

Struktura protonu

Elementy fizyki cząstek elementarnych

Wykład III

- kinematyka rozpraszania
- doświadczenie Rutherforda
- rozpraszanie nieelastyczne
- partony i kwarki
- struktura protonu

Kinematyka

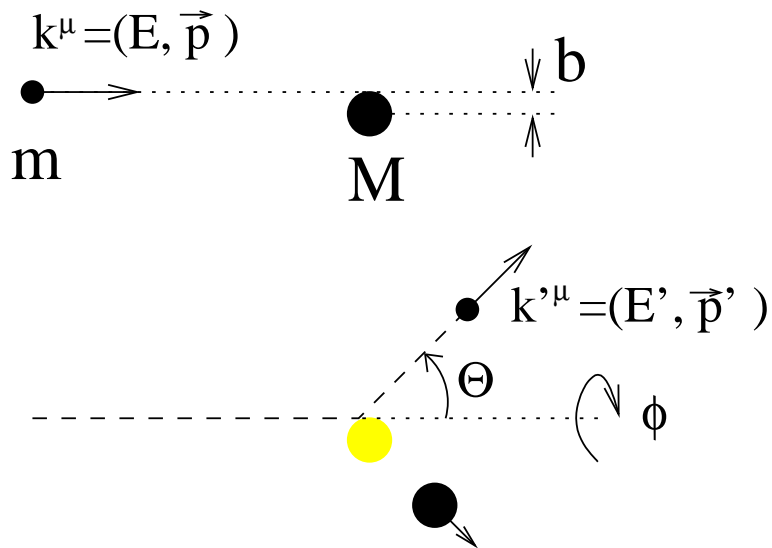
Rozpraszanie elastyczne

“Klasyczne” zderzenie sprężyste:

“sonda” (“pocisk”) o masie m

i energii E rozprasza się na

“tarczy” o masie M :



Zagadnienie to możemy rozwiązać w oparciu o zasady zachowania energii i pędu.

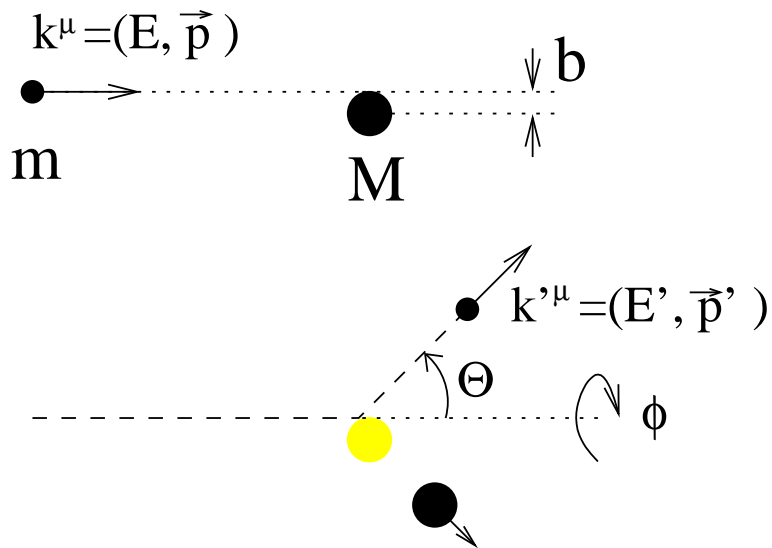
Jednak znajomość energii cząstki padającej **nie wystarcza** do wyznaczenia energii i pędów stanu końcowego.

Musimy wprowadzić jeden **dodatkowy parametr**, np. parametr zderzenia **b**

W przypadku zderzeń cząstek nie jesteśmy w stanie kontrolować **b** \Rightarrow wygodniej użyć jako parametru **kąta rozproszenia θ**

Kinematyka

Rozpraszanie elastyczne



Wprowadzamy nowe zmienne:

- przekaz energii: $\nu = E - E'$
- przekaz czteropędu: $q^\mu = k^\mu - k'^\mu$

Z zasad zachowanie energii i pędu \Rightarrow

$$Q^2 \equiv -q^2 = 2M\nu$$

(niezmiennik transformacji Lorentza)

Energia rozproszonego pocisku i przekaz czteropędu wyrażają się przez kąt rozproszenia θ .

W granicy $E \gg m$:

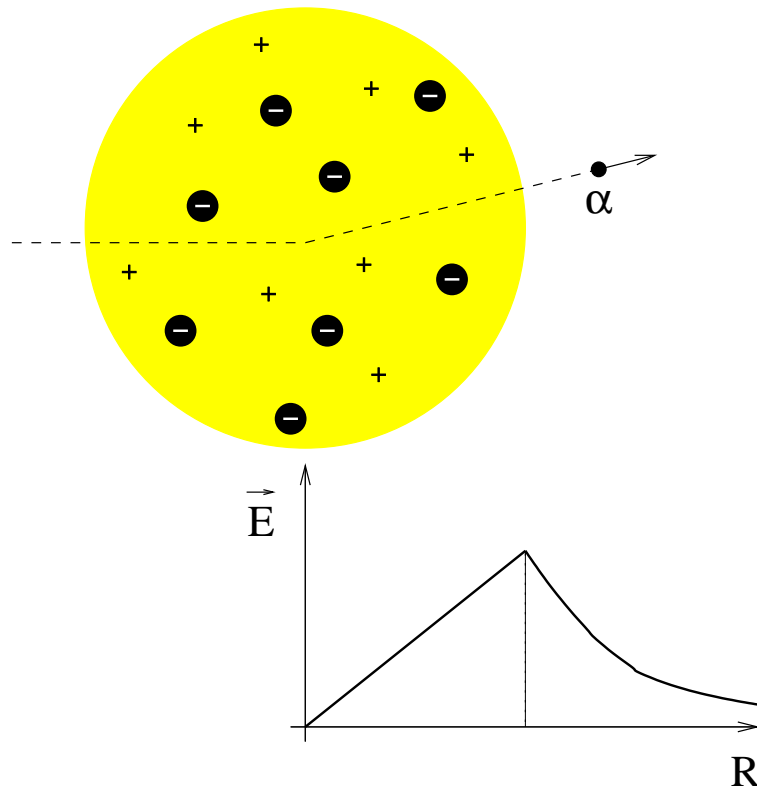
$$E' = \frac{E}{1 + \frac{E}{M}(1 - \cos \theta)} \leq E$$

$$Q^2 = 2EE'(1 - \cos \theta) = 4EE' \sin^2 \frac{\theta}{2}$$

Doświadczenie Rutherforda

Model Thomson

Po odkryciu elektronu (1897), J.J.Thomson zaproponował model atomu w postaci “ciastka z rodzynekami”.



Cała objętość atomu była jednorodnie naładowana dodatnio (“ciastko”), a wewnątrz “pływały” elektrony (“rodzynki”).

Ponieważ ładunek był rozłożony równomiernie w dużej objętości, nie powinien silnie zakłócać ruchu przechodzący cząstek α .

Oczekujemy jedynie niewielkich odchyień toru...

Wpływ elektronów można zaniedbać ze względu na małą masę.

Doświadczenie Rutherforda

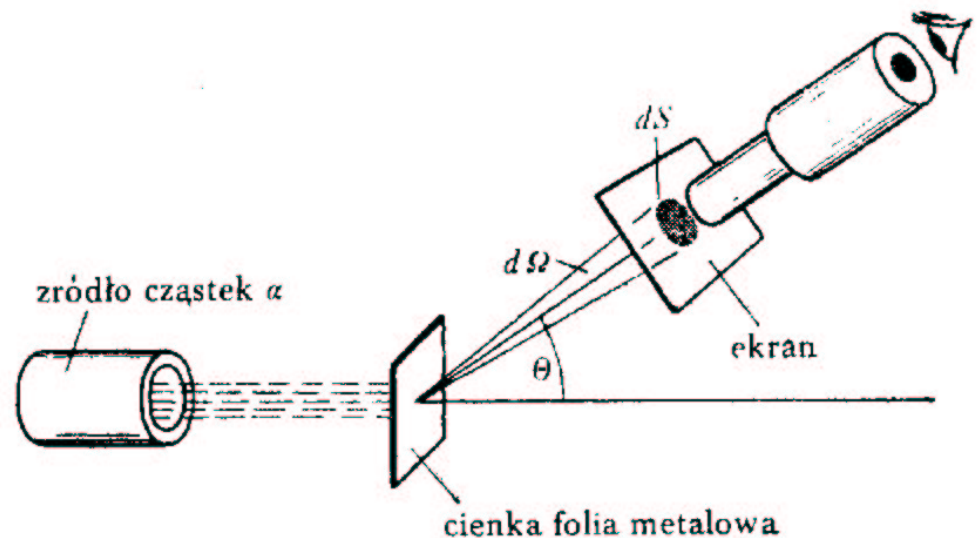
W modelu Thomsona można było oszacować maksymalny kąt rozproszenia cząstki α i był on mały $\theta^{max} \ll \pi$.

