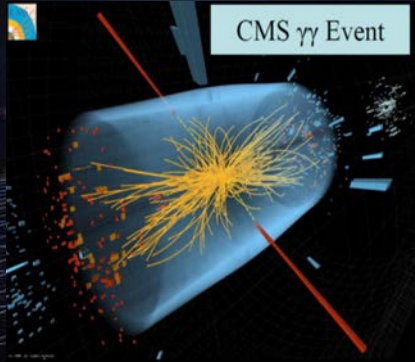


# Wszechświat cząstek elementarnych



## WYKŁAD 7

Maria Krawczyk, Wydział Fizyki UW

**Siły: porównania oddziaływań  
stałe sprzężenia**

3.IV.2013r

**Diagramy Feynmana**

**Oddziaływania:**

elektromagnetyczne i grawitacyjne

elektromagnetyczne i silne (kolorowe)

**Biegające stałe sprzężenia:  $\alpha$  i  $\alpha_s$**

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).

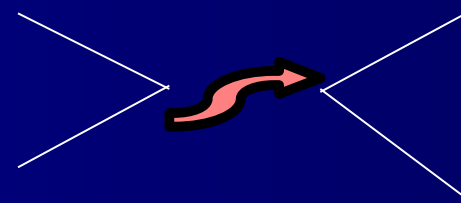
W mikroświecie dodatkowo występują:

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

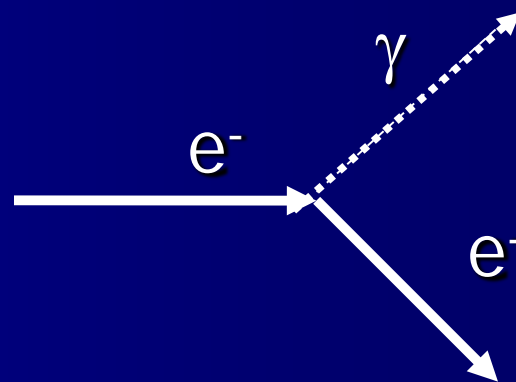
silne (strong fund, color)  $\alpha_s = g_s^2/4 \pi = 1$

\* 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



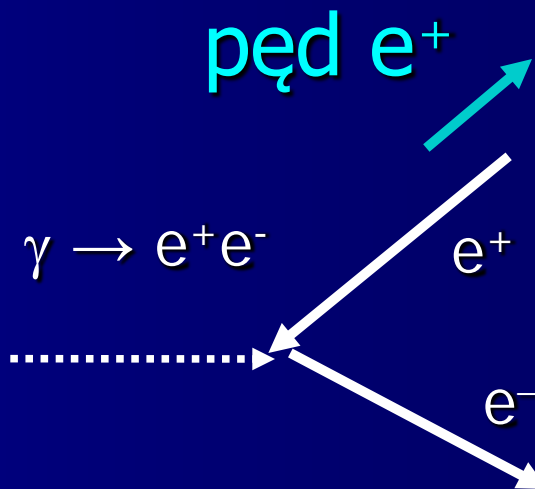
**Strzałki na ciągłej linii (fermionowej)** dla  $e^- \rightarrow$  przepływ ładunku elektrycznego (ujemnego) i pęd,  
strzałki na linii fotonowej (linia przerywana)  $\rightarrow$  pęd

# Diagramy Feynmana dla procesów skrzyżowanych

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

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

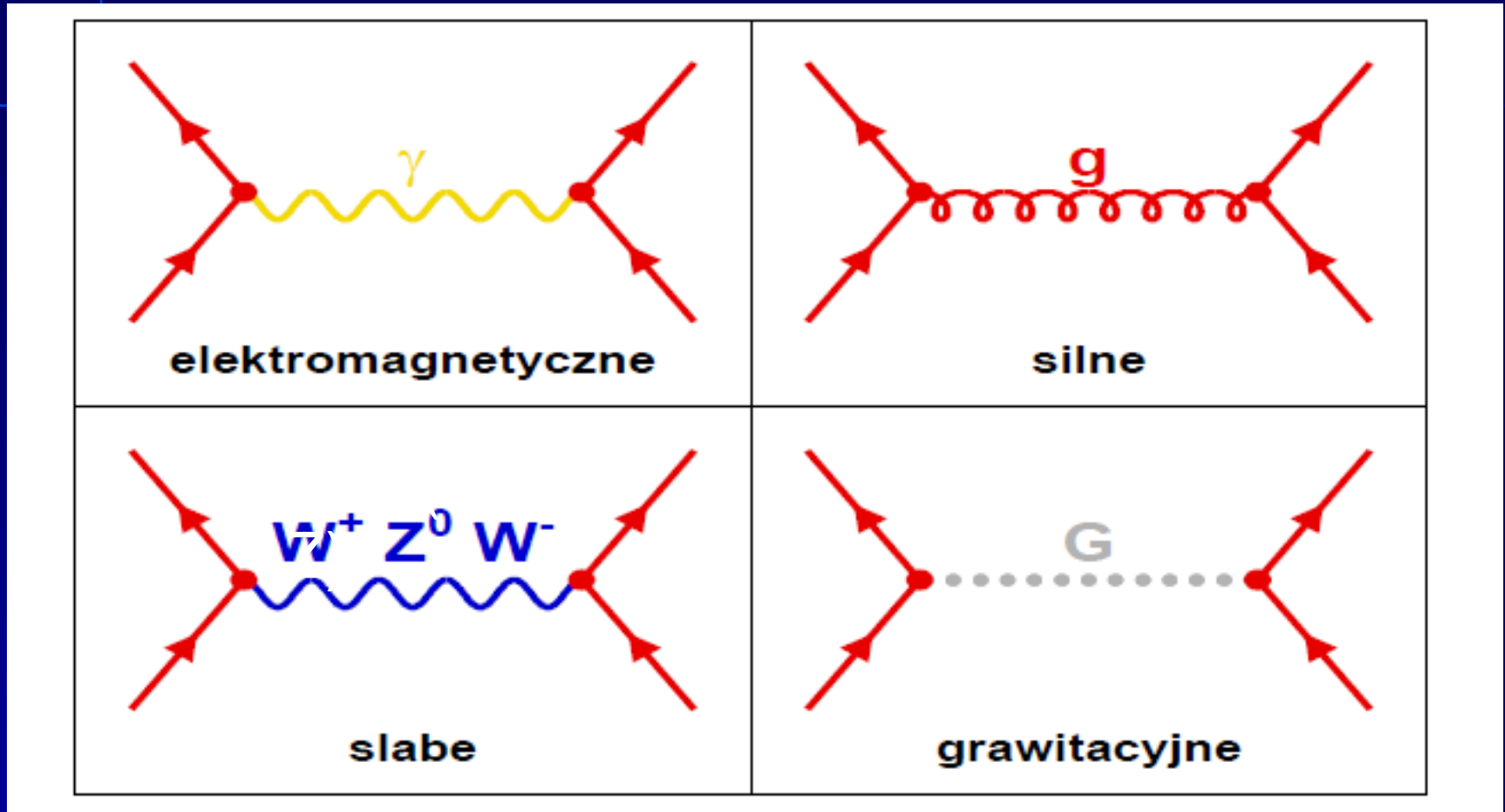
$\gamma e^- \rightarrow e^-$



*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.  $\alpha$

to stała struktury subtelnej

→ ważna w relatywistycznej ( $c$ ), kwantowej teorii ( $\hbar$ )

ładunku elektrycznego ( $e$ ) elektrodynamice kwantowej  
(powstałej w latach 20-30 XXw),

gdzie  $\alpha$  ( $\alpha_{em}$ ,  $\alpha_{el}$ ) - 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 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  $\rightarrow$  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.

size of univ.  $\leq 10^{10}$  yr.  $\times 10^{16}$  m yr<sup>-1</sup>  
 $\leq 10^{26}$  m.

