

Metody eksperymentalne w fizyce wysokich energii

prof. dr hab. A.F.Żarnecki

Zakład Cząstek i Oddziaływań Fundamentalnych IFD

Wykład I

- Wprowadzenie
- Model Standardowy
- ⇒ cele eksperymentów
- Naturalne źródła cząstek
- ⇒ promieniotwórczość naturalna
- ⇒ promieniowanie kosmiczne

Wprowadzenie

Cel wykładu

Przybliżyć **podstawowe** metody badawcze **współcześnie** stosowane w **akceleratorowych** i **nieakceleratorowych** eksperymentach fizyki cząstek i oddziaływań fundamentalnych.

Fizyka Wysokich Energii - High Energy Physics (HEP)

Przedstawienie wszystkich aspektów pracy fizyka “doświadczalnika”:

- przygotowanie eksperymentu
- budowa detektora
- kontrola i zbieranie danych
- analiza przypadków
- przewidywania teorii
- wnioski z porównania

W dużych eksperymentach HEP bardzo trudno jest “ogarnąć” wszystkie te elementy!

⇒ ten wykład powinien to ułatwić

Wprowadzenie

Plan wykładu

- wprowadzenie, Model Standardowy,
- oddziaływanie cząstek z materią, podstawowe zjawiska
- podstawowe metody detekcji
detektory śladowe, detektory krzemowe, kalorymetry
- współczesne układy detekcyjne fizyki cząstek,
- akceleratory,
- detektory uniwersalne dla eksperymentów przy kolajderach,
- problem redukcji tła, układy wyzwalań zbierania danych,
- systemy zbierania, rekonstrukcji i analizy danych,
- metody Monte Carlo i ich rola w projektowaniu eksperymentów i analizie danych,
- podstawy analizy fizycznej zebranych danych,
- poszukiwanie “nowej fizyki”, wyznaczanie ograniczeń na parametry modeli.

Wprowadzenie

Wykład

Wtorki 11¹⁵ – 13⁰⁰ w sali 118 (pawilon IPJ). Przewidziane jest 15 wykładów.

W pojedynczych przypadkach możliwa zmiana godziny (i sali)

Egzamin

W formie egzaminu ustnego: wypowiedź na jeden z wcześniej przygotowanych tematów. Lista zagadnień będzie udostępniona przed egzaminem.

Literatura

- D.H. Perkins, Wstęp do fizyki wysokich energii, PWN, 2004.
- W.R. Leo, Techniques for nuclear and particle physics experiments: a how-to approach, Wyd. Springer, Berlin 1992.
- Data analysis techniques for high-energy physics, ed. M. Regler and R. Frühwirth, Cambridge Univ. Press, 2000.
- The Review of Particle Physics: <http://pdg.lbl.gov/>
- + Materiały zamieszczane na stronie wykładu
<http://www.fuw.edu.pl/~zarnecki/mefwe/>

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

Model Standardowy

Fermiony

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

W Modelu Standardowym mamy łącznie 12 fundamentalnych “cegielek” materii, **fermionów** (cząstek o spinie 1/2)

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

+ anty-fermiony (kolejnych 12)

Model Standardowy

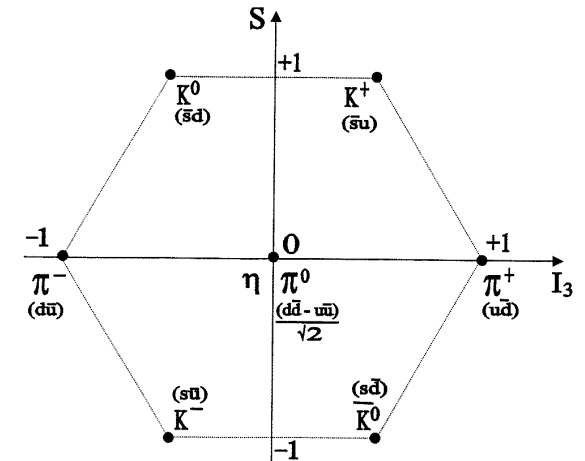
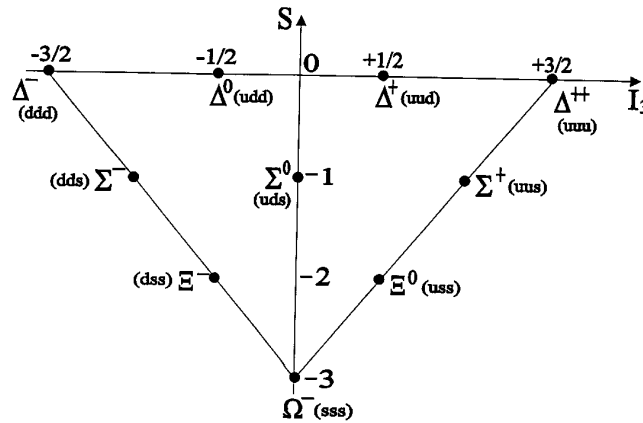
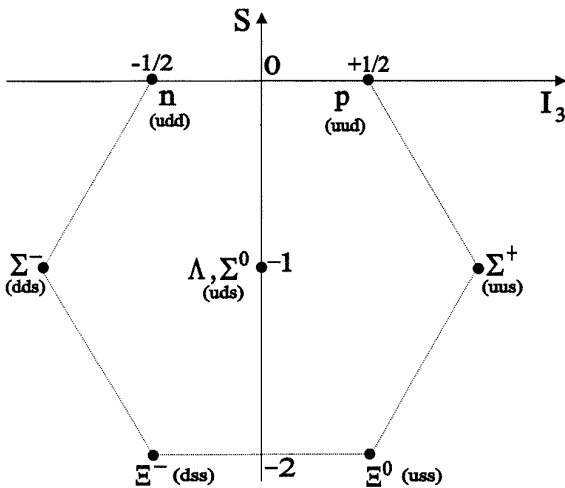
Fermiony

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

Model Standardowy

Bozony

Cząstki materii oddziałują ze sobą poprzez wymianę **nośników oddziaływań**

<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}

Własności oddziaływania wynikają z **symetrii cechowania** (QFT)

