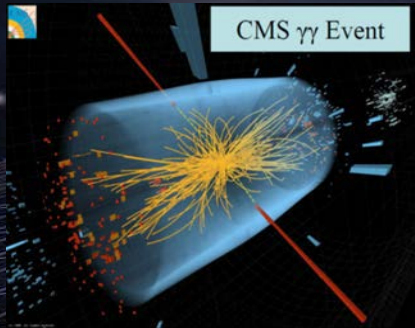


Wszechświat cząstek elementarnych



WYKŁAD 6

M. Krawczyk, A.F. Żarnecki - Wydział Fizyki UW

**Siły: porównania oddziaływań
stałe sprzężenia**

Diagramy Feynmana

Oddziaływania:

elektromagnetyczne i grawitacyjne

elektromagnetyczne i silne (kolorowe)

Biegące stałe sprzężenia: α i α_s

uwięzienie i asymptotyczna swoboda

Procesy skrzyżowane

Siły - porównania

W makro- i mikroświecie występują:

- **grawitacja** - działa między wszystkimi cząstkami, jest to zawsze przyciąganie; odpowiedzialna za tworzenie Układu Słonecznego, galaktyk..
- **siły elektromagnetyczne (e-m, el-mag)** - ładunki elektryczne mogą się odpychać lub przyciągać (np. wiązania atomowe).

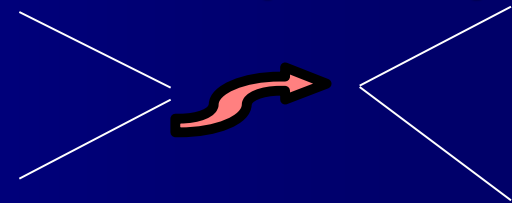
W mikroświecie dodatkowo występują:

- siły **silne (jądrowe)** wiążące nukleony (**wymiana pionów**) w jądra atom., zasięg 10^{-15} m
siły silne (jądrowe) fundamentalne (kolorowe), działające między kwarkami (wymiana gluonów), zasięg podobny
- siły **słabe** np. rozpad neutronu, zasięg mniejszy niż dla sił jądrowych (oddziaływanie punktowe)
siły słabe fundamentalne działają między kwarkami i leptonami (wymiana bozonów W / Z)

Zasięg oddziaływania

- Oddziaływania w mikroświecie = emisja i pochłanianie bozonów (foton, W/Z, gluon..) → wymiana cząstek
- **Zasięg** (z zasady Heisenberga, idea Yukawy) związany z masą wymienianej cząstki (nośnika oddziaływania)

$$\lambda \sim 1/M$$



- oddz. grawitacyjne i el-mag mają **zasięg nieskończony** → masa grawitonu? i fotonu = 0
- oddz. silne kolorowe : zasięg **~ rozmiar protonu 10^{-15} m** tu **uwięzienie** i bezmasowość gluonów nie decyduje o zasięgu
- oddz. słabe : **zasięg 10^{-18} m**, masa nośników 80-90 GeV

Uporządkowanie wg „siły”

- Porównanie: wg „siły” (*strength*) inaczej „natężenia”: oddz. grawitacyjne i el-mag – bardzo różne, **gravitacja b. słaba**, np. dwa protony oddziałują 10^{36} silniej elektromagnetycznie niż grawitacyjnie
- Uporządkowanie wg „siły” oddz. dla *niskich** energii: **silne > elektromagnetyczne > słabe > grawitacyjne**
** niskie energie: 1 GeV aż do około 100 GeV*
- Parametr opisujący elementarny akt oddziaływania („siłę”) danego typu oddz. to → **stała sprzężenia**

Stałe sprzężenia

„Siła” elementarnego aktu oddziaływania = stała sprzężenia:

el-m: $e^- \rightarrow e^- \gamma$, $e^- \gamma \rightarrow e^-$ e (ładunek el.)

słabe fund. (*weak fund.*): g ('słaby' ładunek)

$e^- \rightarrow \nu_e W^-$, $\nu_e \rightarrow e^- W^+$

$d \rightarrow u W^-$, $t \rightarrow b W^+$

$d \rightarrow d Z$, $Z \rightarrow \nu \bar{\nu}$

silne (*strong fund., color*): g_s ('silny' ład., ład. kolorowy)

$u_R \rightarrow u_G + g_{R,anty G}$

Prawdopodobieństwo elementarnego aktu oddziaływania*,**

el-m

$$\alpha = \alpha_{el} = e^2/4 \pi = 1/137$$

słabe fund. (weak fund.)

$$\alpha_w = g^2/4 \pi = 1/32$$

silne (strong fund, color)

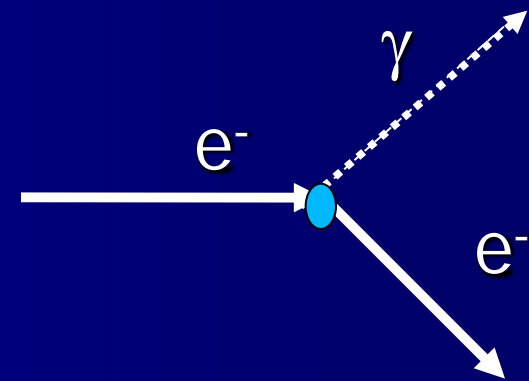
$$\alpha_s = g_s^2/4 \pi = 1$$

* też nazywamy stałą sprzężenia, ** wartości dla energii 1 GeV

Diagramy Feynmana- graficzne przedstawienie procesów

Diagramy Feynmana – cząstki reprezentujemy przez **linie**, a akt oddziaływania przez punkt przecięcia (**wierzchołek**)

Np. emisja fotonu przez elektron

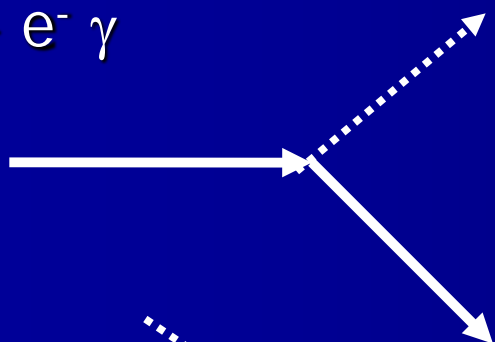


Strzałki na ciągłej linii (fermionowej) dla $e^- \rightarrow$ przepływ ładunku elektrycznego (ujemnego) i pęd,
strzałki na linii fotonowej (linia przerywana) \rightarrow pęd

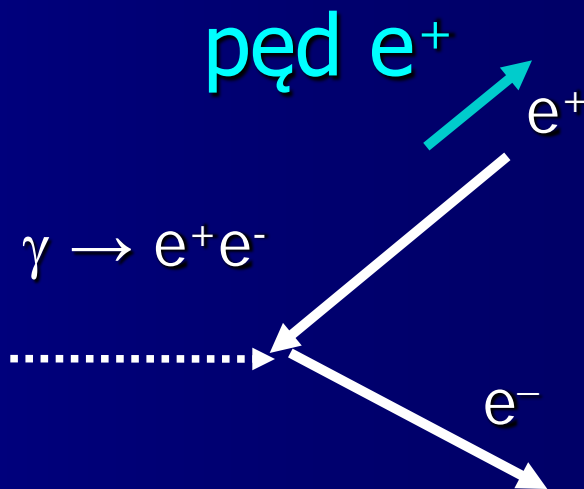
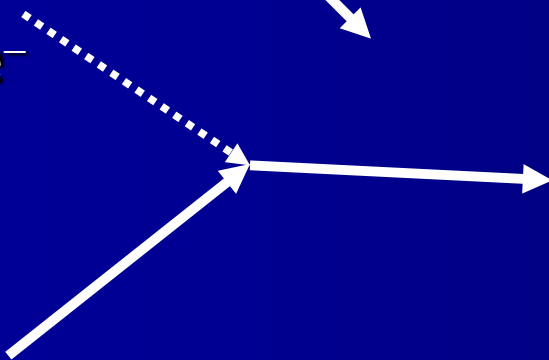
Diagramy Feynmana dla procesów skrzyżowanych

Procesy skrzyżowane z udziałem cząstek: $e^- e^- \gamma$

$e^- \rightarrow e^- \gamma$



$\gamma e^- \rightarrow e^-$



$\gamma \rightarrow e^+ e^-$



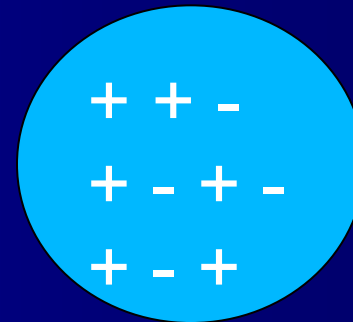
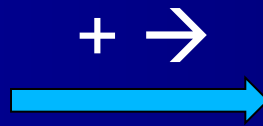
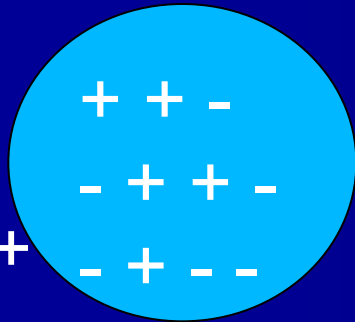
Dla e^+ przepływ ładunku (ujemnego) w przeciwnym kierunku niż ruch (pęd)

Przeptyw ładunków

Ładunek
układu

$$N_- = n_- - n_+$$

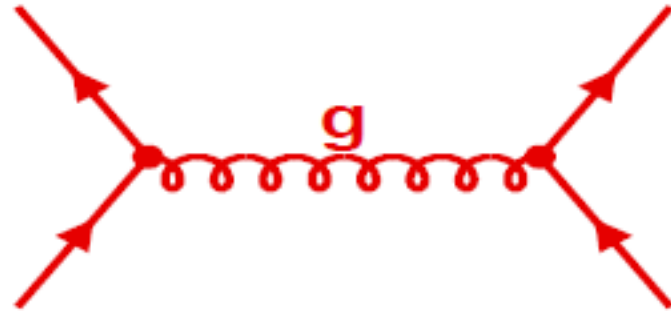
$$N_+ = n_+ - n_-$$



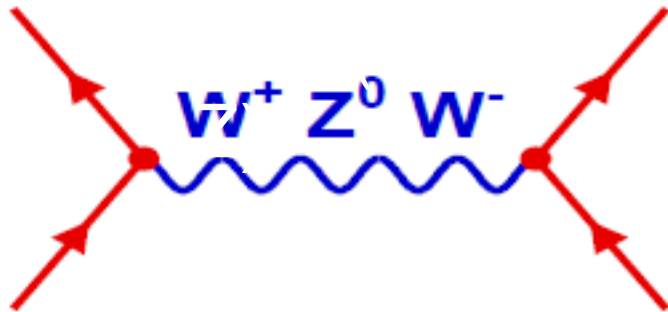
Diagramy Feynmana dla oddziaływań (przykłady)



elektromagnetyczne



silne



slabe



grawitacyjne

Elektromagnetyzm i grawitacja

- Oddziaływania elektromagnetyczne są znacznie silniejsze – więc dlaczego grawitację znano wcześniej?
- W dużych ciałach ładunki elektryczne się znoszą – zaś grawitacja się wzmacnia...
- Siła przyciągania dwóch ładunków elektrycznych, np. dla protonu i elektronu w atomie wodoru
$$F_{el} = e^2 / r^2 \quad \text{zaś} \quad F_{gr} = G M_p m_e / r^2$$
- Stosunek tych sił = $G M_p m_e / e^2$ wynosi ok. 10^{-40}

