



AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA
IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE
AGH UNIVERSITY OF KRAKOW

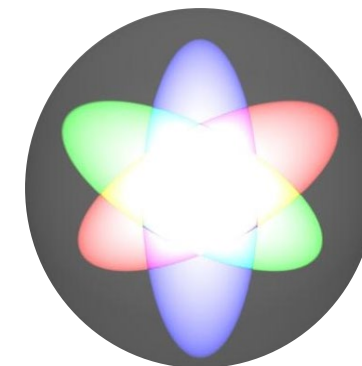
Wstęp do Modelu Standardowego

Oddziaływania silne

Agnieszka Obłąkowska-Mucha

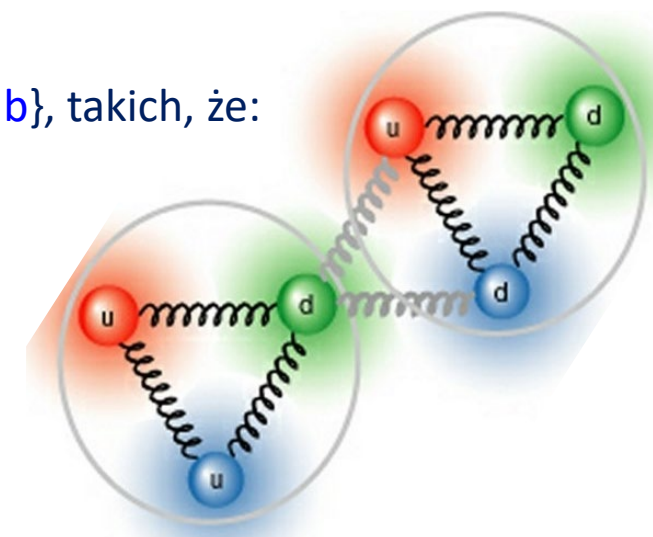
Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej
Katedra Oddziaływań i Detekcji Cząstek

Oddziaływania silne



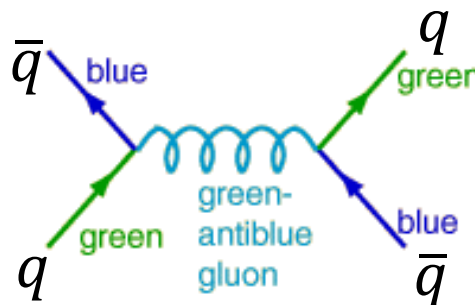
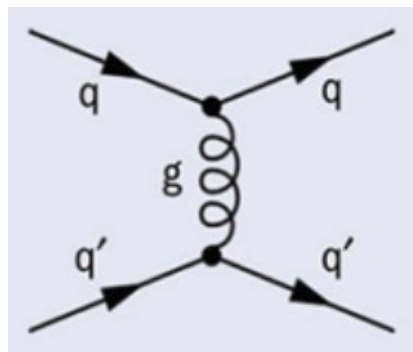
- Oddziaływania silne odpowiadają za budowę jądra atomowego, reakcje jądrowe i wiązania kwarków w hadronach (ale wiązanie neutralnych kolorowo nukleonów w jądrach to silne oddziaływanie reszkowe).
- Regularności w widmie mas hadronów i pomiary przekrojów czynnych N-N i pion-N były opisane przez statyczny model kwarków.
- 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 elektromagnetyźmie.
- 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-antykolor.
 $r\bar{r}, g\bar{g}, b\bar{b}, g\bar{r}, r\bar{g}, r\bar{b}, b\bar{r}, g\bar{b}, b\bar{g}$



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

Kolorowa funkcja falowa

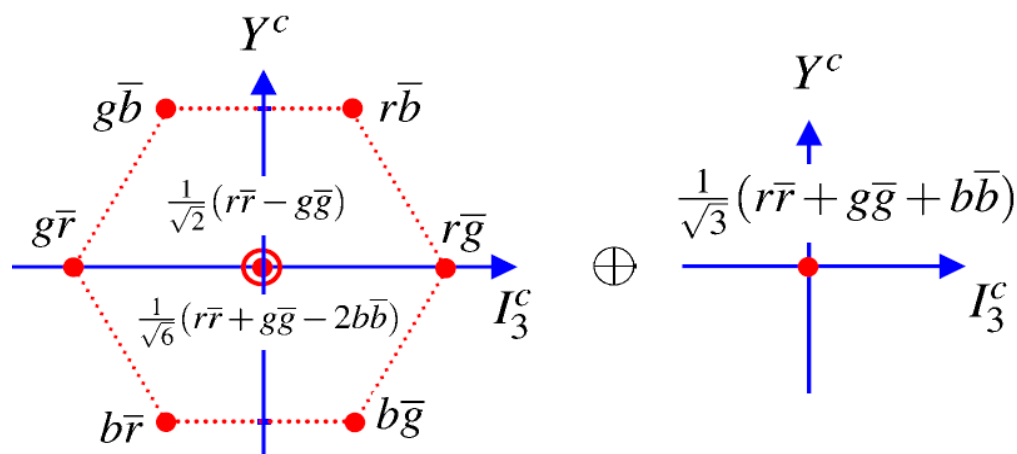
- Skoro są 3 kolory i 3 antykolory, to powinno być 9 gluonów: $r\bar{r}, g\bar{g}, b\bar{b}, g\bar{r}, r\bar{g}, r\bar{b}, b\bar{r}, g\bar{b}, b\bar{g}$
- Kombinacje: $r\bar{r}, g\bar{g}, b\bar{b}$ są neutralne kolorowo. Neutralny gluon zachowywałby się jak foton, a oddziaływanie silne miałyby nieskończony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

$$u \rightarrow r$$

$$d \rightarrow g$$

$$s \rightarrow b$$

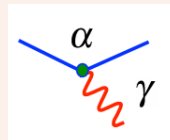
i mamy kolorowe: oktet i siglet



Oddziaływania elektromagnetyczne a silne

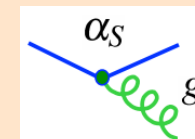
QED:

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 $V(r) \sim \frac{1}{r}$

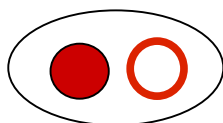


- Oddz. silne zależy tylko od koloru (nie zależy ani od zapachu kwarku ani od ład. elektrycznego).
- Kolor nie może być zmierzony – prawdopodob., że kwark będzie w stanie o danym kolorze = 1/3.
- Gluony niosą kombinację kolorów (porównać z mezonami zbudowanymi z kwarków u, d, s):

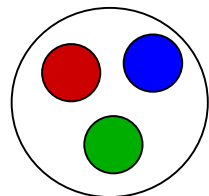
$$\begin{aligned}
 g_1 &\sim \bar{R}G & g_2 &\sim \bar{R}B & g_3 &\sim \bar{G}R & g_4 &\sim \bar{G}B & g_5 &\sim \bar{B}R \\
 g_6 &\sim \bar{B}G & g_7 &\sim R\bar{R} - G\bar{G} & g_8 &\sim R\bar{R} + G\bar{G} - 2B\bar{B}
 \end{aligned}$$

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.

