

## Wielki Zderzacz Hadronów (10 points)

Przeczytaj Ogólne instrukcje znajdujące się w osobnej kopercie zanim zaczniesz rozwiązywać to zadanie.

W tym zadaniu będą rozpatrywane zagadnienia fizyczne zachodzące w akceleratorze LHC (Wielkim Zderzaczem Hadronów) znajdującym się w CERNie. Akcelerator ten jest największym na świecie laboratorium fizyki cząstek elementarnych. Jego zasadniczym zadaniem jest poznanie podstawowych praw natury. Dwie wiązki cząstek zostają przyspieszone do wysokich energii, prowadzone są w pierścieniu akceleratora przez silne pole magnetyczne, a następnie zderzane ze sobą. Protony nie są rozłożone równomiernie na obwodzie akceleratora, lecz tworzą grupy (bunches). Powstałe w wyniku zderzenia cząstki są obserwowane za pomocą dużych detektorów. Niektóre parametry LHC podane są w tabeli 1.

Pierścień LHC	
Obwód pierścienia	26659 m
Liczba grup w każdej wiązce protonów	2808
Liczba protonów w grupie	$1.15 \times 10^{11}$
Wiązki protonów	
Energia protonu	7.00 TeV
Energia w układzie środka masy	14.0 TeV

Tabela 1: Typowe wartości numeryczne niektórych istotnych parametrów LHC.

W fizyce cząstek elementarnych używa się wygodnych jednostek energii, pędu i masy: Energię mierzy się w elektronowoltach [eV]. Z definicji, 1 eV jest energią jaką zyskuje cząstka o ładunku elementarnym,  $e$ , przy przejściu przez różnicę potencjałów jednego wolta ( $1 \text{ eV} = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ kg m}^2/\text{s}^2$ ).

Pęd mierzy się w jednostkach  $eV/c$ , a masę w jednostkach  $eV/c^2$ , gdzie  $c$  jest prędkością światła w próżni. Ponieważ 1 eV jest bardzo małą ilością energii często używa się też MeV ( $1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$ ), GeV ( $1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$ ) lub TeV ( $1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV}$ ).

Część A dotyczy przyspieszania protonów lub elektronów. Część B jest poświęcona identyfikacji cząstek powstających w zderzeniach cząstek w CERNie.

### Część A. Akcelerator LHC (6 points)

#### Przyspieszanie:

Przyjmij, że protony zostały przyspieszone napięciem  $V$  takim, że ich prędkość jest bardzo blisko prędkości światła i pomiń wszelkie straty energii spowodowane promieniowaniem lub zderzeniami z innymi cząstkami.

<b>A.1</b>	Podaj ściśle wyrażenie na końcową prędkość $v$ protonów jako funkcję przyspieszającego napięcia $V$ i stałych fizycznych.	0.7pt
------------	---	-------

Plan na przyszłe doświadczenia w CERNie przewiduje zderzenia protonów z LHC z elektronami o energii 60.0 GeV.

- A.2** Dla cząstek o dużej energii i małej masie spoczynkowej względna różnica  $\Delta = (c - v)/c$  końcowej prędkości  $v$  i prędkości światła jest bardzo mała. Znajdź odpowiednie przybliżenie pierwszego rzędu na  $\Delta$  i wyznacz  $\Delta$  dla elektronów o energii 60.0 GeV używając napięcia przyspieszającego  $V$  i stałych fizycznych. 0.8pt

Teraz wracamy do protonów w LHC. Przyjmij, że rura w której poruszają się cząstki ma kształt okręgu.

- A.3** Wyprowadź wyrażenie określające pole magnetyczne  $B$  konieczne do utrzymania kołowego toru wiązki protonów. Wyrażenie powinno zawierać jedynie energię protonów,  $E$ , obwód  $L$ , podstawowe stałe fizyczne i liczby. Możesz użyć odpowiednich przybliżeń jeśli ich efekt jest mniejszy niż dokładność określona przez najmniejszą liczbę cyfr znaczących. Oblicz pole magnetyczne  $B$  dla protonów o energii  $E = 7.00$  TeV, pomijając oddziaływania pomiędzy protonami. 1.0pt

### Moc promieniowania :

Przyspieszane cząstki emitują energię w postaci fal elektromagnetycznych. Moc promieniowania  $P_{\text{rad}}$  cząstek z ładunkiem które krążą ze stałą prędkością kątową zależy tylko od przyspieszenia  $a$ , ładunku  $q$ , prędkości światła  $c$  i przenikalności elektrycznej próżni  $\epsilon_0$ .

