

Oddziaływania silne 14.V.2008

Kwantowa chromodynamika (QCD)

- Oddziaływania fotonów z elektronami (QED)
rachunek zaburzeń, mała stała sprzężenia $\alpha=1/137$
- Oddziaływania bozonów W i Z z leptonami
i kwarkami – stała sprzężenia $\alpha_w=1/40$ - oddz.
słabe fundamentalne
- Oddziaływania silne fundamentalne (inaczej
kolorowe), sprzężenia gluonów z kwarkami z dużą
stałą sprzężenia $\alpha_s=1$
- Rachunek zaburzeń ? Nie wiemy jak obliczyć masę
protonu (pionu) jako stanu związanego kwarków,
ale wiele potrafimy dzięki *asymptotycznej
swobodzie*
- Uwięzienie, asymptotyczna swoboda i skalowanie

QCD= grupa symetrii cecghowania SU(3), 3 kolory i 8 naładowanych gluonów

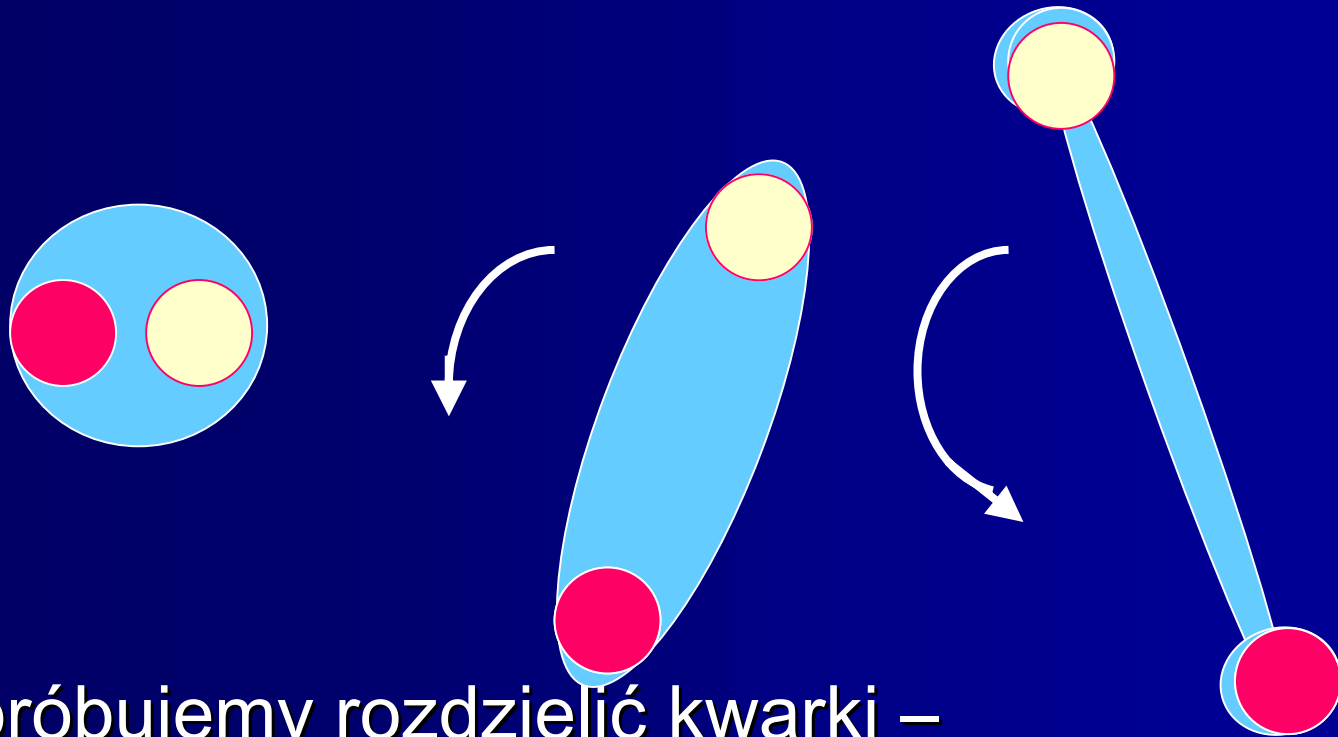
- Oddziaływanie fotonów γ w porównaniu z oddziaływaniem gluonów g : gluony są „naładowane” kolorowo i oddziałują ze sobą.
- Przykład: zał. że oprócz γ istnieje inny foton γ_c naładowany elektrycznie – oczywiście neutralny foton γ będzie oddziaływał z γ_c . Więc wokół jądra zwykłe pole elektryczne (pole Coulomba) związane z γ . Ale również powinno istnieć pole elektryczne związane z γ_c oraz oddziaływanie między nimi. To znacznie komplikują ten obraz – i tak jest z gluonami.
- Wokół każdego kwarku pole gluonowe typu Coulomba i oddz. między gluonami \rightarrow **uwięzienie**

Uwięzienie

- Foton bezmasowy – oddz. długo zasięgowe
- Gluony: też bezmasowe ale oddziaływanie krótko zasięgowe - nieskończona energia potrzebna aby to oddzielić części układu hadronowego.
- Fizyczna cząstka musi być kolorowo neutralna i nie ma długo zasięgowych sił kolorowych.
- Np. stan czerwony i anty-czerwony lub kombinacje kolorów: czerwony, zielony i niebieski zmieszane dają biały kolor światła
- Protony i neutrony – stany związane 3 kwarków o różnych kolorach, pole gluonowe wygaszone na odległościach dużych wzg. odl. między kwarkami
- Nie można usunąć jednego kwarku z protonu, bo powstałyby obiekty kolorowe → **uwięzienie**