Model Standardowy: $U(1) \times SU(2) \times SU(3)$

Model Standardowy

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

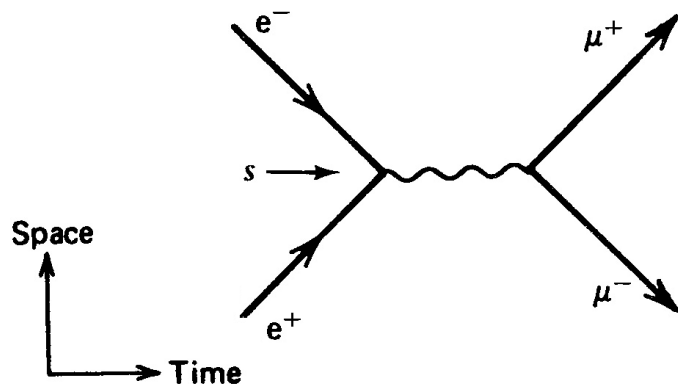
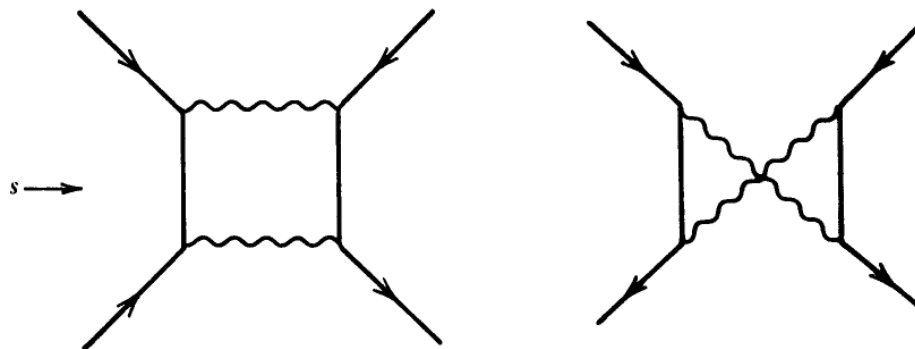


Diagram “drzewowy”

Kolejne diagramy (przykładowe)

next-to-leading order - NLO



Diagramy “pętlowe”

Model Standardowy

Diagramy Feynmana

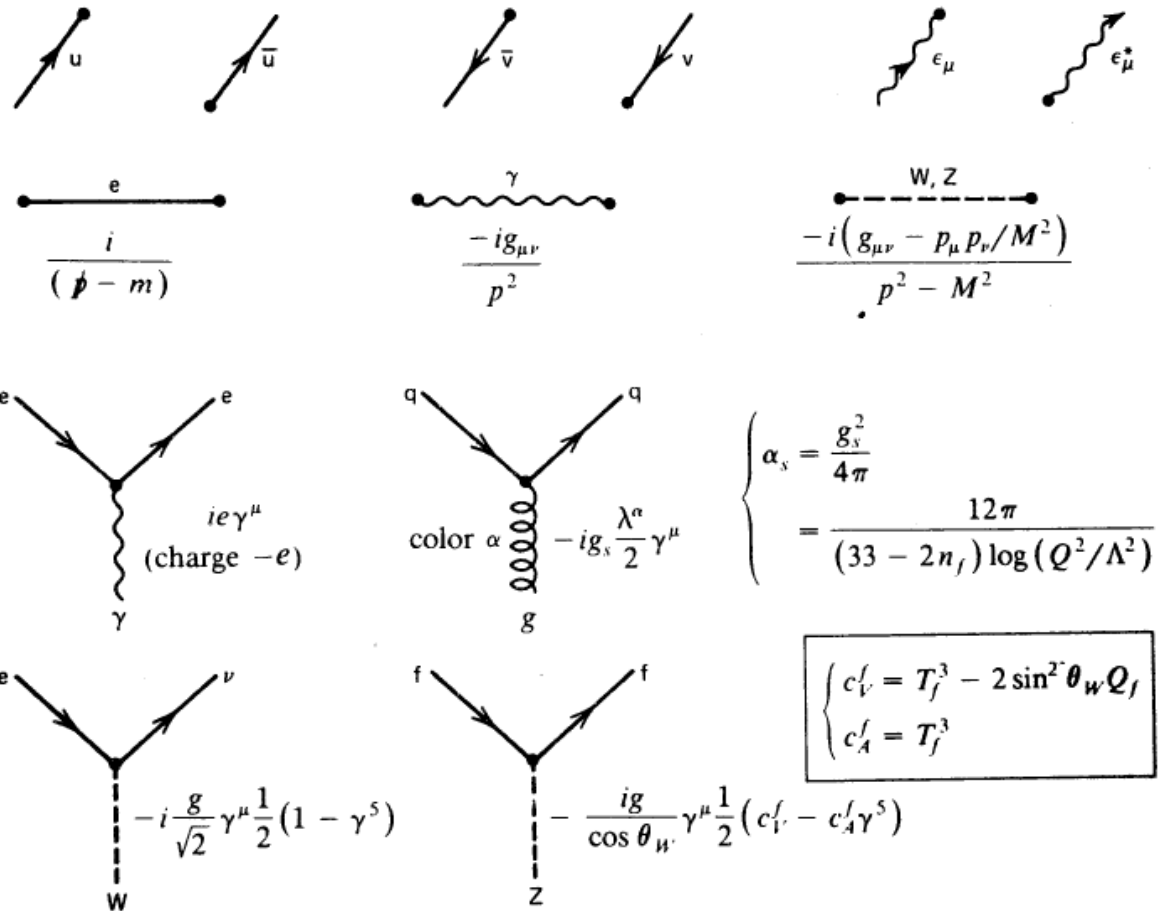
Każdemu diagramowi możemy przyporządkować wyrażenie na odpowiednią amplitudę rozpraszania

Wierzchołki decydują o wielkości przekroju czynnego:

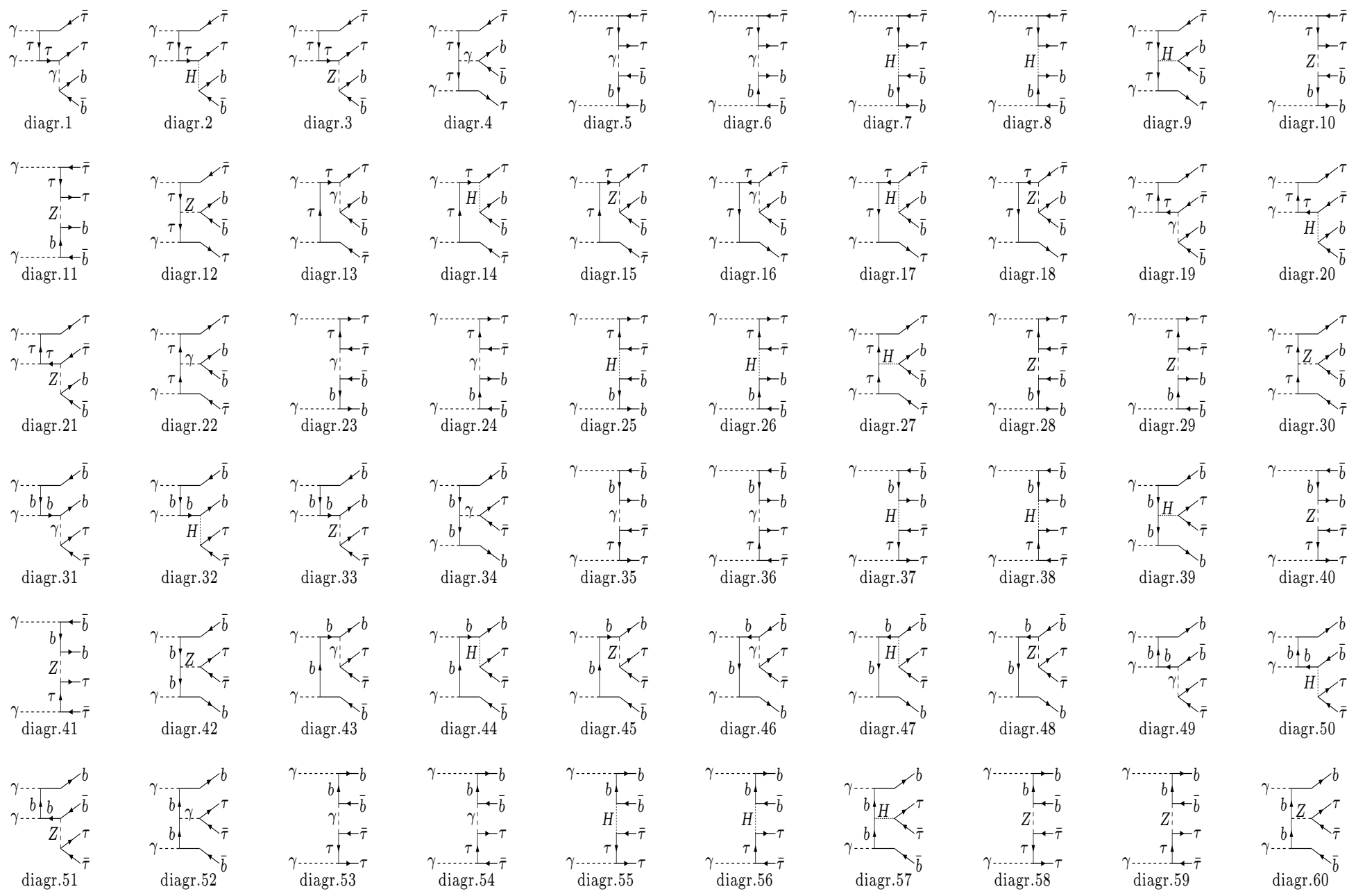
$$\alpha_s = \frac{g_s^2}{4\pi} \sim 0.1 - 0.2$$

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

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



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



Model Standardowy

Pytania i problemy

Wszystkie
obecnie
dostępne dane
zgodne są z
**Modelem
Standardowym**

ale...

- Dlaczego **materia** \equiv fermiony, **oddziaływania** \equiv bozony ?
- Dlaczego **3 pokolenia** kwarków i leptonów ?
- Dlaczego zachowane są **liczby leptonowe** i **barionowa**?
- Jaki jest powód **spontanicznego łamania symetrii** ?
- Gdzie jest **cząstka Higgsa** ?
- Gdzie się podziła **antymateria** ?
- Jakie są źródła **łamania CP** ?
- Jaka jest natura **neutrin** ?
- Skąd się bierze **prom. kosmiczne** b. wysokich energii ?
- Co to jest “**ciemna materia**” ?
- Co to jest “**ciemna energia**” !?

Model Standardowy

Eksperymenty

Duża liczba oraz różnorodność pytań i problemów

⇒ bardzo różnorodne eksperymenty i metody pomiarowe

- poszukiwania cząstki Higgsa lub supersymetrii
wiele możliwych sygnatur, potrzebna duża energia
⇒ detektory uniwersalne przy kolajderach (ATLAS, CMS)
- poszukiwanie cząstek ciemnej materii
⇒ także małe, bardzo czułe eksperymenty niskotłowe (CDMS)
- badanie oscylacji neutrin
⇒ ogromne detektory jednorodne (SK, SNO)
- badanie łamania CP
⇒ precyzyjne dedykowane układy przy kolajderach (Belle, BaBar, LHCb)

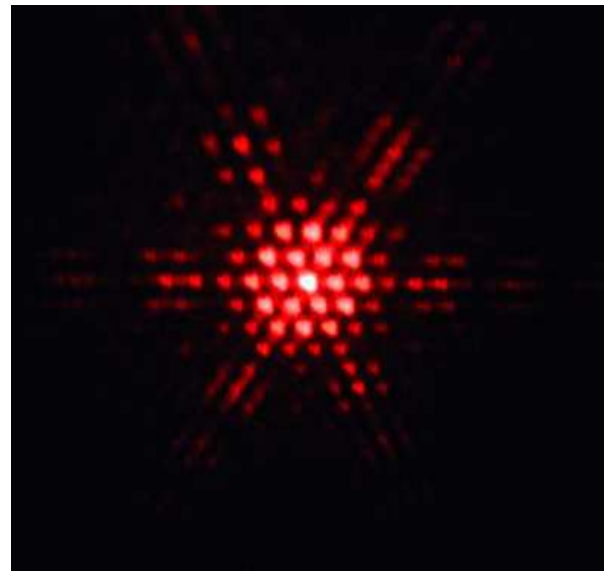
Pomiary cząstek elementarnych

Falowa natura cząstek

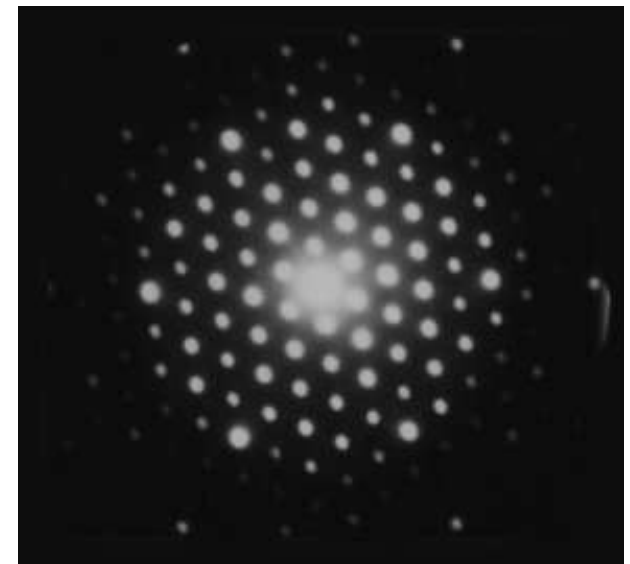
Mechanika kwantowa mówi nam, że ruch cząstki należy opisywać poprzez ewolucję funkcji falowej (“fale prawdopodobieństwa”).

