

Elementy fizyki cząstek elementarnych

dr hab. A.F.Żarnecki, profesor UW
Zakład Cząstek i Oddziaływań Fundamentalnych IFD

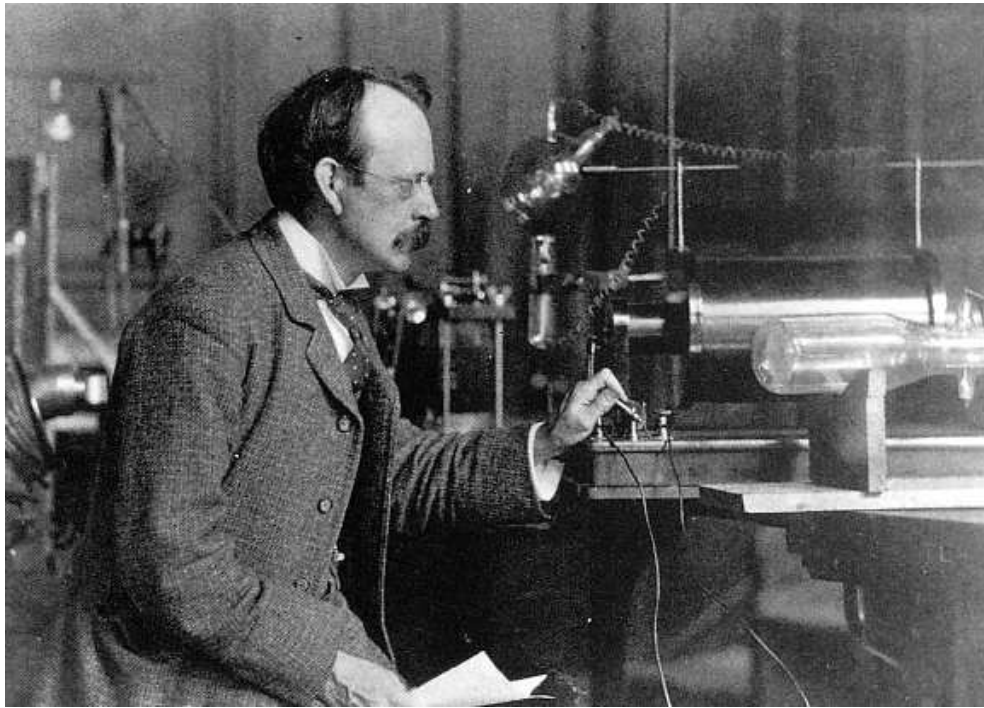
Plan wykładu:

- Świat cząstek elementarnych
cząstki, jednostki, kinematyka relatywistyczna
- Źródła cząstek
- Detektory cząstek
- Kwarki i gluony
badanie struktury protonu, partony i kwarki, funkcje struktury, QCD
- Oddziaływania elektro-słabe
unifikacja, Model Standardowy, łamanie symetrii, mechanizm Higgsa
- Neutrino
neutrino słoneczne i atmosferyczne, oscylacje
- Kosmologia
model Wielkiego Wybuchu, promieniowanie tła
- Unifikacja oddziaływań
pytania i problemy Modelu Standardowego
- Supersymetria
- Dodatkowe wymiary
- Przyszłość fizyki cząstek
LHC, ILC, CLIC, ...

Wprowadzenie

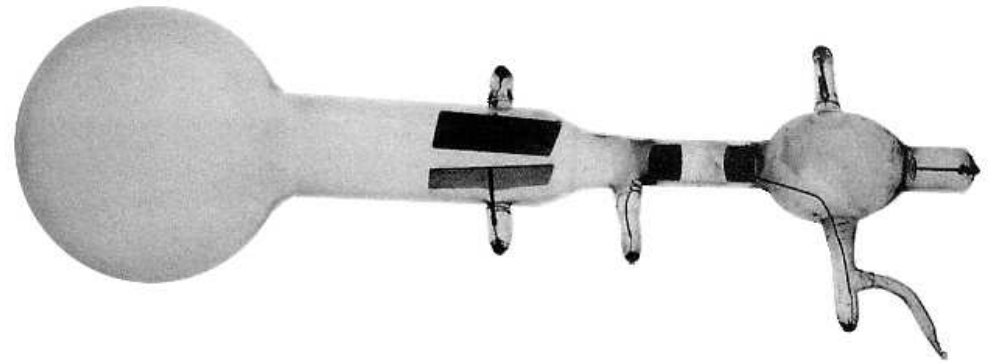
Początki fizyki cząstek

Joseph Thomson



odkrywając elektron w 1897 roku
zapoczątkował nową erę w fizyce

Thomson badał tzw. promienie katodowe



pokazał, że promienie te odchylają się w
polu elektrycznym \Rightarrow niosą ładunek

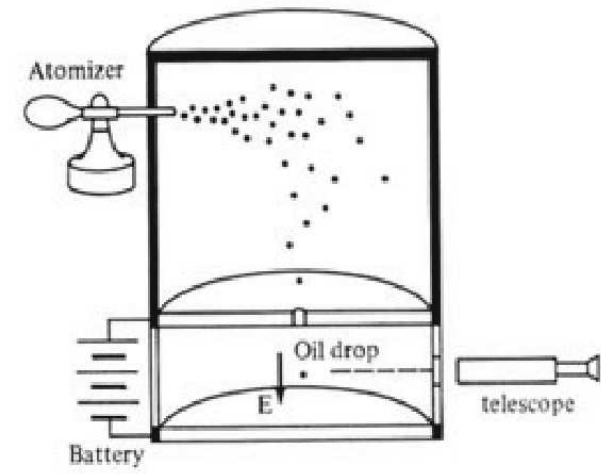
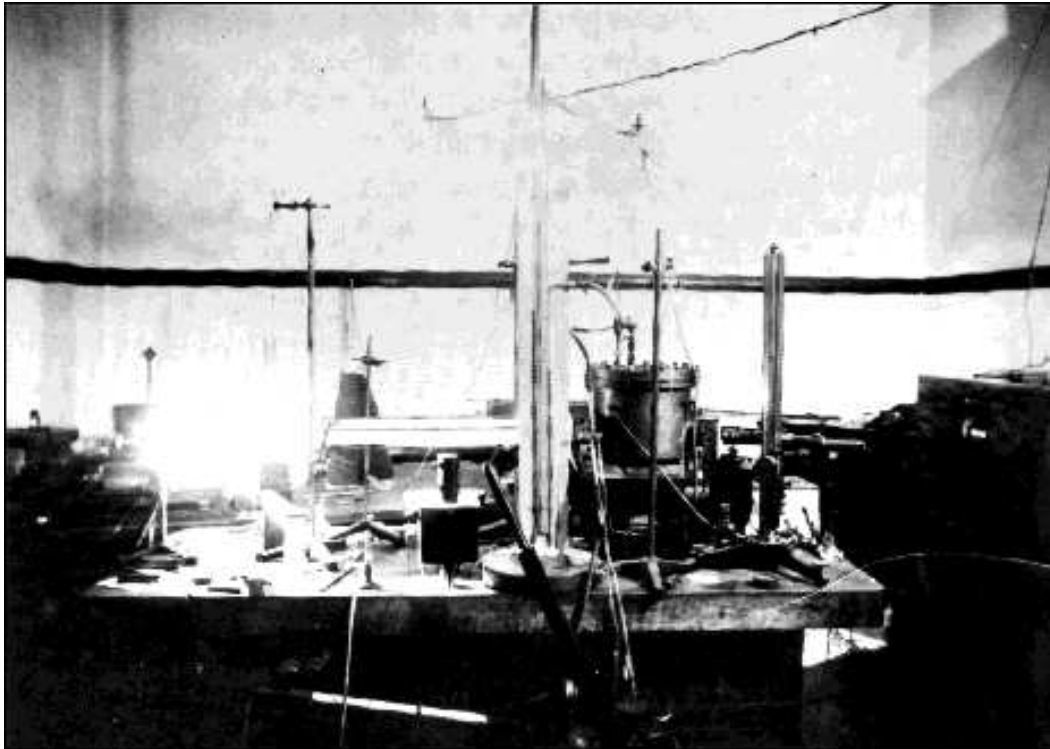
Wyznaczył stosunek ładunku do masy:

$$\frac{e}{m} \approx 2 \cdot 10^{11} \frac{C}{kg}$$

Wprowadzenie

Robert Millikan

1909



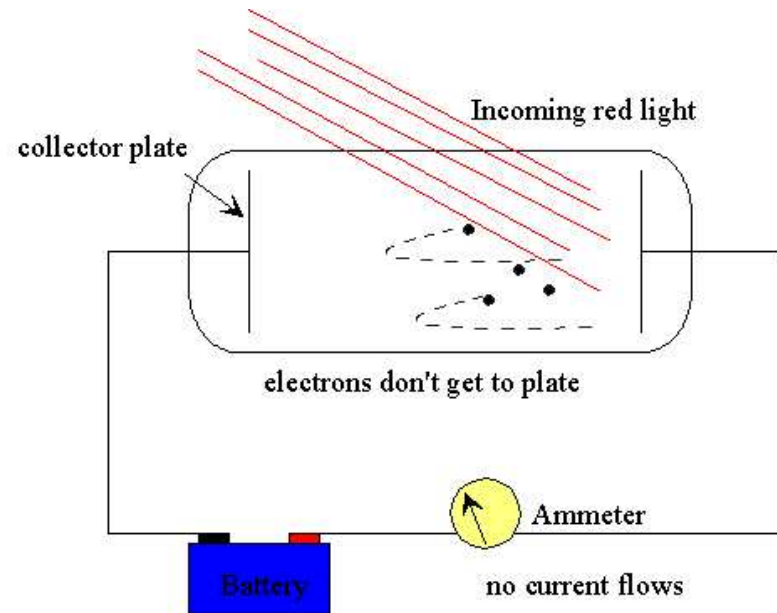
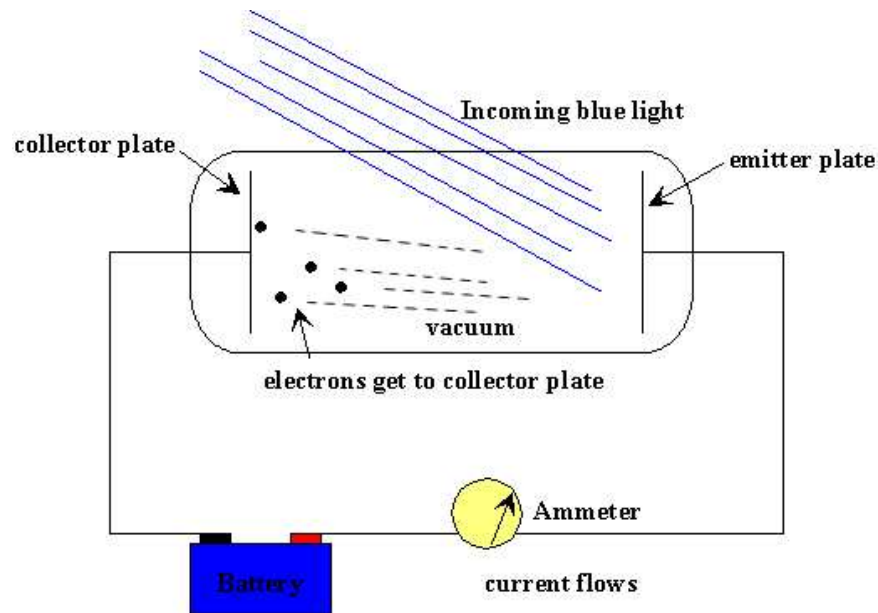
Mierząc opadanie maleńkich kropeł oliwy w powietrzu wyznaczył ładunek elektronu, a następnie obliczył jego masę:

$$m_e = \frac{1}{1837} m_H$$

Wprowadzenie

Efekt fotoelektryczny

Odkryty przez Hertza w 1897: padające światło uwalnia elektrony z powierzchni metalu.
W 1902 **Philipp Lenard** pokazał, że efekt obserwujemy tylko dla wybranych **długości fali** światła:



Efektu tego nie można było wytłumaczyć w parciu o falową teorię światła

Wprowadzenie

Fotony

W roku 1905, Albert Einstein wysunął hipotezę, że światło jest strumieniem niepodzielnych **kwantów** energii, które dziś nazywamy **fotonami**.

Energia fotonu:

$$E_{\gamma} = h\nu = \frac{h}{\lambda}$$

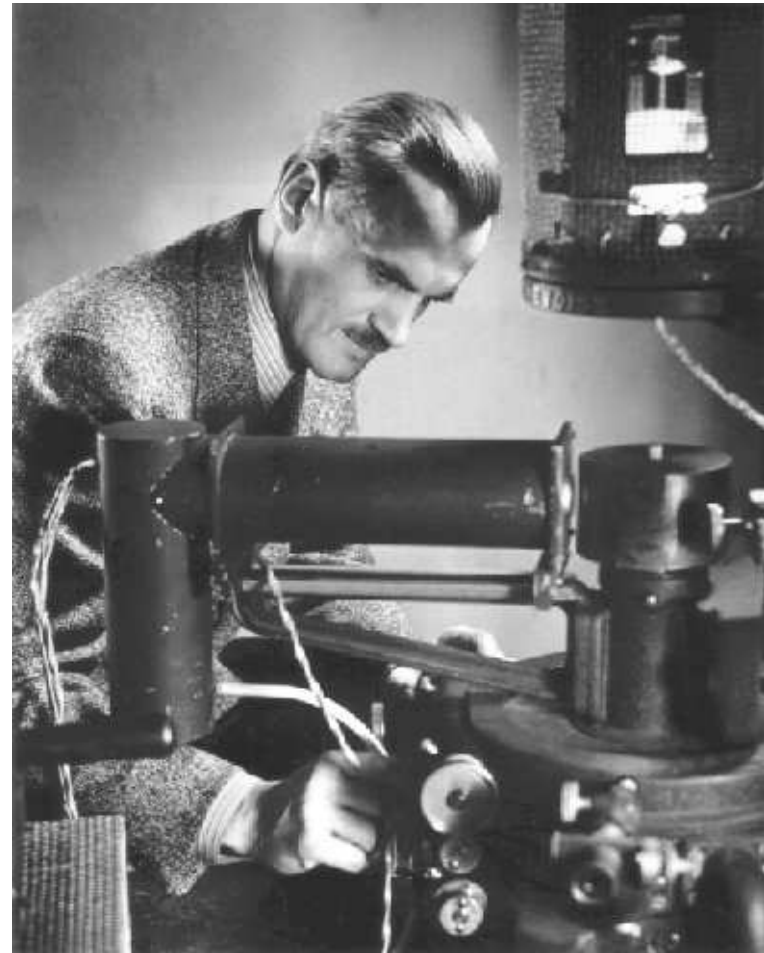
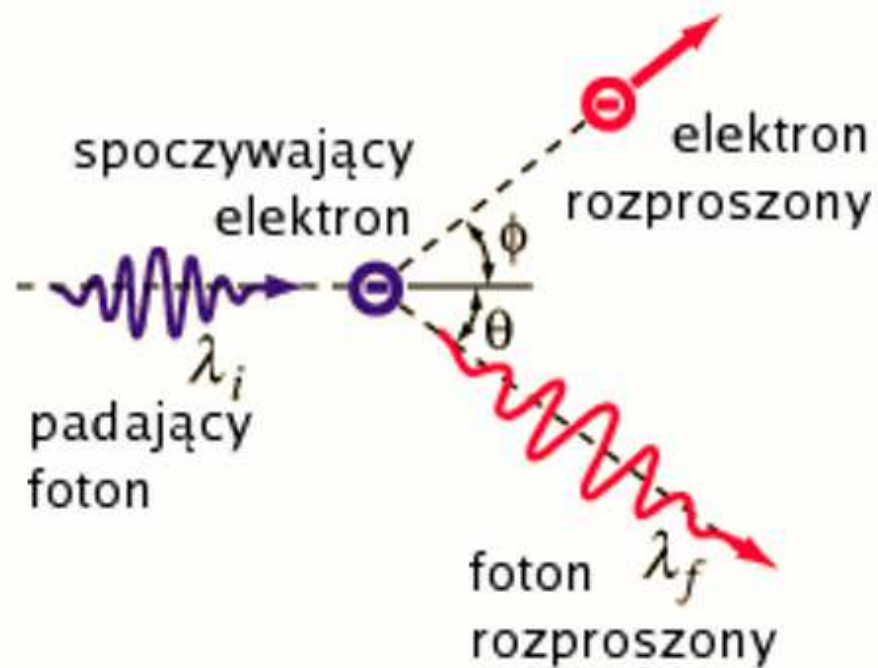
Aby wybić elektron z metalu E_{γ} musi być większa od tzw. **pracy wyjścia** \Rightarrow zależność od długości fali światła



Wprowadzenie

Doświadczenie Comptona 1923

Rozpraszanie fotonów na elektronach



Compton pokazał, że fotony niosą nie tylko **energię**, ale i **pęd** \Rightarrow zachowują się jak **cząstki**