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

GRAVITY



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

# Elektrostatyka

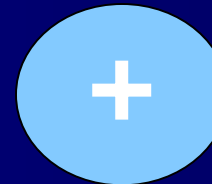
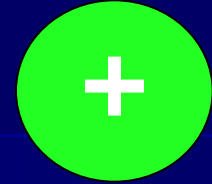
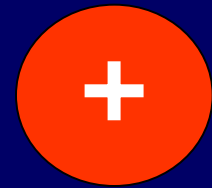
- Dwa typy ładunków elektrycznych: dodatnie (+) i ujemne (-)

## CHROMOSTATYKA

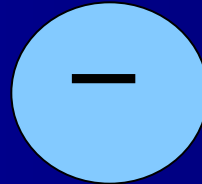
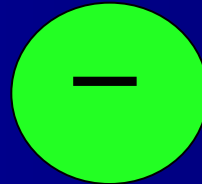
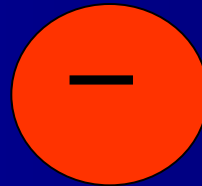
- Trzy rodzaje ładunków kolorowych (kolorów), z których każdy może być dodatni (+) lub ujemny (-) → kolory i antykolory

# 3 ładunki kolorowe

kwarki



antykwaraki

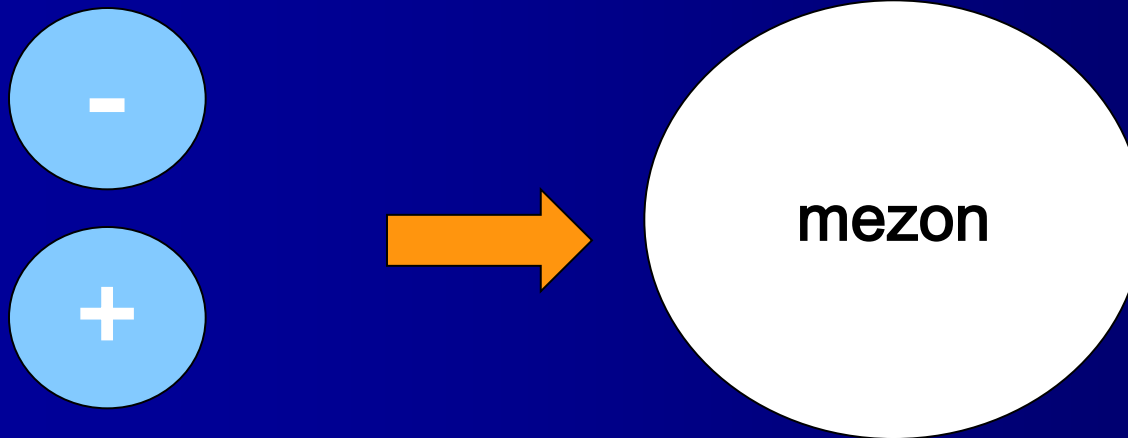


Znana reguła:

“Takie same kolory się odpychają, przeciwne - przyciągają”

# Najprostszy układ: mezon = kwark + antykwark

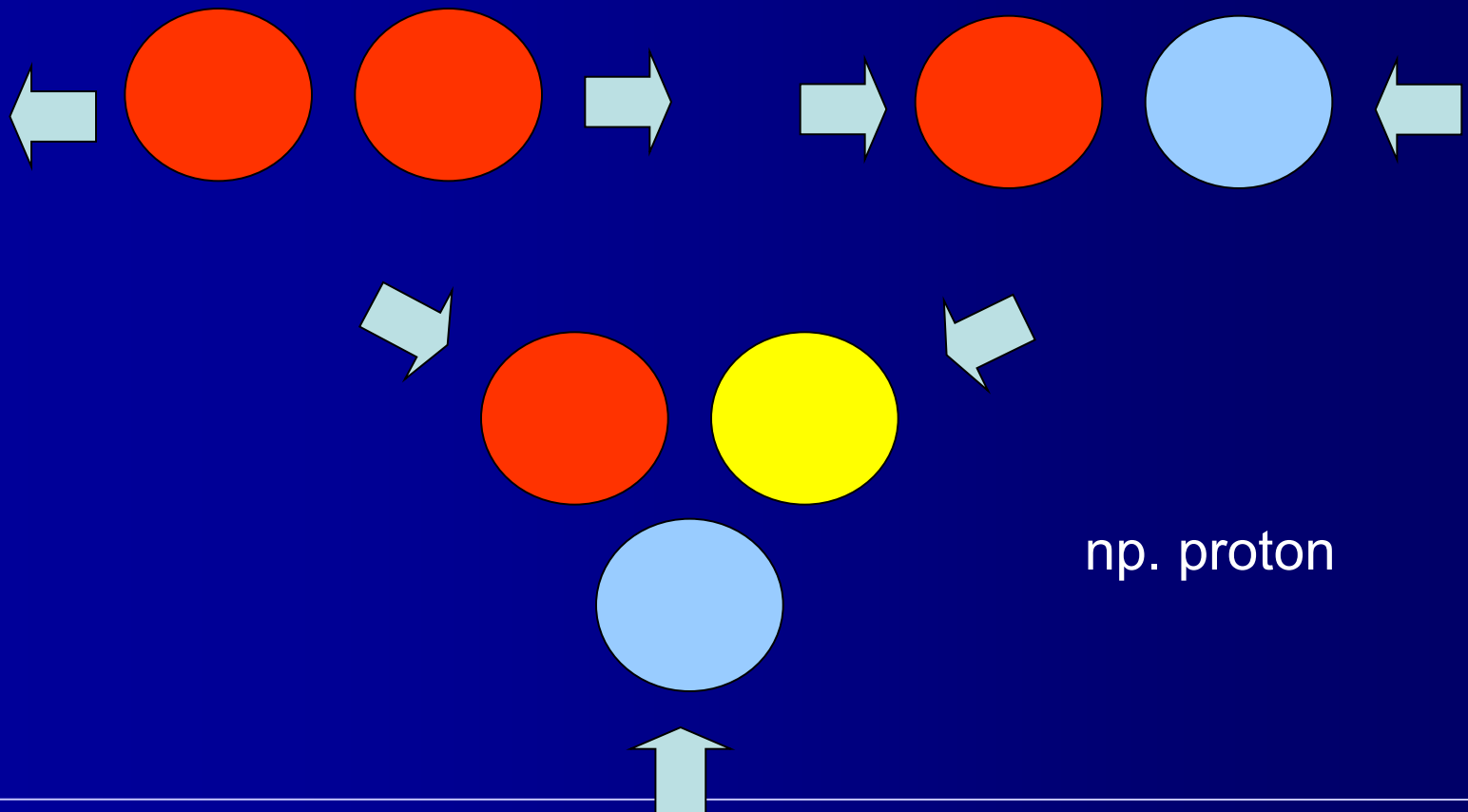
Kolory się znoszą, np





# TRZY kolory

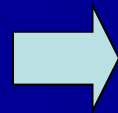
Potrzebne aby powstały bariony (3 kwarki)  
(np. proton) = aby się kolor zneutralizował



