

VI. 6 Rozpraszanie głębokonieelastyczne i kwarki

1. Fale materii. Rozpraszanie cząstek wysokich energii mikroskopią na bardzo małych odległościach.
2. Akceleratory elektronów i protonów. Wiązki mionów i neutrin
3. Elektromagnetyczna struktura protonów i neutronów.
4. Rozmiary jąder wyznaczone w doświadczeniach Hofstadtera i innych (SLAC).
5. Rozpraszanie głębokonieeleastyczne elektronów, mionów i neutrin. Struktura kwarkowa protonów i neutronów.

Przypomnienie z Cz. VI.4: $F=k/r^2$ cd...

Niech gęstość jąder atomowych w folii wynosi n . W tarczy o grubości x znajduje się nx jąder na jednostkę powierzchni.

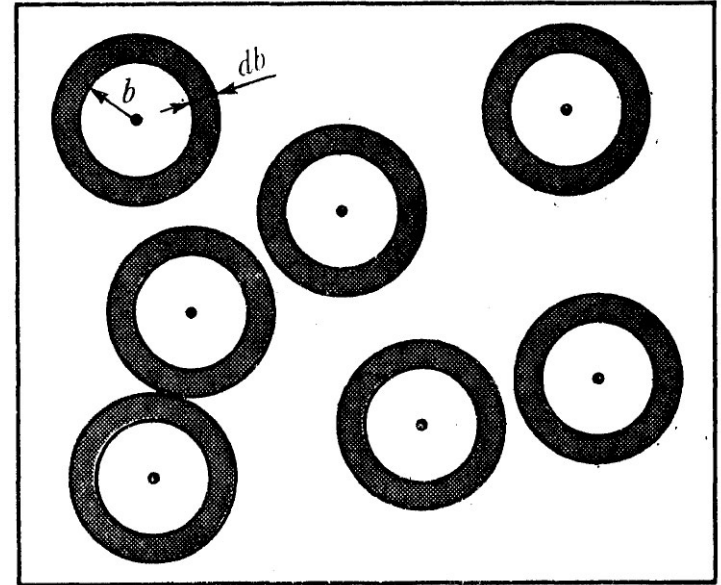
Strumień cząstek padających na folię: N .
Mamy:

$$\frac{dN}{N} = \frac{nx \cdot 2\pi b |db|}{1}; \quad |db| = \frac{1}{2} \frac{k}{\mu v_{\infty}^2} \frac{1}{\sin^2 \theta/2} d\theta$$

$$dN = Nnx \cdot 2\pi \frac{k}{\mu v_{\infty}^2} \operatorname{ctg} \frac{\theta}{2} \cdot \frac{1}{2} \frac{k}{\mu v_{\infty}^2} \frac{1}{\sin^2 \theta/2} d\theta =$$

$$= \left(\frac{k}{\mu v_{\infty}^2} \right)^2 Nnx \frac{2\pi}{4 \sin^4 \theta/2} d\cos \theta$$

$$\frac{dN}{d\Omega} = \left(\frac{k}{\mu v_{\infty}^2} \right)^2 \frac{Nnx}{4 \sin^4 \theta/2}; \quad \frac{d\sigma}{d\Omega} = \left(\frac{k}{\mu v_{\infty}^2} \right)^2 \frac{1}{4 \sin^4 \theta/2}$$



Ile wynosi stała?

$$\left(\frac{k}{\mu v^2} \right) = \frac{q_\alpha q_{\text{Au}}}{4\pi\epsilon_0 2E_{k,\alpha}} = \frac{2 \cdot 79 \cdot \alpha \hbar c}{2E_{k,\alpha}} =$$

$$\approx \frac{\sim 227.6 \text{ MeV} \cdot \text{fm}}{11.2 \text{ MeV}} = 20.3 \cdot 10^{-15} \text{ m}$$

$$\left(\frac{k}{\mu v^2} \right)^2 = \sim 4.13 \cdot b =$$

Dostajemy rząd wielkości rozmiarów jądra atomowego $\sim 10 \text{ fm}$.

1. Fale materii

Wyrażenie na różniczkowy przykrój czynny Rutherforda zawiera czynnik o wymiarze długości, odwrotnie proporcjonalny do kwadratu energii kinetycznej pocisku- cząstki alfa:

$$\lambda^2 = \left(\frac{\hbar c}{E_{\alpha k}} \right)^2 = 35.2 \text{ fm}; \quad \frac{d\sigma}{d\Omega} = (Z_{\alpha} Z_{\text{Au}} \alpha)^2 \lambda^2 \frac{1}{4 \sin^4 \frac{\theta}{2}}$$

Ta wielkość to ~długość fali de Broglia cząstki alfa.

