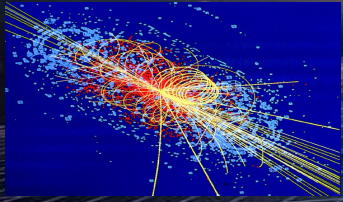


Wszechświat cząstek elementarnych



WYKŁAD 5 sem letni.2010/11

Maria Krawczyk, Wydział Fizyki UW

**Siły: porównania oddziaływań
stałe sprzężenia**

Diagramy Feynmana

Oddziaływania:

elektromagnetyczne i grawitacyjne

elektromagnetyczne i silne (kolorowe)

Biegające 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 **jądrowe** wiążące nukleony (**wymiana pionów**) w jądra atom., zasięg 10^{-15} m

- siły jądrowe fundamentalne (kolorowe)**, działające między kwarkami (wymiana gluonów), zasięg podobny

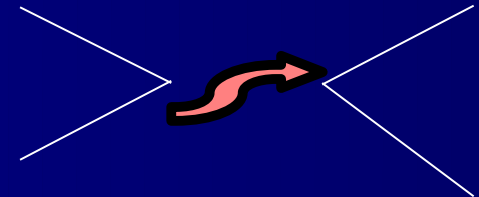
- siły **słabe** np. rozpad neutronu, zasięg mniejszy niż dla sił jądrowych (oddziaływanie punktowe)

- 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 cząstki wymienianej (nośnika oddziaływania)

$$\lambda \sim 1/M$$



- oddz. grawitacyjne i el-mag: **zasięg nieskończony** → masa fotonu (grawitonu?) = 0
- oddz. silne: zasięg \sim **rozmiar protonu 10^{-15} m** (tu **uwięzienie** i bezmasowe gluony nie decydują o zasięgu)
- oddz. słabe: **zasięg 10^{-18} m**, masa nośników 80-90 GeV

Uporządkowanie wg „siły”

- Porównanie: wg „siły” (*strength*) inaczej „natężenia”: 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.*) $\alpha_w = g^2 / 4 \pi = 1/32$

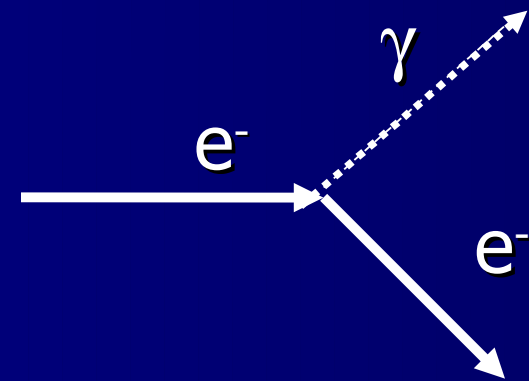
silne (*strong fund, color*) $\alpha_s = g_s^2 / 4 \pi = 1$

* 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



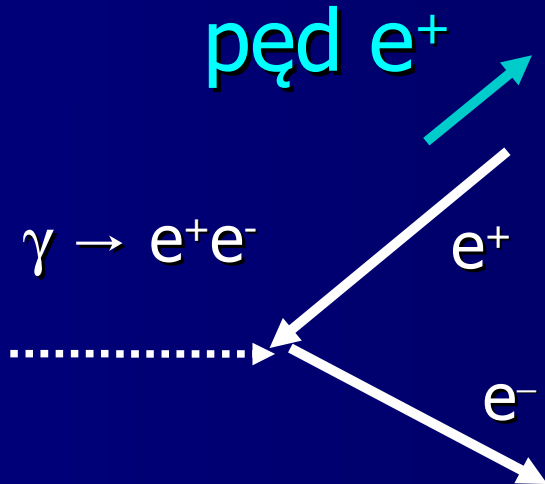
Strzałki na ciągłej linii (fermionowej) dla $e^- \rightarrow$ przepływ ładunku elektrycznego (ujemnego) i pęd,
strzałki na linii fotonowej (linia przerywana) \rightarrow pęd

Diagramy Feynmana dla procesów skrzyżowanych

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

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

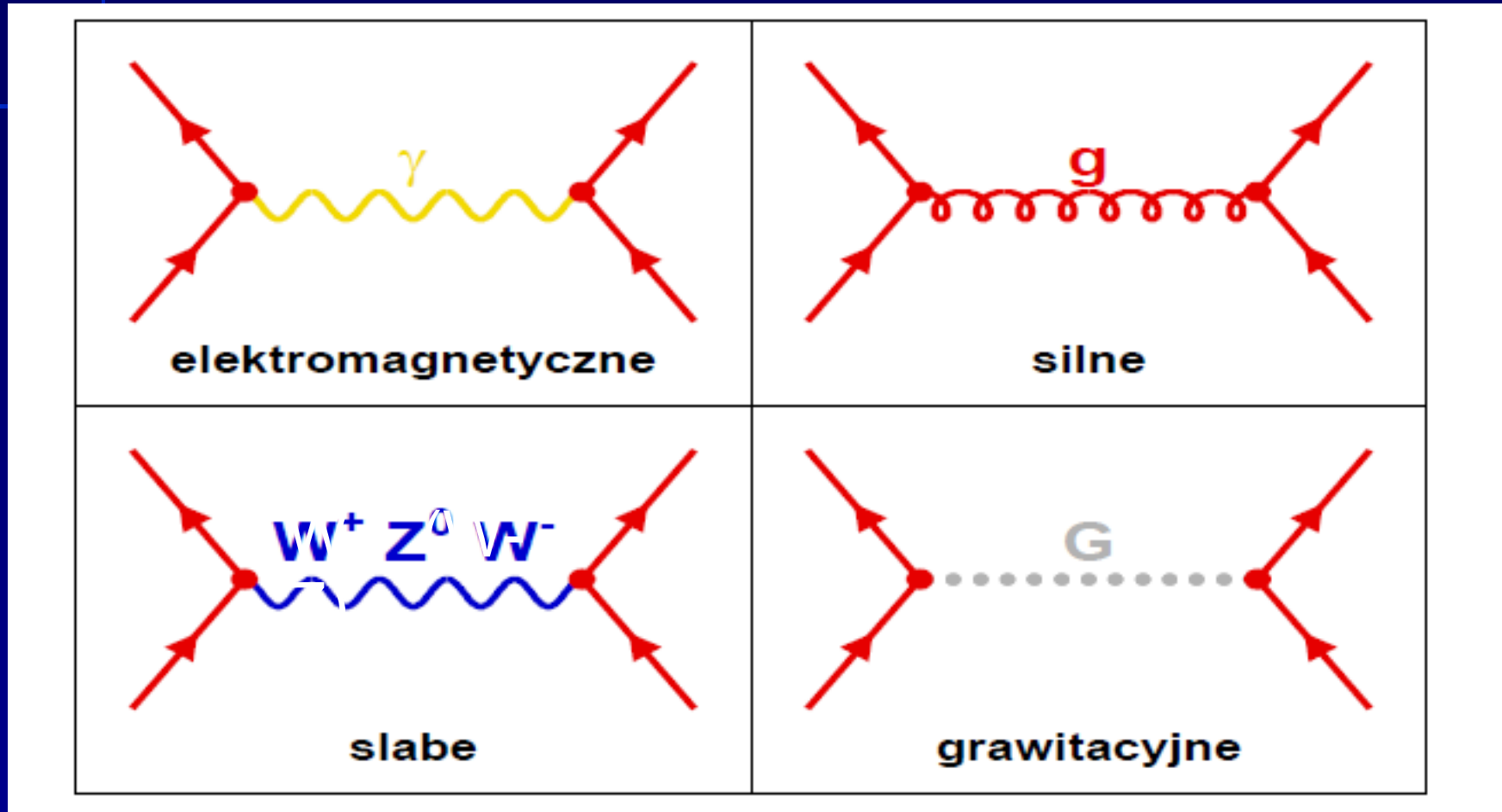
$\gamma e^- \rightarrow e^-$



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



Diagramy Feynmana dla oddziaływań



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
$$F_{el} = e^2 / r^2 \quad \text{zaś} \quad F_{gr} = G M m / r^2$$
- Stosunek tych sił = GMm/e^2 wynosi ok. 10^{-40}

