

Metody eksperymentalne w fizyce wysokich energii

prof. dr hab. A.F.Żarnecki

Zakład Cząstek i Oddziaływań Fundamentalnych IFD

Wykład I

- Wprowadzenie
- ⇒ Cząstki Modelu Standardowego
- ⇒ Układ jednostek
- ⇒ Promieniotwórczość naturalna

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, cząstki i oddziaływania w Modelu Standardowym,
- 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 12¹⁵ – 14⁰⁰ w sali SST. Według planu przewidziane jest 15 wykładów.

Czy jest możliwa (w pojedynczych przypadkach) zmiana godziny?

Egzamin

Prawdopodobnie w formie egzaminu ustnego.

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.
- + Materiały zamieszczane na stronie wykładu

<http://www.fuw.edu.pl/~zarnecki/mefwe/>

Świat cząstek elementarnych

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 <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

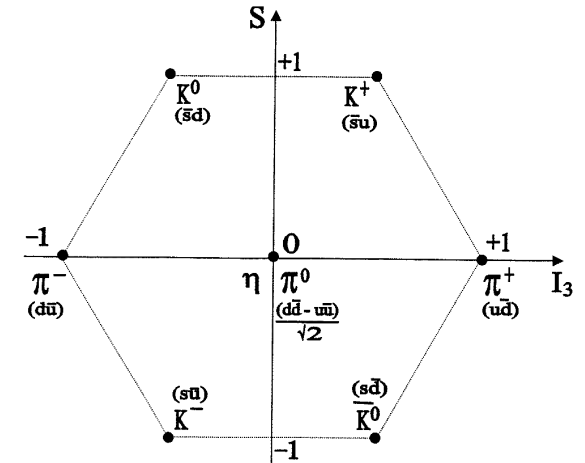
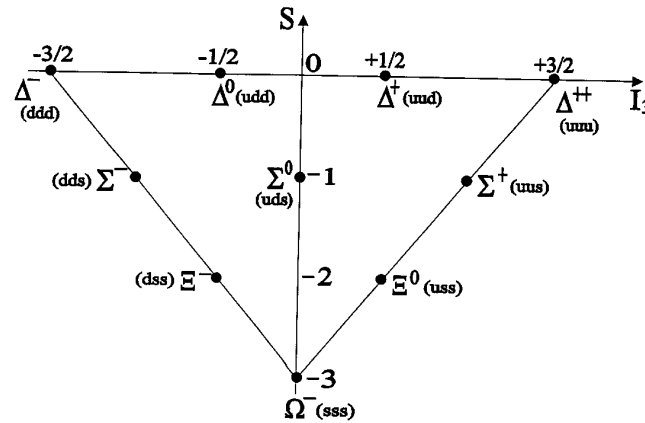
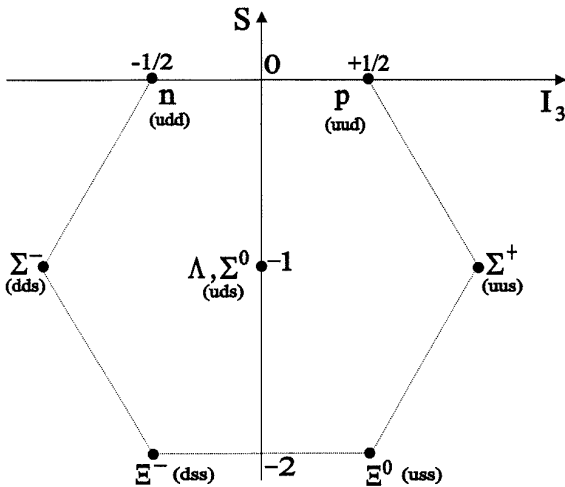
Fermiony

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

Świat cząstek elementarnych

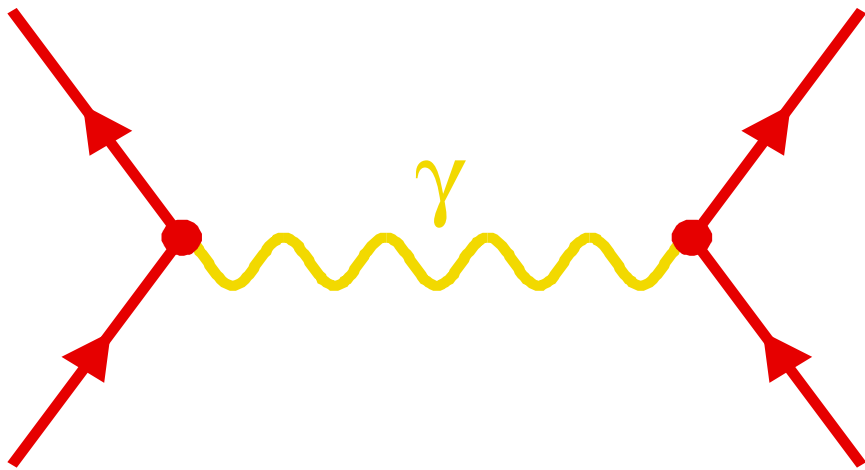
Bozony

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

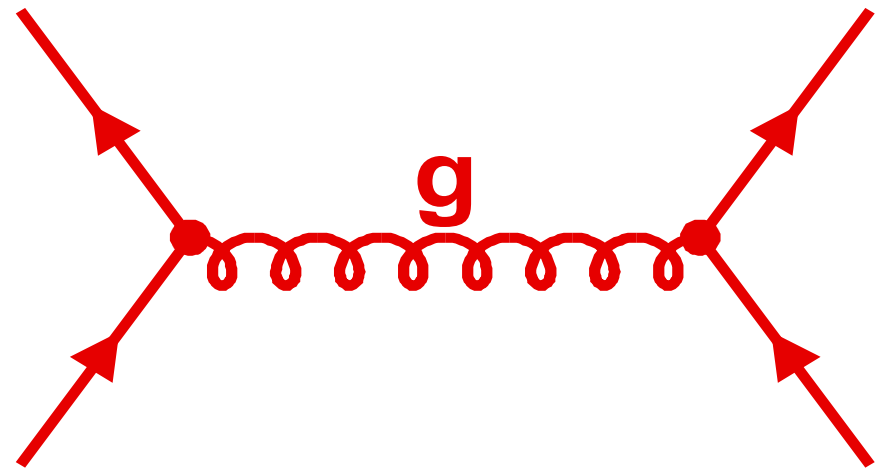
Nośnik przekazuje część energii i/lub pędu jednej cząstki drugiej cząstce