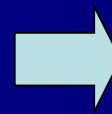
# Elektrodynamika kwantowa

## Quantum Electrodynamics: QED

Ładunek  
elektryczny



Atomy

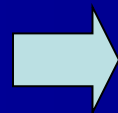


Molekuły  
(cząsteczki)

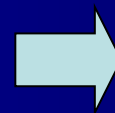
# Chromodynamika kwantowa

## Quantum Chromodynamics: QCD

Ładunek  
kolorowy

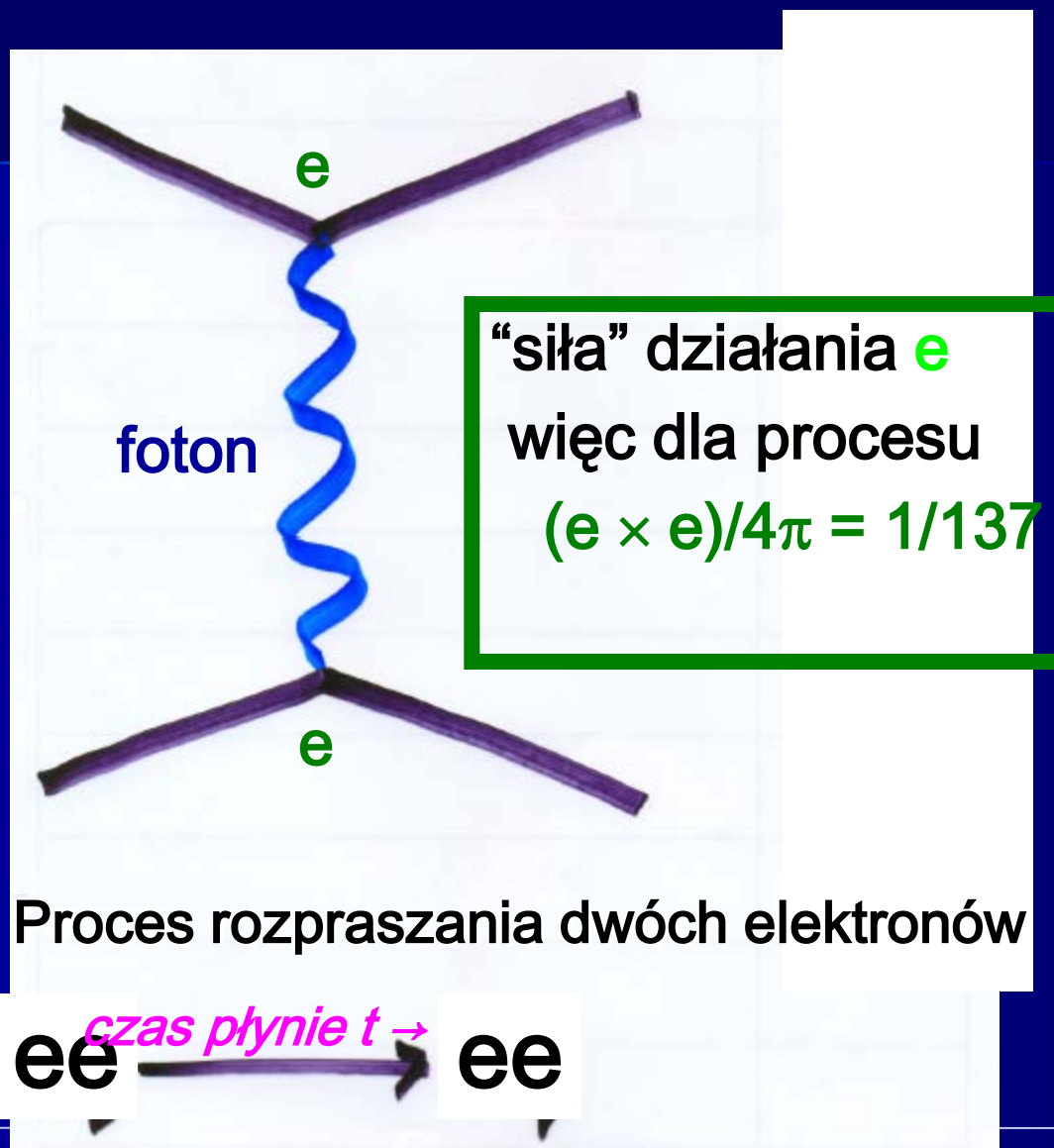


Nukleony



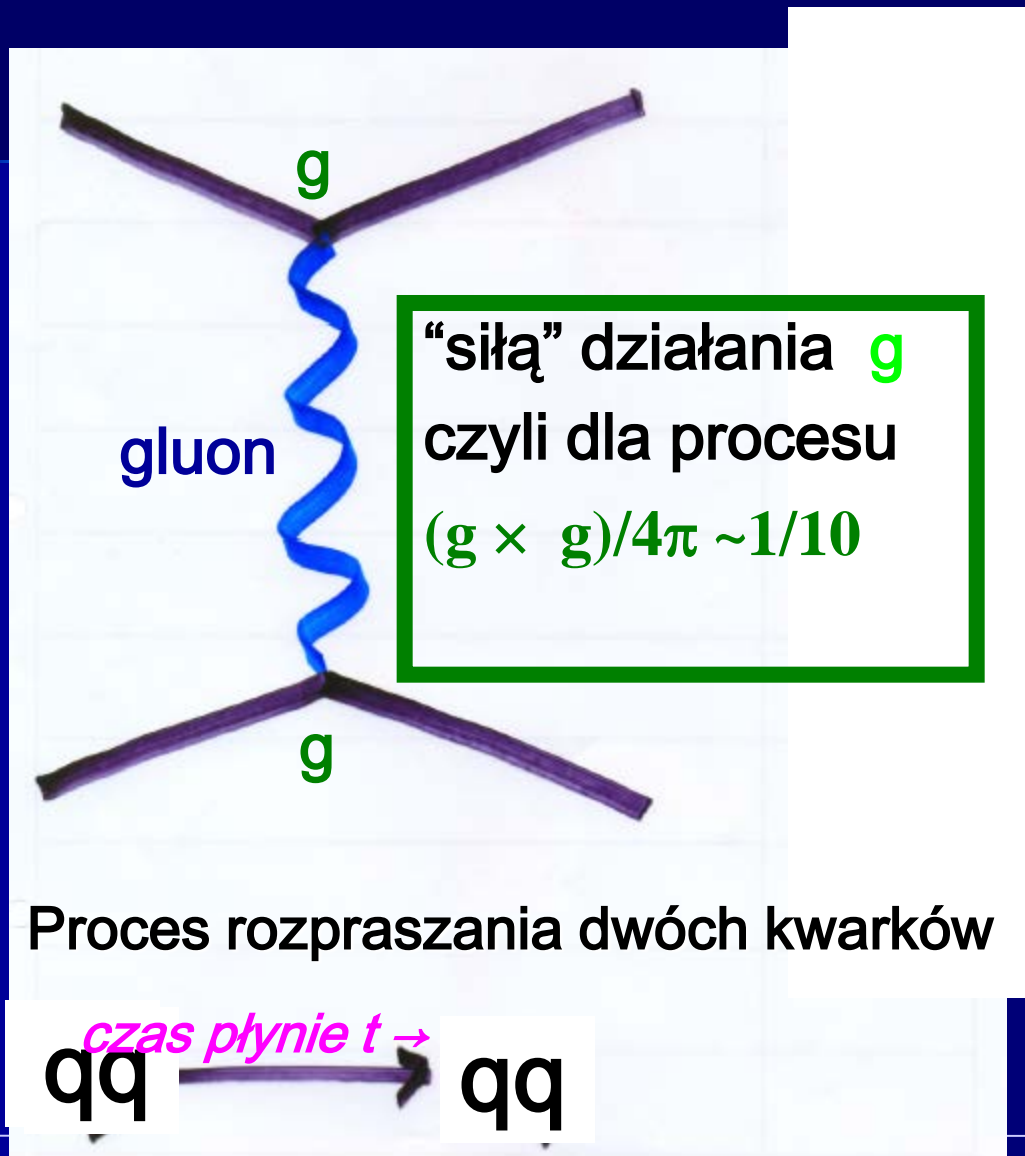
