

Problemy teoretyczne ze sformułowaniem kwantowej teorii pola z asymptotyczną swobodą

W 1973 r D. Gross, H. Politzer i F. Wilczek udowodnili, że **kwantowa teoria pola z cechowaniem nieabelowym posiada własność asymptotycznej swobody** (Nobel 2004)

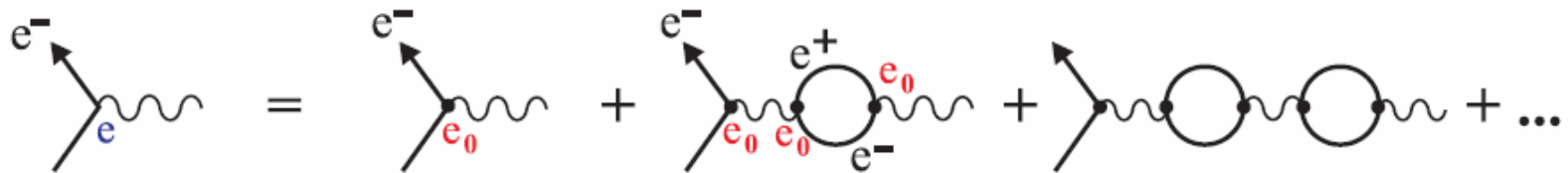
Siła oddziaływania między kwarkami i gluonami maleje dla coraz większych przekazów czteropędu, czyli na coraz mniejszych odległościach, oraz rośnie dla dużych odległości



Charakterystyczna zależność stałej sprzężenia silnego α_s od kwadratu przekazu czteropędu

Biegąca stała sprzężenia oddziaływań silnych

QED



ładunek fizyczny e

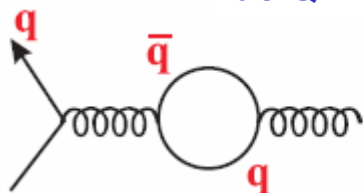
goły ładunek e_0

ekranowanie

Efekty polaryzacji próżni związane z kreacją krótkożyjących wirtualnych par e^+e^- prowadzą do ekranowania gołego ładunku elektronu.

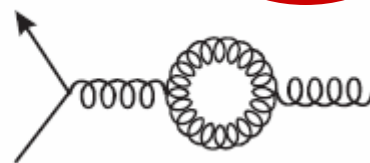
Samoodziaływanie gluonów → antyekranowanie ładunku kolorowego
→ **asymptotyczna swoboda**

QCD



ekranowanie ładunku kolorowego
pętla kwarkowe

analogia do QED



antyekranowanie ładunku kolorowego, pętla gluonowe

nowy wkład

Polaryzacja próżni :

kreacja par kwark – antykwark,
gluon – gluon



poprawki wyższych rzędów

Diagramy polaryzacji próżni związane z pętlami gluonowymi, które antyekranują ładunek kolorowy, dominują nad wkładami pochodzącymi od pętli kwarkowych, które ekranują ładunek kolorowy

Biegająca stała sprzężenia oddziaływań silnych

$\alpha_S \equiv g_S^2 / 4\pi$, g_S – ładunek kolorowy

Efektywna biegająca stała sprzężenia α_S opisująca siłę oddziaływań m-dzy kwarkami i gluonami

QCD przewiduje zależność α_S od Q^2 , ale α_S jest wolnym parametrem teorii

$$\alpha_s(Q^2) = \frac{\alpha_s(\mu^2)}{1 + b_0 \alpha_s(\mu^2) \log(Q^2/\mu^2)}$$

znak !!

Nobel 2004 (Gross, Politzer, Wilczek)

Q^2 – kwadrat przekazu czteropędu

N_f – liczba aktywnych zapachów kwarkowych (liczba kwarków z $m_q < Q$)

N_c – liczba kolorów

μ – skala renormalizacji , $b_0 = (11N_c - 2N_f) / 12\pi$

$N_c = 3, N_f = 6 \longrightarrow b_0 > 0 \longrightarrow$

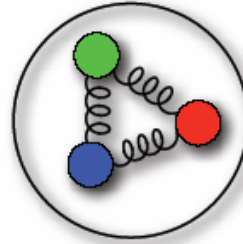
α_S maleje z rosnącym Q^2

Asymptotyczna swoboda ($\alpha_s \ll 1$)