<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}

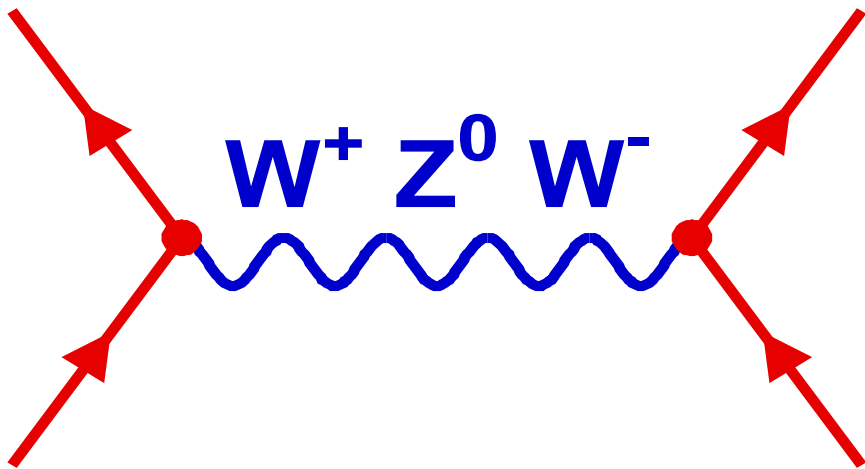
“moc” - przykładowe porównanie wielkości oddziaływań dla dwóch sąsiadujących protonów



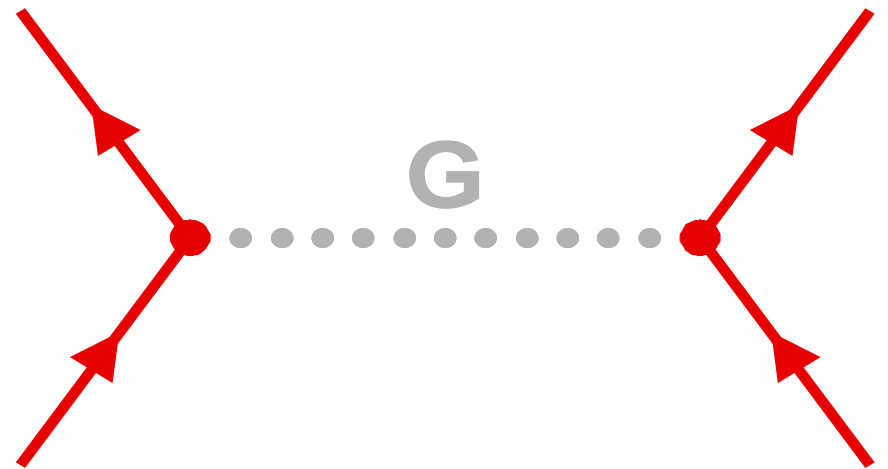
elektromagnetyczne



silne



slabe



grawitacyjne

Świat cząstek elementarnych

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

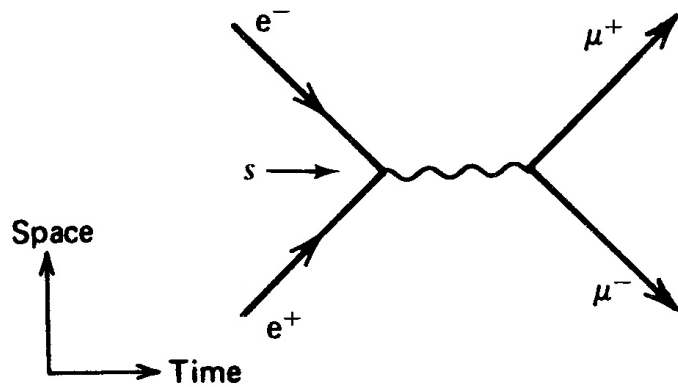
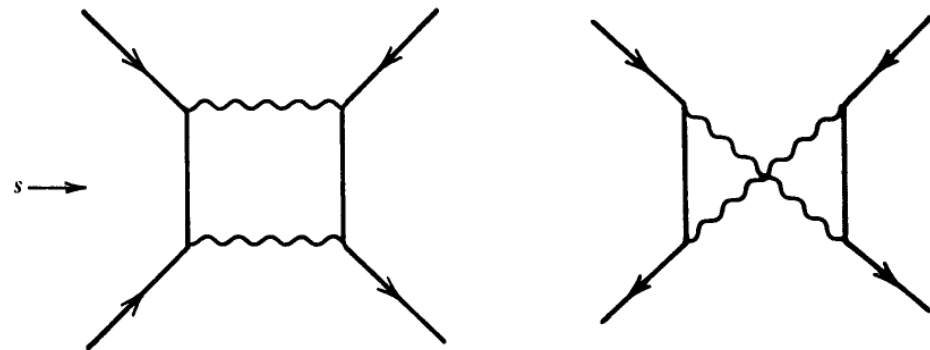


Diagram “drzewowy”

Kolejne diagramy (przykładowe)

next-to-leading order - NLO



Diagramy “pętlowe”

