CZĄSTKI ELEMENTARNE I ODDZIAŁYWANIA

III ZŁOTA REGUŁA FERMIEGO

EKSPERYMENT VS TEORIA

JAK OPISAĆ CZĄSTKĘ? OD SCHRÖDINGERA DO DIRACA

Agnieszka Obłąkowska-Mucha

http://home.agh.edu.pl/~amucha/
Katedra Oddziaływań i Detekcji Cząstek
D11 p. 111

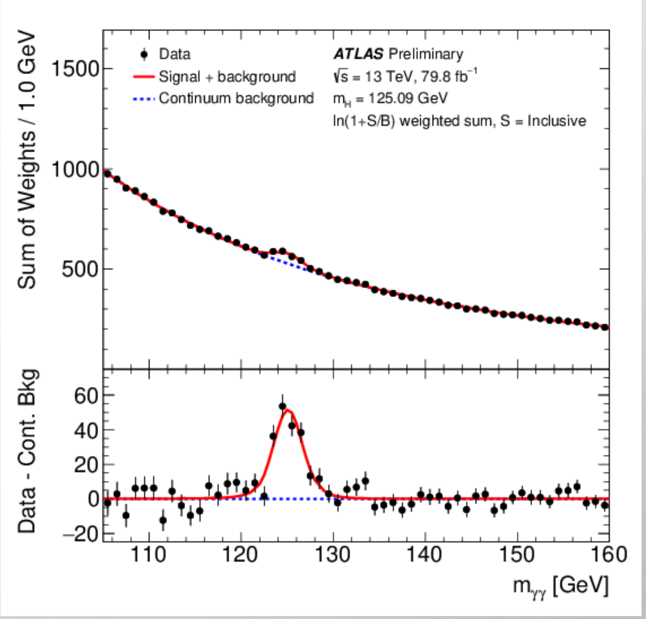
Czy było oddziaływanie?

- Jak można zbadać oddziaływania? Generalnie mamy dwa scenariusze:
- Rozpraszamy (zderzamy) cząstki – szukamy stanów końcowych, ich energii i rozkładów kątowych.
- Badamy rozpady cząstek (czy zaszły, jak szybko, na jakie stany końcowe)

- Wynikiem analizy jest bardzo często histogram masy niezmienniczej szukanego stanu końcowego.
- Jaki jest związek takiego rozkładu z teorią?
  1. Liczba obserwowanych przypadków proporcjonalna jest do przekroju czynnego: $R = L\sigma\mathcal{E}$.
  2. Przekrój czynny jest miarą prawdopodobieństwa zajścia procesu, a zatem powinno się go dać obliczyć z teorii.
- Eksperymentalnie mierzymy:

  - szybkość rozpadu cząstek (decay rates)

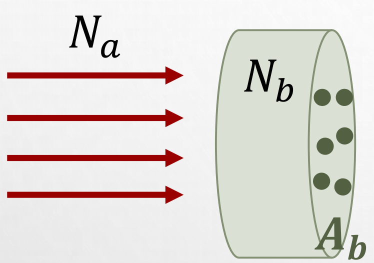
  - przekroje czynne



Przekrój czynny jest parametrem łączącym doświadczenie i teorię

Strumień cząstek czyli flux

- Rozważamy zderzenia wiązek cząstek z tarczą.
- Doświadczalnie rejestrujemy liczbę przypadków w jednostce czasu, czyli *rate*: $R = dN/dt$.
- Obliczymy, jaki jest *rate* w stosunku do jednej cząstki z wiązki i tarczy.