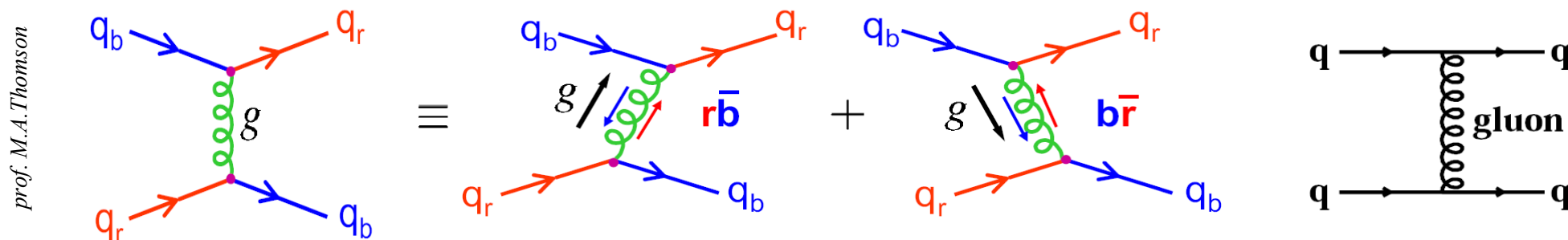


$$\underbrace{q\bar{q}}_{np} \Rightarrow \pi^0 \equiv \frac{1}{\sqrt{18}} (u\bar{u} + u\bar{u} + u\bar{u} + d\bar{d} + d\bar{d} + d\bar{d})$$



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

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



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

Grupa $SU(3)$

- Grupa unitarnych macierzy 3×3 z jednostkowym wyznacznikiem.
- W MS oznacza transformacje pomiędzy trzema stanami, np. kwarkowymi (red, green, blue) – grupa $SU(3)_C$.
- Symetria $SU(3)_C$ opisuje „rotacje” pomiędzy kolorowymi stanami kwarkowymi.
- Generatory grupy $SU(3)_C$ powinny mieć związek z gluonami – nośnikami oddziaływań silnych.
- Generatory – np. macierze Gell-Manna λ_i (pomnożone przez $\hbar/2$) (grupa Lie).

$$T^a = \frac{\lambda^a}{2}$$

$$T_1 = \frac{\hbar}{2} \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad T_2 = \frac{\hbar}{2} \begin{pmatrix} 0 & -i & 0 \\ i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad T_3 = \frac{\hbar}{2} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

$$T_4 = \frac{\hbar}{2} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad T_5 = \frac{\hbar}{2} \begin{pmatrix} 0 & 0 & -i \\ 0 & 0 & 0 \\ i & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad T_6 = \frac{\hbar}{2} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix},$$

$$T_7 = \frac{\hbar}{2} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -i \\ 0 & i & 0 \end{pmatrix}, \quad T_8 = \frac{\hbar}{2\sqrt{3}} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -2 \end{pmatrix},$$

Grupa SU(3)

- Kwarki występują w trzech kolorach (są trypletami koloru):

$$q = \begin{pmatrix} q_r \\ q_g \\ q_b \end{pmatrix}$$

- Transformują się jako: $q \rightarrow U(x)q$, $U(x) \in SU(3)$.
- Jest 8 generatorów, zatem 8 gluonów:
- Gluony są kolorowe i oddziałują ze sobą.
- Na wzór elm wprowadzane są **pola cechowania**
- Grupa SU(3) jest **nieabelowa**.

$$D_\mu = \partial_\mu + ig_s G_\mu^a T^a$$

Grupa SU(3) – rotacje pomiędzy kwarkami

- Każdy stan kwarkowy zapiszmy w postaci:

$$q_r = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad q_g = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad q_b = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

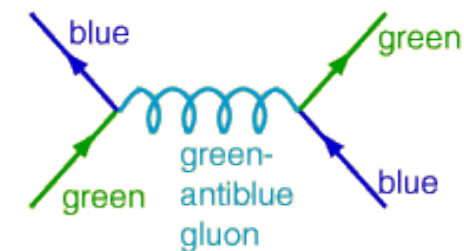
- Zadziałajmy macierzą Gell-Manna:

$$\lambda^1 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$T^1 q_r = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \frac{1}{2} q_g$$

czyli generator T_1 zamienia część czerwonego kwarka na zielony....

Oznacza to wymianę gluonu $\bar{r}g$ ($g_{\bar{r}g}$)



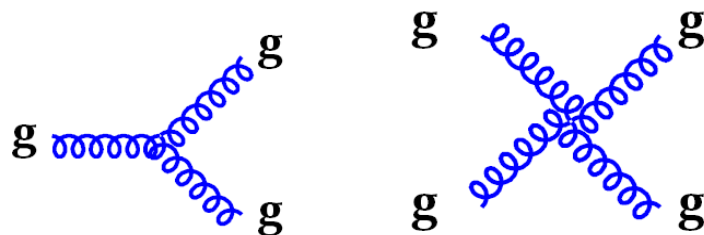
[HyperPhysics](#)

Samoodziaływanie gluonów

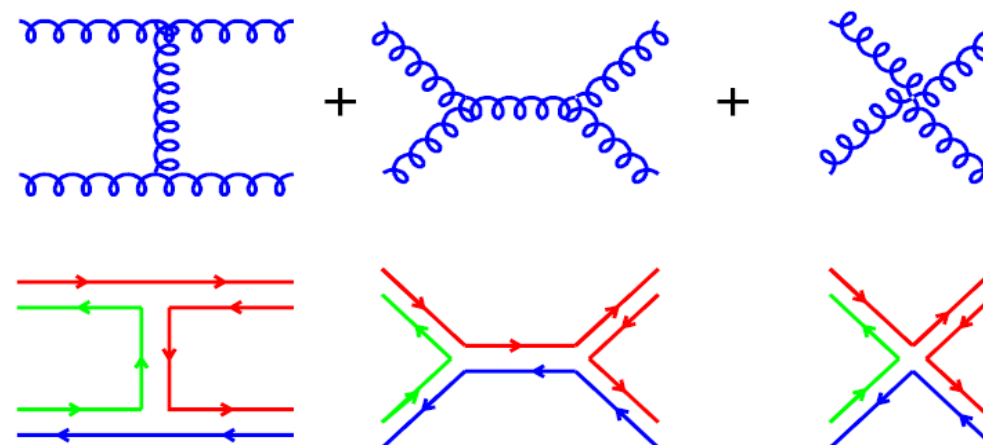
Podstawowa różnica pomiędzy QED a QCD – gluon przenosi ładunek „kolorowy” -