Świat cząstek elementarnych

Diagramy Feynmana

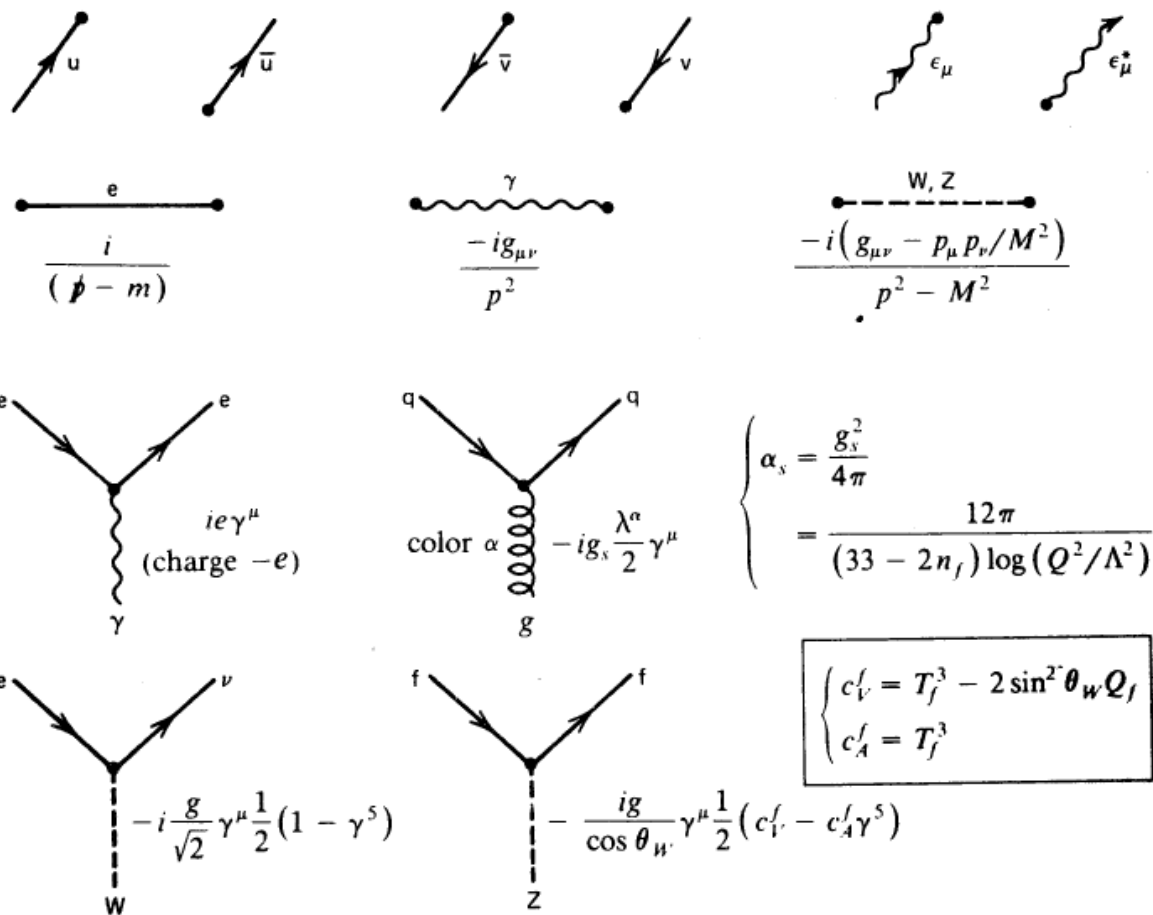
Każdemu diagramowi możemy przyporządkować wyrażenie na odpowiednią amplitudę rozpraszania

Wierzchołki decydują o wielkości przekroju czynnego:

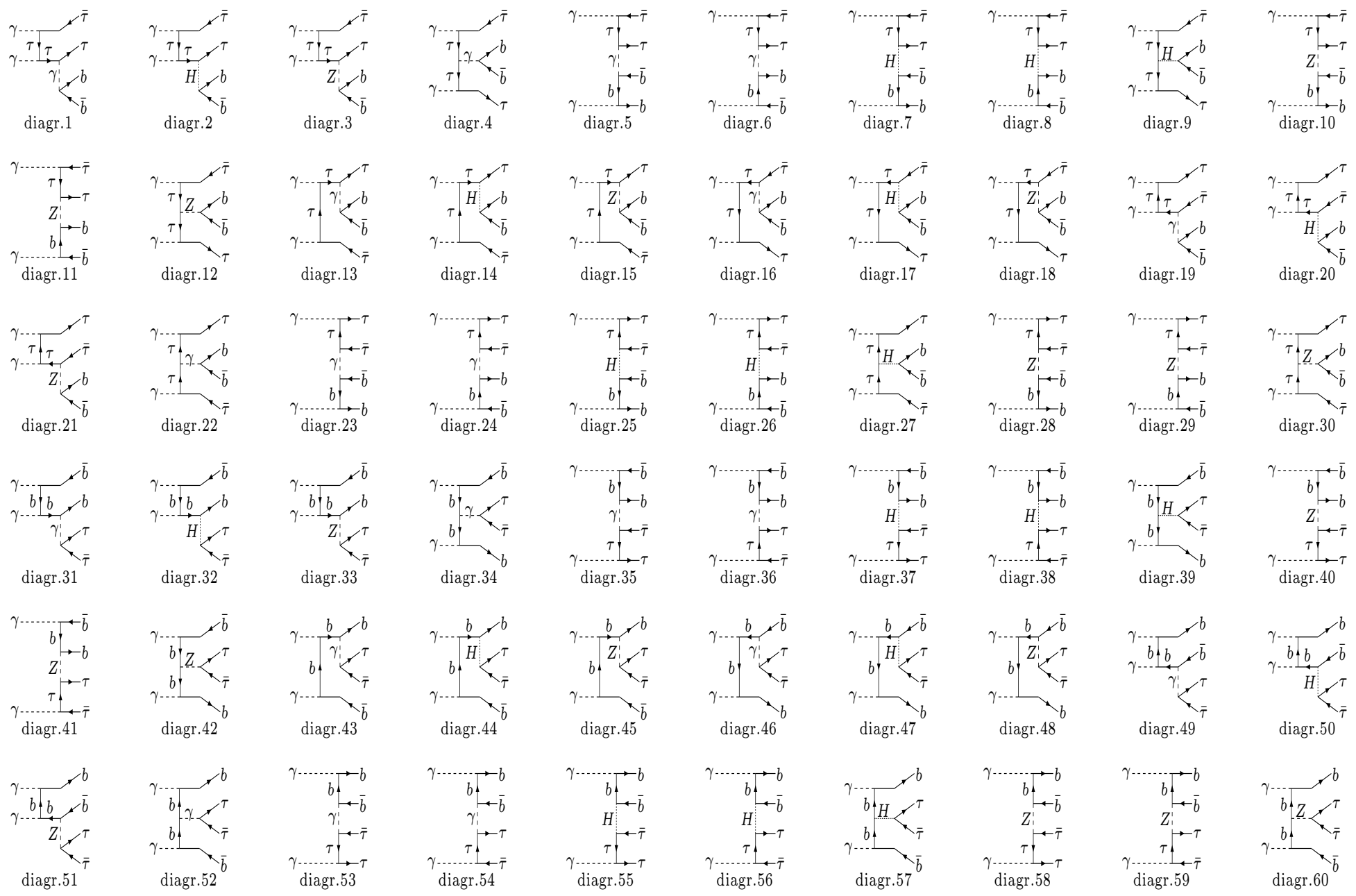
$$\alpha_s = \frac{g_s^2}{4\pi} \sim 0.1 - 0.2$$