W doświadczeniu Rutherforda możemy badać rozmiary obiektów nie dużo mniejszych niż ta długość fali. Mamy tu pełną analogię z mikroskopią optyczną, gdzie osiągamy zdolność rozdzielczą rzędu długości fali światła.

Mikroskopia

Doświadczenie Rutherforda jest to więc nic innego jak mikroskopia za pomocą cząstek alfa o długościach fali ~ 35 fm. Jak widzieliśmy, dokładne uwzględnienie wszystkich stałych prowadzi do wartości przekrojów czynnych rzędu $(20 \text{ fm})^2$, a więc nieco mniejszych niż $(35 \text{ fm})^2$.

Jak można badać materię na jeszcze mniejszych odległościach?

Należy posłużyć się jeszcze krótszymi falami materii, a więc cząstkami o jeszcze większej energii niż cząstki alfa ze źródła Po, używanego przez Geigera i Marsdena.

Z uwagi na łatwiejszą interpretacji wyników lepiej posłużyć się cząstkami o możliwie najprostszej strukturze, a więc raczej elektronami, mionami i neutrinami (punktowymi leptonami) a nie posiadającymi strukturę cząstkami alfa czy protonami.

2. Akceleratory cząstek wysokich energii

Źródła cząstek o długościach fal 10^{5-6} razy krótszych niż cząstki alfa z doświadczenia Rutherforda to akceleratory cząstek naładowanych.

Do przyspieszania najlepiej nadają się cząstki trwałe a więc protony, antyprotony, elektrony i pozytony.

Podstawową techniką przyspieszania cząstek jest przekazywanie im energii pola elektromagnetycznego fali stojącej we wnęce rezonansowej.

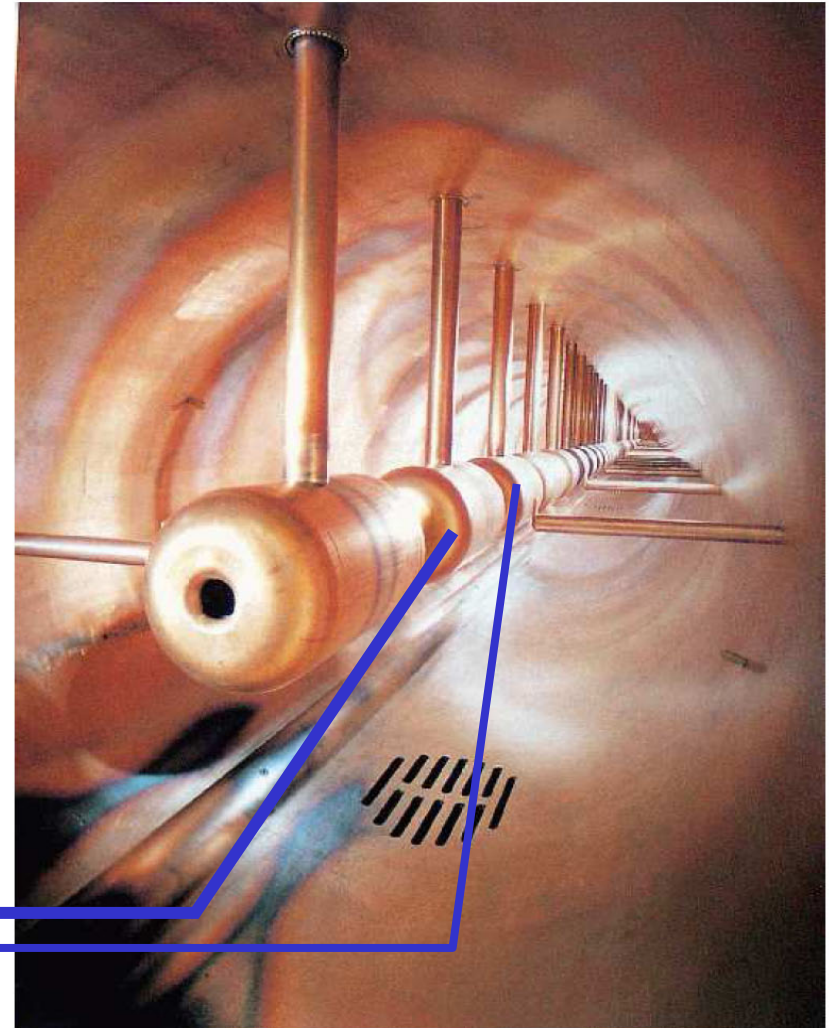
Akceleratory dzielimy na liniowe i kołowe

Wiązki przyspieszanych cząstek muszą być utrzymywane w akceleratorze za pomocą magnesów: soczewek magnetycznych zapobiegających de ogniskowaniu się wiązek oraz magnesów odchylających zapewniających zamknięte orbity w akceleratorach kołowych.