GLUON MOŻE ODDZIAŁYWAĆ Z INNYM GLUONEM

Kreacja pary gluonów przez gluon
(wierzchołek trójgluonowy):



Rozpraszanie gluonów

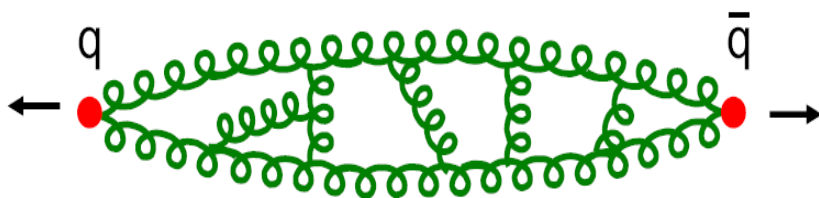


e.g. $r \bar{g} + g \bar{b} \rightarrow r \bar{r} + r \bar{b}$

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.



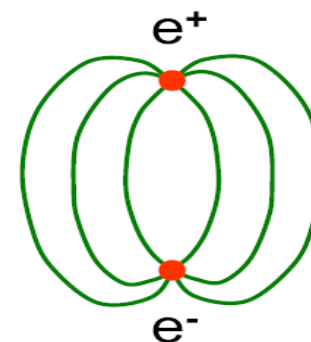
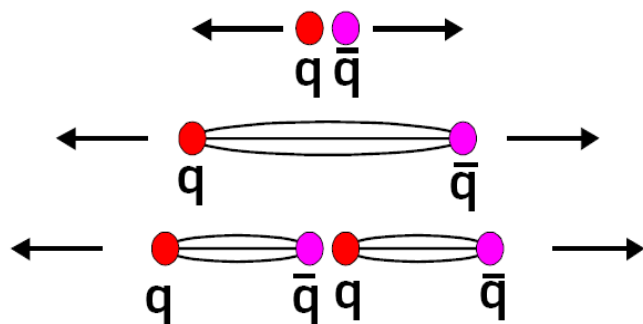
UWIEZIENIE KWARKÓW (confinement)

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

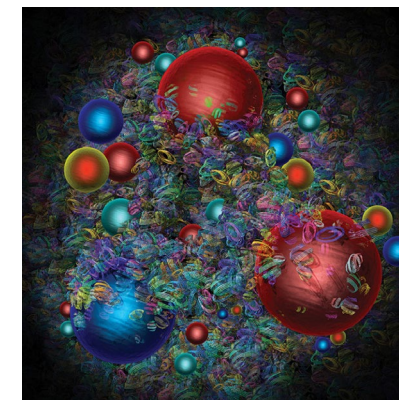
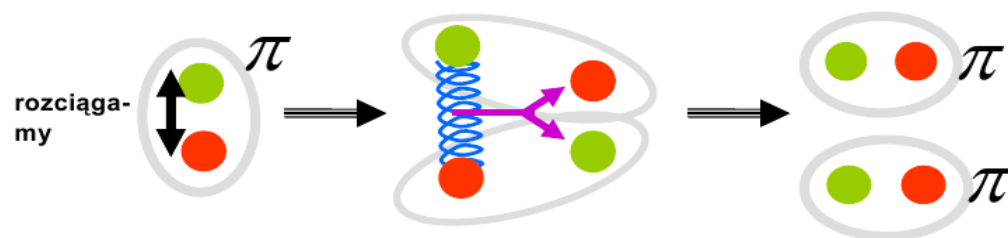
- Do rozdzielania kwarków potrzebna nieskończona energia.

