

## Большой адронный коллайдер (10 баллов)

Перед началом работы над задачей прочтите инструкцию.

В этой задаче рассматривается ускоритель элементарных частиц БАК — Большой адронный коллайдер (LHC, Large Hadron Collider) в ЦЕРНе. ЦЕРН является крупнейшей лабораторией физики элементарных частиц. Основная задача ЦЕРНа — изучение фундаментальных законов природы. В коллайдере два пучка частиц ускоряются до высоких энергий. Они удерживаются на круговой траектории ускорителя сильным магнитным полем, а затем сталкиваются друг с другом. Протоны не распределены равномерно по кольцу коллайдера, а собраны в так называемые сгустки. Образовавшиеся в результате столкновений частицы наблюдаются с помощью больших детекторов. Некоторые параметры коллайдера приведены в таблице 1.

Кольцо БАК	
Длина окружности кольца	26659 м
Количество сгустков в протонном пучке	2808
Число протонов в сгустке	$1.15 \times 10^{11}$
Протонные пучки	
Энергия протонов	7.00 ТэВ
Энергия в системе центра масс	14.0 ТэВ

Таблица 1 — Типичные численные значения некоторых параметров БАК.

В физике элементарных частиц используются следующие единицы измерения для энергии, импульса и массы. Энергия измеряется в электрон-вольтах [эВ]. По определению 1 эВ равен энергии, которую приобретает частица с элементарным зарядом  $e$ , при прохождении разности потенциалов в один вольт:  $1 \text{ эВ} = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ кг м}^2/\text{с}^2$

Импульс измеряется в эВ/ $c$ , а масса — в эВ/ $c^2$ , где  $c$  — скорость света в вакууме. Так как 1 эВ — очень маленькое количество энергии, то наряду с ним используют МэВ (1 МэВ =  $10^6$  эВ), ГэВ (1 ГэВ =  $10^9$  эВ) или ТэВ (1 ТэВ =  $10^{12}$  эВ).

В части А обсуждаются вопросы, связанные с ускорением протонов и электронов. Часть В посвящена идентификации частиц, образующихся в результате столкновений.

## Часть А. Ускоритель БАК (6 баллов)

### Ускорение

Рассмотрим ускорение протонов напряжением  $V$  до скоростей очень близких к скорости света, пренебрегая потерями энергии на излучение или на столкновения с другими частицами.

- A.1** Получите точную формулу для конечной скорости  $v$  протонов через ускоряющее напряжение  $V$  и физические постоянные. 0.7pt

В будущем планируется использовать протоны из БАК для столкновения с электронами с энергией 60.0 ГэВ.

- A.2** Для частиц с высокой энергией и малой массой относительное отклонение  $\Delta = (c - v)/c$  конечной скорости  $v$  от скорости света очень мало. Найдите первое приближение для  $\Delta$  и вычислите  $\Delta$  для электронов с энергией 60.0 ГэВ. Выразите ответ через ускоряющее напряжение  $V$  и физические константы. 0.8pt

Снова рассмотрим протоны в БАК. Считайте, что туннель, в котором движутся пучки, имеет форму окружности.

- A.3** Найдите индукцию однородного магнитного поля  $B$  необходимого для поддержания протонного пучка на круговой траектории. Выражение должно содержать только энергию протонов  $E$ , длину окружности  $L$ , физические постоянные и числа. Используйте только такие приближения, которые не изменяют результат с точностью до последней значащей цифры. Вычислите магнитную индукцию  $B$  для энергии протонов  $E = 7.00$  ТэВ, пренебрегая взаимодействием протонов. 1.0pt

### Мощность излучения

Заряженная частица, движущаяся с ускорением, излучает энергию в виде электромагнитных волн. Мощность излучения  $P_{\text{rad}}$  заряженной частицы, движущейся по окружности с постоянной угловой скоростью, зависит только от её ускорения  $a$ , заряда  $q$ , скорости света  $c$  и электрической постоянной  $\epsilon_0$ .

