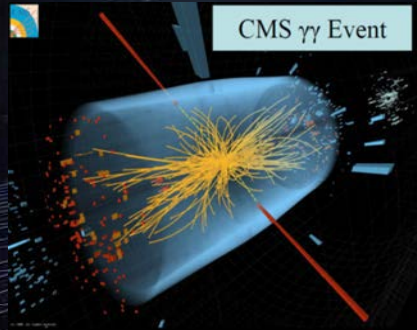


Wszechświat cząstek elementarnych

dla humanistów

WYKŁAD 8



Maria Krawczyk, A.Filip 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).

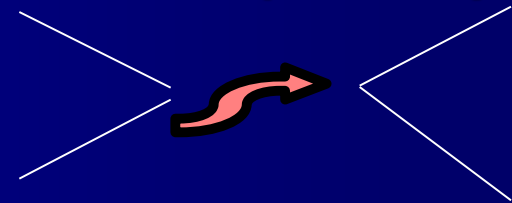
W mikroświecie dodatkowo występują:

- 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 \sim **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)

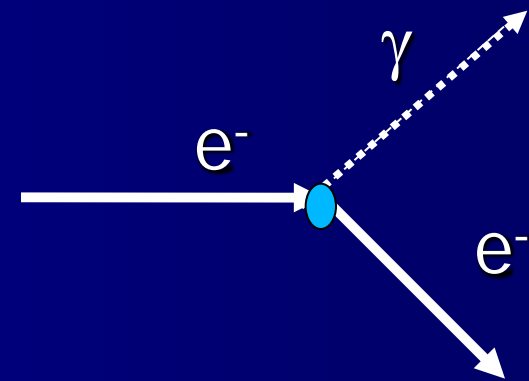
$$\alpha_s = g_s^2/4 \pi = 1$$

* 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

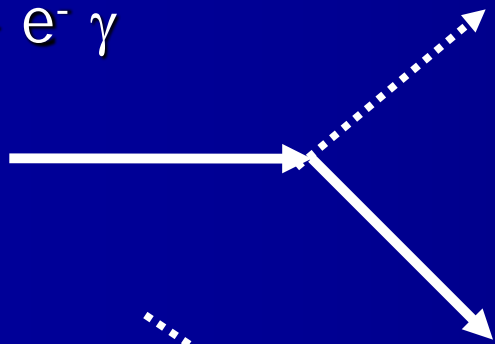


Strzałki na ciągłej linii (fermionowej) dla $e^- \rightarrow$ przepływ ładunku elektrycznego (ujemnego) i pęd,
strzałki na linii fotonowej (linia przerywana) \rightarrow pęd

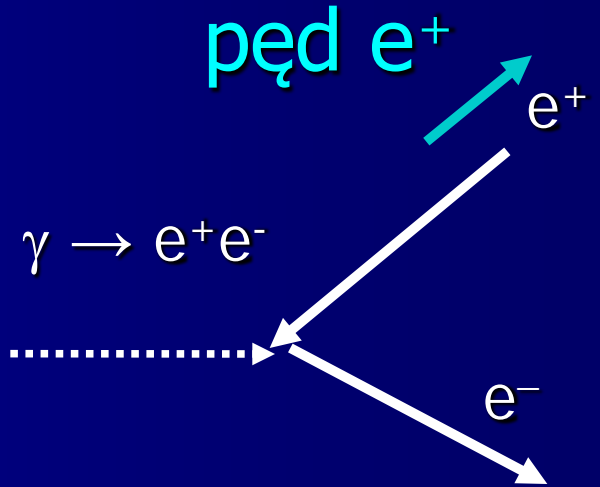
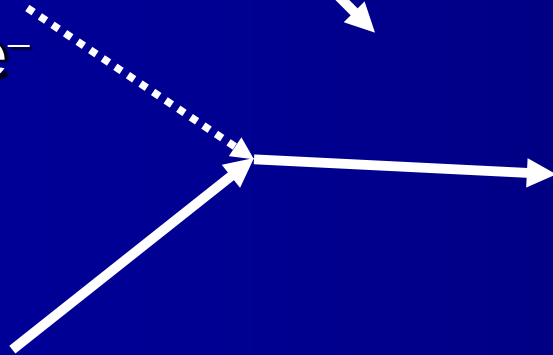
Diagramy Feynmana dla procesów skrzyżowanych

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

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



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



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



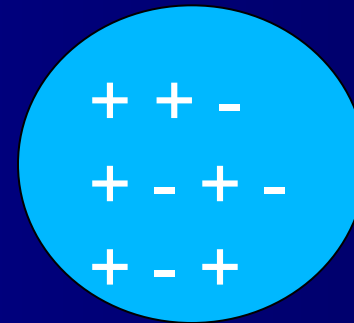
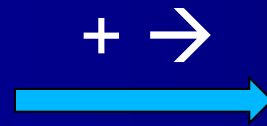
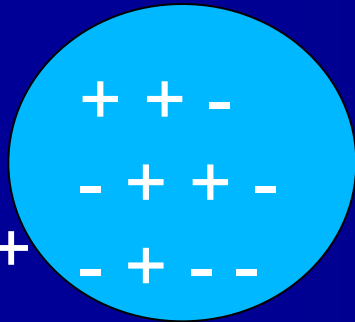
Dla e^+ przepływ ładunku (ujemnego) w przeciwnym kierunku niż ruch (pęd)

Przepływ ładunków

Ładunek
układu

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

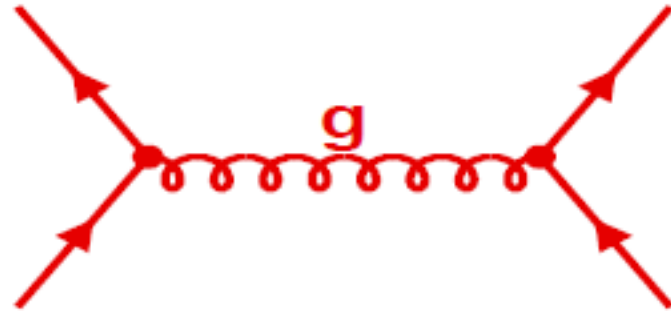
$$N_+ = n_+ - n_-$$



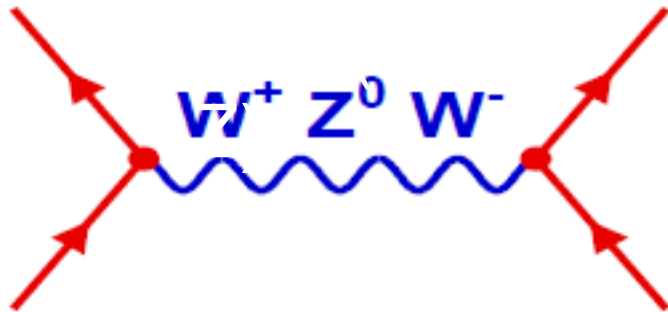
Diagramy Feynmana dla oddziaływań (przykłady)



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.

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

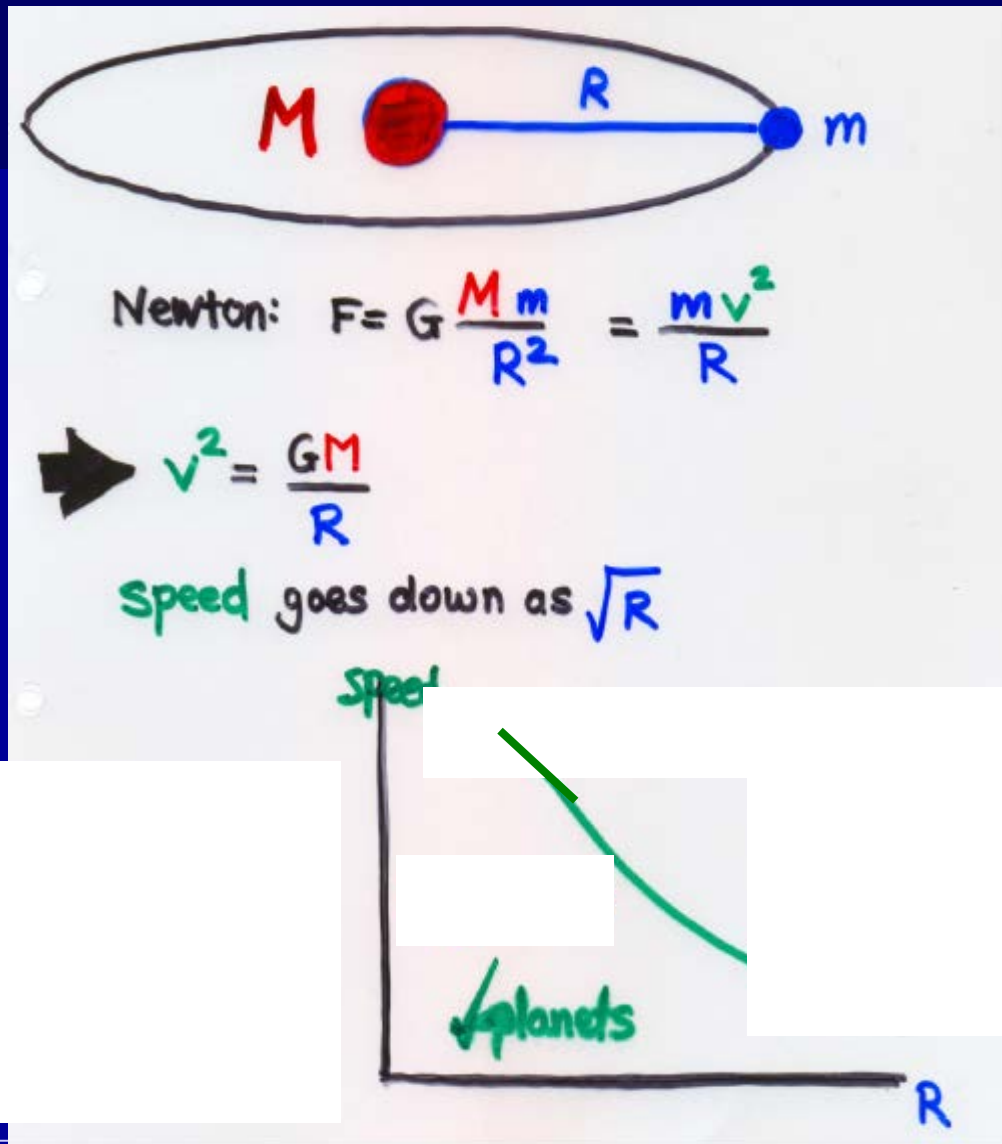
$$10^{-40} \approx \frac{\text{Radius of proton}}{\text{Radius of Universe}}$$

