

# *Już wiemy*

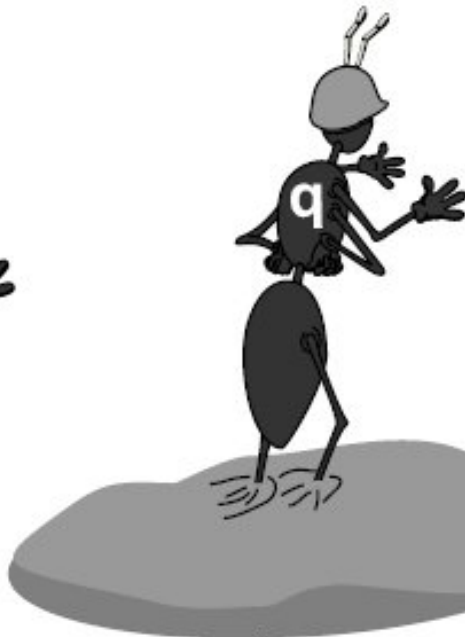
- Oddziaływania: QED, QCD, słabe
- Ładunek  $\Leftrightarrow$  kolor, potencjały w QED i QCD
- Stała struktury subtelnej zależy od odległości od ładunku: wielkie osiągnięcie fizyki oddziaływań elementarnych (tzw. running)
- Pojęcie asymptotycznej swobody i uwięzienia kwarków w QCD
- Składniki materii (fermiony) oraz bozony pośredniczące
- Podstawowa jednostka: GeV

# Najważniejsze masy

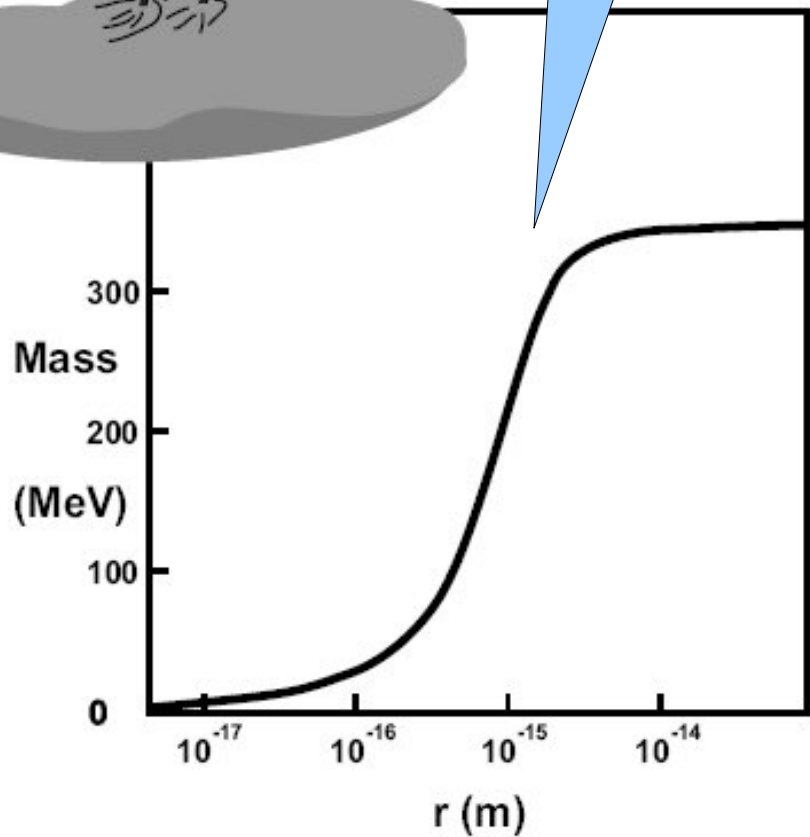
• foton, grawiton: 0,	neutrino: (sub)eV
• Elektron	511 keV
• Proton	938 MeV
• Mion	106 MeV
• Tau	1.78 GeV
• Kwark	
– u	1-5 MeV (ciekawe dlaczego taki zakres?)
– d	3-9 MeV
– s	75-170 (150) MeV
– c	1.15-1.35 GeV
– b	4.0-4.4 GeV
– t	174(5) GeV
• Bozon	
– W	80.4 GeV
– Z	91.2 GeV



Ok, fajny rysunek, ale o co tu chodzi?



Masy u,d aż do 300 MeV!  
Pennington,  
hep-ph/0504262

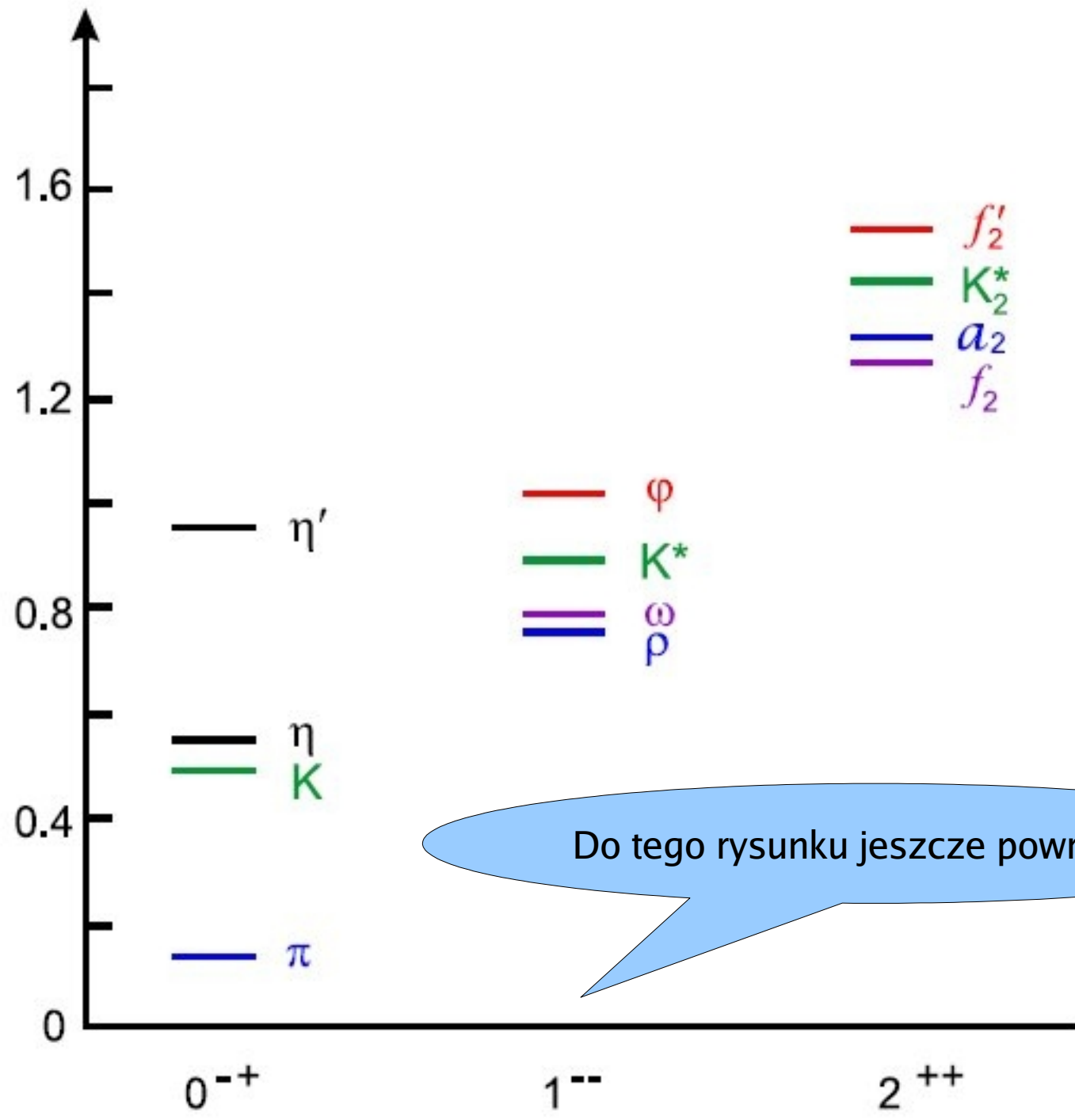


Mrówki idące w miodzie

Wykład IV J. Gluza

Masy kwarków to dynamiczny proces

Mass (GeV)



Do tego rysunku jeszcze powrócimy

J<sup>PC</sup>

# Względna siła oddziaływań

- Grawitacyjne:  $10^{-42}$
- Słabe:  $10^{-6}$
- Elektromagnetyczne:  $10^{-2}$
- Silne: 1
- Jak to się szacuje?