Wprowadzenie

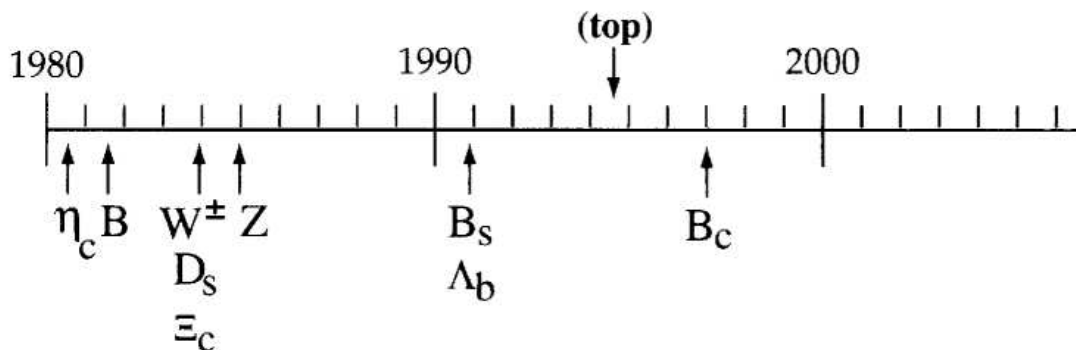
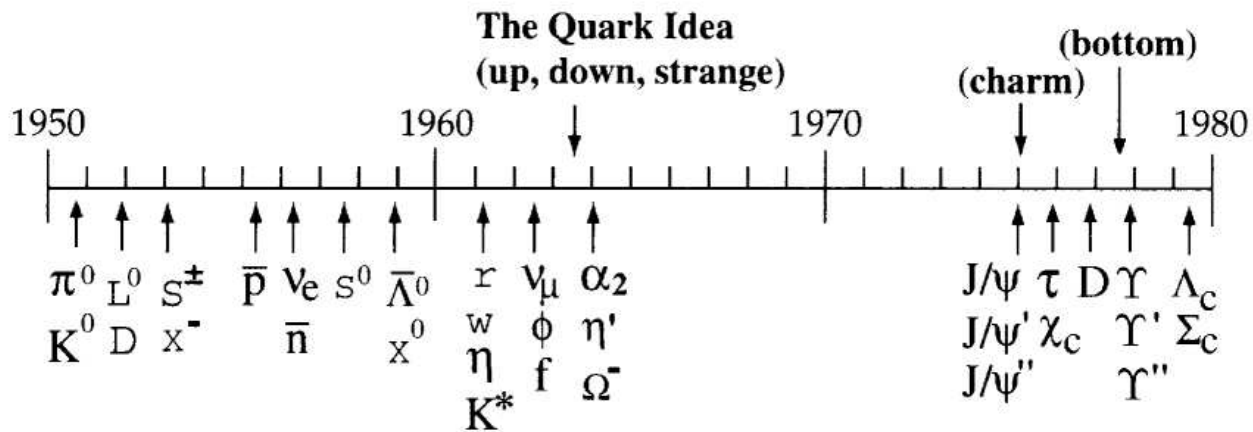
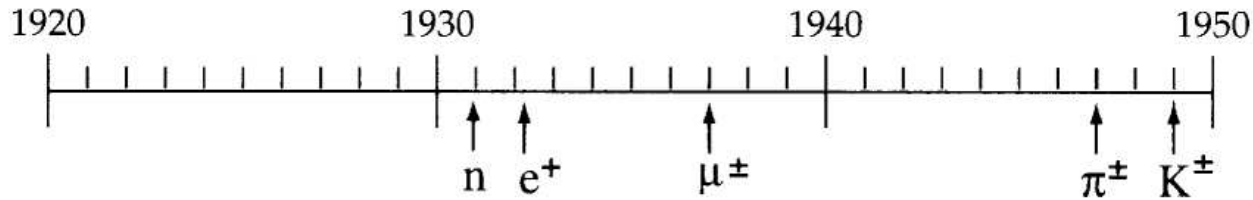
Kolejne odkrycia...

- 1911 – Ernest Rutherford wysuwa hipotezę jądra atomowego
 - Charles Wilson konstruuje komorę mgłową
- 1919 – Ernest Rutherford dostarcza pierwszych dowodów istnienia protonu
- 1929 – akcelerator Van der Graaffa
- 1930 – Wolfgang Pauli wysuwa hipotezę neutrino
- 1931 – James Chadwick odkrywa neutron
 - Ernest Lawrence buduje pierwszy cyklotron
- 1932 – Carl Anderson odkrywa pozytron
- 1937 – odkrycie mionu μ^\pm

po wojnie nastąpił lawinowy rozwój...

Wprowadzenie

Kolejne odkrycia...



1952

komora pęcherzykowa

1955

synchrotron

Świat cząstek elementarnych

Fermiony

świat “codzienny” zbudowany jest z 3 “cegielek” (elektron oraz kwarki u i d)

Fizyka cząstek znalazła już jednak 12 fundamentalnych “cegielek” materii, **fermionów** (cząstek o spinie $1/2$)

	leptony		kwarki	
pokolenie 1	e <i>elektron</i>	ν_e <i>neutrino el.</i>	d <i>down</i>	u <i>up</i>
pokolenie 2	μ <i>mion</i>	ν_μ <i>neutrino mionowe</i>	s <i>strange</i>	c <i>charm</i>
pokolenie 3	τ <i>taon</i>	ν_τ <i>neutrino taonowe</i>	b <i>beauty</i> <i>(bottom)</i>	t <i>top</i> <i>(truth)</i>
ładunek [e]	-1	0	-1/3	+2/3

+ **anty-fermiony** (kolejnych 12)

Świat cząstek elementarnych

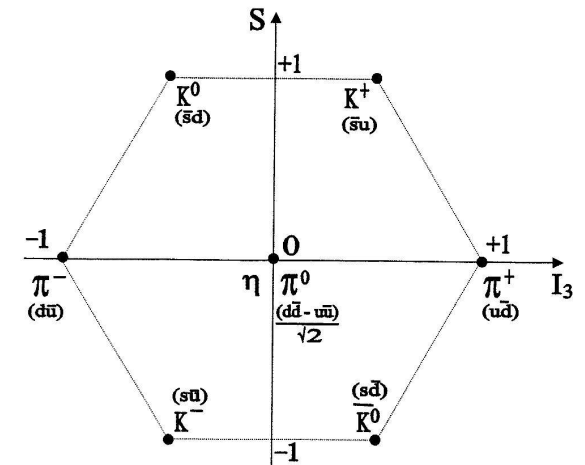
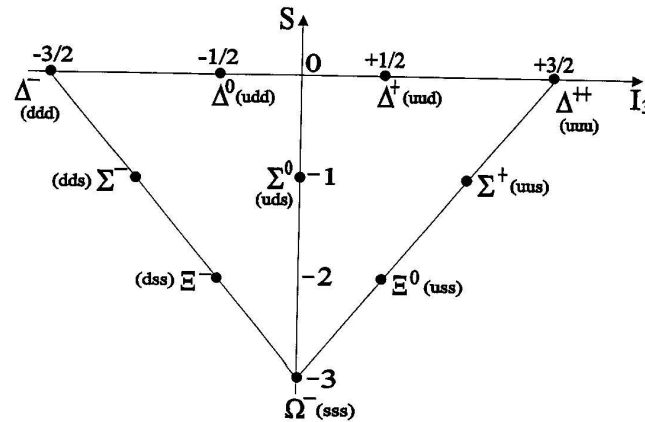
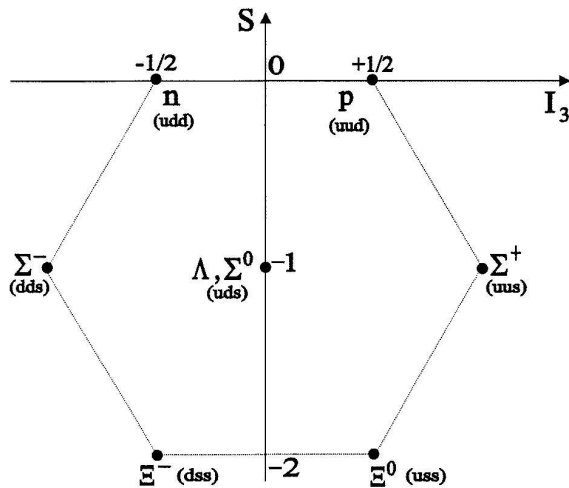
Fermiony

Wszystkie **leptony** obserwujemy jako cząstki **swobodne**.

Kwarki natomiast są "uwięzione" w **hadronach** (cząstkach oddziałujących silnie).