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

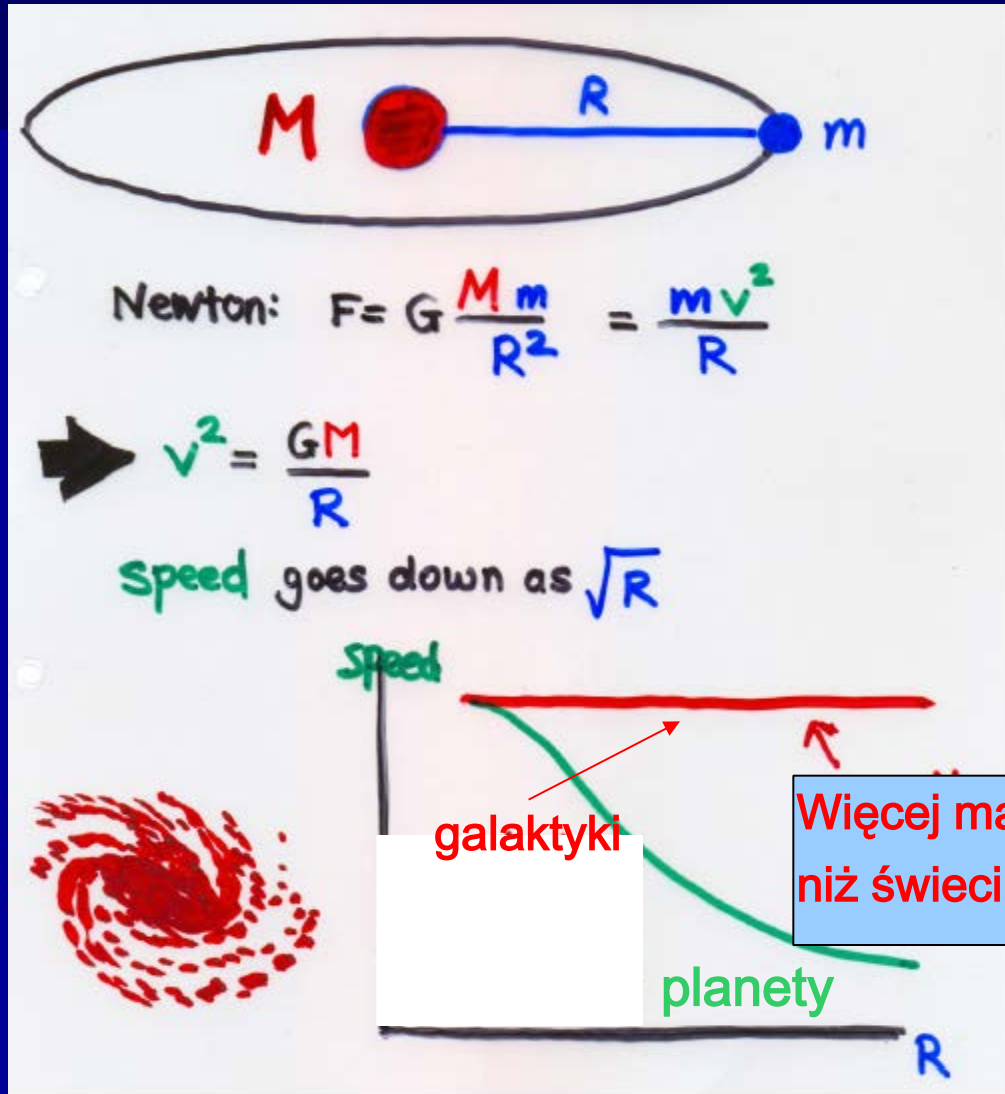


Prędkość maleje gdy promień R rośnie

Tak jest dla planet !

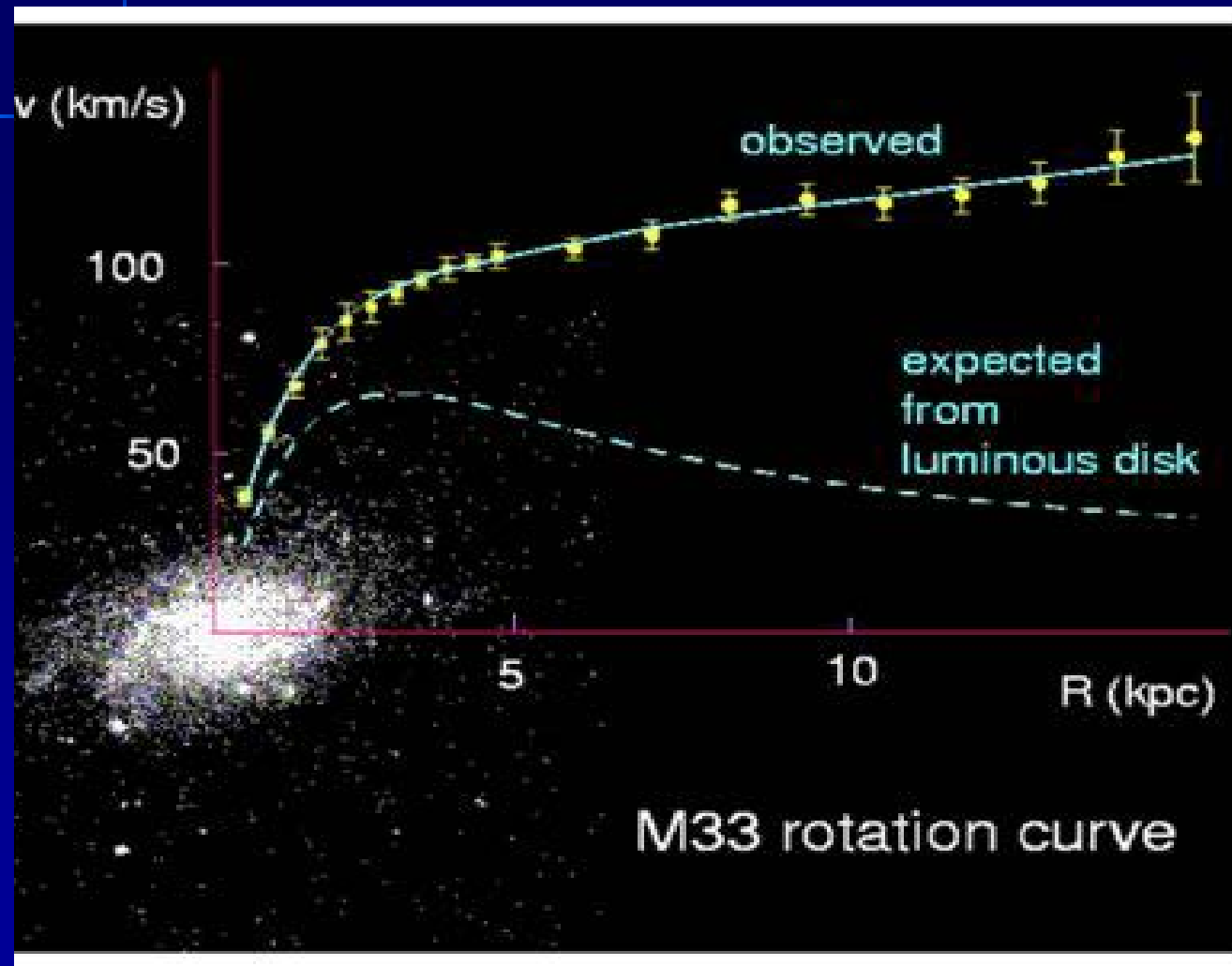
CIEMNA MATERIA

Ale prędkość ciał w galaktykach – inaczej!



