




CZĄSTKI ELEMENTARNE I ODDZIAŁYWANIA

I WPROWADZENIE:

O CZYM JEST FIZYKA CZĄSTEK?

Agnieszka Obłąkowska-Mucha

<http://home.agh.edu.pl/~amucha/>
Katedra Oddziaływań i Detekcji Cząstek
D11 p. 106



Organizacja zajęć

- Zajęcia mają na celu uzupełnienie wiedzy naszych studentów o zjawiska fizyczne w skali **mniejszej niż 1 fermi** i zapoznanie ich z pracami prowadzonymi w Katedrze Oddziaływań i Detekcji Cząstek.
- Wykład/Ćwiczenia/Projekt w wymiarze godzin 26/6/6/ prowadzone będą zamiennie i zakończone projektem z analizą danych eksperymentalnych.

	Wykład	Ćwicz. aud	Ćwicz. lab	Ćw. proj.	SUMA	ECTS	Egz.
Cząstki elementarne i oddziaływania	26	6	6	8	46	4	+

Ocena końcowa wyznaczona jest jako średnia ważona $0.5 E + 0.25 \text{ } \acute{C}w + 0,25 (1/2P+1/2L)$.

Organizacja zajęć

- Największy nacisk położony zostanie na fizykę w obecnie prowadzonych eksperymentach i metody analizy danych.
- Dopełnieniem Fizyki Cząstek są **Oddziaływania promieniowania jonizującego z materią**.

Literatura:

A.Bettini "Introduction to Elementary Particle Physics"

M.Thomson "Modern Particle Physics"

B.Martin, G.Shaw "Particle Physics"

C.Grupen, B.Shwartz "Particle detectors"

D.H Perkins „[Introduction to High Energy Physics](#)”

Zachęcam do dyskusji i zadawania pytań (na które nie zawsze znam odpowiedź).

Trochę historii i dwie koncepcje

- Dwa poglądy na budowę materii.

Materia ma budowę ciągłą-własności rozłożone są w sposób ciągły w przestrzeni:

fale, ośrodki ciągłe (płyyny), ciała stałe: gęstość, elektryczne i magnetyczne

POLA

Materia ma budowę dyskretną (molekuły, atomy, kwanty energii,

CZĄSTKI

- Które podejście jest właściwe?
- Jaka nauka płynie z historii odkryć w nauce?
- Jakie odkrycia nazwiemy obecnie „przełomowe”?



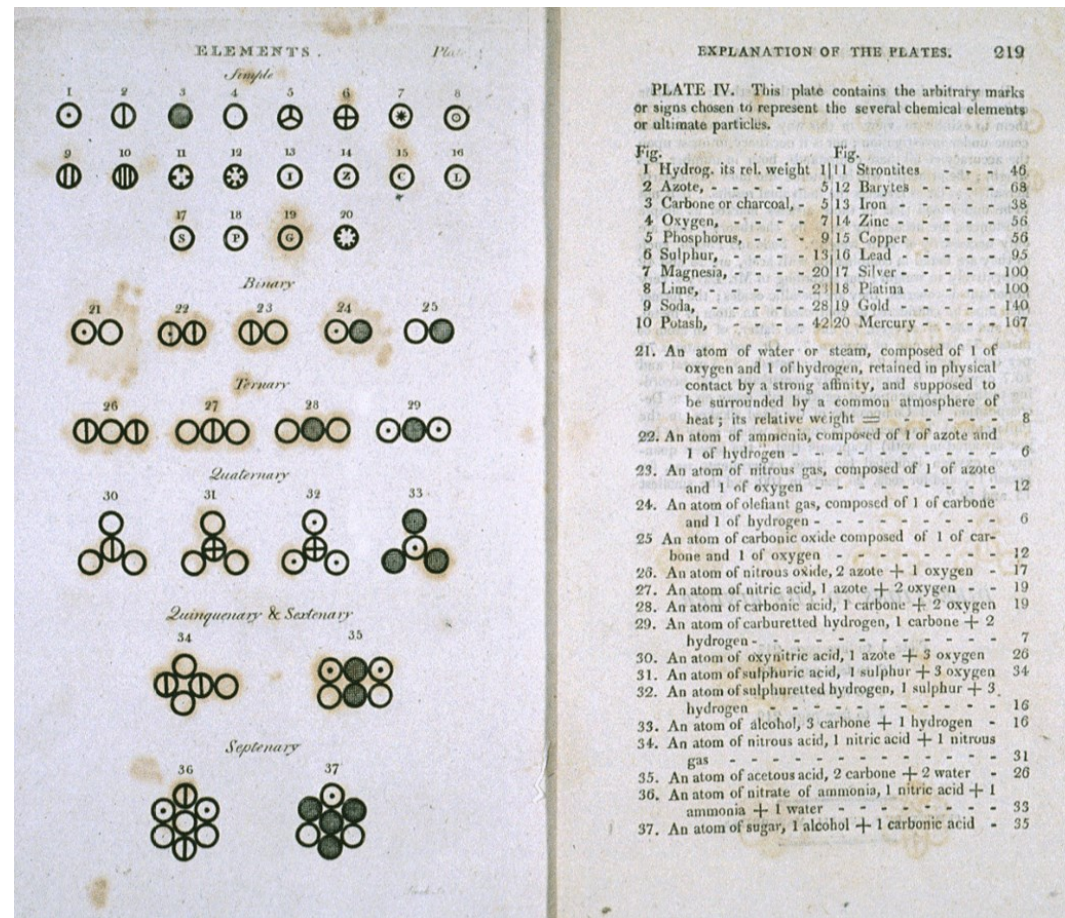
Trochę historii – chemia i pierwsza kwantyzacja

- Koncepcja Johna Daltona z roku 1808 (1869 – układ okresowy Mendelejewa)

Każda **molekuła** ma masę, która jest wielokrotnością masy wodoru.

$$M(C^{12}) \propto 12 m_H$$

Mamy 92 stabilnych atomów w przyrodzie uważanych do końca XIX wieku za elementarne.



Trochę historii – rozpad promieniotwórczy

- Henri Becquerel 1896 – odkrycie naturalnej promieniotwórczości



Przypadkowo położony magnes spowodował, że strumień cząstek rozdzielił się!

W dodatku kąt odchylenia cząstek w lewo był inny niż w prawo.

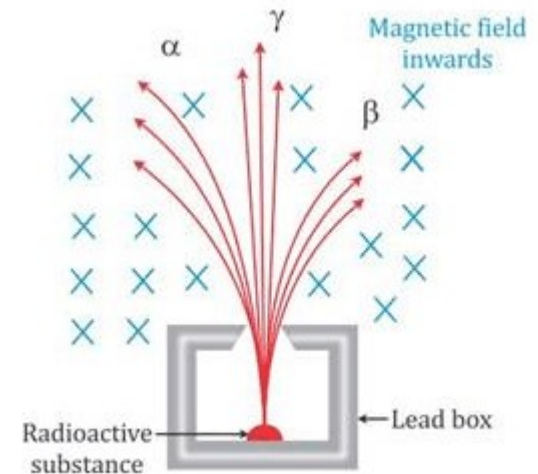
- Trzy rodzaje promieniowania.