Odpowiada to sytuacji rozproszenia “pocisku” na dużo lżejszej “tarczy”.

Masa przypadająca na jednostkę “rozmytego” ładunku atomu wynosiła ok. $\frac{1}{8}$ masy cząstki α .

Doświadczenie Rutherforda

Rozpraszanie cząstek α na cienkiej złotej folii



Obserwowano błyski wywoływane przez padające cząstki na ekranie scyntylacyjnym

Doświadczenie Rutherforda

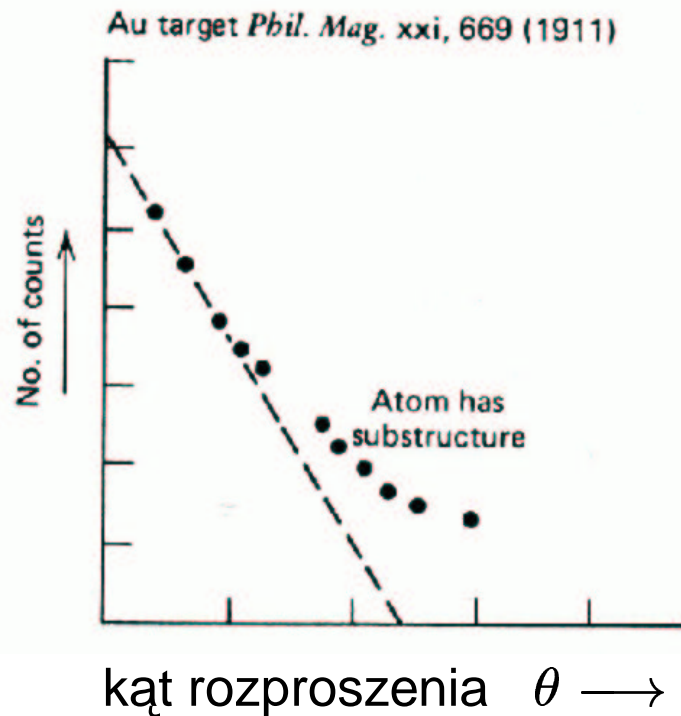
Wyniki pomiarów

Przeprowadzonych przez
H.Geigera i E.Marsdena:

Zaobserwowano rozproszenia cząstek α pod bardzo dużymi kątami, $\theta \gg \theta_{Th}^{max}$, czego nie można było wyjaśnić w modelu Thomsona

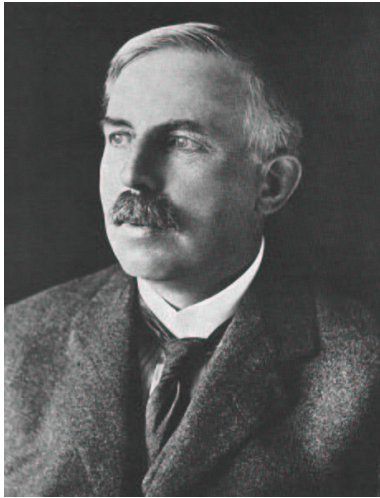
“To było tak jakbyście wystrzelili piętnastocalowy pocisk w kierunku kawałka bibułki, a on odbił się i was uderzył.”

E. Rutherford



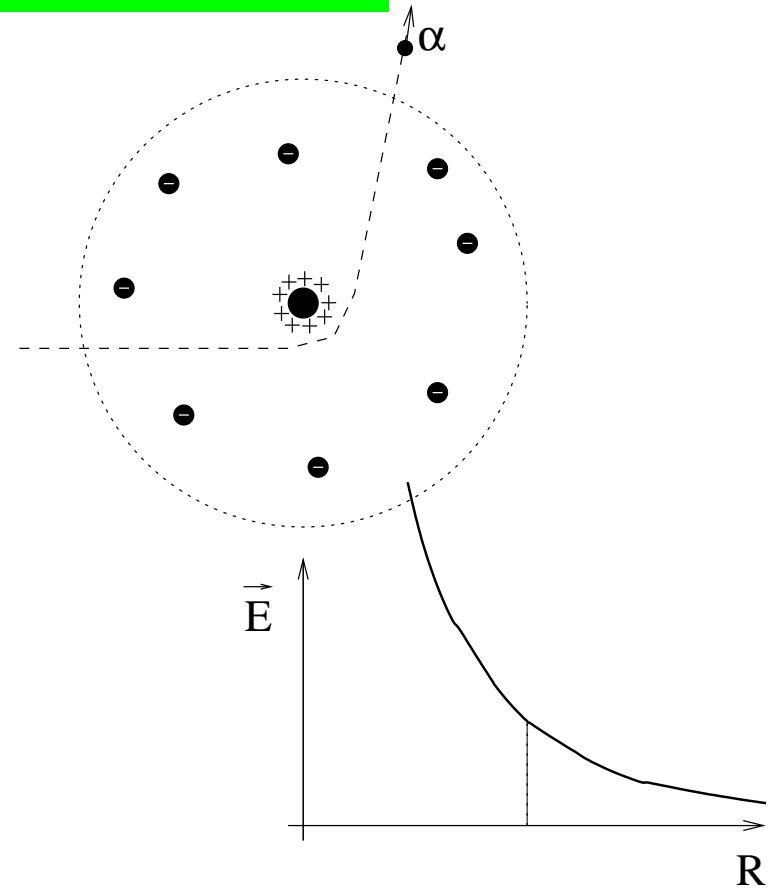
Doświadczenie Rutherforda

Model Rutherforda



Rutherford zaproponował
jądrowy model atomu.

Cały dodatni ładunek atomu (10^{-10} m)
skupiony jest w praktycznie **punktowym**
(10^{-14} m) **jądrze**



Przechodząca cząstka zawsze czuje cały
ładunek dodatni \Rightarrow kąty rozproszenia są
dużo większe.

Doświadczenie Rutherforda

Przekrój czynny

Obserwowany rozkład kątowy rozproszonych cząstek α proporcjonalny jest do tzw. **różniczkowego przekroju czynnego** na rozpraszanie cząstki o ładunku e w potencjale kulombowskim ładunku Ze :

$$N(\theta) \sim \frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{Z^2\alpha^2}{4E^2\sin^4\frac{\theta}{2}}$$

Wzór Rutherforda

(zaniedbujemy odrzut jądra i efekty spinowe)

Skończone prawdopodobieństwo rozproszenia $\theta = \pi$!