Więcej masy M dla dużych R
niż świeci

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

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

więcej w dalszych wykładach

Oddziaływania elektromagnetyczne
kontra oddziaływania silne (kolorowe)

Elektrostatyka

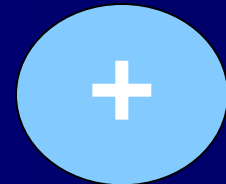
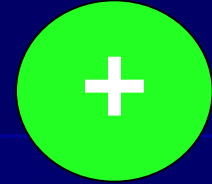
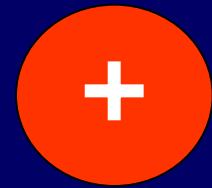
- Dwa typy ładunków elektrycznych: dodatnie (+) i ujemne (-)

CHROMOSTATYKA

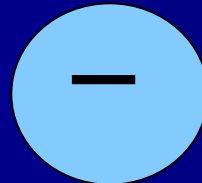
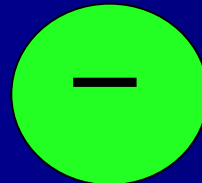
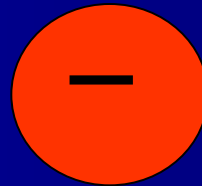
- Trzy rodzaje ładunków kolorowych (kolorów), z których każdy może być dodatni (+) lub ujemny (-) → kolory i antykolory

3 ładunki kolorowe

kwarki



antykwaraki

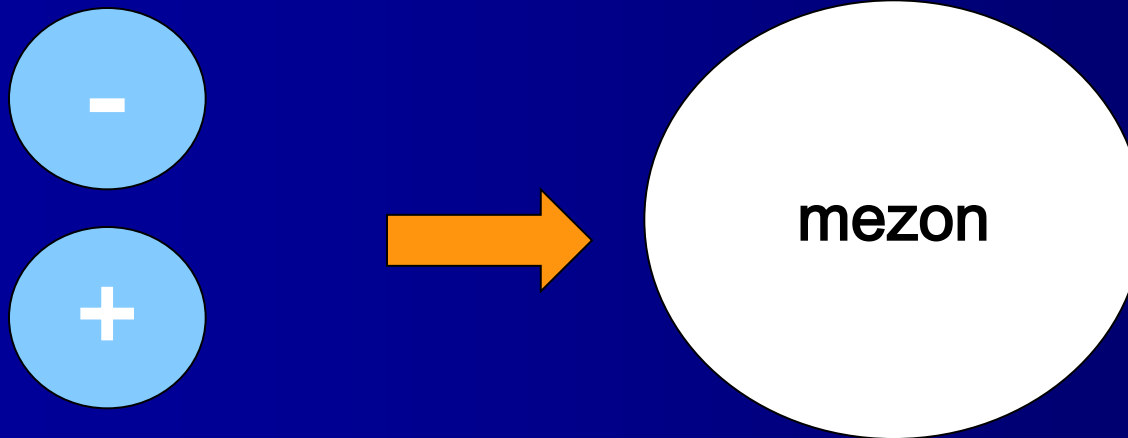


Znana reguła:

“Takie same kolory się odpychają, przeciwne - przyciągają”

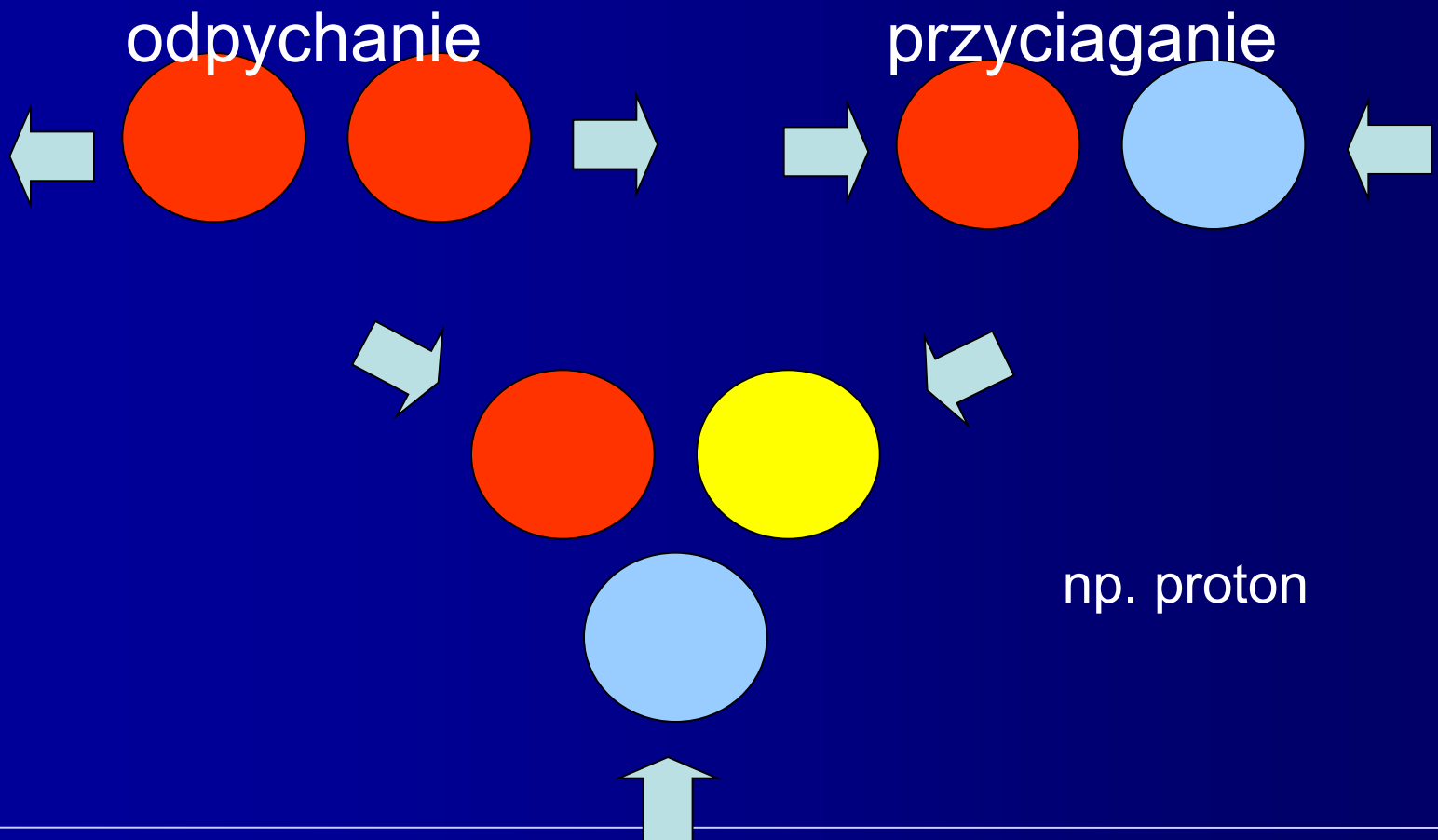
Najprostszy układ: mezon = kwark + antykwark

Kolory się znoszą, np



TRZY kolory

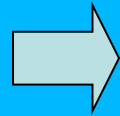
Potrzebne aby powstały bariony (3 kwarki)
(np. proton) = aby się kolor zneutralizował



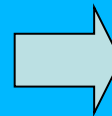
Elektrodynamika kwantowa

Quantum Electrodynamics: QED

Ładunek
elektryczny



Atomy

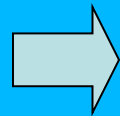


Molekuły
(cząsteczki)