Struna gluonowa

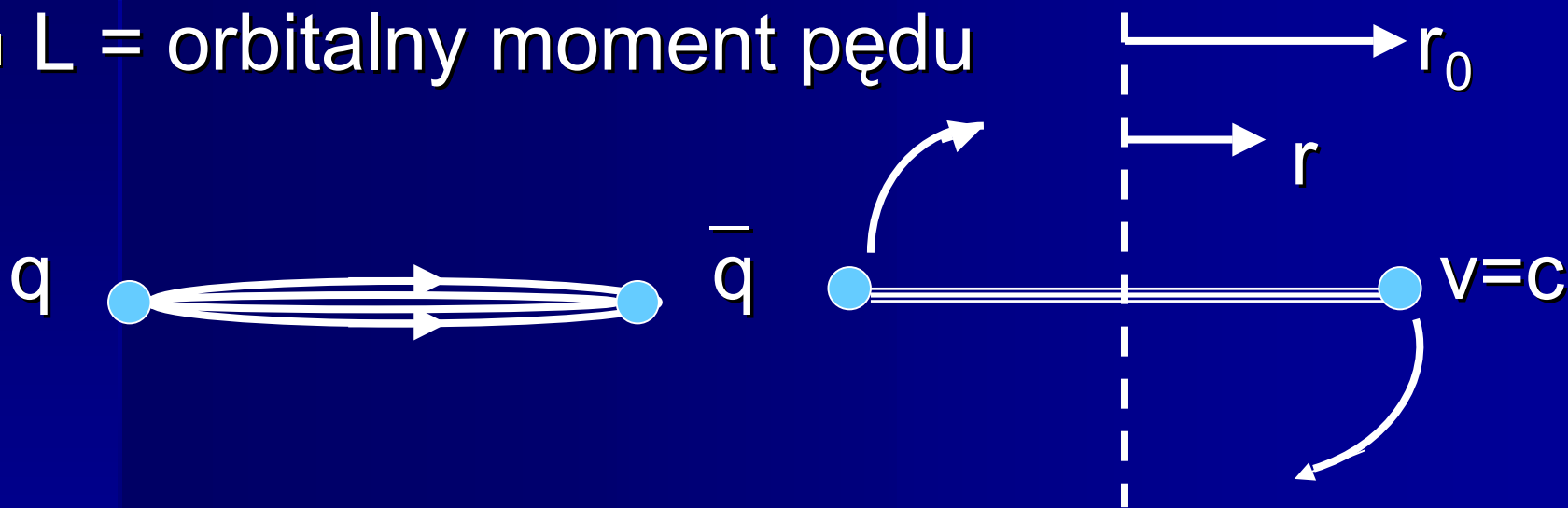
- Pole gluonowe wewnątrz hadronów – jak klej, guma



- Gdy próbujemy rozdzielić kwarki – struna gluonowa, mogą pojawić się też obroty kwarków wokół siebie-> stany wzbudzone, wyższe energie i spiny

Spin i masa cząstek – moment struny

- Związek liniowy $J = J_0 + \alpha' m^2$
- Całkowity moment pędu $J =$ orbitalny moment pędu + wewnętrzny moment pędu (spin)
- $L =$ orbitalny moment pędu



Pęd cząstki relatywistycznej: $p = mv / \sqrt{(1-v^2/c^2)}$

Model struny

- Gęstość energii na jednostkę długości struny wynosi k
- Na końcach dwa bezmasowe kwarki (q i \bar{q}) wirują z prędkością $v = c$
- Prędkość elementu na strunie w odł. r $v/c = r/r_0$
- Energia (masa) struny