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

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



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



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

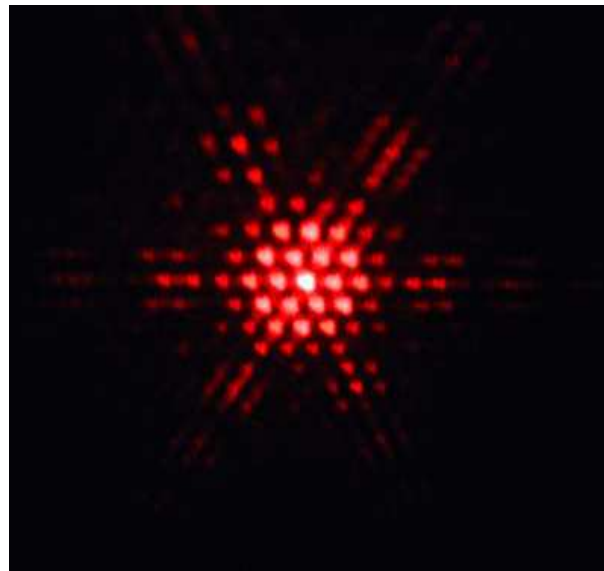
Świat cząstek elementarnych

Falowa natura cząstek

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

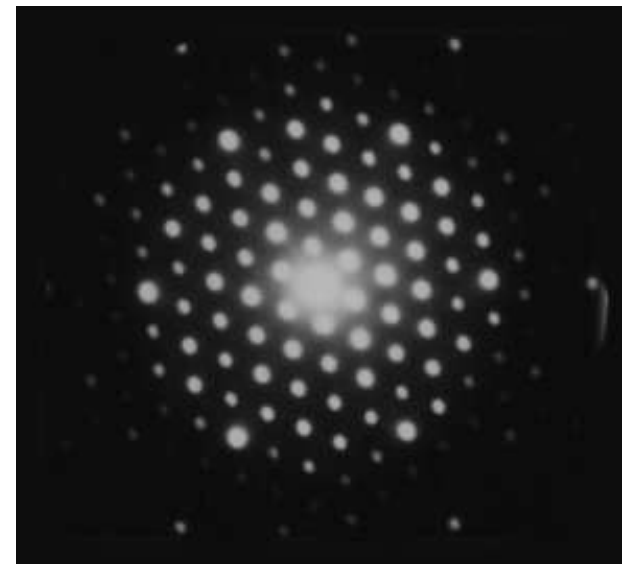
Dla cząstek także obserwujemy interferencję i dyfrakcję.

Światło



Dyfrakcja na strukturach heksagonalnych

Elektrony



Świat 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 ($\Delta x \sim \mu\text{m}$) efekty falowe są całkowicie zaniedbywalne!

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

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**.

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

Jednostki pochodne:

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

W jednostkach energii możemy także wyrazić pęd cząstki

$$1 eV/c = 5.3 \cdot 10^{-28} Ns$$

w granicy ultrarelatywistycznej pęd cząstki $pc = E$

Jednostkę energii możemy też przyjąć za jednostkę masy ($E_0 = mc^2$; $c \equiv 1$)

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

Jednostki

Masy cząstek

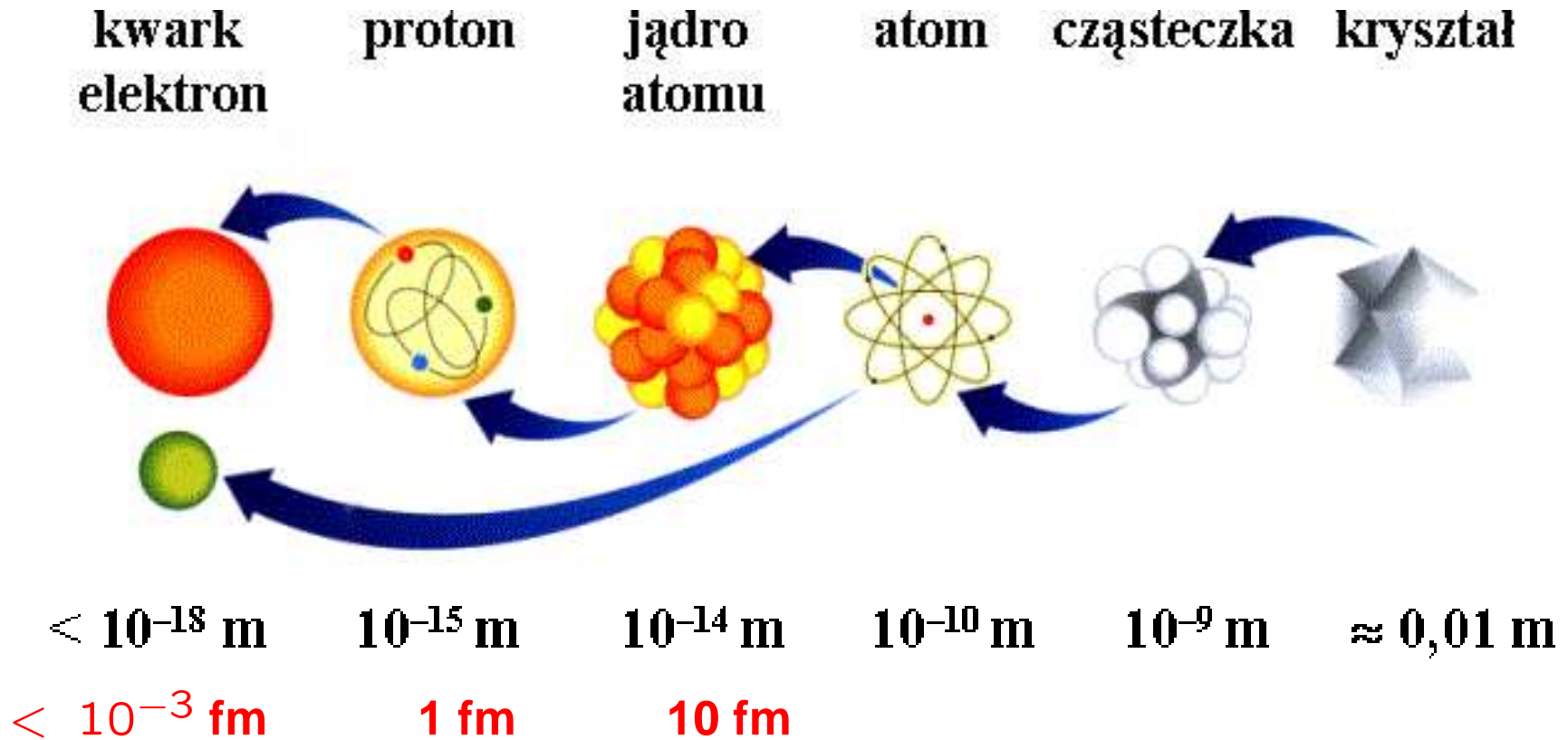
elektron	e	511 keV	$(9.1 \cdot 10^{-31} \text{ kg})$
proton	p	938 MeV	$(1.7 \cdot 10^{-27} \text{ kg})$
mion	μ	106 MeV	
taon	τ	1.78 GeV	
pion	π^0	135 MeV	
	π^\pm	140 MeV	
kwark	u	1-5 MeV	
	d	3-9 MeV	
	s	75-170 MeV	
	c	1.15-1.35 GeV	
	b	4.0-4.4 GeV	
	t	$171 \pm 2 \text{ GeV}$	
bozon	W^\pm	80.4 GeV	
	Z^0	91.2 GeV	