# Naturalny układ jednostek: $\hbar/2\pi=c=1$

- Stosunek energii elektrostatycznej oddziaływania dwóch ładunków znajdujących się w naturalnej odległości  $L$  od siebie

$$L = \frac{\hbar}{mc}, \quad \Delta x \Delta p \geq \hbar$$

$$T = \frac{\hbar}{mc^2}, \quad \Delta E \Delta t \geq \hbar$$

$$\alpha \equiv \frac{\phi e}{mc^2} = \frac{\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 L}}{mc^2} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon\hbar c} = \frac{1}{137.036\dots}$$

## *Stała struktury subtelnej*

- Wprowadził w 1916, A. Sommerfeld
- Wiemy z poprzedniego wykładu, że stała ta nie jest stała (zależy od odległości od badanego ładunku i struktury próżni), poza tym spekuluje się, że **stała ta jest też zmienna :-)) w czasie** (ma znaczenie w kosmologii): teza nieudowodniona
- A może zmienia się prędkość światła, a może ładunek (od których zależy ta stała)?
- Numerologia wokół  $1/137$ , Eddington,

# Jeden z przykładów ‘adań’

$$\alpha = \frac{\cos(\pi/137) \tan(\pi/(137 \cdot 29))}{137 \frac{\pi}{(137 \cdot 29)}} \approx \frac{1}{137.0359997867}$$

tyle cyfr się zgadzaz doświadczeniem

137 to 33 liczba pierwsza, 29 to 10 liczba pierwsza,  
piramidy, itp, itd



## *Rozważania na temat stałych*

- Kelvin 1874 (?)
- 1931, Jeans (przesunięcie ku czerwieni poprzez kurczenie się atomów)
- Zasada antropiczna (np. znaczenie węgla jako podstawowego pierwiastka dla organizmów żywych, wartość stałych fizycznych)

# Grawitacja: skala Plancka

$$\alpha_G \equiv \frac{G_N \frac{m^2}{L}}{mc^2} = \frac{G_N m^2}{\hbar c}$$

Stała = 1

$$m = \sqrt{\frac{\hbar c}{G_N}} = 1.22 \cdot 10^{19} \text{ GeV}$$

Dla niskich energii, np. dla elektronu:



$$\frac{G_N m_e^2}{\hbar c} = \frac{1}{2.5} 10^{-44}$$

$$\frac{\alpha}{\alpha_G} = \frac{1/137}{1/2.5 \cdot 10^{-44}} \simeq 10^{42}$$

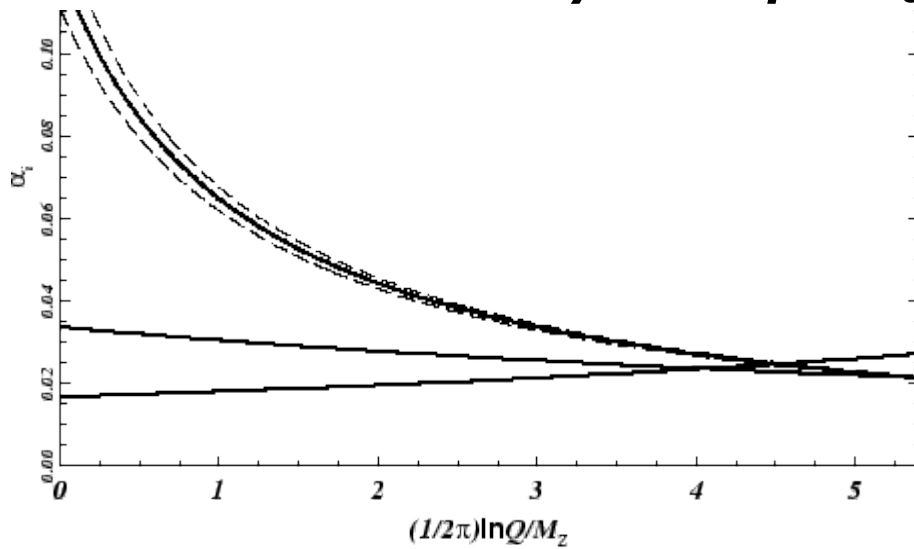
Grawitacja dla  
"zwykłych" cząstek  
nie ma znaczenia

# Podstawowe jednostki wg Plancka (1899)

Name	Quantity	Expressions	Approximate SI equivalent	Other equivalent
Planck length	Length (L)	$l_P = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}}$	$1.61624 \times 10^{-35}$ m	
Planck mass	Mass (M)	$m_P = \sqrt{\frac{\hbar c}{G}}$	$2.17645 \times 10^{-8}$ kg	$1.311 \times 10^{19}$ u
Planck time	Time (T)	$t_P = \frac{l_P}{c} = \frac{\hbar}{m_P c^2} = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^5}}$	$5.39121 \times 10^{-44}$ s	
Planck charge	Electric charge (Q)	$q_P = \sqrt{\hbar c 4\pi\epsilon_0}$	$1.8755459 \times 10^{-18}$ C	11.70624 e
Planck temperature	Temperature (Θ)	$T_P = \frac{m_P c^2}{k} = \sqrt{\frac{\hbar c^5}{G k^2}}$	$1.41679 \times 10^{32}$ K	

Z nich siła, pęd, itp, “on time-variation of fundamental constants”, hep-th/0208093, Okun, physics/0110060, physics/0310069

# Zmiana stałych sprzężenia z energią: unifikacja?

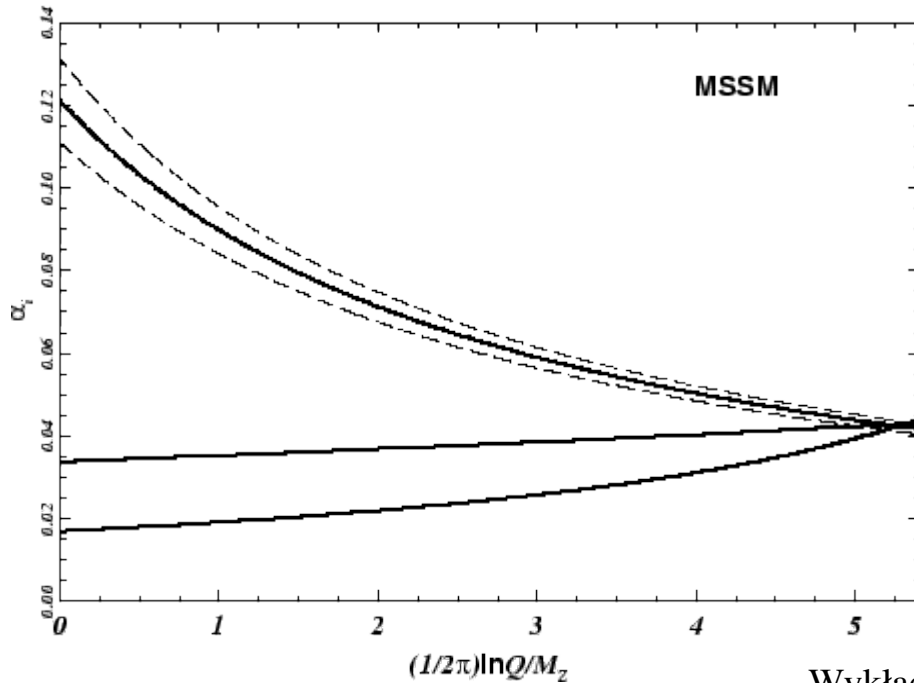


- Najniższa linia odpowiada  $U(1)_Y$ ,  
następna  $SU(2)_L$ , najwyżej  $SU(3)$

$$\alpha_1(M_Z) = \frac{5}{3} \frac{\alpha(M_Z)}{1 - \sin^2 \Theta_W(M_Z)}$$

$$\alpha_2(M_Z) = \frac{\alpha(M_Z)}{\sin^2 \Theta_W(M_Z)}$$

$$\frac{\alpha_3(M_Z)}{1 + \frac{\alpha_3(M_Z)}{4\pi}} = \alpha_s(M_Z)$$



# ***Duże energie w akceleratorze leptonowym: ILC vs akcelerator kołowy (promieniowanie synchrotronowe)***

$$U_{SR} [GeV]/cykl = 6 \cdot 10^{-21} \cdot \gamma^4 \frac{1}{r [km]}$$

- LEP [100 GeV]: obwód 27 km, strata 2 GeV na cykl
- LEP [250 GeV]: ( $\gamma = 5 \cdot 10^5$ ) obwód 170 km, strata 13 GeV na cykl
- $L = 10^{34} \frac{1}{cm^2 \cdot s} \rightarrow 1$  A na wiązkę

2A plus 13 GeV straty na cykl wymagają mocy 26 GW (+ sprawność) = 45 GW  
(stan Kalifornia w lecie)

$$\lambda = \frac{hc}{E} = 1.2 \frac{GeV}{E} \cdot 10^{-15} m \simeq 1.2 \cdot 10^{-15} m$$

$$LEP : 6 \cdot 10^{14} \text{ } ^\circ K \simeq 10^{-19} \text{ }_s BB$$

# ***Kalibracja: proces Bhabhy?***

- Zderzamy elektron z pozytronem, duża energia, mogą się produkować różne cząstki, akceleratorzy, detektory są bardzo skomplikowane, tak więc aby przewidzieć wynik, należy znać tzw. świetlność  $L$

$$\frac{dN}{dt} = L(t)\sigma, \quad N = \sigma \int dt L(t) = \sigma L \quad (1)$$

Lub znać z bardzo dużą dokładnością jakiś proces (kalibracja), np.

$$L = \frac{1}{\sigma_{Bhabha}} N_{Bhabha}$$

Wtedy możemy określić jakikolwiek przekrój czynny w (1)