Stałe fundamentalne

Związek ze zjawiskami fizycznymi

c – fizyka relatywistyczna

prędkość światła

\hbar – fizyka kwantowa

stała Plancka $\hbar = h/2\pi$

G – grawitacja

stała grawitacyjna (Newtona)

Stała struktury subtelnej

Ładunek elektryczny e

Wielkość ($\alpha = e^2/4 \pi \hbar c = 1/137$) - to stała struktury subtelnej, wprowadzona do opisu oddz. elektronów z fotonami przez Sommerfelda w 1916r (*wyjaśnienie struktury subtelnej widm emisyjnych wodoru i srebra*)

→ ważna w relatywistycznej (c), kwantowej (\hbar) teorii ładunku elektrycznego (e) elektrodynamice kwantowej (powstałej w latach 20-30 XXw), gdzie α (inne ozn. α_{em} , α_{el}) - miarą „siły” oddziaływania el-mag elektronów i fotonów (→ stała sprzężenia)

Uwaga: we wzorach często formalnie przyjmujemy $\hbar c = 1$, np. na str. 5 w definicjach różnych stałych sprzężenia

Grawitacja - skale Plancka

- Zaniedbujemy grawitację dla pojedynczych cząstek elementarnych przy obecnych energiach
- Kiedy grawitacja może być ważna w mikroświecie?
Z wielkości G , h i c możemy utworzyć wielkość

$$(\hbar c/G)^{1/2} \text{ - masa Plancka}$$

- Skale Plancka :

długość Plancka = 10^{-35} m,

masa (energia) Plancka = 10^{19} GeV

Dla tych skal → **relatywistyczna kwantowa grawitacja**, ale wciąż poszukujemy takiej teorii...

gravitacja kontra elektromagnetyzm

wg wykładu Close'a

 ep in H atom

$$\frac{\text{Gravity P.E.}}{\text{Electromag}} \approx 10^{-40}$$

c.f. size of proton $\approx 10^{-15}$ m.

$$\begin{aligned} \text{size of univ.} &\leq 10^{10} \text{ yr.} * 10^{16} \text{ m yr}^{-1} \\ &\leq 10^{26} \text{ m.} \end{aligned}$$

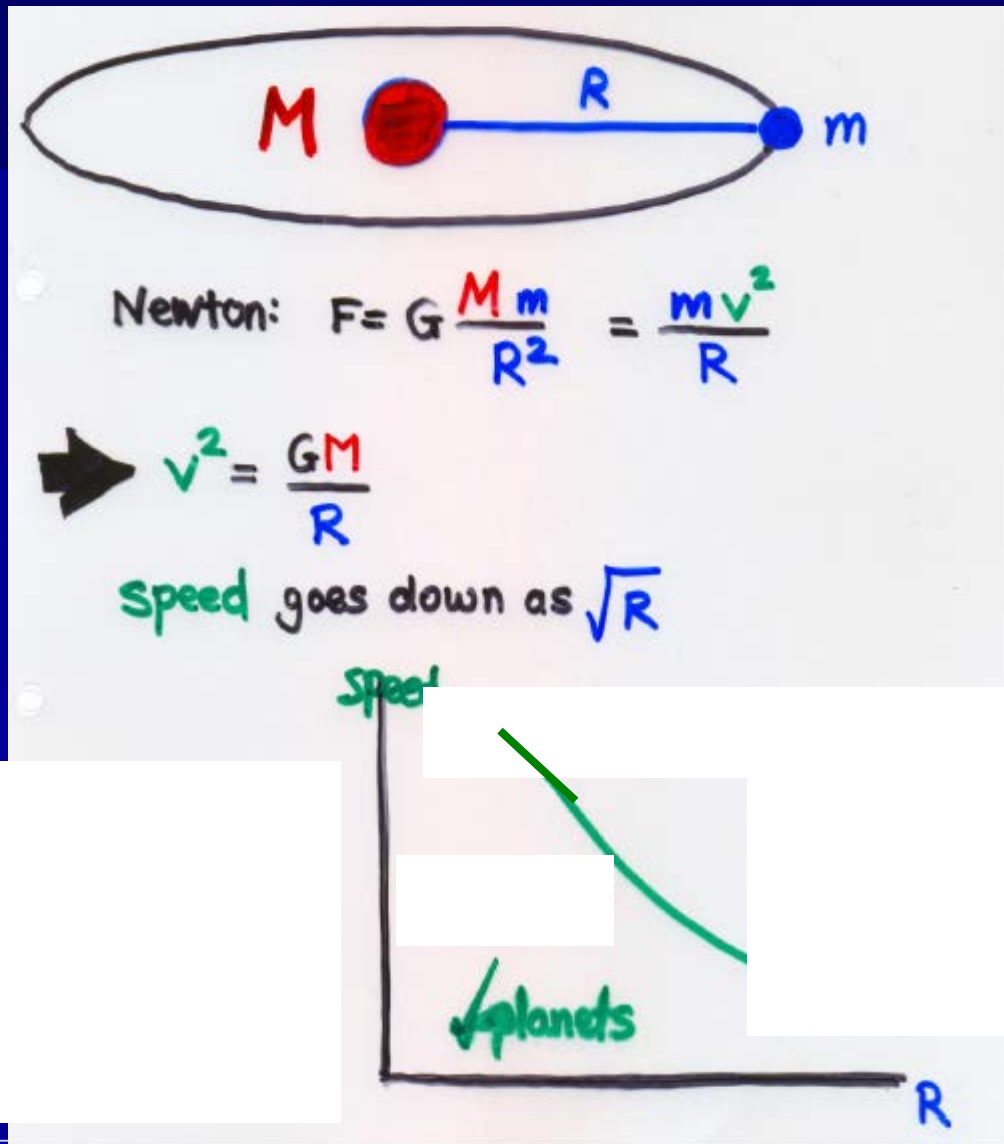
$$10^{-40} \approx \frac{\text{Radius of proton}}{\text{Radius of Universe}}$$

GRAVITY



Grawitacja zwycięża dla dużych ciał i dostarcza zagadek, które mogą się wiązać z cząstkami

Prędkość ciała o masie m w ruchu wywołanym przyciąganiem grawitacyjnym wokół masy M