Kąt bryłowy możemy wyrazić przez przekaz czteropędu Q^2

$$Q^2 = 2EE'(1 - \cos\theta)$$

$$dQ^2 = 2EE' \sin\theta d\theta$$

$$d\Omega = 2\pi \sin\theta d\theta = \frac{\pi}{EE'} dQ^2$$

Otrzymujemy wzór na rozpraszanie Rutherforda w postaci:

$$\frac{d\sigma}{dQ^2} = \frac{4\pi\alpha^2 Z^2}{Q^4} \cdot \frac{E'}{E}$$

(czynnik $\frac{E'}{E}$ uwzględnia odrzut jądra)

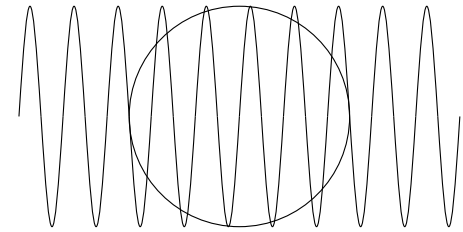
Oddziaływanie typu $\frac{1}{r^2} \Rightarrow \frac{d\sigma}{dQ^2} \sim \frac{1}{Q^4}$

Rozpraszanie elastyczne

Rozdzielczość

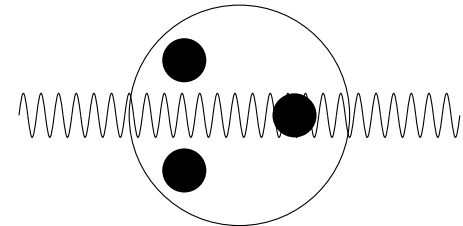
Ze **wzrostem** przekazu czteropędu Q^2
maleje długość fali wymianianego fotonu.

“miękki” foton
małe Q^2



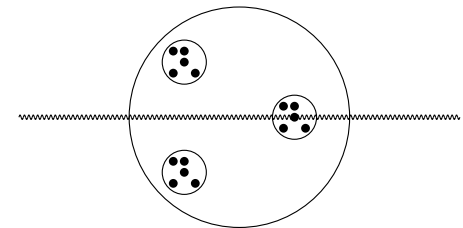
Model Rutherforda załamuje się
⇒ stajemy się czuli na wewnętrzną
budowę jądra...

pośrednie Q^2



a potem **nukleonów**...

twardy foton
duże Q^2



Rozpraszanie elastyczne

Czynniki postaci

Skończone rozmiary “tarczy” (jądra, nukleonu) wprowadzają modyfikację do wyrażenia na przekrój czynny:

$$\frac{d\sigma}{dQ^2} = \left(\frac{d\sigma}{dQ^2} \right)_{\text{point}} \cdot [F(Q^2)]^2$$

gdzie $F(Q^2)$ jest tzw. **czynnikiem postaci** (form factor), odzwierciedlającym **przestrzenny rozkład ładunku** tarczy (transformata Fouriera).

Dla **sferycznie symetrycznego** rozkładu ładunku i małych wartości Q^2 :

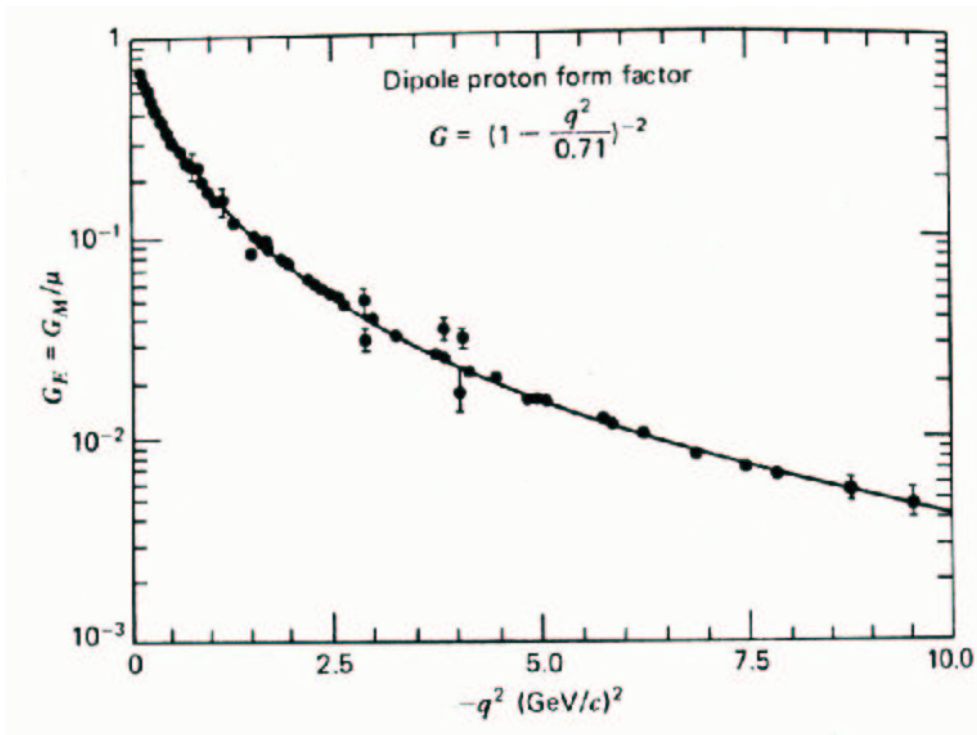
$$F(Q^2) \approx 1 - \frac{1}{6}Q^2 \langle R^2 \rangle + \dots$$

Pomiar $F(Q^2)$ w rozpraszaniu elektronów przy $E \sim 500$ MeV pozwolił na dokładny pomiar rozkładu ładunków w różnych jądrach atomowych (odwrotna transformata Fouriera).

Rozpraszanie elastyczne

Czynniki postaci

Ze wzrostem energii wiązek można też było zmierzyć czynnik postaci protonu:



Parametryzacja wyników:

$$F(Q^2) \approx \left(1 + \frac{Q^2}{0.71 \text{ GeV}^2}\right)^{-2}$$

$$\frac{1}{6} \langle R^2 \rangle \approx \frac{2}{0.71 \text{ GeV}^2}$$

$$\Rightarrow \bar{R} \approx \sqrt{\frac{12}{0.71 \text{ GeV}^2}} \approx 4 \text{ GeV}^{-1} \approx 0.8 \text{ fm}$$

Rozpraszanie nieelastyczne

Do tej pory rozważaliśmy tylko rozpraszanie **elastyczne**, czyli takie dla których “tarcza” (jak i cząstka padająca - “pocisk”) pozostawała **niezmieniona**.

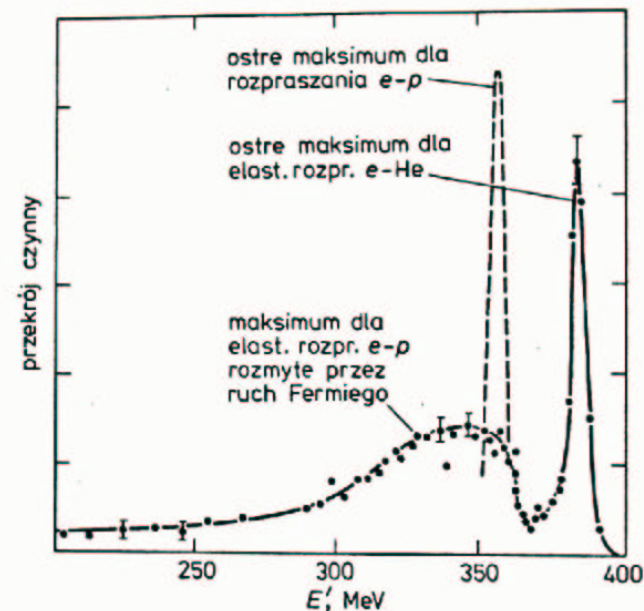
W rozpraszaniu elastycznym **energia** rozproszonego pocisku jest **jednoznacznie określona przez kąt rozproszenia**:

$$E' = \frac{E}{1 + \frac{E}{M}(1 - \cos \theta)}$$

$$\Rightarrow M = \frac{EE'(1 - \cos \theta)}{E - E'}$$

Rozpraszanie $e He$

Rozkład energii elektronów o energii 400 MeV, rozproszonych na jądrach He pod kątem 45° :