- A.4** Найдите выражение для мощности излучения  $P_{\text{rad}}$  методом размерностей. 1.0pt

В настоящей формуле для мощности излучения содержится множитель  $1/(6\pi)$ , ещё один дополнительный множитель  $\gamma^4$  даёт теория относительности, где  $\gamma = (1 - v^2/c^2)^{-\frac{1}{2}}$ .

- A.5** Для энергии протонов  $E = 7.00$  ТэВ вычислите полную излучаемую мощность  $P_{\text{tot}}$  большого адронного коллайдера. Обратите внимание на Таблицу 1. Пользуйтесь целесообразными приближениями. 1.0pt

## Линейное ускорение

В ЦЕРНе изначально покоящиеся протоны ускоряются с помощью разности потенциалов  $V = 500$  МэВ в линейном ускорителе длины  $d = 30.0$  м. Считайте, что электрическое поле однородно. Линейный ускоритель можно представить в виде двух пластин (рис. 1).

**A.6** Определите время  $T$  движения протонов в электрическом поле.

1.5pt

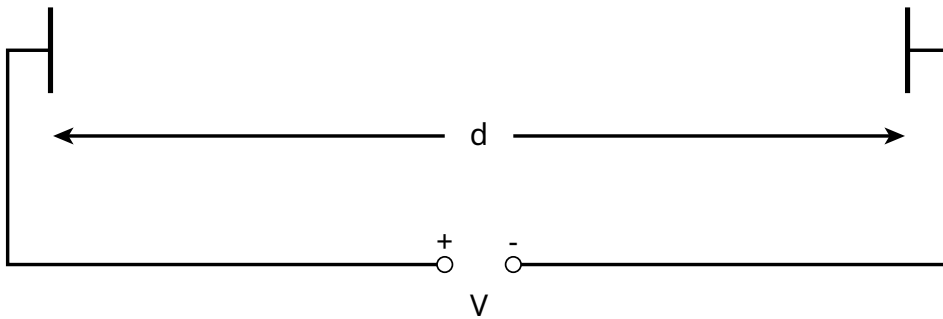


Рисунок 1. Схема ускорительного блока.

## Часть В. Идентификация частиц (4 балла)

Чтобы правильно интерпретировать процессы взаимодействия при столкновениях, нужно уметь определять, какие высокоэнергетические частицы при этом образуются. Один из простых методов — измерить время ( $t$ ), которое требуется частице с известным импульсом для прохождения расстояния  $l$  в так называемом время-пролётном (ВП) детекторе. В Таблице 2 приводится список частиц, которые обычно идентифицируются в детекторе, и их массы.

Частица	Масса [МэВ/ $c^2$ ]
Deuteron (дейтрон)	1876
Proton (протон)	938
Charged Kaon (заряженный К-мезон)	494
Charged Pion (заряженный $\pi$ -мезон)	140
Electron (электрон)	0.511

Таблица 2. Частицы и их массы.

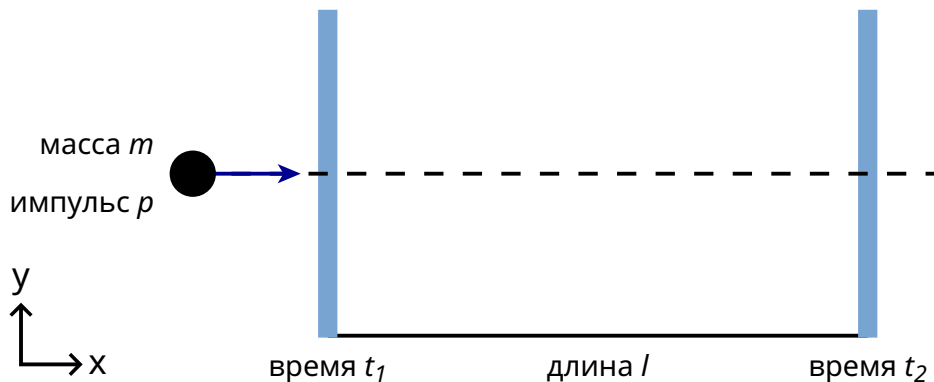


Рисунок 2. Схема время-пролётного детектора.