Akseleratory liniowe

Liniowy akselerator wstępnie przyspieszający protony w Narodowym Laboratorium Fermiego FNAL w Batawii k/ Chicago.

Akselerator składa się z wielu identycznych sekcji (relatywistyczne protony mają niemal stałą prędkość).

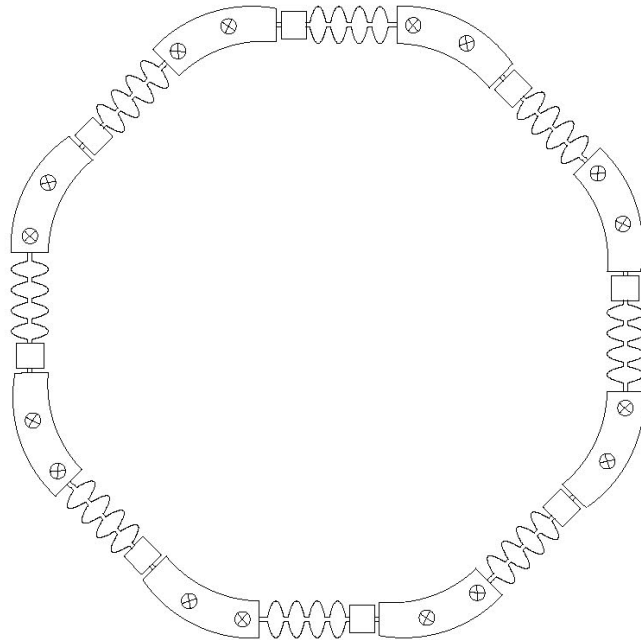


Tu działa pole elektryczne

Akceleratory kołowe

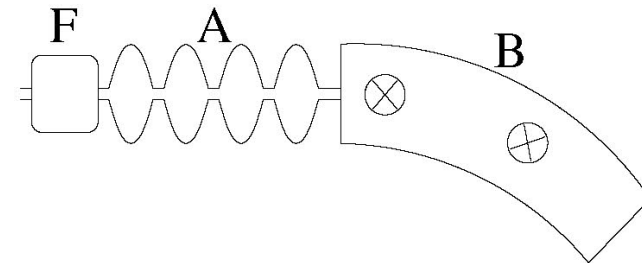
Akcelerator kołowy

Wpółczesne akceleratory kołowe zbudowane są z wielu powtarzających się **segmentów**:



Każdy segment składa się z

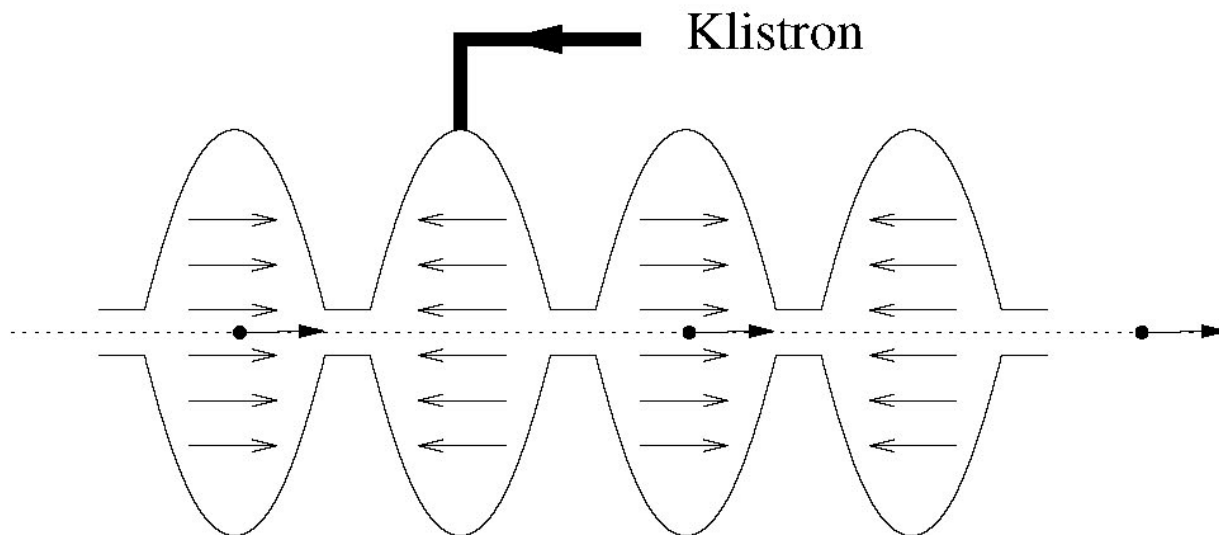
- wnek przyspieszających (A)
- magnesów zakrzywiających (B)
- układów ogniskujących (F)