Name	Type	$\sqrt{s}$ (GeV)	$L_{\text{int}}$ ( $\text{pb}^{-1}$ )	Years of operation	Detectors	Location
LEP	$e^+e^-$	91.2 (LEP-1) 130-209 (LEP-2)	$\approx 200$ (LEP-1) $\approx 600$ (LEP-2)	1989-95 (LEP-1) 1996-2000 (LEP-2)	ALEPH, OPAL, DELPHI, L3	CERN

Weźmy LEPI

$$\sigma(e^+e^- \rightarrow e^+e^-) \simeq 400 \text{ nb} = 4 \cdot 10^5 \text{ pb dla } \sqrt{s} = 91.2 \text{ GeV}$$

$$L_{\text{int}} = 200 \text{ pb}^{-1}$$

$$\#(e^+e^- \rightarrow e^+e^-) = 4 \cdot 10^5 \text{ pb} \cdot 2 \cdot 10^2 \text{ pb}^{-1} = 8 \cdot 10^7 \simeq 10^8$$

$$1 \text{ barn} = 2568 \text{ GeV}^{-2},$$

$$1 \text{ GeV}^{-2} = 3.894 \cdot 10^{-4} \text{ bn.}$$

Więcej o Bhabha, 0807.4691, Actis, Czakon, JG, Riemann

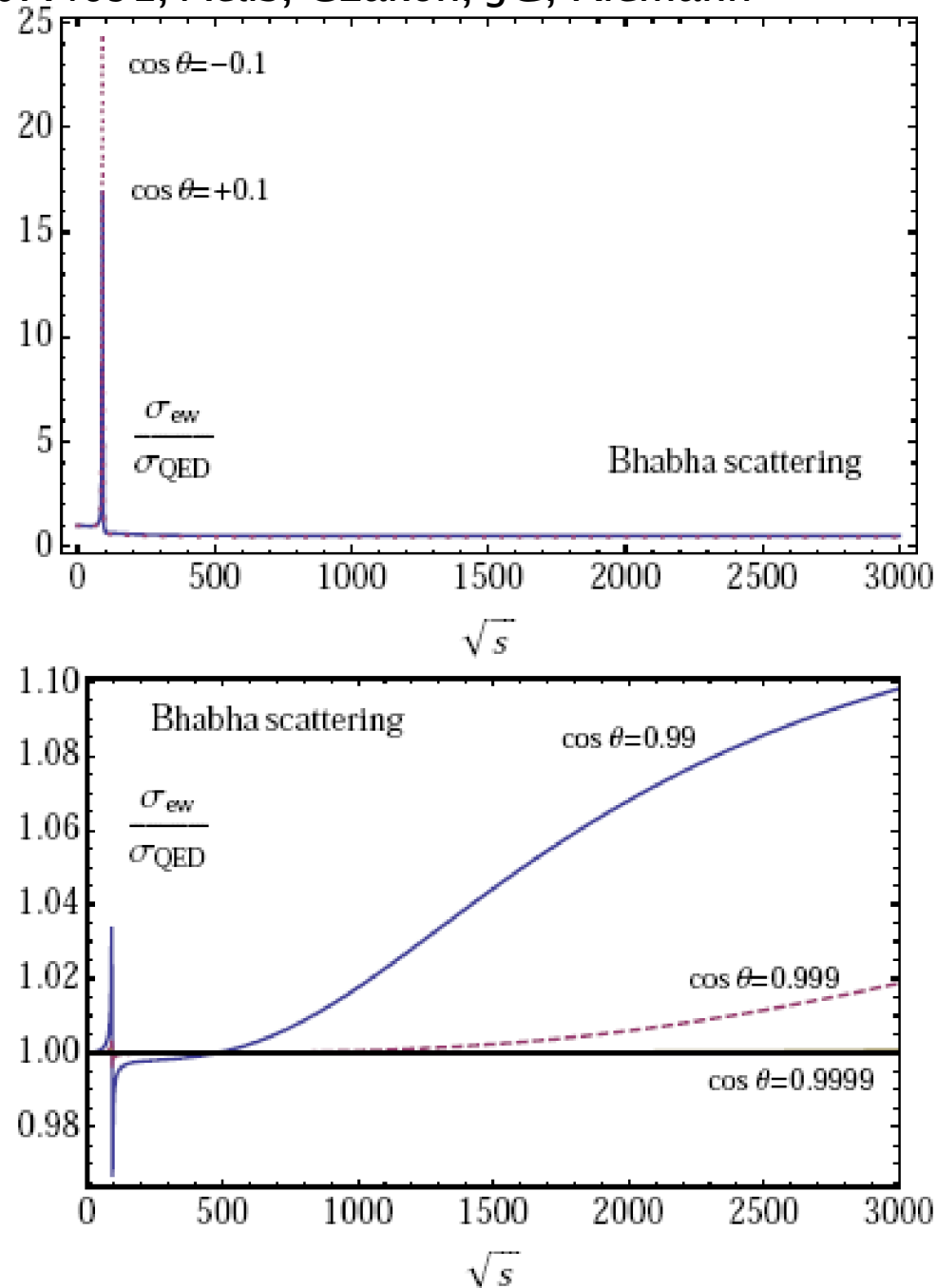
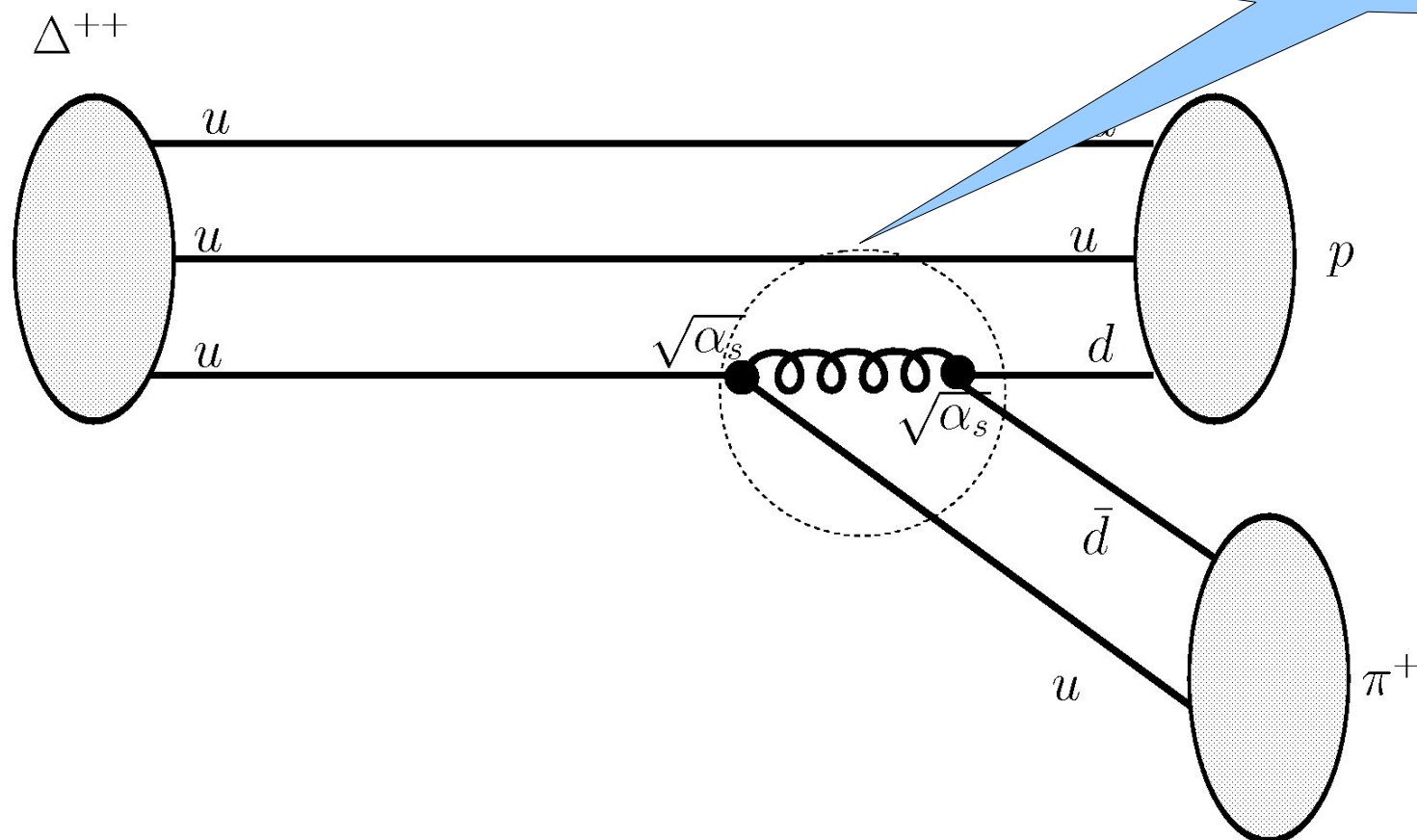


FIG. 1: Ratio of electroweak to QED Bhabha scattering cross-section at large angles (up) and small angles (down) as a function of  $\sqrt{s}$ .