Jednostki

Długość

Powszechnie używaną jednostką długości jest **1 femtometr**

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



Jednostki

Czas

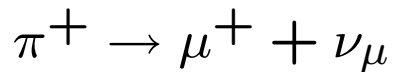
Typowe czasy życia cząstek
(rzęd wielkości):

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

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

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

Przykład:



rozpad słaby

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

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

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

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

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	$2.2 \cdot 10^{-6} \text{ s}$	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

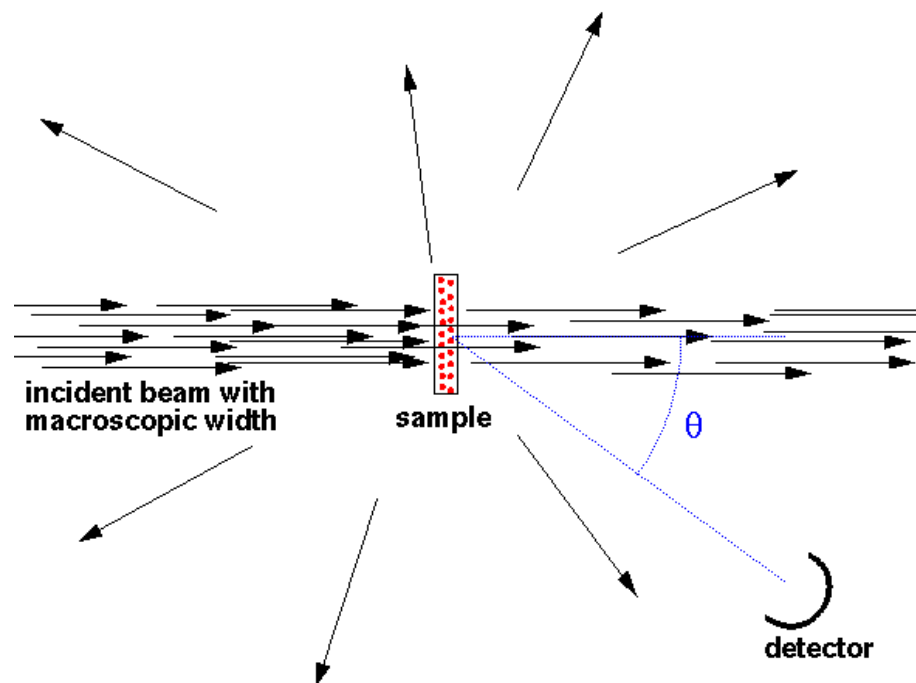
Cząstki o niemierzalnym zasięgu

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

$$p = n \sigma dx$$

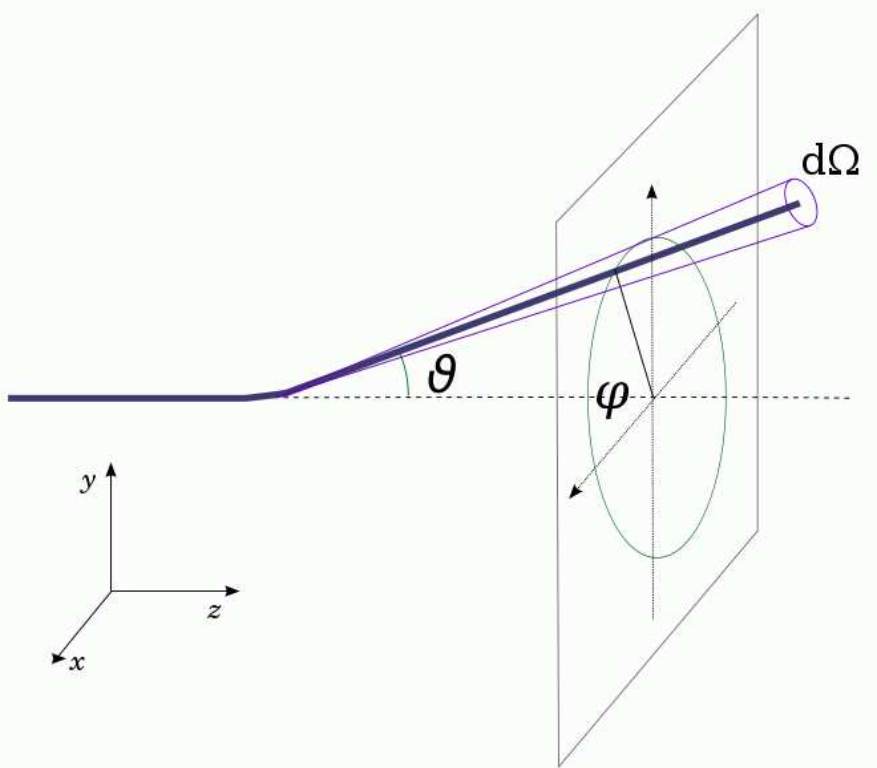
n - gęstość centr rozproszenia
na jednostkę objętości

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..