Czy ciągłego, czy dyskretnego?

- Sygnał mógł być obserwowany na emulsji jądrowej lub w komorze drutowej (pik pik pik piiiik..)

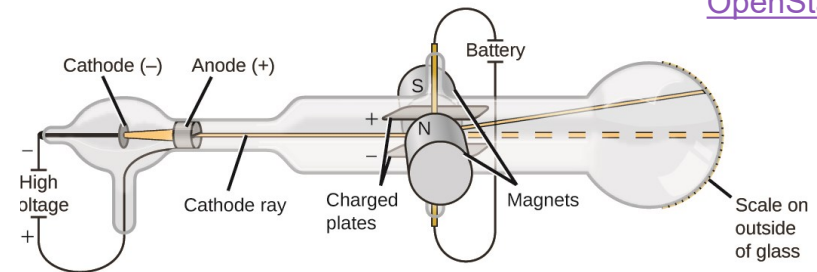
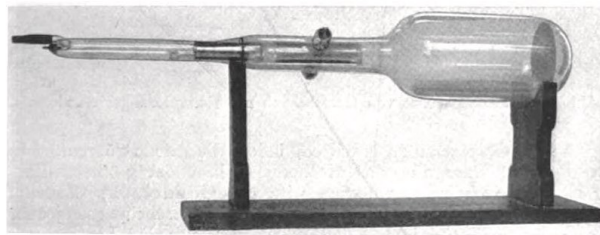
Pierwsza wiązka cząstek!

Taka wiązka cząstek α posłużyła Ruthefortowi w pokazaniu, że atom składa się z ciężkiego jądra i krążących wokół niego elektronów.



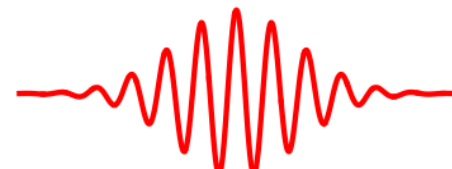
Trochę historii – odkrycia elektronu (two faces of electron)

- J.J. Thomson 1897 doprowadził blisko 50-letnie badania nad promieniami katodowymi do wniosku, że są to ujemnie naładowane cząstki, wyznaczył stosunek e/m ,
- Uzgodniono ich nazwę jako „elektrony”.
- Elektrony były lekkie, Thomson pokazał, że $m_e \approx \frac{1}{1000} m_H$



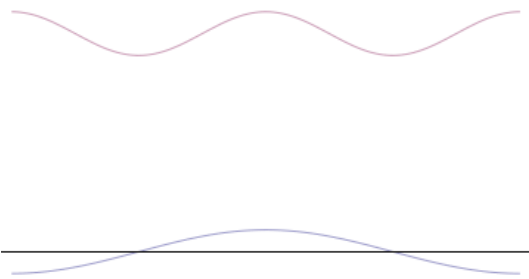
Falowa twarz elektronu

- Hipoteza Louisa DeBroglie'a 1923 o falowej naturze elektronu.
- Czy potrafimy pokazać, jak DeBroglie „wymyślił” $\lambda = \frac{h}{p}$?
(hint: bierzemy Einsteina, mieszamy z Planckiem i kładziemy $m_0 = 0$)
- Jeśli elektron jest falą, to gdzie on właściwie jest?
(hint: co na to Heisenberg?)



Elektron to paczka falowa (?), jeśli ma lepiej zlokalizowana, to ma większe rozmycie w przestrzeni pędu

<https://en.wikipedia.org/wiki/>



Trochę historii – co to jest γ ?

- Odkrycie promieniotwórczości pozostawiło pytanie: czym są cząstki nie odchylone w polu magnetycznym?
- Co to jest światło?
 - fala elektromagnetyczna,
 - rozchodzi się w sposób ciągły w przestrzeni.Jaki jest związek światła (fali) z neutralną częścią promieniowania?
- Planck (1900) – światło składa się z dyskretnych porcji energii, nazwanych fotonami (Einstein 1905) (przypomnienie wzorów):

$$E = \hbar\omega, \quad E = h\nu$$

Dlaczego nie widzimy skwantowanej fali?

Przykład: jeśli do Ziemi dociera światło ze Słońca o mocy 1000 W/m^2 i długości około 500 nm , to ile fotonów uderza w m^2 w ciągu sekundy?

Odp. ok. 2.5×10^{21}

Strumień fotonów jest dla nas ciągłą falą.

Jaki jest związek energii fali z amplitudą i z wzorem Plancka?

$$E = mc^2 = \sqrt{p^2 c^2 + m_0^2 c^4}$$

\downarrow \downarrow $\nearrow m_0 = 0$
 E_{kin} E_0

$$E = pc$$

$$p = \frac{E}{c}$$

$$E = h\nu = h \frac{c}{\lambda} \Rightarrow \frac{E}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

$$p = \frac{h}{\lambda}$$

$$m = 1 \text{ kg}$$

$$\nu = 10 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$p = 10 \text{ kg} \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\lambda = \frac{6.6 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}}{10 \text{ kg} \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 6.26 \cdot 10^{-35}$$

$$\frac{h \cdot \text{m} \cdot \text{s} \text{ kg} \frac{\text{m}}{\text{s}}}{\text{s}^2 \text{ kg} \frac{\text{m}}{\text{s}}} = m$$

Historia metodą odkryć

Czego nauczyła nas historia promieniowania?

- Pierwsze odkrycia dokonane były urządzeniami codziennego użytku (oko, soczewka) promieniowania naturalnego (światła).
- Dalsze badania składników materii wymagały:
 - źródeł promieniowania,
 - detektorów promieniowania,
- W dalszej przyszłości również:
 - zaawansowanych metod analizy danych.
- W latach 1930-40 odkryto pozyton, mion, neutrino, Dirac napisał sławne równanie, Rutherford z doktorantami przekonali świat o istnieniu jądra atomowego.
 - Czy hipoteza o ciągłej budowie materii zawsze upada po nowych obserwacjach?
 - Współczesne eksperymenty budowane są z bardzo dobrze określonym celem, np. badanie bozonu Higgsa, ciemnej energii.



W latach 60-tych wiele się zmieniło

~1955 – rozwój technik przyspieszania i detekcji cząstek, eksperymenty roproszeniowe

1960 – Świat cząstek elementarnych: p , n , e^- , e^+ , π , μ , Σ , Λ , Ω , ϕ ... stanowczo zbyt liczny .

Struktura wyjaśniona na podstawie Modelu Kwarkowego (M. Gell-Mann).

1974 – Odkrycie kwarku powabnego c .

1994 - 2000 teoria zebrana w **Modelu Standardowym**, została potwierdzona w zderzaczu LEP.

1. Wyjaśnia wszystkie wyniki doświadczalne.
2. Siły opisane są poprzez wymianę cząstek pośredniczących.
3. Kwarki są elementami punktowymi, bez struktury wewnętrznej,
3. Nie jest teorią pełną – wiele parametrów do wyjaśnienia.