$$E = mc^2 = 2s \int_0^{r_0} k \, dr / \sqrt{1 - v^2/c^2} = kr_0 \pi$$

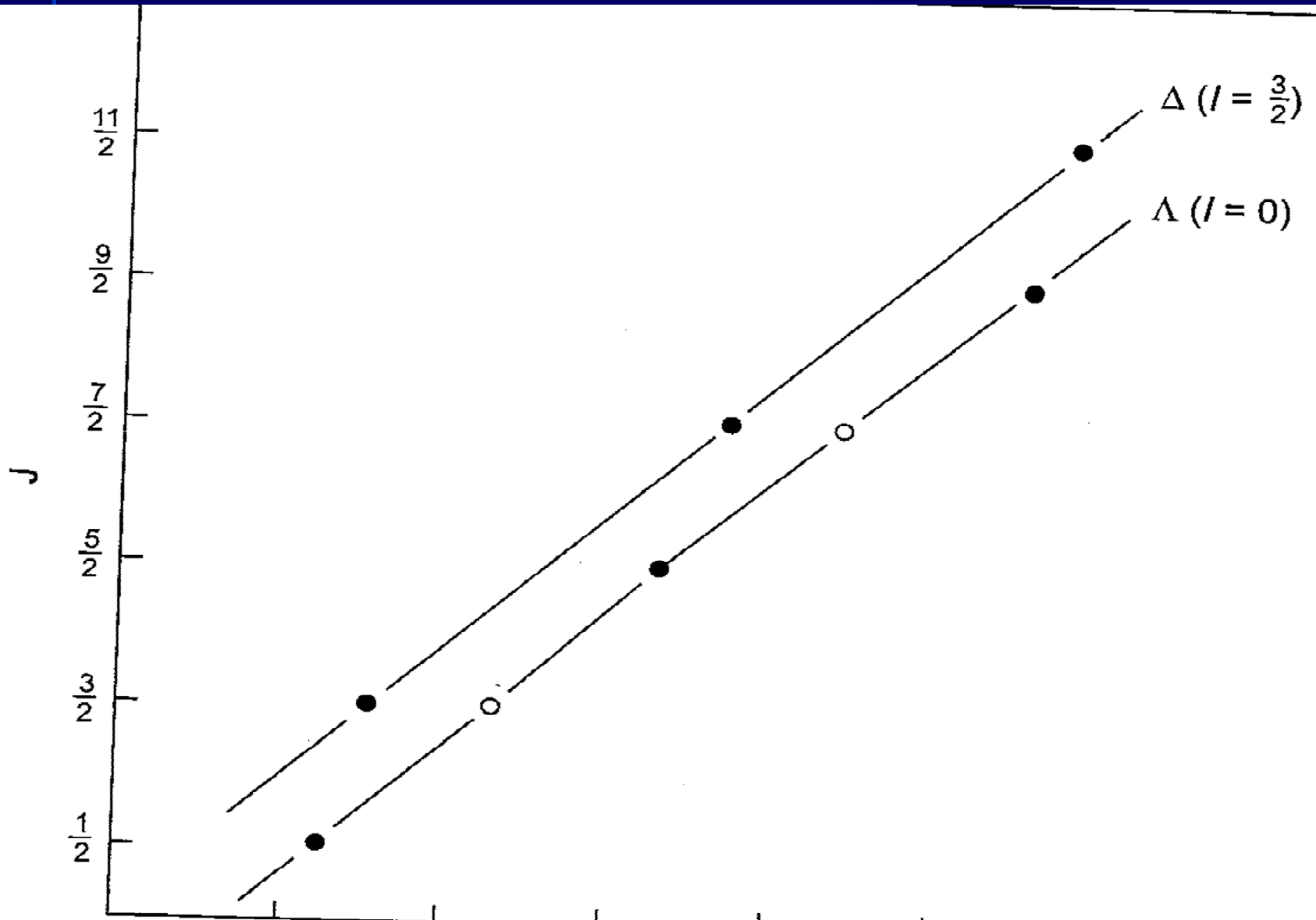
- A moment pędu

$$L = 2 \int_0^{r_0} c^2 s \, r \, v \, dr / \sqrt{1 - v^2/c^2} = kr_0^2 \pi / 2 \sim c$$

- Zależność $J = \alpha' E^2 + \text{const}$ $\alpha' = 1/2\pi k \sim c = 0.93 \text{ GeV}^{-2}$
 $k = 0.87 \text{ GeV fm}^{-1}$

- Zgadza się, gdyż masa protonu $\sim 1 \text{ GeV}/c^2$,
promień 1 fm , gęstość $k = 1 \text{ GeV fm}^{-1}$