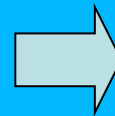
Chromodynamika kwantowa

Quantum Chromodynamics: QCD

Ładunek
kolorowy

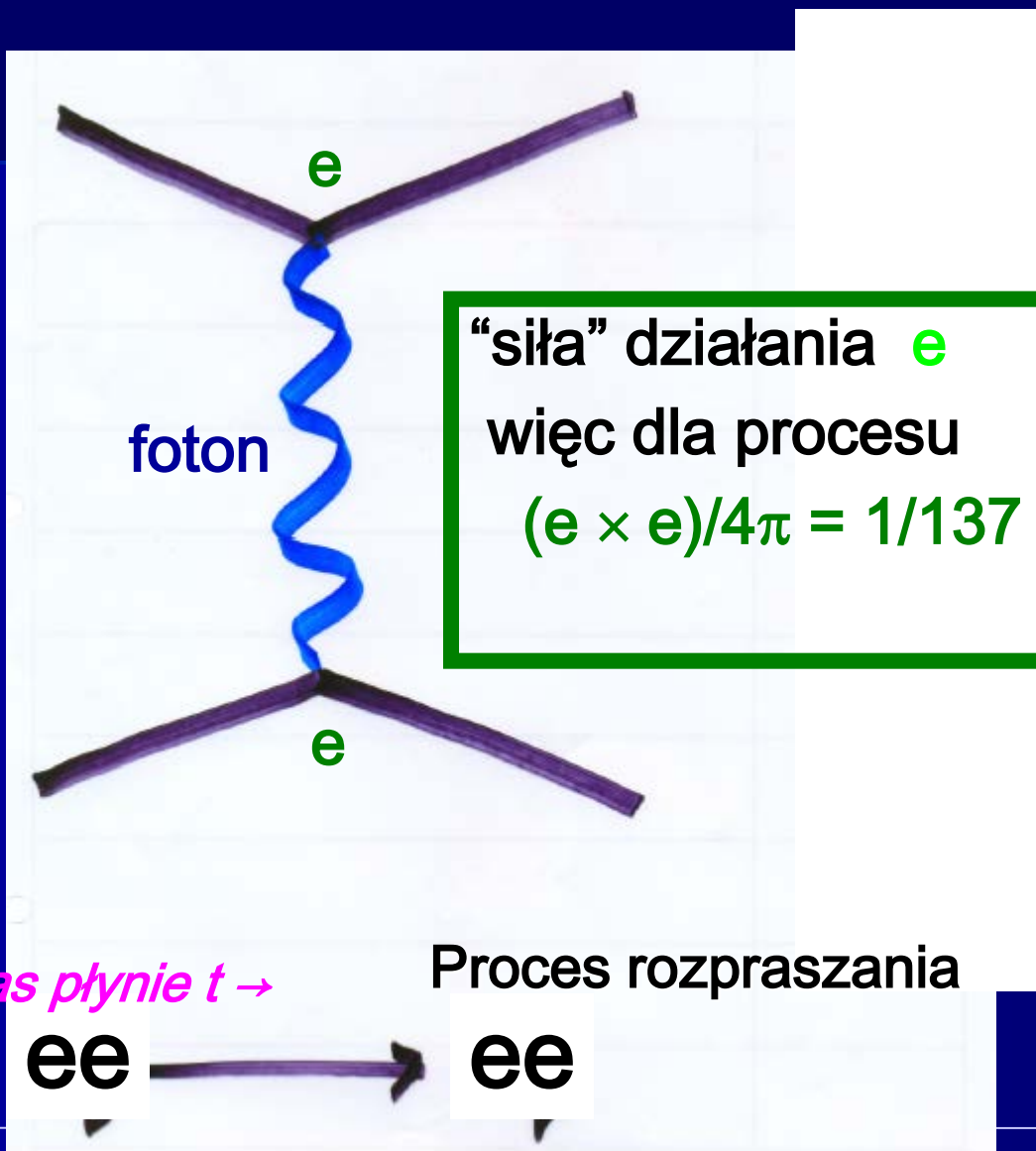


Nukleony



Jądra

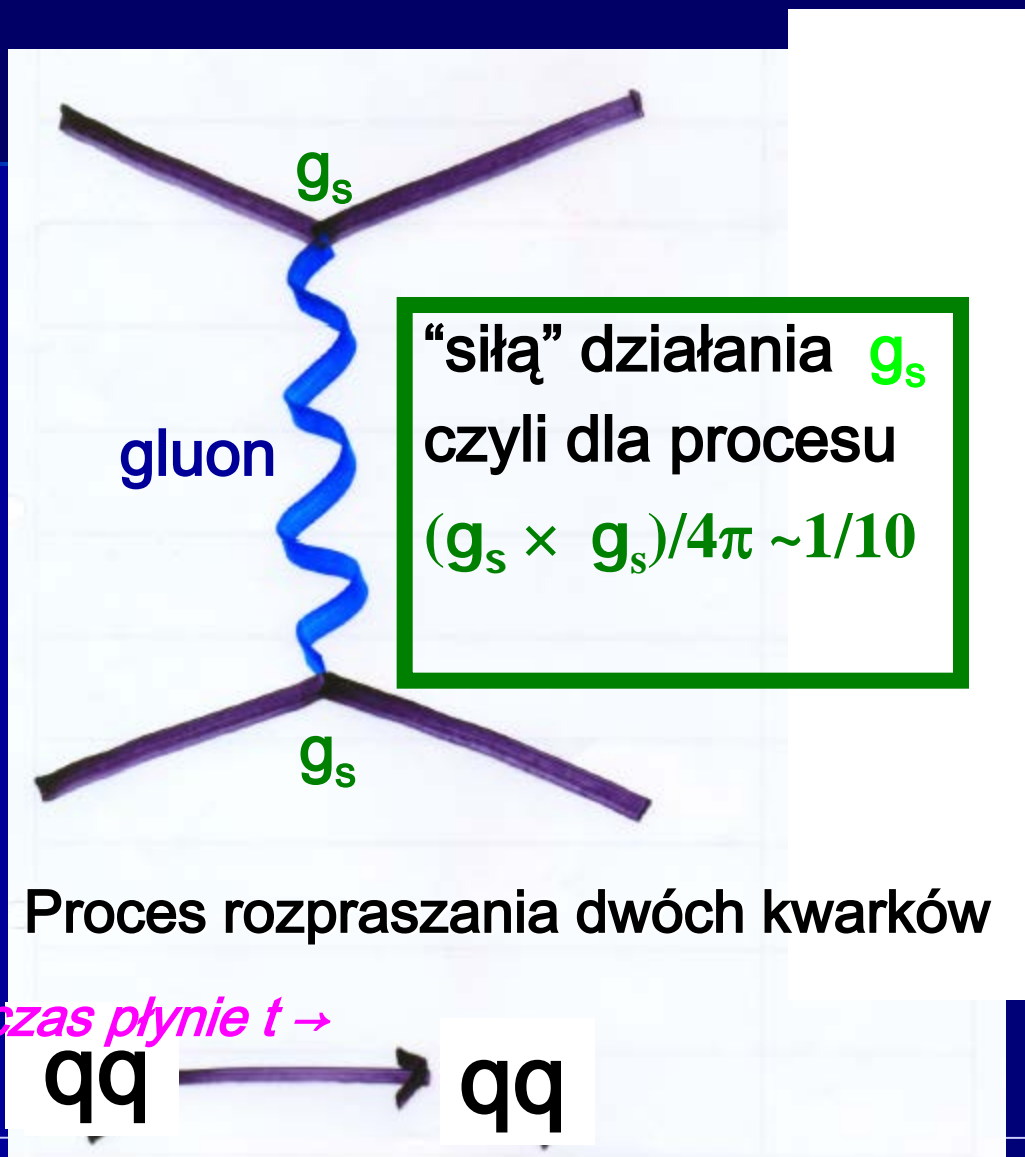
Diagramy Feynmana dla oddziaływań elektromagnetycznych



