

## برخورد دهنده بزرگ هادرونی (۱۰ نمره)

لطفاً قبل از شروع، راهنمایی‌های کلی موجود در پاکت جداگانه را بخوانید.

هدف این مسئله، توضیح فیزیک شتاب‌دهنده ذرات LHC در سرن (CERN) است. سرن بزرگترین آزمایشگاه فیزیک ذرات است که هدف آن به دست آوردن توصیفی از قوانین بنیادی طبیعت است. دو باریکه از ذرات تا انرژی‌های بسیار زیاد شتاب داده می‌شوند، به وسیله‌ی یک میدان مغناطیسی قوی درون حلقه‌ی شتاب‌دهنده هدایت می‌شوند و سرانجام به یکدیگر برخورد داده می‌شوند. پروتون‌ها به طور یکنواخت در محیط شتاب دهنده توزیع نشده‌اند، بلکه در قالب دسته‌های مجزا (bunches) خوشه بندی شده‌اند. ذرات پدید آمده در برخورد توسط آشکارسازهای بزرگ مشاهده می‌شوند. برخی از مشخصه‌های LHC در جدول ۱ آمده است.

حلقه‌ی LHC	
26659 m	محیط حلقه
2808	تعداد دسته‌ها در یک باریکه‌ی پروتون
$1.15 \times 10^{11}$	تعداد پروتون‌ها در هر دسته
باریکه پروتون	
7.00 TeV	انرژی اسمی پروتون‌ها
14.0 TeV	انرژی ذرات برخورد کننده در چارچوب مرکز جرم

جدول ۱: مقادیر عددی نوعی پارامترهای مهم LHC

واحدهای رایج میان فیزیکدانان ذرات برای کمیت‌های انرژی، تکانه و جرم به کار می‌برند با واحدهای معمول تفاوت دارد. واحد انرژی eV است. بنا به تعریف 1 eV مقدار انرژی است که ذره‌ای با بار بنیادی e هنگامی که در اختلاف پتانسیل یک ولت شتاب می‌گیرد به دست می‌آورد:  $1 \text{ eV} = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ kg m}^2/\text{s}^2$ .

واحد تکانه eV/c و واحد جرم  $\text{eV}/c^2$  است که c سرعت نور در خلاء است. از آنجا که 1 eV مقدار انرژی بسیار کوچکی است، فیزیکدانان ذرات اغلب از  $1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$ ،  $1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$  یا  $1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV}$  استفاده می‌کنند.

بخش A در باره شتاب دادن پروتون‌ها یا الکترون‌ها است. بخش B به شناسایی ذراتی که در برخوردهای سرن خلق می‌شوند، می‌پردازد.

### قسمت A. شتاب دهنده‌ی LHC (۶ نمره)

شتاب دادن :

فرض کنید پروتون‌ها توسط ولتاژ V شتاب داده شده‌اند به طوری که سرعت آن‌ها به سرعت نور خیلی نزدیک است. از اتلاف انرژی پروتون‌ها در اثر تابش و برخورد با ذرات دیگر سر راه صرف‌نظر کنید.

**A.1** عبارتی برای سرعت نهایی پروتون‌ها،  $v$ ، به عنوان تابعی از ولتاژ V، که باعث شتاب دادن آن‌ها می‌شود و  $0.7 \text{ pt}$  ثابت‌های فیزیکی به دست آورید.

در سرن طرحی برای آزمایش‌های آینده در نظر است که در آنها پروتون‌های شتاب داده شده در LHC با الکترون‌هایی با انرژی 60.0 GeV برخورد داده شوند.

**A.2** برای ذرات پر انرژی و دارای جرم سکون کم، انحراف نسبی سرعت نهایی  $v$  از سرعت نور،  $\Delta = (c - v)/c$ ، بسیار کوچک است. تقریب مناسبی برای  $\Delta$  به کار ببرید و  $\Delta$  را با استفاده از مقدار ولتاژ و ثابت‌های فیزیکی برای الکترون‌هایی با انرژی 60.0 GeV حساب کنید.  $0.8 \text{ pt}$

اکنون به پروتون‌ها در LHC برگردیم. فرض کنید لوله‌ای که باریکه‌ی پروتونی داخل آن حرکت می‌کند دایره‌ای شکل است.