Jądra

# Diagramy Feynmana dla oddziaływań elektromagnetycznych



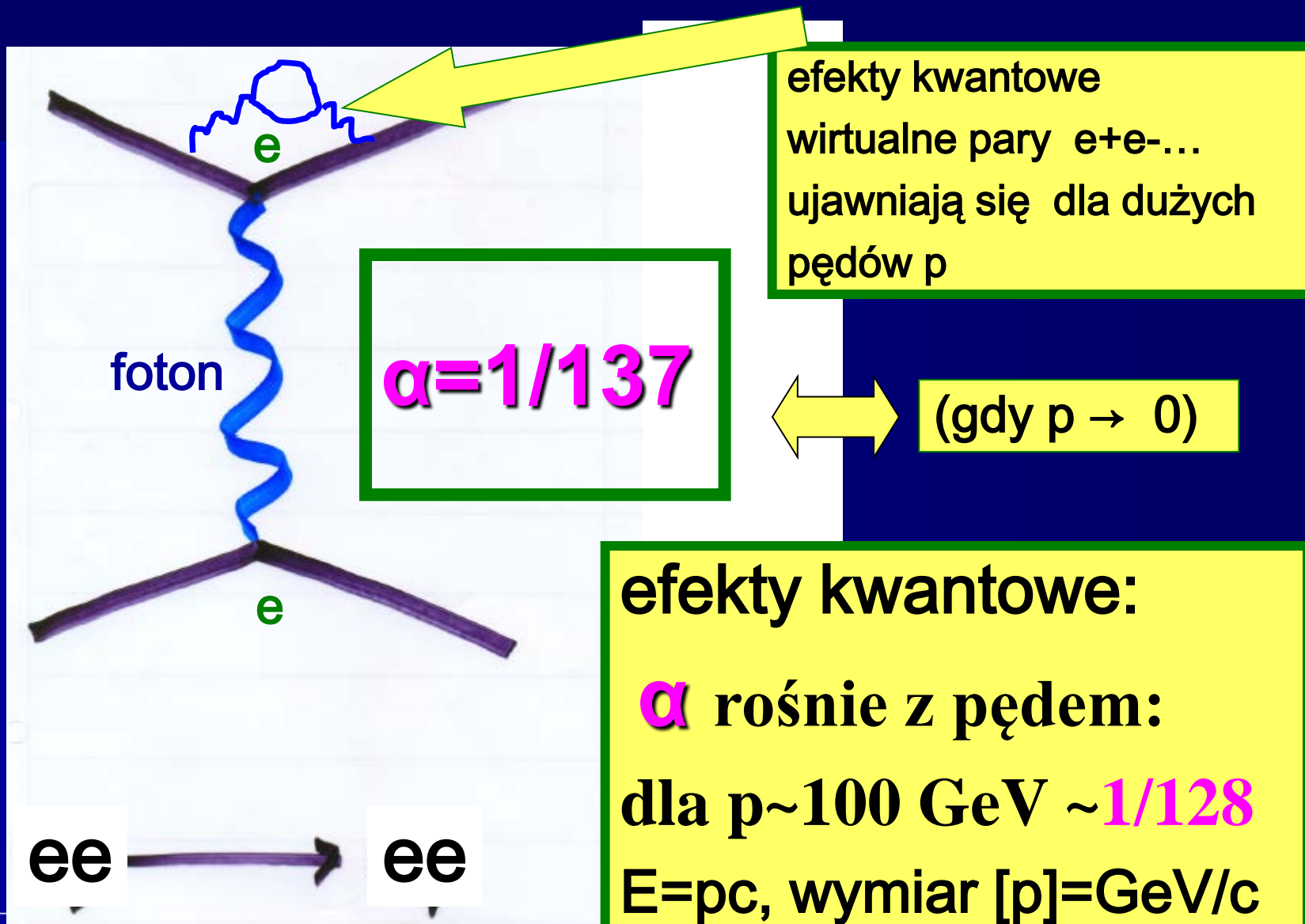
$\alpha$

# Diagramy Feynmana dla oddziaływań kolorowych

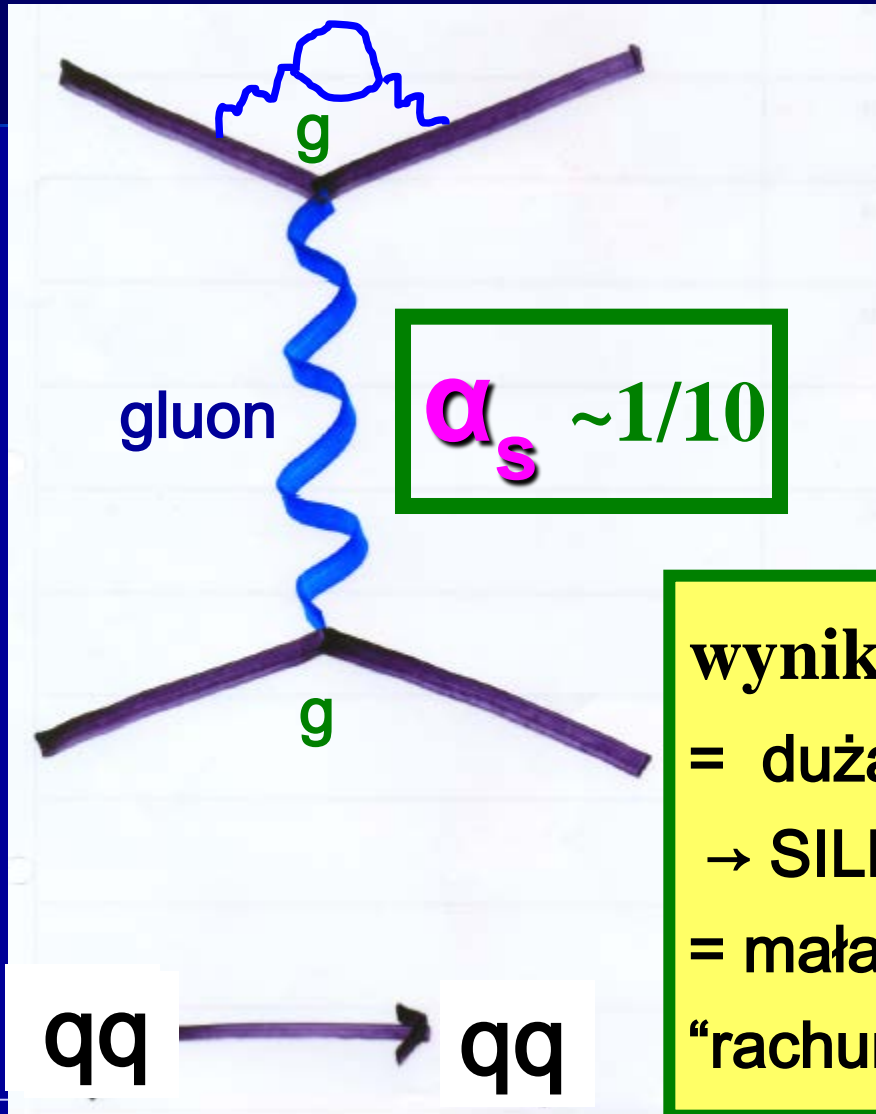


$\alpha_s$

# 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:  $\alpha_s$  maleje z  $p$  !  
= duża dla małych pędów  
→ SILNE ODDZIAŁYWANIA!  
= mała dla dużych pędów  
“rachunek zaburzeń QCD”