Pęki hadronowe

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

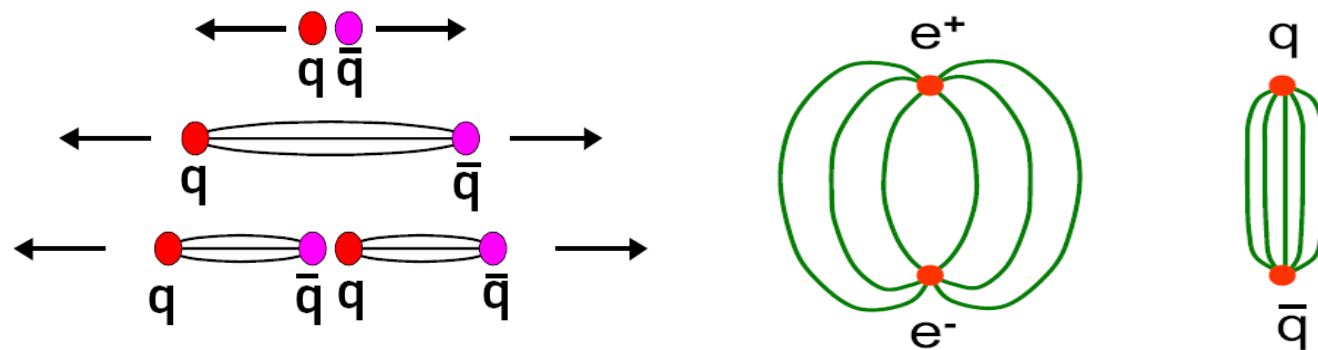


następnie „sparowane” kwarki się rozsuwają – powstają hadrony

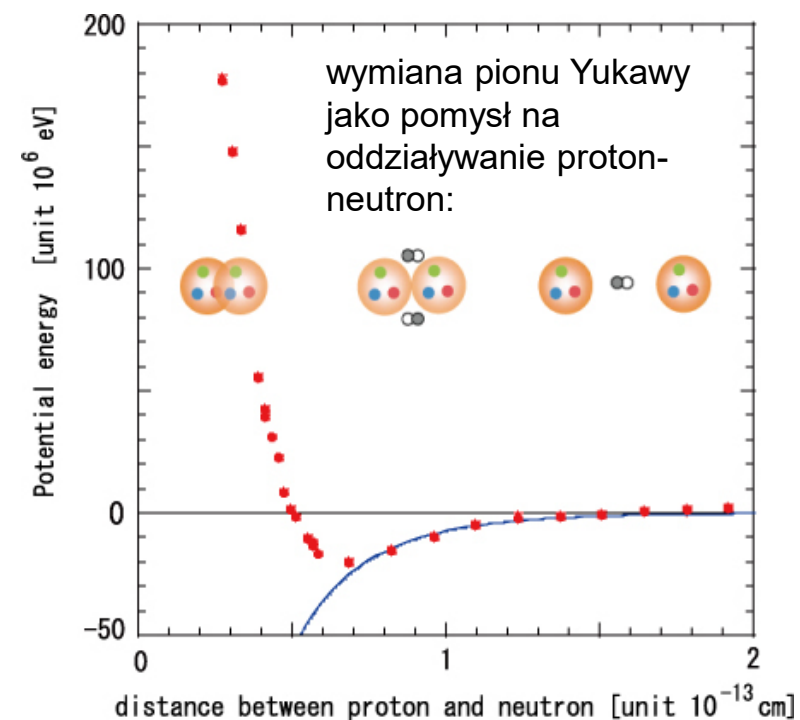
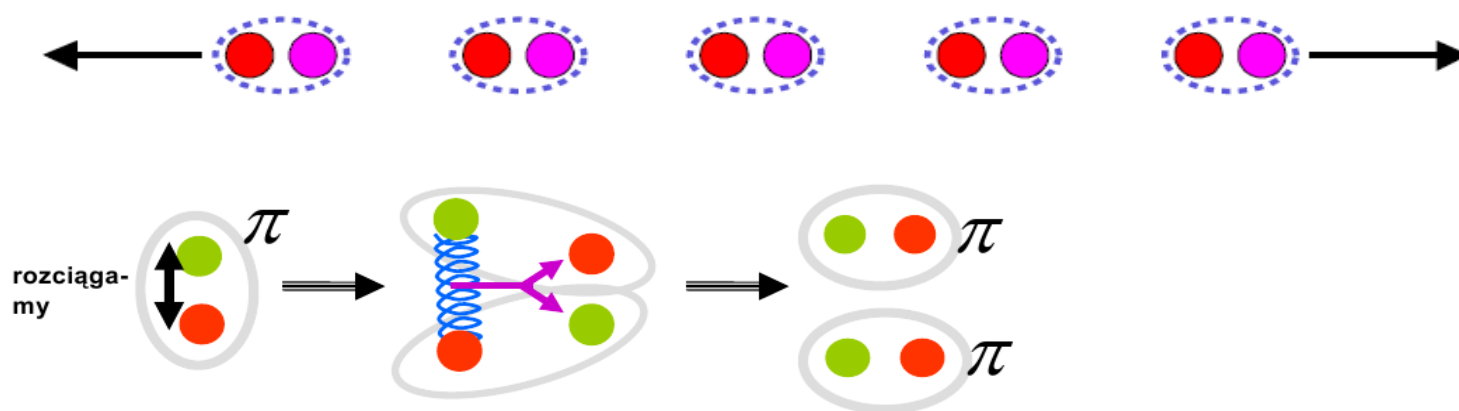


Pęki hadronowe

- 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

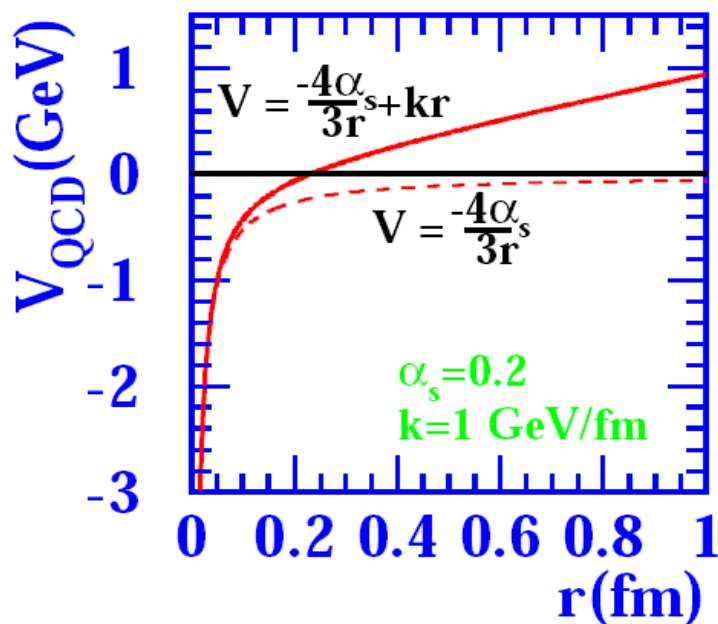


Silna stała

- 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



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

with $k \approx 1 \text{ GeV/fm}$

$$F = -\frac{dV}{dr} = \frac{\alpha_s}{r^2} + k$$

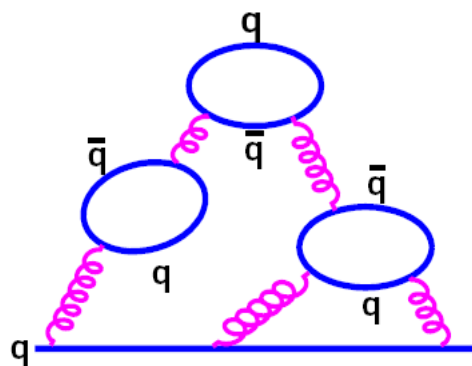
at large r $F = k = \frac{1.6 \times 10^{-10}}{10^{-15}} \text{ N}$

$$= 160000 \text{ N}$$

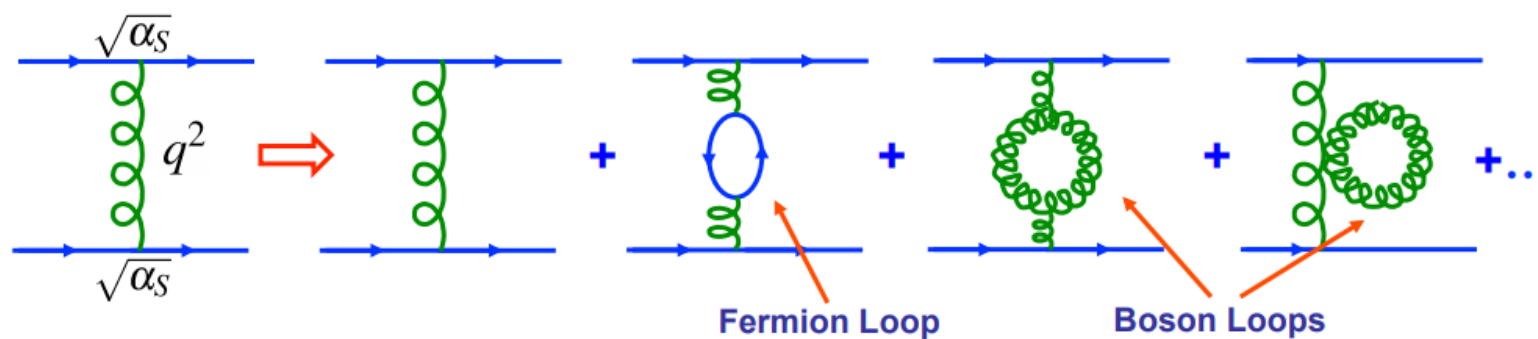
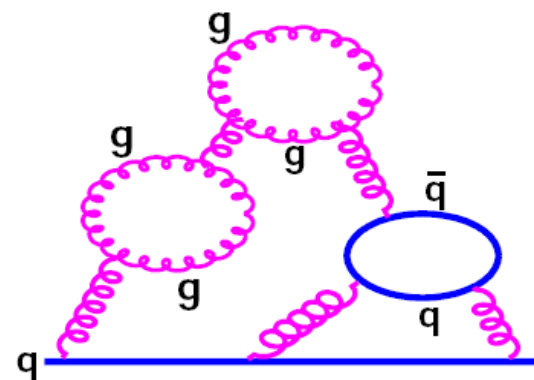
α_s określa siłę silnych oddziaływań.