# Rozpady a stałe sprzężenia

- istnieje (na ogół) korelacja pomiędzy czasem życia cząstek a rodzajem oddziaływania
- np. rozpad (silny), proton i pion widoczne przy odległości ok. 1 fm, co odpowiada czasowi życia ok.  $10^{-23}$  s (jak obliczyć?)



# Rozpady a stałe sprzężenia

- Rozpady słabe mają o wiele większą rozpiętość skali, np. Rozpad swobodnego **neutronu** trwa ok. 15 min., a rozpad **mionu** ok.  $2.2 \cdot 10^{-6}$  s;
- Natomiast rozpad neutralnego pionu na dwa fotony trwa około  $10^{-16}$  s;
- Ogólnie można się spodziewać

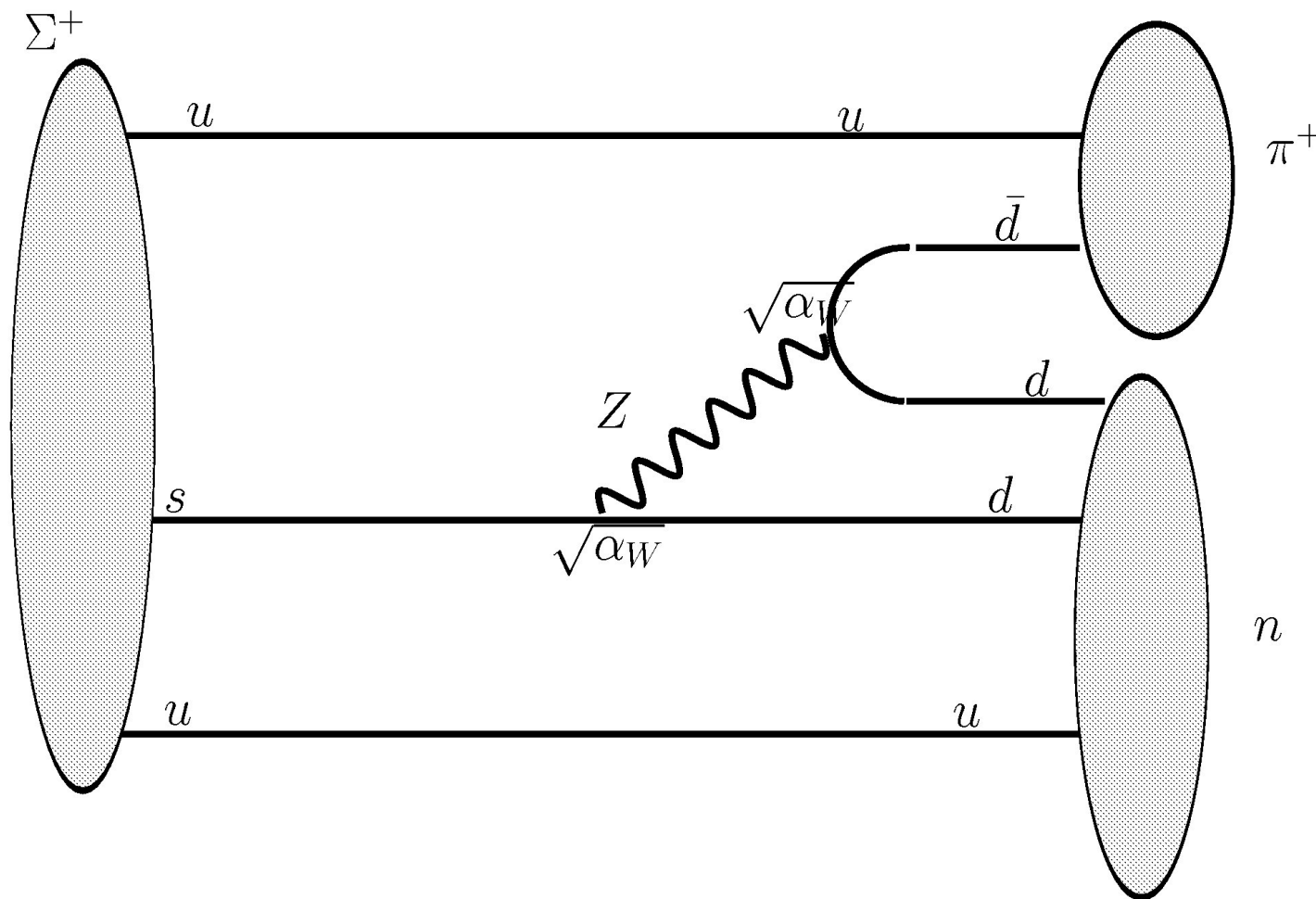
$$\left( \frac{\tau_{\text{silne}}}{\tau_{e-m}} \right) \simeq \left( \frac{\alpha_s}{\alpha} \right) \simeq \left( \frac{0.1 \div 1}{137} \right)^2 \simeq 10^4 \div 10^6$$

- W istocie:  $10^{-23}/10^{-16}$  to około  $10^{-7}$
- Rozpady słabe to z kolei dłuższe czasy życia

# Rozpad słaby

$$\frac{\tau(\Delta^{++} \rightarrow p\pi^+)}{\tau(\Sigma^+ \rightarrow n\pi^+)} \simeq \frac{10^{-23} \text{ s}}{10^{-10} \text{ s}} = 10^{-13} \equiv \left(\frac{\alpha_W}{\alpha_s}\right)^2$$

$10^{(-6)}$



Jeśli 1

# Masa bozonu W

- Przyjmijmy, że prawdopodobieństwo produkcji w oddziaływaniu kwarku d (na poprzednim rysunku) bozonu Z(W) jest równa prawdopodobieństwu emisji fotonu
- Jedyna różnica w masie propagacji cząstek
- Wtedy poprzednia relacja daje

$$\alpha_W = \frac{\alpha}{(M_W/m_p)^2} \approx 10^{-6}$$

- Dla  $\alpha$  rzędu 1/100, mamy masę W rzędu 100 mas protonu **(i tak jest rzeczywiście!)**

- Tak więc znamy już hierarchię wszystkich podstawowych oddziaływań ze względu na siłę stałych sprzężenia

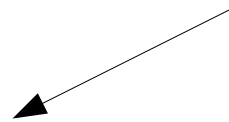
# Prawa zachowania

ENERGII

PĘDU

MOMENTU PĘDU

ŁADUNKU



*Mniej pewne*

LICZBY BARIONOWEJ

LICZBY LEPTONOWEJ

IZOSPINU

DZIWNOŚCI

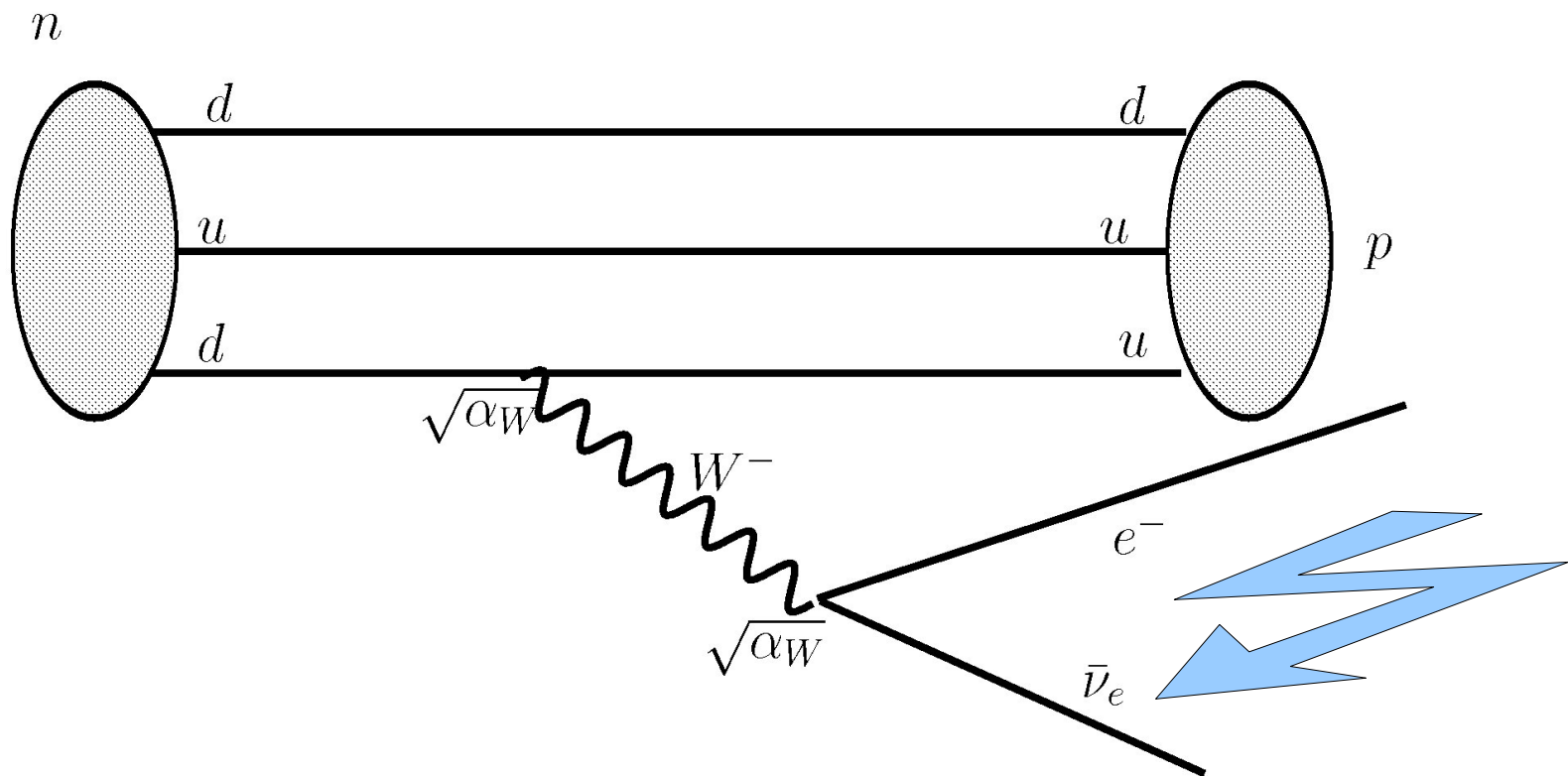
POWABU,

HIPERŁADUNKU

*Pewnik (no, nie do końca (!))  
to też się bada!*

# Liczba leptonowa

- Zauważmy, że w rozpadzie neutronu używam dziwnego oznaczenia dla neutrina (kreseczka), to stanie się jasne nieco później