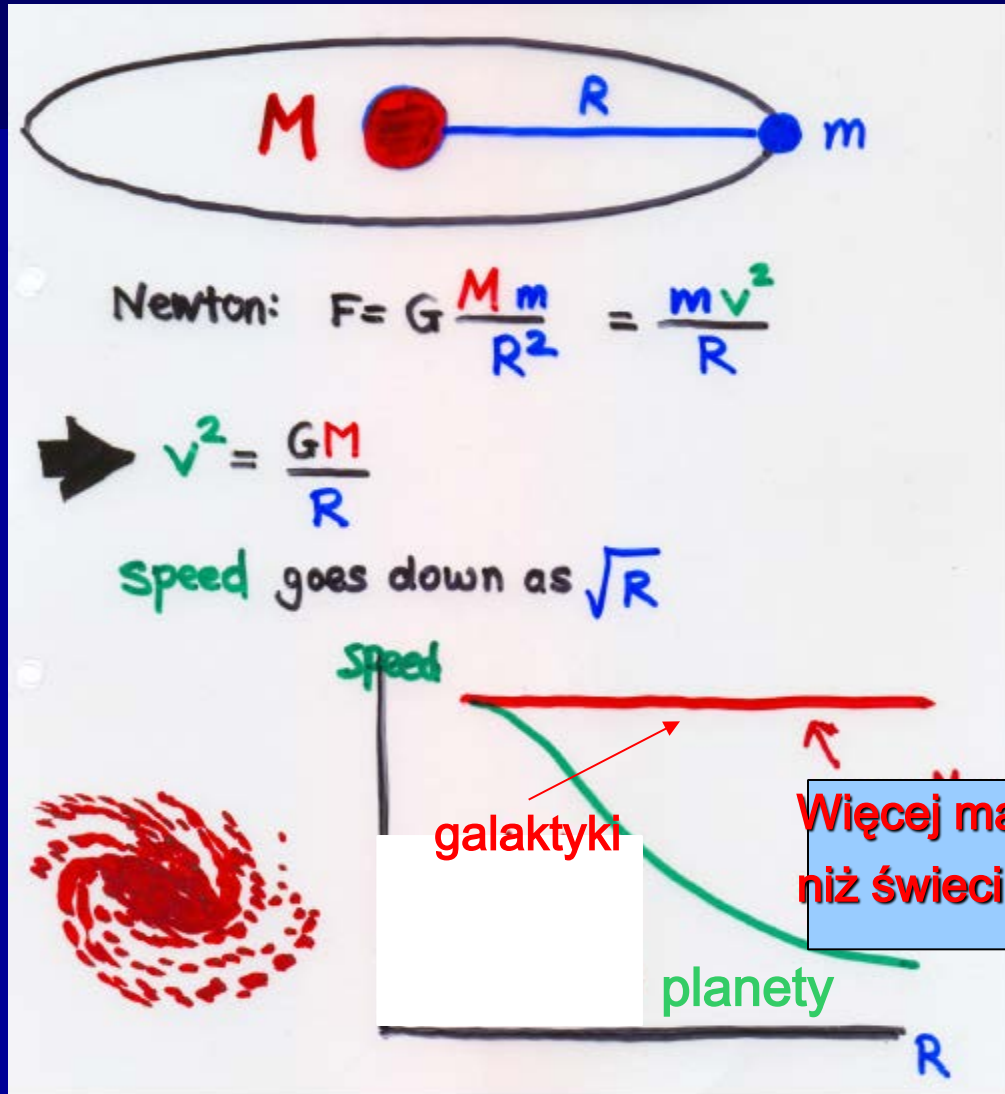


Prędkość maleje gdy promień R rośnie

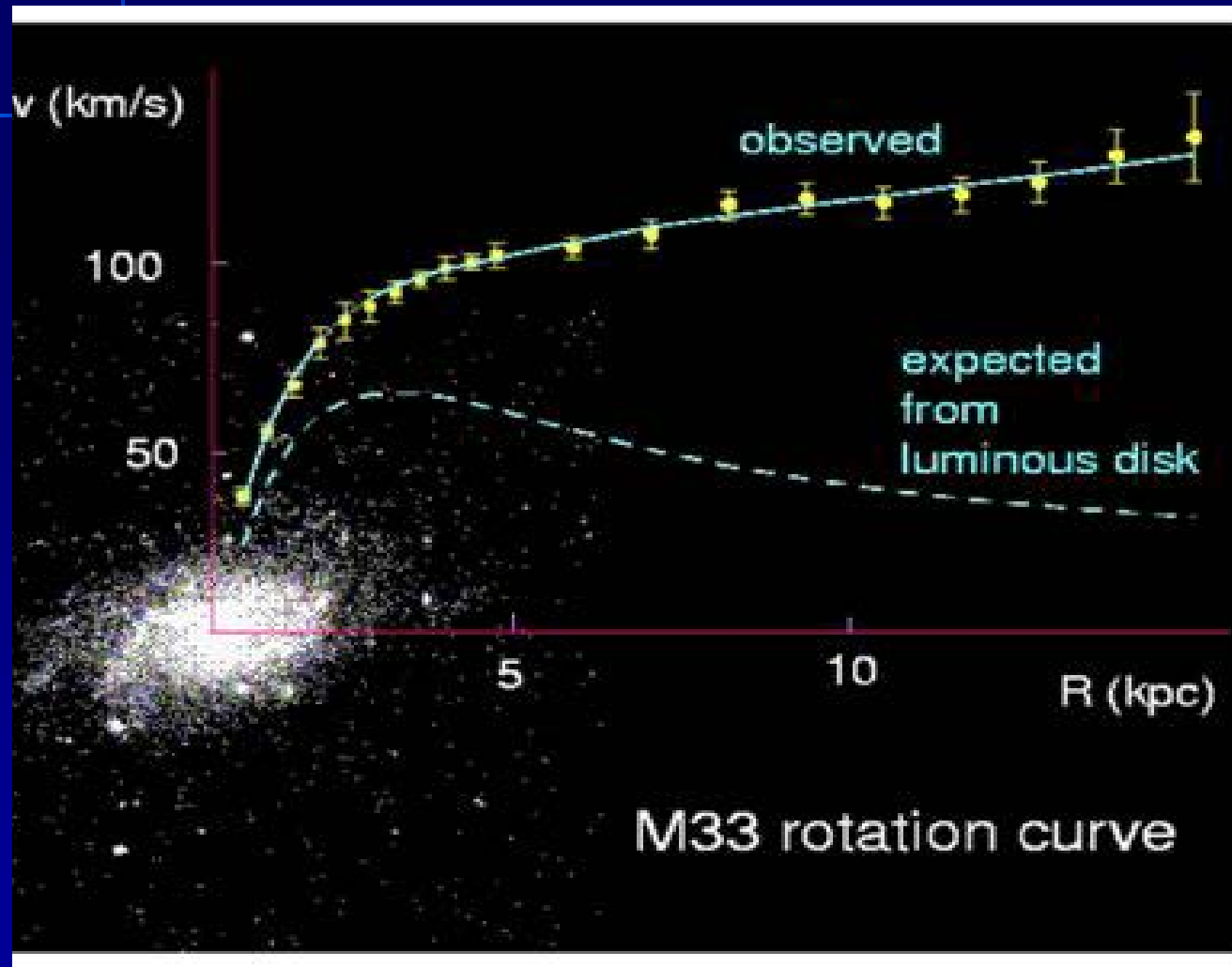
Tak jest dla planet !

CIEMNA MATERIA

Ale prędkość ciał w galaktykach – inaczej!



Krzywa rotacji



oczekiwane dla
← świecącego
dysku

Co to jest ciemna materia?

- Wciąż, nie wiemy, ale musi być neutralna elektrycznie

i albo:

- zimna ciemna materia – ciężkie cząstki (małe energie kinetyczne)

albo

- gorąca ciemna materia – lekkie cząstki (duże energie kinetyczne)

więcej w dalszych wykładach

Oddziaływania elektromagnetyczne
kontra oddziaływania silne (kolorowe)

Elektrostatyka

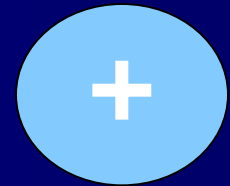
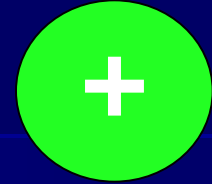
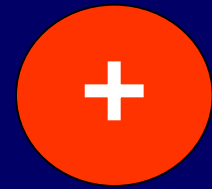
- Dwa typy ładunków elektrycznych: dodatnie (+) i ujemne (-)

CHROMOSTATYKA

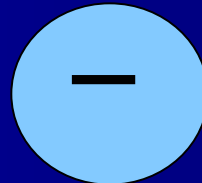
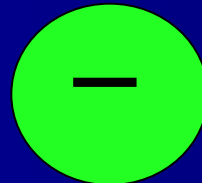
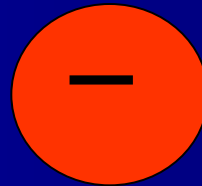
- Trzy rodzaje ładunków kolorowych (kolorów), z których każdy może być dodatni (+) lub ujemny (-) → kolory i antykolory

3 ładunki kolorowe

kwarki



antykwaraki

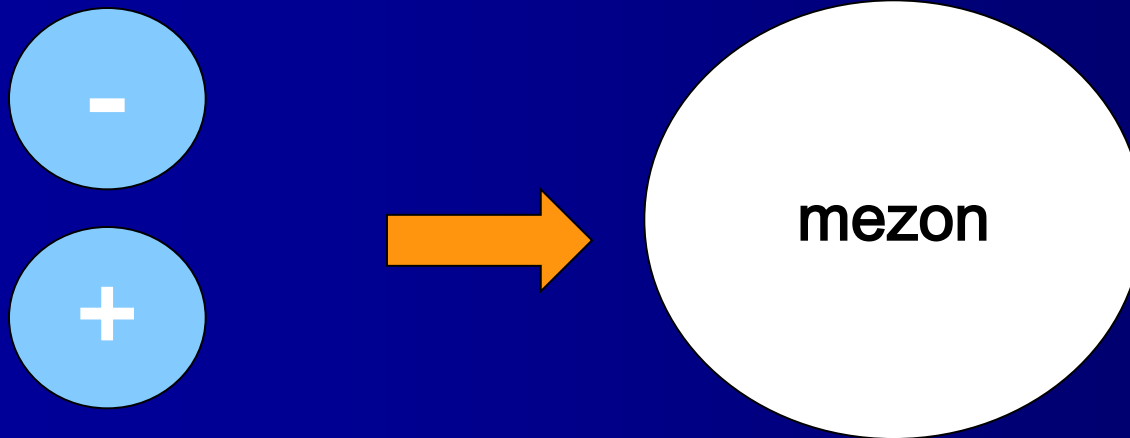


Znana reguła:

“Takie same kolory się odpychają, przeciwne - przyciągają”

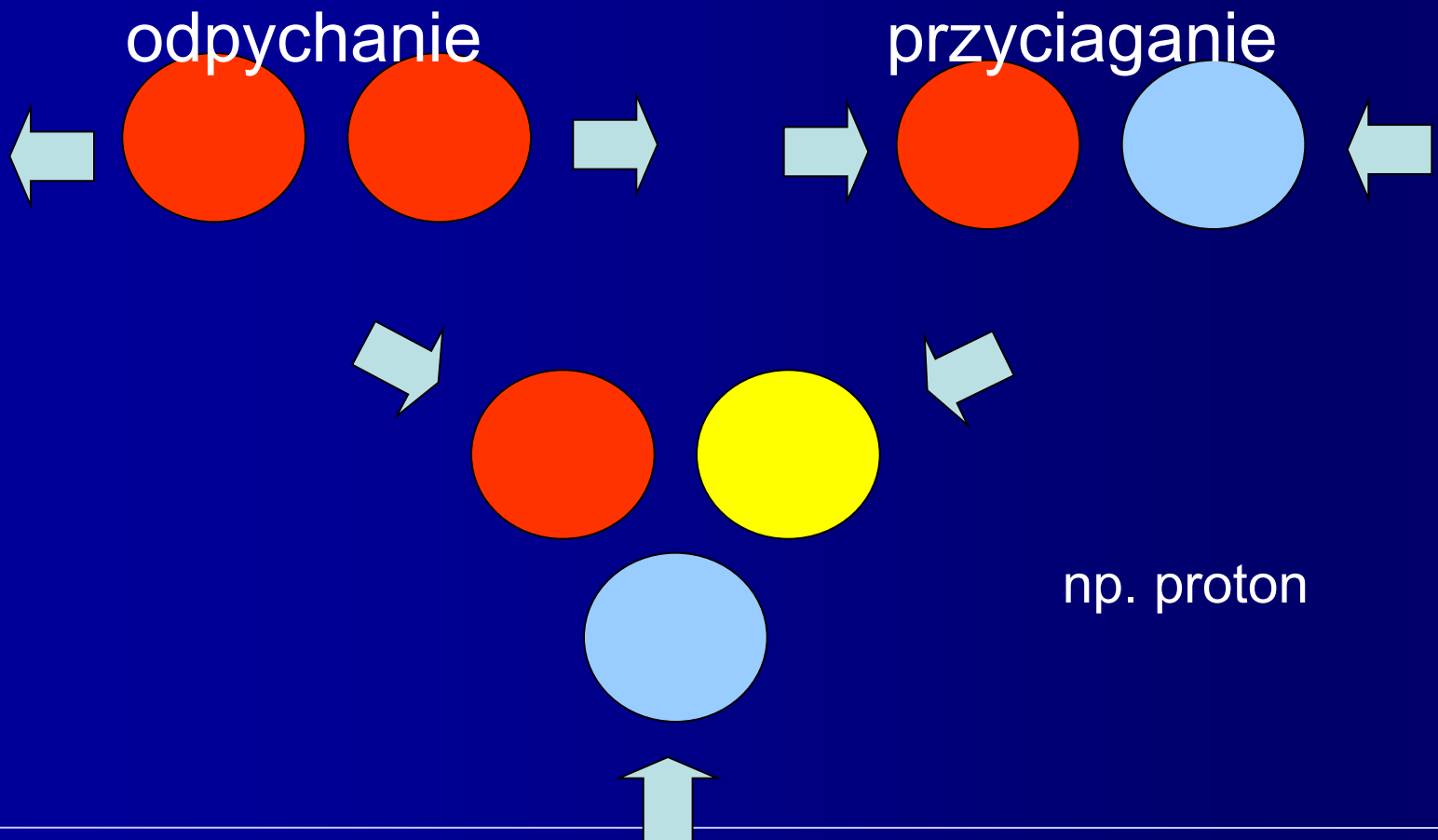
Najprostszy układ: mezon=kwark+antykwar

Kolory się znoszą, np



TRZY kolory

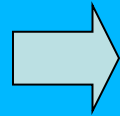
Potrzebne aby powstały bariony (3 kwarki)
(np. proton) = aby się kolor zneutralizował