Silna stała

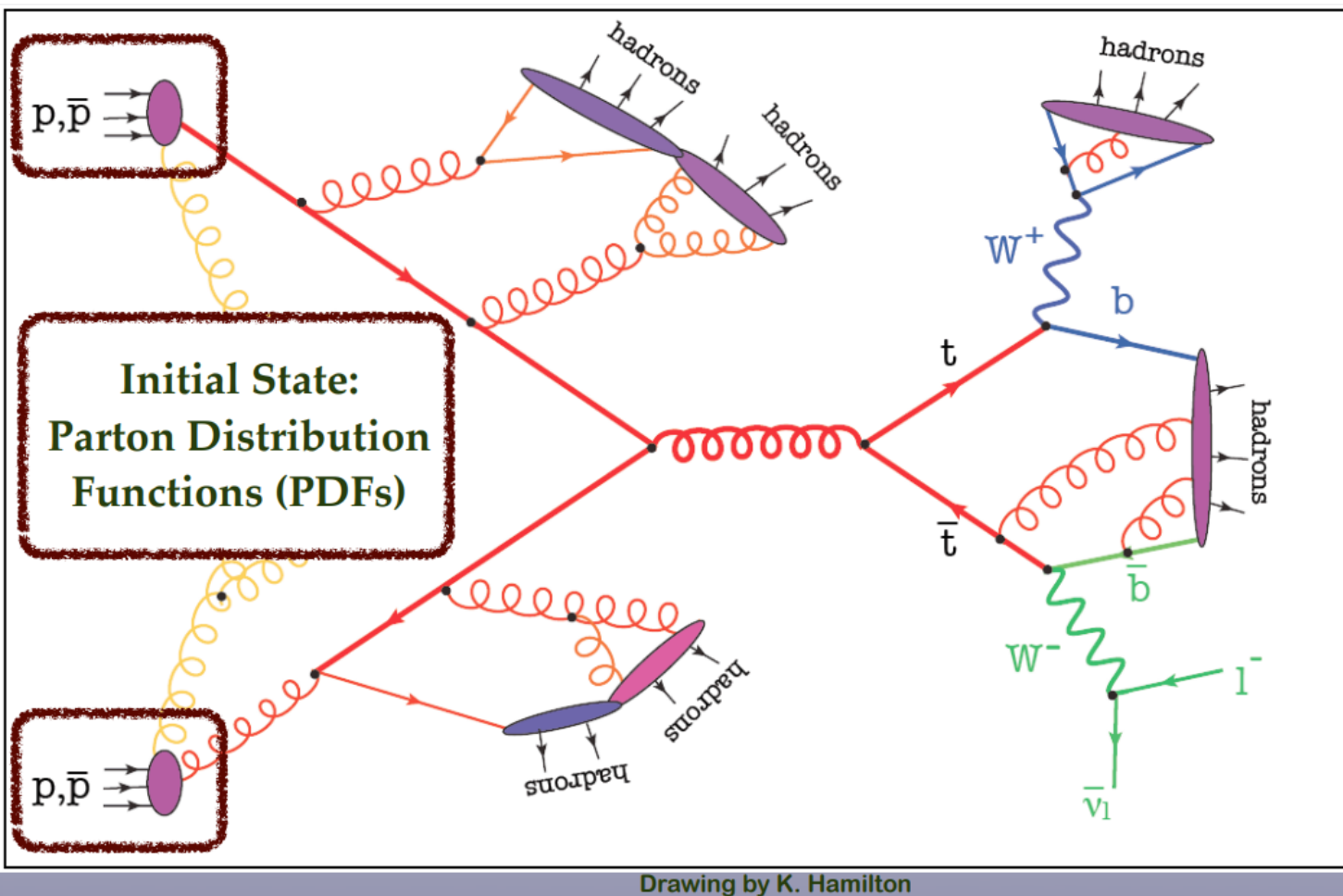
W QCD kwantowa fluktuacja próżni daje chmurę wirtualnych par kwarków:



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



QCD @ LHC



Oddziaływania protonów - niskie energie

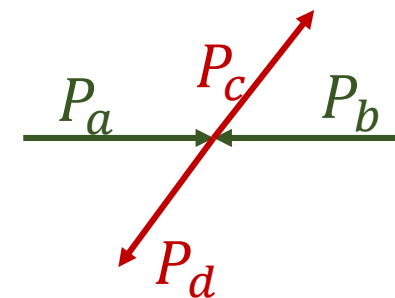
- Oddziaływania protonów o energiach kilkaset MeV –
 - ✓ oddziaływanie elektromagnetyczne
 - ✓ silne oddziaływanie resztkowe (jądrowe),
 - ✓ oddziaływanie pomiędzy hadronami, a nie pojedynczymi kwarkami,
 - ✓ teorie „efektywne”,
 - ✓ brak stanu związanego proton-proton, ale jest proton-neutron (dlaczego?)