Dla cząstek także obserwujemy interferencję i dyfrakcję.

Światło



Elektrony



Dyfrakcja na strukturach heksagonalnych

Pomiary cząstek elementarnych

Falowa natura cząstek

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...

Efekty falowe są istotne wtedy gdy

$$\Delta x \sim \lambda = \frac{h}{p}$$
$$h = 6.6 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} \approx 1 \text{ GeV}/c \cdot \text{fm}$$

W procesach detekcji cząstek ($\Delta x \sim \mu m$) efekty falowe są całkowicie zaniedbywalne!

Cząstki zachowują się jak klasyczne “kulki”, masy punktowe...

Pomiary cząstek elementarnych

Czas życia

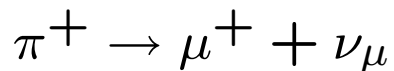
Typowe czasy życia cząstek
(rzęd wielkości):

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

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

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

Przykład:



rozpad słaby

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

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

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

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

przyjmujemy $c \equiv 1$ czyli:

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

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

cT określa orientacyjny zasięg cząstki
(zaniedbujemy prędkość cząstki i dylatację czasu)

\Rightarrow czasami wygodne i łatwiejsze do zapamiętania

Pomiary cząstek elementarnych

Czasy życia

Cząstki “quasi-stabilne”

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

Cząstki o mierzalnym zasięgu

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

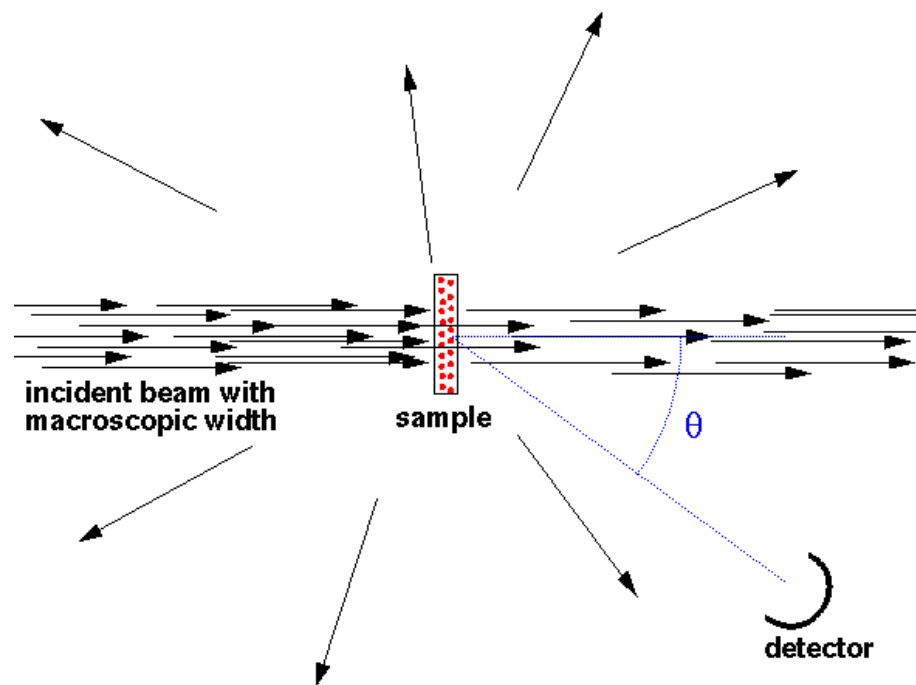
Cząstki o niemierzalnym zasięgu

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

Przekrój czynny

W przypadku zderzeń cząstek (lub jąder atomowych) nie jesteśmy w stanie kontrolować wszystkich parametrów procesu (np. parametru zderzenia).

Nawet gdyby nie istniały efekty kwantowe możemy jedynie mówić o **prawdopodobieństwie** określonego przebiegu zderzenia



prawdopodobieństwo reakcji możemy wyrazić poprzez **całkowy przekrój czynny** - σ

$$p = n \sigma dx$$

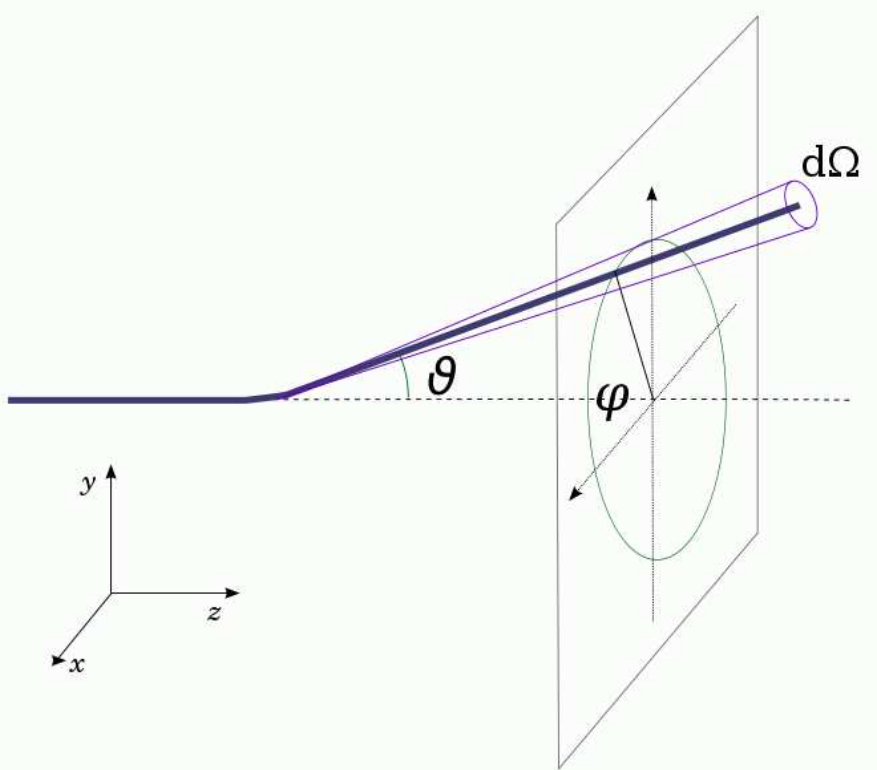
n - gęstość centr rozproszenia
na jednostkę objętości

dx - grubość tarczy

Jednak w większości przypadków nie obserwujemy wszystkich przypadków rozproszenia, a jedynie wybrany zakres (kątown, energii...)