**1.0pt** عبارتی برای میدان مغناطیسی یکنواخت  $B$  که لازم است تا باریکه‌ی پروتونی را در یک مسیر دایره‌ای نگه دارد بر حسب انرژی پروتون  $E$ ، محیط دایره  $L$  و اعداد و ثابت‌های بنیادی به دست آورید. می‌توانید تقریب‌های مناسبی به کار برید به شرطی که اثرشان کوچکتر از اثر خطای موجود در عددی که دارای کمترین تعداد ارقام معنی‌دار است، باشد. مقدار عددی میدان مغناطیسی  $B$  را برای پروتونی با انرژی  $E = 7.00 \text{ TeV}$  به دست آورید. از برهم کنش میان پروتون‌ها چشم‌پوشید.

**A.3**

توان تابش شده:

یک ذره‌ی باردار شتابدار، با گسیل امواج الکترومغناطیسی انرژی تابش می‌کند. توان تابش شده  $P_{\text{rad}}$  ذره‌ی باردار که با سرعت زاویه‌ای ثابت بر یک مسیر دایره‌ای می‌چرخد فقط بستگی به شتاب ذره  $a$ ، بار ذره  $q$ ، سرعت نور  $c$  و ضریب گذردهی خلاء  $\epsilon_0$  دارد.

**1.0pt** با استفاده از تحلیل ابعادی عبارتی برای توان تابش شده،  $P_{\text{rad}}$ ، به دست آورید.

**A.4**

فرمول دقیق توان تابش شده شامل ضریب  $1/(6\pi)$  است. همچنین با تحلیل کاملاً نسبیتی مسئله یک ضریب  $\gamma^4$  نیز ظاهر می‌شود که  $\gamma = (1 - v^2/c^2)^{-\frac{1}{2}}$ .

**1.0pt** با استفاده از داده‌های جدول ۱ و تقریب‌های مناسب، توان تابشی کل  $P_{\text{tot}}$  را برای LHC در شرایطی که در آن پروتون‌ها انرژی  $E = 7.00 \text{ TeV}$  دارند، حساب کنید.

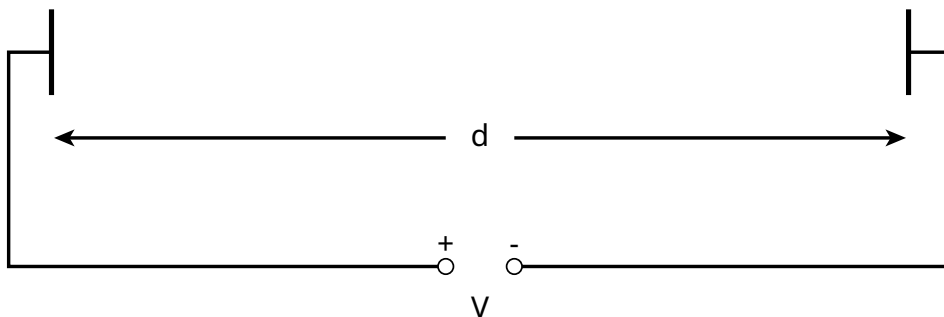
**A.5**

شتاب دهنده خطی

در سرن، در ابتدا پروتون‌های ساکن در یک شتابدهنده‌ی خطی به طول  $d = 30.0 \text{ m}$  با اختلاف پتانسیل  $V = 500 \text{ MV}$  شتاب داده می‌شوند. فرض کنید میدان الکتریکی همگن است و یک شتاب دهنده خطی اساساً از دو صفحه موازی مطابق شکل ۱ ساخته شده است.