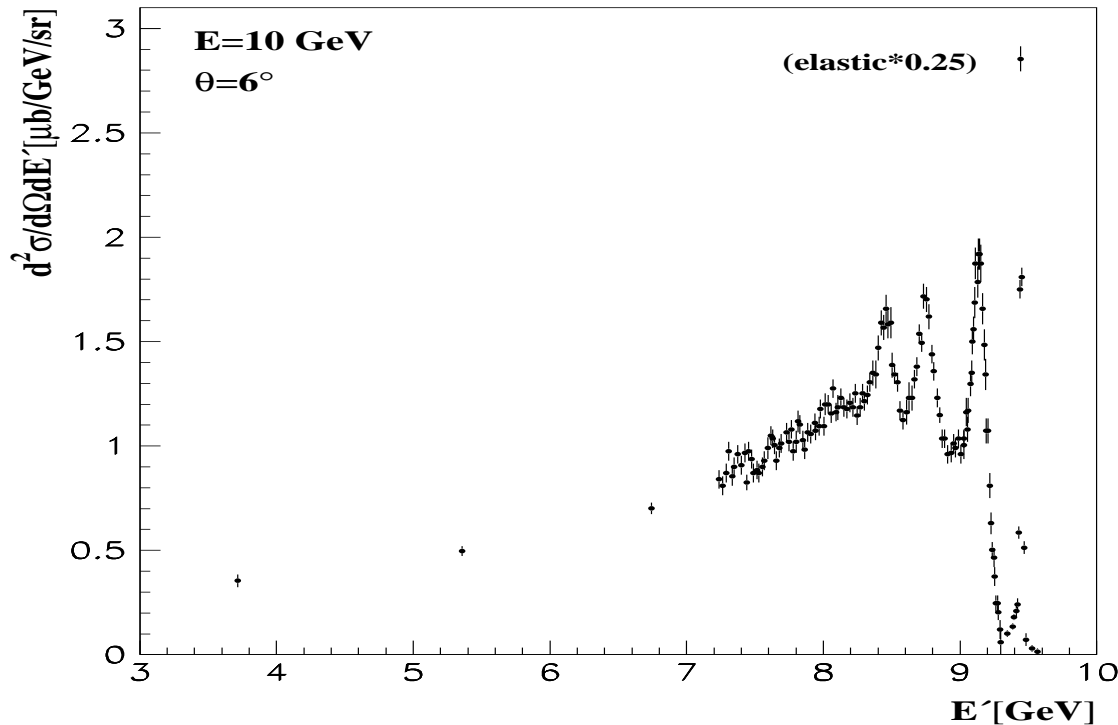


Oprócz elastycznego rozpraszania $e-He$ ($M = M_{He}$) widoczne jest rozpraszanie $e-p$ ($M = m_p$)

Rozpraszanie nieelastyczne

Rozpraszanie ep

Bardzo podobną strukturę widma energii **elektronów** obserwujemy w rozpraszaniu **na protonach**:



Pierwsze (od prawej) maksimum to **rozpraszanie elastyczne**.

Kolejne to produkcja **stanów wzbudzonych** protonu (rezonansów barionowych) o masach pomiędzy 1 i 2 GeV.

Masa stanu końcowego:

$$W^2 = M^2 + 2M(E - E') - Q^2$$

rośnie dla malejącego E' .

Skąd ciągłe widmo w obszarze **głęboko-nieelastycznym** ($W \gg M$) $E' < 8 \text{ GeV}$?

Rozpraszanie głęboko-nieelastyczne

Przekrój czynny ep

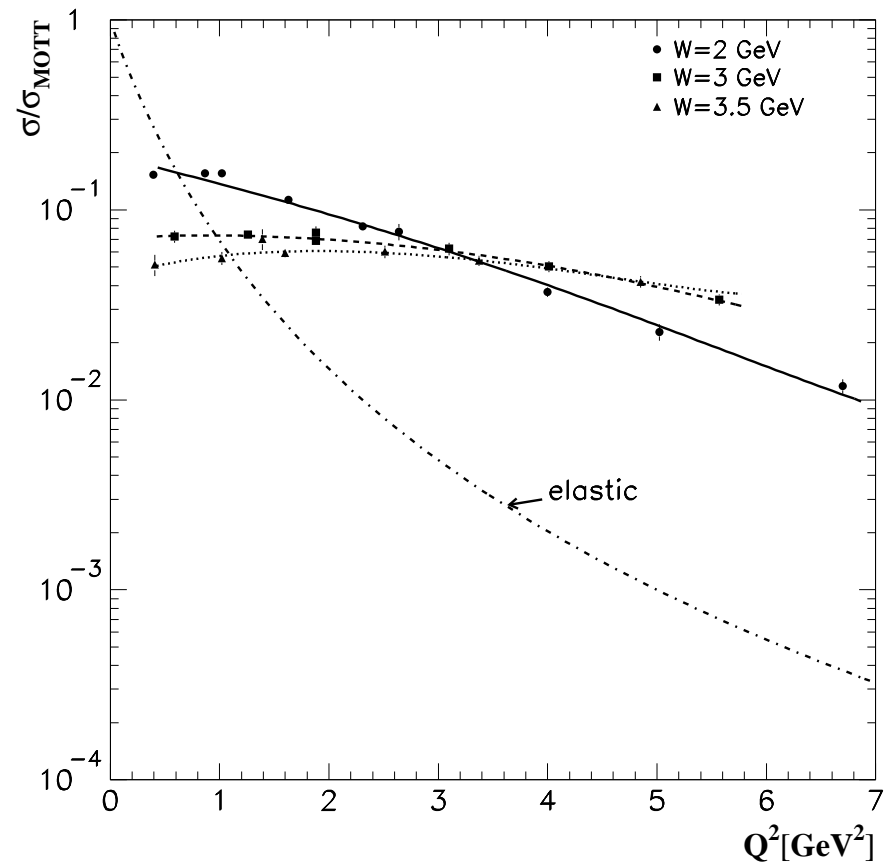
Stosunek przekroju czynnego na rozpraszanie **nieelastyczne** przy ustalonym W do przekroju czynnego na rozpraszanie **elastyczne** na ładunku punktowym (σ_{Mott})



Ta sama zależność od Q^2

⇒ **elastyczne** rozpraszanie na punktowych **partonach**

Model zaproponowany przez **Feynman'a** w 1969 roku



Rozpraszanie głęboko-nieelastyczne

Model partonowy

Rozpraszanie elektronu **na partonie** o ładunku e_q :

$$\frac{d\sigma}{dQ^2} = \frac{4\pi\alpha^2 e_q^2}{Q^4} \cdot \left(\frac{E'}{E}\right) \cdot \left[\cos^2 \frac{\theta}{2} + \dots\right]$$

Człon $\cos^2 \frac{\theta}{2}$ pochodzi od spinu elektronu.

Spin partonu na razie pomijamy (...)

Z kinematyki możemy wyznaczyć efektywną **masę partonu**:

$$m = \frac{Q^2}{2\nu}$$

$$\frac{m}{M} = \frac{Q^2}{2M\nu} \equiv x$$

Przekrój czynny na rozpraszanie **na protonie**:

$$\frac{d\sigma}{dx dQ^2} = \frac{4\pi\alpha^2}{xQ^4} \cdot \left(\frac{E'}{E}\right) \cdot \left[F_2(x) \cdot \cos^2 \frac{\theta}{2} + \dots\right]$$

gdzie $F_2(x)$ - **funkcja struktury**

$F_2(x)$ zdefiniowana jest w oparciu o **gęstości prawdopodobieństwa** $q(x)$ znalezienia partonu q o masie $m = xM$:

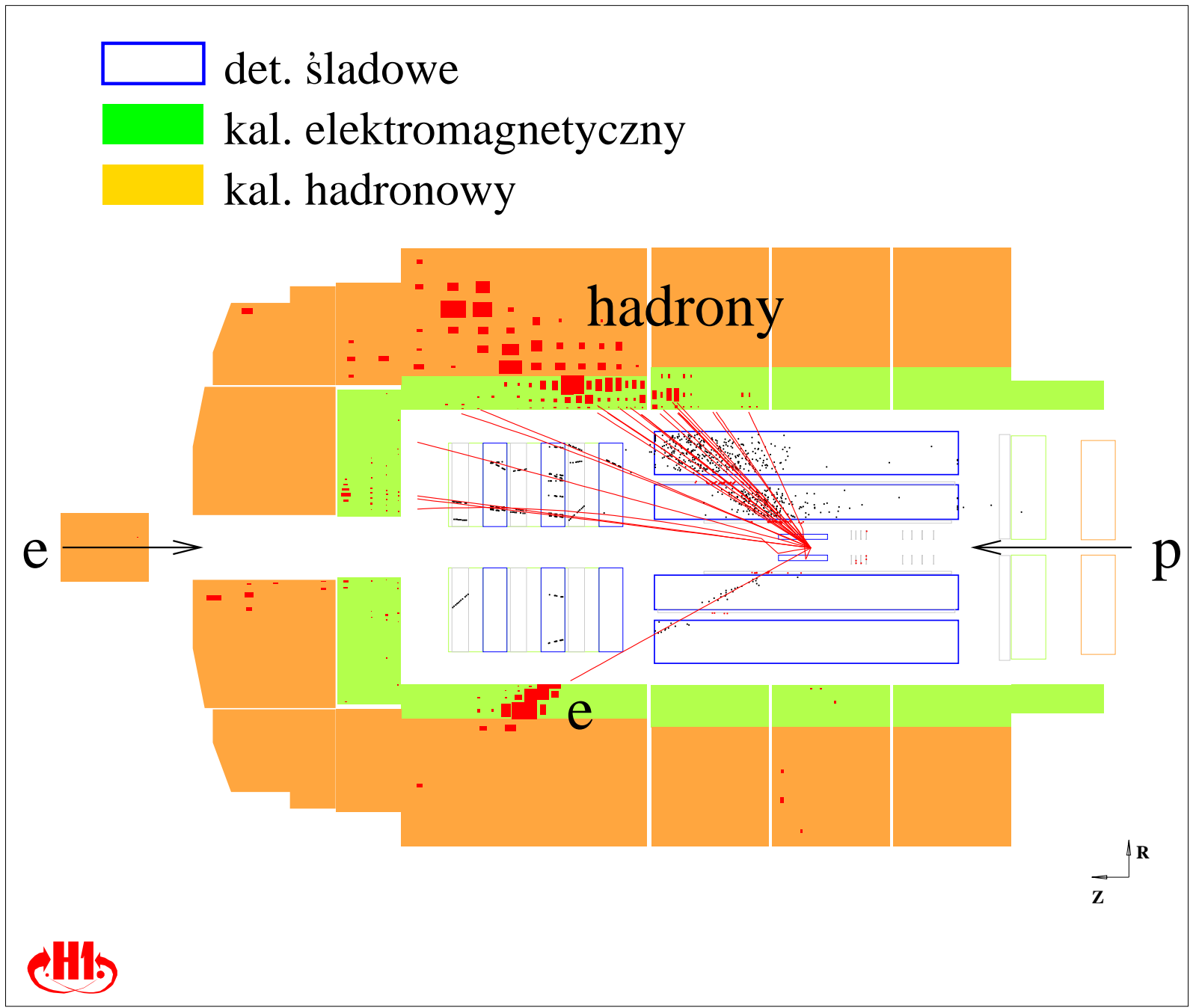
$$F_2(x) = \sum_{\text{partony } q} e_q^2 xq(x)$$

Przypadek
 głęboko-
 –nieelastycznego
 rozpraszania
 elektron-proton

Ekspertment H1

mierzymy energię
 i kąt rozproszenia
 elektronu
 $\Rightarrow x, Q^2$

można też mierzyć
 stan hadronowy...



Rozpraszanie głęboko-nieelastyczne

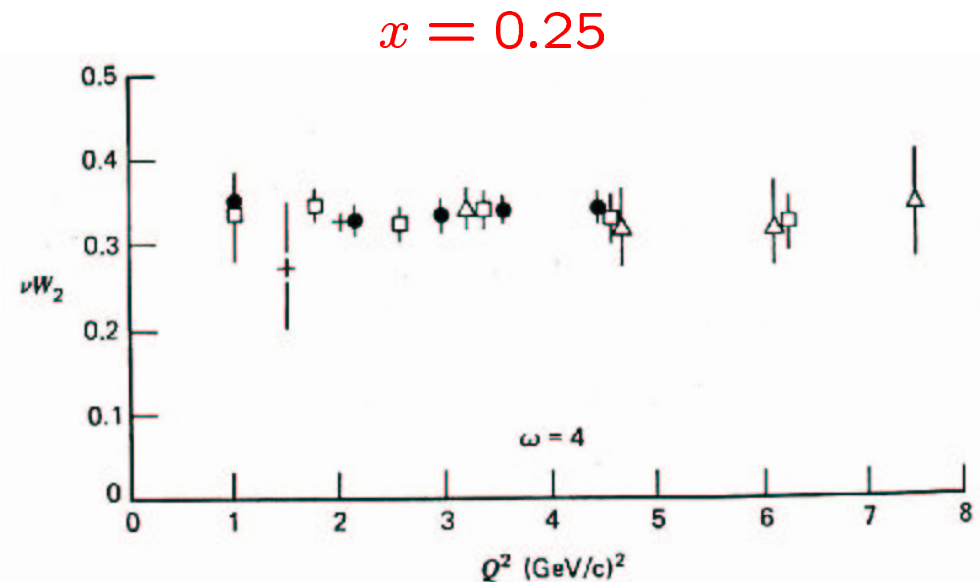
Skalowanie Bjorkena

Funkcję struktury $F_2(x, Q^2)$ można zdefiniować **niezależnie od modelu** (!).

Sukcesem modelu partonowego była obserwacja **skalowania** $F_2(x, Q^2)$, czyli braku zależności od Q^2 (wynikającego z elastycznego rozpraszania na partonach)

Jest to tzw. **skalowanie Bjorkena**, zaproponowane przez Bjorkena w 1968 roku.

Zmienna x często nazywana jest zmienną bjorkenowską

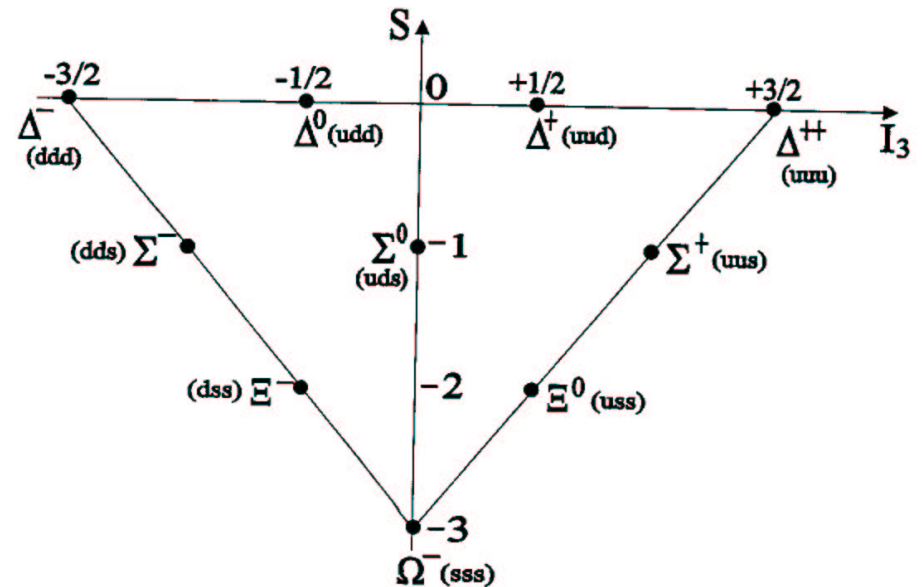
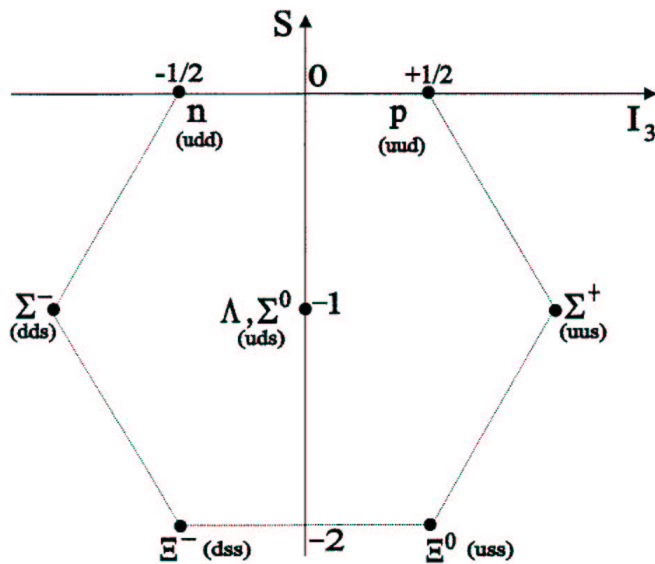