Jednostki

Przekrój czynny

Przekrój czynny ma wymiar powierzchni.

Klasycznie:

pole powierzchni poprzecznej obiektu

Jednostka używana w fizyce jądrowej:

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

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

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.

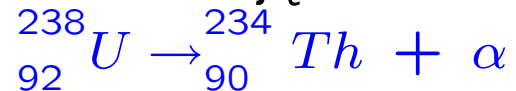
1903 - nagroda Nobla, wraz z **M.Skłodowską i P.Curie**

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

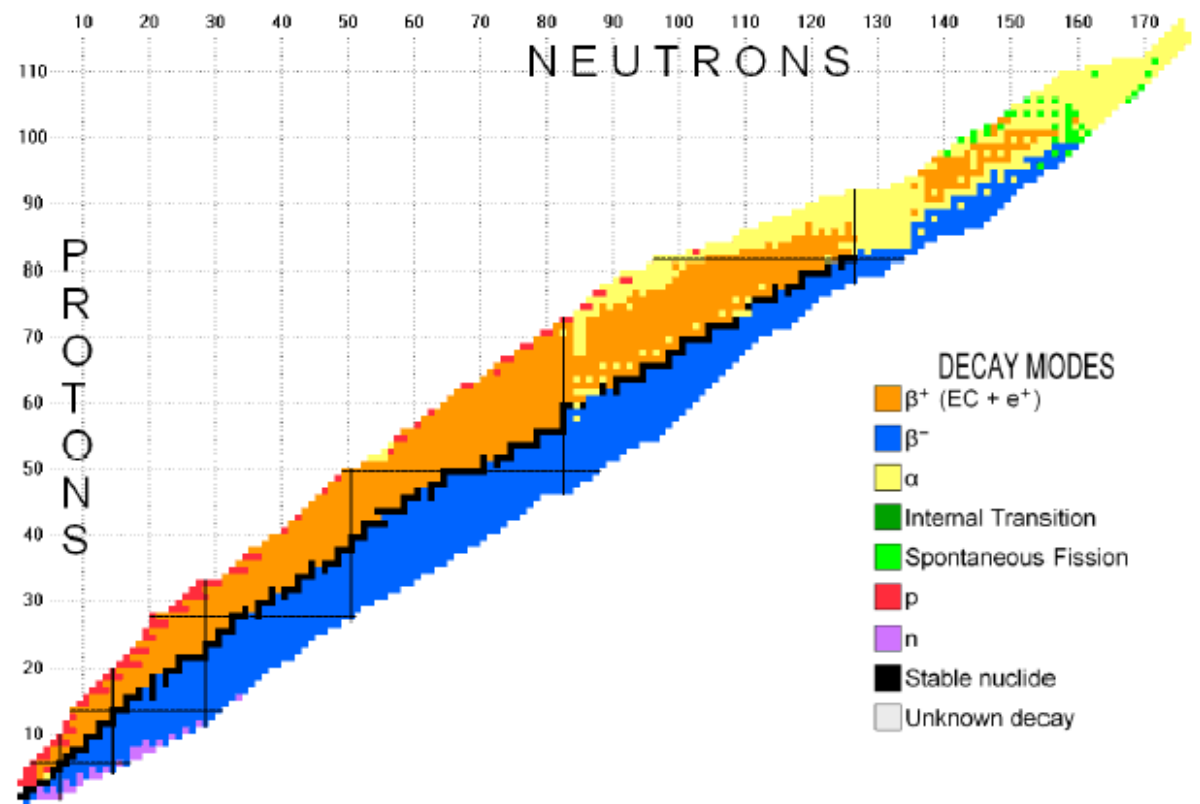
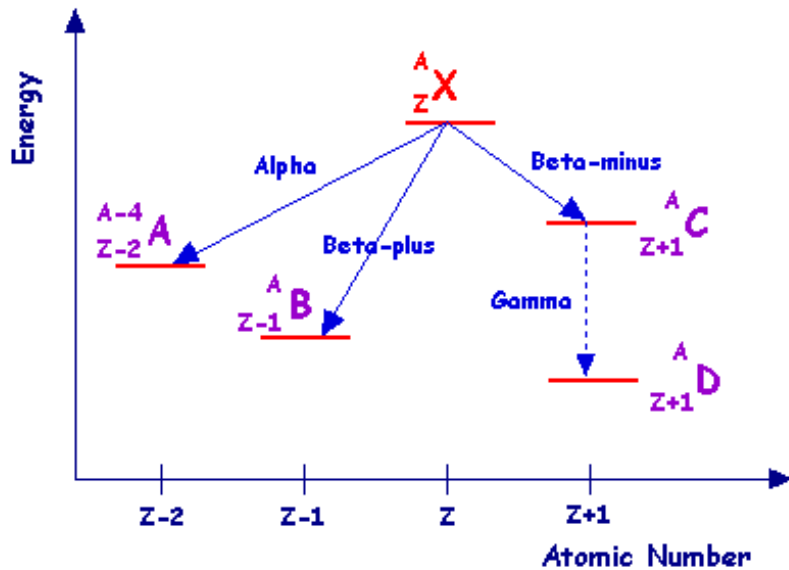


Promieniotwórczość naturalna

Rozpady promieniotwórcze

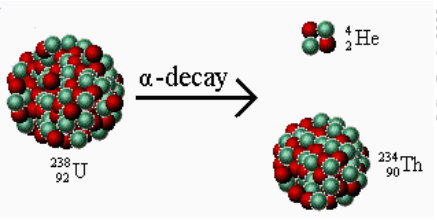
Jądro promieniotwórcze dąży do stanu o najniższej energii.