# *Liczba barionowa i leptonowa*

- Dla cząstek (antycząstek przeciwne)

Niezachowanie liczby  
leptonowej

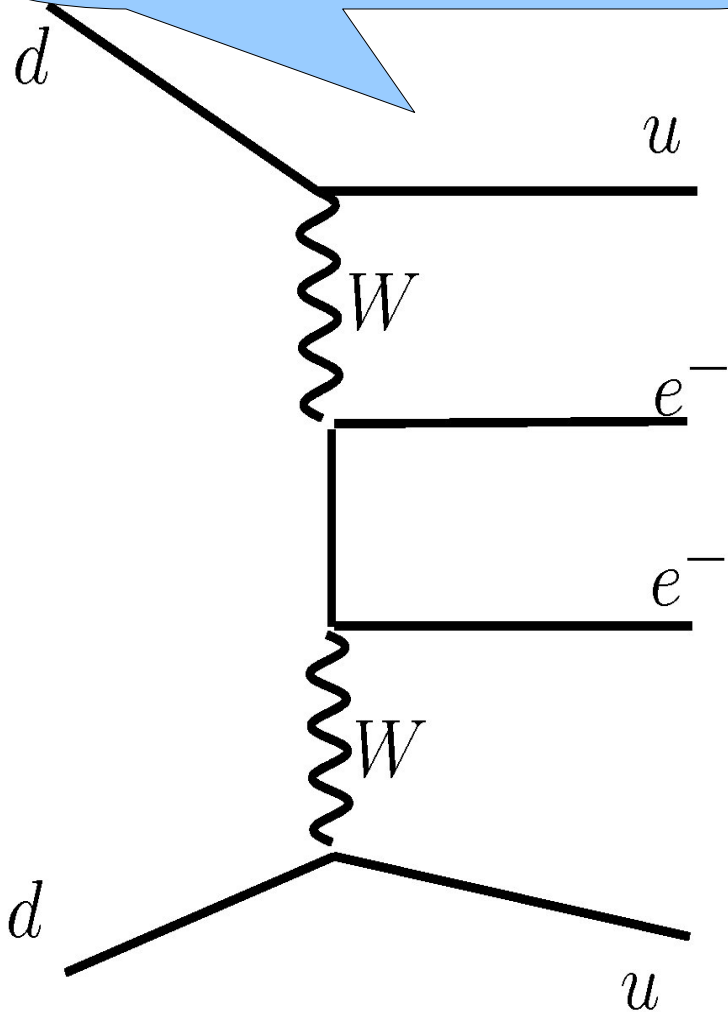
$$\tau(^{76}\text{Ge} \rightarrow ^{76}\text{Se} + 0\nu + e^- + e^-) > 10^{26} \text{ lat}$$

$$\tau(p \rightarrow e^+ \pi^0) > 10^{33} \text{ lat}$$

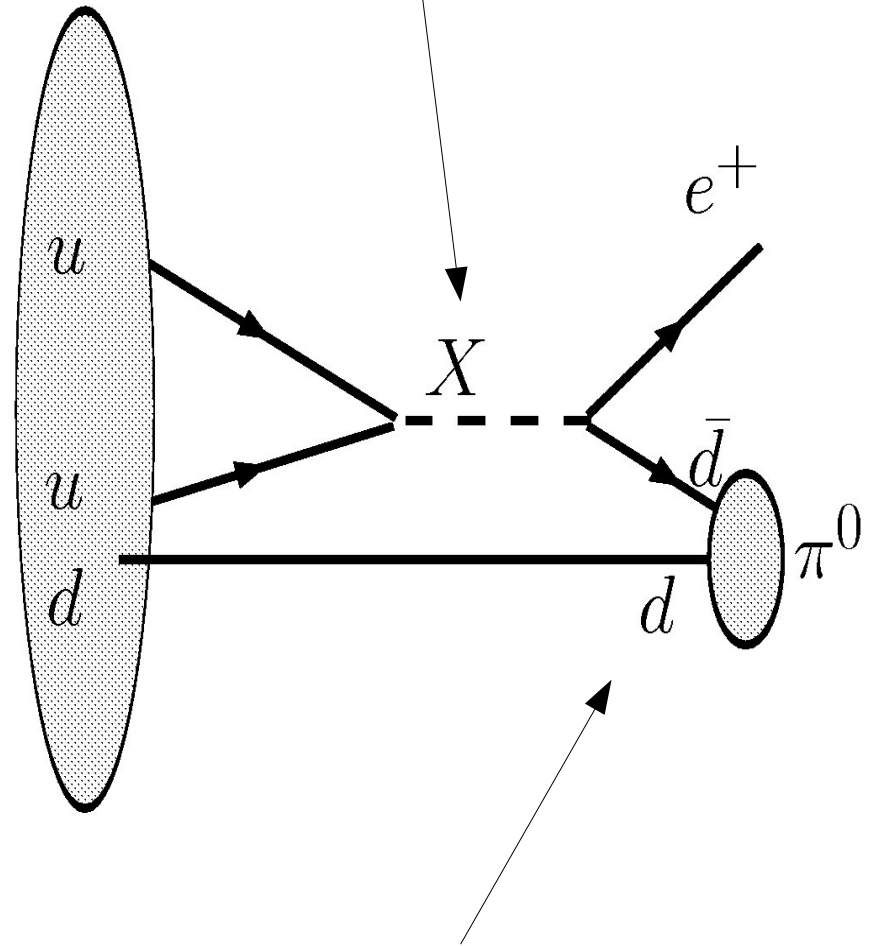
Niezachowanie liczby  
barionowej



A to bezneutrinowy, podwójny rozpad beta, usilnie poszukiwany (ćwiczenia)



Nowy bozon X i niestandardowe sprzężenia



Co mam na myśli?

Tak może być gdy leptony z kwarkami występują w tych samych multipletach: teorie GUT

Każda cząstka ma "swoją" liczbę kwantową  $L_j$

$L_e=1$   
(dla antycząstek -1)

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu^- \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau^- \end{pmatrix}$$

Zarówno górne jak i dolne:  
 $L_\tau=1$

$I_3=+1/2$

$$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}$$

górne:  
 $L_c(c)=+1, L_c(t)=0$   
 $L_t(c)=0, L_t(t)=+1$

$I_3=-1/2$

$$\sum_i L_j^i = const, \quad j = e, \mu, \tau$$

**zabronione:**

dolne:  
 $L_s(s)=-1, L_s(b)=0$   
 $L_b(s)=0, L_b(b)=-1$

$$\mu^- \rightarrow e^- + \gamma$$

$$\mu^- \rightarrow e^- + e^+ + e^- + \gamma$$

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$$

Dla antycząstek zmiana znaków liczb

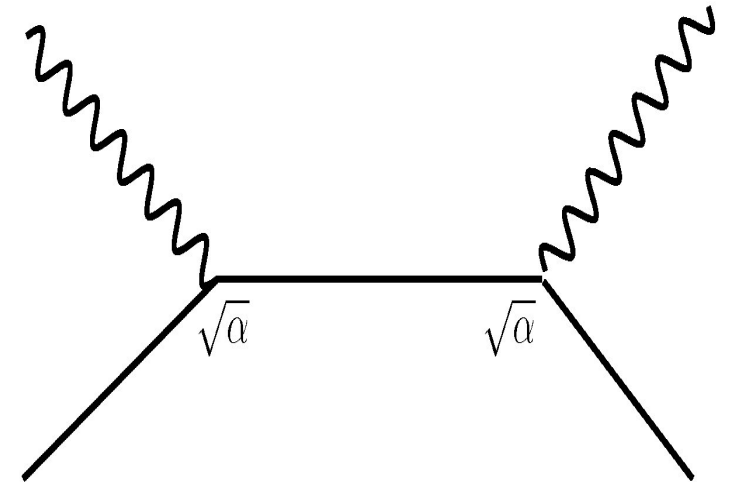
Jeszcze pokażę, że liczby kwarkowe nie są zachowane (często), liczby leptonowe są, bo neutrina są bezmasowe (prawie)