2009 – start LHC – brakujące elementy i nowe teorie (supersymetria)

2012 – odkrycie bozonu Higgsa,

2015-2018 – Run II LHC

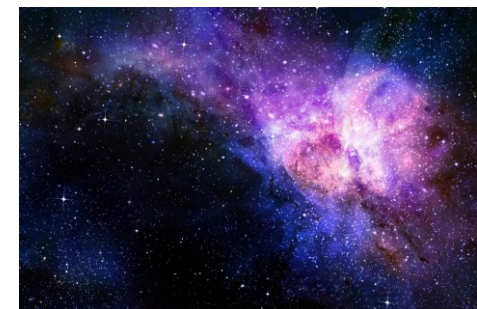
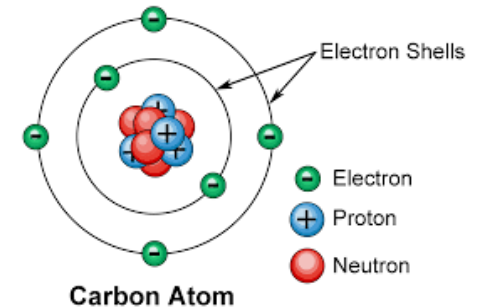
2022 – Run III LHC

Czego szukamy?

- Podstawowych składników materii ziemskiej (elektron, proton, neutron, neutrino),
- cząstek przybyłych na Ziemię z kosmosu (miony, piony, cząstki dziwne...

Również:

- cząstek ciężkich, krótkożyciowych, wytworzonych na Ziemi w celu odtworzenia Wielkiego Wybuchu,
- cząstek egzotycznych, nieprzewidzianych przez Modele,
- cząstek – kandydatów na ciemną energię.



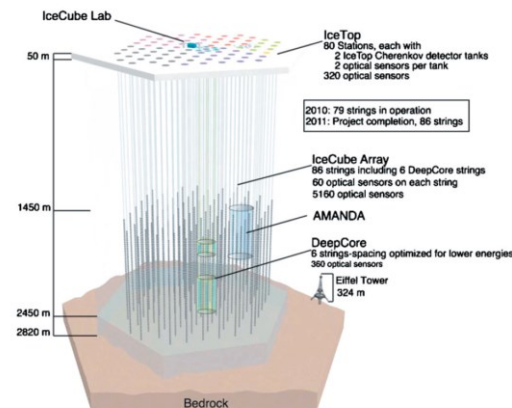
Czego szukamy?

Co możemy zrobić?

- budować detektory na Ziemi i czekać, aż coś ciekawego przyleci,
- wysłać sondy w górne warstwy atmosfery, w kosmos i odległe Galaktyki,
- drążyć otwory pod Ziemią, pod lądolodem, na dnie jezior i oceanów.

Ale znacznie ciekawiej (ale i drożej) jest:

- budować zespoły przyspieszające naładowane cząstki i detektory, które rejestrują, co powstało po ich zderzeniu.



Jak tu żyć?

A tymczasem życie pokazuje:

LHC Page1 Fill: 7495 No data t(SB): 00:00:00 04-10-19 09:06:50

SHUTDOWN: NO BEAM

Subsystem		State	Request	HV State
LHC	NO_BEAM	OK	NO_BEAM	NOT_READY
BCM	UNKNOWN	OK	NO_BEAM	NOT_READY
Magnet	OFF	OK	NO_BEAM	NOT_READY
Velo	OPEN	OK	NO_BEAM	NOT_READY
Clock	ERROR	OK	NO_BEAM	NOT_READY

Handshakes: LHC OK, LHCb OK, Com STANDBY, VETO OK

Voltages: LHCb HV & LV OK, High Voltage OK

Subdetector: VELO OK, TT OK, IT OK, OT OK, RICH1 OK, RICH2 OK, PRS OK, ECAL OK, HCAL OK, MUON OK, HRC OK

Comments (02-Oct-2019 08:14:54):
*** LONG SHUTDOWN 2 ***
FIRST BEAM EXPECTED SPRING 2021

BIS status and SMP flags

	B1	B2
Link Status of Beam Permits	Except	Except
Global Beam Permit	Except	Except
Setup Beam	Except	Except
Beam Presence	Except	Except
Moveable Devices Allowed In	Except	Except
Stable Beams	Except	Except

AFS: 75_150ns_733Pb_733_702_468_42bpi_20inj PM Status B1: ENABLED PM Status B2: ENABLED

LHCb Operation State

Mode: SHUTDOWN, Fill Number: 7495, Energy: 7864.2 GeV

Magnet Status: Set Current: 0 A, Measured Current: 0 A, Polarity: Down

Velo Position: Position: IN, XA: -1001.00 mm, XC: -1001.00 mm, Y: -1001.00 mm

Rich1 Gas: Pressure: 977.0 hPa, Temperature: 294.2 K, Rich2 Gas: Pressure: 975.60 hPa, Temperature: 294.2 K

Database Status: Run DB: OK, Cond DB: Not OK, PVSS Archive: OK

Cooling Plant Status: Cooling: IT, TT, OT, Rich, Alarms: FALSE, FALSE, FALSE, TRUE, Faults: FALSE, FALSE, TRUE, TRUE

DSS Mixed water temperature: D1/D2: 12.37 °C, D3-A: 16.16 °C, D3-B: 15.81 °C, Bunker: 18.00 °C, Calo A: 18.01 °C, Calo C: 18.34 °C, UXA-A: 14.08 °C, UXA-B1: 17.67 °C, UXA-C: 18.16 °C

Background Status and Beam Permits: Permits: TRUE, FALSE, FALSE, FoM: 50.RS2/32: 0.387 0.159 (S.RS2/32): 1.127 0.382

Safety: TT: NOT_READY, IT: NOT_READY, RICH: READY, MUON: NOT_READY

LHC wystartował w roku 2022 z rocznym opóźnieniem spowodowanym Covid-19

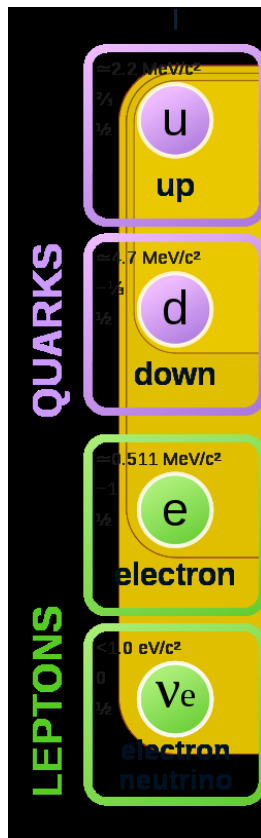
O czym w końcu będzie ten wykład? O cząstkach. Elementarnych cząstkach.