Stałe fundamentalne

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 ($e^2/4 \pi \hbar c = 1/137$) ozn. α

to stała struktury subtelnej

→ ważna w relatywistycznej (c), kwantowej teorii (\hbar)
ładunku elektrycznego (e) elektrodynamice kwantowej
(powstałej w latach 20-30 XXw),

gdzie α (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

- Zanedbujemy grawitację dla pojedynczych cząstek elementarnych przy obecnych energiach
- Kiedy grawitacja może być ważna w mikroświecie?
Z 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



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

ep in H atom

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

c.f. size of proton $\approx 10^{-15}$ m.
size of univ. $\leq 10^{10}$ yr. $\times 10^{16}$ m yr⁻¹
 $\leq 10^{26}$ m.
 $10^{-40} \approx \frac{\text{Radius of proton}}{\text{Radius of Universe}}$

Elektrostatyka

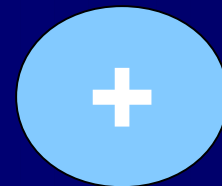
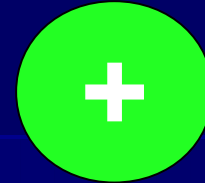
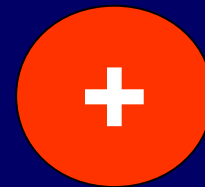
- Dwa typy ładunków elektrycznych: dodatnie (+) i ujemne (–)

CHROMOSTATYKA

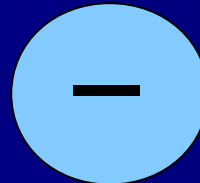
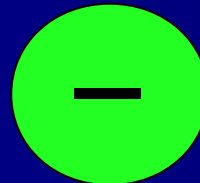
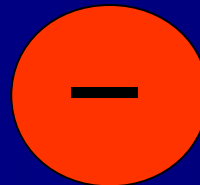
- Trzy rodzaje ładunków kolorowych (kolorów), z których każdy może być dodatni (+) lub ujemny (–) → kolory i antykolory

3 ładunki kolorowe

kwarki



antykwaraki

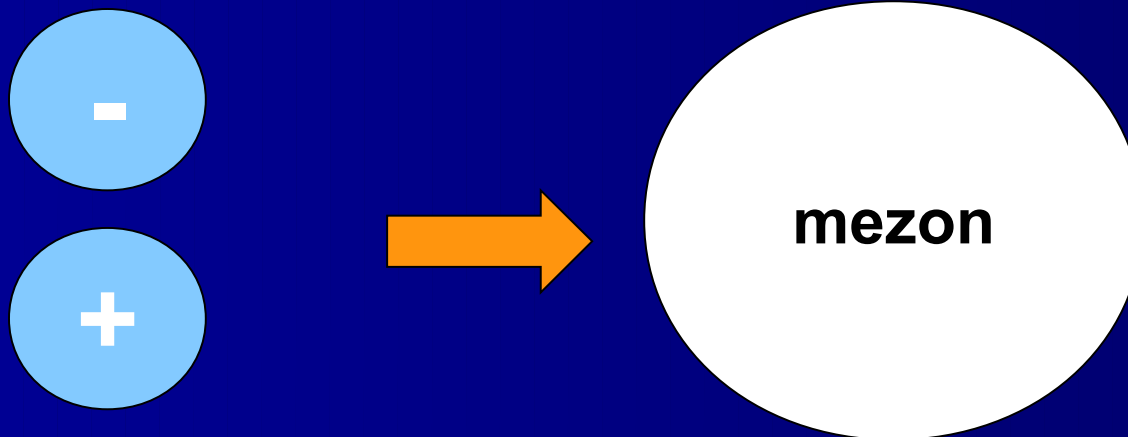


Znana reguła:

“Takie same kolory się odpychają, przeciwne - przyciągają”

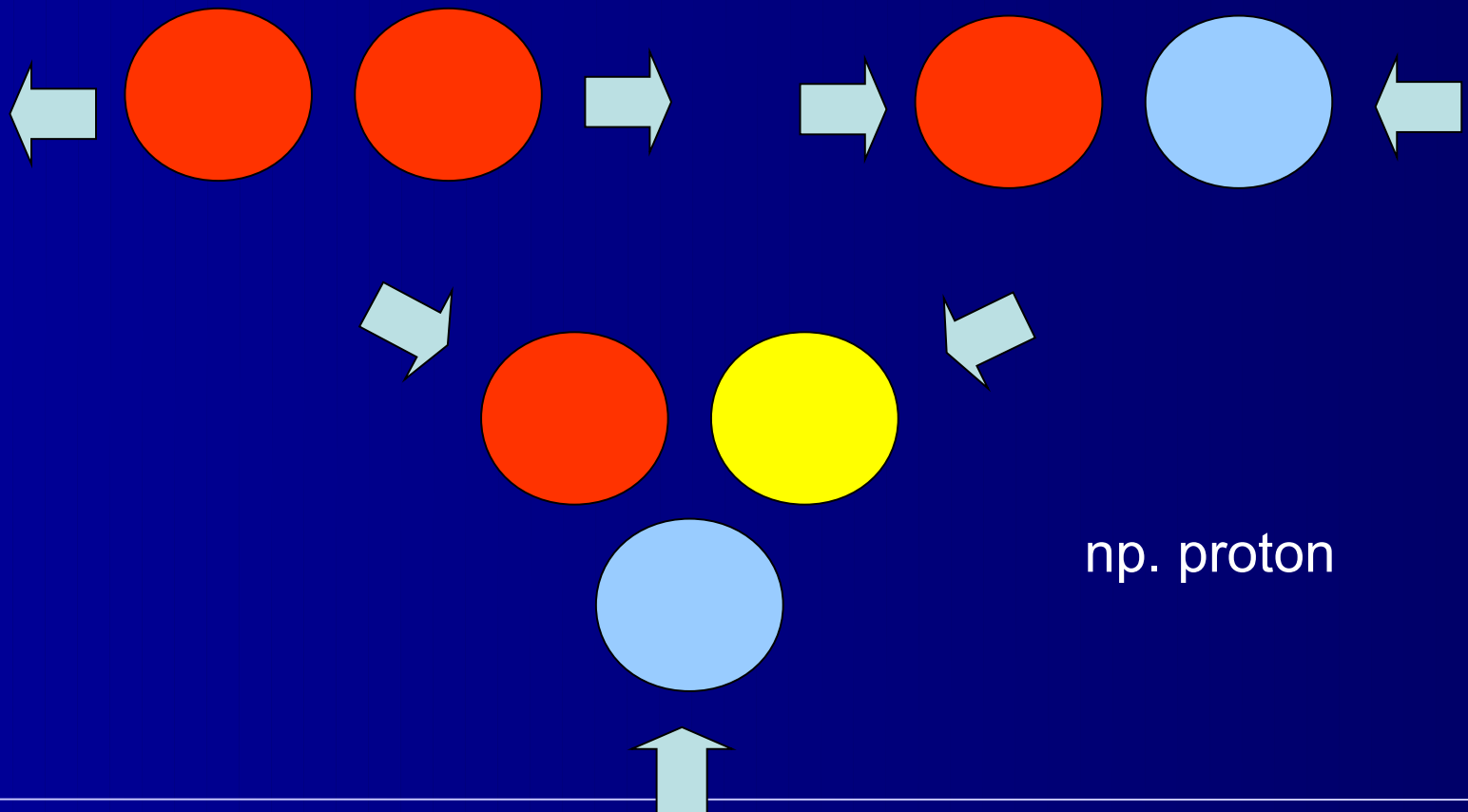
Najprostszy układ: mezon=kwark+antykwar

Kolory się znoszą, np



TRZY kolory

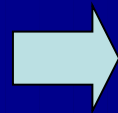
Potrzebne aby powstały bariony (3 kwarki)
(np. proton) = aby się kolor zneutralizował