Możliwe procesy:

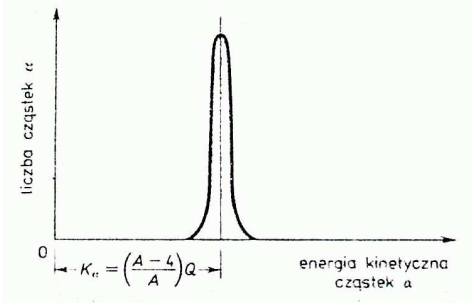


Promieniotwórczość naturalna

Rozpad α



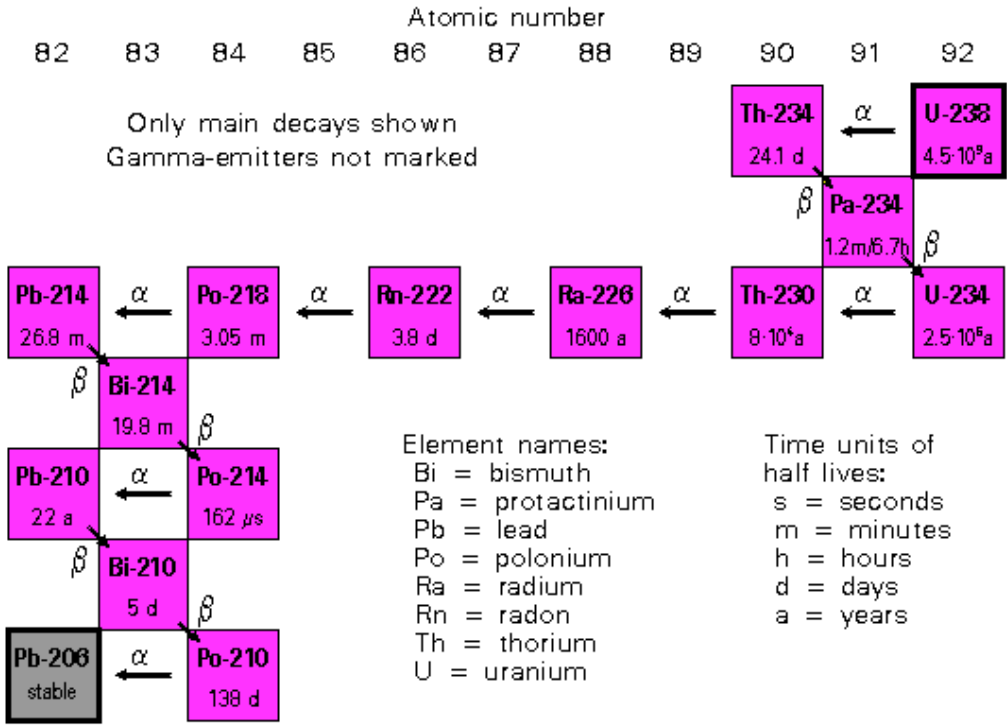
Dyskretne widmo energii:



Energia emitowanej cząstki

$$E_\alpha = \frac{M^2 - M'^2 + m_\alpha^2}{2M} \approx \Delta M c^2$$

The uranium-238 decay chain



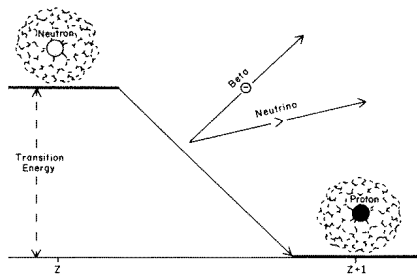
Większość dostępnych źródeł $E_k \sim 4 - 6 \text{ MeV}$

Promieniotwórczość naturalna

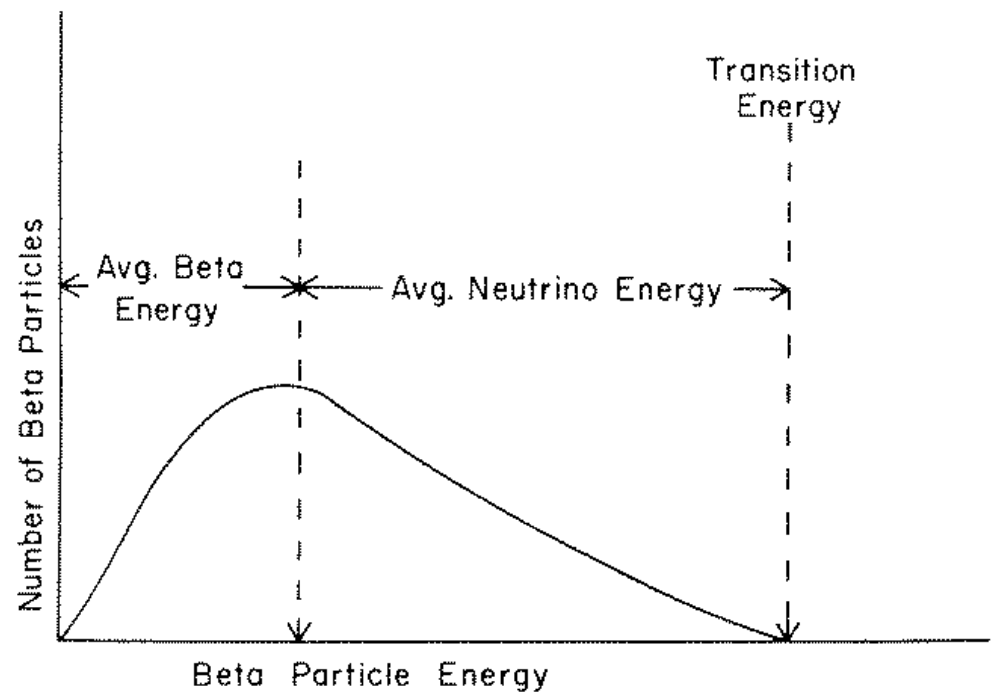
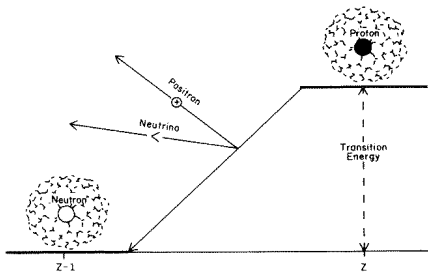
Rozpad β^\pm