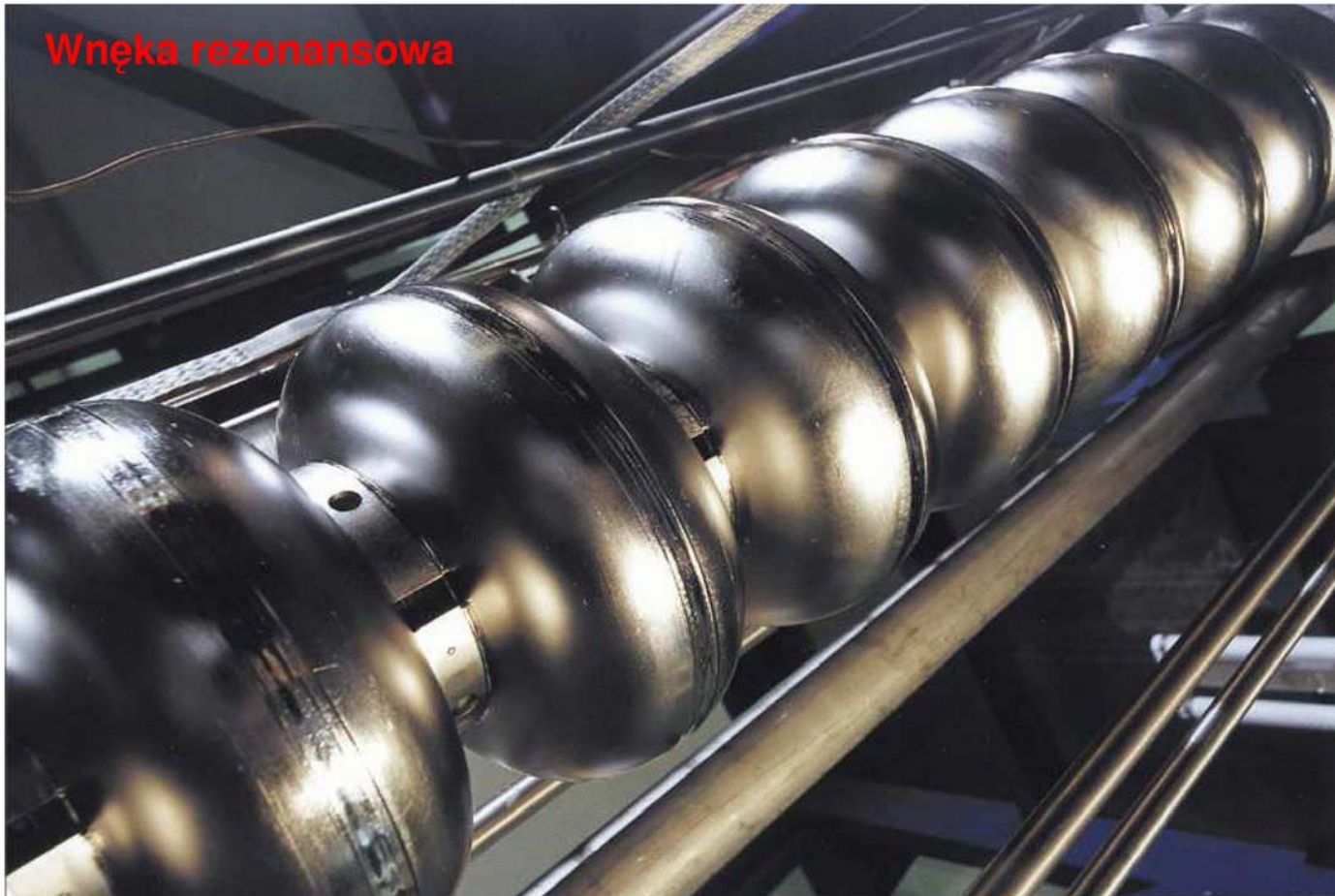
Największym zbudowanym akceleratorem był LEP w CERN pod Genewą (obwód ok. 27 km).