Trajektorie Reggego $J=J_0+\alpha' m^2(\text{GeV}^2)$

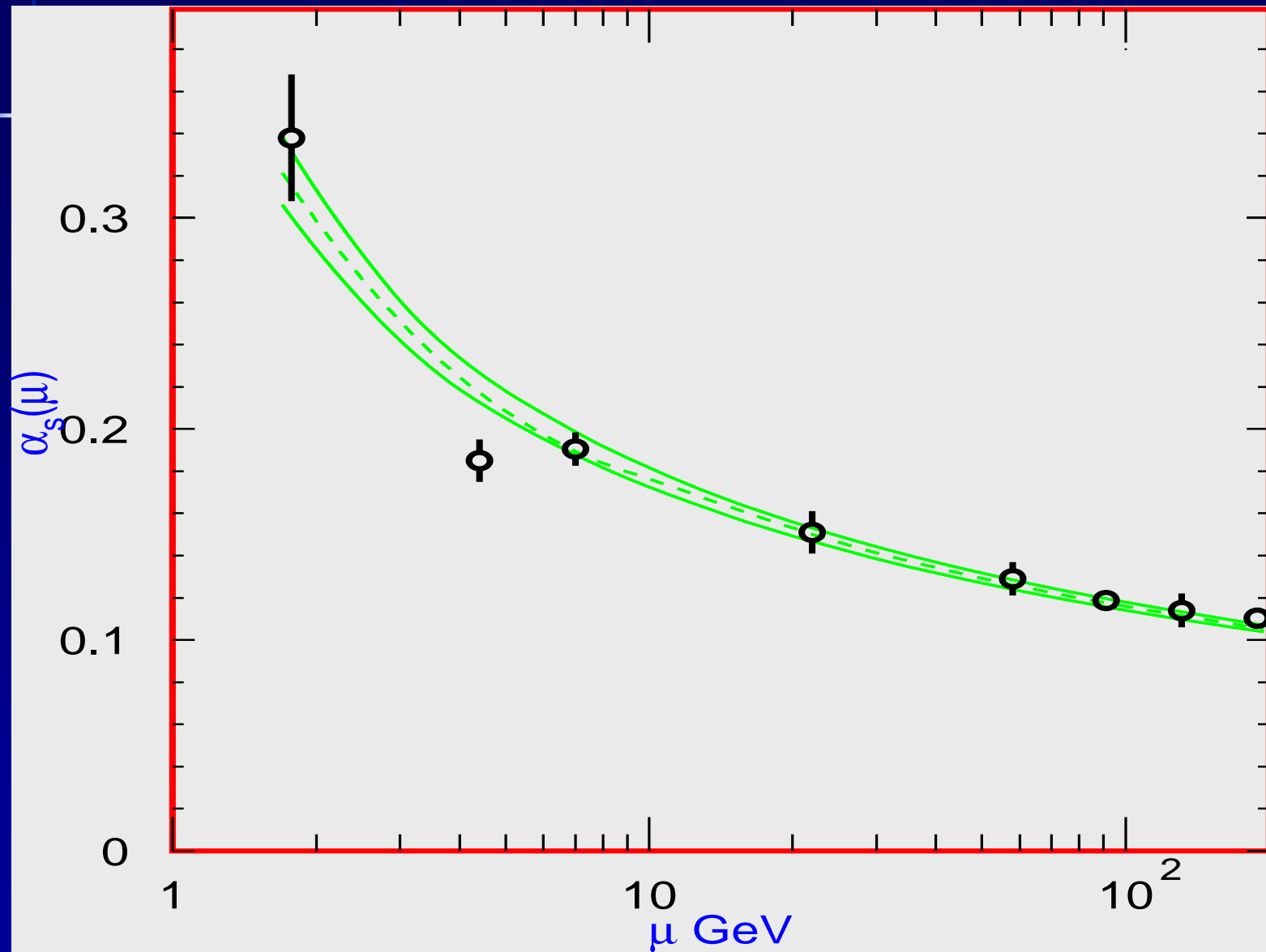


Biegająca stała sprzężenia

- Poprawki wyższych rzędów powodują że efektywnie stałe sprzężenia „biegną” tzn. są zależne od skali energii procesu
- QED - tu rośnie α z energią
 $1/137 \rightarrow 1/128$ dla skali M_Z
- QCD - maleje ze wzrostem energii (przekazu pędu) \rightarrow **asymptotyczna swoboda**
- EW (SU(2)) - również maleje z energią
- Skąd różnica między QED a QCD?
Naładowane gluony , samoodziaływanie (nieabelowa grupa symetrii)

Politzer, Gross, Wilczek'74 (Nobel 2004)