α

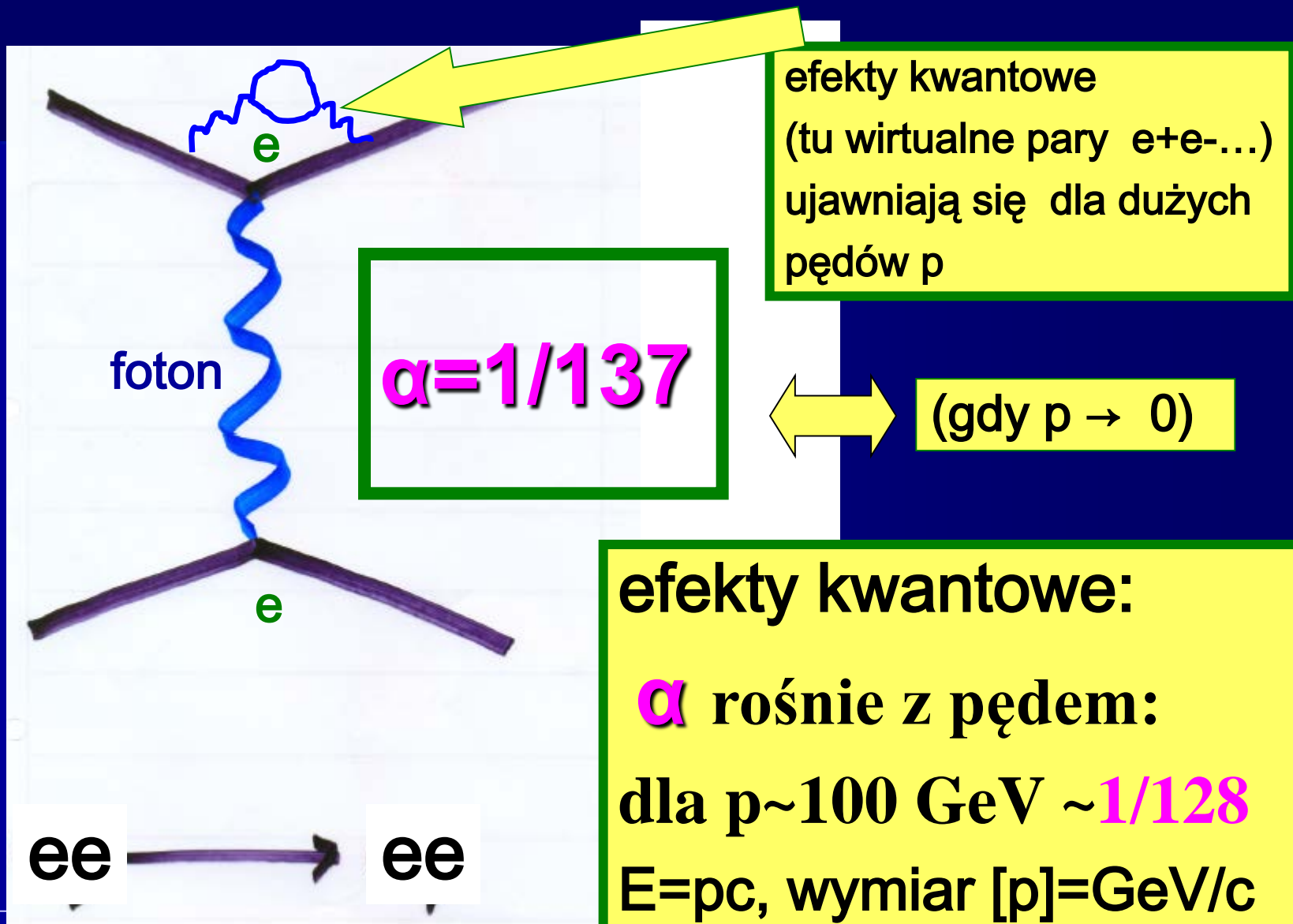
Proces rozpraszania dwóch elektronów

Diagramy Feynmana dla oddziaływań kolorowych

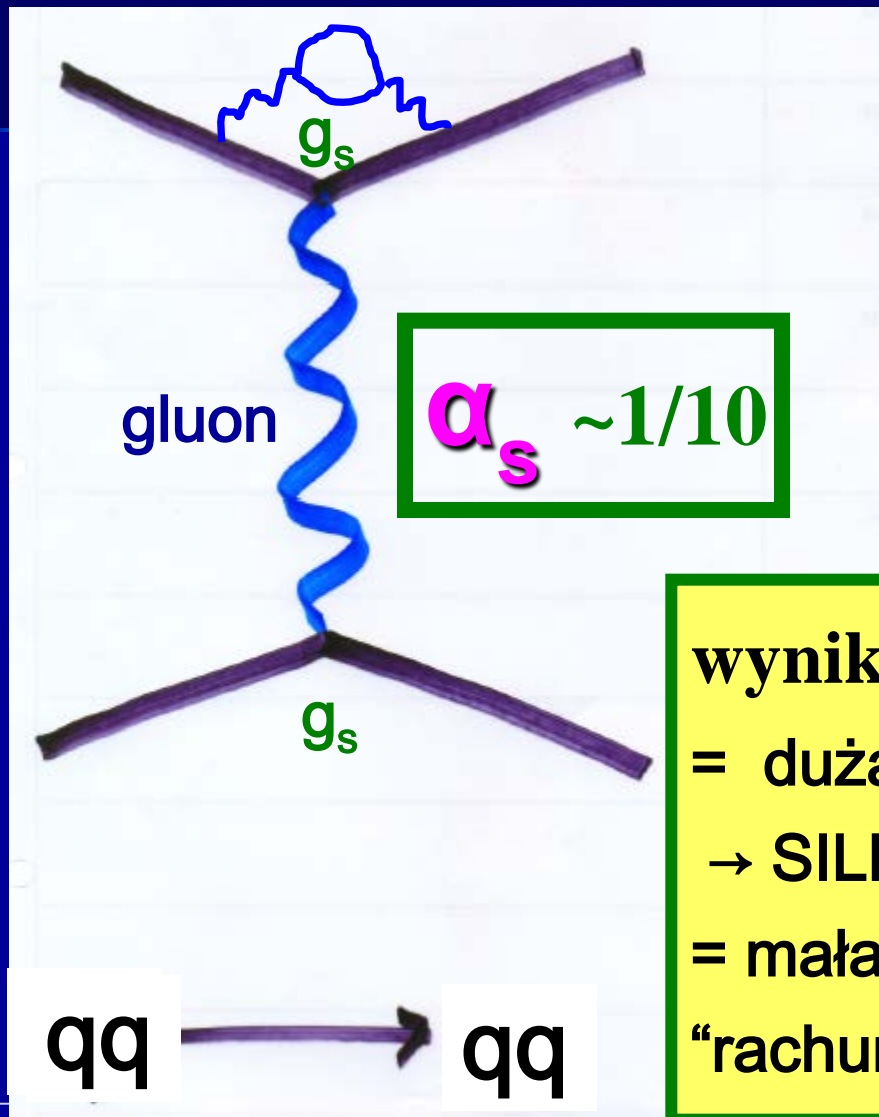


α_s

Diagramy Feynmana dla oddziaływań elektromagnetycznych



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

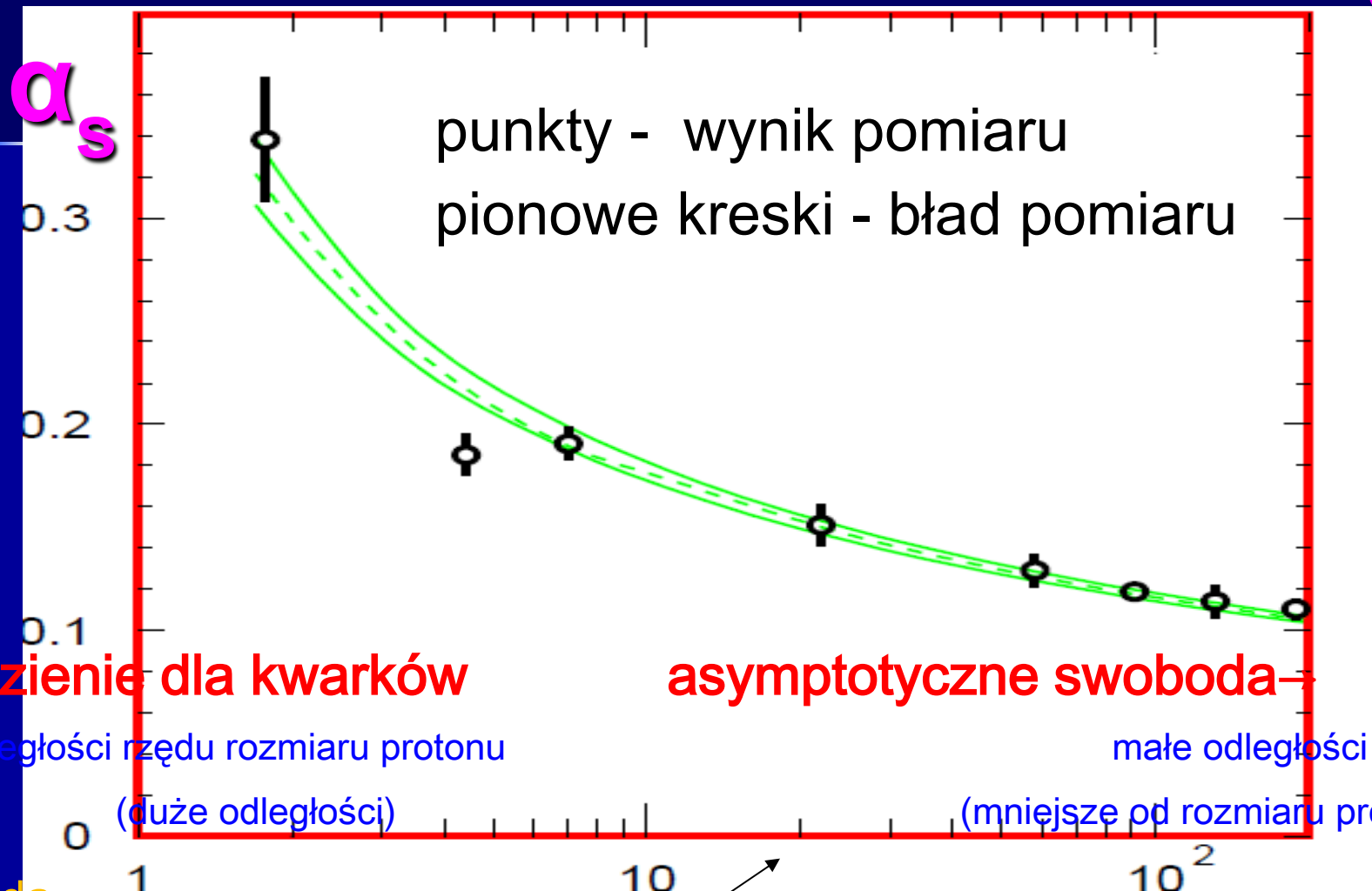
→ SILNE ODDZIAŁYWANIA!

= mała dla dużych pędów

“rachunek zaburzeń QCD”

„Biegnąca” stała sprzężenia (dane 2008)

α_s



← **więzienie dla kwarków**

asymptotyczna swoboda →

: odległości rzędu rozmiaru protonu
(duże odległości)

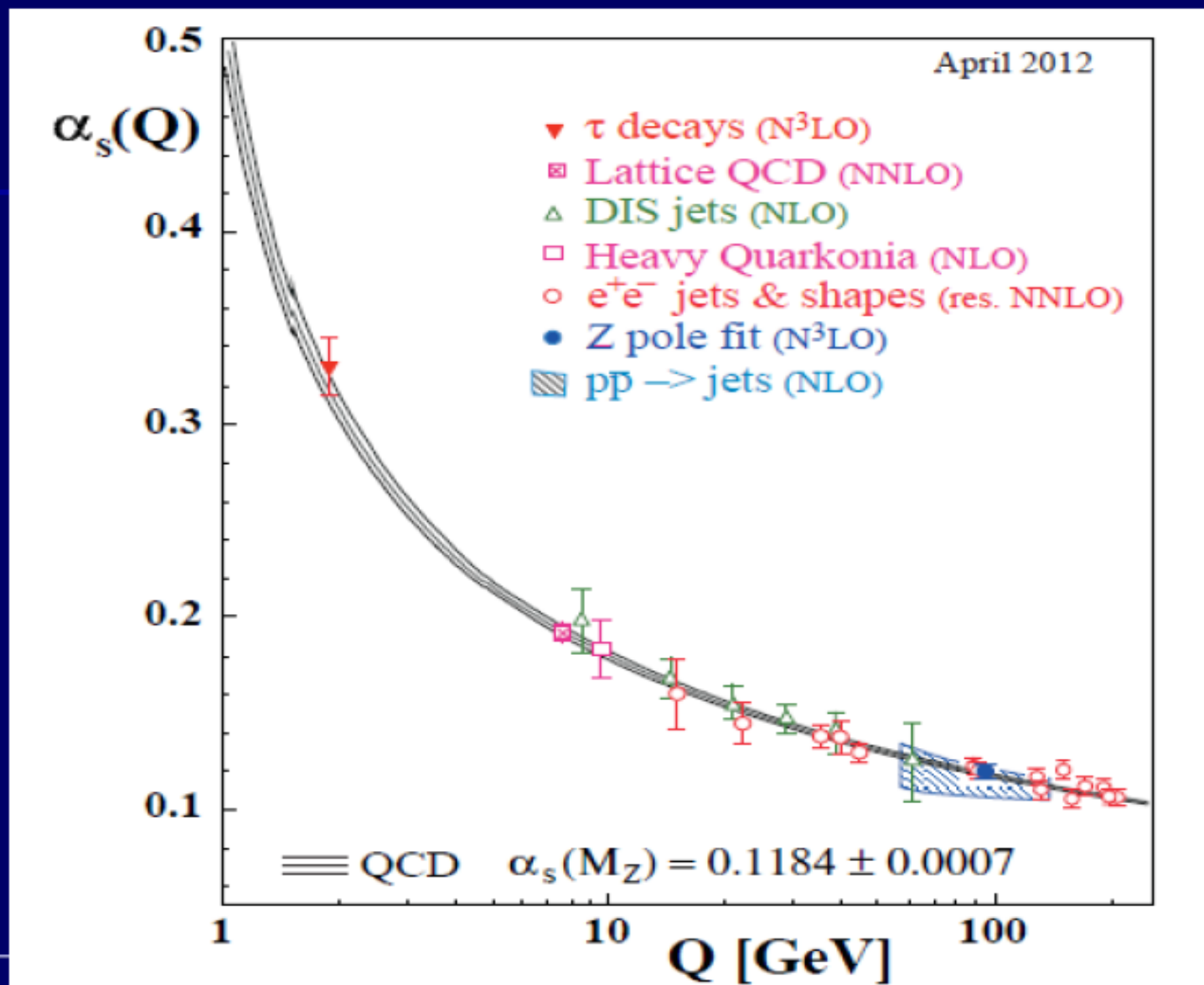
małe odległości
(mniejsze od rozmiaru protonu)

zasada
nieoznaczoności

na tej osi pęd (GeV)