**1.5pt** مدت زمان  $T$  که پروتون‌ها از ناحیه‌ی شامل میدان الکتریکی عبور می‌کنند، چقدر است؟

**A.6**



شکل ۱: طرحواره‌ای از یک دستگاه شتابدهنده خطی

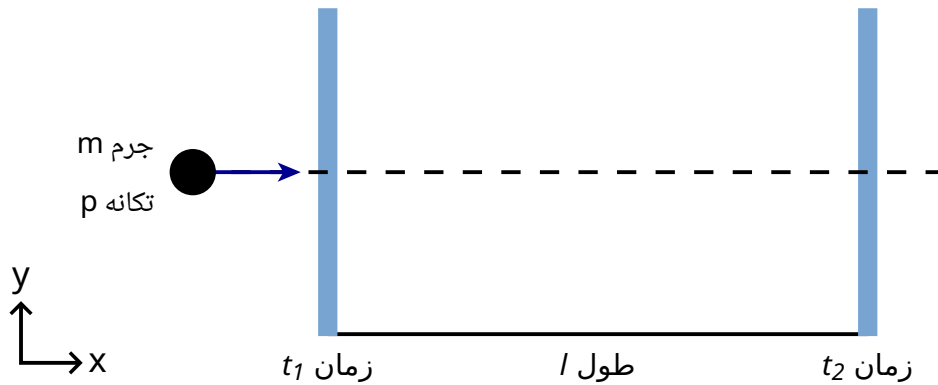
قسمت B. شناسایی ذرات تولید شده (۴ نمره)

زمان پرواز:

برای تعبیر بر همکنش ها، شناسایی ذرات پر انرژی تولید شده در برخوردها اهمیت دارد. یک روش ساده، اندازه‌گیری زمان  $t$  است که ذره‌ای با تکانه‌ی معلوم فاصله‌ی  $l$  را در یک آشکارساز زمان پرواز، (TOF) طی می‌کند. برخی از ذراتی که در آشکارساز شناسایی می‌شوند به همراه جرم‌شان در جدول ۲ فهرست شده‌اند.

جرم $[MeV/c^2]$	ذره
1876	دوترون
938	پروتون
498	کائون باردار
140	پیون باردار
0.511	الکترون

جدول ۲ - چند ذره مهم و جرم‌هایشان

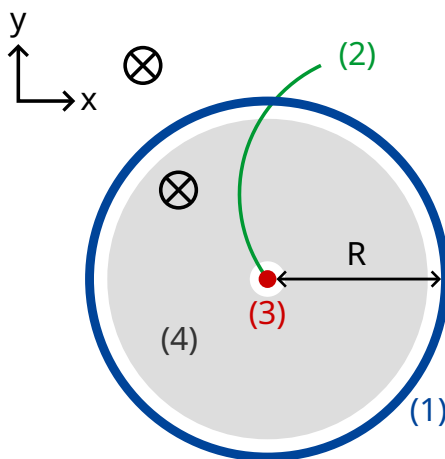


شکل ۲: طرحواره‌ای از یک آشکارساز زمان پرواز

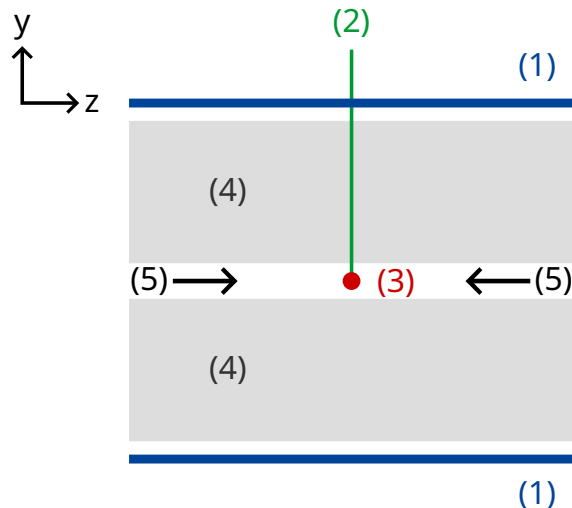
**B.1** جرم ذره،  $m$  را بر حسب تکانه‌ی  $p$ ، طول پرواز  $l$  و زمان پرواز  $t$  بیان کنید. فرض کنید ذرات بار بنیادی  $e$  دارند و با سرعت نزدیک نور بر روی یک مسیر مستقیم در آشکارساز ToF حرکت می‌کنند به طوری که مسیر آنها بر دو صفحه‌ی آشکارسازی عمود است (شکل ۲ را ببینید). **0.8pt**

**B.2** کمینه طول  $l$  در یک آشکار ساز ToF را طوری به دست آورید که یک کائون و یک پیون با تکانه‌ی یکسان  $1.00 \text{ GeV}/c$  از یکدیگر قابل تمیز باشند. برای یک تمیز خوب لازم است اختلاف زمان پرواز آن دو، بیش از سه برابر زمان قابل تفکیک دستگاه (زمان رزولوشن آشکار ساز) باشد. زمان قابل تفکیک نوعی در یک آشکار ساز ToF  $150 \text{ ps}$  ( $1 \text{ ps} = 10^{-12} \text{ s}$ ) است.