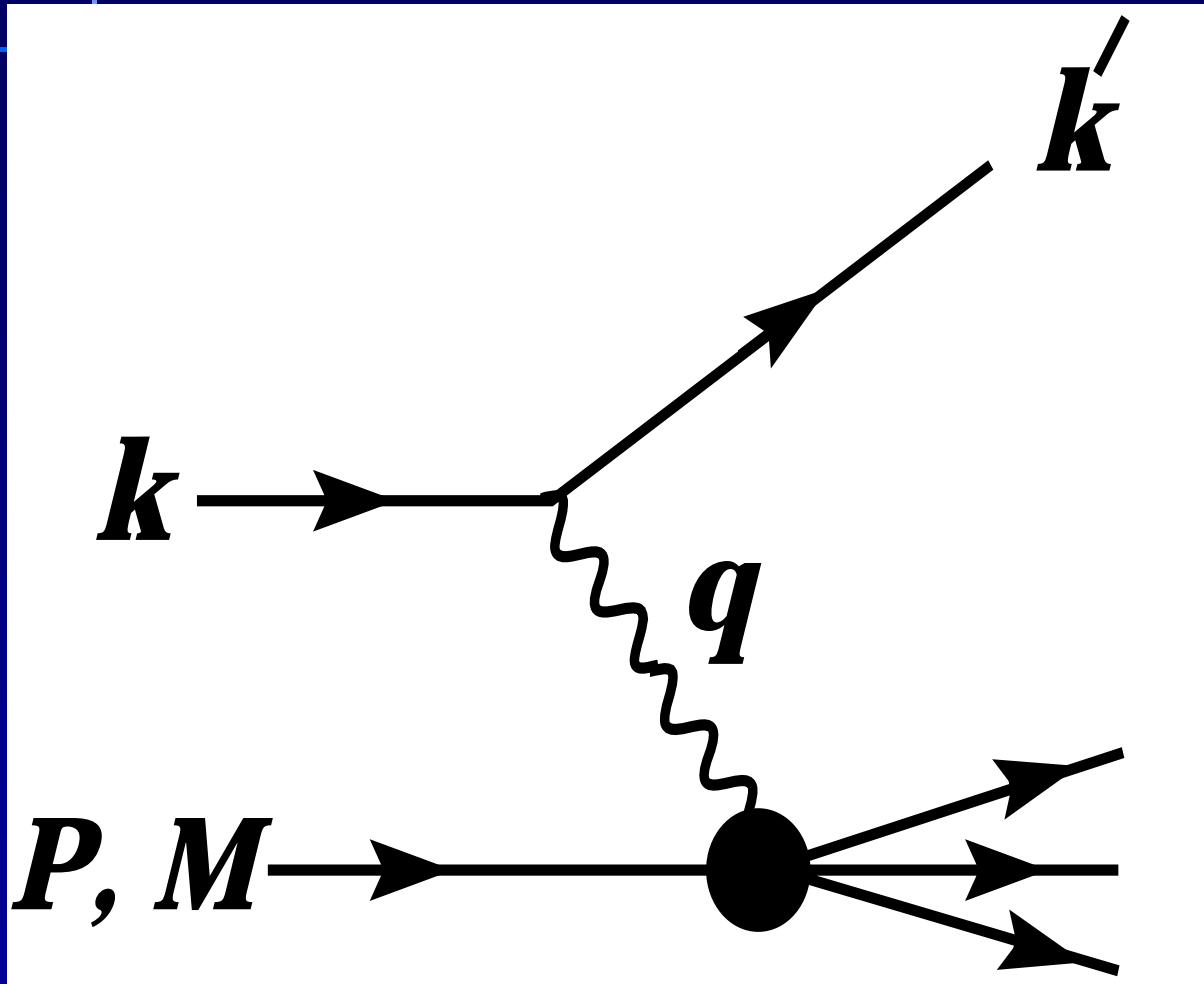
Biegająca stała sprzężenia α_s



α_s a liczba fermionów n_f

$$\alpha_s(\mu_2^2) = \frac{\alpha_s(\mu_1^2)}{1 + \frac{\alpha_s(\mu_1^2)}{12\pi} (33 - 2n_f) \log(\mu_2^2 / \mu_1^2)}$$

Rozpraszanie głęboko nieelastyczne $ep \rightarrow e \text{ hadrony}$ (a'la Rutherford)



Sonda
fotonowa

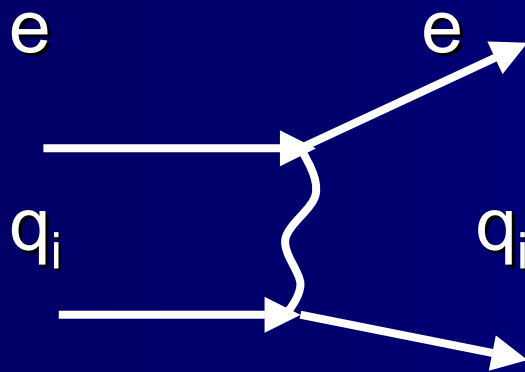
wirtualność
 $|q^2| = Q^2$

$Q^2 \gg M_p^2$

Duży przekaz
pędu do
protonu

Warunki doświadczalne: foton robi zdjęcie pewnej konfiguracji składników w protonie

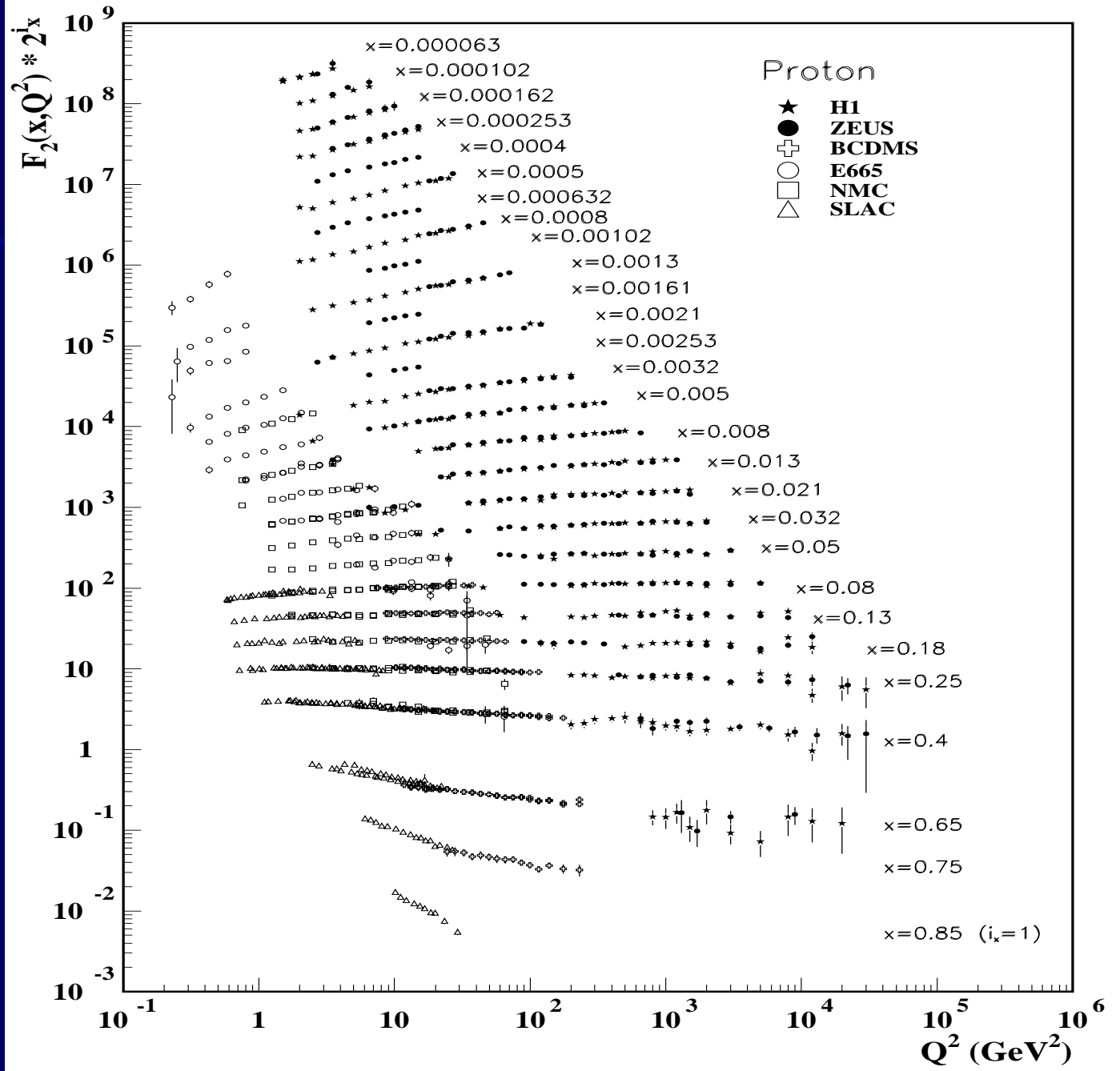
- Foton oddziałuje z prawie swobodnym kwarkiem w protonem (jak $ee \rightarrow ee$)