Wiązka – cząstki tego samego typu „a" (elektrony, pozytony, protony, jony, ...) poruszające się w tym samym kierunku o zbliżonej energii.

gęstość cząstek: $\boldsymbol{n_a = N_a/V}$

natężenie wiązki $\boldsymbol{I_a}$ to liczba cząstek w jednostce czasu: $\boldsymbol{I_a = \frac{N_a}{t}}$

strumień (właściwie powinno się to nazywać *gęstość strumienia*) cząstek (flux) $\boldsymbol{\Phi_a}$ to liczba cząstek padających na tarczę w jedn. czasu na jedn. powierzchni (por. świetlność):

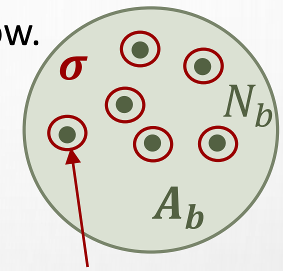
$$\boldsymbol{\Phi_a = \frac{N_a}{A\,t}}$$

Przekrój czynny

- Tarcza – kawałek materiału, złożony z jąder, nukleonów, elektronów czy kwarków. Charakteryzowany:

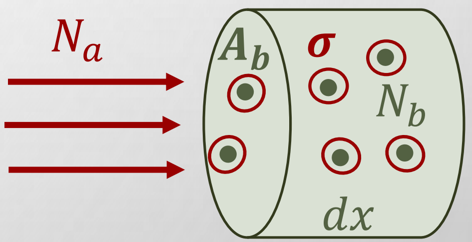
  gęstością $\boldsymbol{n_b} = \frac{\boldsymbol{N_b}}{\boldsymbol{V}}$ [cząstek/objętość],

  N_b – całkowitą liczbą cząstek- „centrów rozpraszania”



- Przekrój czynny $\boldsymbol{\sigma}$ - miara prawdopodobieństwa oddziałania, geometrycznie – powierzchnia „centrów rozpraszania”, jeśli cząstka trafi w tę powierzchnię, to zajdzie oddziaływanie,

  1 barn = 10^{-28} m^2 – powierzchnia jądra o A=100 (uranu)



- Wiązka cząstek „$\boldsymbol{a}$” o prędkości $\boldsymbol{v_a}$ wpada na tarczę o powierzchni $\boldsymbol{A_b}$,

  w czasie $\boldsymbol{dt}$ cząstka $\boldsymbol{a}$ przecina region $\boldsymbol{A_b}$, w którym jest

$$dN = \frac{N_b}{V} A_b dx = n_b A_b v_a dt \text{ cząstek } b$$

prawdopodobieństwo oddziaływania (geometryczne) procesu jest to efektywne pole powierzchni:

$$P = \frac{\sigma}{A_b} = n_b v_a A_b \, dt \frac{\sigma}{A_b} = n_b v_a \, \sigma \, dt$$

a szybkość reakcji:

$$r_a = \frac{dP}{dt} = n_b v_a \, \sigma$$

Prawdopodobieństwo reakcji

Dla wiązki N_a cząstek a w objętości V: $R_a = r_a\, n_a\, V = n_b v_a\, \sigma\, n_a\, V$

$$\left.\begin{aligned} n_a &= \frac{N_a}{V} = \frac{N_a}{A_a v_a\, t} \\ n_b &= \frac{N_b}{V} \end{aligned}\right\} \qquad \begin{aligned} R_a &= \frac{N_a}{A\, v\, t} v_a \frac{N_b}{V} \sigma\, V \\ R_a &= \boldsymbol{\Phi}_a N_b\, \sigma \end{aligned}$$

$$\boxed{R_a = \underbrace{\frac{N_a}{A\, t}}\ N_b\, \sigma}$$

$\boldsymbol{\Phi}_a$ strumień cząstek $\boldsymbol{a}$

Szybkość (prawdopodobieństwo) reakcji zależy od strumienia cząstek początkowych i od przekroju czynnego tej reakcji.

Problem: strumień cząstek (flux) nie jest niezmienniczy lorentzowsko, dla każdego procesu należy go wyznaczać oddzielnie.