Standard Model of Elementary Particles

	three generations of matter (fermions)			interactions / force carriers (bosons)	
	I	II	III		
mass	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 124.97 \text{ GeV}/c^2$
charge	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0
spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
QUARKS	u up	c charm	t top	g gluon	H higgs
	d down	s strange	b bottom	γ photon	
	e electron	μ muon	τ tau	Z Z boson	
LEPTONS	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	W W boson	
				SCALAR BOSONS	
				GAUGE BOSONS VECTOR BOSONS	

Proton, neutron i ziemska materia

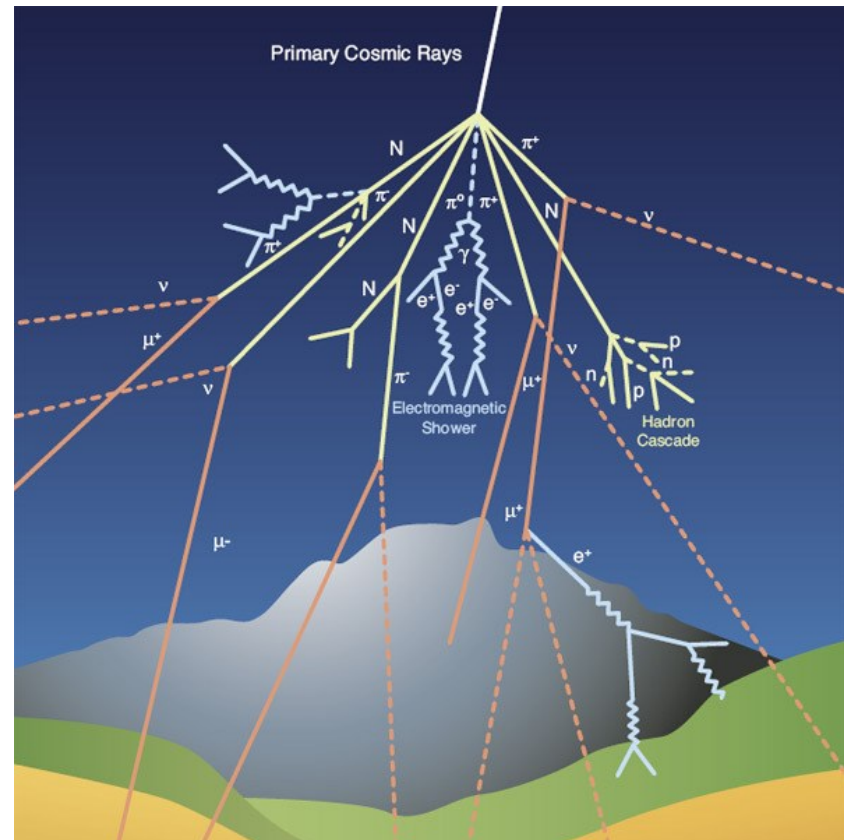
Materia znaleziona na Ziemi składa się z cząstek z pierwszej rodziny:



Promieniowanie kosmiczne

Z kosmosu przyleciały dziwne cząstki: kaony, piony i nowe neutrino (mionowe)

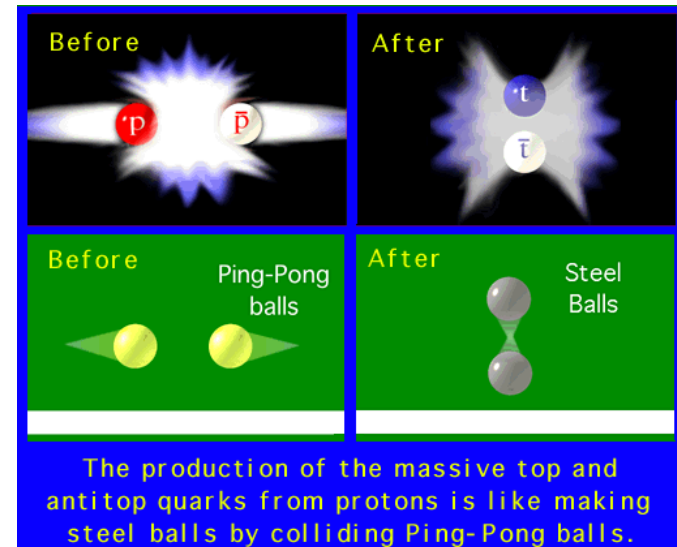
QUARKS	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ u up	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ c charm
	$\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ d down	$\approx 96 \text{ MeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ s strange
LEPTONS	$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$ e electron	$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$ μ muon
	$< 1.0 \text{ eV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ ν_e electron neutrino	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ ν_μ muon neutrino



Piękno i powab wymagają topowej energii

A trzecia rodzina to wymaga specjalnych urządzeń, pojawia się tylko przy najwyższych energiach!

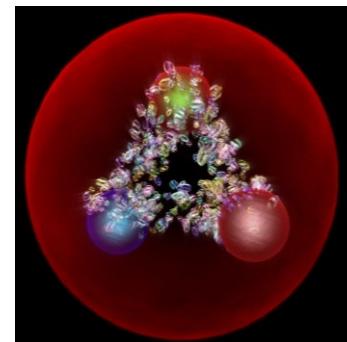
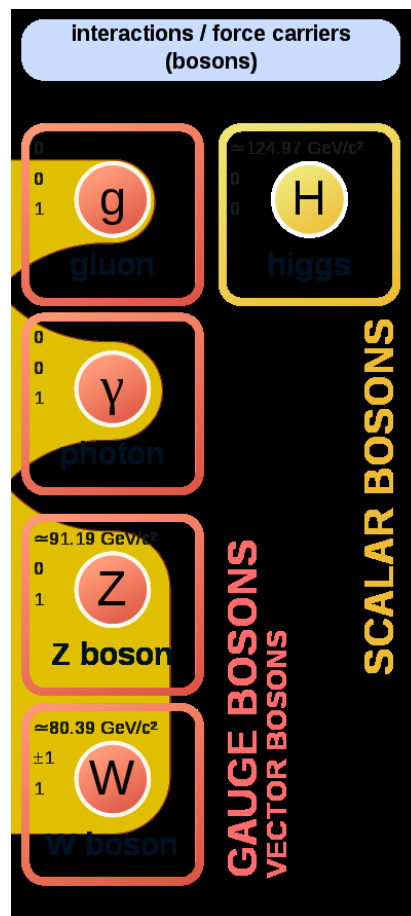
$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ c charm	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ t top
	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ b bottom
	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$ τ tau
	$< 18.2 \text{ MeV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ ν_τ tau neutrino



https://ed.fnal.gov/samplers/hspphys/activities/graphics/pingpong_steel.gif

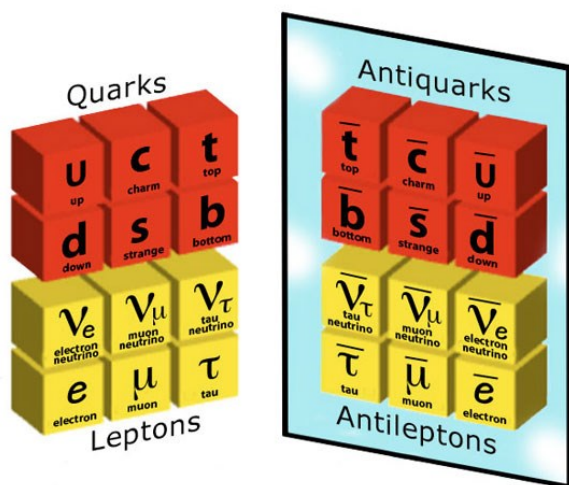
Jak nie ma kleju, to się nie trzyma

- Do złożenia kwarków w proton potrzebne są **gluony**.
- Dzięki **fotonom** są oddziaływania elektromagnetyczne.
- A bozony **W i Z** zapewniają nam energię ze Słońca.
- **Bozon Higgsa** na razie przydaje się do zamknięcia Modelu w zgrabną teorię (elektrosłabą).