$\alpha_s \rightarrow 0$ dla $Q^2 \rightarrow \infty$, α_s maleje dla rosnących Q^2 , czyli na małych odległościach

Na odległościach mniejszych niż typowy rozmiar hadronu (~ 1 fm) kwarki zachowują się jak b. słabo oddziałujące cząstki

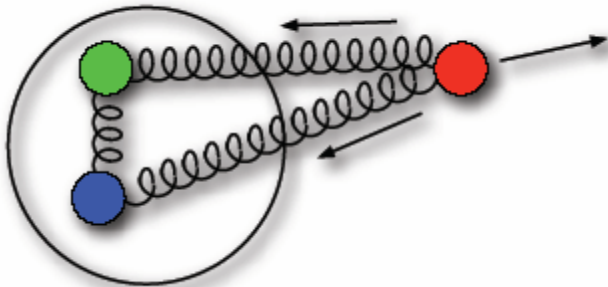
$\alpha_s \ll 1 \rightarrow$ obszar perturbacyjnej QCD



Uwięzienie kwarków w hadronach ($\alpha_s \gg 1$)

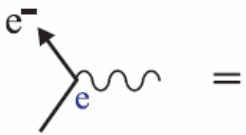
$Q^2 \rightarrow 0$, siła oddziaływania m-dzy kwarkami i gluonami rośnie wraz z odległością i staje się nieskończona dla odległości odp. rozmiarom hadronów (~ 1 fm)

$\alpha_s \gg 1 \rightarrow$ nieperturbacyjny obszar uwięzienia koloru



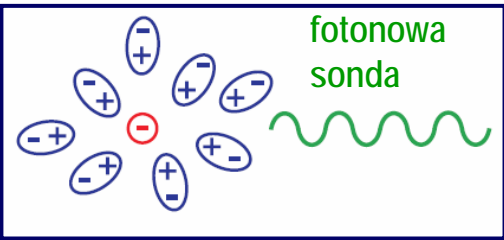
Usiłując "wyciągnąć" kwark z hadronu obserwujemy wzrost stałej sprzężenia α_s – oddziaływanie silne nie pozwala by kwark był swobodny

QED

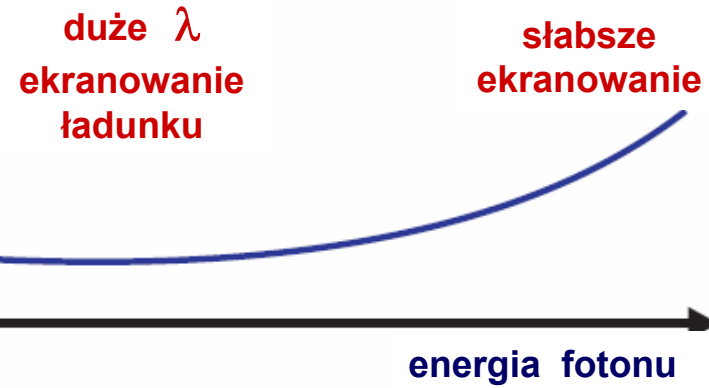


ładunek fizyczny

$$\alpha_{em} = \frac{e^2}{4\pi}$$



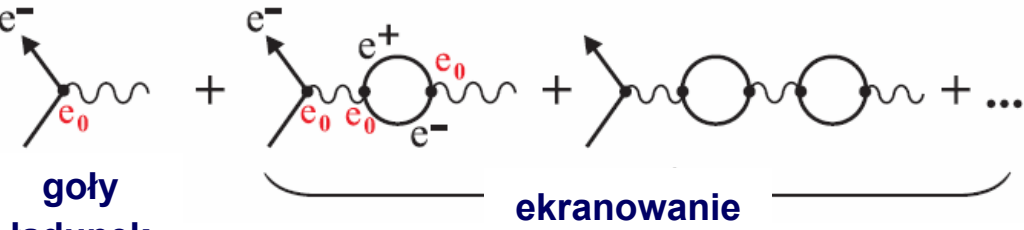
fotonowa sonda



duże λ
ekranowanie
ładunku

małe λ
słabsze
ekranowanie

energia fotonu



goły ładunek

ekranowanie

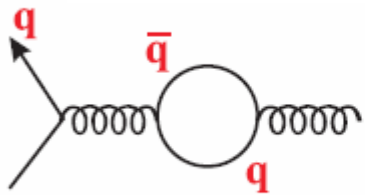
$$\frac{1}{137}$$

Im krótsza długość fali λ sondującego fotonu tym więcej widzi on "gołego ładunku"
 → elektromagnetyczna stała sprzężenia rośnie b. powoli (logarytmicznie) wraz z energią