Przekrój czynny

W przypadku, gdy interesuje nas rozproszenie pod określonym kątem, jego **prawdopodobieństwo** określa **różniczkowy przekrój czynny**:



$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{1}{F S n dx} \cdot \frac{dN}{d\Omega}$$

- $d\Omega$ - element kąta bryłowego, w który następuje rozproszenie
- dN - liczba przypadków rejestrowanych w tym kącie
- F - strumień cząstek wiązki (na jednostkę powierzchni)
- S - powierzchnia tarczy

Można także określać różniczkowy przekrój czynny w innych zmiennych, np. energii rozproszonej cząstki, masy niezmienniczej produkowanego układu..

Przekrój czynny

Przekrój czynny ma wymiar powierzchni.

Klasycznie:

pole powierzchni poprzecznej obiektu

Jednostka używana w fizyce jądrowej:

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

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

$$1 \text{ b} = (10 \text{ fm})^2$$

w fizyce wysokich energii:

$$\text{nanobarn} \quad 1 \text{ nb} = 10^{-9} \text{ b}$$

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

$$\text{femto} - \quad 1 \text{ fb} = 10^{-15} \text{ b}$$

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} ...

Promieniotwórczość naturalna

Odkrycie

Odkrycie promieniotwórczości uranu: **Henri Becquerel**, 1896.

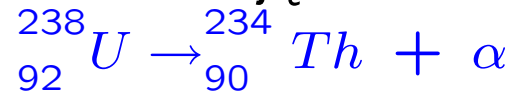
1903 - nagroda Nobla, wraz z **M.Skłodowską i P.Curie**

E.Rutherford i F.Soddy:

Źródłem promieniowania są **przemiany** jednych **pierwiastków** w inne.

Separacja w polu magnetycznym:

- promieniowanie α - jądra helu



- promieniowanie β - elektrony (lub pozytony)



- promieniowanie γ - wysokoenergetyczne fotony

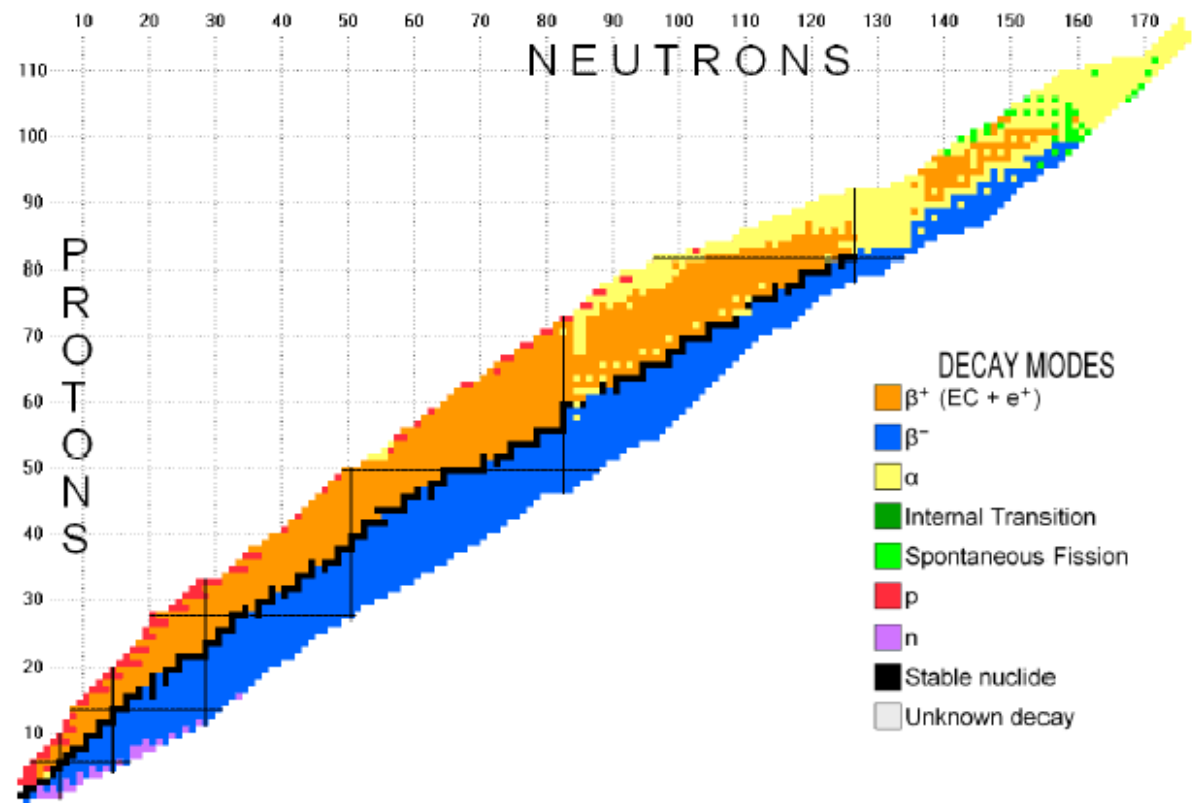
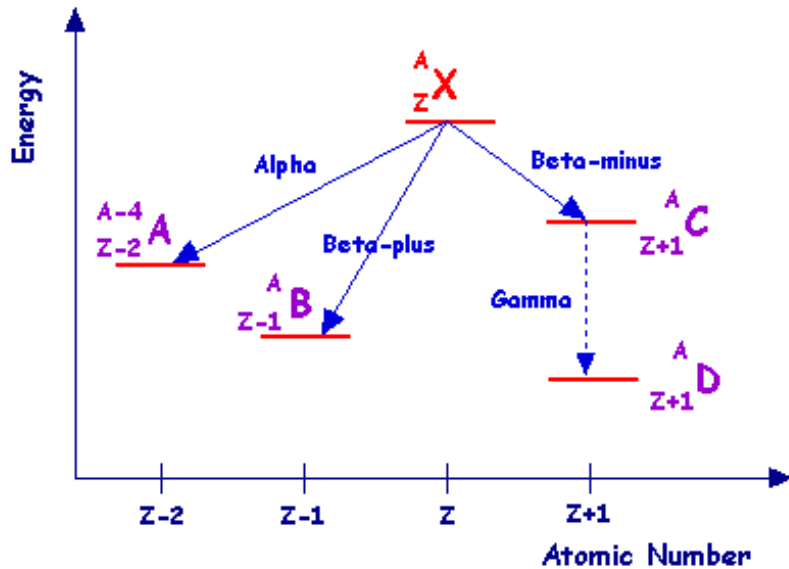


Promieniotwórczość naturalna

Rozpady promieniotwórcze

Jądro promieniotwórcze dąży do stanu o najniższej energii.