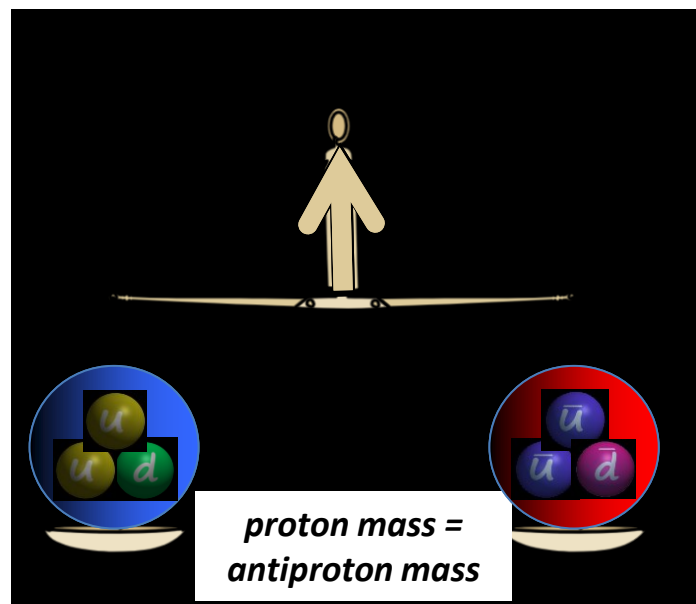


Antymateria, gdzie jest antymateria?

No i mamy jeszcze antykwarki i antyleptony, czyli **antymaterię**.

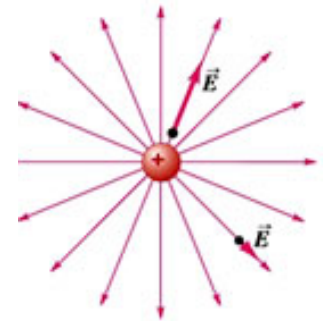
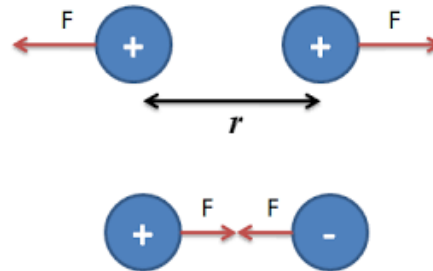
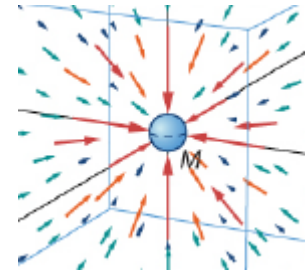


Czy jest antygravitacja?



Co to są oddziaływania?

- Masy oddziałują nawet na dużych odległościach, w próżni. Opisujemy to **polem grawitacyjnym** i siłami grawitacyjnymi.
- Ładunki elektryczne podobnie – oddziałują wytwarzając **pole elektrostatyczne**, opisane potencjałem: $V(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r}$



- W jaki sposób jedno ciało działa na drugie przez próżnię, bez żadnego ośrodka?

Co to są oddziaływania?

- Może zamiast mówić o sile Coulomba, założymy, że oddziaływanie polega **na wymianie cząstki pośredniczącej**.

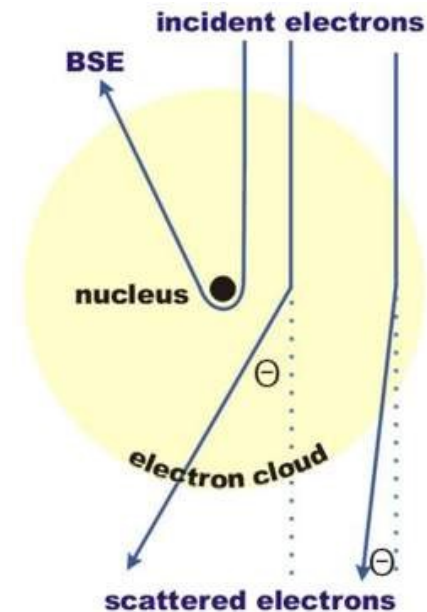
Jak to rozumieć?

- Skąd wiemy, że doszło do wymiany cząstki pośredniczącej?

Obserwujemy skutek oddziaływania -
zmianę energii lub pędu rozpraszanych
cząstek.

Pamięta ktoś równania?

Co się zmienia w wersji relatywistycznej?

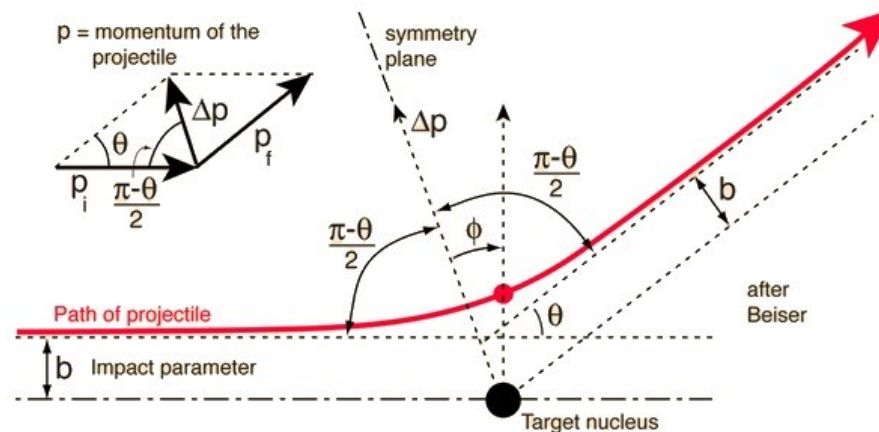


Czy było oddziaływanie?

Obserwacja:

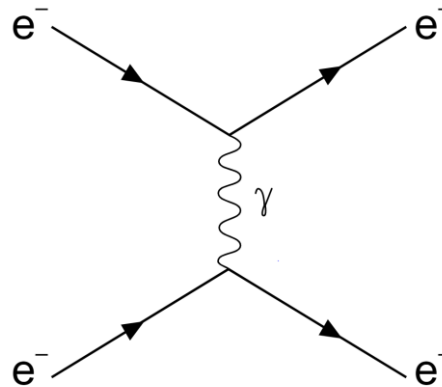
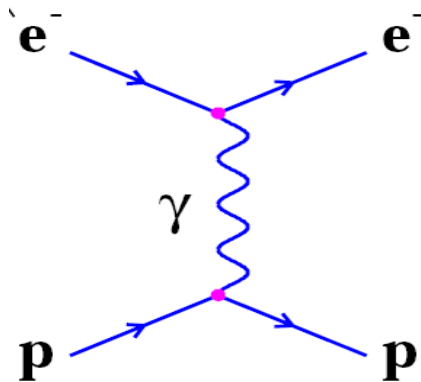
- elektron zbliżył się do protonu i jego tor się zakrzywił,
- elektron zderzył się z protonem i odbił się od niego,
- elektron zderzył się z protonem, odchylił się i zmienił energię,

do jakich wniosków doprowadzają te obserwacje?
jakie to mogło być oddziaływanie?