# „Biegnąca” stała sprzężenia (dane 2008)

$\alpha_s$

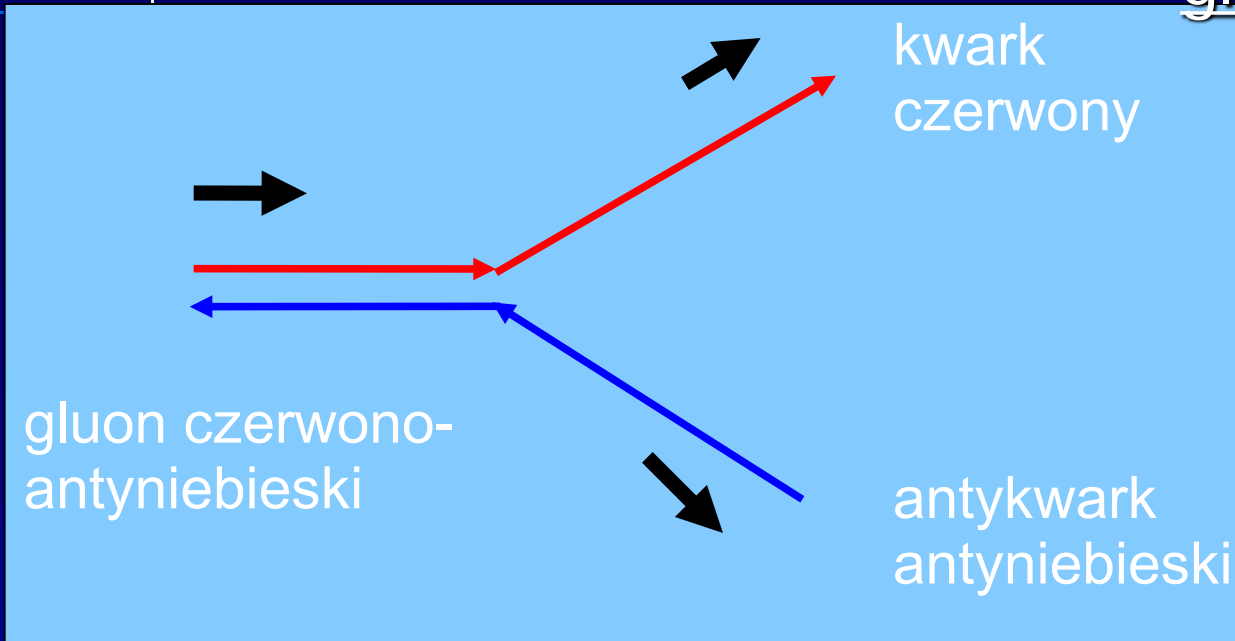


na tej osi pęd (GeV)


# Oddziaływania kolorowe

Przykład elementarnego aktu oddziaływania

gluonu z kwarkami



gluon zwykle oznaczamy linią typu sprężynka



← tu 'śledzimy' kolor

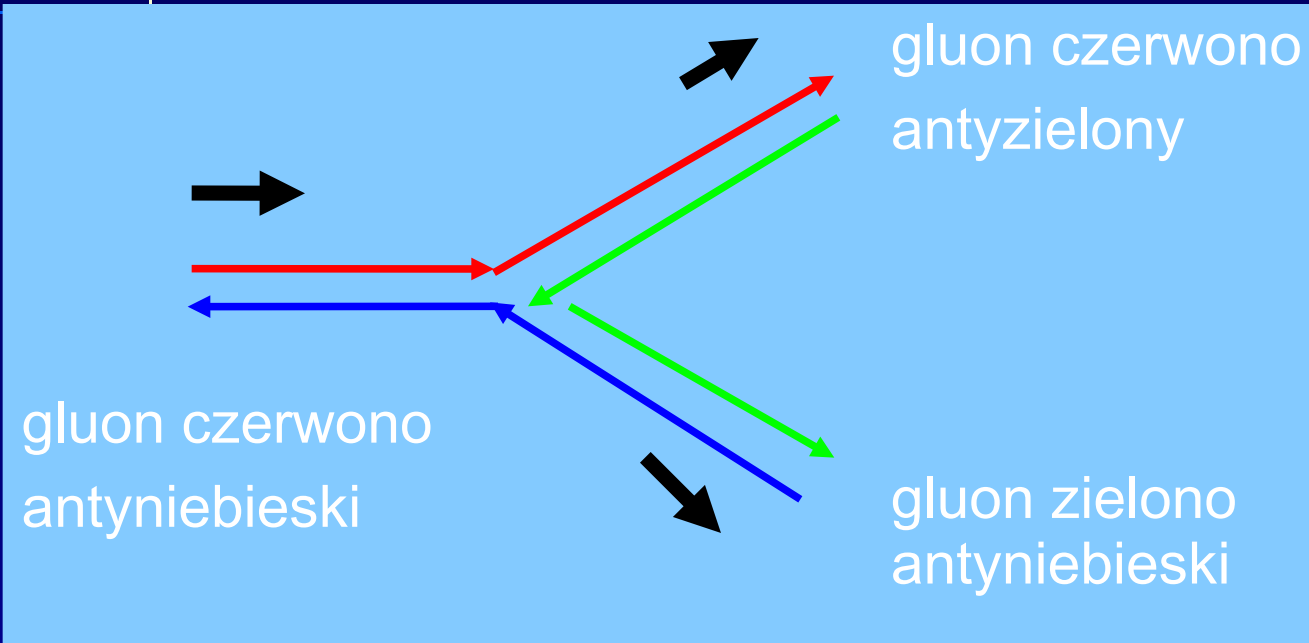
- kolorowe linie ciągłe - przepływ ładunku kolorowego (zachowanie koloru)
- czarne strzałki – kierunek pędów cząstek (zachowanie pędu)