Możliwe procesy:

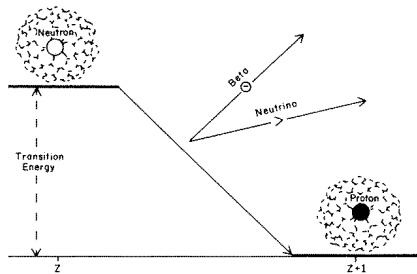


Promieniotwórczość naturalna

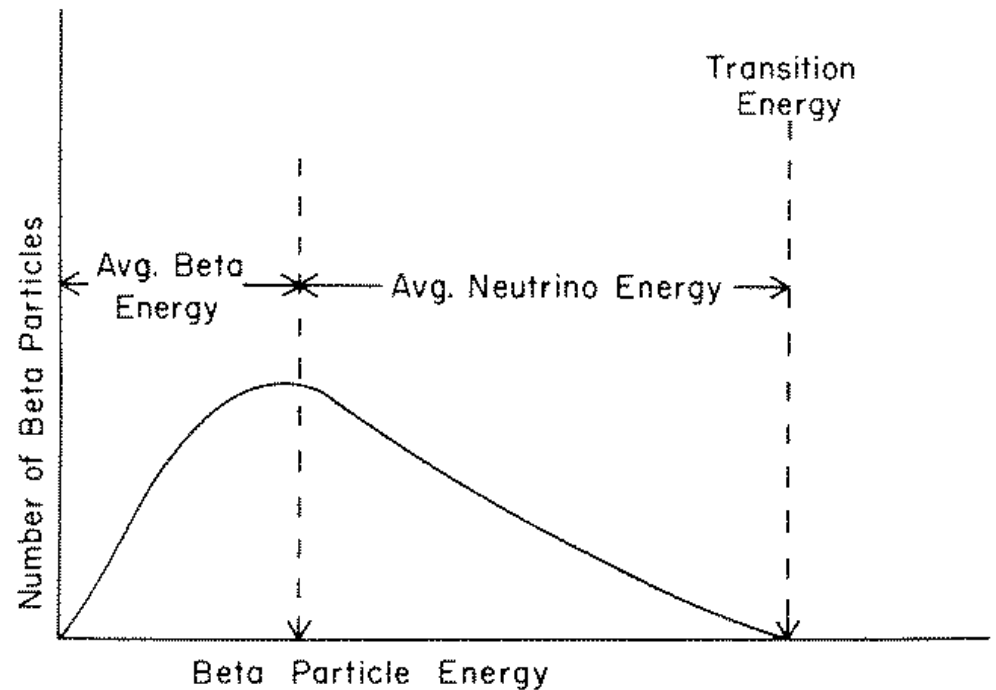
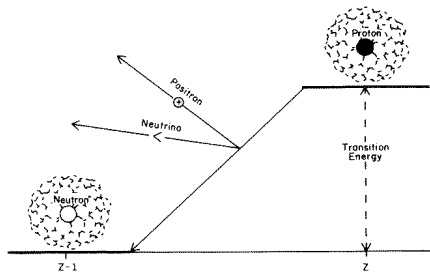
Rozpad β^\pm

β^- - jądra z nadmiarem neutronów

Rozpad trójciałowy - szerokie spektrum energii



β^+ - jądra z deficytem neutronów

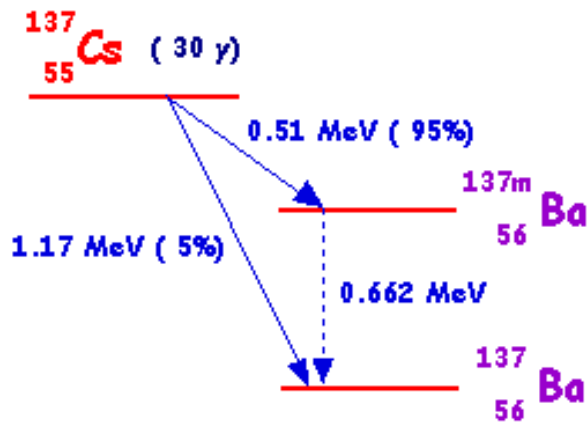


Typowe energie maksymalne $\sim 0.1 - 1 \text{ MeV}$

Promieniotwórczość naturalna

Promieniowanie γ

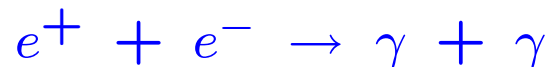
Większość rozpadów β^\pm
→ do stanu wzbudzonego



Powrót do stanu podstawowego:
monoenergetyczne promieniowanie γ

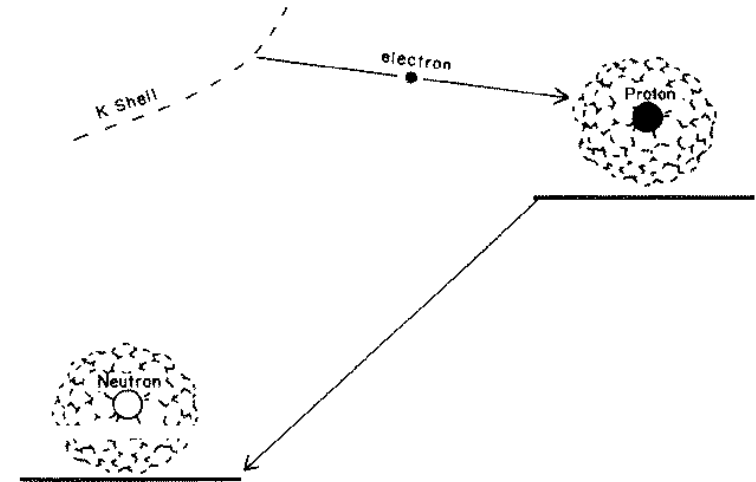
Typowe energie $\sim 0.1 - 1 \text{ MeV}$

β^+ : dodatkowa linia 511 keV z anihilacji:



Wychwył elektronu

Dla jądra z deficytem neutronów



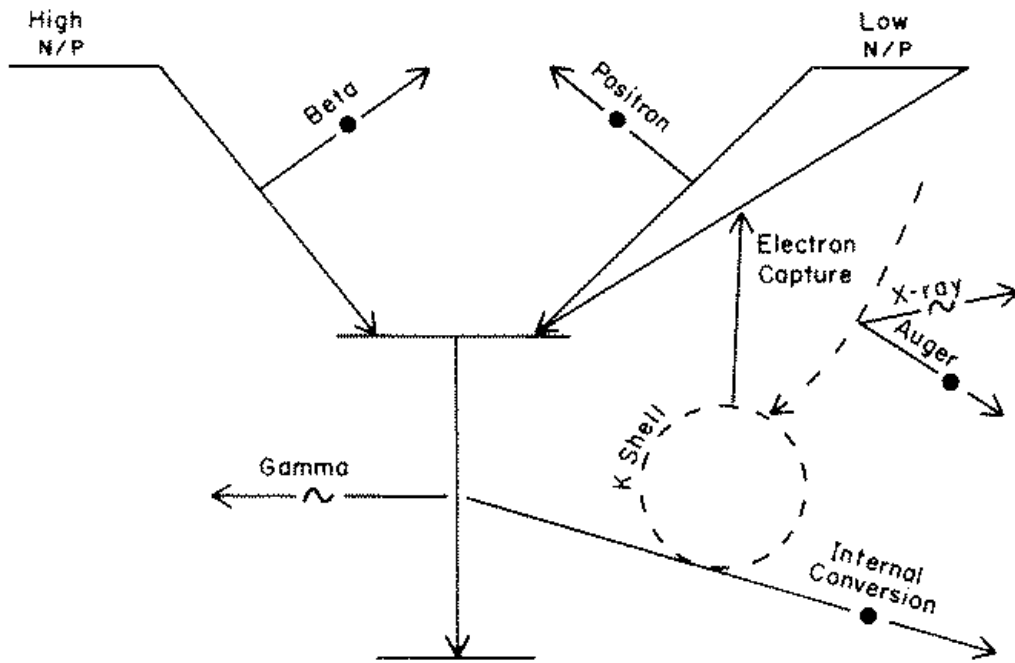
Wychwytywany jest naogół e^- z powłoki K.

Pozostała "dziura" → promieniowanie X

Typowe energie rzędu keV

Promieniotwórczość naturalna

Podsumowanie

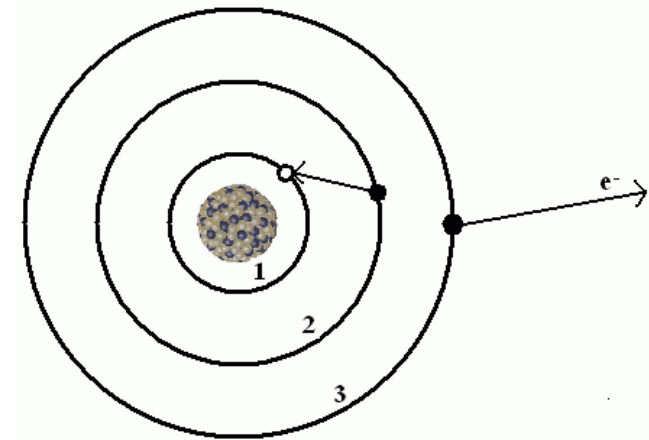


Deekscytacja jądra atomowego może też zajść z emisją elektronu:

konwersja wewnętrzna kwantu gamma

Podobnie w przypadku **wychwytu e^-** : zamiast emisji fotonu X energia może być przekazana do elektronu

efekt Augera



30. COMMONLY USED RADIOACTIVE SOURCES

From Review of Particle Physics, <http://pdg.lbl.gov/>

Table 30.1. Revised November 1993 by E. Browne (LBNL).

Nuclide	Half-life	Type of decay	Particle		Photon	
			Energy (MeV)	Emission prob.	Energy (MeV)	Emission prob.
$^{22}_{11}\text{Na}$	2.603 y	β^+ , EC	0.545	90%	0.511	Annih.
					1.275	100%
$^{54}_{25}\text{Mn}$	0.855 y	EC			0.835	100%
					Cr K x rays 26%	
$^{55}_{26}\text{Fe}$	2.73 y	EC			Mn K x rays:	
					0.00590	24.4%
					0.00649	2.86%
$^{57}_{27}\text{Co}$	0.744 y	EC			0.014	9%
					0.122	86%
					0.136	11%
					Fe K x rays 58%	
$^{60}_{27}\text{Co}$	5.271 y	β^-	0.316	100%	1.173	100%
					1.333	100%
$^{68}_{32}\text{Ge}$	0.742 y	EC			Ga K x rays 44%	
$\rightarrow ^{68}_{31}\text{Ga}$		β^+ , EC	1.899	90%	0.511	Annih.
					1.077	3%
$^{90}_{38}\text{Sr}$	28.5 y	β^-	0.546	100%		
$\rightarrow ^{90}_{39}\text{Y}$		β^-	2.283	100%		
$^{106}_{44}\text{Ru}$	1.020 y	β^-	0.039	100%		
$\rightarrow ^{106}_{45}\text{Rh}$		β^-	3.541	79%	0.512	21%
					0.622	10%

“Emission probability” is the probability per decay of a given emission; because of cascades these may total more than 100%. Only principal emissions are listed. EC means electron capture, and e^- means monoenergetic internal conversion (Auger) electron. The intensity of 0.511 MeV e^+e^- annihilation photons depends upon the number of stopped positrons. Endpoint β^\pm energies are listed. In some cases when energies are closely spaced, the γ -ray values are approximate weighted averages. Radiation from short-lived daughter isotopes is included where relevant.

Half-lives, energies, and intensities are from E. Browne and R.B. Firestone, *Table of Radioactive Isotopes* (John Wiley & Sons, New York, 1986), recent *Nuclear Data Sheets*, and *X-ray and Gamma-ray Standards for Detector Calibration*, IAEA-TECDOC-619 (1991).

Neutron data are from *Neutron Sources for Basic Physics and Applications* (Pergamon Press, 1983).