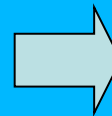
Elektrodynamika kwantowa

Quantum Electrodynamics: QED

Ładunek
elektryczny



Atomy

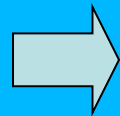


Molekuły
(cząsteczki)

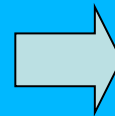
Chromodynamika kwantowa

Quantum Chromodynamics: QCD

Ładunek
kolorowy

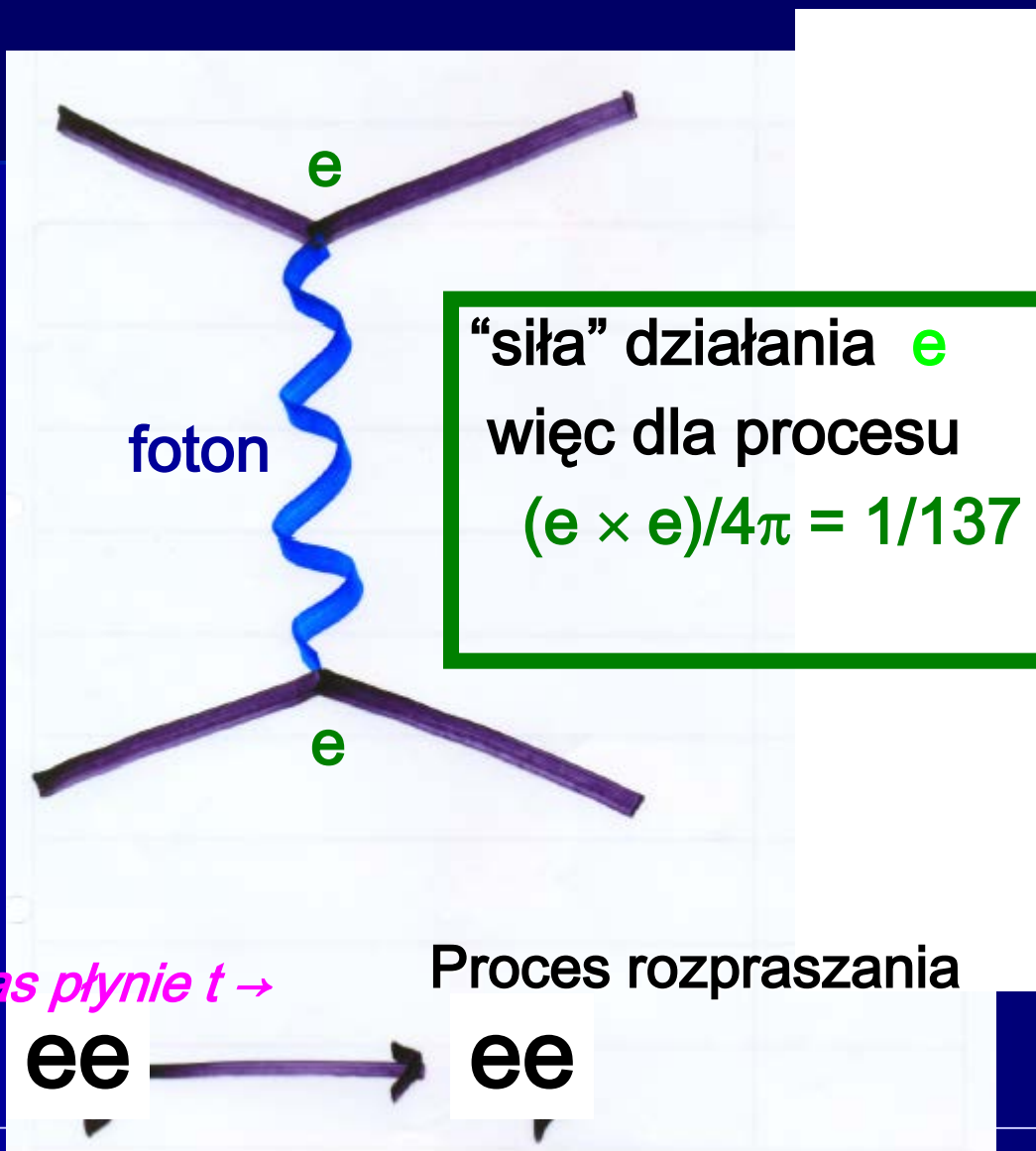


Nukleony



Jądra

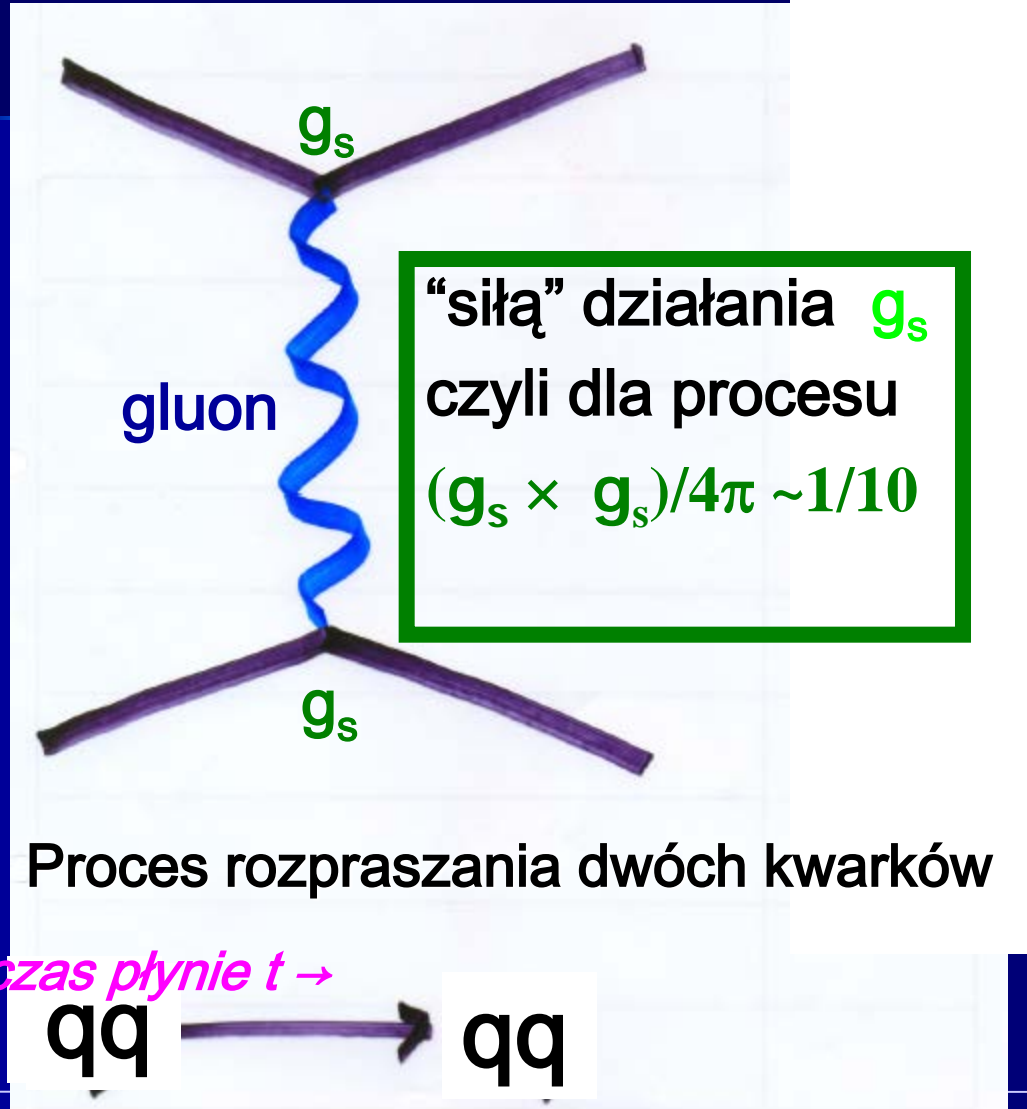
Diagramy Feynmana dla oddziaływań elektromagnetycznych



α

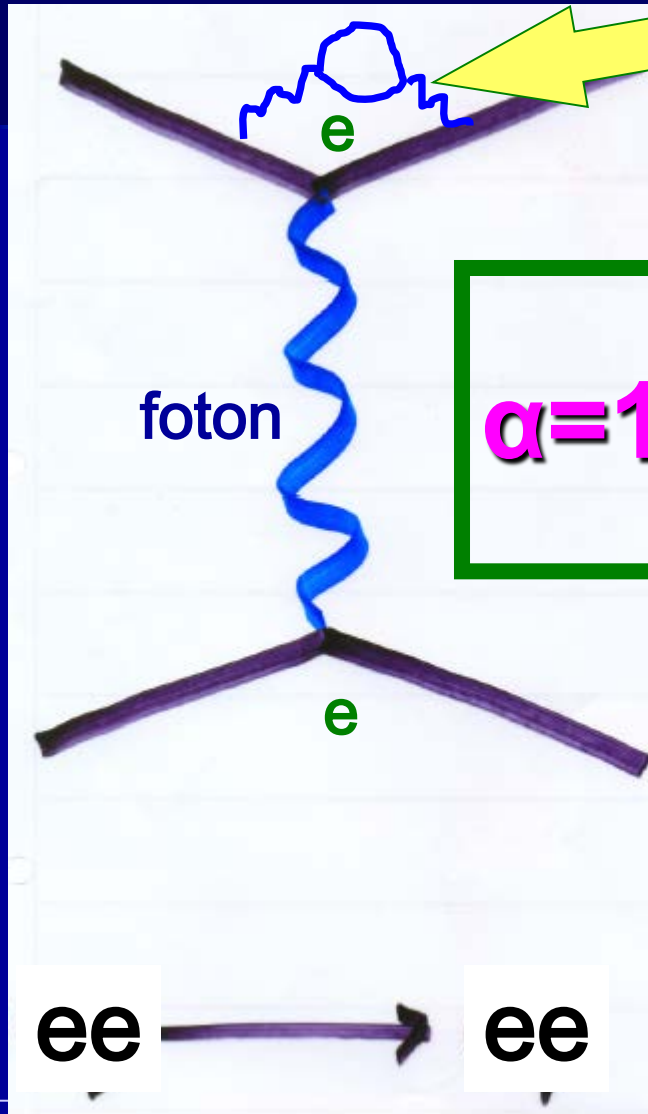
Proces rozpraszania dwóch elektronów

Diagramy Feynmana dla oddziaływań kolorowych



α_s

Diagramy Feynmana dla oddziaływań elektromagnetycznych



foton

$$\alpha = 1/137$$

efekty kwantowe
(tu wirtualne pary e^+e^- ...)
ujawniają się dla dużych
pędów p

(gdy $p \rightarrow 0$)