β^- - jądra z nadmiarem neutronów

Rozpad trójciałowy - szerokie spektrum energii



β^+ - jądra z deficytem neutronów

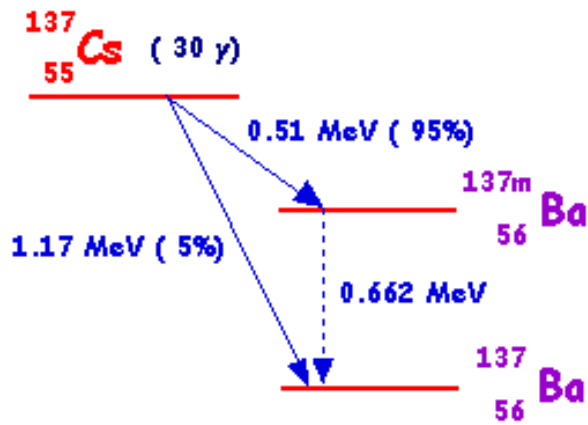


Typowe energie maksymalne $\sim 0.1 - 1 \text{ MeV}$

Promieniotwórczość naturalna

Promieniowanie γ

Większość rozpadów β^\pm
→ do stanu wzbudzonego



Powrót do stanu podstawowego:
monoenergetyczne promieniowanie γ

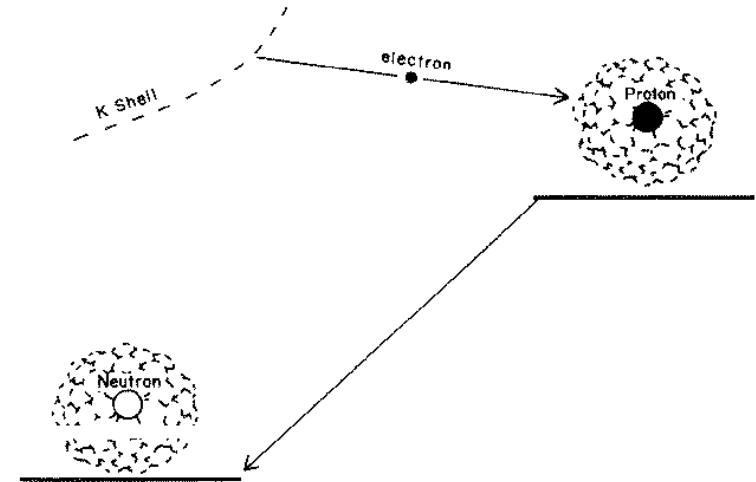
Typowe energie $\sim 0.1 - 1 \text{ MeV}$

β^+ : dodatkowa linia 511 keV z anihilacji:



Wychwył elektronu

Dla jądra z deficytem neutronów



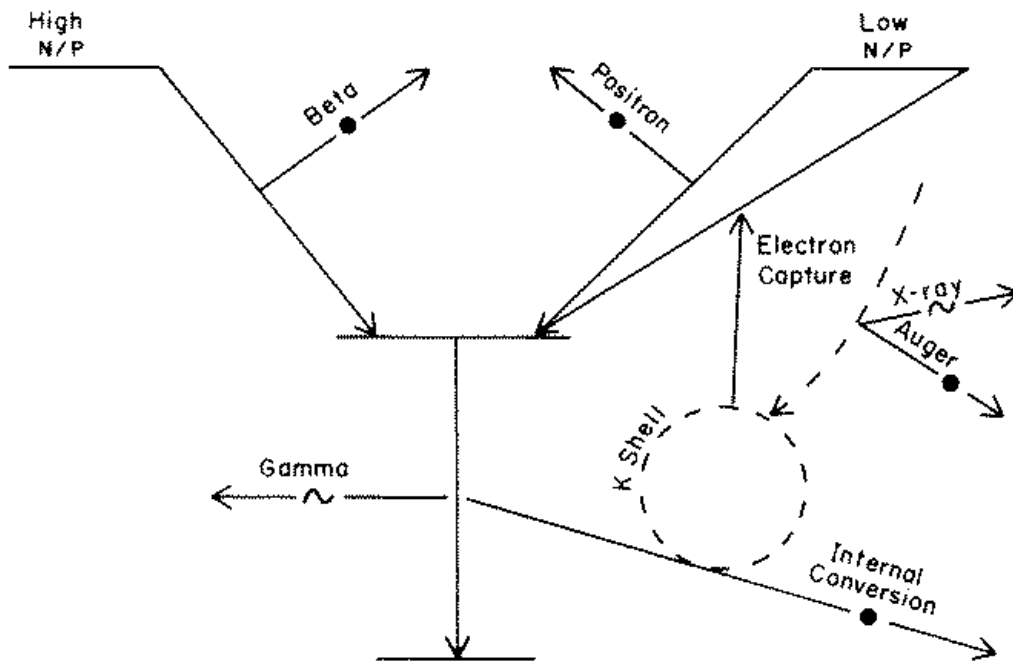
Wychwytywany jest naogół e^- z powłoki K.

Pozostała "dziura" → promieniowanie X

Typowe energie rzędu keV

Promieniotwórczość naturalna

Podsumowanie

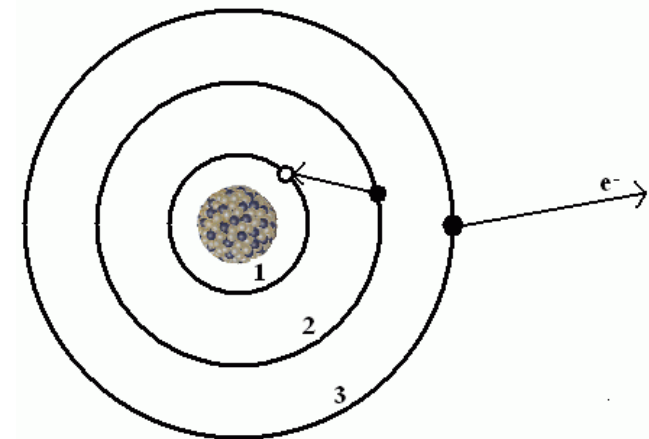


Deekscytacja jądra atomowego może też zajść z emisją elektronu:

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).