Czy było oddziaływanie?

- Współcześnie mówimy, że elektron oddziałał z protonem poprzez wymianę cząstki (wirtualnej).
- Wymaga to założenia, że każda cząstka (naładowana elektrycznie) otoczona jest chmurą (wirtualnych) cząstek,
- Jak ładunki są blisko siebie, to może dojść do wymiany tych cząstek.



Przerwa na dyskusję jednostek!

Prędkość światła jest stała i nieprzekraczalna, a jednak:

$$c = 299\,792\,\frac{m}{s}$$

$$c = 1079251.2 \text{ km/h}$$

$$c = 670615.60487 \text{ mi/h}$$

$$c = 17987.52 \text{ km/min}$$



czy to są te same prędkości? Jaka jest różnica?



Druga ważna liczba

Dla czego stała Plancka jest tak mała?

hint: $E = h\nu$

$$h = 6.626070 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

$$\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1.054571800 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

Czy Natura jest tak okrutna, że najważniejsze stałe są tak dziwnymi liczbami?

Czy to ludzie tak skomplikowali Naturę, bo nie znali jej zamiarów?

A może lepiej znaleźć taki system, żeby:

$$c = 1$$

$$h = 1$$

Co to oznacza?

Oznacza to, że musimy przedefiniować jednostkę długości i czasu....

Tylko trzy jednostki

W fizyce wystarczą trzy jednostki do opisu każdego procesu:

CZAS

DŁUGOŚĆ

MASA

wszystkie inne jednostki pochodzą od tych trzech.

Zauważmy, że można je wybrać dowolnie!

np. jako wzorzec masy można przyjąć masę protonu $m_p = 1$, albo Słońca, $m_S = 1$.

Skoro są trzy podstawowe jednostki, to wybierzmy TRZY jednostki, które przyjmiemy jako wzorce (każda dziedzina może wybrać swój zestaw) i nazwać go „jednostki naturalne”:

$$c = 1$$

$$h = 1$$

czy $m_p = 1$ ma sens? Dlaczego c i h są uprzywilejowane?.

Jaka trzecia stała jest równie uniwersalna?

Wymiana cząstek – jak to rozumieć?

Rozważmy proces $A + B \rightarrow A + B$ zachodzący z wymianą cząstki X :

$$A(m_A, 0) \rightarrow A(E_A, \vec{p}_A) + X(E_X, \vec{p}_X)$$

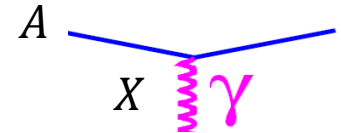
$$\vec{p}_X = -\vec{p}_A$$

$$p = p_x = p_A$$

Czteropęd A: $P_A = (E_A, \vec{p}_A)$

$$P_A^2 = E_A^2 - p_A^2 \equiv m_A^2$$

$$E_A = \sqrt{p^2 + m_A^2} \quad E_X = \sqrt{p^2 + m_X^2}$$



Różnica energii pomiędzy stanem końcowym i początkowym: $\Delta E = E_X + E_A - m_A$
jest różna od zera!

$$\left. \begin{array}{l} \text{gdy } p \rightarrow 0 \text{ to } \Delta E \rightarrow m_X \\ \text{gdy } p \rightarrow \infty \text{ to } \Delta E \rightarrow p \end{array} \right\} \Delta E \geq m_X$$

a zatem energia **nie jest zachowana...**

Wymiana cząstki (wirtualnej)

Zasada nieoznaczoności Heisenberga pozwala na pogwałcenie ZZE na krótką chwilę:

$$\tau \leq \frac{1}{\Delta E} = \frac{1}{m_X}$$

co pozwala wyznaczyć odległość, którą może przebyć cząstka X zanim zostanie zabsorbowana

$$r \leq \frac{1}{m_X}$$

Największa odległość nazywana jest **ZASIĘGIEM ODDZIAŁYWANIA (RANGE)**

$$R = \frac{1}{m_X}$$

W ten prosty sposób wyznaczyliśmy zależność pomiędzy masą wymienianej cząstki a zasięgiem oddziaływania (problem z masą fotonu wróci)

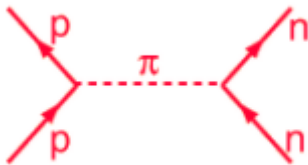
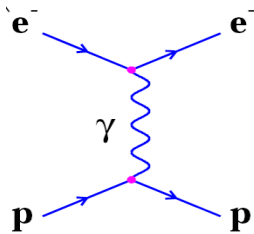
Oddziaływania jako wymiana cząstek

Dwa oddziaływania:

- elektromagnetyczne
- jądrowe (silne)

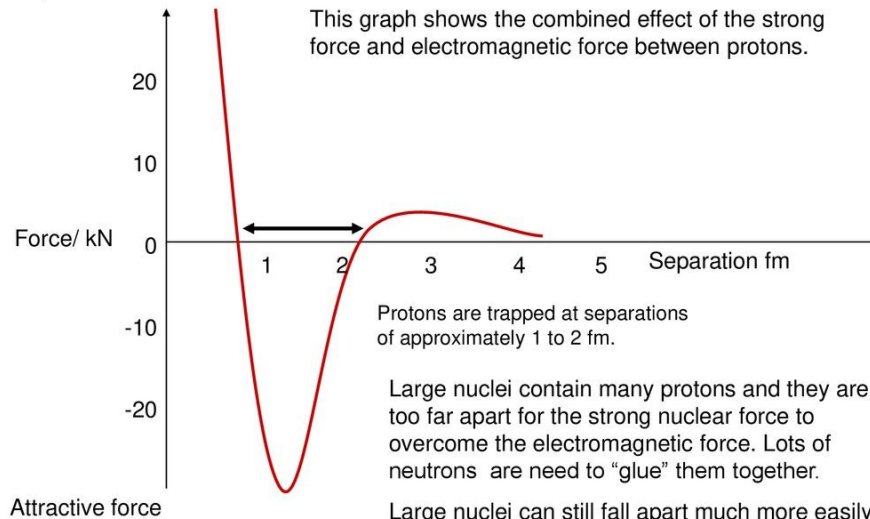
Wymiana cząstki:
jakiej?
skąd to mamy
wiedzieć????

zmierzyliśmy zasięg
oddziaływania!