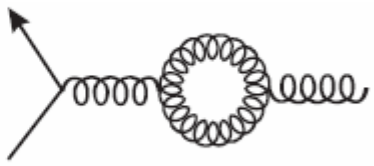
QCD

analogia do QED

nowy wkład



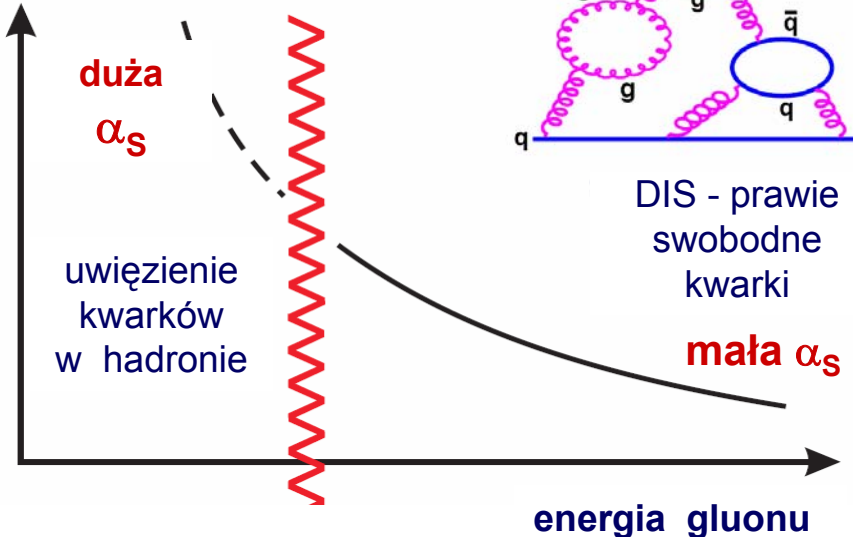
ekranowanie



antyekranowanie ładunku kolorowego

Biegająca stała sprzężenia QCD, α_s , maleje logarytmicznie wraz z energią.

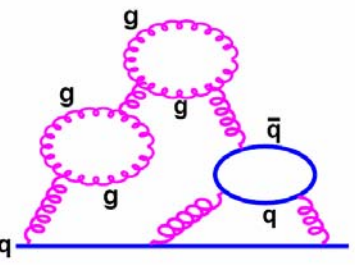
$$\alpha_s$$



duża α_s

uwięzienie kwarków w hadronie

mała α_s



DIS - prawie swobodne kwarki

energia gluonu

Elastyczne rozpraszanie kwark - kwark

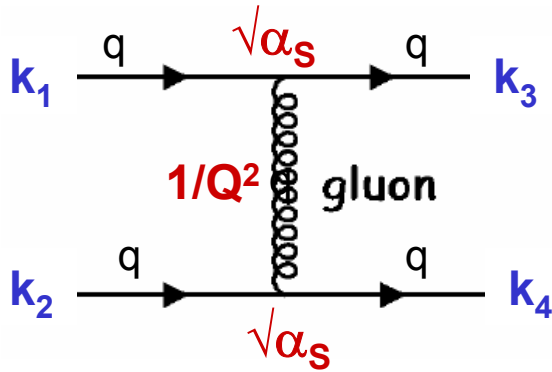
Amplituda rozpraszania
kwark – kwark w najniższym
rzędzie rachunku zaburzeń

$$A \sim \alpha_s / Q^2$$

k_i – czteropęd kwarka

q^2 – kwadrat przekazu czteropędu między kwarkami

$$Q^2 = -q^2 = -(k_1 - k_3)^2 = -[(E_1 - E_3)^2 - (\vec{p}_1 - \vec{p}_3)^2]$$



Procesy twarde \equiv procesy z dużym przekazem
czteropędu (zachodzące na małych odległościach)

$\rightarrow \alpha_s \ll 1 \rightarrow$ rachunki perturbacyjnej QCD

α_s jest parametrem rozwinięcia amplitud rozpraszania
w szereg potęgowy

Diagramy Feynmana opisujące
elastyczne rozpraszanie kwark - kwark