Trzy kwarki tworzą **bariony**:

Para kwark-antykwar **mezony**:



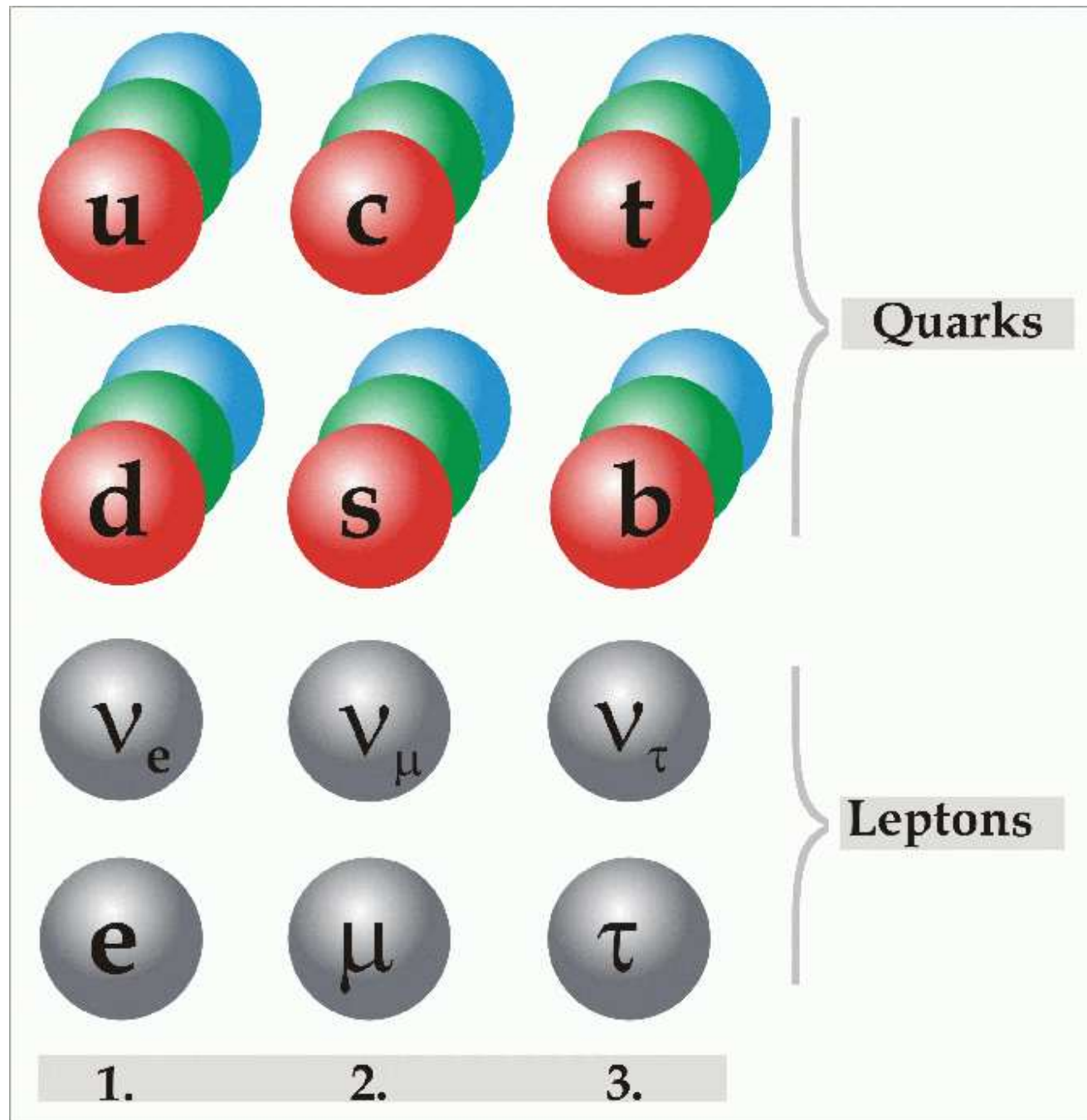
trzy **ant**kwarki \Rightarrow **ant**bariony

Budowa materii

Trzy "pokolenia" fermionów

Kwarki dodatkowo występują
w trzech "kolorach"

R **G** **B**



Świat cząstek elementarnych

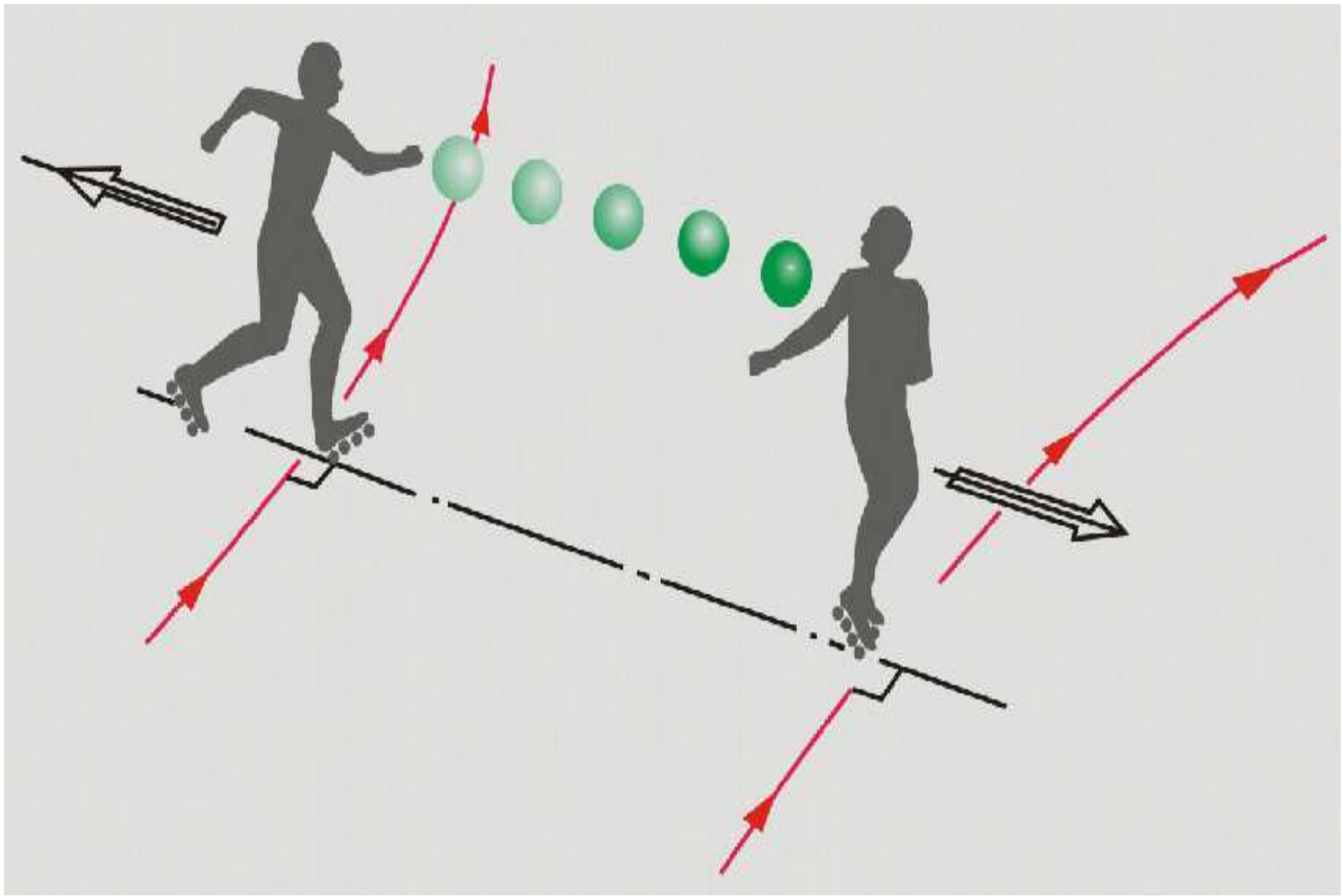
Bozony

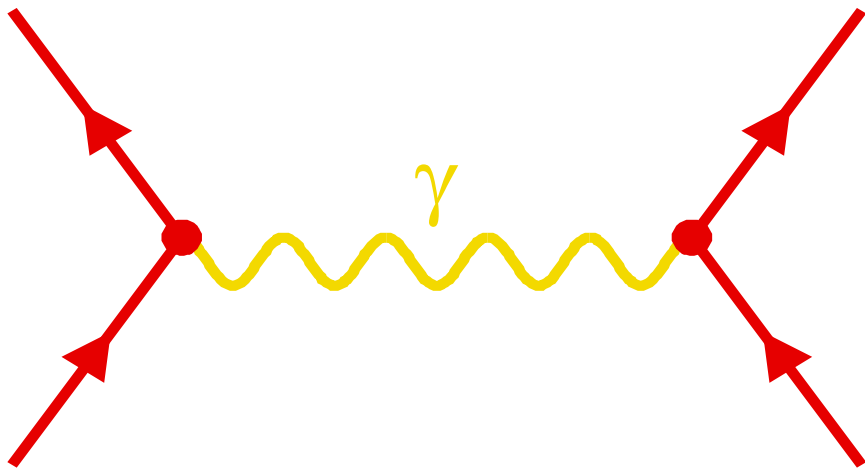
“Cegiełki” materii oddziałują ze sobą poprzez wymianę **nośników oddziaływań**