Przekrój czynny

Przekrój czynny jest to zatem:

$$\sigma = \frac{Liczba\ zdarzeń\ na\ liczbę\ cząstek\ tarczy/czas}{strumień\ cząstek\ "a"}$$

Interesuje nas „rate” na jedną cząstkę w tarczy, czyli: $W = \frac{R_a}{N_b}$, a $R_a = W N_b$

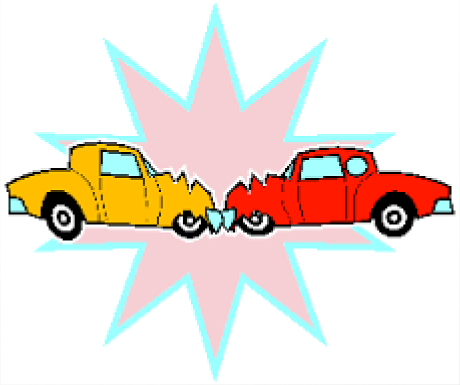
Pamiętamy, że świetlność to liczba cząstek wiązki na jednostkę czasu na powierzchnię, a zatem:

$$R_a = \mathcal{L}\,\sigma$$

Zderzenia

Zderzenia są to procesy typu $\boldsymbol{a+b \to c+d}$
Obserwable doświadczalne:

- energia, pędy każdej (lub nie każdej) cząstki,
- kierunki lotu, polaryzacje,
- kąty w układzie lab, CMS,
- …



Przekrój czynny:

- inkluzywny - gdy interesuje nas jedynie jedna obserwabla, nie znamy energii i pędów wszystkich cząstek, całkujemy po pozostałych, np. przekrój czynny na produkcję cząstek z dużym pędem poprzecznym, produkcję czarmu, itp.
- ekskluzywny – wszystkie parametry są zmierzone.

W wyniku zderzenia mogą powstać różne stany końcowe:

$$a+b \to \begin{cases} a+b & \text{elastyczne} \\ c_1+d_1 & \\ c_i+d_i+\ e_i & \text{nieelastyczne} \end{cases}$$

są to różne kanały reakcji,
na każdy kanał jest określony parcjalny przekrój czynny: $\boldsymbol{\sigma_i}$

$$\sigma_{tot} = \sum \sigma_i$$

Rozproszenia

Zderzenia cząstek i zderzenia z tarczą prowadzą do rozproszeń:

- elastycznych – ten sam stan końcowy, co początkowy, zachowana energia (kinetyczna) i pęd;
- nieelastycznych – stan końcowy i początkowe różnią się, pęd nie jest zachowany.

Strumień początkowy – liczba cząstek początkowych na jednostkę czasu i powierzchni.

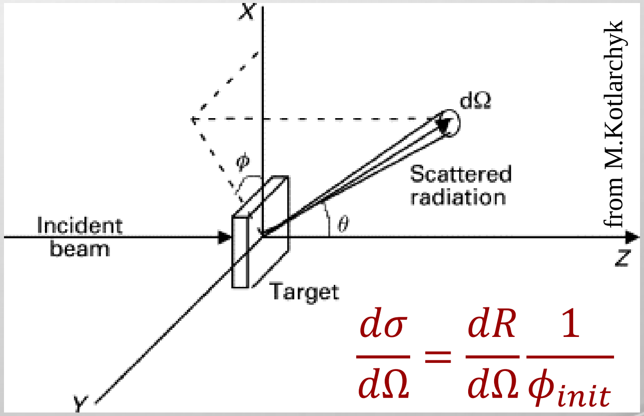
Strumień rozproszony – liczba cząstek rozproszonych w kącie bryłowym $d\Omega$ w jednostce czasu.