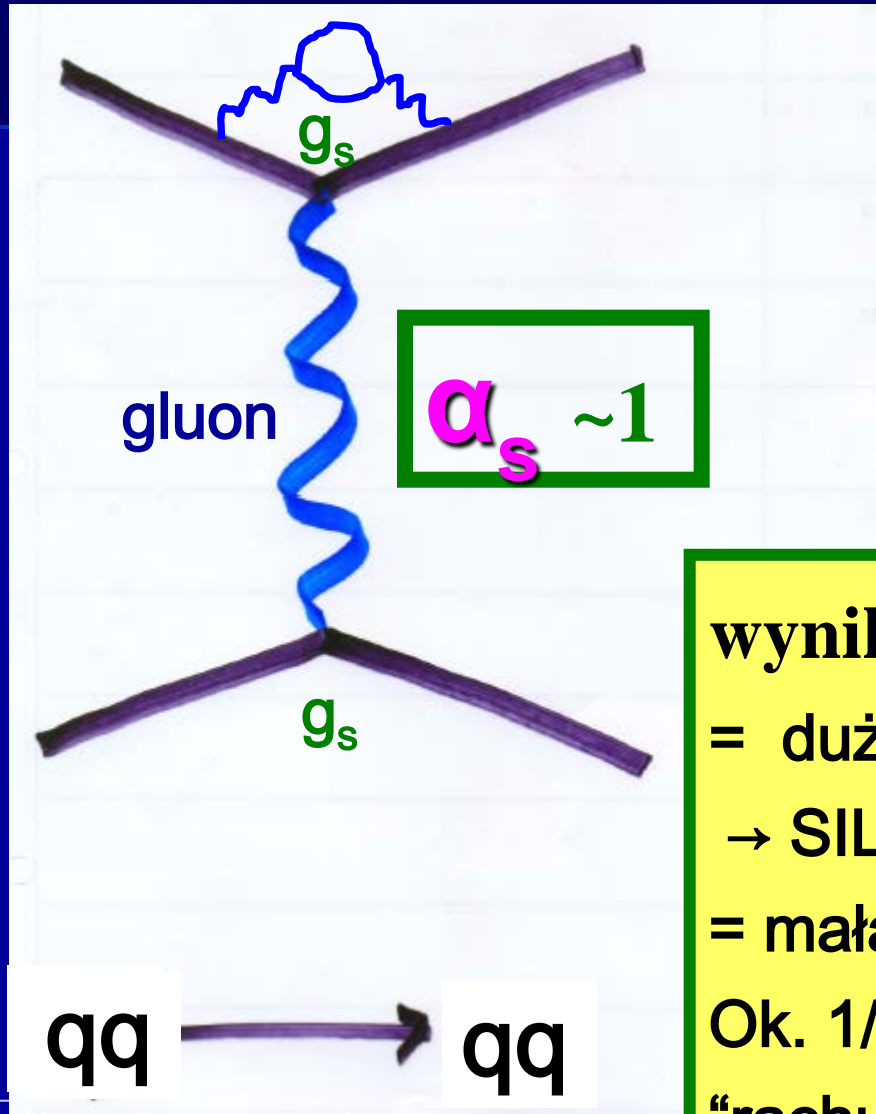
efekty kwantowe:

α rośnie z pędem:

dla $p \sim 100 \text{ GeV} \sim 1/128$

$E=pc$, wymiar $[p]=\text{GeV}/c$

Diagramy Feynmana dla oddziaływań kolorowych



Efekty kwantowe wQCD podobne jak w QED.

pętla kwarkowa

ale w QCD również pętla gluonowa !

wynik: α_s maleje z p !

= duża dla małych pędów

→ SILNE ODDZIAŁYWANIA!

= mała dla dużych pędów

Ok. 1/10 dla pędu 100 GeV

“rachunek zaburzeń QCD”

„Biegnąca” stała sprzężenia (dane 2008)

α_s



← **więzienie dla kwarków**

asymptotyczne swoboda →

: odległości rzędu rozmiaru protonu
(duże odległości)

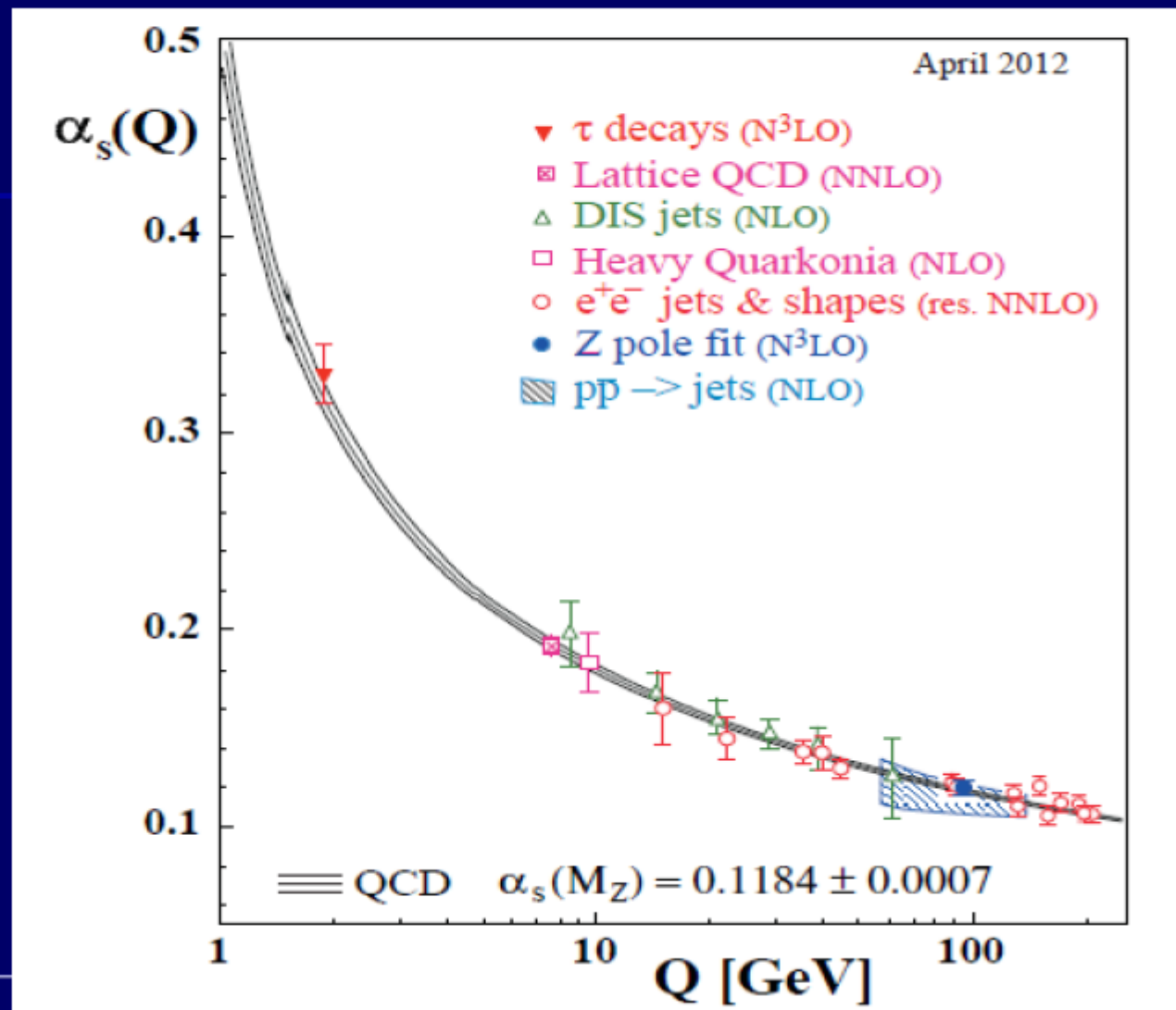
małe odległości
(mniejsze od rozmiaru protonu)

zasada
nieoznaczoności

na tej osi pęd (GeV)

$$\Delta x \sim 1/\Delta p \quad (\hbar c=1)$$

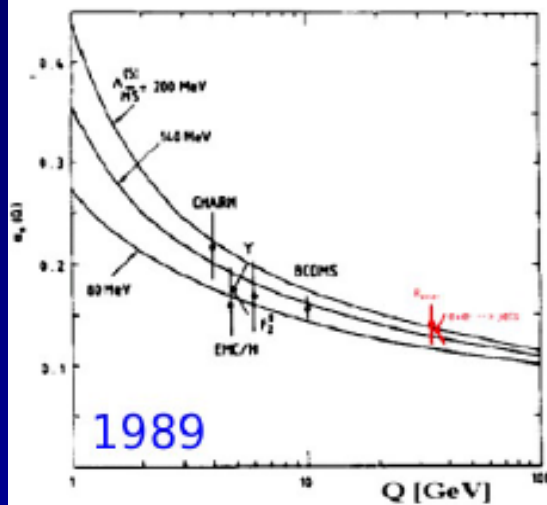
Różne doświadczenia (stan na kwiecień 2012)



Determination of the QCD coupling α_s

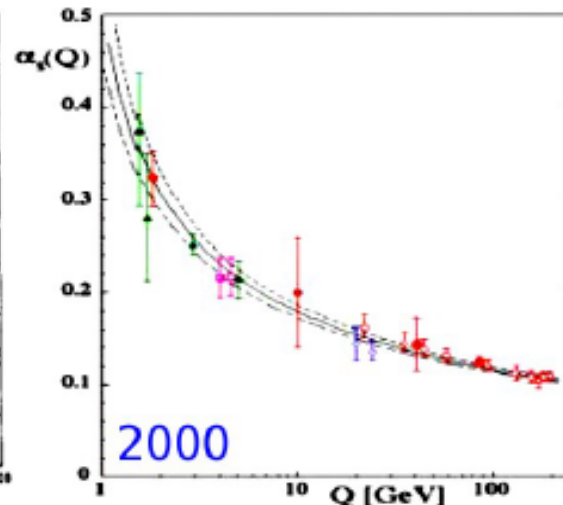
α_s = Single free parameter in QCD
(in the $m_q \rightarrow 0$ limit). Determined
at a given ref. scale (e.g. m_Z).
Decreases as $\sim \ln(Q^2/\Lambda^2)$,
with $\Lambda \sim 0.25$ GeV

- Least precisely known of all couplings:
 $\delta\alpha \sim 3 \cdot 10^{-10}$, $\delta G_F \sim 5 \cdot 10^{-8}$, $\delta G \sim 10^{-5}$, $\delta\alpha_s \sim 5 \cdot 10^{-3}$
- Impacts all LHC cross-sections.
- Key for SM precision fits
(e.g. uncertainties b,c Yukawa).
- BSM physics (e.g. couplings at GUT).