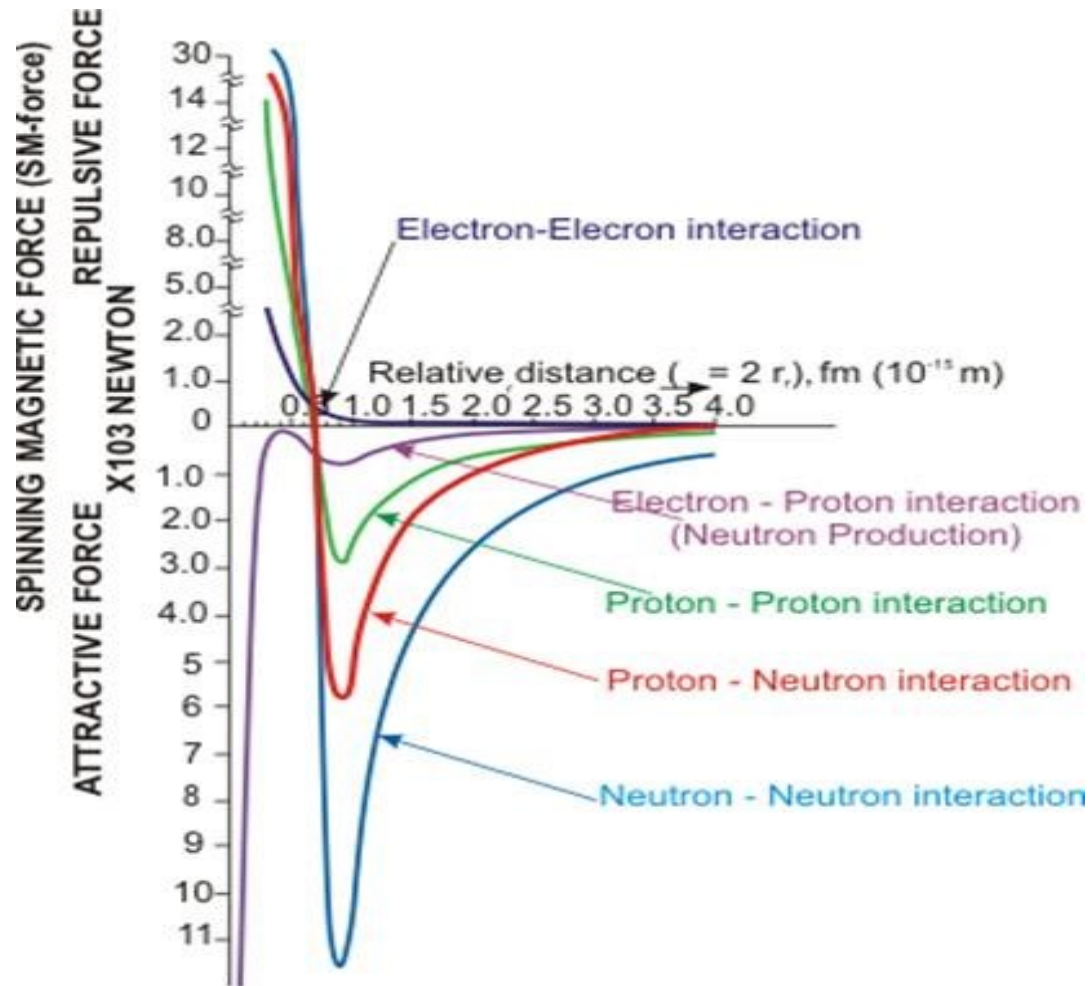


The force between protons

Repulsive force



Oddziaływania jądrowe



dlaczego
oddziaływanie
pomiędzy neutronami
jest silniejsze od
oddziaływania
pomiędzy protonami?



Oddziaływania jako wymiana cząstek

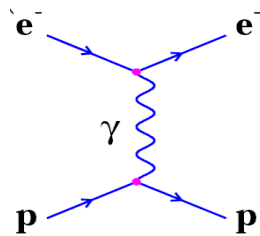
Dwa oddziaływania:

- elektromagnetyczne
- jądrowe (silne)

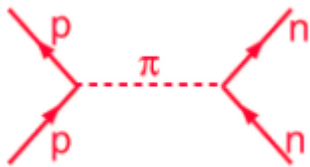
Wymiana cząstki:
jakiej?
skąd to mamy
wiedzieć????

zmierzyliśmy zasięg
oddziaływania!

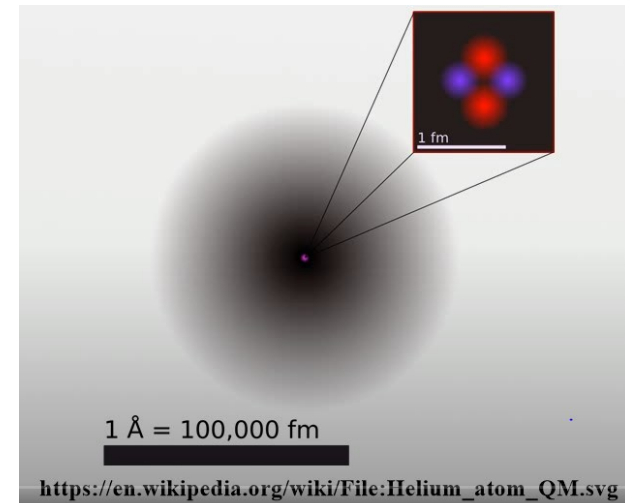
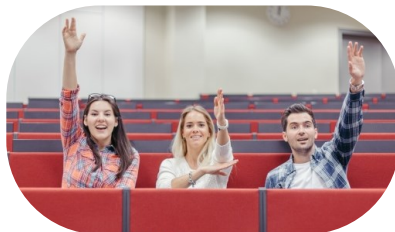
$$R = \frac{1}{m_X}$$



Skoro zasięg oddziaływań elektromagnetycznych $R \rightarrow \infty$, to $m_\gamma = 0$



Jaki jest zasięg oddziaływań silnych?
Policzmy masę cząstki pośredniczącej...



Oddziaływania jako wymiana cząstek – oddz. jądrowe

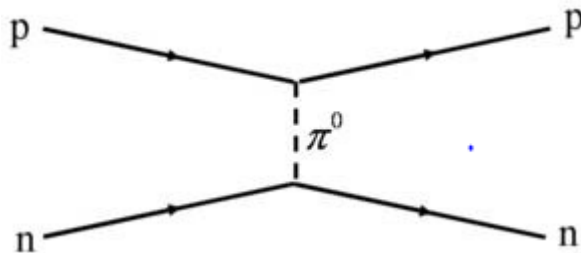
- 1934 – H. Yukawa zaproponował wyjaśnienie rozpraszania neutron- proton (oddz. silne) poprzez wymianę cząstki pośredniczącej (bozonu pośredniczącego)

Wymieniany bozon nazwano pionem i uważano, że istnieją jego trzy stany ładunkowe (dodatni, ujemny i neutralny).

Z zasięgu oddz. silnych (1 fm) i zasady nieoznaczoności wyznaczono jego masę.

Potencjał Yukawy:

$$V(r) = -\frac{g^2}{4\pi} \frac{e^{-r/R}}{r} \quad R = \frac{1}{m_X}$$



- Czy wymiana pionu wyjaśnia cokolwiek? Nukleony się przyciągają, czy wymiana pionu tu pomaga?

Jak wymiana cząstki wyjaśnia przyciąganie?

Oddziaływania jako wymiana cząstek – oddz. jądrowe

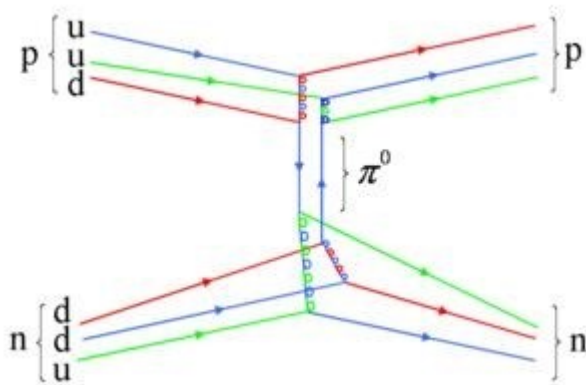
- 1934 – H. Yukawa zaproponował wyjaśnienie rozpraszania neutron- proton (oddz. silne) poprzez wymianę cząstki pośredniczącej (bozonu pośredniczącego)

Wymieniany bozon nazwano pionem i uważano, że istnieją jego trzy stany ładunkowe (dodatni, ujemny i neutralny).