W tym samym tunelu budowany jest obecnie akcelerator LHC.

Wnęka rezonansowa - zasada działania



Wnęka rezonansowa TESLA



Cyklotron warszawski U-200

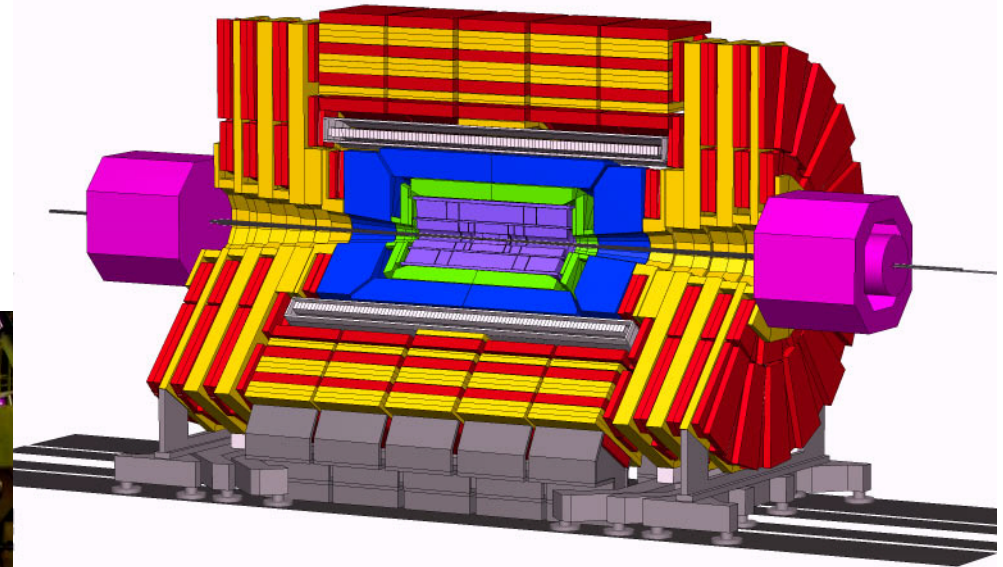


LEP / Large Hadron Collider 2007-



Compact Muon Solenoid CMS detector @ LHC

Budowany z udziałem
grupy warszawskiej z IFD
UW i IPJ. Ruszy w 2007



Stan z lata 2005

Ulepszony wzór Rutherforda - rozpraszanie na cząstce niepunktowej

Różniczkowy przekrój czynny na elastyczne rozpraszanie elektronów wysokich energii E na cząstce o masie M posiadającej przestrzenny rozkład ładunku i momentu magnetycznego dany jest wzorem Rosenbluta:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{\alpha \hbar c}{4(4\pi)^2 E^2} \frac{\cos^2 \theta/2}{\sin^4 \theta/2} \frac{1}{1 + \frac{2E}{M} \sin^2 \theta/2} \times$$

$$\times \left\{ F_1^2 - \frac{q^2}{4M^2} \left[2(F_1 + 2MF_2)^2 \operatorname{tg}^2 \theta/2 + (2MF_2)^2 \right] \right\}$$

$$q^2 = -\frac{4E^2 \sin^2 \theta/2}{1 + \frac{2E}{M} \sin^2 \theta/2}$$

$F_1(q^2)$ – transformata Fouriera przestrzennego rozkładu ładunku elektrycznego

$F_2(q^2)$ – transformata Fouriera przestrzennego rozkładu momentu magnetycznego

Czynniki postaci

Czynniki postaci zdają sprawę z tego, że ładunek i moment magnetyczny protonu, neutronu czy jądra atomowego ma przestrzenny rozkład, a nie jest skupiony w punkcie.