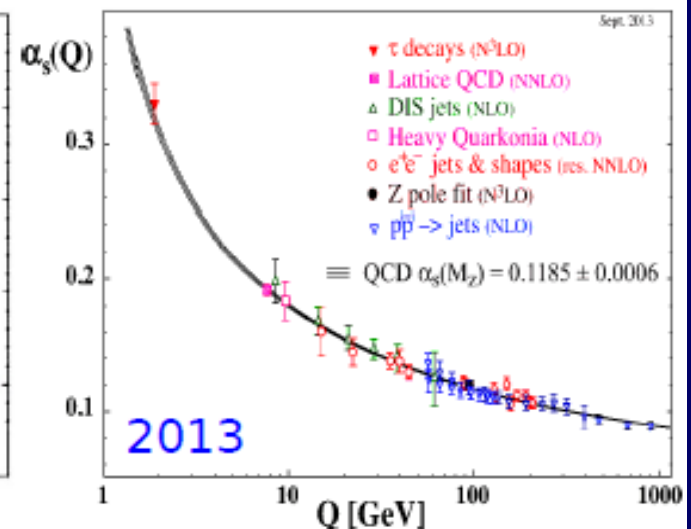
$$\alpha_s(M_Z) = 0.110^{+0.006}_{-0.008} \text{ (NLO)}$$

G. Altarelli, Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. 39, 1989



$$\alpha_s(M_Z) = 0.1184 \pm 0.0031 \text{ (NNLO)}$$

S. B., J. Phys. G 26, 2000



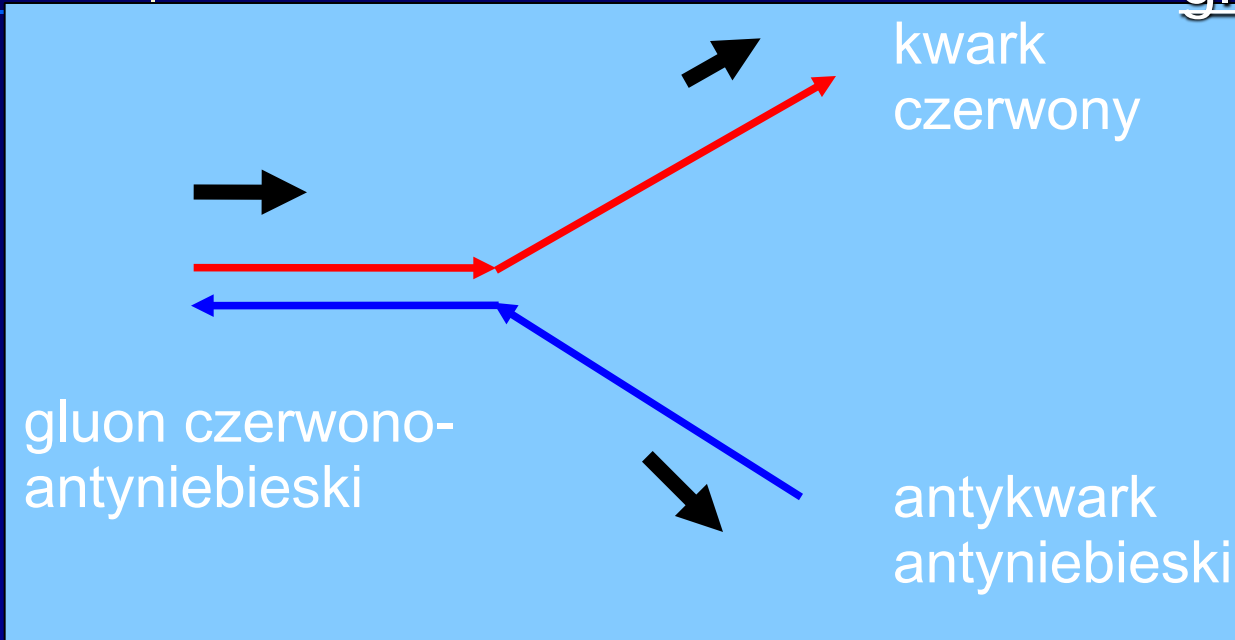
$$\alpha_s(M_Z) = 0.1185 \pm 0.0006 \text{ (NNLO)}$$

Current uncertainty: $\pm 0.5\%$
(lattQCD disputed by some: $\pm 1\%$)


Oddziaływania kolorowe

Przykład elementarnego aktu oddziaływania

gluonu z kwarkami



gluon zwykle oznaczamy linią typu sprężynka



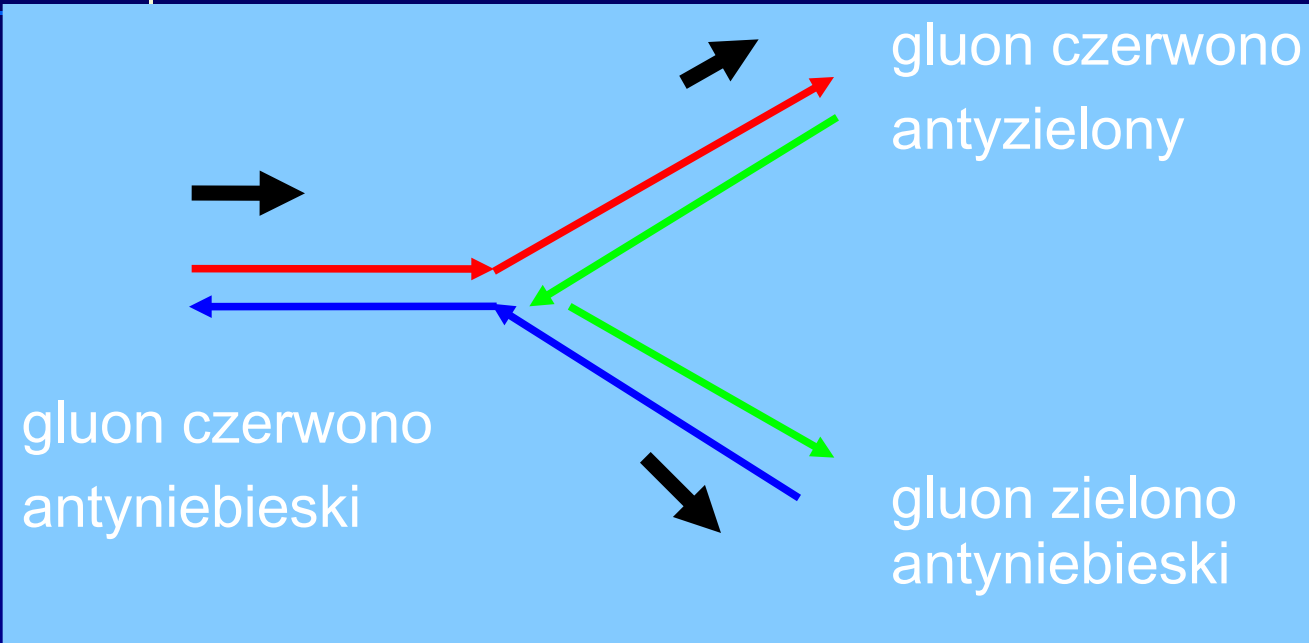
← tu 'śledzimy' kolor

- kolorowe linie ciągłe - przepływ ładunku kolorowego (zachowanie koloru) -
- czarne strzałki – pędy cząstek (zachowanie pędu)

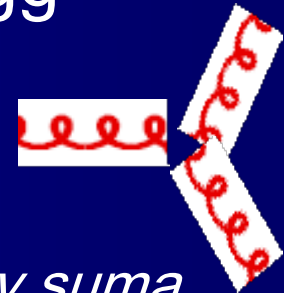
Oddziaływania kolorowe

Przykład elementarnego aktu oddziaływania

gluonów ze sobą



ggg



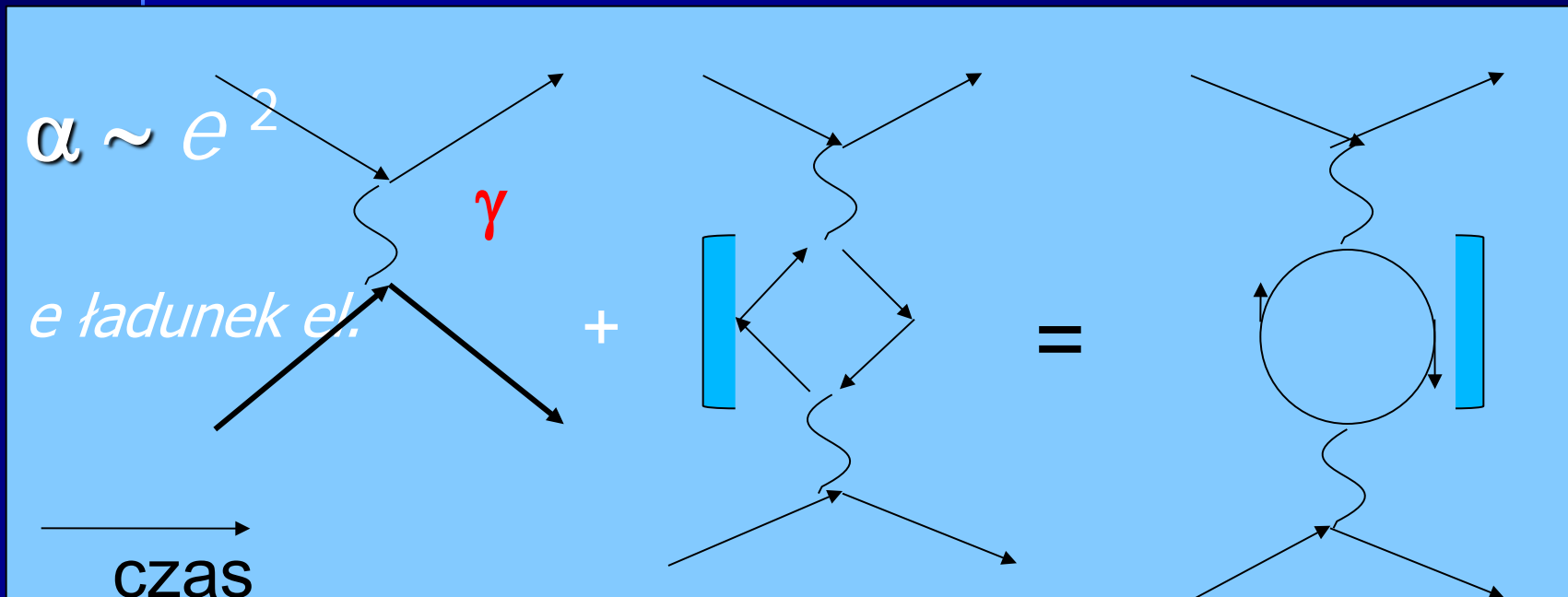
*gdy suma
po kolorach*

*są również
sprężenia
ggg*

- kolorowe linie ciągłe - przepływ ładunku kolorowego (zachowanie koloru)
- czarne strzałki – kierunek pędów cząstek (zachowanie pędu)