Nośnik przekazuje część energii i/lub pędu jednej cząstki drugiej cząstce

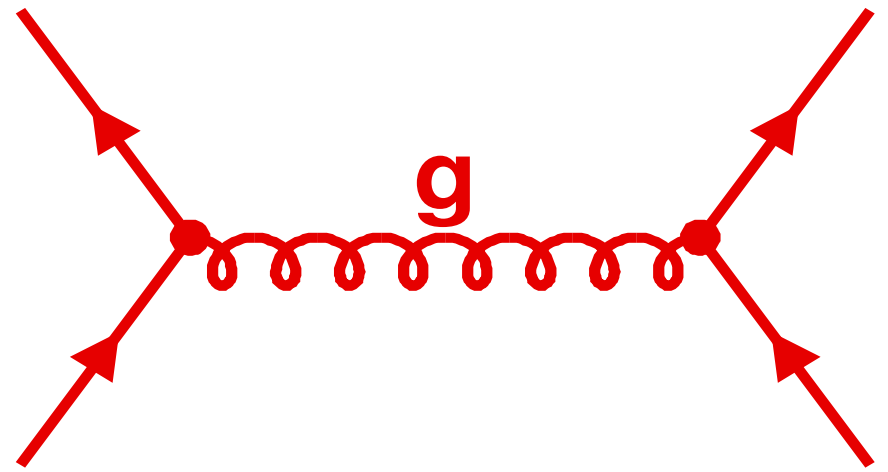
<i>oddziaływanie</i>	<i>źródło</i>	<i>nośnik</i>	<i>moc</i>
grawitacyjne	masa	grawiton	G 10^{-39}
elektromagnetyczne	ładunek	foton	γ 10^{-2}
silne	“kolor”	gluony	g 1
słabe	“ładunek słaby”	“bozony pośredniczące”	W^{\pm}, Z^0 10^{-7}

“moc” - przykładowe porównanie wielkości oddziaływań dla dwóch sąsiadujących protonów

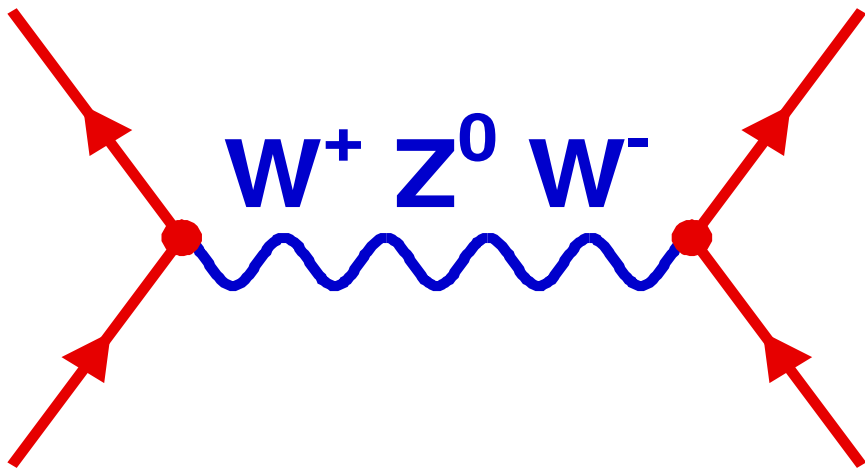




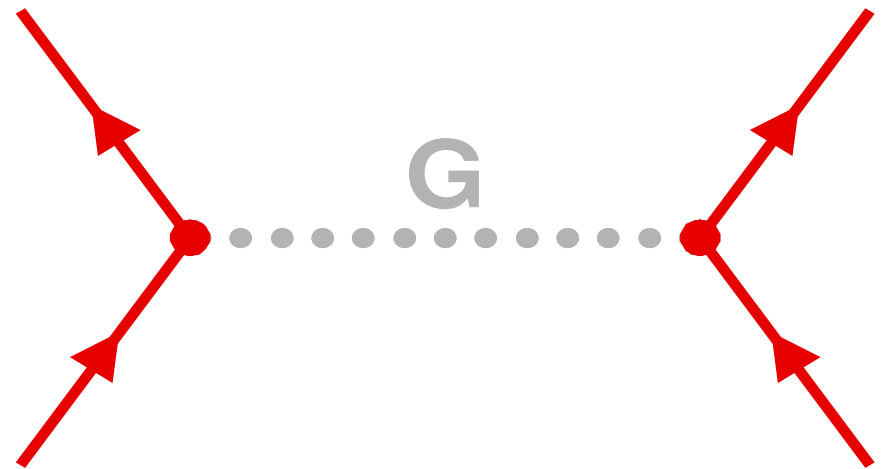
elektromagnetyczne



silne



slabe



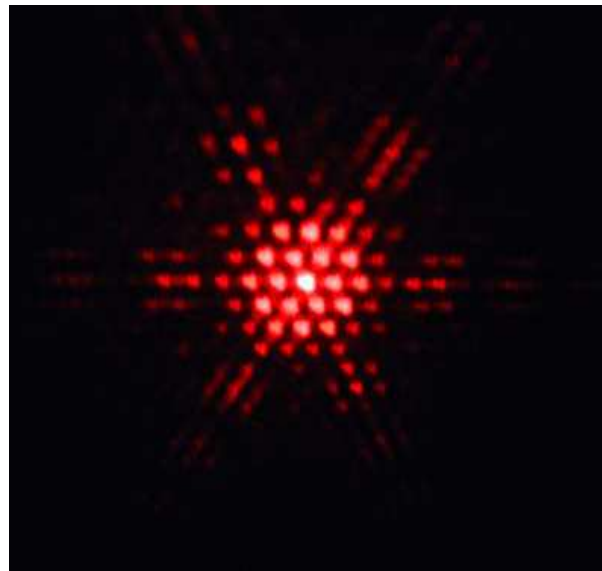
grawitacyjne

Świat cząstek elementarnych

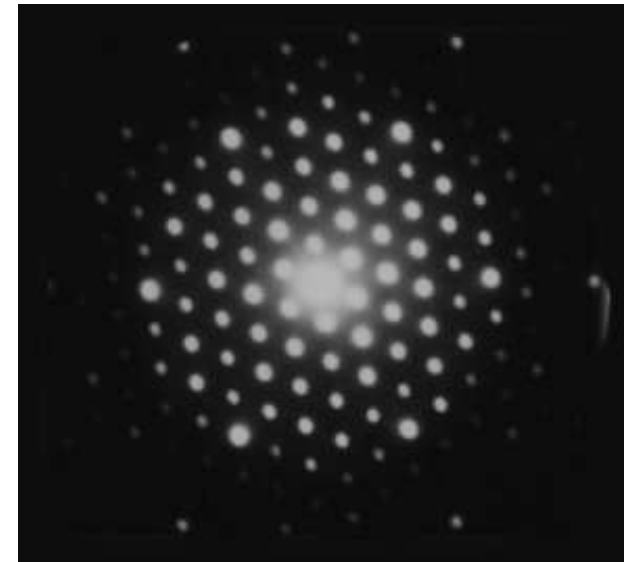
Falowa natura cząstek

Dyfrakcja na strukturach
heksagonalnych

Światło



Elektrony



Pełen opis oddziaływań cząstek - kwantowa teoria pola.

Cząstki możemy traktować jako punktowe, ale ich zachowanie **nie** jest deterministyczne. Możemy tylko badać rozkłady prawdopodobieństwa: czasy życia, przekroje czynne, funkcje struktury...

Świat cząstek elementarnych

Diagramy Feynmana

Pozwalają zobrazować zachodzące oddziaływania między cząstkami, biorąc pod uwagę możliwe sprzężenia elementarne (wierzchołki).