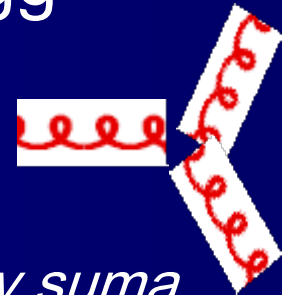
# Oddziaływania kolorowe

Przykład elementarnego aktu oddziaływania

gluonów ze sobą



ggg



*gdy suma  
po kolorach*

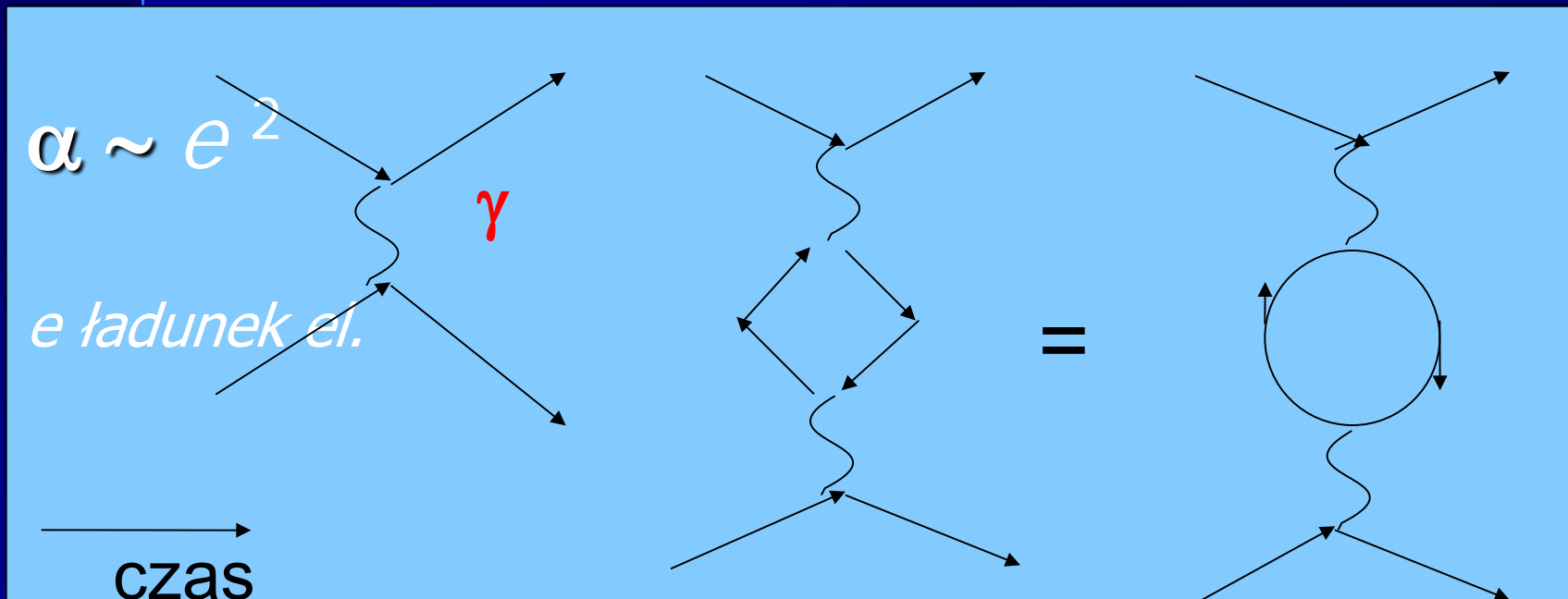
*są również  
sprężenia  
ggg*

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

# Biegająca stała sprzężenia $\alpha$

Pomiar stałej  $\alpha$  w zderzeniu dwóch elektronów

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



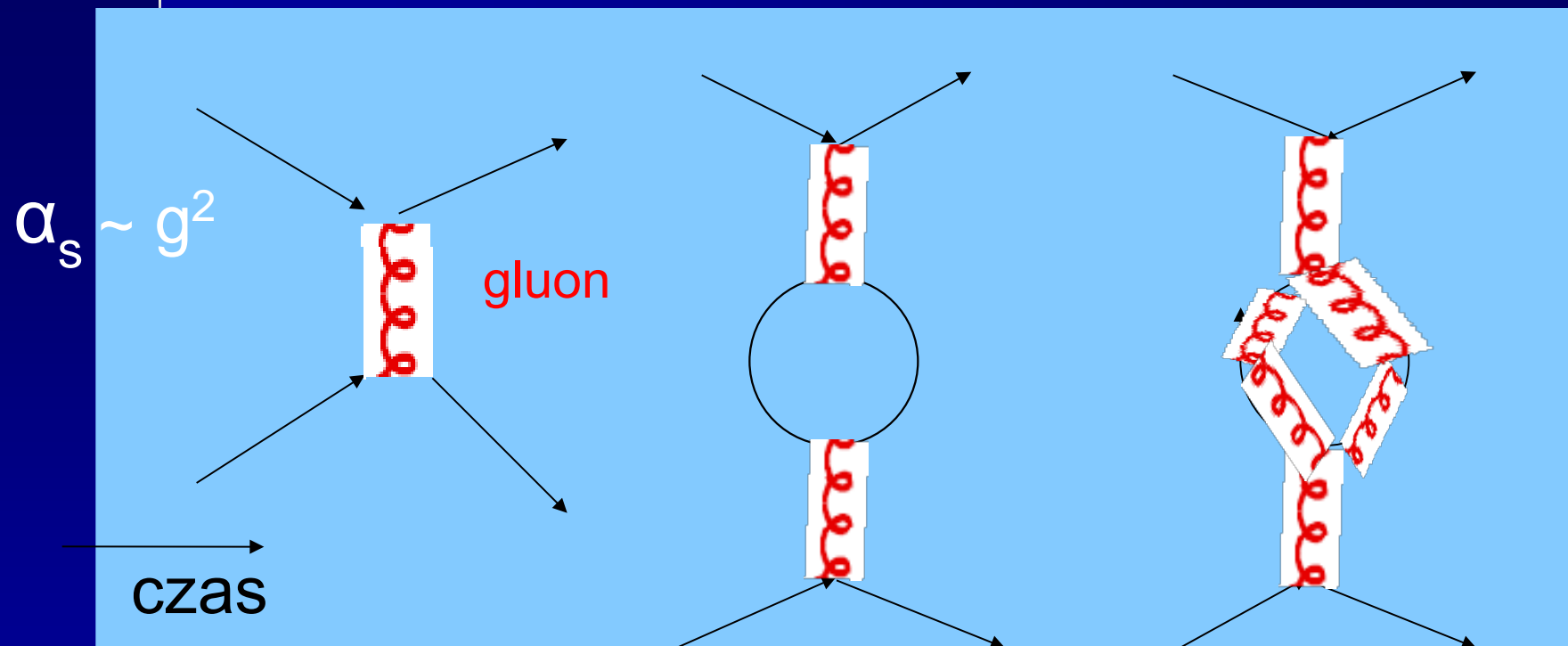
Prawdopodobieństwo tego procesu proporcjonalne do

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

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

# Biegająca stała sprzężenia $\alpha_s$

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  $\alpha_s$ ). Tu dodatkowo pętla gluonowa, która ma **przeciwny** znak  $\rightarrow$  i  $\alpha_s$  maleje ze wzrostem pędu !