	$e^-$ elektron	$\nu_e$ neutrino elektronowe	$\mu^-$ mion	$\nu_\mu$ neutrino mionowe	$\tau^-$ taon	$\nu_\tau$ neutrino taonowe
ładunek [e]	-1	0	-1	0	-1	0
liczba barionowa	0	0	0	0	0	0
elektronowa liczba leptonowa	1	1	0	0	0	0
mionowa liczba leptonowa	0	0	1	1	0	0
taonowa liczba leptonowa	0	0	0	0	1	1
spin [ $\hbar$ ]	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2
masa [MeV/c <sup>2</sup> ]	0,511	0,000015	106	0,17	1777	18

	<b>d</b> dolny	<b>u</b> górnny	<b>s</b> dziwny	<b>c</b> powabny	<b>b</b> piękny	<b>t</b> prawdziwy
ładunek [e]	-1/3	+2/3	-1/3	+2/3	-1/3	+2/3
liczba barionowa	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3
liczba leptonowa	0	0	0	0	0	0
spin [ $\hbar$ ]	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2
izospin I	1/2	1/2	0	0	0	0
składowa I <sub>3</sub>	-1/2	+1/2	0	0	0	0
dziwność S	0	0	-1	0	0	0
powab C	0	0	0	1	0	0
piękno B	0	0	0	0	-1	0
prawda T	0	0	0	0	0	1
masa [GeV/c <sup>2</sup> ]	0,005	0,0027	0,1	1,2	4,2	174

# Ładunek jako miara amplitudy prawdopodobieństwa (emisji lub absorpcji fotonu)

- Weźmy rozpraszanie fotonu na elektronie (rozpraszanie Thompsona)
- **2/3** to efekt polaryzacji (dwie możliwe na 3),  $\alpha^2$  - miara siły oddziaływania, pole w nawiasie: padający foton “widzi” elektron jak tarczę o promieniu **2 R**



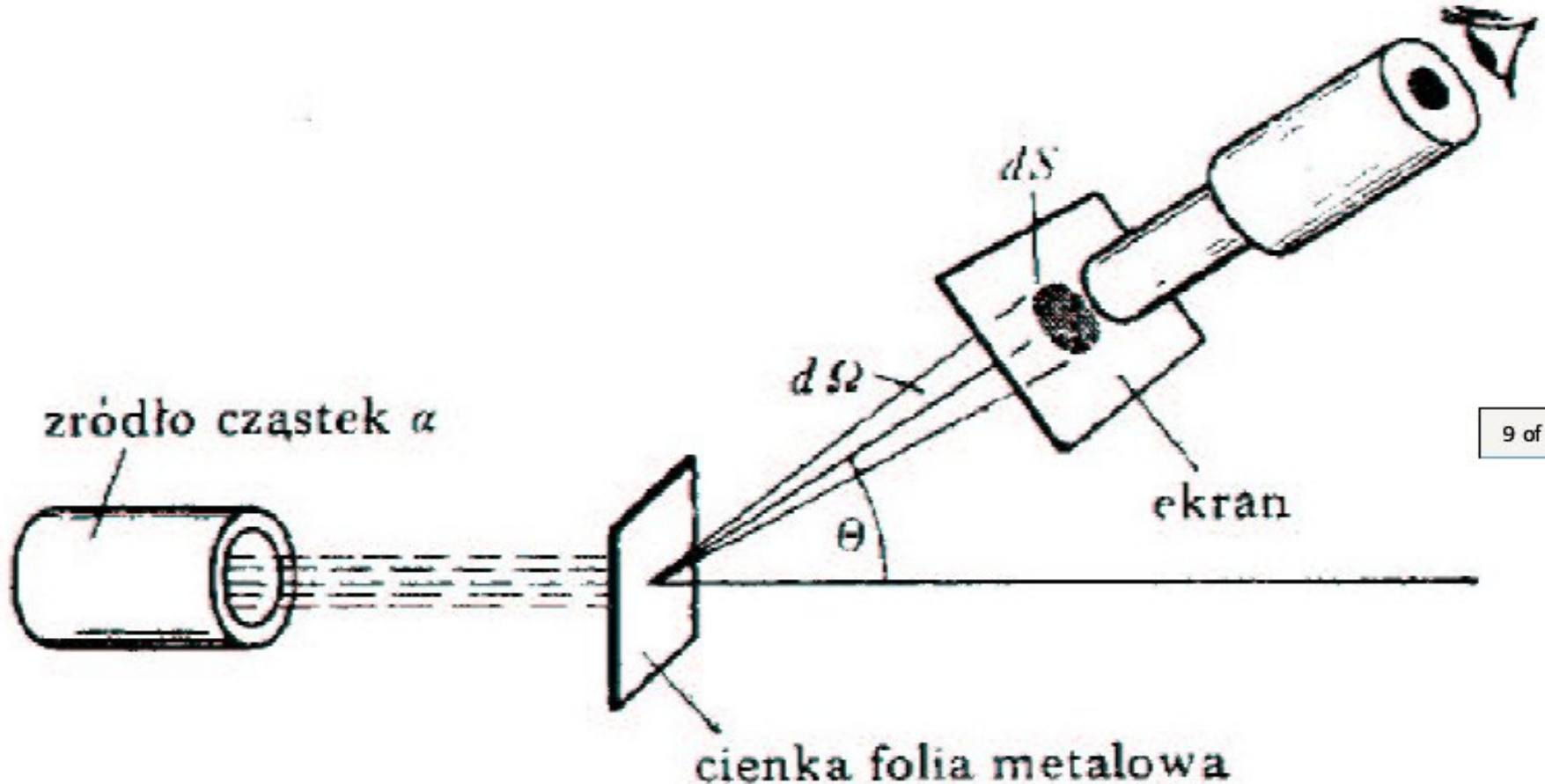
$$\text{Prawdopodobieństwo} \simeq (\sqrt{\alpha} \cdot \sqrt{\alpha})^2 = \alpha^2$$

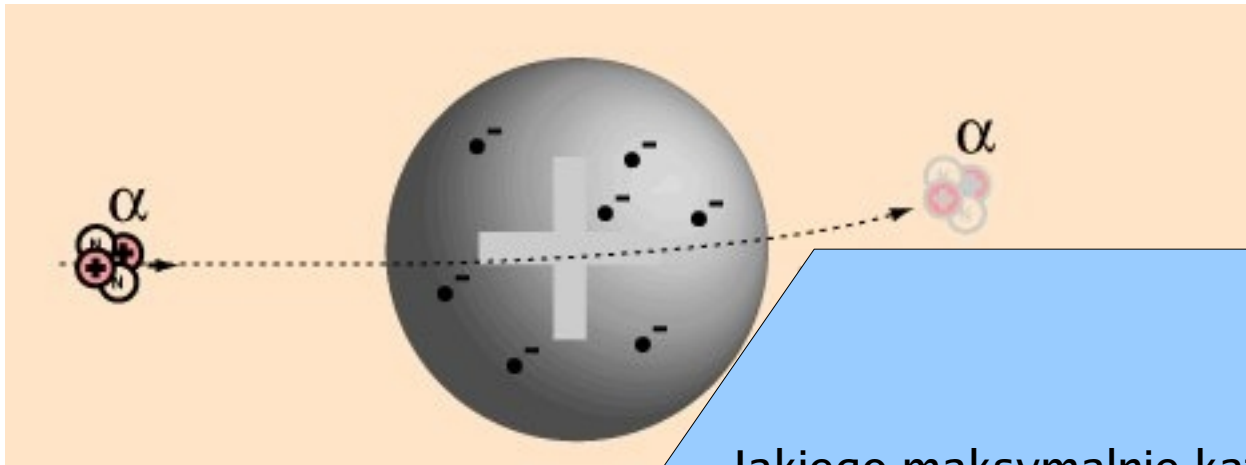
Dokładnie:

$$\sigma = \frac{2}{3} \alpha^2 (4\pi R_e^2), \quad R_e = \frac{\hbar}{m_e c}$$

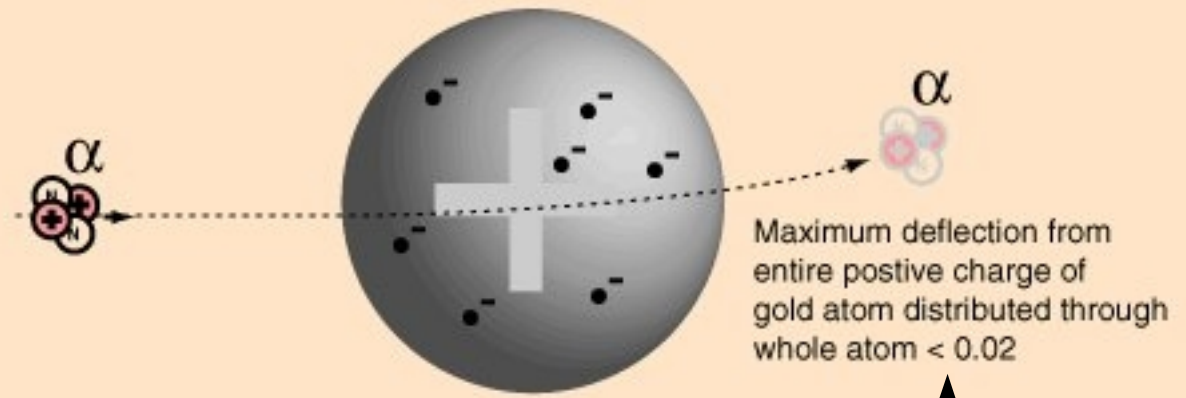
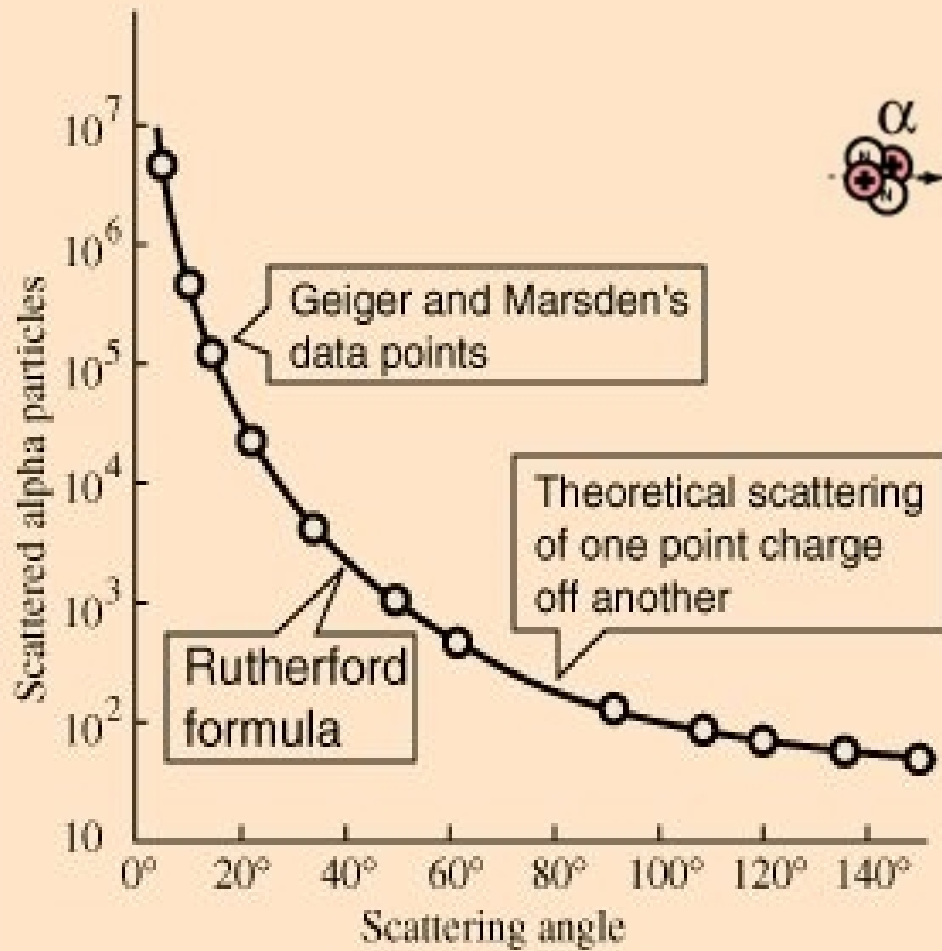
# Doświadczenie Marsdena, Geigera

- Kąt  $\Theta$  duży: rozpraszanie do tyłu
- Rutherford: atom  $10^{-10}\text{m}$ , jądro:  $10^{-14}\text{m}$
- “To tak jakby wystrzelić pocisk w kierunku kawałka papierku, a on by się odbił i uderzył was z powrotem”





Jakiego maksymalnie kąta rozproszenia możemy się spodziewać w tym modelu?

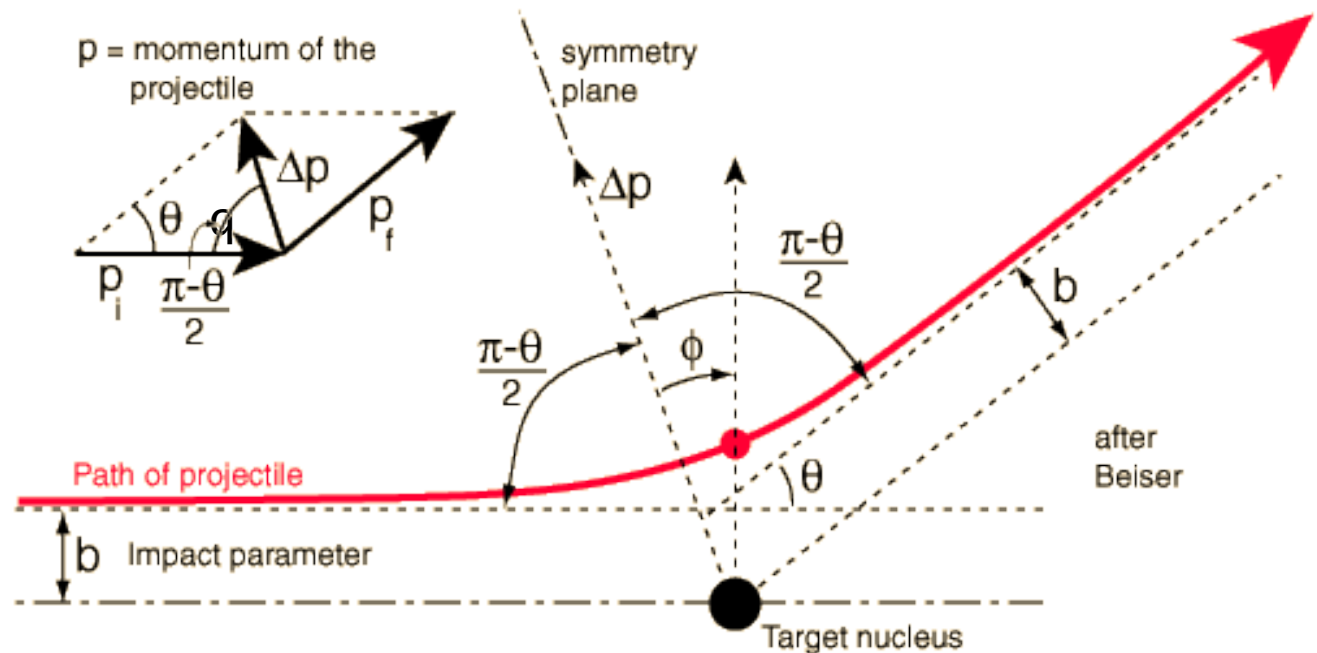


Na ćwiczenia?

Doszli do około 140, powyżej odstępstwa (oddziaływanie z samym jądrem, plus...)

# Kinematyka

- Przekaz pędu ( $Q^2$ ) związany z kątem rozpraszania  $\Theta$ : następny slajd



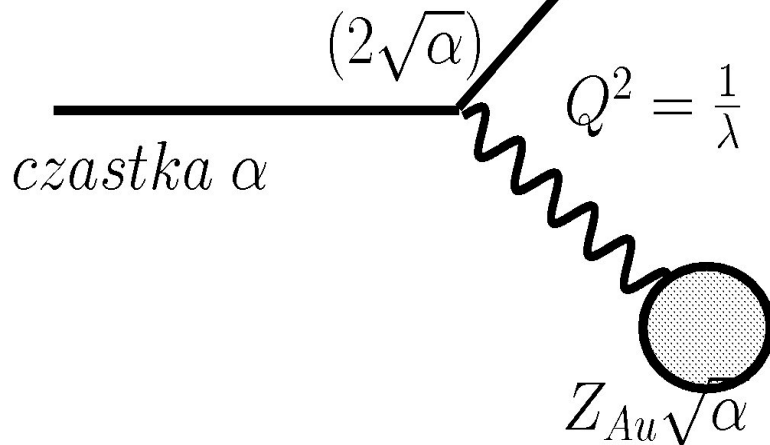


# Doświadczenie Rutherforda i jego analog w jeszcze wyższych energiach

- Gdy długość fotonu rzędu rozmiarów atomu (angstrem), cząstka  $\alpha$  rozprasza się na elektronach powłoki
- Gdy długość fotonu rzędu rozmiarów jądra (fermi), to kulombowskie rozpraszanie ładunku ( $2e$ ) na jądrze ( $Ze$ )