Biegająca stała sprzężenia α

Pomiar stałej α w zderzeniu dwóch elektronów



Prawdopodobieństwo tego procesu proporcjonalne do

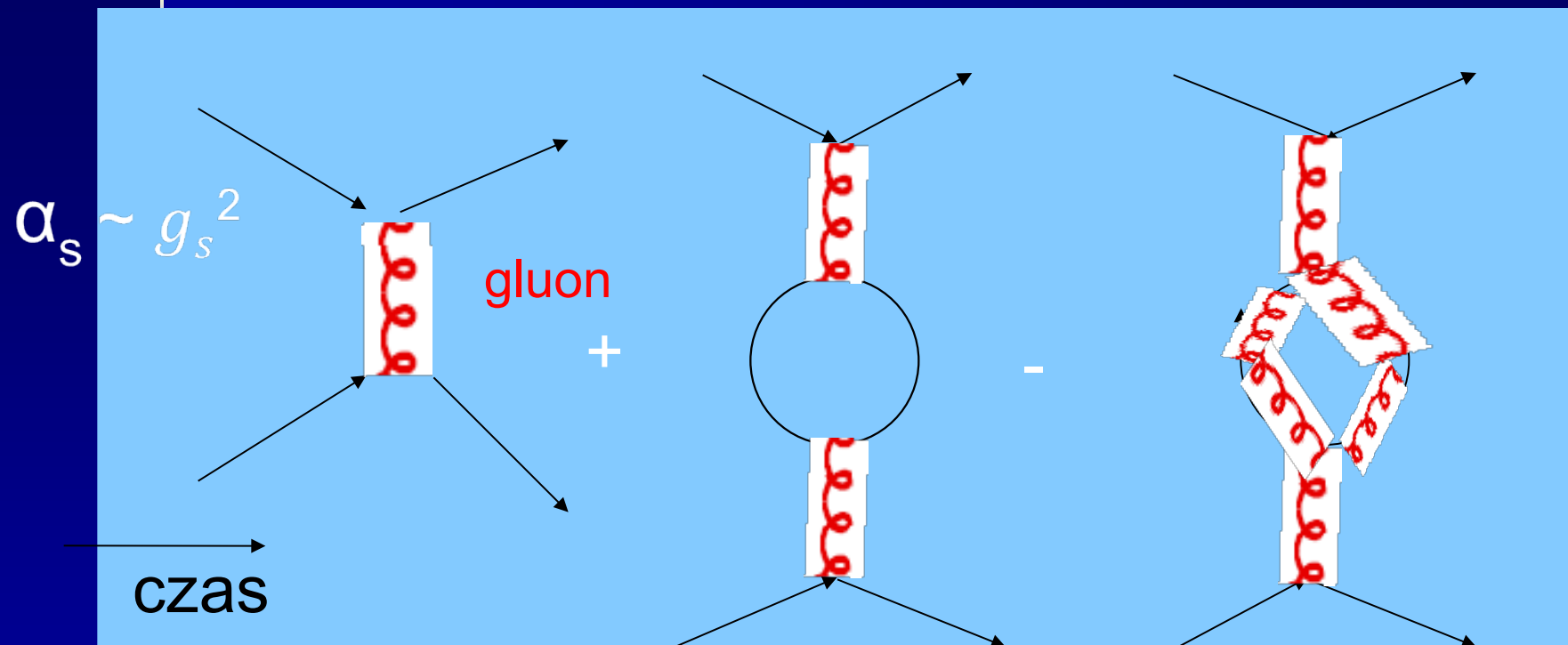
$$\alpha \times [1 + \text{poprawki}(p)] = \alpha(p).$$

Pętla elektronowa $\rightarrow \alpha$ zmienia się z pędem ('biegnie'); wzrasta dla

większych pędów fotonu, czyli większych energii zderzenia

Biegąca stała sprzężenia α_s

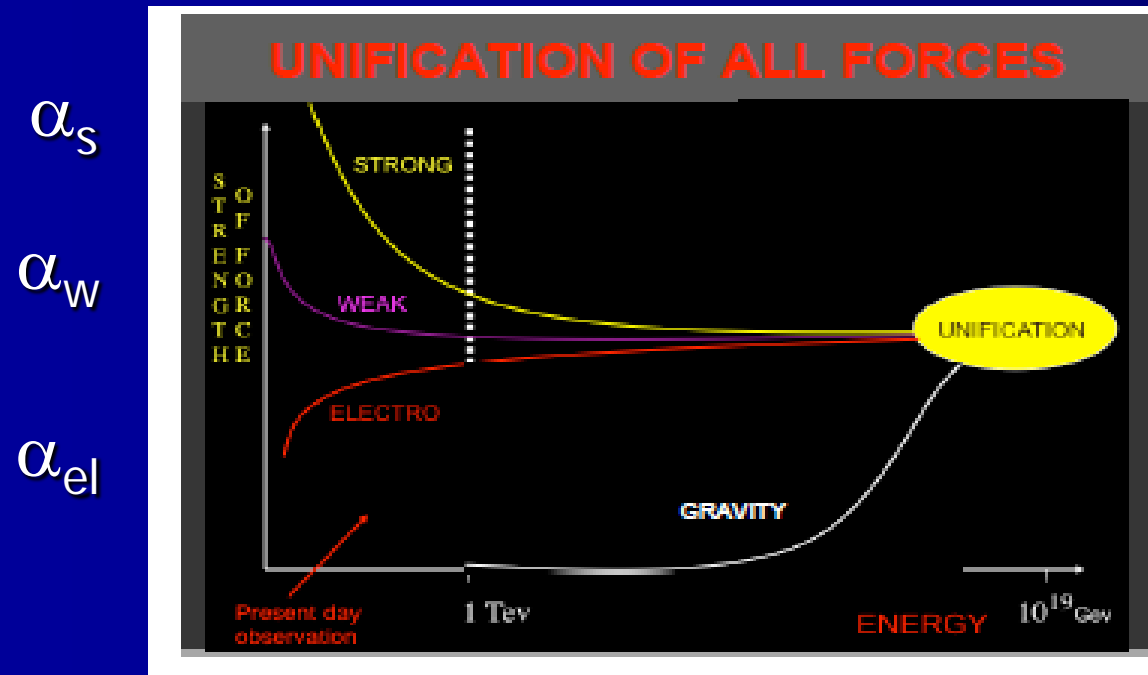
Oddziaływanie kolorowe – pomiar stałej sprzężenia w zderzeniu dwóch kwarków (przy zderzeniu dwóch hadronów)



Pętla kwarkowa - efekt podobny jak dla oddziaływań el-mag (powoduje wzrost stałej α_s). Tu dodatkowo pętla gluonowa, która ma **przeciwny** znak \rightarrow i w efekcie α_s maleje ze wzrostem pędu !!

„Siła” oddziaływania zależy od energii (*biegnące stałe sprzężenia*)!

Ze wzrostem energii (pędu): oddz. silne słabną
oddz. słabe słabną
oddz. el-mag wzmacniają się



D. Gross,
Photon 2005

Na osi poziomej - energia

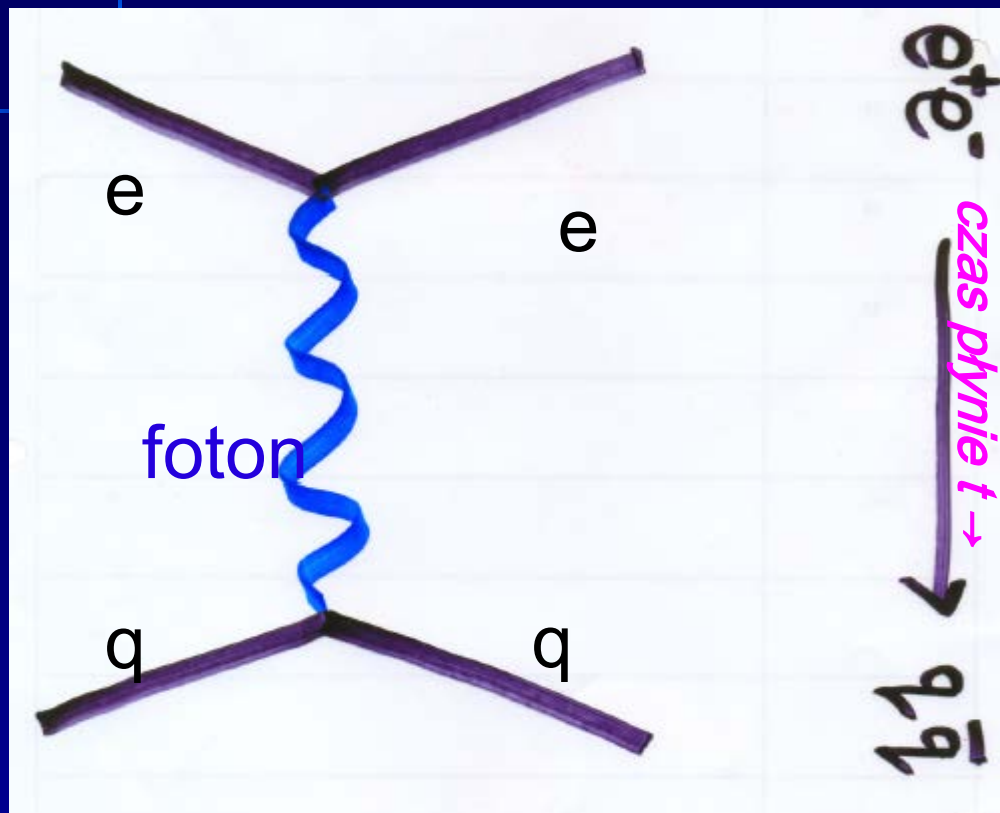
Biegające stałe sprzężenia

- pytanie o unifikacje

- Stałe sprzężenia zmieniają się wraz z skalą energii (pędu) jako efekt poprawek kwantowych
- Struktura kwantowa danego oddziaływania decyduje o tym czy stała sprzężenia rośnie czy maleje ze wzrostem energii (kluczowy fakt - czy nośniki sił są „naładowane”, czyli czy same ze sobą oddziałują, np. foton – neutralny, a gluony „naładowane”)
- Jeśli jedne stałe sprzężenia rosną a inne maleją to dla pewnych energii mają te same (lub zbliżone) wartości **pojawia się pytanie o wspólny opis takich oddziaływań**
→ unifikacja ?