Ten rozkład przestrzenny można parametryzować przez czynniki postaci w przestrzeni Minkowskiego i w przestrzeni pędów:

$$F_i(y) = \int \frac{d^4q}{(2\pi)^4} F_i(q^2) e^{iq \cdot y}$$

$$F_i(q^2) = \int d^4y e^{-iq \cdot y} F_i(y)$$

Okazuje się, że przekrój czynny zależy od czynników postaci w przestrzeni pędów

Dwa elastyczne czynniki postaci F_1 i F_2

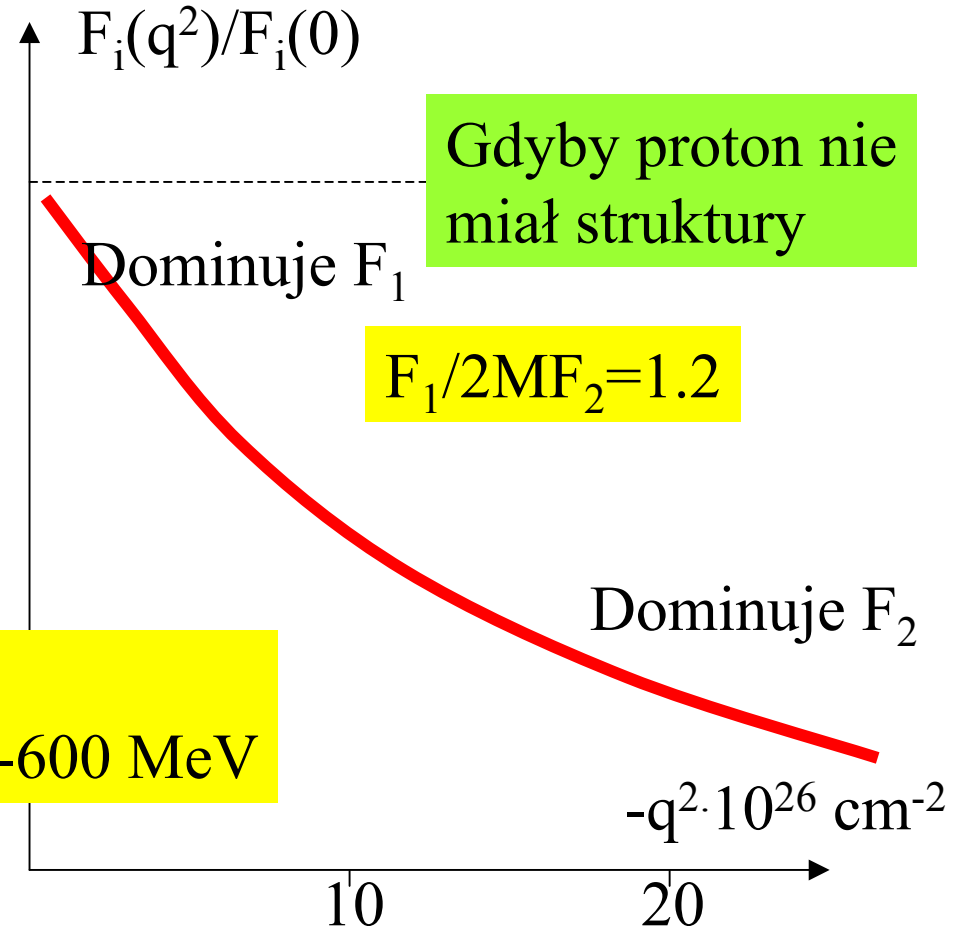
Opisują przestrzenny rozkład ładunku i (anomalnego) momentu magnetycznego tarczy .

Warunki normalizacji:

$$F_1(0) = e$$

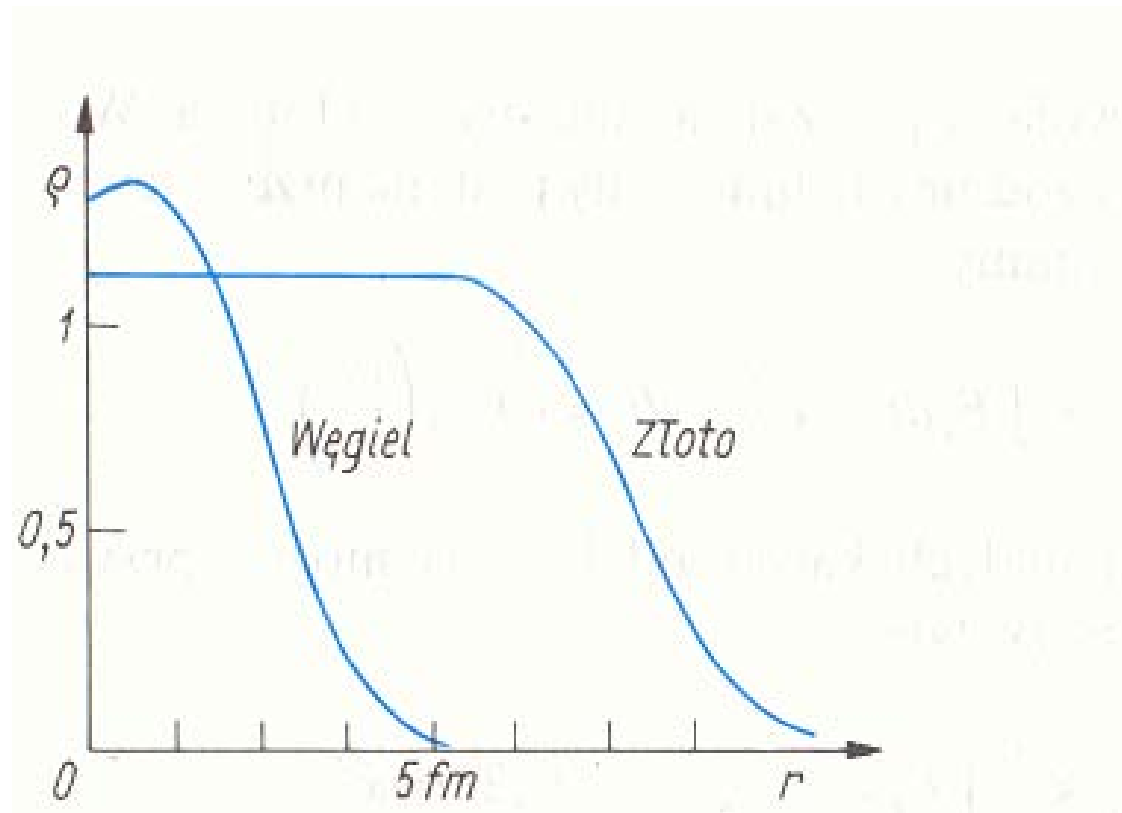
$$F_2(0) = g \frac{e\hbar}{2M} = 1.79\mu_N$$

Wyniki Hofstadtera i innych
1957 rozpraszanie ep, $E \sim 100-600$ MeV



Rozmiary jąder (Hofstadter et.al.)

W podobny sposób jak funkcje postaci nukleonów można wyznaczać rozkłady ładunku jąder



Akcelerator liniowy w SLAC

2 milowy akcelerator liniowy elektronów na Uniwersytecie Stanforda w laboratorium SLAC w Palo Alto (CA).

Za pomocą wiązek elektronów o energiach do 20 GeV odkryto tu w latach 1966-1970 dowody doświadczalne kwarkowej struktury nukleonów.



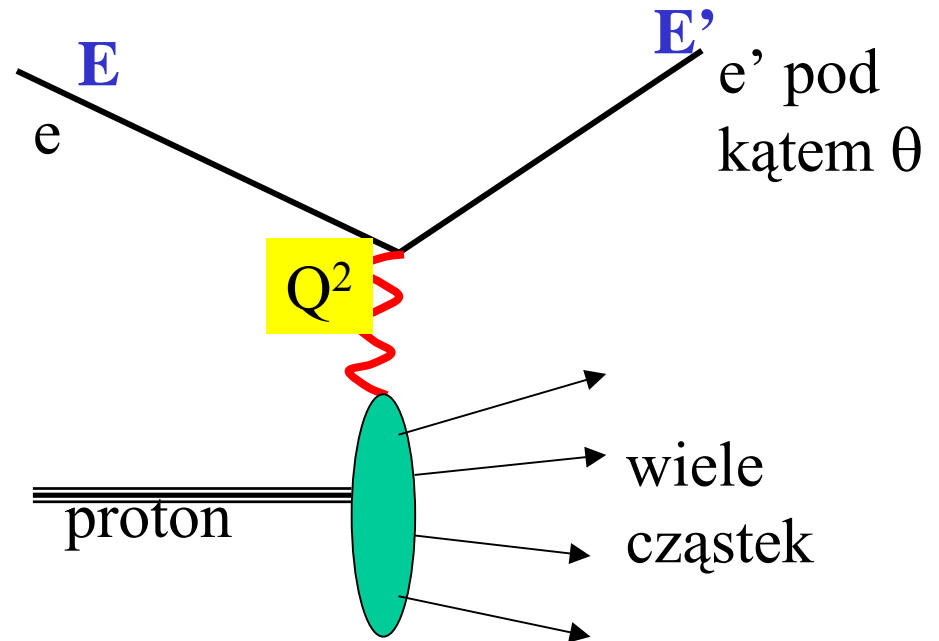
Dziesięć lat później (1968) , także w SLAC

Elektrony o energiach do 20 GeV z 2 milowego akceleratora liniowego podlegały rozproszeniu głębokonieastycznemu.

