

# Ćwiczenia – seria XII

Przygotował: J. Ciborowski, Z. Szeffiński, A.F.Żarnecki

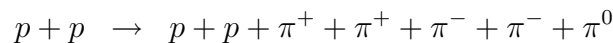
## 1. Transformacja energii i pędu, masa niezmiennicza

W LHC zderzają się przeciwbieżne wiązki protonów o energiach 7 TeV każda.

- oblicz współczynniki transformacji Lorentza z układu laboratoryjnego do układu protonu wiązki.
- jaka będzie energia mijających go protonów drugiej wiązki w układzie, w którym proton pierwszej wiązki spoczywa?
- jaka jest całkowita energia dostępna dla produkcji cząstek w układzie środka masy?
- jaka musiałaby być energia wiązki protonów padających na tarczę stacjonarną aby energia dostępna wynosiła tyle samo co w LHC?

Masa protonu wynosi w przybliżeniu  $M_p = 1 \text{ GeV}/c^2$ ;  $1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV}$ ,  $1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$ .

## 2. Wiązka protonów pada na tarczę protonową (ciekły wodór). Jaka musi być minimalna energia wiązki aby móc wyprodukować $n=5$ mezonów $\pi$ :



Masy mezonów  $\pi$  i protonu wynoszą odpowiednio  $m_\pi = 0.14 \text{ GeV}/c^2$  i  $m_p = 0.94 \text{ GeV}/c^2$ .

## 3. Układ środka masy, przeliczanie czteropędów między układami

Wiązka mezonów  $\pi$  o energii  $E_1 = 1 \text{ GeV}$  pada na tarczę protonową (ciekły wodór). Jednym z zachodzących procesów jest rozpraszanie elastyczne  $\pi p \rightarrow \pi p$ .

- jaka jest prędkość układu środka masy  $\pi p$ ?
- jakie są energie i pędy obu cząstek w układzie środka masy?
- mezon rozproszył się pod kątem  $\theta^* = 90^\circ$  w układzie środka masy. Pod jakim kątem nastąpiło rozproszenie w układzie laboratorium?

Masy mezonu  $\pi$  i protonu wynoszą odpowiednio  $m_\pi = 0.14 \text{ GeV}/c^2$  i  $m_p = 0.94 \text{ GeV}/c^2$ .

## 4. Pion $\pi^0$ o masie $m_\pi = 140 \text{ MeV}/c^2$ poruszający się z energią kinetyczną $E_k = 35 \text{ MeV}$ rozpada się na dwa fotony. Wyznacz maksymalną i minimalną energię fotonu, która może zostać zmierzona w układzie laboratoryjnym. Jaki kąt między fotonami zostanie zmierzony w układzie laboratoryjnym jeśli w układzie własnym pionu fotony zostaną wyemitowane prostopadle do kierunku ruchu?

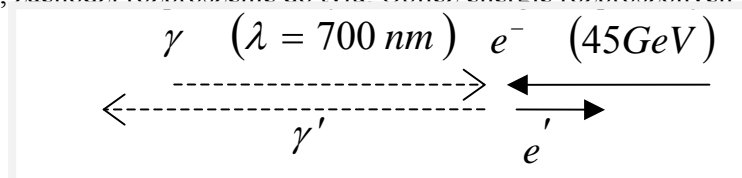
5. (nieobowiązkowo) Cząstka  $X$  o masie  $M$  rozpada się na 3 identyczne cząstki (dla ułatwienia numerujemy je)  $a_1$ ,  $a_2$  i  $a_3$ , oczywiście o tych samych masach  $m$ . W układzie środka masy cząstki wtórne mogą mieć różne pędy, związane jedynie warunkiem znikania ich sumy. Ile wynosi energia kinetyczna produktów rozpadu w CMS? Rozważ taką konfigurację pędów cząstek wtórnych, w której:
- mają one pędy równe co do wartości. Jaki jest pęd każdej z cząstek?
  - jedna z nich spoczywa. Jakie są pędy dwóch pozostałych?
  - pędy wszystkich 3 cząstek wtórnych są (i) współliniowe oraz (ii) pędy dwóch cząstek są równe i równoważą pęd pozostałej. Jakie są pędy cząstek w takiej konfiguracji?
6. Rakieta lecąca w kierunku Ziemi z prędkością  $v = 0.6 c$  emituje sygnały przy pomocy lasera. Emitowane fotony mają energię  $0.6\text{eV}$  (podczerwień). Jaką energię fotonów zmierzy obserwator na Ziemi? Jak szybko musiałaby lecieć rakieta, żeby fotony stały się widzialne ( $E > 1.8\text{ eV}$ )?