Procesy skrzyżowane

Linie bez strzałek pozwalają opisywać różne procesy z udziałem



czas płynie t →

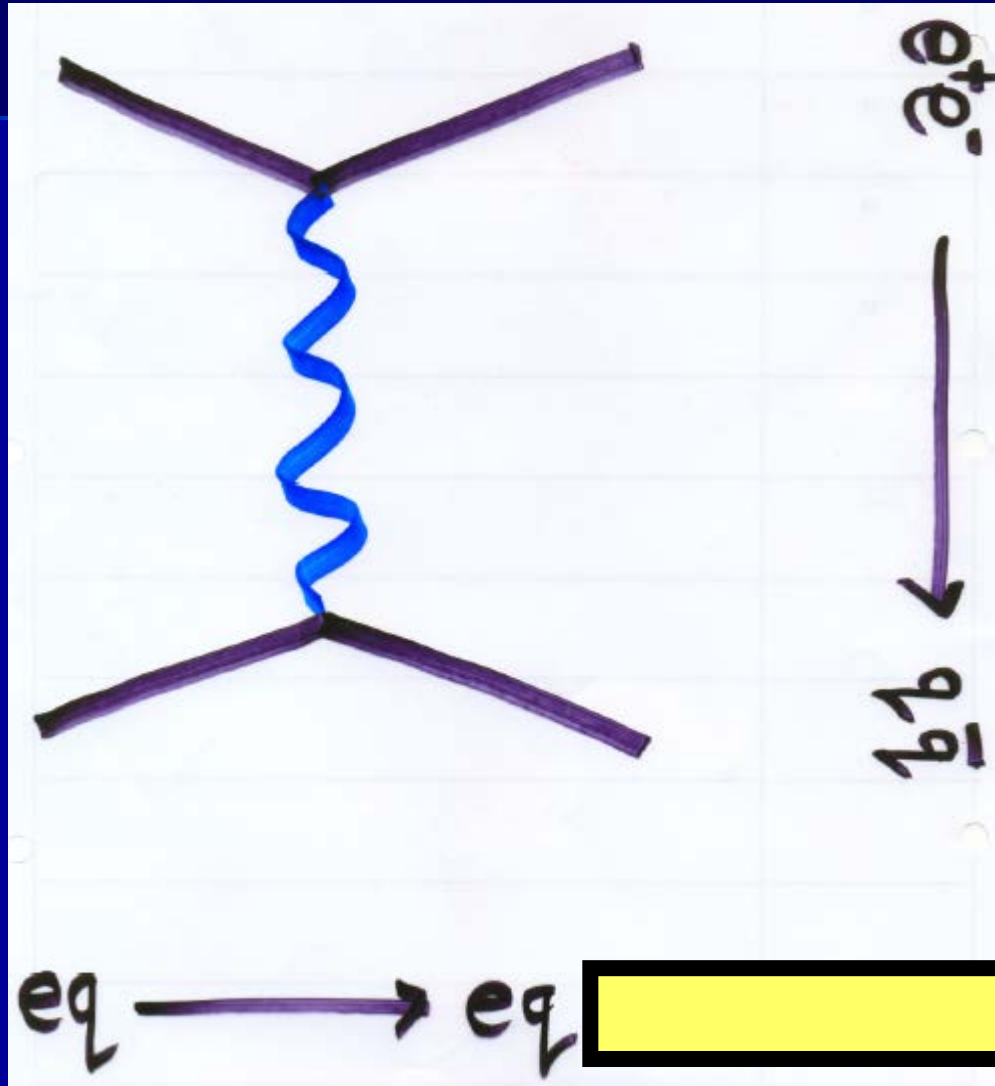
$$e^- q \rightarrow e^- q$$

ustalonych typów cząstek zewnętrznych (tzn. na liniach zewnętrznych)
 Tu mamy 2 e
 (e- e- lub e+ e+, lub e-e+)
 i 2 kwarki q
 (q q lub q anty-q, anty-q anty-q)

Procesy skrzyżowane

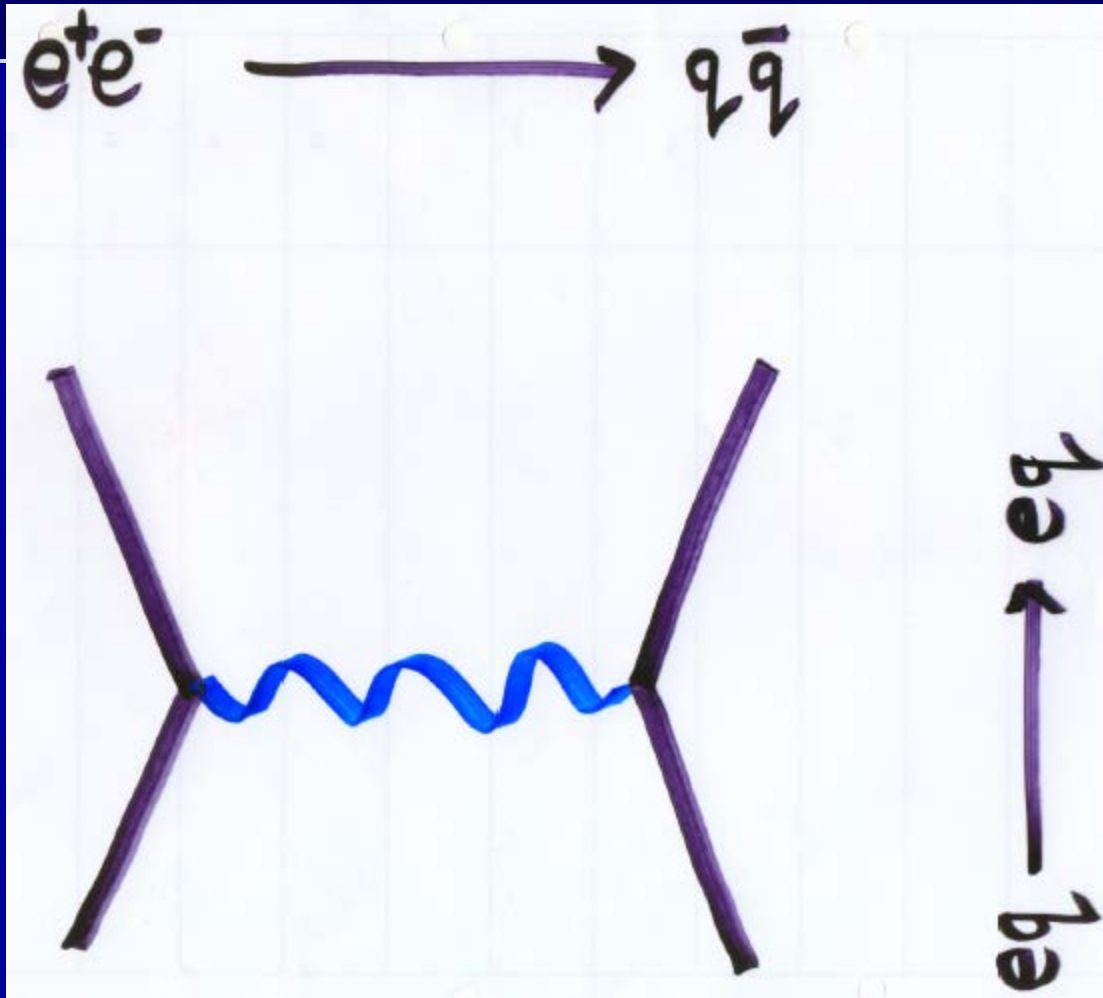
pozyton początkowy \leftrightarrow elektron końcowy
 a anty-q końcowe \leftrightarrow q początkowe

**Przekrecając diagram....
zamieniamy jeden proces na inny...**



Diagramy Feynmana dla oddziaływań elektromagnetycznych

Po obrocie:



Procesy skrzyżowane – przykład:

proces $e^-e^- \rightarrow e^-e^-$

(czas płynie od lewej do prawej, tzn w stanie początkowym mamy zderzające się dwa elektrony i obserwujemy w stanie końcowym dwa elektrony)

- Inne możliwe procesy (skrzyżowane) otrzymamy zamieniając cząstki początkowe z końcowymi, z jednoczesną zamianą cząstek na antycząstki.
- Niech kolor żółty oznacza cząstkę przenoszoną do przyszłości (jako antycząstkę) a kolor różowy – cząstkę przenoszoną do przeszłości (jako antycząstkę):
 - $e^-e^- \rightarrow e^-e^- \Rightarrow e^-e^+ \rightarrow e^-e^+$, a następnie
 - $e^-e^+ \rightarrow e^-e^+ \Rightarrow e^+e^+ \rightarrow e^+e^+$

Pytania do wykładu

- Zasięg sił słabych jest większy czy mniejszy od zasięgu sił jądrowych?
- Między jakimi cząstkami działają siły jądrowe a jakimi siły kolorowe?
- Czy grawitacja jest ważna w mikroświecie dla niskich energii ?
- Ile wynosi długość Plancka? Ile wynosi masa Plancka?
- Wypisz 3 elementarne akty oddziaływania z udziałem cząstek z I rodziny.
- Co oznacza strzałka na linii fotonowej na diagramie Feynmana?
- Co świadczy o istnieniu ciemnej materii: ruch planet czy galaktyk?
- Czy ciemna materia jest naładowana elektrycznie? Czy wiemy z czego składa się ciemna materia?
- Ile wynosi stała struktury subtelnej dla pędów $p \rightarrow 0$, ile dla $p = 100 \text{ GeV}$?
- Czy ze wzrostem energii (pędów) dwa elektrony oddziałują silniej czy słabiej ?
- Ile wynosi stała sprzężenia oddziaływań silnych dla pędu ok. 1 GeV? Dla jakiego pędu α_s wynosi 1/10?
- Kiedy kwarki stają się bardziej swobodne (mniejsza „siła” działania) – dla dużych czy małych energii? Dla jakich energii mamy uwięzienie kwarków?
- Wypisz 1 proces skrzyżowany do procesu rozproszenia kwarków: $u d \rightarrow u d$

Pytania do wykładu cd.

- Na jakie kwarki rozpada się gluon zielono-antyczerwony?
- W zderzenie kwarku niebieskiego i antykwarku antyczerwonego produkowany jest gluon o jakim kolorze?
- Kwark niebieski promieniuje gluon niebiesko-antyzielony w elementarnych procesie $q \rightarrow g q$ i zmienia kolor. Na jaki?
- Wypisz możliwe kolory dwóch gluonów, które w procesie $gg \rightarrow g$ produkują gluon czerwono-antyzielony.
- Co powoduje biegnięcie stałych sprzężenia? Dlaczego stała struktury subtelnej niemaleje, a stała sprzężenia dla sił kolorowych maleje ze wzrostem energii?
- Czy stała struktury subtelnej jest wielkością o wymiarze energii? odwrotności energii?

Cztery podstawowe siły

Oddziaływanie grawitacyjne

Działa między wszystkimi cząstkami, jest to zawsze przyciąganie.

Odpowiedzialne za tworzenie Układu Słonecznego, galaktyk itp.

Oddziaływanie elektromagnetyczne

Ładunki elektryczne mogą się odpychać lub przyciągać.

Odpowiedzialne za tworzenie wiązań atomowych.

Oddziaływanie silne (jądrowe) (elementarne i kolorowe)

Siły jądrowe działają między nukleonami → przyciąganie; odpowiedzialne za tworzenie jąder atomowych. Wewnątrz nukleonów i innych hadronów (cząstek oddziałujących silnie) - kwarki i siły kolorowe między nimi.

Oddziaływanie słabe (elementarne i fundam.)

Rozpady promieniotwórcze niektórych jąder np. rozpad beta

Na poziomie fundamentalnym realizowane między kwarkami,

we współpracy z oddziaływaniem e-m (→ oddz. elektroślabe)