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

Ze wzrostem energii: oddz. silne słabną

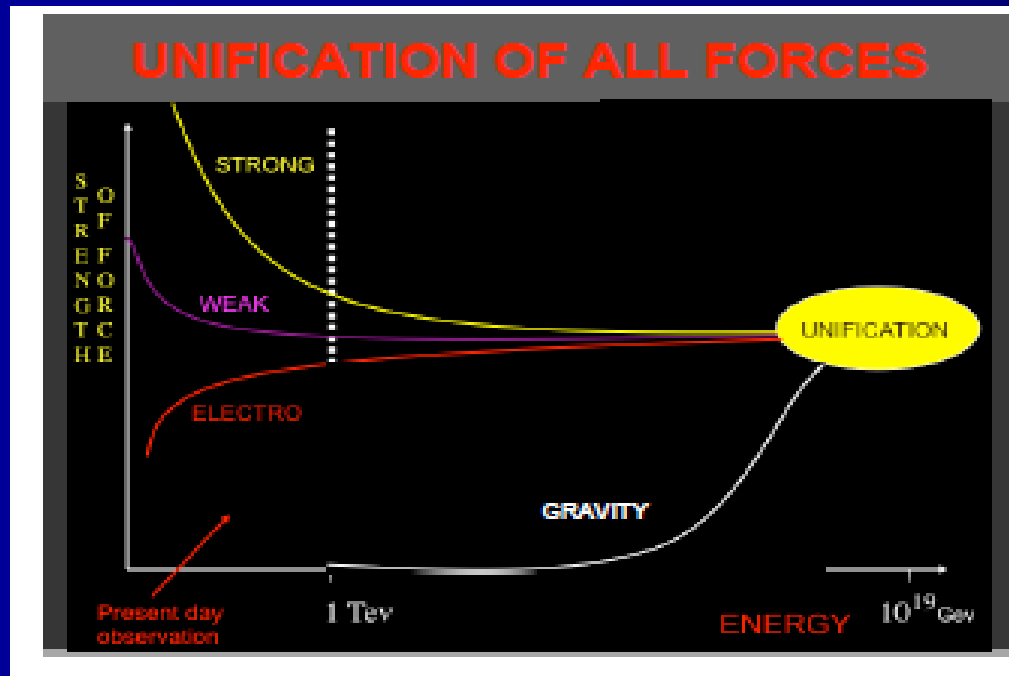
oddz. słabe słabną

oddz. el-mag wzmacniają się

$\alpha_s$

$\alpha_w$

$\alpha_{el}$



*Na osi poziomej - energia*

D. Gross,  
Photon 2005

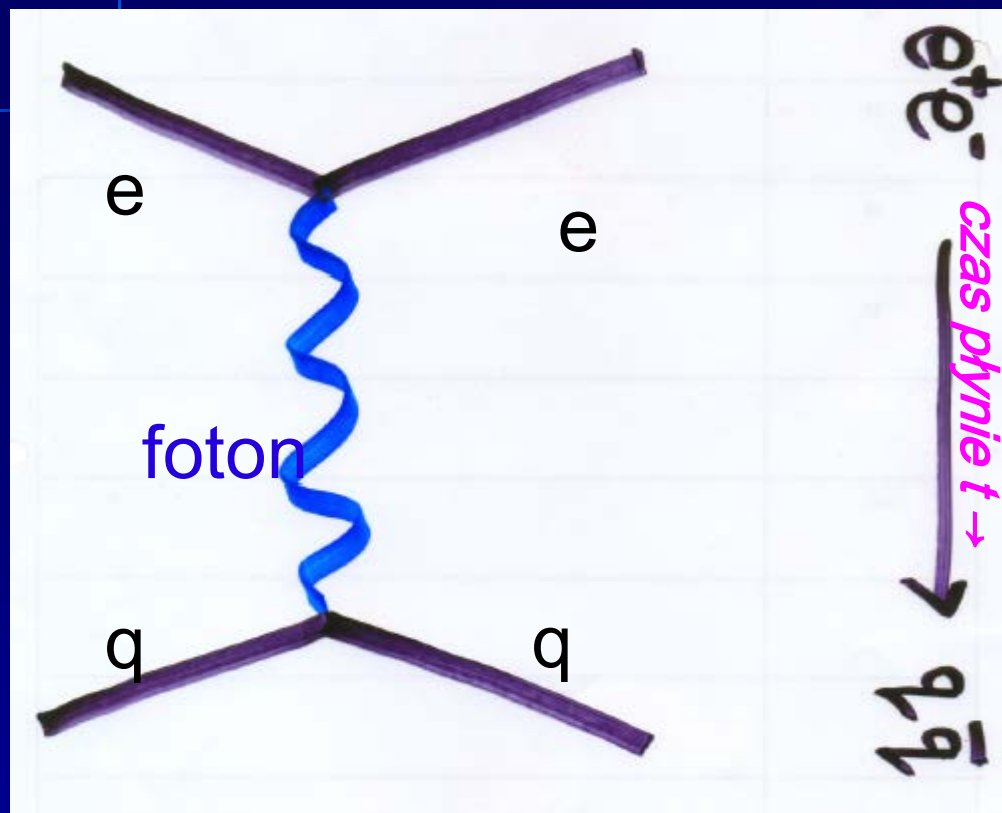
# Biegące stałe sprzężenia

## - 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)

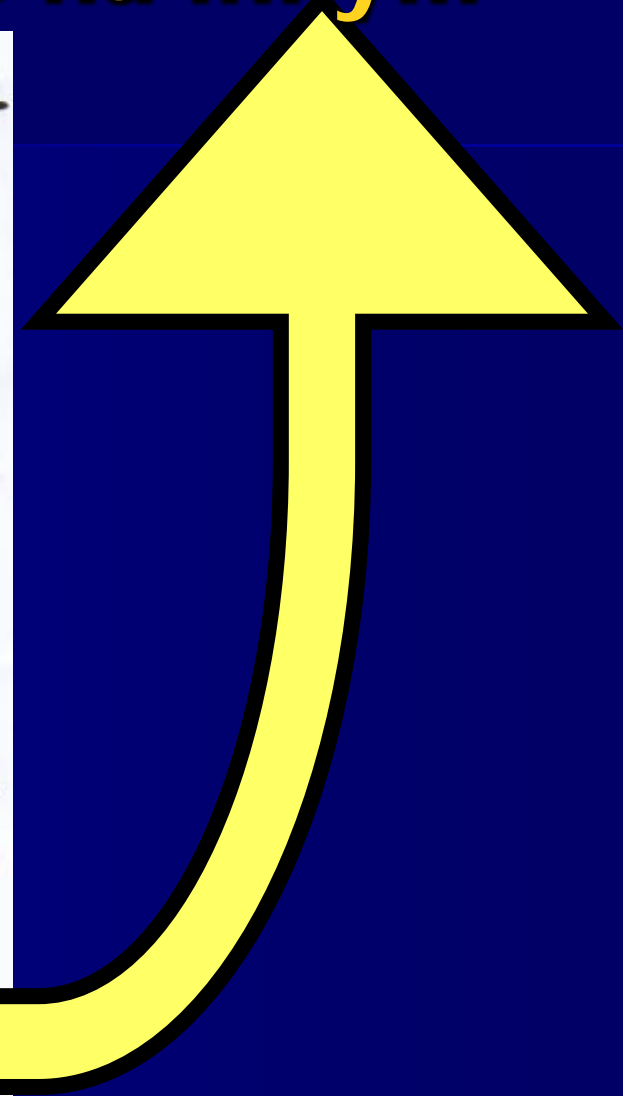
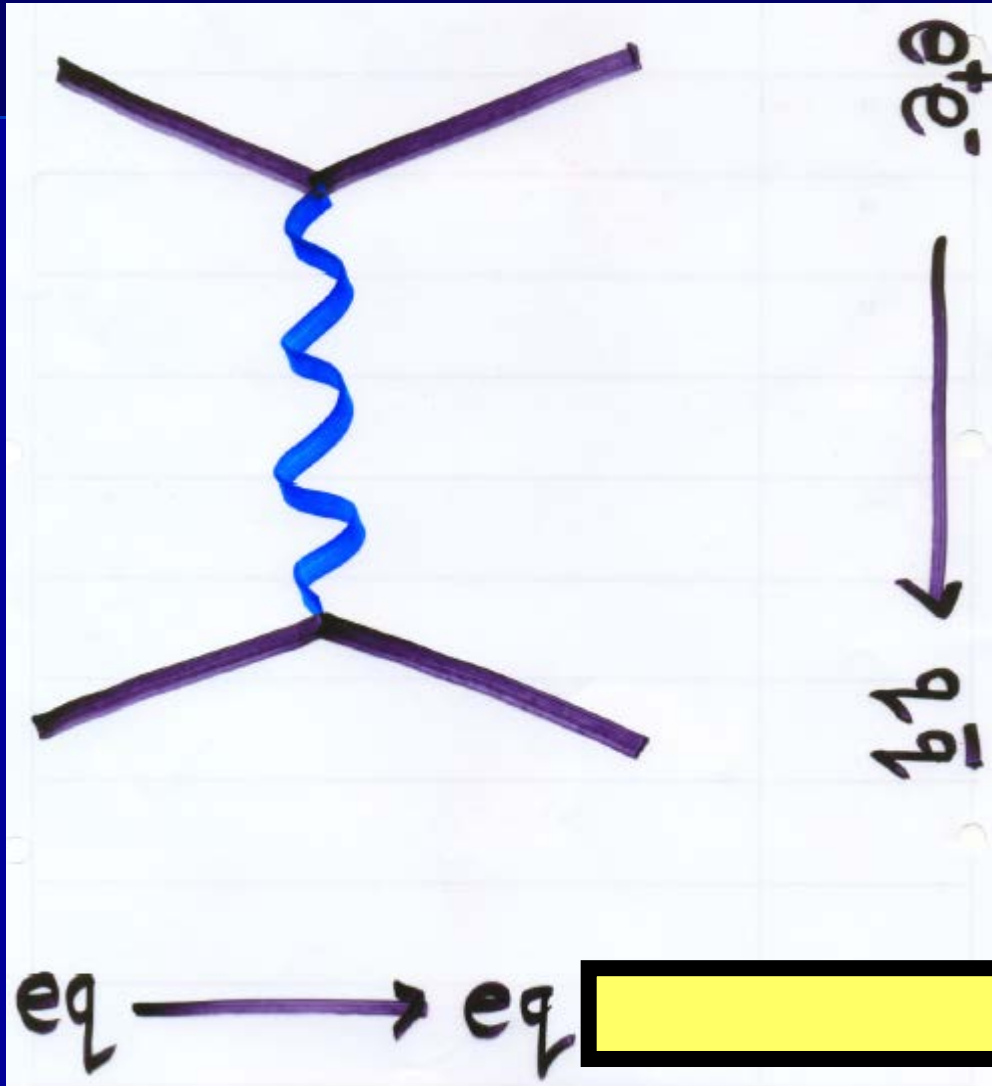
czas płynie t ->

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

## Procesy skrzyżowane

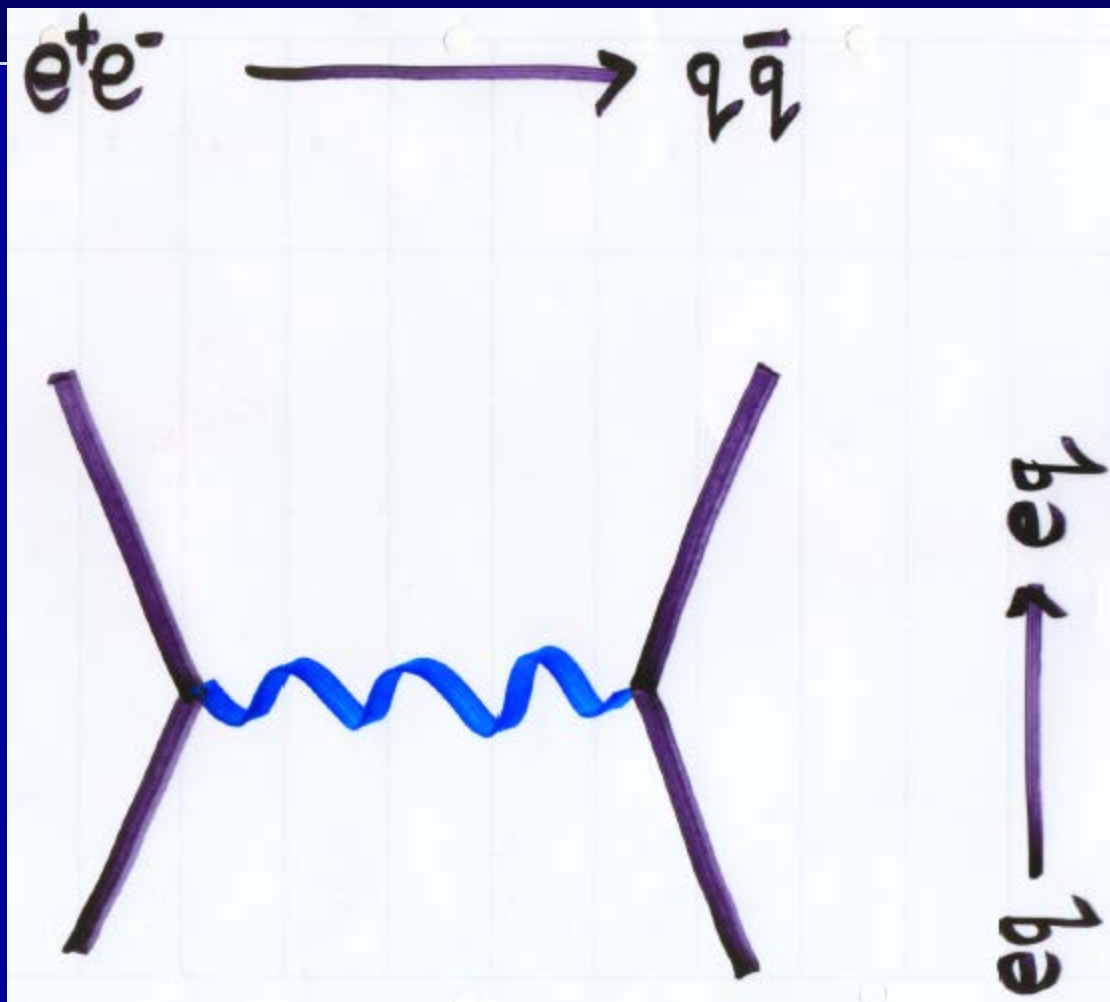
pozyton początkowy  $\leftrightarrow$  elektron końcowy  
a anty-q końcowe  $\leftrightarrow$  q początkowe

**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 7

- 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.  $1 \text{ GeV}$ ? Dla jakiego pędu  $\alpha_s$  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:  $u d \rightarrow u d$
- Co powoduje biegnięcie stałych sprzężenia? Dlaczego stała struktury subtelnej nie maleje, a stała sprzężenia dla sił kolorowych maleje ze wzrostem energii?
- W zderzenie kwarku niebieskiego i antykwarku antyczerwonego produkowany jest gluon o jakim kolorze?