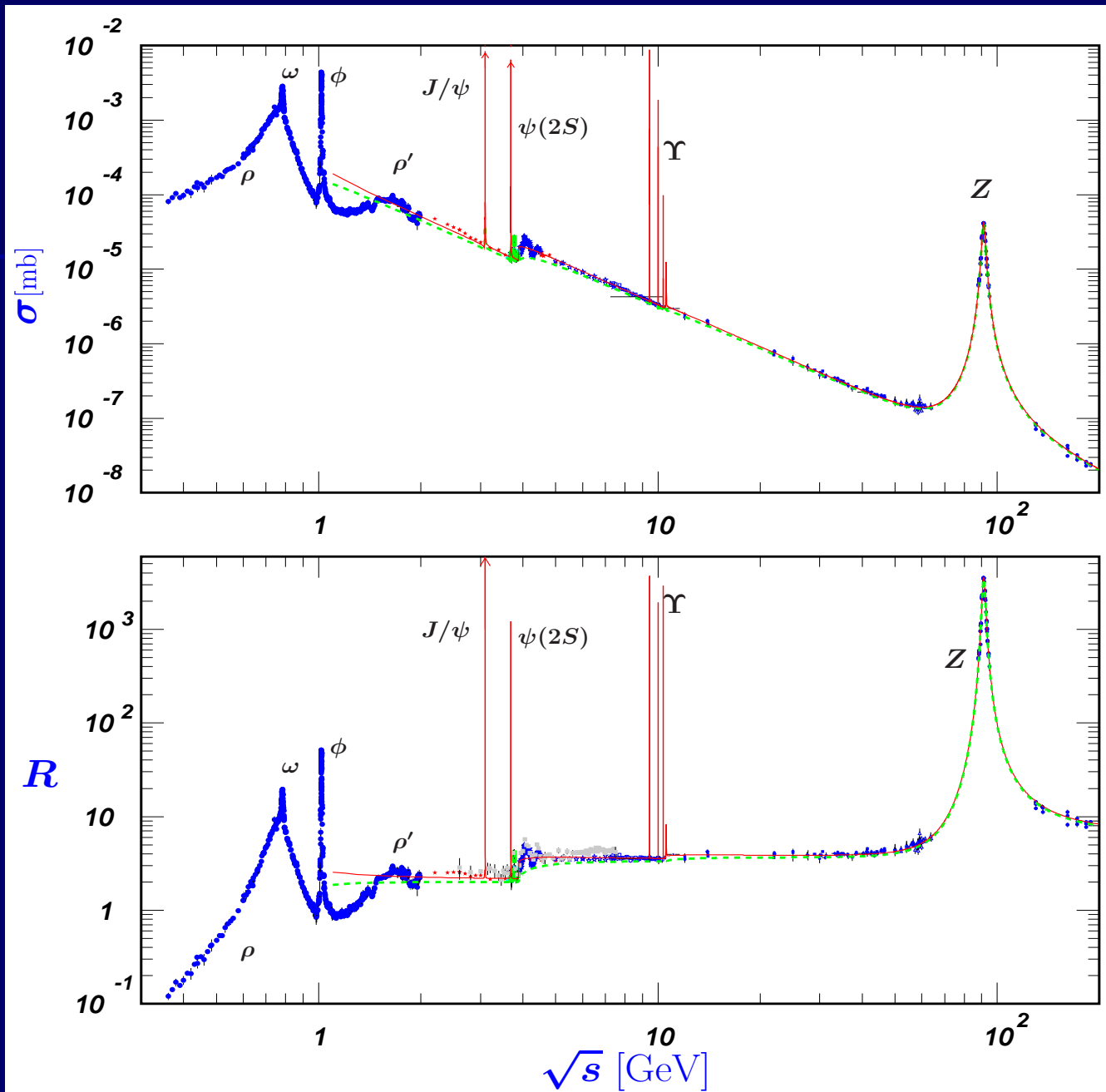
suma po różnych q_i

- Funkcja struktury F: suma wkładów $e_{q_i}^2 q_i(x, Q^2)$
 $x_{Bj} = Q^2/(2 p_p q) = x$ część pędu protonu niesiona przez kwark q (**parton**) Feynman
- Skalowanie F nie zależy od Q^2 Bjorken 1967