-

Rozpraszanie elastyczne protonów

■ Rozpraszanie elastyczne $p + p \rightarrow p + p$:

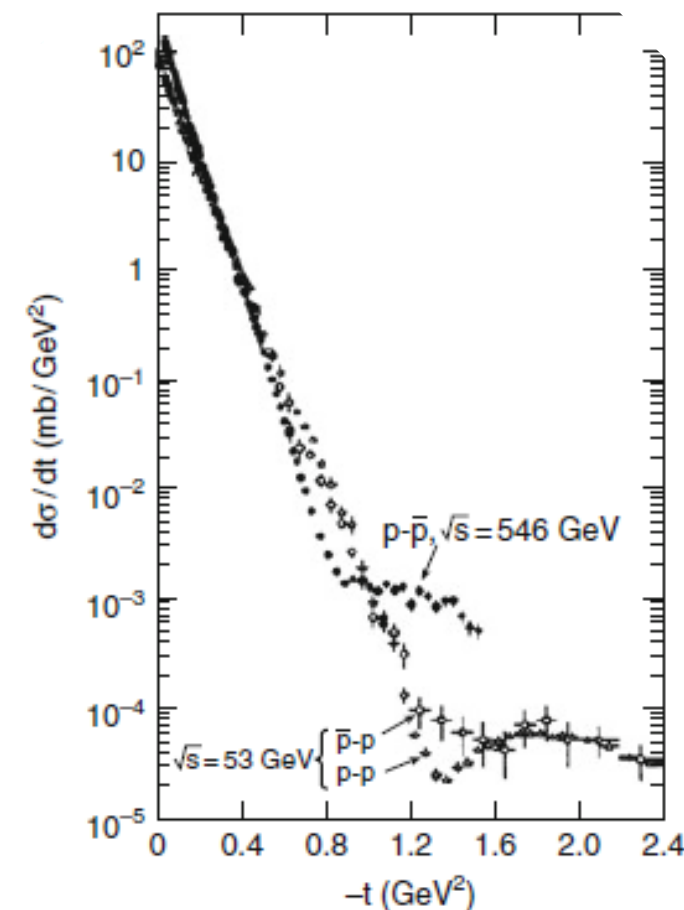
- ✓ nie tworzą się nowe stany
- ✓ całkowita energia zachowana,
- ✓ kąty rozpraszania dają informację o dynamice oddziaływania



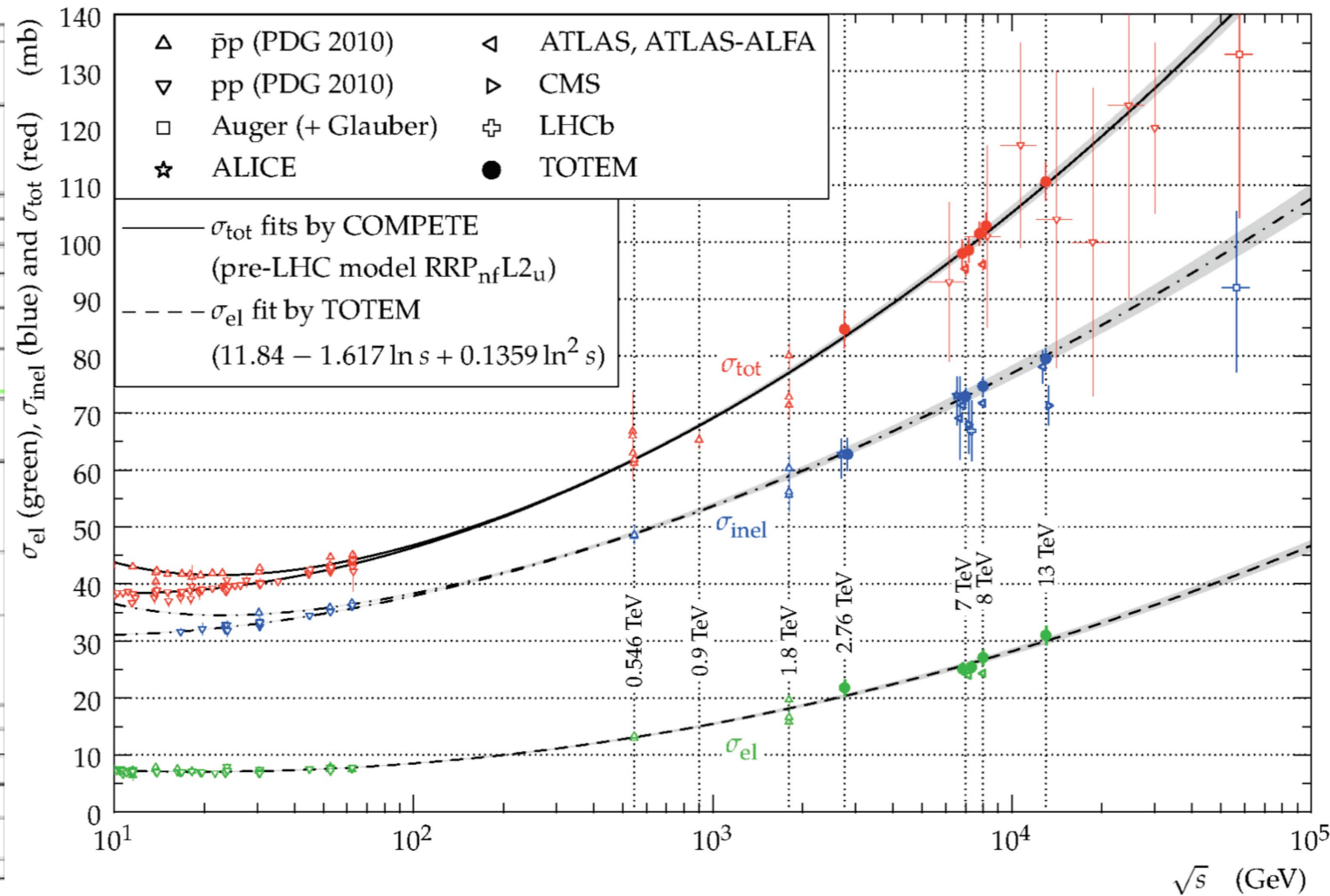
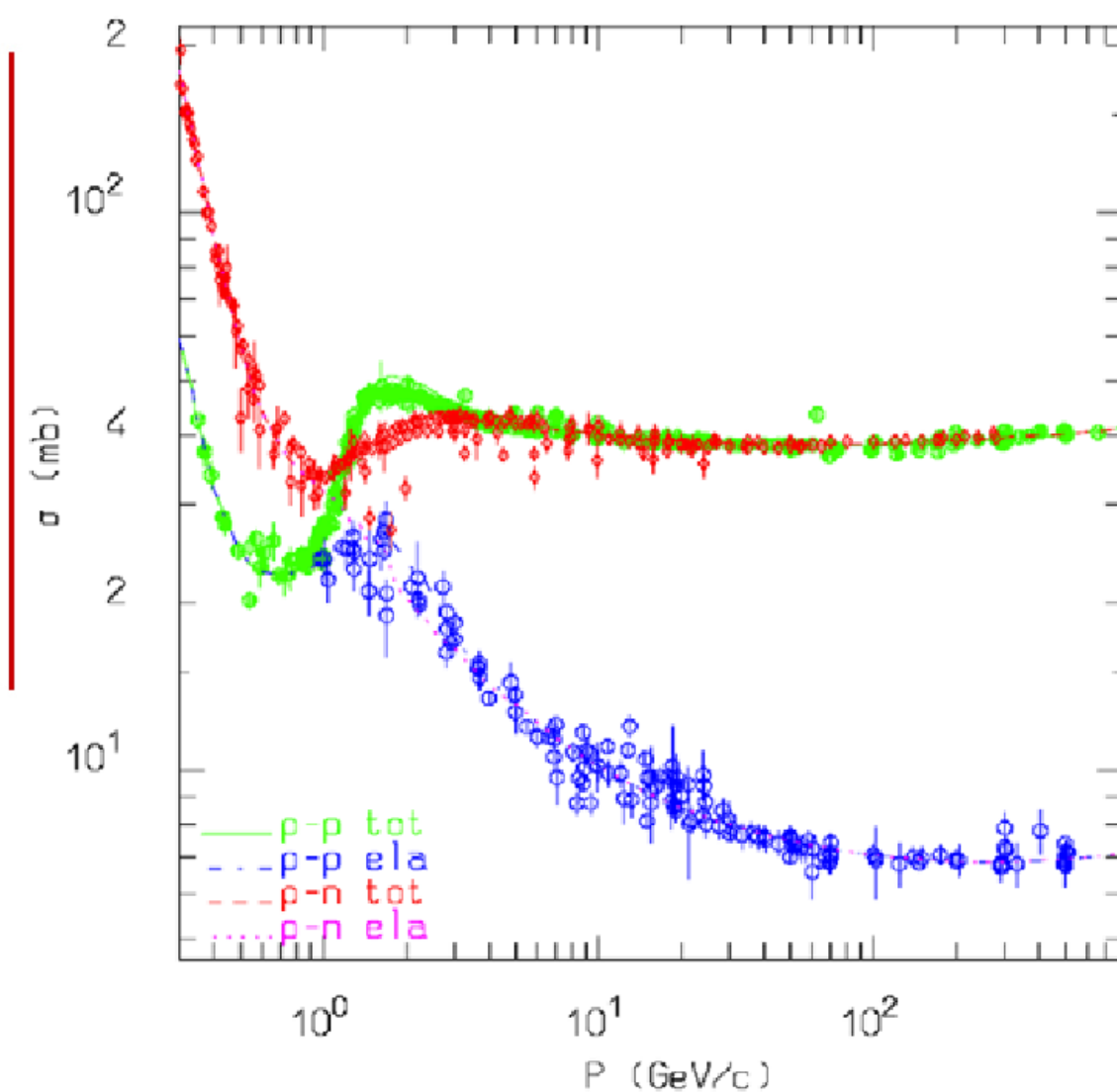
$$t = (P_c - P_a)^2 \quad t \leq 0$$