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

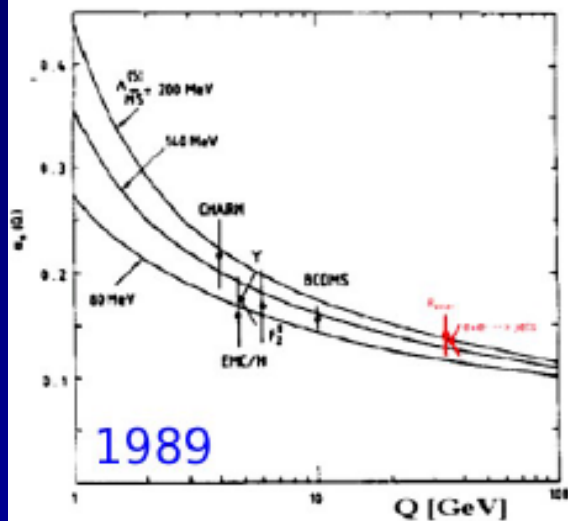
Różne doświadczenia (stan na kwiecień 2012)



Determination of the QCD coupling α_s

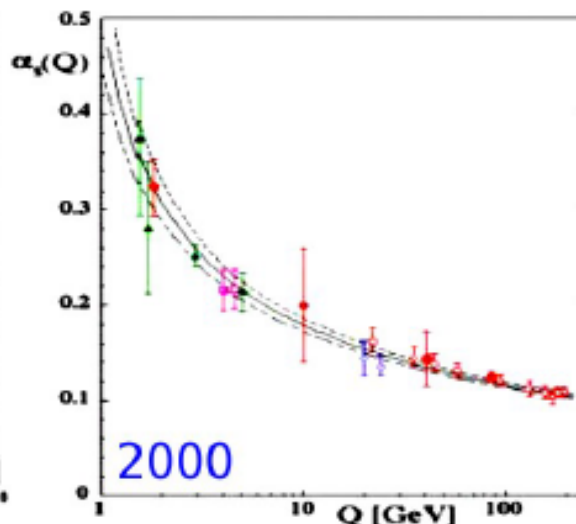
α_s = Single free parameter in QCD
(in the $m_q \rightarrow 0$ limit). Determined
at a given ref. scale (e.g. m_Z).
Decreases as $\sim \ln(Q^2/\Lambda^2)$,
with $\Lambda \sim 0.25$ GeV

- 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).



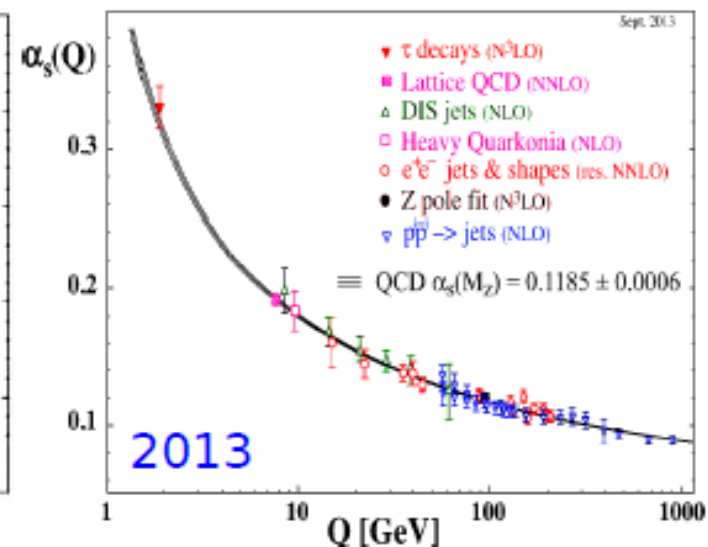
$$\alpha_s(M_Z) = 0.110^{+0.006}_{-0.008} \text{ (NLO)}$$

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



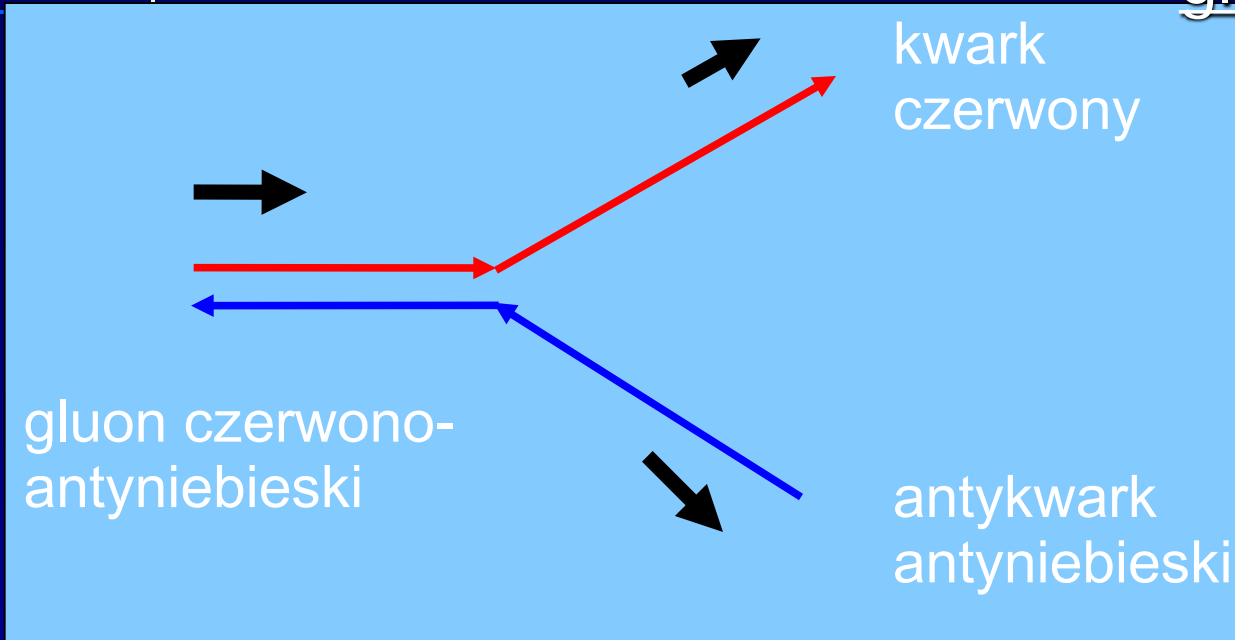
$$\alpha_s(M_Z) = 0.1185 \pm 0.0006 \text{ (NNLO)}$$