F_2

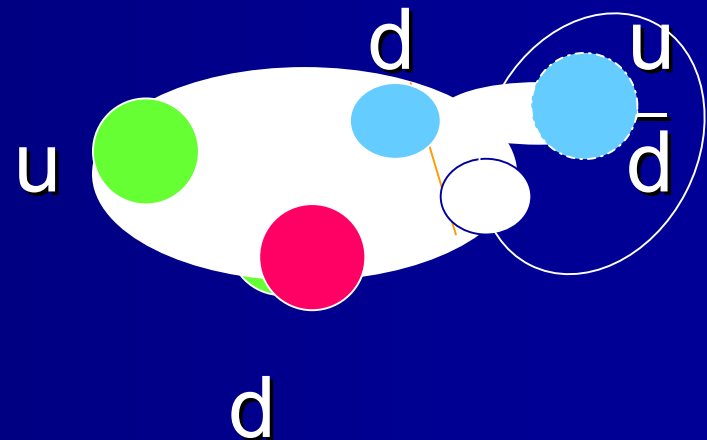
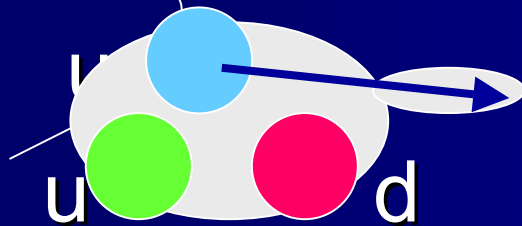


$e^+e^- \rightarrow$
hadrony



Produkcja hadronów $eq \rightarrow eq$

- Wybijanie kwarku i kreacja pary kwark-antykwar~~k~~ ze struny gluonowej
- jak $p(uud) \rightarrow n(ddd) \pi^+$



Dżety (strugi) hadronowe

- Po wybiciu kwarku w procesie który nazywamy *twardym*, tzn pędy poprzeczne > 1 GeV (rach. zaburzeń)
- następuje proces fragmentacji kwarku w kwarki i gluony – *proces półtwardy*
(rachunek zaburzeń, ale suma wszystkich rzędów w α_s)
- a następnie proces *hadronizacji*
(mała skala energ. – *procesy miękkie*, modelowanie, efekty nieperturbacyjne)
- Pamięć po wybitym kwarku – *dżety hadronowe*

Czy są dżety hadronowe pochodzące z gluonu?