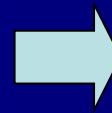
Elektrodynamika kwantowa

Quantum Electrodynamics: QED

Ładunek
elektryczny



Atomy

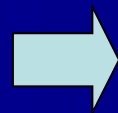


Molekuły
(cząsteczki)

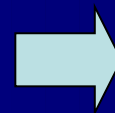
Chromodynamika kwantowa

Quantum Chromodynamics: QCD

Ładunek
kolorowy

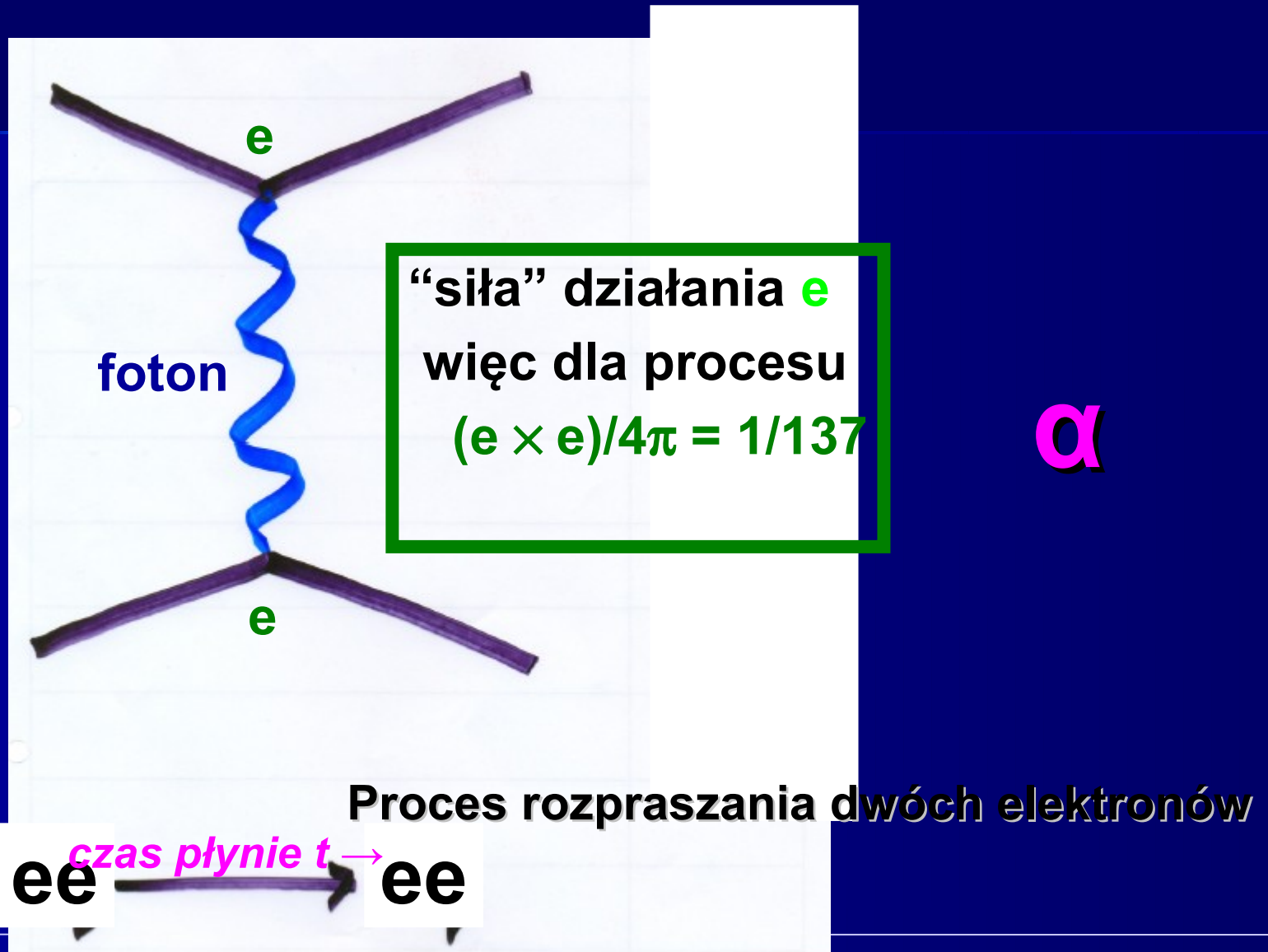


Nukleony

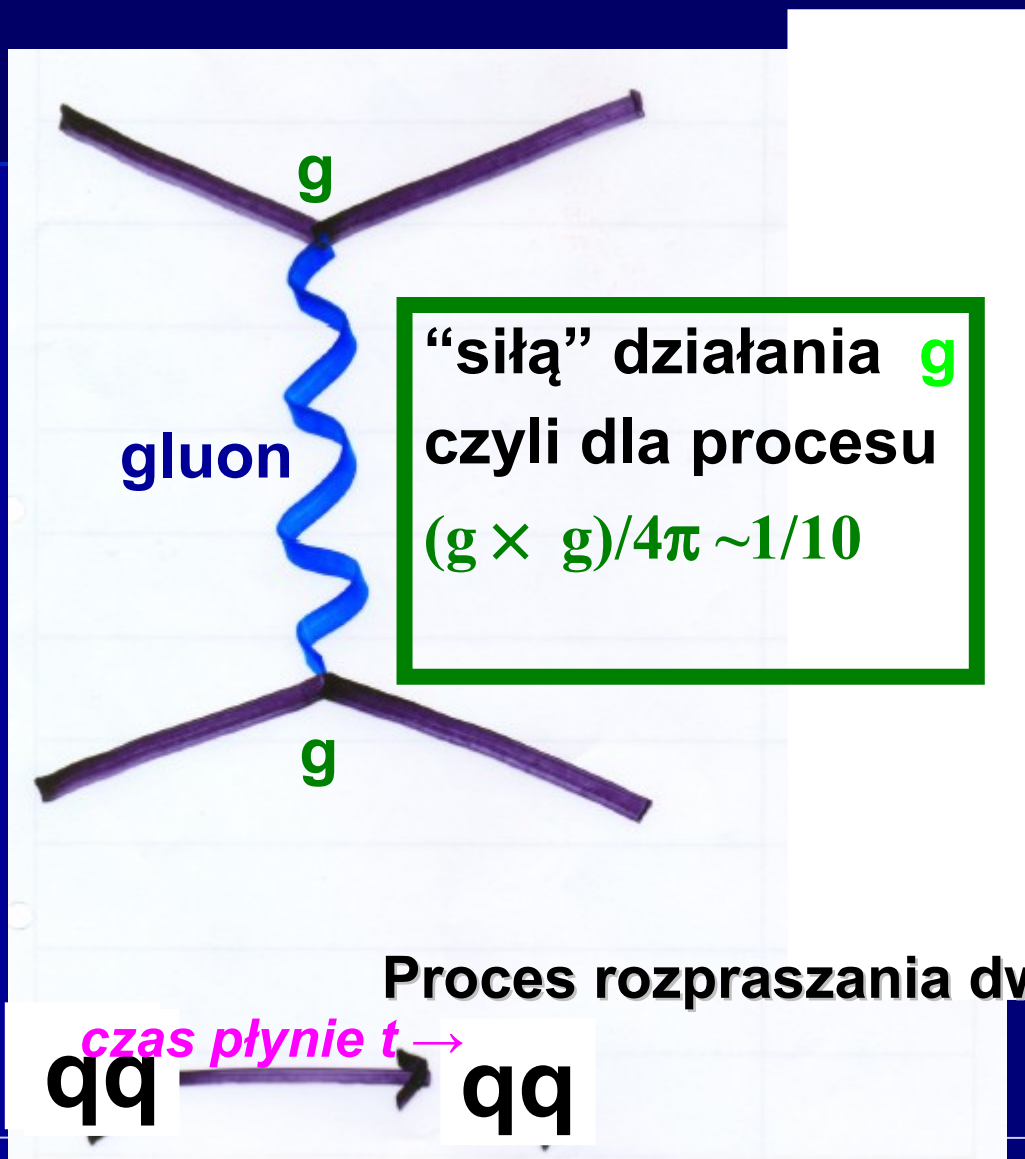