A jeśli interesuje nas (lub możemy tyle zmierzyć) różniczkowy przekrój czynny:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} \equiv \frac{\phi_{scatt}}{\phi_{init}}$$

to całkowity przekrój czynny (LI):

$$\sigma = \int \frac{d\sigma}{d\Omega}\, d\Omega$$



$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{dR}{d\Omega}\frac{1}{\phi_{init}}$$

Rozpady

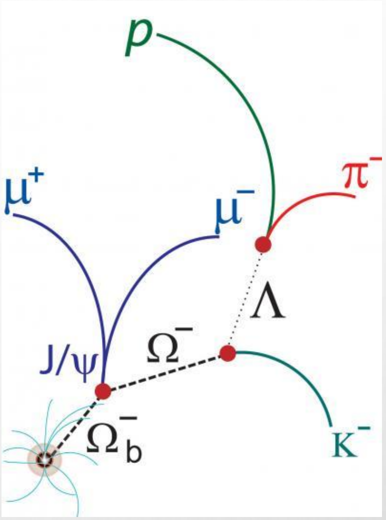
Rozpady są to procesy typu $\boldsymbol{a \rightarrow b + c + d}$

Cząstka może rozpadać się poprzez wiele kanałów rozpadu.

Prawdopodobieństwo każdego z nich może być obliczone i wyznaczone niezależnie.

Parcjalne szybkości reakcji (lub szerokości) – dla każdego kanału.

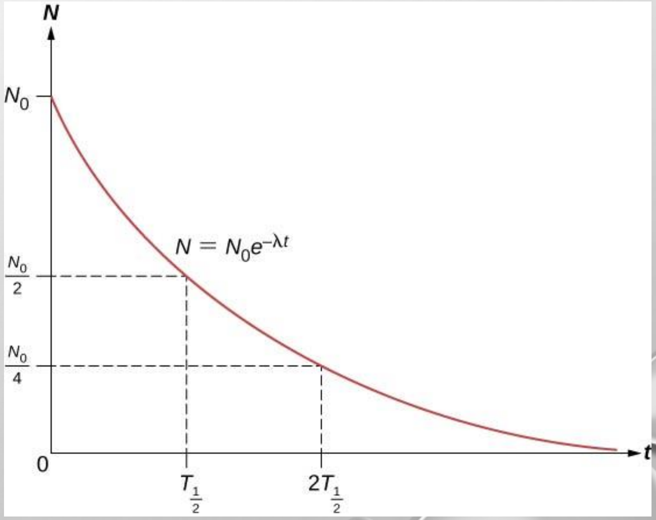
Definiujemy szybkość rozpadu (*decay rate*) Γ jako prawdopodobieństwo na jednostkę czasu, że cząstka ulegnie rozpadowi:



$$dN = -\Gamma\, N\, dt$$

a liczba cząstek, które pozostały po czasie t:

$$N(t) = N(0)\, e^{-\Gamma\, t} = N(0) e^{\frac{-t}{\tau}}$$



czas życia (własny) jest odwrotnością praw-twa rozpadu:

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

Rozpady

Jeżeli cząstka rozpada się na i– sposobów, to:

$$dN = -N\,\Gamma_1\,dt - N\,\Gamma_2\,dt - \ \ldots = -N\sum_i \Gamma_i = N\,\Gamma\,dt$$

gdzie całkowita szybkość rozpadu jest sumą wszystkich rozpadów parcjalnych:

$$\Gamma = \sum_i \Gamma_i$$

a względna częstość rozpadu (Branching Ratio): $$BR(i) = \frac{\Gamma_i}{\Gamma}$$

2019 Review of Particle Physics.
M. Tanabashi *et al.* (Particle Data Group), Phys. Rev. D **98**, 030001 (2018) and 2019 update.

STRANGE MESONS
($S = \pm1$, $C = B = 0$)
$K^+ = u\bar{s}$, $K^0 = d\bar{s}$, $\overline{K}^0 = \bar{d}s$, $K^- = \bar{u}s$, similarly for K^*'s

K_S^0 $\quad I(J^P) = 1/2(0^-)$

Mode		*Fraction* (Γ_i/Γ)
Hadronic modes		
Γ_1	$\pi^0\pi^0$	$(30.69 \pm 0.05)\%$
Γ_2	$\pi^+\pi^-$	$(69.20 \pm 0.05)\%$
Γ_3	$\pi^+\pi^-\pi^0$	$(3.5^{+1.1}_{-0.9}) \times 10^{-7}$