Kwarki

Model Gell-Mann'a i Zweig'a

W połowie lat 60 obserwowana **symetria** w świecie znanych **cząstek** elementarnych doprowadziła Gell-Mann'a i Zweig'a do hipotezy istnienia **kwarków**

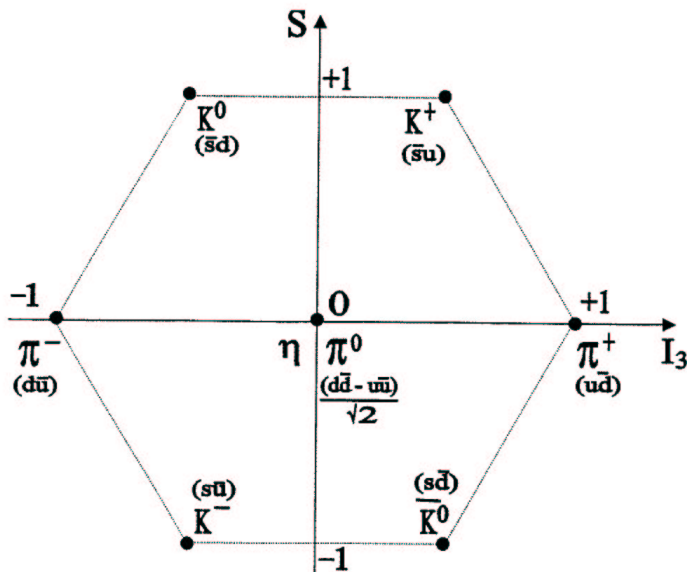
Trzy kwarki tworzyłyby bariony:



Kwarki

Model Gell-Mann'a i Zweig'a

Para kwark-antykwar্ক tworzyłaby mezony



Zakładając istnienie tylko **trzech kwarków** (u , d , s) można było wytłumaczyć spektrum wszystkich znanych cząstek.

Gell-Mann i Zweig zakładali, że kwarki są:

- bardzo masywne
- silnie związane

Z drugiej strony model partony w modelu partonowym:

- lekkie
- quasi-swobodne

Czy partony to kwarki ?

To wcale nie było takie oczywiste...

Kwarki a partony

Spin partonów

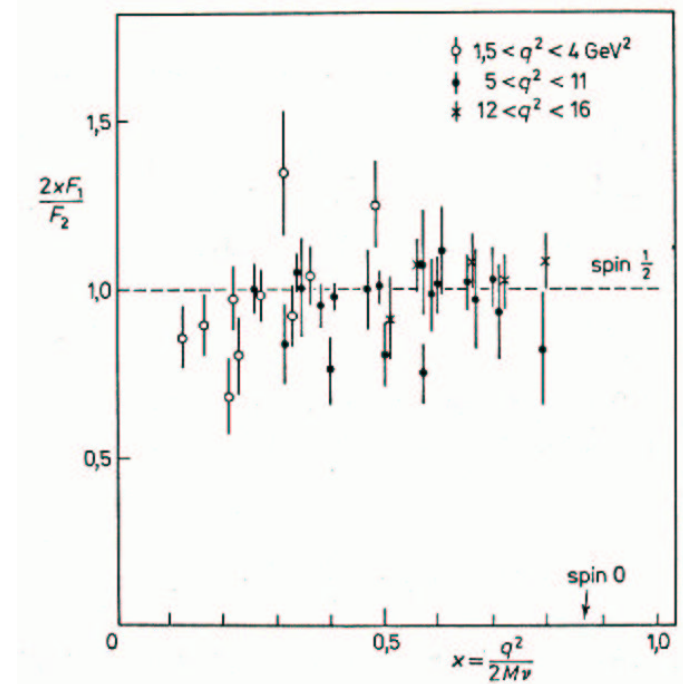
Pełne wyrażenie na przekrój czynny:

$$\frac{d\sigma}{dx dQ^2} = \frac{4\pi\alpha^2}{xQ^4} \cdot \left(\frac{E'}{E}\right) \cdot \left[F_2(x) \cdot \cos^2 \frac{\theta}{2} + 2xF_1(x) \cdot \frac{Q^2}{2M^2x^2} \sin^2 \frac{\theta}{2} \right]$$

gdzie w zależności od spinu s partonów:

$$\begin{aligned} F_1(x) &= 0 & \text{dla } s &= 0 \\ 2xF_1(x) &= F_2(x) & \text{dla } s &= \frac{1}{2} \end{aligned}$$

Wyniki pomiaru $2xF_1/F_2$:



⇒ Partony mają spin $\frac{1}{2}$ (jak kwarki)

Kwarki a partony

Ładunki kwarków

W oddziaływaniach neutrin mierzymy:

$$F_2^{eN}(x) = \sum_q e_q^2 xq(x)$$

$$F_2^{\nu N}(x) = \sum_q xq(x)$$

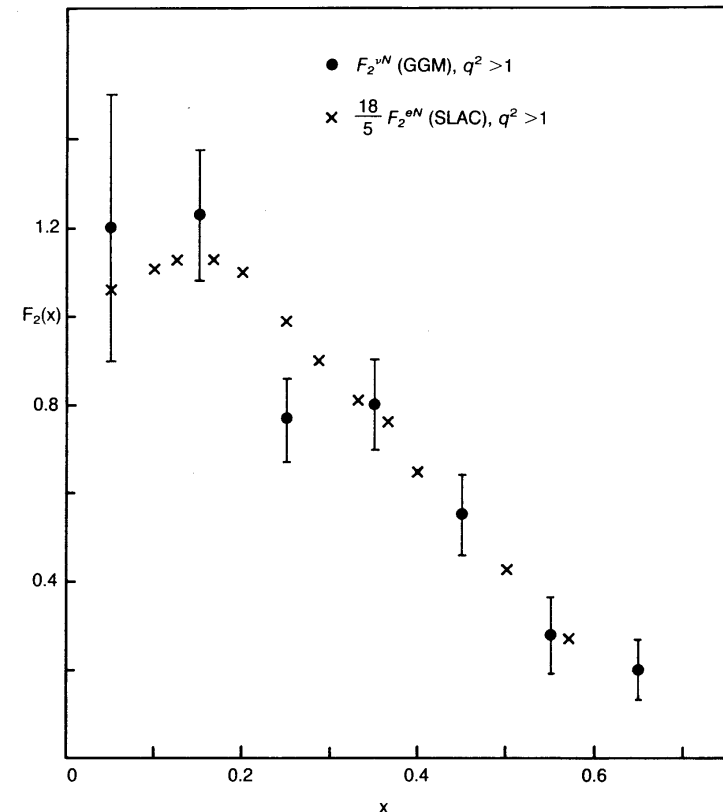
$$\Rightarrow F_2^{eN}(x) = \langle e_q^2 \rangle F_2^{\nu N}(x)$$

gdzie $\langle e_q^2 \rangle$ jest średnim kwadratem ładunku partonu.

W modelu kwarków mamy (dla $A = 2Z$)

$$\langle e_q^2 \rangle = \frac{5}{18}$$

Porównanie pomiarów $F_2^{\nu N}(x)$ i $\frac{18}{5}F_2^{eN}(x)$ (1972):



\Rightarrow Partony mają ładunki takie jak kwarki...