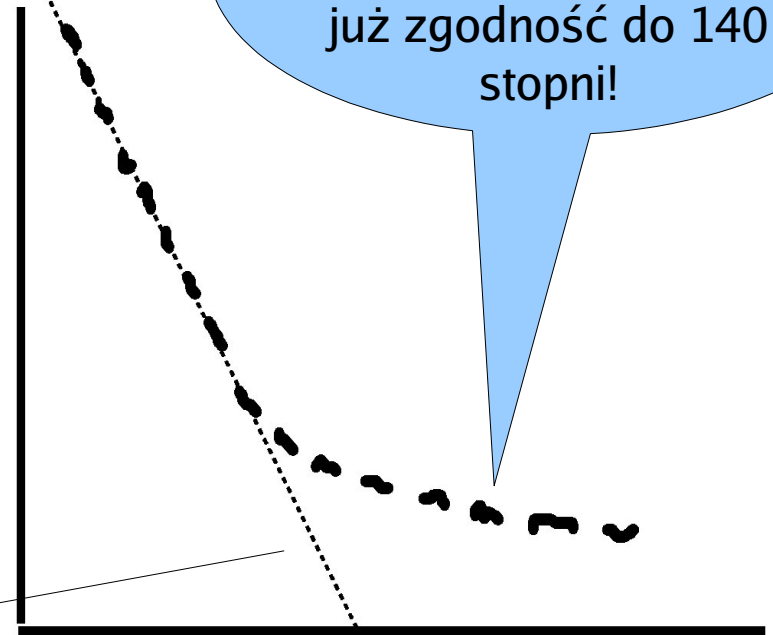
$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{(2\sqrt{\alpha} Z\sqrt{\alpha})^2}{4E^2} \frac{1}{\sin^4 \Theta/2} = \frac{4Z^2\alpha^2}{4E^2} \frac{1}{\sin^4 \frac{\Theta}{2}}$$

To jest  $Q^2$ , przekaz pędu



Rozpraszanie kulombowskie

$$\ln \left( \frac{d\sigma}{d \cos \Theta} \right)$$

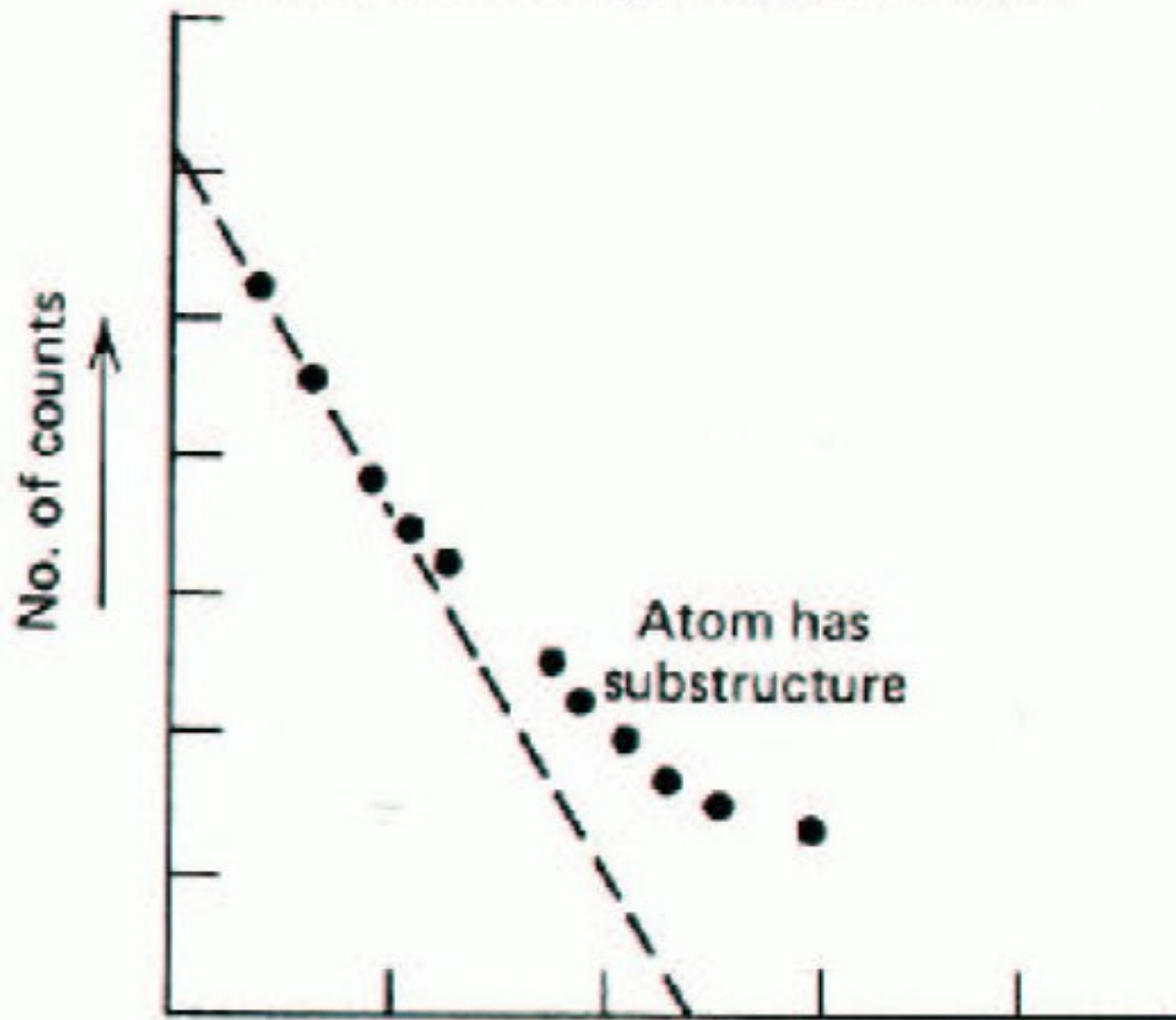


$$\ln \left( \sin \frac{\Theta}{2} \right)$$

Często zła interpretacja:

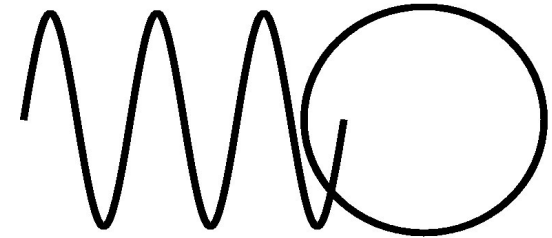
Odstępstwo, Duże kąty: istnieje jądro; o jądrze świadczy już zgodność do 140 stopni!

Au target *Phil. Mag.* xxi, 669 (1911)

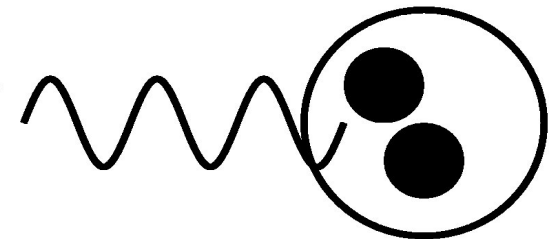


# Znaczenie długości fali cząstki padającej

*foton – jadro*

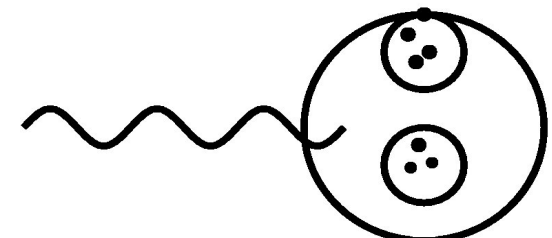


*foton – nukleony*



Zły obraz, raczej ...

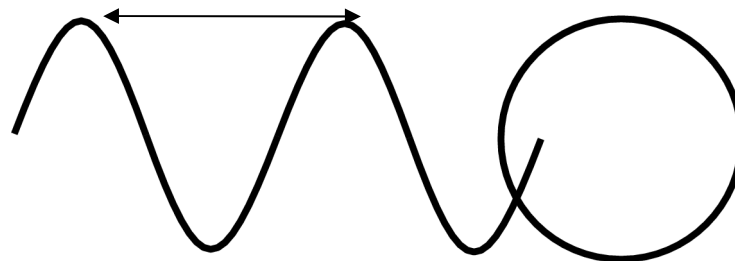
*foton – partony*



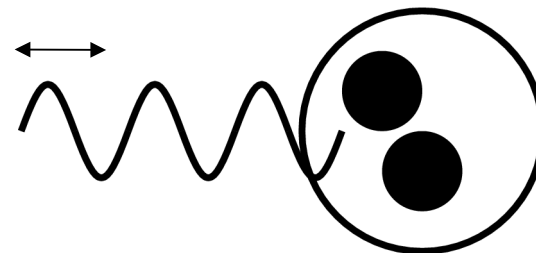
# Znaczenie długości fali cząstki padającej

Obecnie  
“mikroskopy” widzą  
obiekty o  
rozmiarach  $10^{-15}$  m

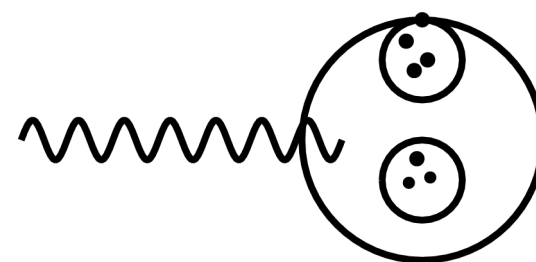
*foton – jądro*



*foton – nukleony*



*foton – partony*



# *Tak więc stosujemy odpowiednie narzędzie do odpowiedniego celu...*



Zdjęcia zrobione w tych samych warunkach pogodowych

# Jeszcze większe energie, pp, CERN 1973

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} \sim \frac{\alpha_s^2}{4E^2} \frac{1}{\sin^4 \frac{\Theta}{2}}$$