Z zasięgu oddz. silnych (1 fm) i zasady nieoznaczoności wyznaczono jego masę.

Potencjał Yukawy:

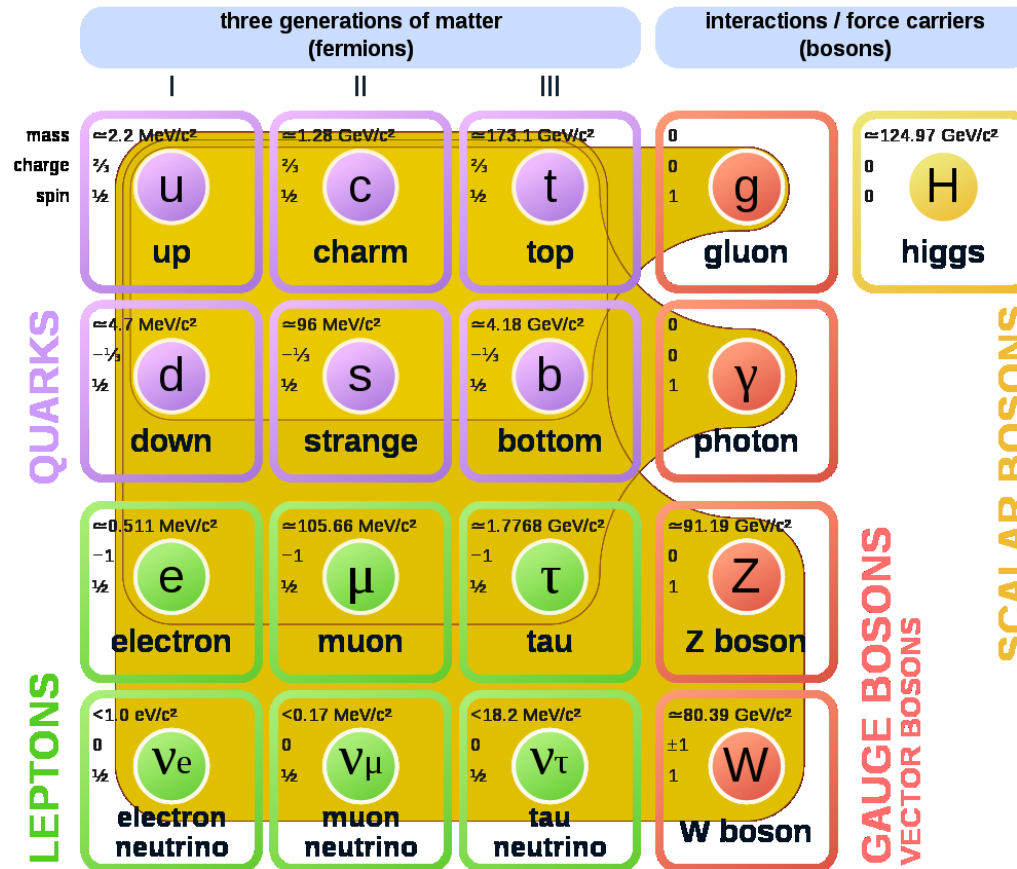
$$V(r) = -\frac{g^2}{4\pi} \frac{e^{-r/R}}{r} \quad R = \frac{1}{m_X}$$



- Choć hipoteza pionu jako bozonu oddz. silnych nie sprawdziła się, potencjał Yukawy opisuje poprawnie krótkozasięgowe procesy silne.
- Na wyjaśnienie trzeba poczekać do roku 1973!

Proton, neutron i ziemska materia

Standard Model of Elementary Particles



Jednostki - przeliczanie



wielkość	zależność	SI	$[\hbar, c, \text{GeV}]$	NU $\hbar = c = 1$
Energia	E	$\text{kg m}^2 \text{s}^{-1}$	GeV	GeV
Pęd	$p = E/c$	kg m s^{-1}	GeV/c	GeV
Masa	$E = mc^2$	kg	GeV/c^2	GeV
Czas	$E \cdot t = \hbar/2$	s	\hbar/GeV	GeV^{-1}
Długość	$p \cdot x = \hbar/2$	m	$\hbar c/\text{GeV}$	GeV^{-1}
Powierzchnia	x^2	m^2	$(\hbar c/\text{GeV})^2$	GeV^{-2}

NU \rightarrow SI

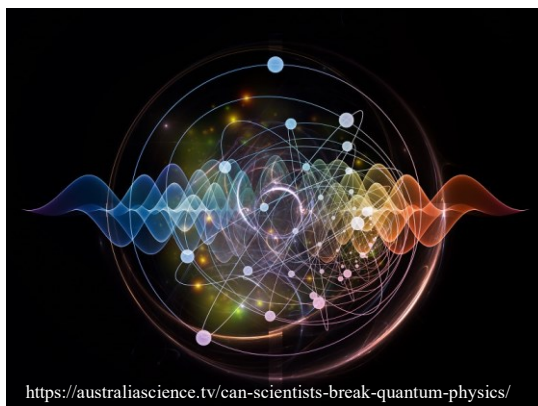
przemnażamy przez
brakujące czynniki

Quantity	natural units		SI
energy	GeV		$1.6 \cdot 10^{-10} \text{ J}$
momentum	GeV	$\times 1/c$	$5.34 \cdot 10^{-19} \text{ kg m/s}$
mass	GeV	$\times 1/c^2$	$1.78 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$
time	GeV^{-1}	$\times \hbar$	$1.5 \cdot 10^{-24} \text{ s}$
length	GeV^{-1}	$\times \hbar c$	0.197 fm
area	GeV^{-2}	$\times (\hbar c)^2$	$0.389 \text{ mb} = 0.389 \cdot 10^{-31} \text{ m}^2$

Jednostki - wiedza

Z przeliczenia z układu SI na jednostki naturalne wynikają ciekawe wnioski:

- masa cząstki pośredniczącej w oddziaływaniu jądrowym
- oszacowanie energii potrzebnej do „zobaczenia struktury protonu: długość fali deBroglia mniejsza od promienia protonu:



Jednostki

Przeliczenie czasu życia na [GeV] i potem policzenie szerokości rozpadu:

$$\tau_\mu = 2.20 \cdot 10^{-6} \text{ s}$$

$$[\tau_\mu] \rightarrow \text{GeV}$$

$$\Gamma = \frac{1}{\tau}$$

- zależność przekroju czynnego od energii

$$[\sigma] = m^2 \rightarrow \text{GeV}^{-2}$$

$$1 \text{ fm} \approx 5 \text{ GeV}^{-1}$$

$$1 \text{ mb} \approx 2.6 \text{ GeV}^{-2}$$