Mierzymy różniczkowy
przekrój czynny

$$\frac{d^2\sigma}{dQ^2 d(E-E')}$$

$$Q^2 = 4EE' \sin^2 \frac{\theta}{2}$$



który zależy także od 2 funkcji struktury F_1 i F_2 .

Interpretacja funkcji struktury F_2

Okazuje się, że funkcja F_2 to rozkład pędowy naładowanych elektrycznie składników protonu i neutronu- kwarków i antykwarków:

$$F_2(x, Q^2) = \sum_q e_q^2 \cdot xq(x, Q^2) + \sum_{\bar{q}} e_{\bar{q}}^2 \cdot x\bar{q}(x, Q^2)$$

Zaś zmienna x ma interpretację ułamka pędu protonu niesionego przez składnik, który zaabsorbował wirtualny foton:

$$x = \frac{Q^2}{2M(E - E')} = \frac{Q^2}{2M\nu}$$

$$0 < x < 1$$

Jakie są więc rozkłady pędowe kwarków w nukleonie?

Podsumowanie wyników

(A. D. Martin 2002).

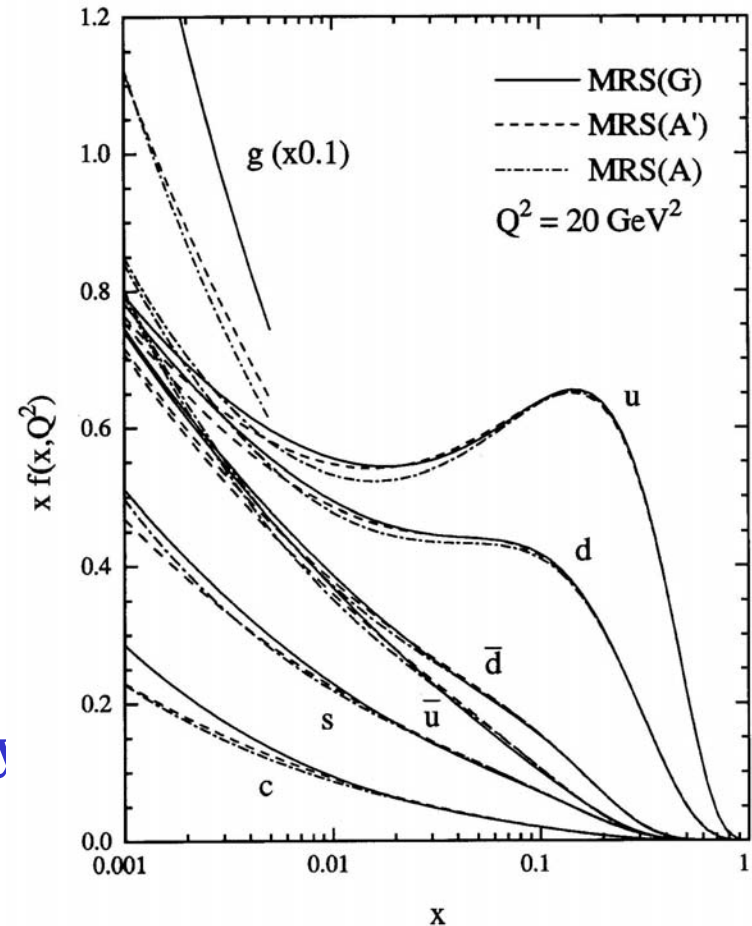
Rozkłady zależą od tego jaką długość fali ma wirtualny foton

„oświetlający” nukleon, a więc jaką

zdolność rozdzielczą ma nasz

mikroskop: $\lambda \approx \hbar c / \sqrt{Q^2}$

Im mniejsza długość fali tym więcej widzimy partonów o małych ułamkach pędu. Jest to dowodem na ich wzajemne oddziaływanie za pomocą nie naładowany gluonów- przenoszących oddziaływanie silne.



Gluony

Kwarki i antykwarki (naładowane partony) niosą tylko ok. 50% pędu protonu.

Reszta to pęd niesiony przez neutralne elektrycznie, a więc niewidoczne w oddziaływaniach elektromagnetycznych kwanty pola kolorowego- gluony- cząstki oddziałujące wyłącznie silnie!

Rozproszenie głębokonieelastyczne jest bogatym źródłem informacji (pośrednich) o oddziaływaniach kolorowych- chromodynamice kwantowej (QCD).