Promieniowanie kosmiczne

Promieniowanie pierwotne - obserwowane poza atmosferą ziemską

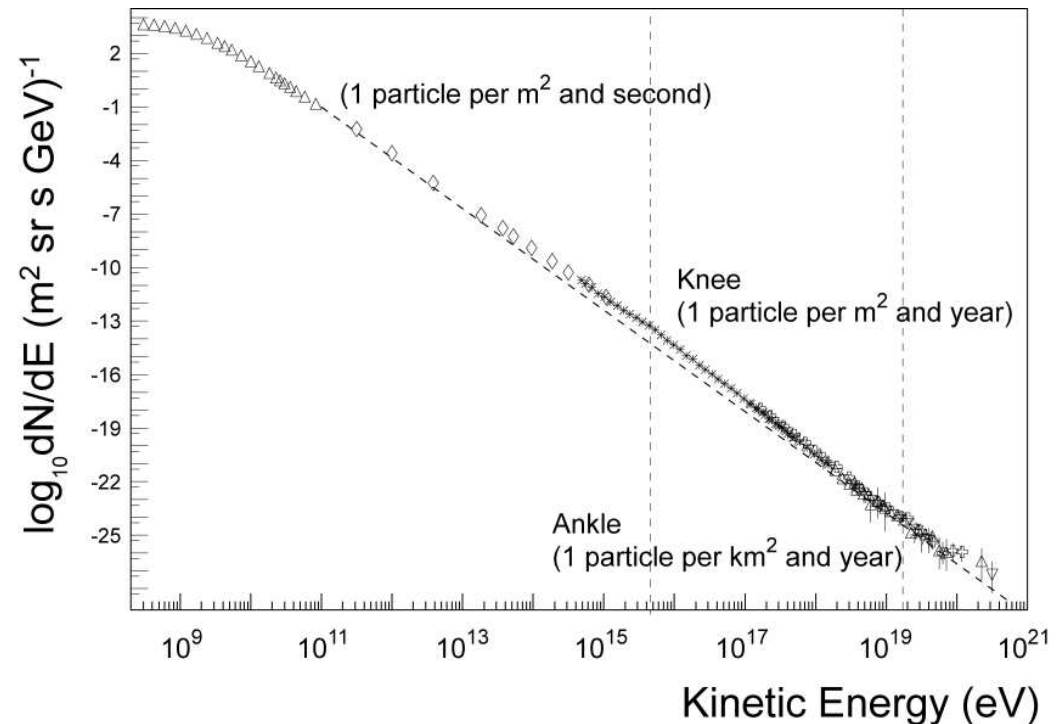
Energie dochodzące do 10^{12} GeV.

Skład (pomijając neutrina):

- protony (jądra H) $\sim 86\%$
- cząstki α (jądra He) $\sim 13\%$
- cięższe jądra $\sim 1\%$
- neutrony, elektrony, fotony $\ll 1\%$

Wciąż nie rozumiemy skąd to promieniowanie pochodzi:

- **supernowe**
- **aktywne jądra galaktyk**
- **???**



Nie rozumiemy dlaczego dociera do Ziemi !...

(powyżej $5 \cdot 10^{19}$ eV powinno być pochłaniane w oddziaływaniu z mikrofalowym promieniowaniem tła)

Promieniowanie kosmiczne

Wtórne promieniowanie kosmiczne

Promieniowanie pierwotne oddziałuje w atmosferze Ziemi. Produkowane są liczne cząstki wtórne, głównie piony i kaony:

$$p + N \rightarrow X + n \pi + m K + \dots$$

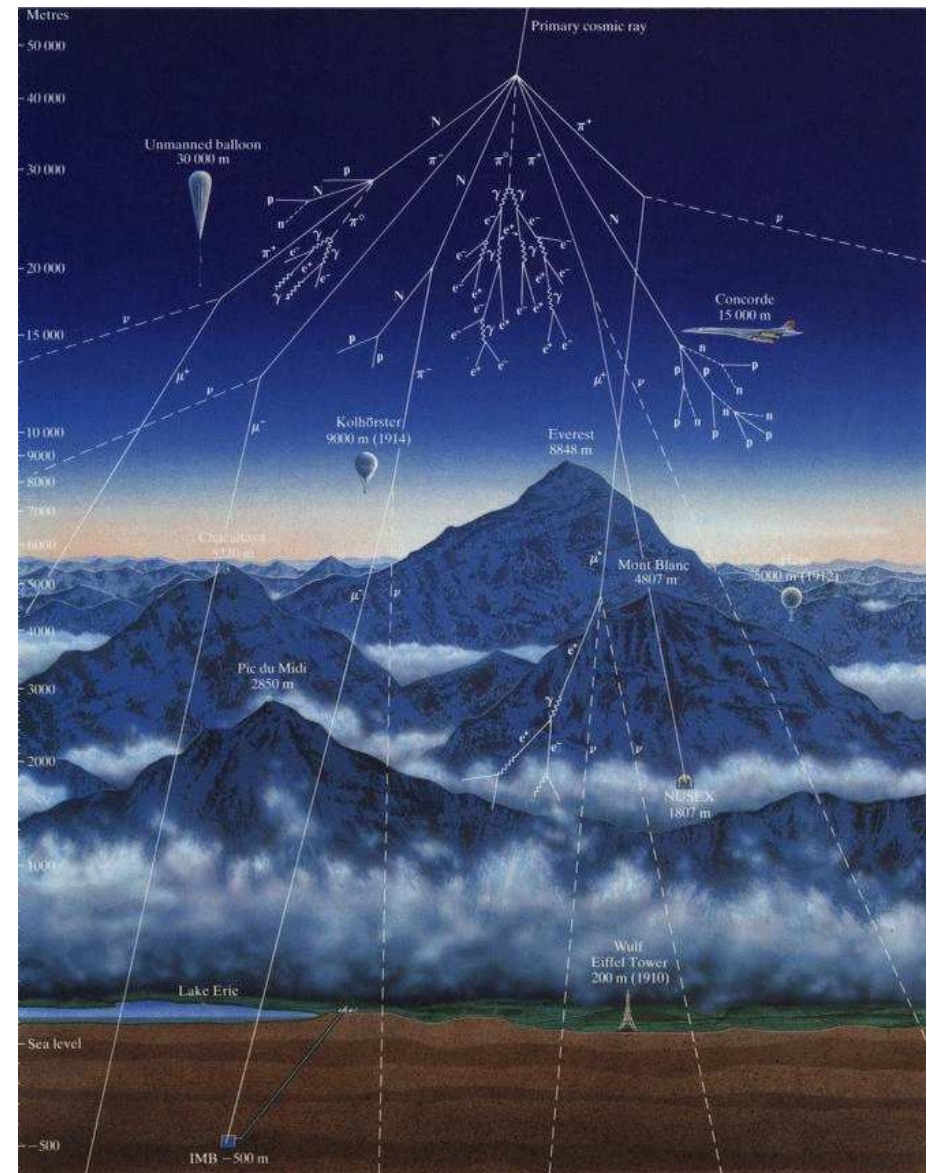
$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$$

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

Docierają do powierzchni Ziemi

- miony $\mu^\pm \sim 70\%$
- elektrony $e^\pm \sim 25\%$
- protony, piony $\pi^\pm \sim 3\%$

Łącznie około $180 \text{ na } m^2 \cdot s$



Promieniowanie kosmiczne

Wykorzystanie

Do lat 50 XX w. badanie oddziaływań promieniowania kosmicznego z materią było jednym z głównych kierunków badań.

Wciąż pozostaje ważnym źródłem danych.

Budowane są coraz większe detektory do pomiaru promieniowania kosmicznego najwyższych energii.

Ważne narzędzie kalibracji detektorów.

Projekt “Pierre Auger Observatory”:

obserwacja promieniowania czerenkowa i fluorescencji kaskady w atmosferze.

1600 detektorów rozmieszczonych na obszarze 3000 km²