- A.4** Znajdź wyrażenie na moc promieniowania  $P_{\text{rad}}$  używając analizy wymiarowej. 1.0pt

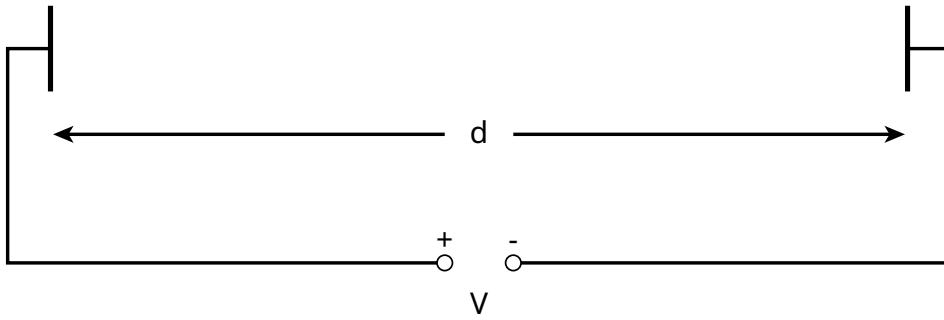
Pełny wzór na moc promieniowania zawiera czynnik  $1/(6\pi)$ ; ponadto pełne relatywistyczne wyrażenie zawiera dodatkowy multiplikatywny czynnik  $\gamma^4$ , gdzie  $\gamma = (1 - v^2/c^2)^{-\frac{1}{2}}$ .

- A.5** Oblicz pełną moc promieniowania  $P_{\text{tot}}$  z LHC w przypadku energii protonu  $E = 7.00$  TeV (Zwróć uwagę na tabelę 1). Możesz użyć właściwych przybliżeń. 1.0pt

### Przyspieszanie liniowe:

W CERNie spoczywające początkowo protony są przyspieszane w liniowym akceleratorze o długości  $d = 30.0$  m różnicą potencjałów  $V = 500$  MV. Przyjmij, że pole elektryczne jest jednorodne. Akcelerator liniowy składa się z dwóch płytek naszkicowanych na rysunku 1.

- A.6** Wyznacz czas  $T$  w ciągu którego protony przechodzą przez to pole. 1.5pt



Rysunek 1: Szkic modułu przyspieszającego.

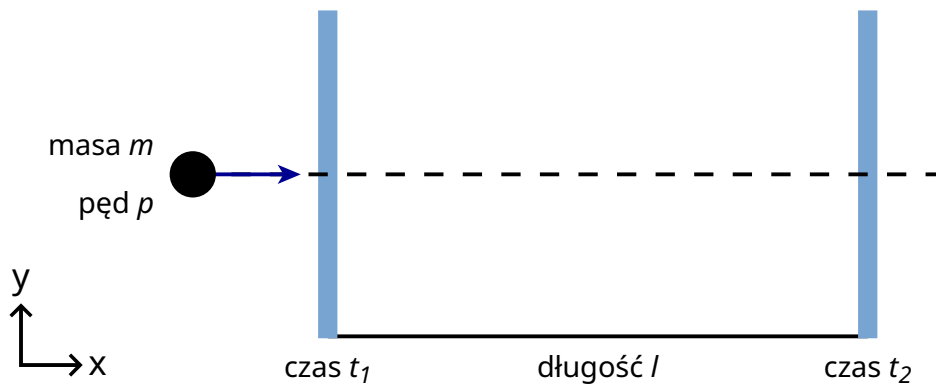
## Część B. Identyfikacja cząstek (4 points)

### Czas przelotu:

Do właściwej interpretacji zderzeń istotna jest identyfikacja wysokoenergetycznych cząstek powstających w zderzeniu. Prosta metoda polega na pomiarze czasu ( $t$ ) który cząstka znanym pędzie potrzebuje na przebycie odległości  $l$  w tak zwanym detektorze czasu przelotu (Time-of-Flight, w skrócie ToF). Typowe cząstki, które są identyfikowane w takim detektorze oraz ich masy są podane w tabeli 2.

Cząstka	Masa [ $\text{MeV}/c^2$ ]
Deuteron	1876
Proton	938
naładowany Kaon	494
naładowany pion	140
Elektron	0.511

Tabela 2: Cząstki i ich masy.

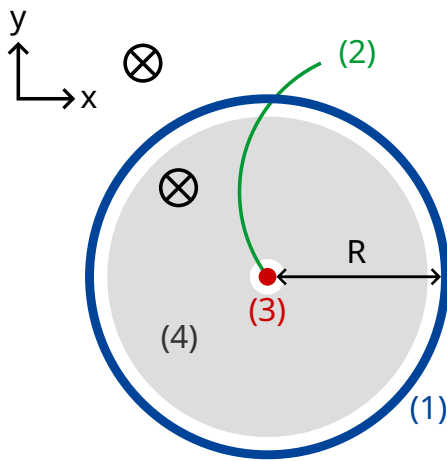


Rysunek 2: Schematyczny widok detektora czasu przelotu.