Jądra

Diagramy Feynmana dla oddziaływań elektromagnetycznych



Diagramy Feynmana dla oddziaływań kolorowych

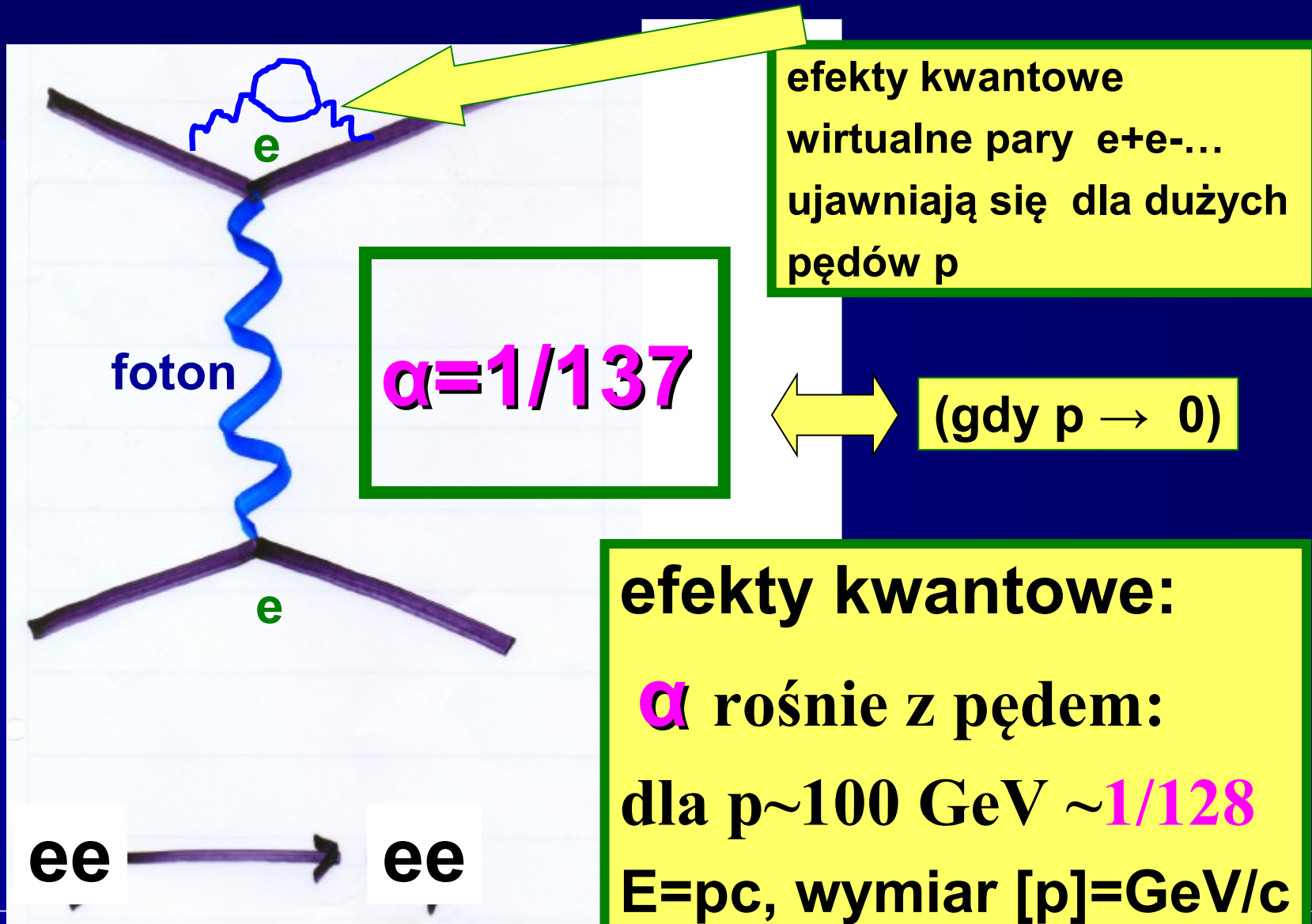


α_s

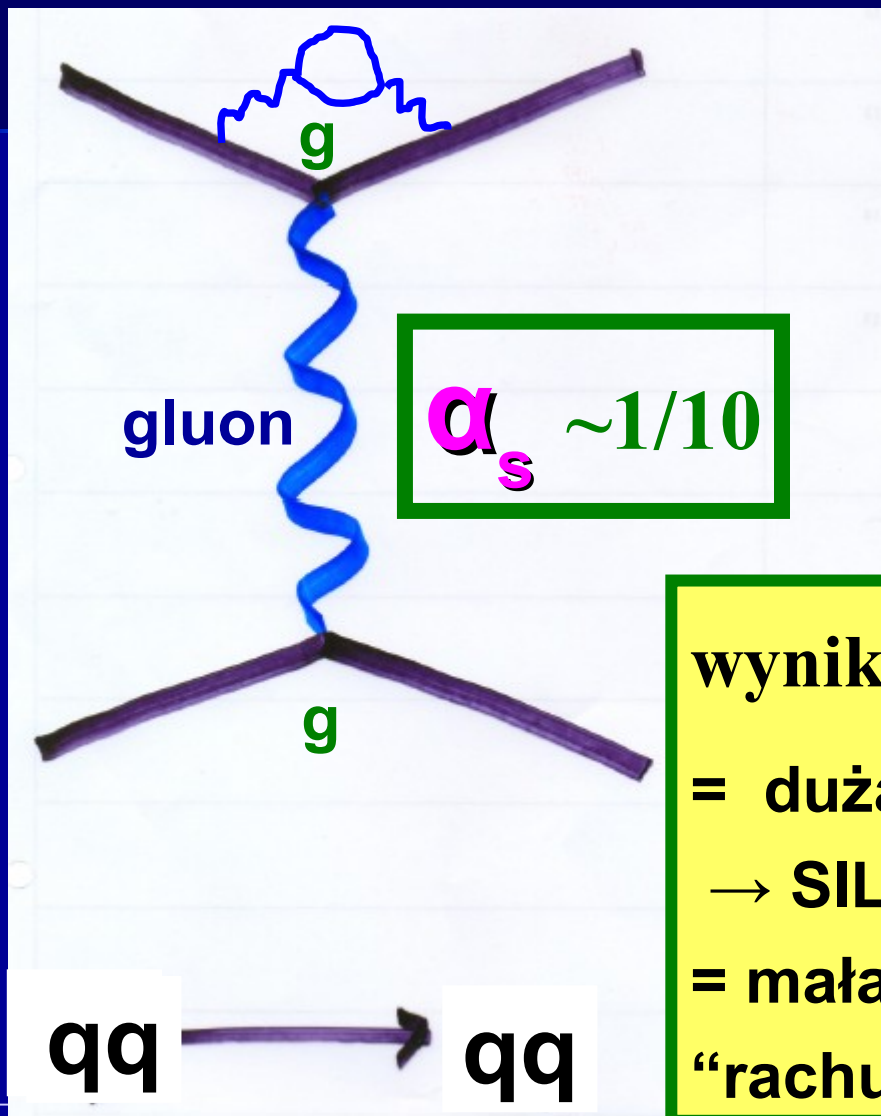
Proces rozpraszania dwóch kwarków

czas płynie $t \rightarrow$
qq → qq

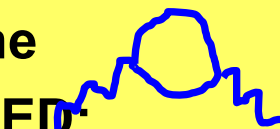
Diagramy Feynmana dla oddziaływań elektromagnetycznych