Kwarki a partony

Ładunki kwarków

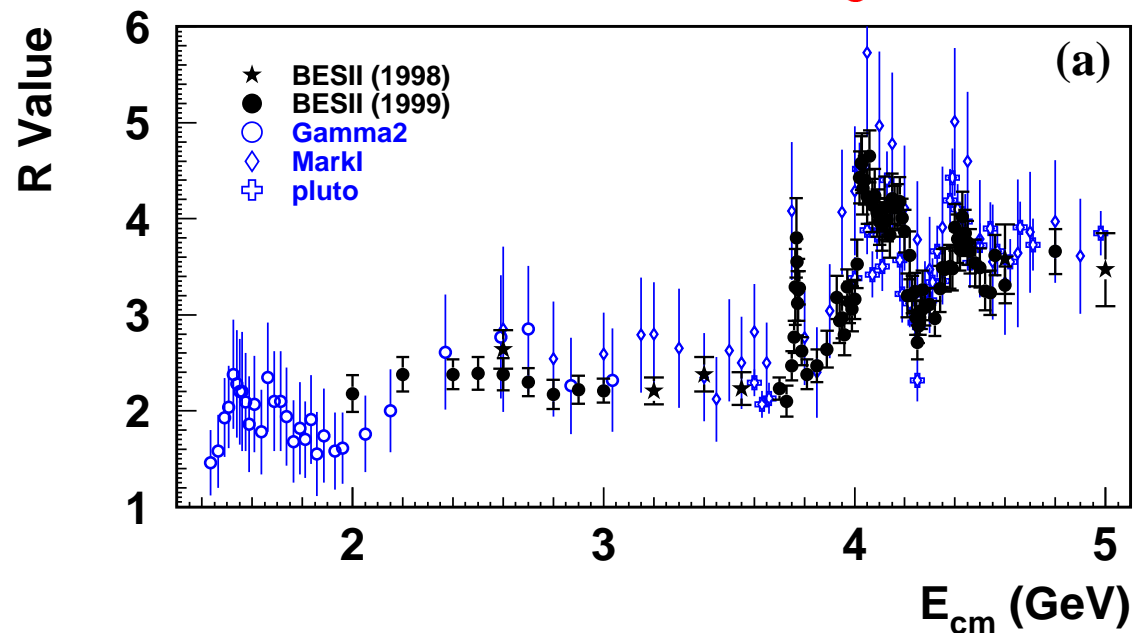
Ładunki partonów można też sprawdzić w pomiarze:

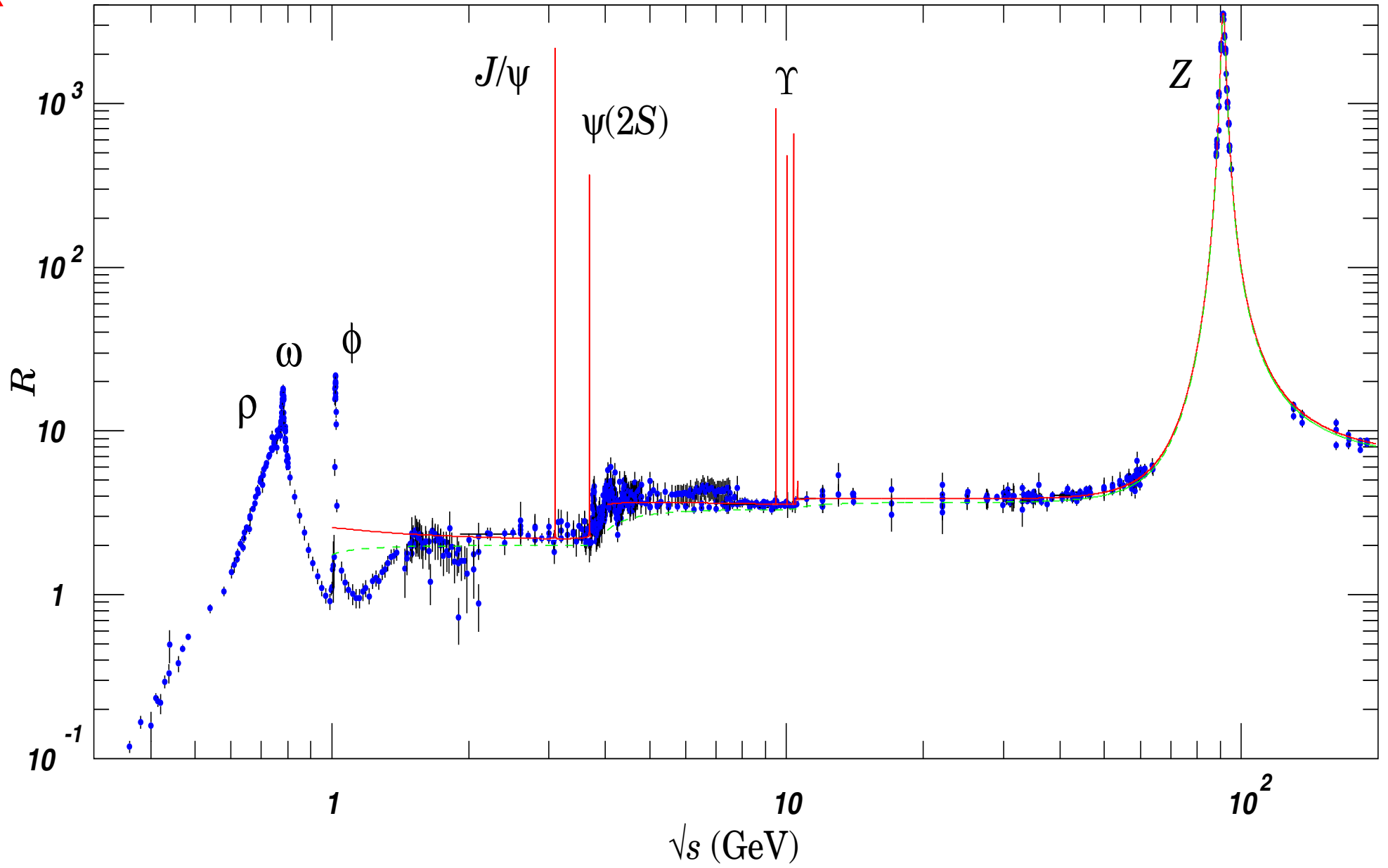
$$R^{e^+e^-} = \frac{\sigma(e^+e^- \rightarrow \text{hadrony})}{\sigma^{th}(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)} \approx 3 \cdot \sum_q e_q^2$$

Dla 3 kwarków (u,d,s) oczekujemy $R \approx 2$, dla $E_{CM} > 4 \text{ GeV} \Rightarrow R \approx \frac{10}{3}$ (u,d,s,c)

Po uwzględnieniu poprawek wyższych rzędów wyniki doświadczalne bardzo dobrze to potwierdzają.

Zgodność zawdzięczamy czynnikowi 3 we wzorze na $R \Rightarrow$ liczba “kolorów” w jakich występują kwarki/partony



R

Struktura protonu

Funkcja struktury F_2

W modelu partonowym

$$F_2(x) = \sum_q e_q^2 xq(x)$$

Największy wkład do $F_2(x)$ protonu

⇒ kwark u

- największa gęstość

$$u(x) \approx 2d(x) \gg s(x) \dots$$

- ładunek

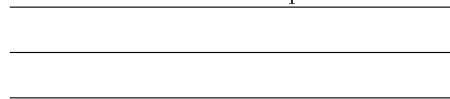
$$|e_u^2| = 4|e_d^2|$$

If the Proton is:

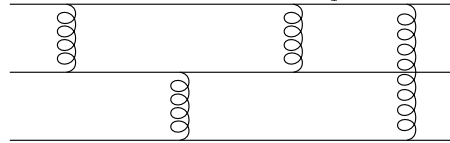
A quark



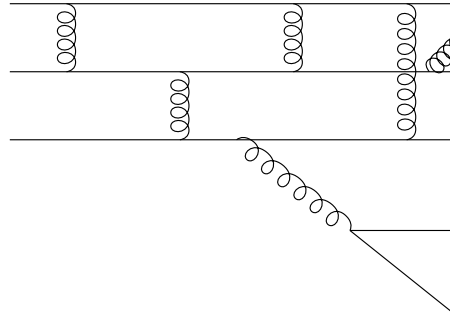
Three valence quarks



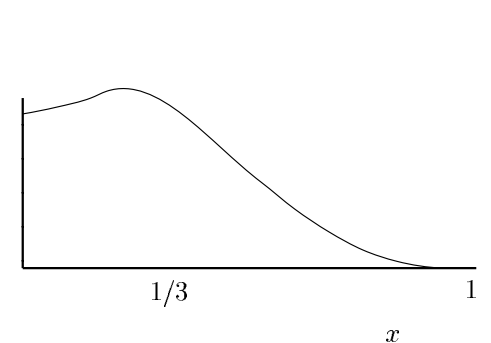
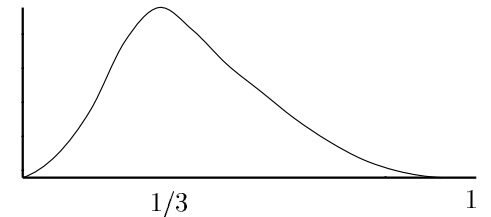
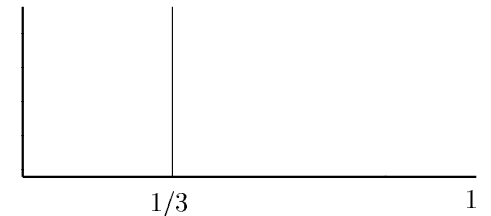
Three bound valence quarks



Valence, Sea quarks, gluons



then $F_2^{ep}(x)$ is:



Struktura protonu

Gluony

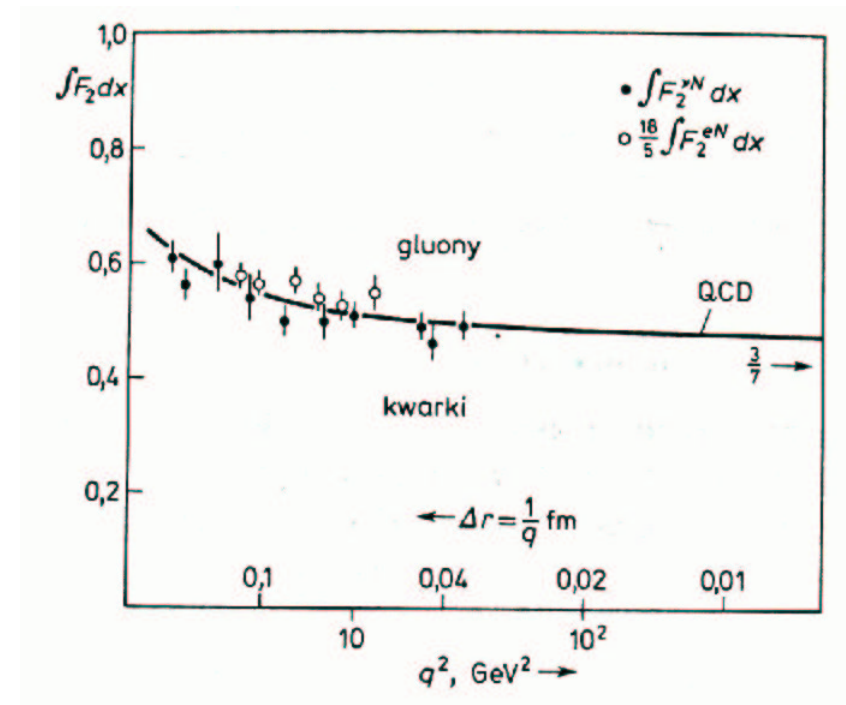
Jak dużą rolę odgrywają gluony ?

Możemy to sprawdzić licząc całkę po x z $F_2(x)$.

Gdyby cały pęd protonu niesiony był przez kwarki

$$\int dx F_2^{\nu N}(x) = \frac{18}{5} \int dx F_2^{eN}(x) = 1$$

Wyniki pomiarów:



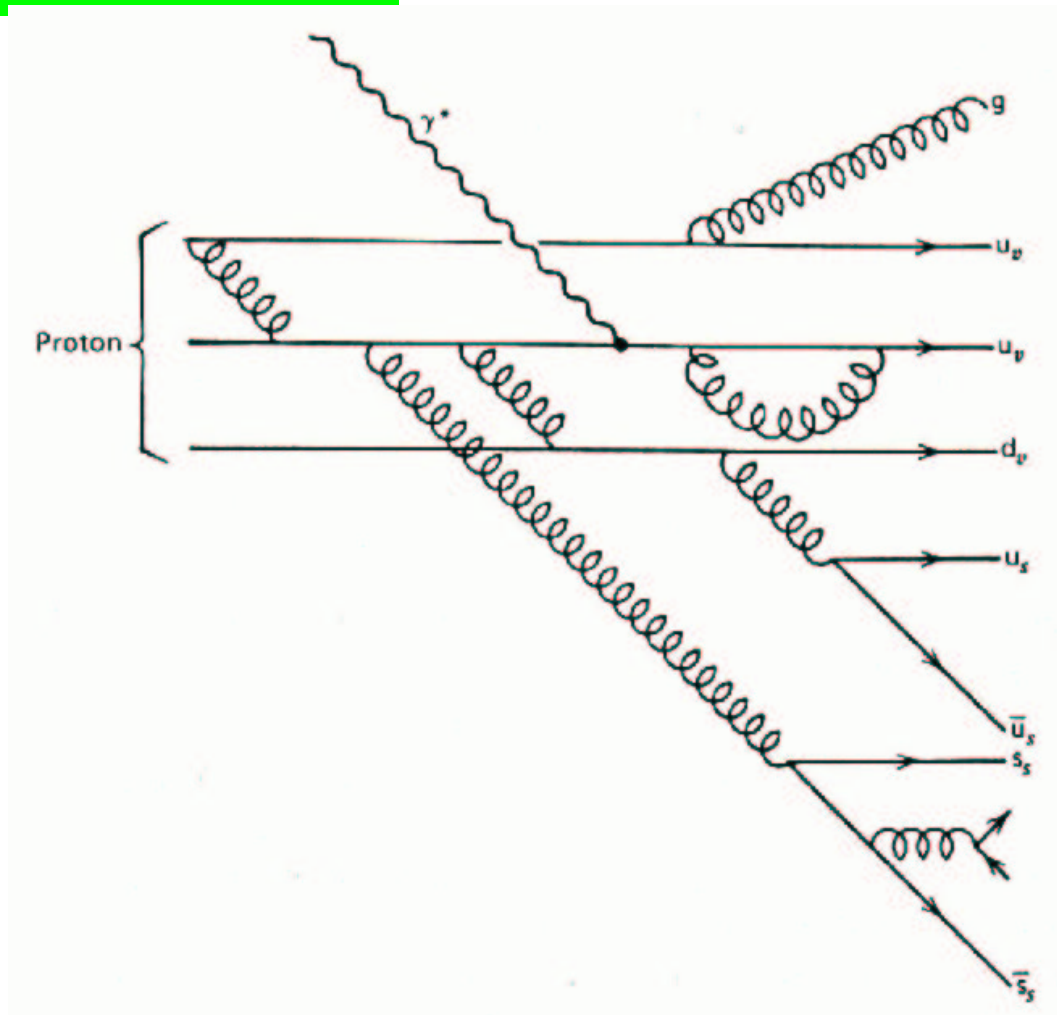
Kwarki niosą jedynie około połowy pędu nukleonów \Rightarrow gluony są bardzo ważne !...

Struktura protonu

Ewolucja QCD

Gluony **przenoszą oddziaływania** między kwarkami, ale mogą także **kreować** dodatkowe **pary kwark-antykwar** (tzw. **kwarki morza**).

Im dokładniej przyglądamy się protonowi (**wyższe Q^2**) tym **więcej partonów** (kwarków i gluonów) widzimy



Struktura protonu

Łamanie skalowania

Chromodynamika kwantowa (QCD) przewiduje, że rozkłady kwarków (a więc i funkcje struktury) powinny **zależać od Q^2**

Dla małych wartości x :

$$F_2(x, Q^2) \text{ rośnie z } Q^2.$$

Dla dużych wartości x :

$$F_2(x, Q^2) \text{ maleje z } Q^2.$$

⇒ skalowanie było szczęśliwym zbiegiem okoliczności !...