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

Najprostszy diagram

“wiodący” rząd, **leading order** - LO

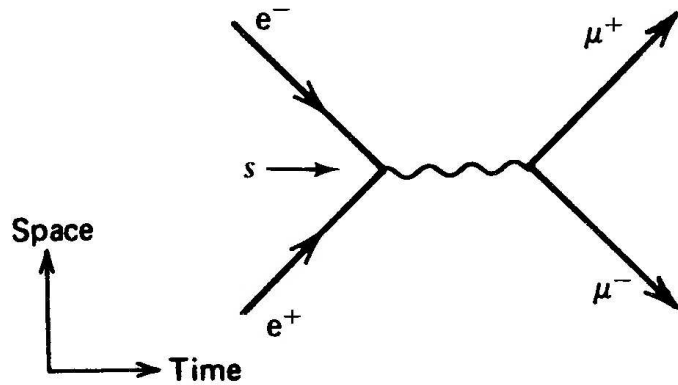
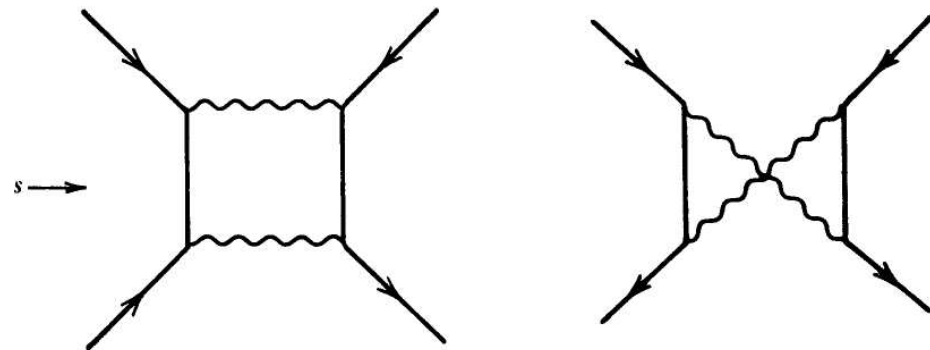


Diagram “drzewowy”

Kolejne diagramy (przykładowe)

next-to-leading order - NLO



Diagramy “pętlowe”

Świat cząstek elementarnych

Diagramy Feynmana

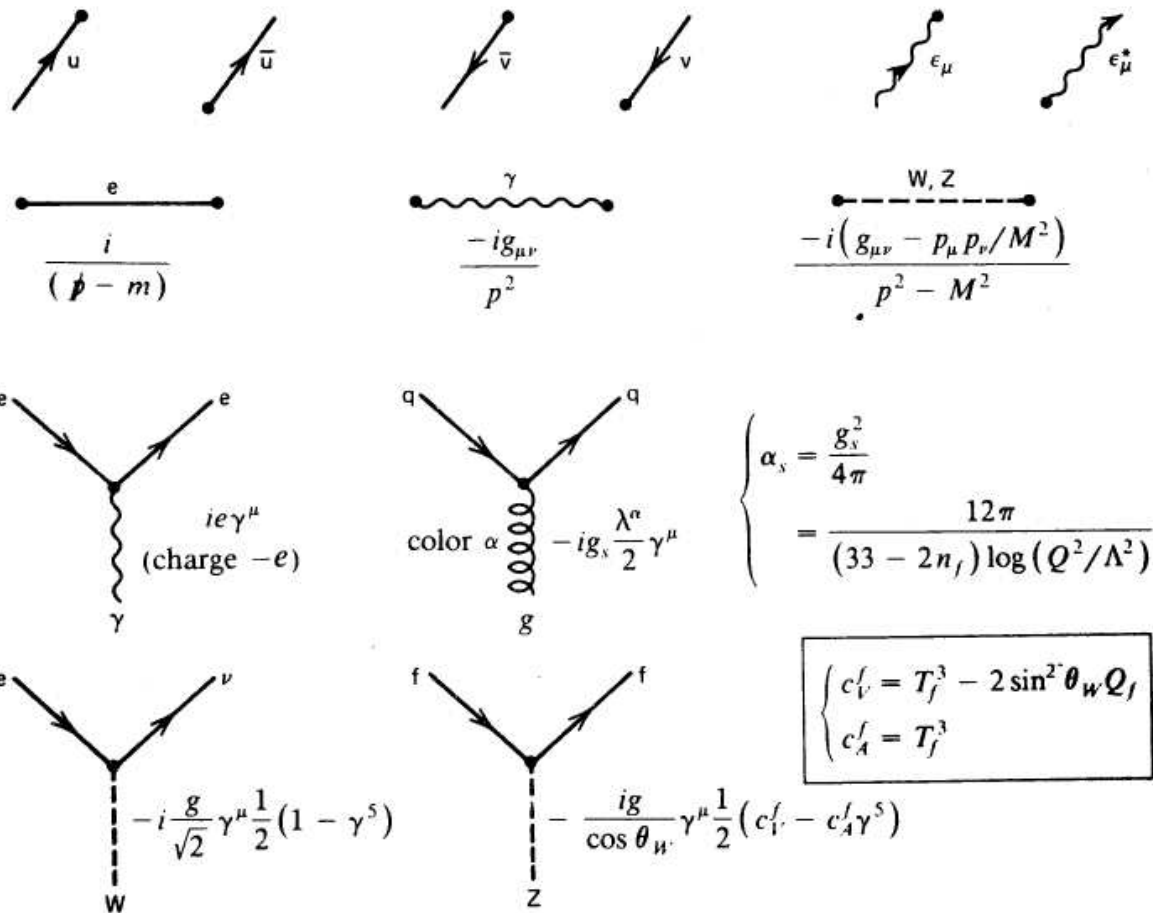
Każdemu diagramowi możemy przyporządkować wyrażenie na odpowiednią amplitudę rozpraszania

Wierzchołki decydują o wielkości przekroju czynnego:

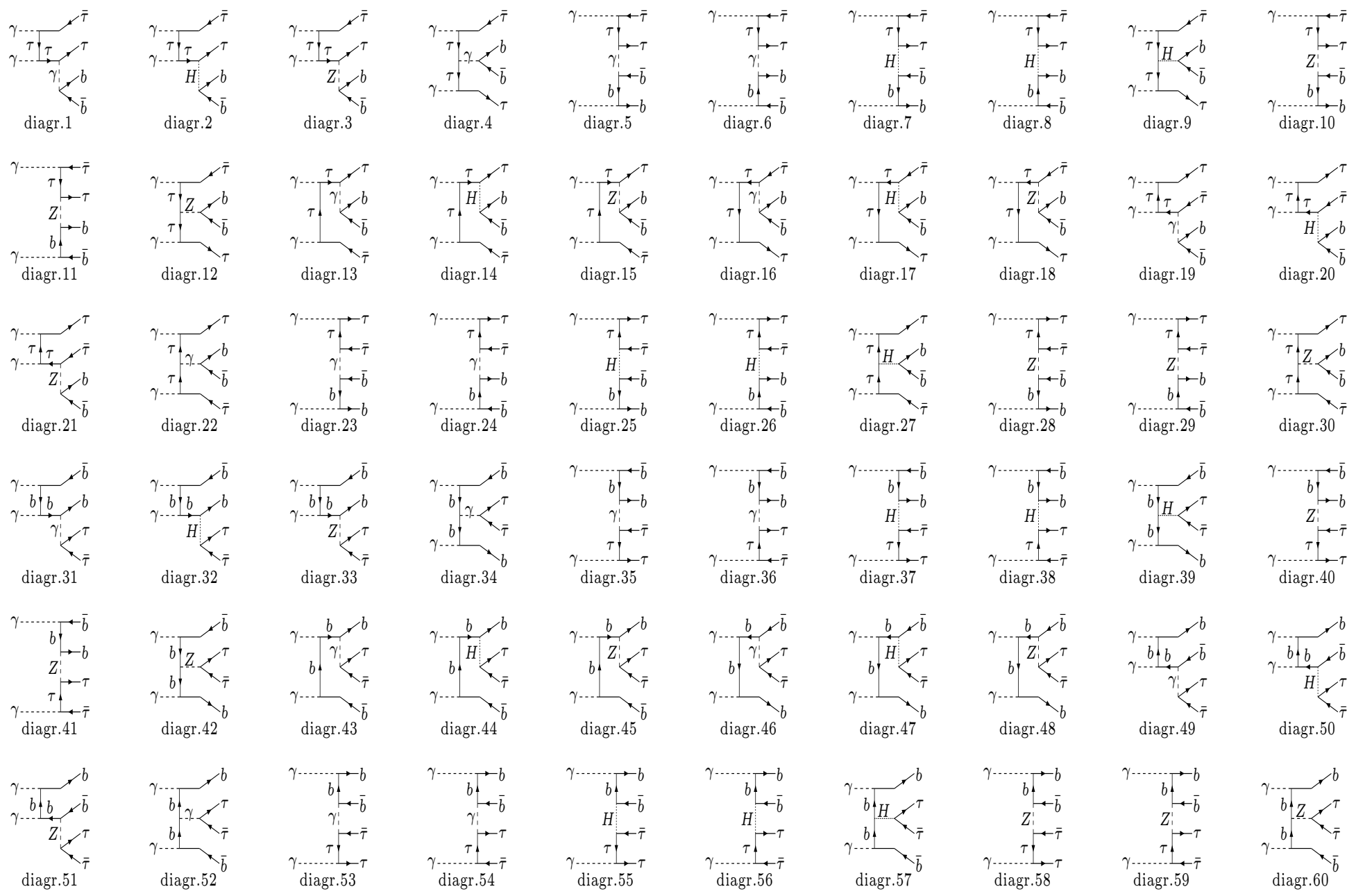
$$\alpha_s = \frac{g_s^2}{4\pi} \sim 0.1 - 0.2$$