Diagramy Feynmana dla oddziaływań kolorowych

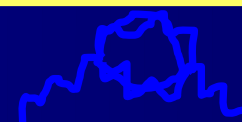


Efekty kwantowe wQCD podobne jak w QED:



pętla kwarkowa

ale w QCD również pętla gluonowa !



wynik: α_s maleje z p !

= duża dla małych pędów

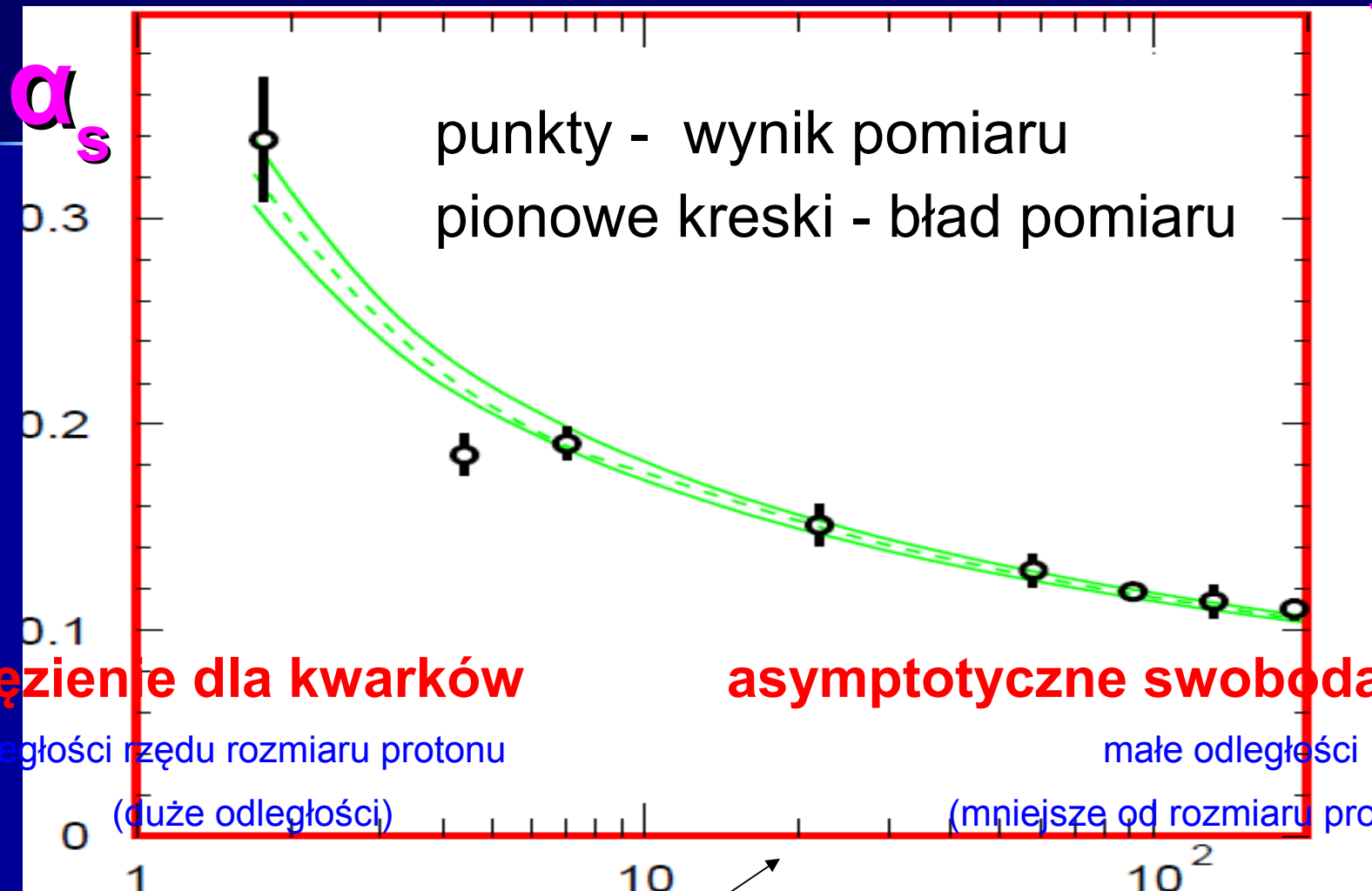
→ SILNE ODDZIAŁYWANIA!

= mała dla dużych pędów

“rachunek zaburzeń QCD”

„Biegnąca” stała sprzężenia (dane 2008)

α_s



α_s

← **więzienie dla kwarków**

asymptotyczna swoboda →

· odległości rzędu rozmiaru protonu

małe odległości

(duże odległości)

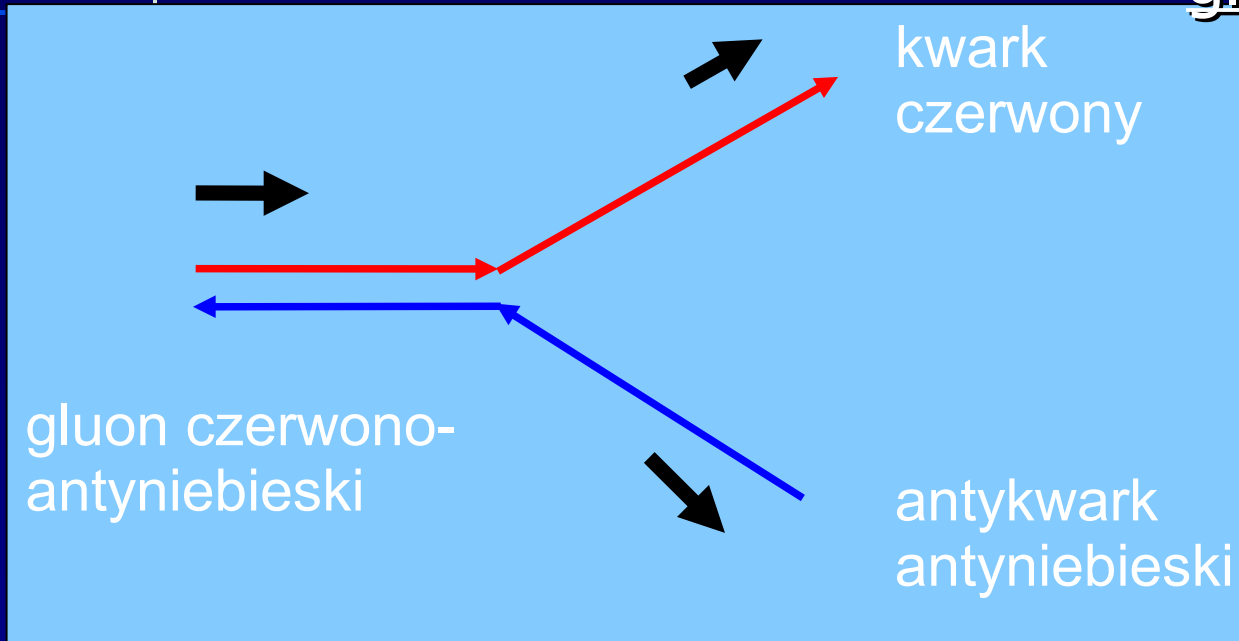
(mniejsze od rozmiaru protonu)


na tej osi pęd (GeV)