$$t = -2p^2(1 - \cos\theta_{CM}) \cong -p^2 \theta^2 \text{ dla małych } \theta$$

- Małe t – rozpraszanie pod małymi kątami, małe pędy poprzeczne, niskie wymiany pędów
- „Wymiana cząstki w kanale t ” – w zależności od energii: pionu i mezonów ρ, ω, ϕ .

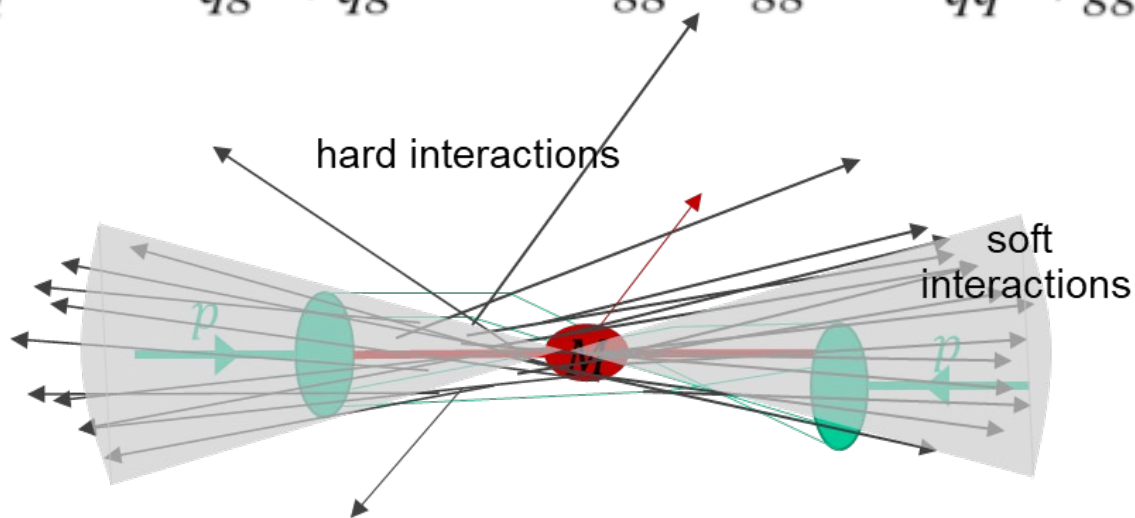
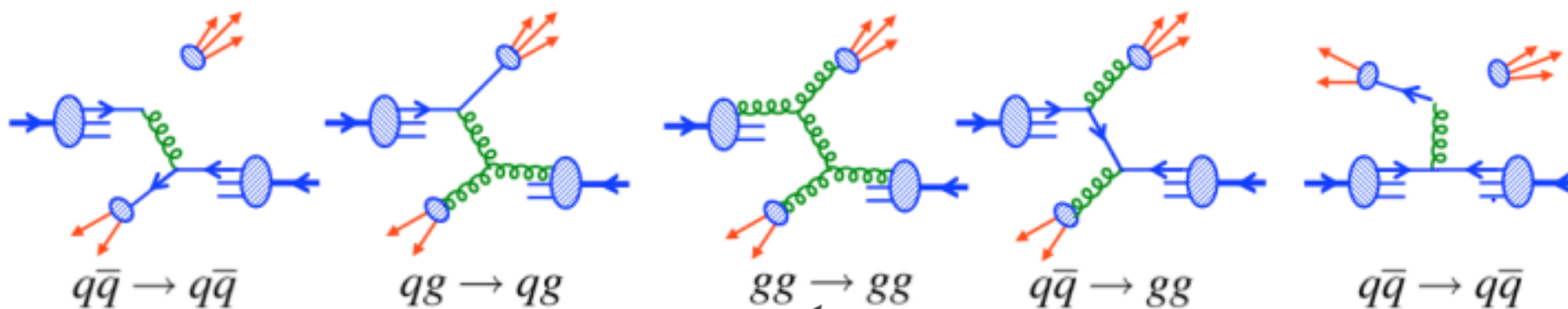