$$\frac{g^2}{4\pi} \sim 0.03$$

$$\alpha_{em} = \frac{e^2}{4\pi} \sim \frac{1}{137} \approx 0.0073$$



$$\gamma\gamma \rightarrow \tau^+\tau^- b\bar{b}$$



Model Standardowy

The Standard Model

Generation I Generation II Generation III

Leptons

ν_e	e
---------	-----

ν_μ	μ
-----------	-------

ν_τ	τ
------------	--------

Quarks

u	u	u
d	d	d

c	c	c
s	s	s

t	t	t
b	b	b

Gauge Bosons

Z^0	W^+	γ
	W^-	

	g	

Higgs

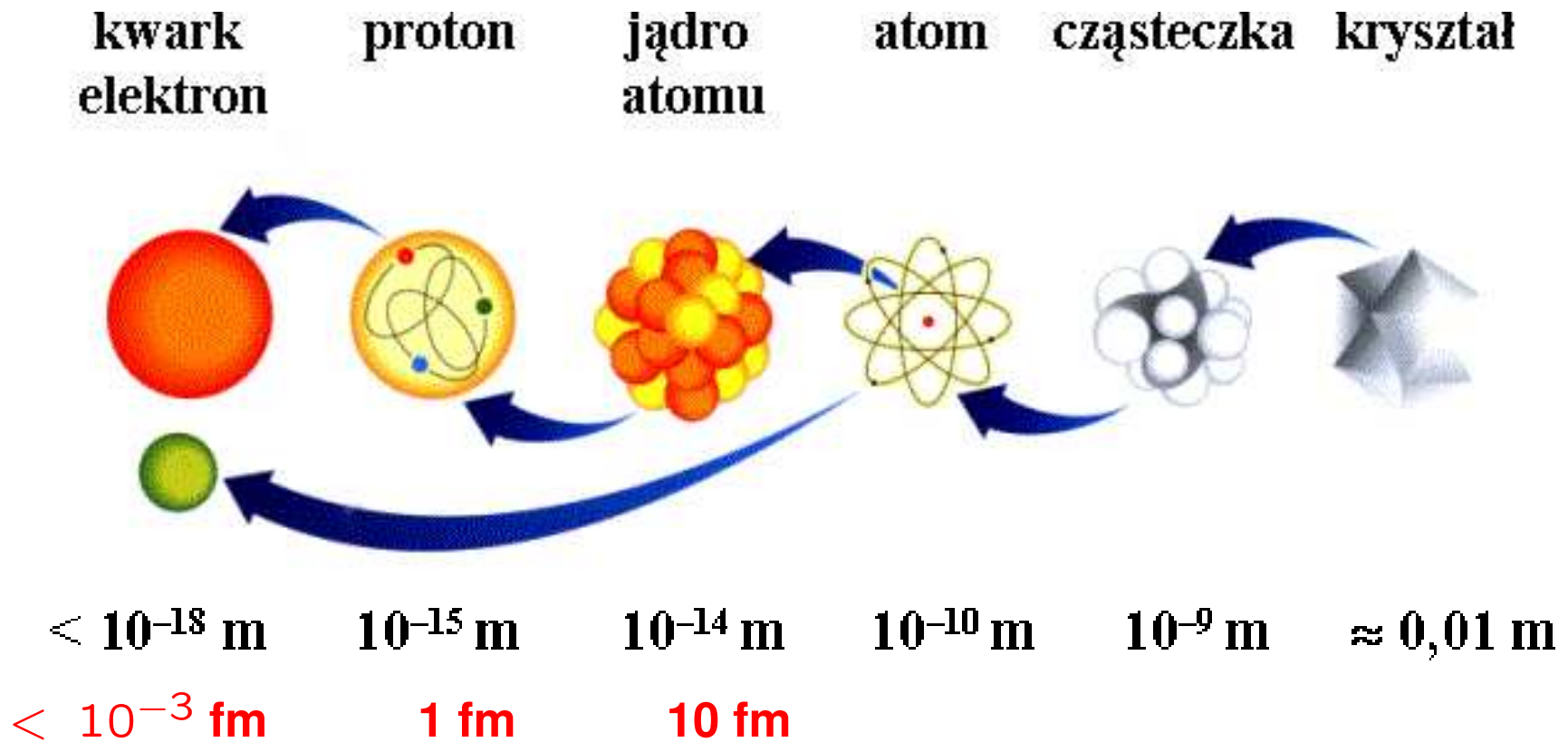
Graviton

Jednostki

Długość

Powszechnie używaną jednostką długości jest **1 femtometr**

$$1\text{fm} = 10^{-15}\text{m}$$



Jednostki

Czas

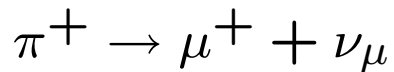
Typowe czasy życia cząstek
(rzęd wielkości):

$$\text{rozpady słabe} \Rightarrow 10^{-10} \text{ s}$$

$$\text{rozpady EM} \Rightarrow 10^{-20} \text{ s}$$

$$\text{rozpady silne} \Rightarrow 10^{-23} \text{ s}$$

Przykład:



rozpad słaby

$$\Rightarrow \tau_{\pi^+} = 2.6 \cdot 10^{-8} \text{ s}$$

“naturalnym” przelicznikiem czasu życia na jednostki
długości jest prędkość światła:

$$c \equiv 299\,792\,458 \text{ m/s} \quad (\text{dokładnie!!!})$$

$$c \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

W fizyce cząstek powszechnie przyjmujemy $c \equiv 1$ czyli:

$$1 \text{ s} \equiv 299\,792\,458 \text{ m}$$

$$\tau_{\pi^+} \equiv c \cdot \tau_{\pi^+} = 7.8 \text{ m}$$

$c\tau$ określa orientacyjny zasięg cząstki
(zaniedbujemy prędkość cząstki i dylatację czasu)

\Rightarrow czasami wygodne i łatwiejsze do zapamiętania

Jednostki

Czasy życia

przykłady \Rightarrow nie trzeba uczyć się wartości liczbowych

Cząstki “quasi-stabilne”

		τ	$c\tau$
mion	μ	$2.2 \cdot 10^{-6}$ s	660 m
kaon	K_L^0	$5.2 \cdot 10^{-8}$ s	15.5 m
pion	π^\pm	$2.6 \cdot 10^{-8}$ s	7.8 m
kaon	K^\pm	$1.2 \cdot 10^{-8}$ s	3.7 m

Cząstki o mierzalnym zasięgu

lambda	Λ	$2.6 \cdot 10^{-10}$ s	7.9 cm
kaon	K_S^0	$0.9 \cdot 10^{-10}$ s	2.7 cm
mezon	B^\pm	$1.7 \cdot 10^{-12}$ s	0.5 mm
mezon	D^\pm	$1.1 \cdot 10^{-12}$ s	0.3 mm
taon	τ	$2.9 \cdot 10^{-13}$ s	87 μ m

Cząstki o niemierzalnym zasięgu

pion	π^0	$8 \cdot 10^{-17}$ s	25 nm
barion	Σ^0	$7 \cdot 10^{-20}$ s	0.02 nm
mezon	ρ^0	$5 \cdot 10^{-24}$ s	1.3 fm

Jednostki

Energia

Naturalna jednostka w fizyce cząstek jest **1 elektronowolt**

1 eV - energia jaka zyskuje cząstka o ładunku **1 e** (ładunek elementarny) przy przejściu różnicy potencjału **1 V**.

$$1 e = 1.6 \cdot 10^{-19} C$$
$$\Rightarrow 1 eV = 1.6 \cdot 10^{-19} J$$

Jednostki pochodne:

$$\begin{aligned} \text{kilo} - 1 \text{ keV} &= 10^3 eV \\ \text{mega} - 1 \text{ MeV} &= 10^6 eV \\ \text{giga} - 1 \text{ GeV} &= 10^9 eV \\ \text{tera} - 1 \text{ TeV} &= 10^{12} eV \end{aligned}$$

Masa

jednostkę energii możemy też przyjąć za jednostkę masy ($E = mc^2$; $c \equiv 1$)

$$1 eV/c^2 \equiv 1 eV = 1.8 \cdot 10^{-36} kg$$

Jednostki

Masy cząstek

elektron	e	511 keV	$(9.1 \cdot 10^{-31} \text{ kg})$
proton	p	938 MeV	$(1.7 \cdot 10^{-27} \text{ kg})$
mion	μ	106 MeV	
taon	τ	1.78 GeV	
kwark	u	1-5 MeV	
	d	3-9 MeV	
	s	75-170 MeV	
	c	1.15-1.35 GeV	
	b	4.0-4.4 GeV	
	t	$173 \pm 3 \text{ GeV}$	
bozon	W^{\pm}	80.4 GeV	
	Z^0	91.2 GeV	

Wartości liczbowe wystarczy znać z dokładnością do jednej cyfry znaczącej.