## 7. Wsteczne rozpraszanie Comptona na relatywistycznych elektronach.

W procesie Comptona fotony UV padają na spoczywające elektrony i rozpraszają się, a długość fali zależy jedynie od kąta rozproszenia  $\theta$ :

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos\theta) = \lambda_c (1 - \cos\theta), \text{ gdzie } \lambda_c = \frac{h}{m_e c} = 2,4 \cdot 10^{-3} \text{ nm} = 2,4 \cdot 10^3 \text{ fm}.$$

W zderzeniu fotonów z lasera rubinowego ( $\lambda=700\text{nm}$ ) z elektronami z akceleratora LEP w CERN-ie o energii  $E_e=45\text{ GeV}$ , zachodzi rozproszenie do tyłu. Oblicz energie rozproszonych fotonów.



## 8. Efekt Dopplera

Przeprowadzono spektrometryczne badania promieniowania pochodzącego z odległej galaktyki. Linie widmowa o długości fali (zarejestrowanej w spektrometrze)  $\lambda=730\text{nm}$  udało się zidentyfikować jako linię wodoru serii Balmera, która w warunkach laboratorium ziemskiego ma długość fali  $\lambda_0=487\text{nm}$ . Korzystając z wzorów Dopplera oblicz prędkość i kierunek ruchu galaktyki.

## 9. Efekt Dopplera z wzorów transformacyjnych energii

Przeprowadzono spektrometryczne badania promieniowania pochodzącego z odległej galaktyki. Linie widmowa o długości fali (zarejestrowanej w spektrometrze)  $\lambda=730\text{nm}$  udało się zidentyfikować jako linię wodoru serii Balmera, która w warunkach laboratorium ziemskiego ma długość fali  $\lambda_0=487\text{nm}$ . Korzystając z wzorów transformacji energii oblicz prędkość i kierunek ruchu galaktyki.

## 10. Efekt Dopplera i stała Hubble'a

Obserwacje wskazują, że Wszechświat rozszerza się jednorodnie i nie posiada wyróżnionego punktu. Dla odpowiednio dużych skal w porównaniu z rozmiarami Galaktyki spełniona jest zależność (prawo Hubble'a):  $v = H_0 r$

Gdzie:

$v$  - prędkość oddalania się obiektu (źródła promieniowania(galaktyki)) od Ziemi,

$r$  - odległość do źródła,

$H_0$  - stała Hubble'a.

- W jaki sposób stosunek  $\frac{\lambda}{\lambda_0}$  zależy od odległości źródła od Ziemi ( $r$ ), przy spełnieniu

prawa Hubble'a. Oblicz Stałą Hubble'a jako funkcję odległości,  $r$  i  $\frac{\lambda}{\lambda_0}$ .

- W jaki sposób wielkość zdefiniowana jako przesunięcie ku czerwieni (redshift)

$$z = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} \text{ zależy od odległości źródła od Ziemi (r), przy spełnieniu prawa}$$

Hubble'a.

- Policz stałą Hubble'a dla

- Galaktyka w gwiazdozbiore Panny  $r_1=17\text{Mpc}$ ,  $z_1=0,004$

- Galaktyka w Wielkiej Niedźwiedzicy  $r_2=180\text{ Mpc}$ ,  $z_2=0,051$