در ادامه، ذرات تولید شده در یک آشکار ساز نوعی LHC در یک فرایند دو مرحله‌ای مرکب از یک ردیاب مسیر و یک آشکار ساز ToF شناسایی می‌شوند. شکل ۳ نماهای طولی و عرضی که به ترتیب در صفحه‌ی شامل مسیر پروتون‌ها و در صفحه‌ی عمود بر مسیر حرکت پروتون‌ها است را نشان می‌دهد. هر دو آشکار ساز شامل محفظه‌هایی استوانه‌ای هستند که ناحیه‌ی برهم‌کنش را احاطه کرده‌اند. محفظه ردیاب، مسیر یک ذره‌ی باردار تولید شده را ردیابی می‌کند. میدان مغناطیسی در محفظه ردیاب موازی امتداد باریکه‌ی پروتونی طراحی شده است. با استفاده از شعاع مسیر،  $r$  تکانه‌ی عرضی  $p_T$  ذره قابل تعیین است. چون زمان برخورد معلوم است، آشکار ساز ToF فقط به یک محفظه بیرونی برای سنجش زمان پرواز نیاز دارد. این محفظه ToF درست بعد از اتافک ردیاب مسیر قرار دارد. برای سهولت در این قسمت از مسئله فرض کنید همه‌ی ذرات خلق شده در برخورد، عمود بر امتداد حرکت باریکه‌ی پروتون حرکت می‌کنند، به عبارت دیگر همه ذرات تولید شده تکانه‌ی طولی در امتداد مسیر باریکه پروتونی ندارند.



صفحه‌ی عرضی



برش طولی دستگاه  
در صفحه شامل مرکز  
و در امتداد خط باریکه

- (۱) - محفظه‌ی ToF  
(۲) - مسیر ذرات خلق شده  
(۳) - نقطه‌ی برخورد  
(۴) - محفظه ردیابی
- شکل ۳: طرحواره‌ای از آزمایش شناسایی ذرات، شامل اتافک ردیابی و یک آشکار ساز ToF که هر دو محفظه استوانه‌ای شکل‌اند و نقطه‌ی برخورد را که درست در وسط آن‌ها واقع است، احاطه کرده‌اند. چپ: نمای عرضی عمود بر امتداد باریکه، راست: نمای طولی موازی امتداد باریکه. ذره‌ی حاصل از برخورد عمود بر امتداد باریکه حرکت می‌کند.

**B.3** جرم ذره را به عنوان تابعی از اندازه میدان مغناطیسی،  $B$ ، شعاع محفظه‌ی ToF،  $R$ ، ثابت‌های بنیادی و  $1.7 \text{ pt}$  کمیت‌های اندازه‌گیری شده شعاع  $r$  مسیر و زمان پرواز  $t$  بیان کنید.

ما چهار ذره‌ی مختلف را آشکار کرده‌ایم و می‌خواهیم آن‌ها را شناسایی کنیم. میدان مغناطیسی در آشکار ساز مسیر را برابر  $B = 0.500 \text{ T}$  و

شعاع  $R$  آشکارساز ToF را برابر  $3.70\text{ m}$  بگیرید. نتایج در جدول زیر ثبت شده است ( $1\text{ ns} = 10^{-9}\text{ s}$ ).

نره	شعاع مسیر $r$ [m]	زمان پرواز $t$ [ns]
A	5.10	20
B	2.91	14
C	6.06	18
D	2.32	25

0.8pt

**B.4** با محاسبه‌ی جرم هر یک ذرات آن‌ها را شناسایی کنید.