Oddziaływania protonów



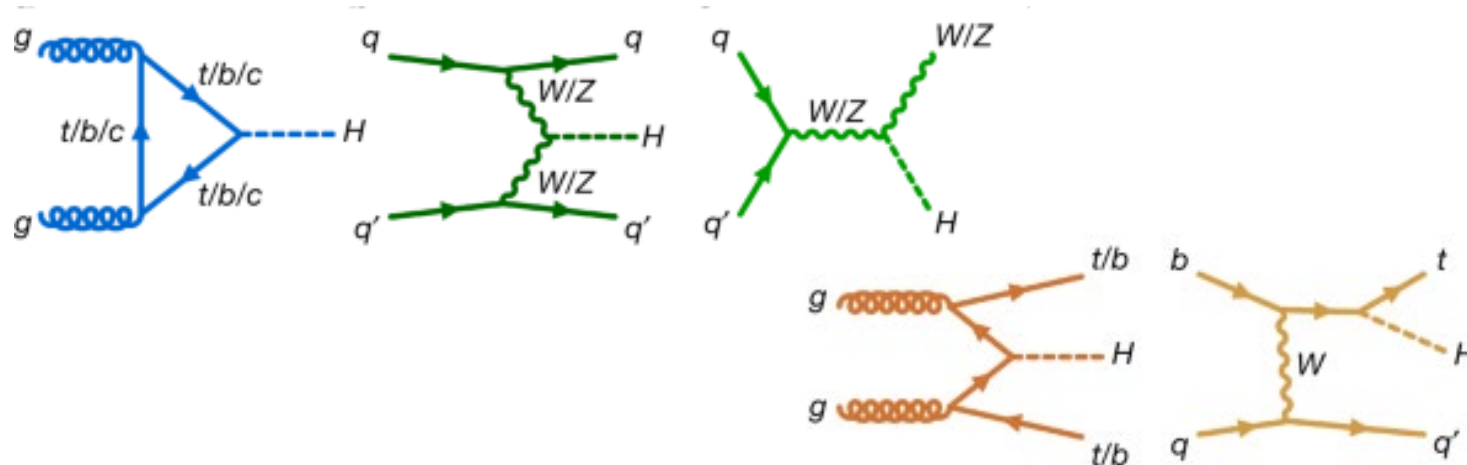
QCD @ LHC

- Obszar kinematyczny dostępny w zderzeniach proton-proton przy energiach 3-7-14 TeV obejmuje najszersze 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), niepewności teoretyczne, modele

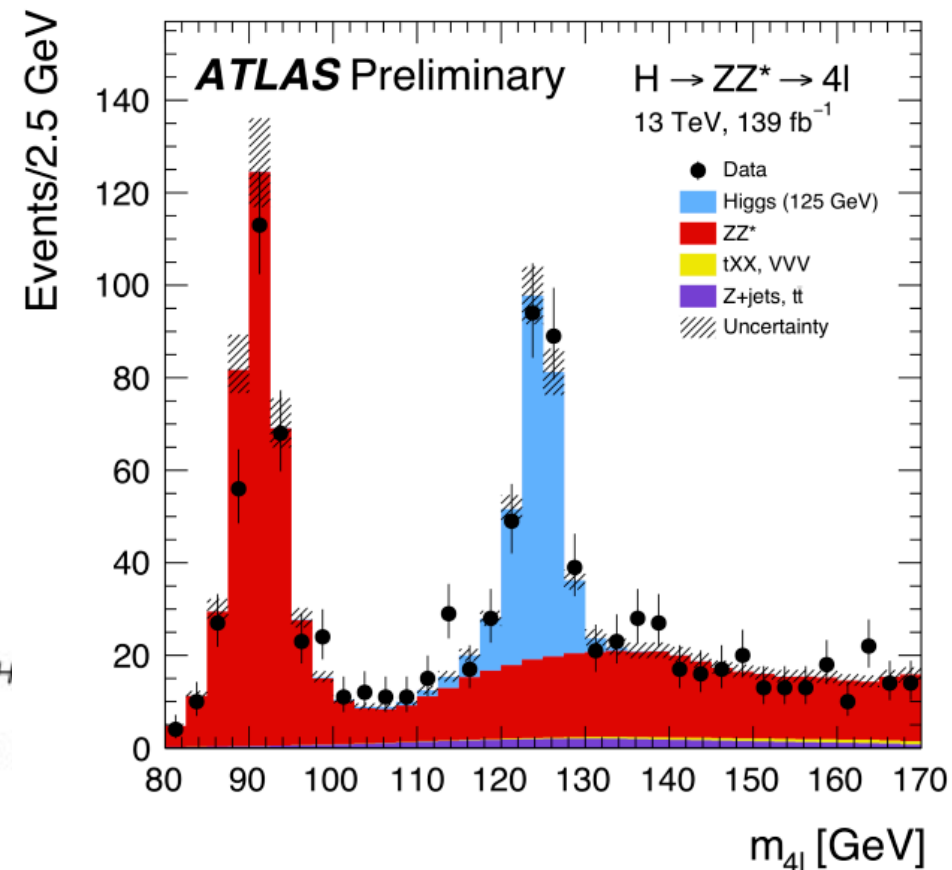
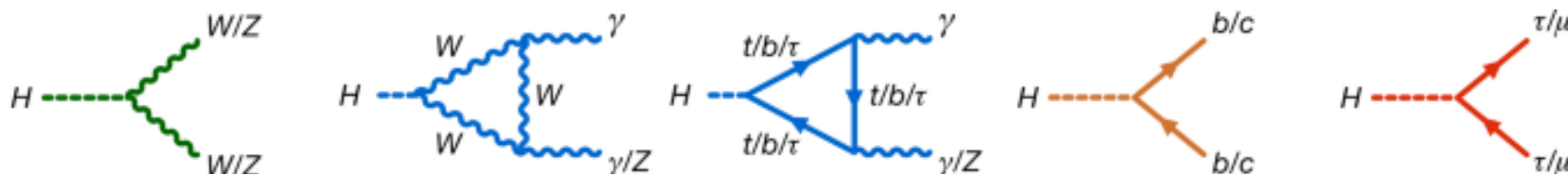


LHC jako zderzacz gluonów

- Produkcja bozonu Higgsa na LHC – fuzja gluonowa lub fuzja bozonów wektorowych:



- Obserwacja bozonu Higgsa na LHC - rozpady:



Badania oddziaływań silnych (np. protonów) wymagają ZAWSZE modelowania tła od fizyki elektroslabej