Oddziaływania kolorowe

Przykład elementarnego aktu oddziaływania

gluonu z kwarkami



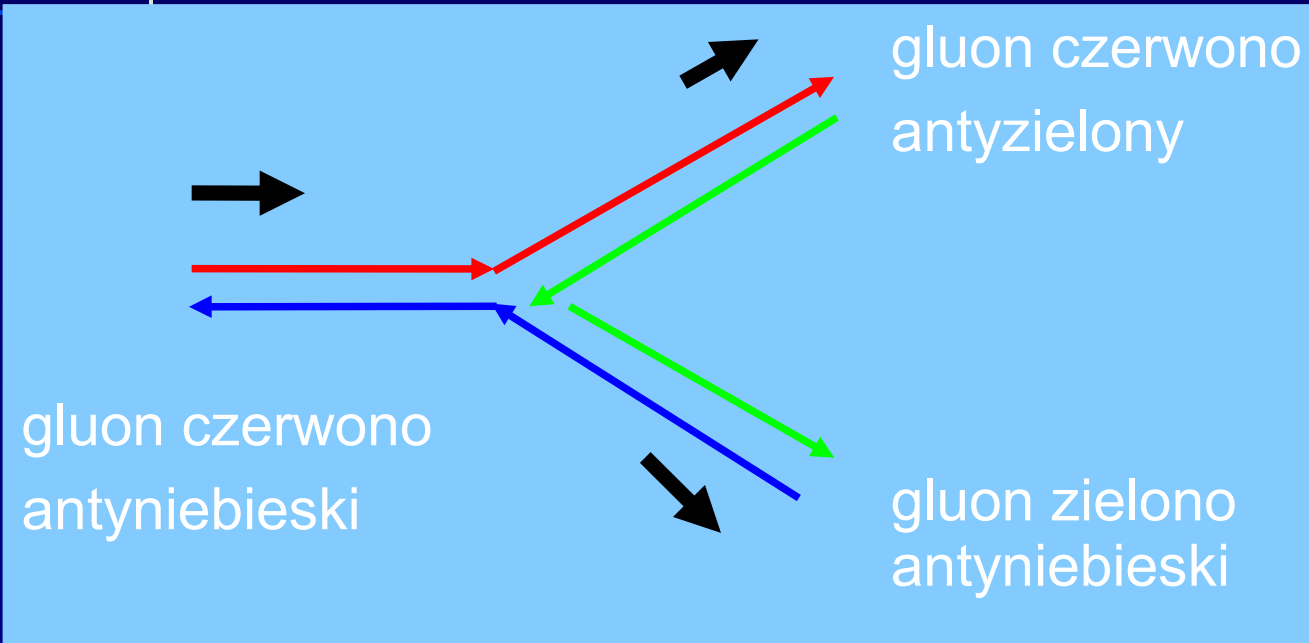
gluon zwykle oznaczamy linią typu sprężynka 
← tu 'śledzimy' kolor