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



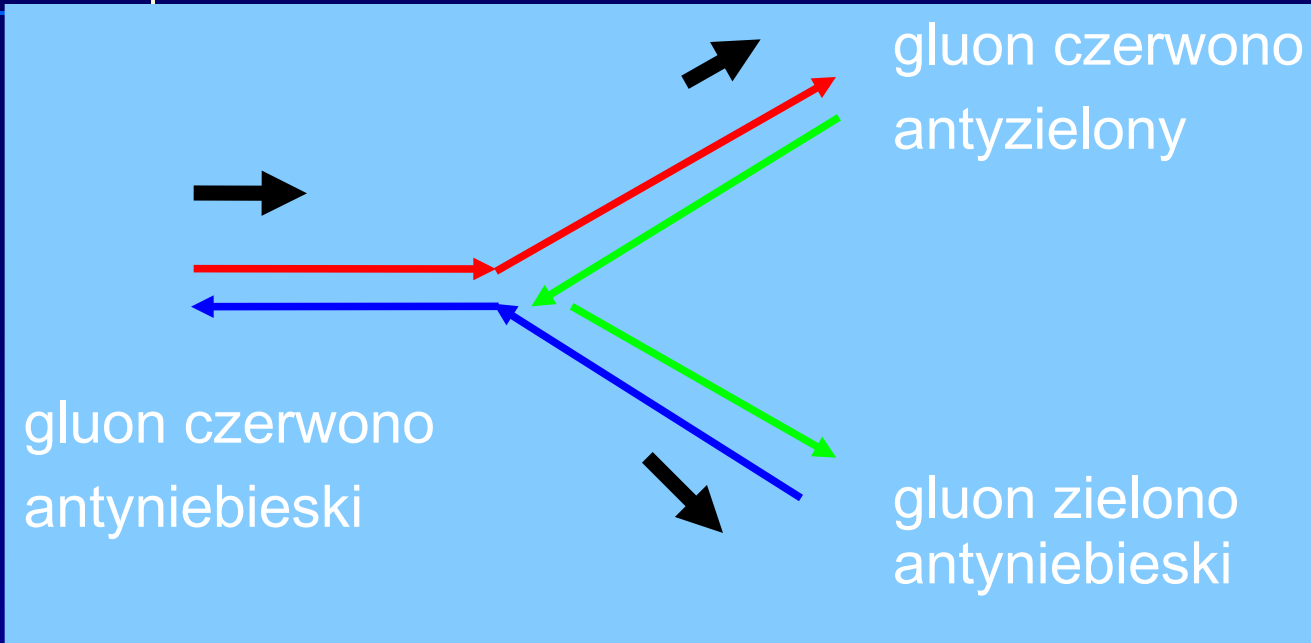
← tu 'śledzimy' kolor

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

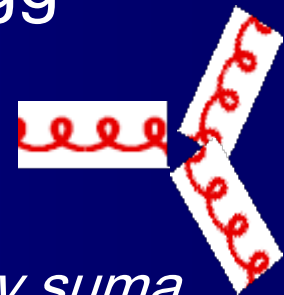
Oddziaływania kolorowe

Przykład elementarnego aktu oddziaływania

gluonów ze sobą



ggg



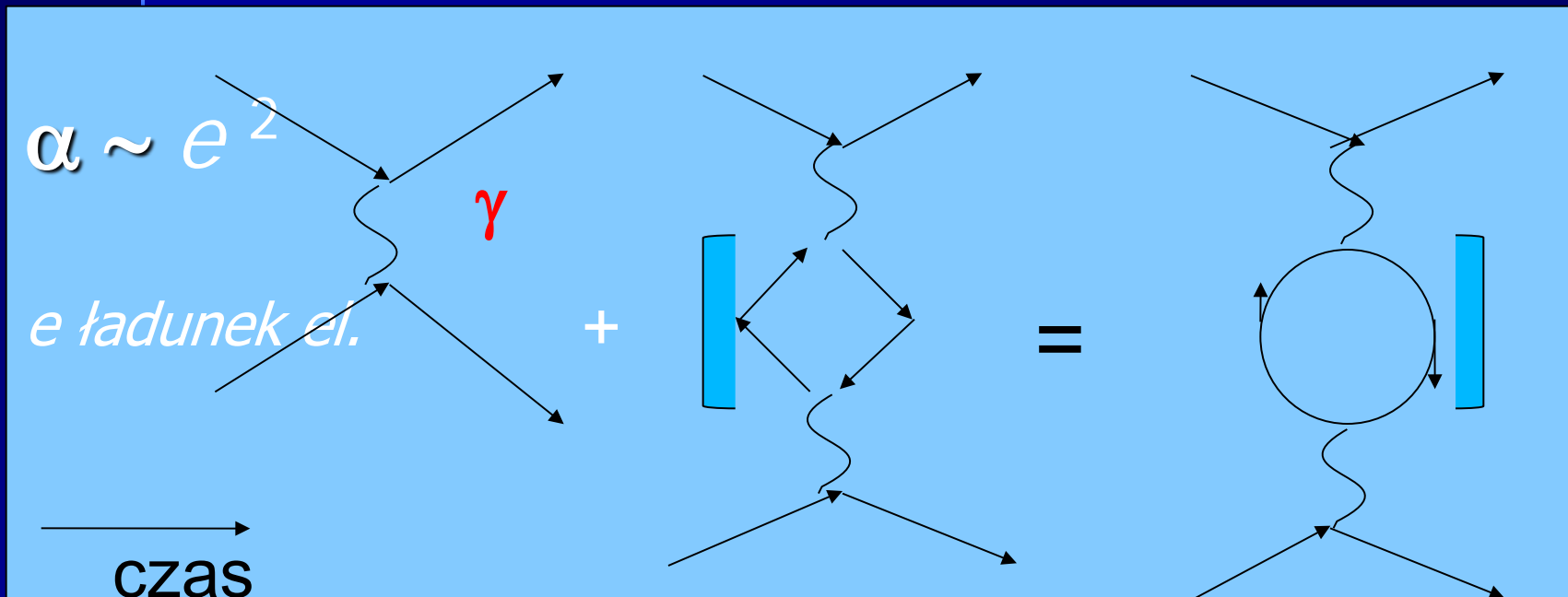
*gdy suma
po kolorach*

*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



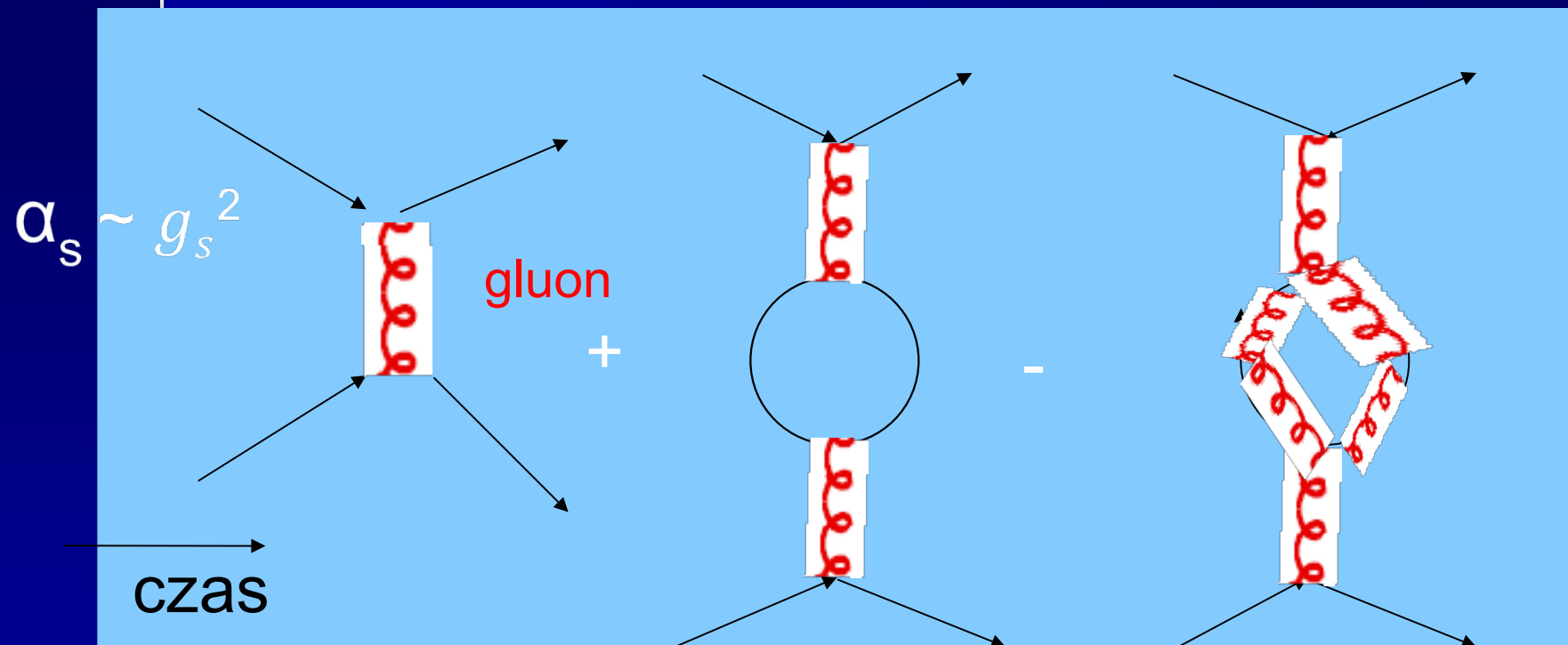
Prawdopodobieństwo tego procesu proporcjonalne do

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

Pętla elektronowa $\rightarrow \alpha$ zmienia się z pędem ('biegnie'); wzrasta dla większych pędów fotonu, czyli większych energii zderzenia

Biegąca stała sprzężenia α_s

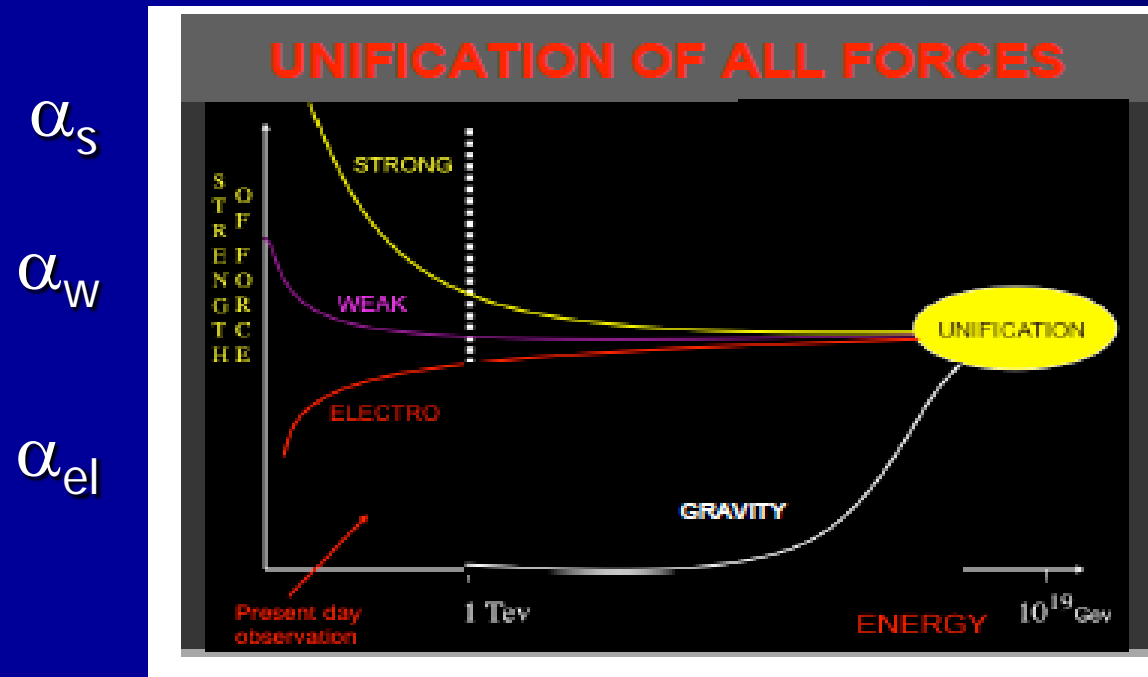
Oddziaływanie kolorowe – pomiar stałej sprzężenia w zderzeniu dwóch kwarków (przy zderzeniu dwóch hadronów)