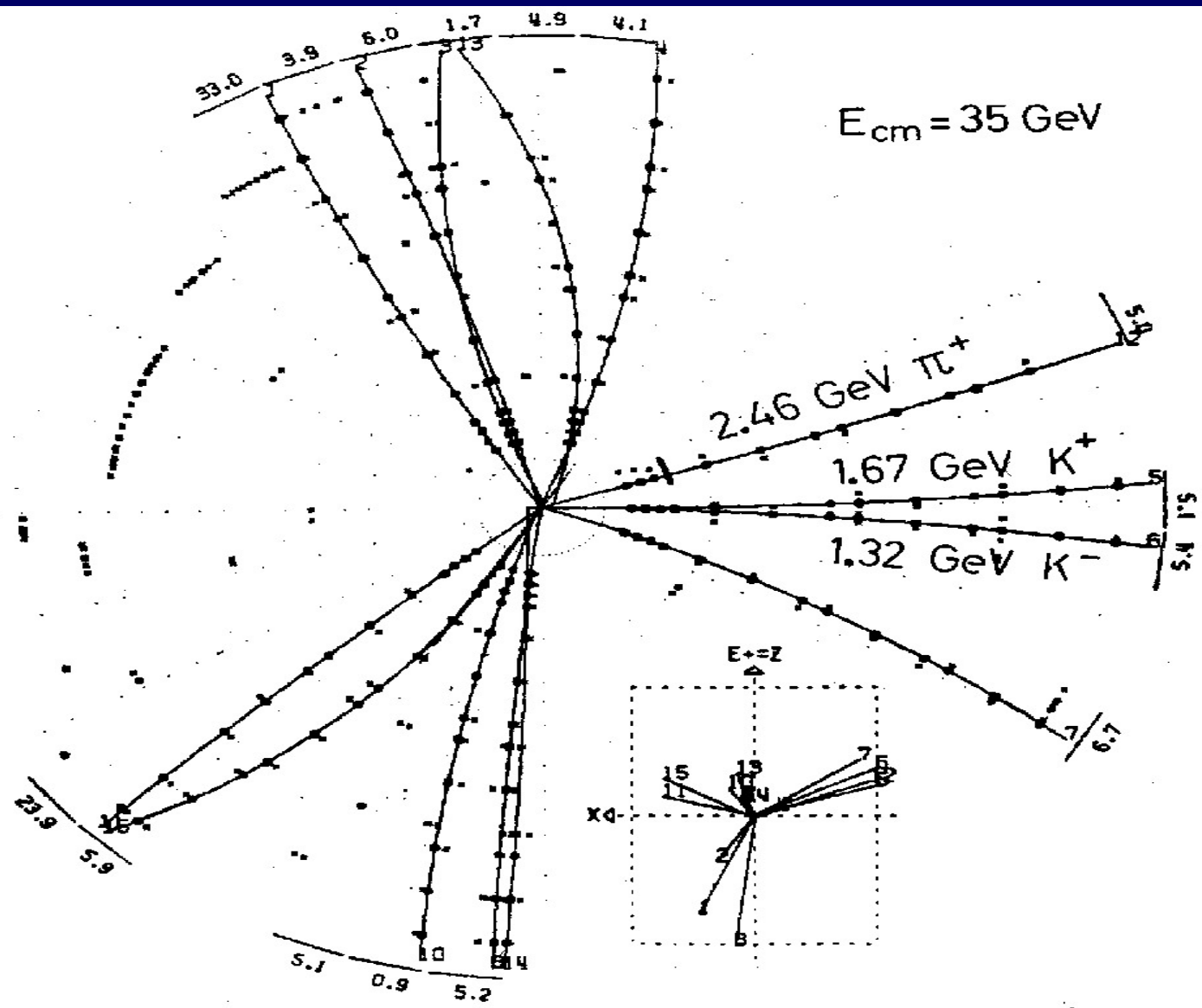
- Tak, czekamy na Nobla

$$e^+e^- \rightarrow q \bar{q}$$

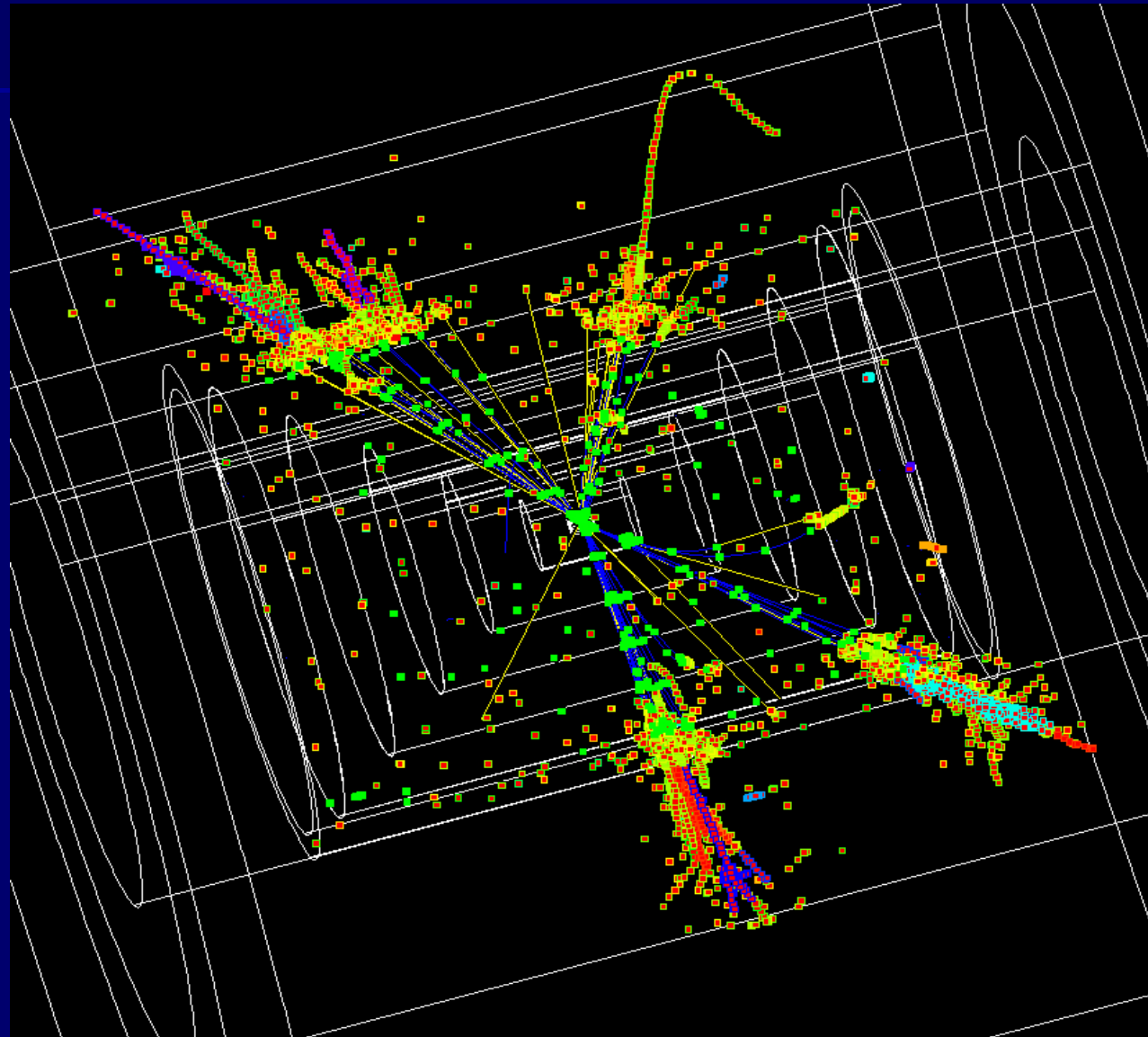
$$e^+e^- \rightarrow q \bar{q} g$$

przypadki 3 dżetowe

- A pioneering discovery in 1979. At the PETRA storage ring, the "gluon" was directly observed for the first time. The gluon is the carrier particle of the strong force, which binds the fundamental constituents of all matter - the quarks - together and is considered one of the four basic forces of nature. For their discovery of the gluon in 1979, four DESY scientists received the Particle Physics Prize of the European Physical Society (EPS), considered the "European Nobel Prize in Physics", in 1995. (Source: DESY Hamburg)



A simulation of what the decay of a Z + Higgs to four jets would look like in an ILC detector



Unifikacja sił