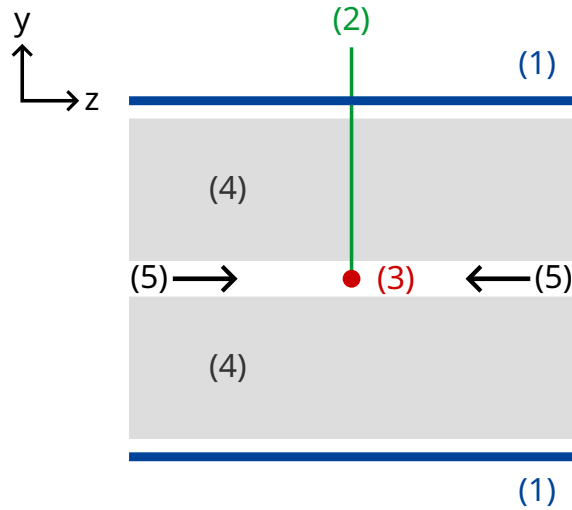
- B.1** Wyznacz masę  $m$  cząstki poprzez jej pęd  $p$ , odległość  $l$  i czas przelotu  $t$  przyjmując, że cząstki o ładunku  $e$  poruszają się w detektorze ToF z prędkością bliską  $c$  po linii prostej i poruszają się prostopadłe do dwóch płaszczyzn detekcji (patrz rysunek 2). 0.8pt

- B.2** Oblicz najmniejszą długość  $l$  detektora ToF, która umożliwi bezpieczne rozróżnienie naładowanego kaonu od naładowanego pionu, gdy pędy obu cząstek wynoszą  $1.00 \text{ GeV}/c$ . Dla dobrego rozróżnienia konieczne jest, aby różnica czasów przelotu była większa niż trzykrotna wartość czasowej rozdzielczości detektora. Typowa wartość rozdzielcza detektora czasu przelotu wynosi  $150 \text{ ps}$  ( $1 \text{ ps} = 10^{-12} \text{ s}$ ). 0.7pt

W dalszej części, powstające cząstki są identyfikowane w dwustopniowym detektorze składającym się z detektora toru i detektora czasu przelotu. Rysunek 3 pokazuje układ w płaszczyźnie prostopadłej oraz w płaszczyźnie równoległej do wiązki protonów. Oba detektory są rurami otaczającymi obszar oddziaływania, wiązki przechodzą przez środek rur. Detektor toru mierzy tor naładowanej cząstki przechodzącej przez obszar pola magnetycznego skierowanego równoległe do wiązki protonów. Promień  $r$  toru pozwala na wyznaczenie poprzecznej składowej  $p_T$  pędu (prostopadłej do kierunku wiązki). Ponieważ moment zderzenia jest znany, wystarczy zmierzyć jeden czas (moment przelotu przez rurę detektora ToF) do wyznaczenia długości czasu przelotu (czasu od zderzenia do detekcji w rurze ToF). Ta rura ToF jest umieszczona na zewnątrz detektora toru. W tym zadaniu możesz przyjąć, że wszystkie cząstki powstające w zderzeniu poruszają się prostopadle do kierunku wiązki protonów, co oznacza, że powstające cząstki nie mają składowej pędu wzdłuż kierunku wiązek protonów.



płaszczyzna poprzeczna



przekrój przez środek rury  
widok podłużny  
wzdłuż wiązki w rurze,

- (1) - Rura detektora ToF
- (2) - tor
- (3) - miejsce zderzenia
- (4) - rura pomiaru toru
- (5) - wiązki protonów
- ⊗ - pole magnetyczne

Rysunek 3 : Układ doświadczenia do identyfikacji cząstek z detektorem toru i detektorem ToF. Oba detektory są rurami otaczającymi miejsce zderzenia znajdujące się w środku. Lewa część: widok prostopadły do kierunku wiązki, Prawa część: widok wzdłuż kierunku wiązki. Cząstki poruszają się prostopadle do kierunku wiązki.

**B.3** Wyznacz masy cząstek poprzez pole magnetyczne  $B$ , promień  $R$  rury detektora ToF, podstawowe stałe fizyczne i wielkości mierzone: promień  $r$  toru i czas przelotu  $t$ . 1.7pt

Zmierzono cztery cząstki, które podlegają identyfikacji. Pole magnetyczne w detektorze toru wynosi  $B = 0.500$  T. Promień  $R$  rury detektora ToF wynosi 3.70 m. Uzyskano następujące wyniki: ( $1 \text{ ns} = 10^{-9} \text{ s}$ ):

Cząstka	Promień toru $r$ [m]	Czas przelotu $t$ [ns]
A	5.10	20
B	2.94	14
C	6.06	18
D	2.31	25

**B.4** Zidentyfikuj cztery powyższe cząstki wyznaczając ich masy.

0.8pt