Jednostki

Przekrój czynny

Przekrój czynny ma wymiar powierzchni.

Klasycznie:

pole powierzchni poprzecznej obiektu

Jednostka używana w fizyce cząstek:

$$1 \text{ barn} \equiv 1 \text{ b} = 10^{-28} \text{ m}^2$$

$$\textit{mili} - 1 \text{ mb} = 10^{-3} \text{ b}$$

$$\textit{mikro} - 1 \mu\text{b} = 10^{-6} \text{ b}$$

$$\textit{nano} - 1 \text{ nb} = 10^{-9} \text{ b}$$

$$\textit{piko} - 1 \text{ pb} = 10^{-12} \text{ b}$$

Zasada nieoznaczoności

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{1}{2} \hbar$$

$$\Delta t \cdot \Delta E \geq \hbar \equiv h/2\pi$$

$$\hbar = 1.05 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

$$= 0.197 \text{ GeV} \cdot \text{fm} \quad (c \equiv 1)$$

Zasada nieoznaczoności wprowadza relacje między jednostkami energii i długości. Bez straty ogólności możemy przyjąć:

$$\hbar \equiv 1$$

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

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

Przekrój czynny ma wymiar E^{-2} ...

Jednostki

Przykład 1

Całkowity przekrój czynny na proces

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

W granicy dużych energii wiązek e^\pm : $E \gg m_e, m_\mu$
analiza wymiarowa daje:

$$\sigma_{e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-} \sim \frac{\alpha^2}{E^2}$$

α - elektromagnetyczna stała sprzężenia ($\alpha \approx \frac{1}{137}$)
Wynik rachunków QED (w tzw. “wiodącym rzędzie”)

$$\sigma_{e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-} = \frac{\pi}{3} \cdot \frac{\alpha^2}{E^2}$$

Dla $E = 1 \text{ GeV}$ $\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-) \approx 22 \text{ nb}$.

Przykład 2

Jaką energię powinna mieć
“sonda” (elektron, foton)
aby “zobaczyć” wewnętrzną
strukturę nukleonu ?

\Rightarrow długość fali de Broglie’a
mniejsza niż promień nukleonu:

$$\begin{aligned} \lambda = h/p &< R_{nucl} \sim 1 \text{ fm} \\ p &> h/R_{nucl} \sim 1 \text{ GeV} \end{aligned}$$

Kinematyka relatywistyczna

Czterowektory

Ogólna postać:

$$a^\mu = (a_0, a_1, a_2, a_3) = (a_0, \vec{a})$$

gdzie: a_0 - składowa czasowa
 a_i - składowe przestrzenne ($i=1,2,3$)

Długość czterowektora

(niezmiennik transformacji Lorentza):

$$a^2 = a_0^2 - |\vec{a}|^2$$

Wektor cztero-położenia ($c \equiv 1$):

$$x^\mu = (t, x_1, x_2, x_3) = (t, \vec{x})$$

Wektor cztero-pędu:

$$p^\mu = (E, p_1, p_2, p_3) = (E, \vec{p})$$

W przypadku czteropędu pojedynczej cząstki:

$$p^2 = E^2 - |\vec{p}|^2 = m^2$$

Kinematyka relatywistyczna

Transformacja Lorentza

Przyjmijmy, że początek układu **A** porusza się z prędkością $\vec{v} = (0, 0, \beta c)$ w układzie **B**.

Transformacja Lorentza dla czteropędu:

$$E^B = \gamma E^A + \beta \gamma p_3^A$$

$$p_1^B = p_1^A$$

$$p_2^B = p_2^A$$

$$p_3^B = \gamma p_3^A + \beta \gamma E^A$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

Jeśli układ **A** jest układem własnym cząstki o masie m :

$$E^A = m$$

$$\vec{p}^A = \vec{0}$$

$$E^B = \gamma m$$

$$|\vec{p}^B| = \beta \gamma m = \beta E^B$$

Przydatne są też relacje odwrotne:

$$\gamma = E/m$$

$$\beta = |\vec{p}|/E$$

Kinematyka relatywistyczna

Granica ultra-relatywistyczna

Dla fotonu mamy:

$$m_\gamma \equiv 0$$

$$\beta \equiv 1$$

$$E = p$$

Elektron o energii 50 GeV:

$$\gamma = E/m \approx 10^5$$

$$\beta = \sqrt{1 - \frac{1}{\gamma^2}} \approx 0.999999999999995$$

$$E - p = (1 - \beta)E \approx 2.5 \text{ eV} \ll m_e$$

można traktować jak cząstkę bezmasową: $E = p$

Proton o energii 100 GeV:

$$\gamma = E/m \approx 10^2$$

$$\beta = \sqrt{1 - \frac{1}{\gamma^2}} \approx 0.99995$$

$$E - p = (1 - \beta)E \approx 5 \text{ MeV} \ll m_p$$

też można stosować przybliżenie $E \approx p$

Kinematyka relatywistyczna

Energia dostępna

Dla układu cząstek kwadrat czteropędu określa energię dostępną w układzie środka masy:

$$p^2 = E_{cm,s}^2 \equiv s$$

Układ dwóch cząstek **a** i **b**:

$$\begin{aligned} p &= p_a + p_b = (E_a + E_b, \vec{p}_a + \vec{p}_b) \\ s &= (E_a + E_b)^2 - |\vec{p}_a + \vec{p}_b|^2 \end{aligned}$$

Zderzenia wiązek przeciwbieżnych

$$E_a, E_b \gg m_a, m_b:$$

$$\begin{aligned} s &\approx 4 \cdot E_a \cdot E_b \\ E_{cms} &\approx \sqrt{4 \cdot E_a \cdot E_b} \\ E_a = E_b = E &\Rightarrow E_{cms} \approx 2E \end{aligned}$$

Zderzenia wiązki **a** z tarczą **b**;

$$E_a \gg m_a, m_b$$

$$\begin{aligned} s &\approx 2 \cdot E_a \cdot m_b \\ E_{cms} &\approx \sqrt{2 \cdot E_a \cdot m_b} \end{aligned}$$

Kinematyka relatywistyczna

Przykład 1

Zderzenia elektron-proton w akceleratorze HERA

$E_e = 27.5 \text{ GeV}$, $E_p = 920 \text{ GeV}$:

$$s \approx 10^5 \text{ GeV}^2$$
$$E_{cms} \approx 318 \text{ GeV}$$

Aby uzyskać taką samą E_{cms} w zderzeniach wiązki elektronów na tarczy potrzebna jest energia wiązki

$$E_e = \frac{s}{2m_p} \approx 54 \text{ TeV}$$

Wymagałoby to zbudowania akceleratora liniowego o długości ponad 1000 km.

Akcelerator kołowy nie zmieściłby się między Ziemią a Księżycem...

Akcelerator HERA ma średnicę ok. 2 km (obwód 6.3 km).

DESY, Hamburg



Kinematyka relatywistyczna

Przykład 2

Zderzenia proton-proton w **LHC**; $E_p = 7 \text{ TeV}$:

$$s \approx 200 \text{ TeV}^2$$
$$E_{cms} \approx 14 \text{ TeV}$$

W zderzeniach na tarczy potrzebna byłaby wiązka o energii

$$E_p = \frac{s}{2m_p} \approx 10^5 \text{ TeV} = 10^{17} \text{ eV}$$

Cząstki o takiej energii spotykamy w promieniowaniu kosmicznym.

Nie potrafimy ich jednak wytworzyć...

Budowany obecnie akcelerator LHC ma obwód 27 km