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

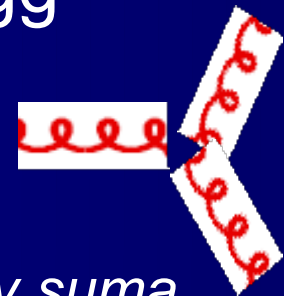
Oddziaływania kolorowe

Przykład elementarnego aktu oddziaływania

gluonów ze sobą



ggg



gdy suma
po kolorach

są również
sprzężenia

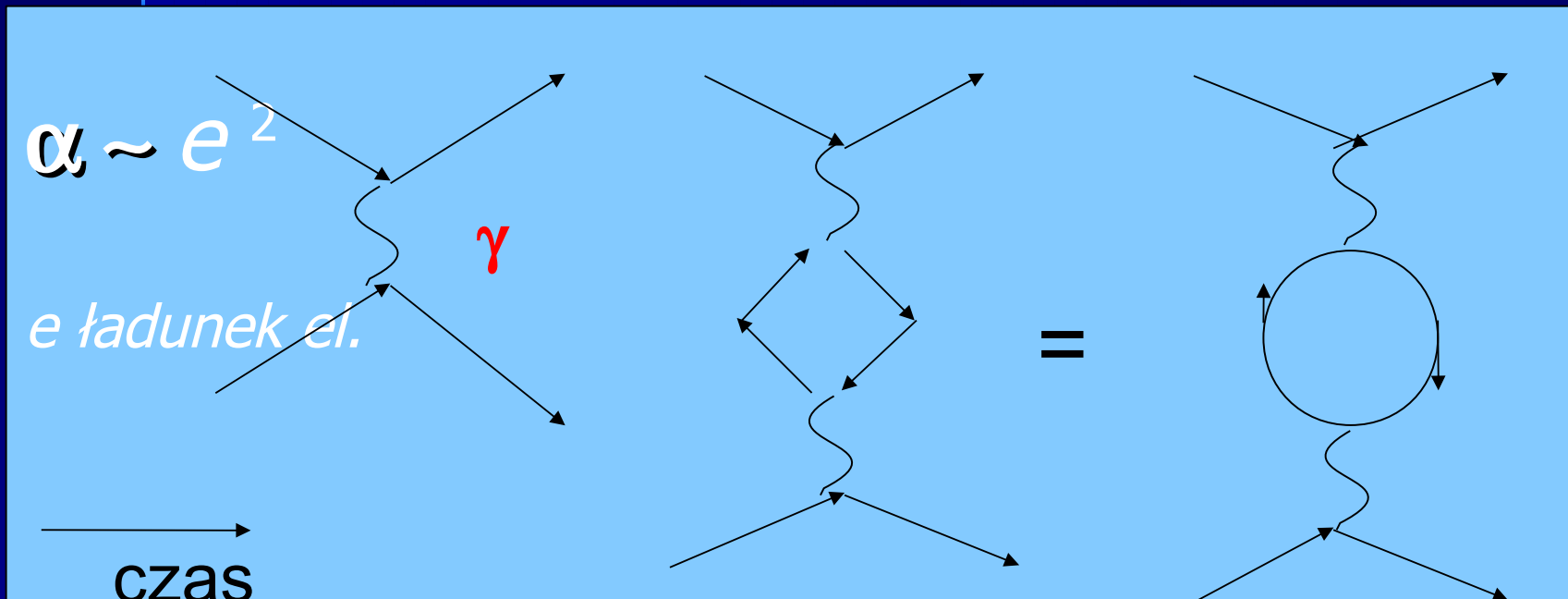
gggg

- 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

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



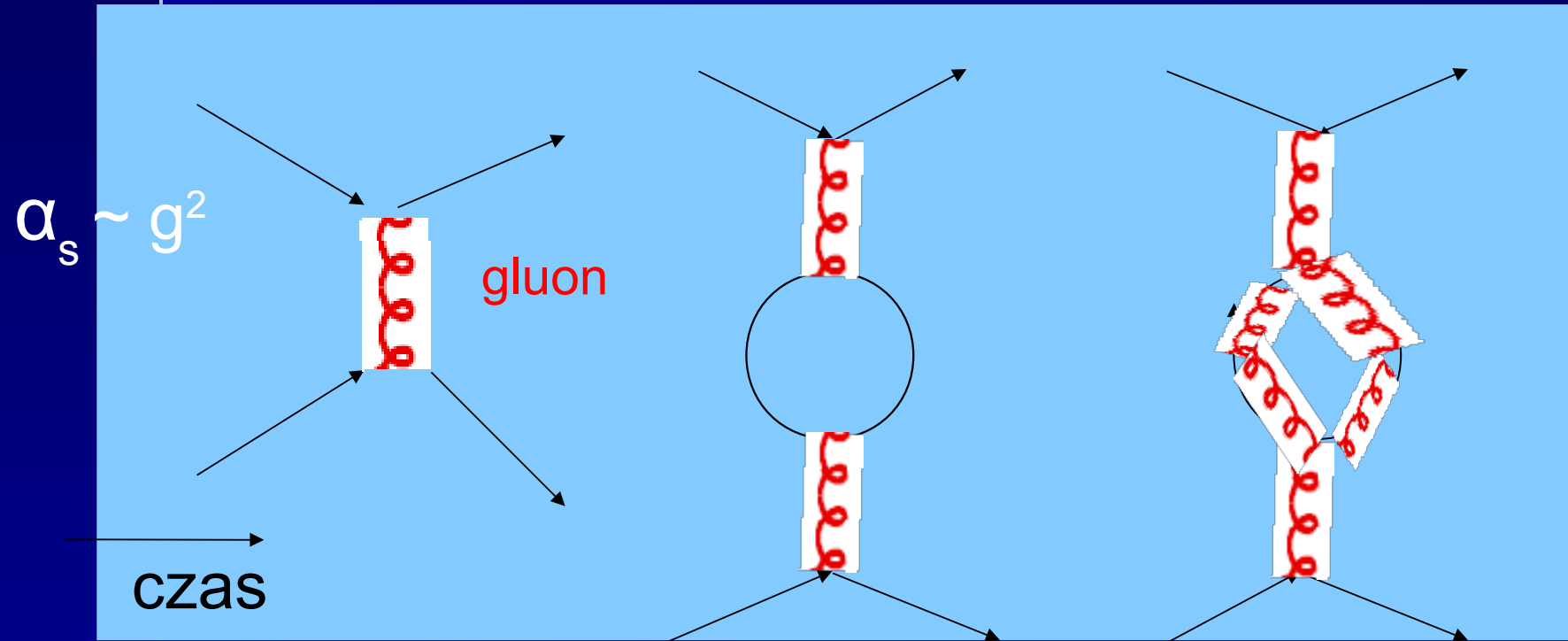
Prawdopodobieństwo tego procesu proporcjonalne do

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

Pętla elektronowa \rightarrow α 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 e-m (powoduje wzrost stałej α_s). Tu dodatkowo pętla gluonowa, która ma **przeciwny** znak \rightarrow i α_s maleje ze wzrostem pędu !

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

Ze wzrostem energii: oddz. silne słabną

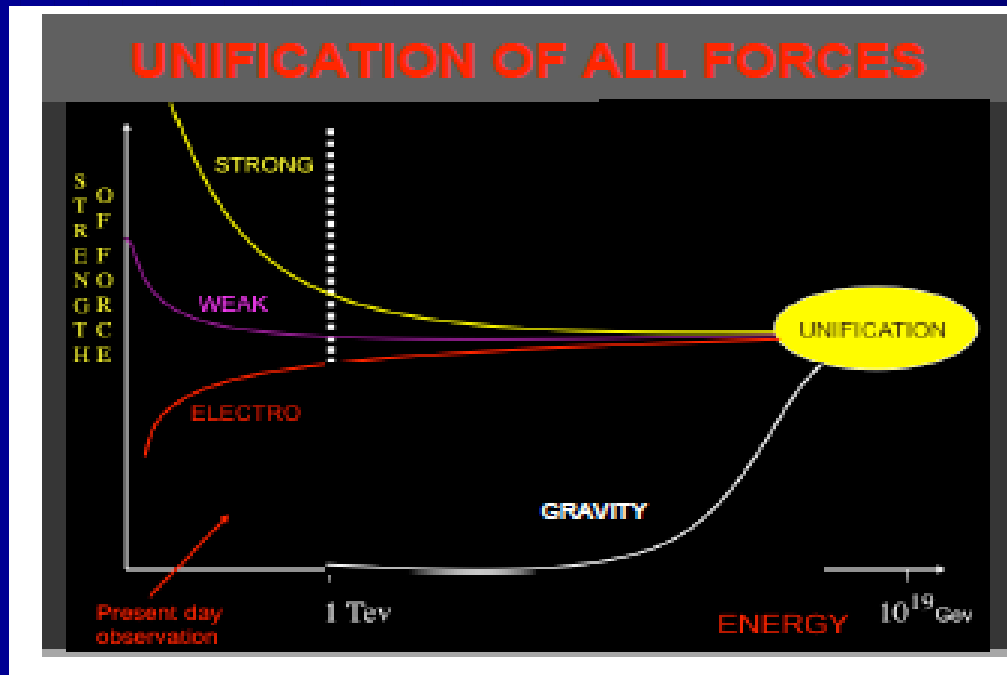
oddz. słabe słabną

oddz. el-mag wzmacniają się

α_s

α_w

α_{el}



Na osi poziomej - energia

D. Gross,
Photon 2005

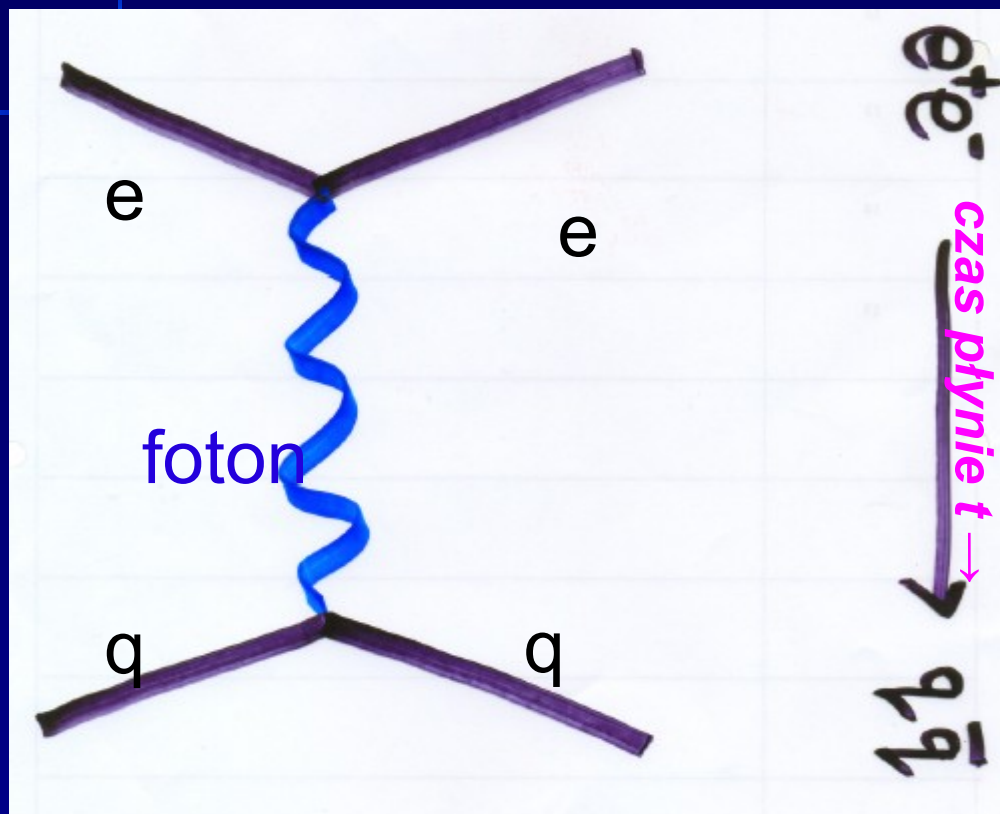
Biegające stałe sprzężenia

- 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



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)