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

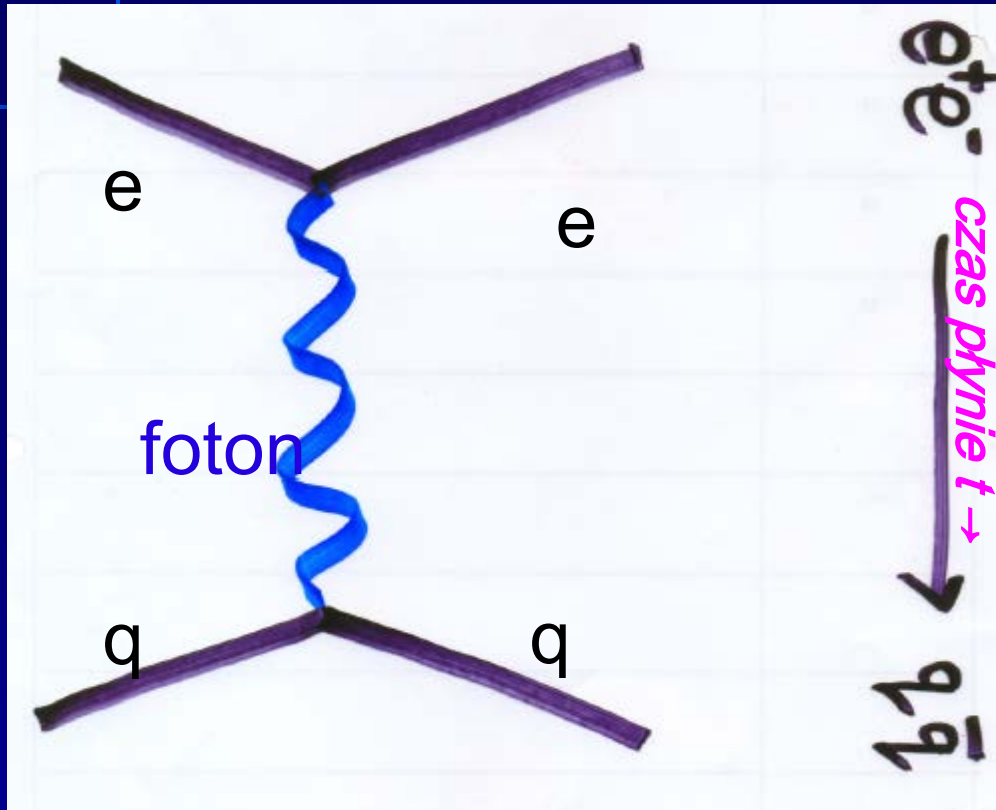
Biegające stałe sprzężenia

- 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

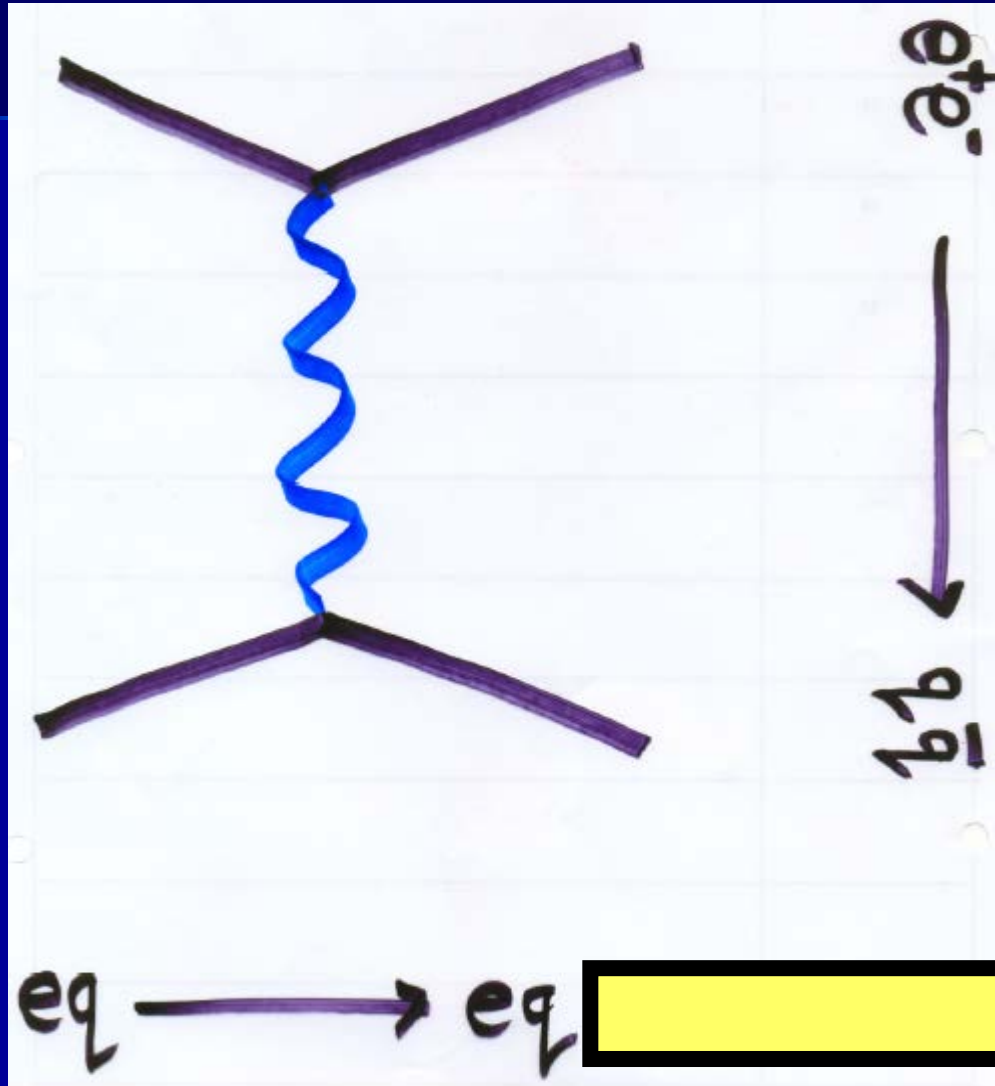
(q q lub q anty-q, anty-q anty-q)

Procesy skrzyżowane

pozyton początkowy \leftrightarrow elektron końcowy

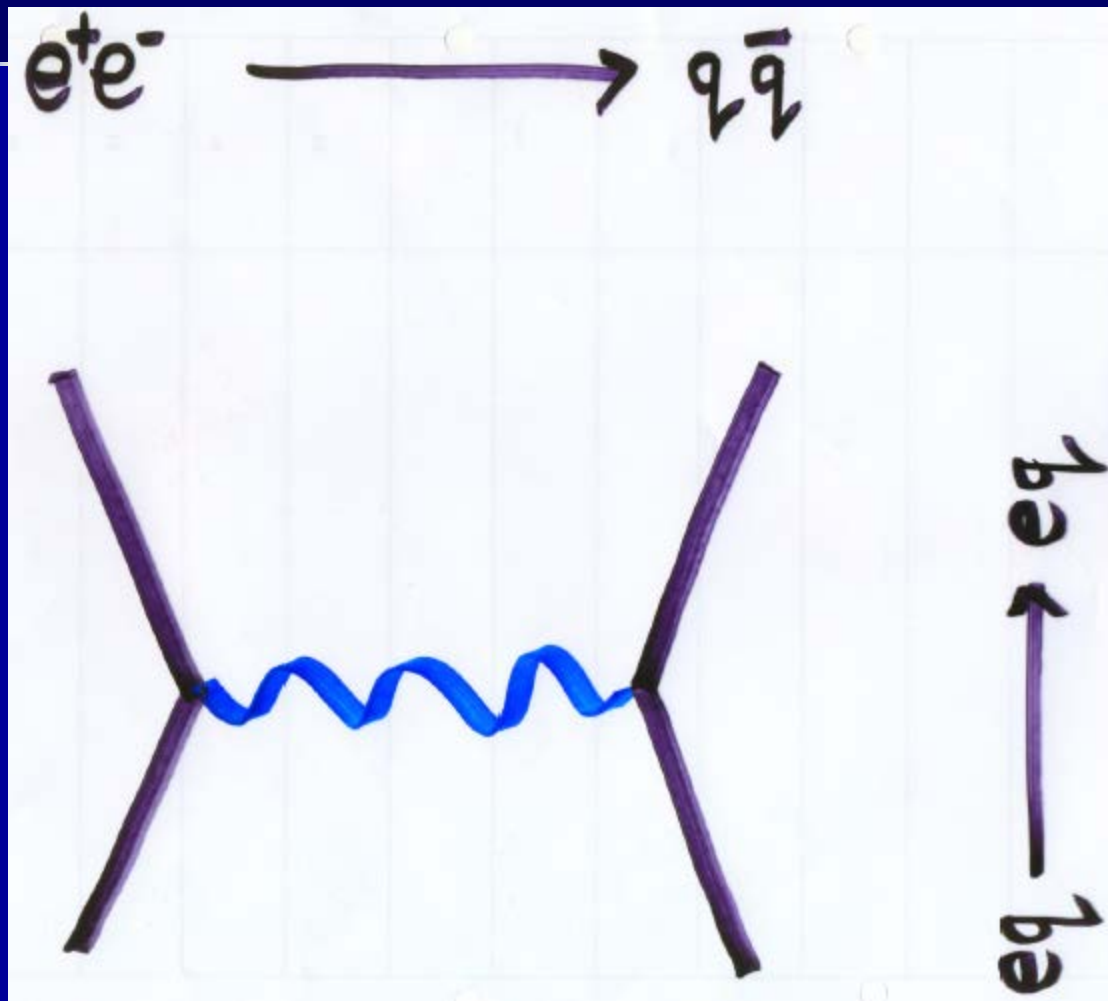
a anty-q końcowe \leftrightarrow q początkowe

**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 8

- 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 2 procesy skrzyżowane do procesu rozproszenia kwarków: $u d \rightarrow u d$

Pytania do wykładu 8 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?