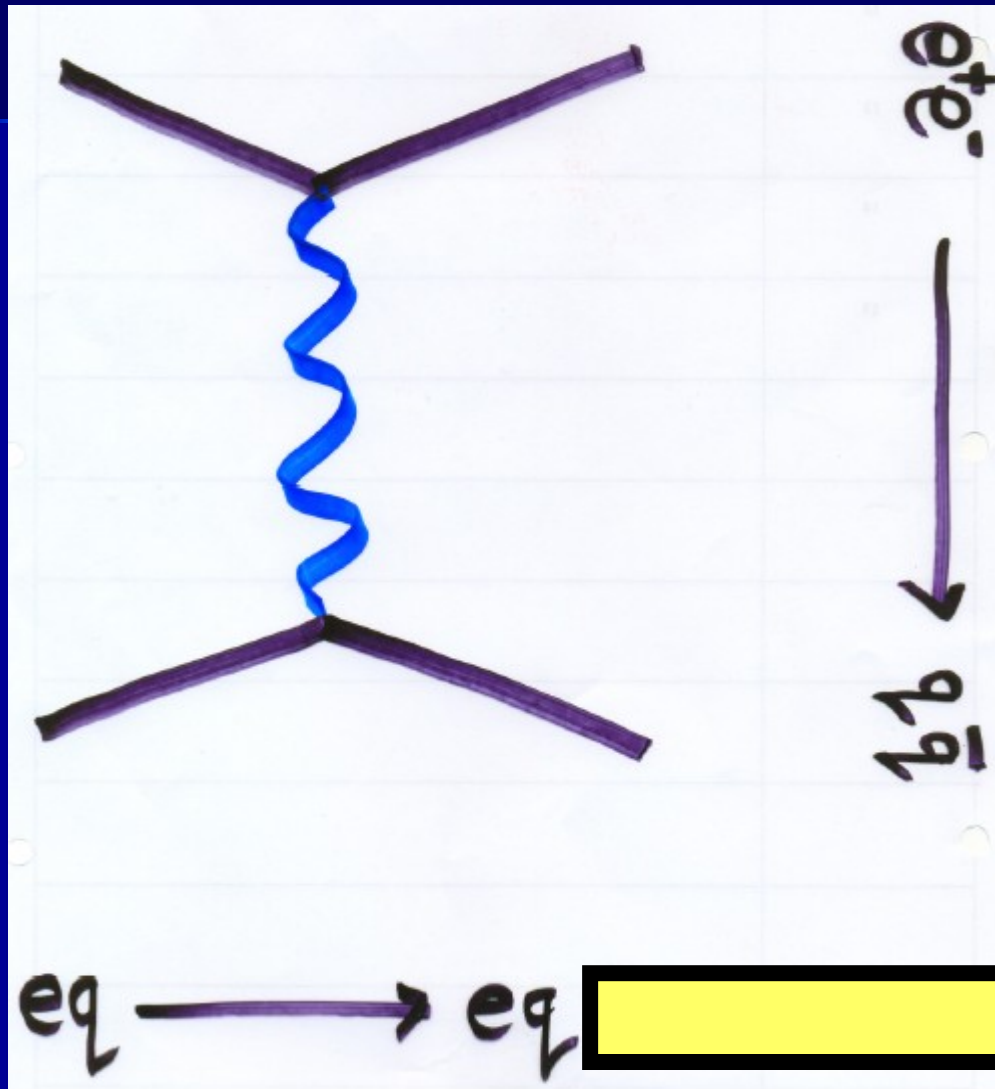
czas płynie $t \rightarrow$

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

Procesy skrzyżowane

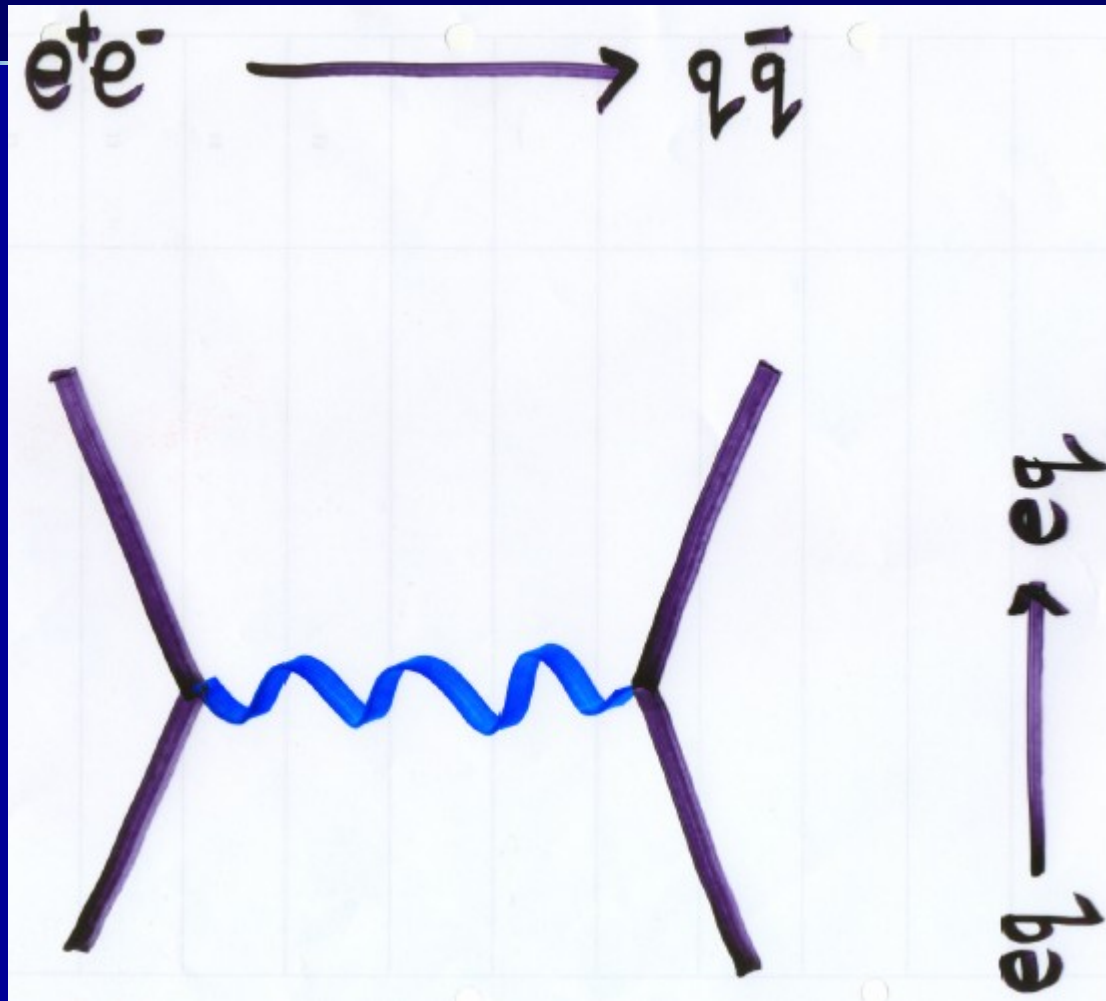
pozyton początkowy \leftrightarrow elektron końcowy
a anty-q końcowe \leftrightarrow q początkowe

**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 5

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

Pytania do wykładu 5 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?