**В.1** Выразите массу частицы  $m$  через импульс  $p$ , расстояние  $l$  и время пролёта  $t$ , считая, что частицы имеют элементарный заряд  $e$  и движутся прямолинейно со скоростью близкой к  $c$  перпендикулярно обеим плоскостям детектирования (рис. 2). 0.8pt

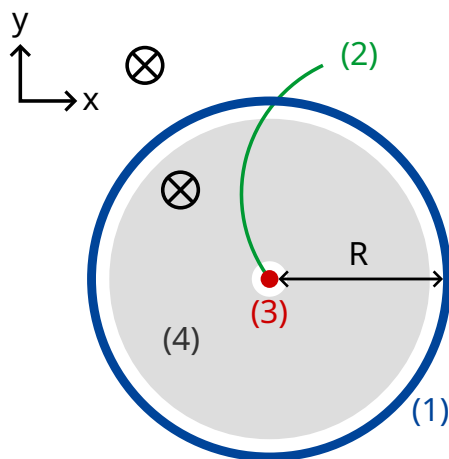
**В.2** Вычислите минимальную длину ВП детектора  $l$ , которая позволяет надёжно отличить заряженный К-мезон (charged Kaon) от заряженного  $\pi$ -мезона (charged Pion), если импульс каждой частицы равен 1.00 ГэВ/с. Для надёжного различения частиц необходимо, чтобы разница во временах пролёта превышала временное разрешение детектора более чем в три раза. Типичное разрешение ВП детектора составляет 150 пс ( $1 \text{ пс} = 10^{-12} \text{ с}$ ). 0.7pt

Ниже рассматривается идентификация частиц в двухступенчатом детекторе, состоящем из трекового детектора и ВП детектора. На Рисунке 3 изображено строение двухступенчатого детектора в

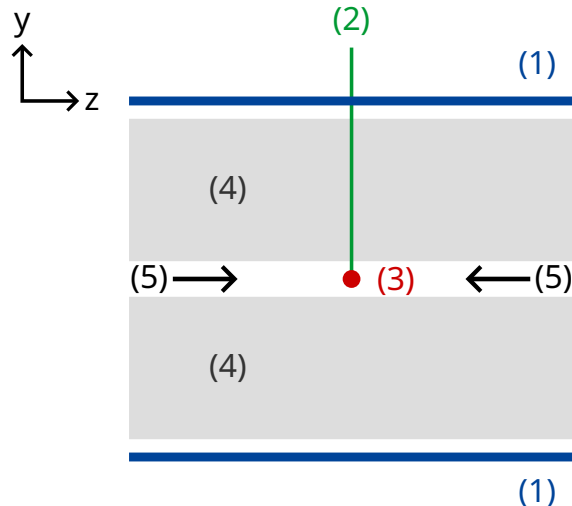
поперечной и продольной плоскостях (относительно протонных пучков). Детекторы представляют собой трубки, окружающие область взаимодействия протонов. Пучки протонов движутся по оси трубок. Трековый детектор регистрирует траекторию (трек) заряженной частицы, пролетающей через магнитное поле, параллельное пучку протонов.

Радиус траектории  $r$  позволяет определить поперечный импульс  $p_T$  частицы. Так как момент столкновения известен, ВП детектору требуется только одна трубка для измерения времени пролёта от точки столкновения до трубки ВП детектора. Трубка расположена снаружи трековой камеры.

Считайте, что все частицы, возникшие в результате столкновения, движутся перпендикулярно протонным пучкам, т.е. возникшие частицы не имеют импульса вдоль направления протонных пучков.



поперечное сечение



cross section of the  
продольное сечение  
вдоль линии пучка

- (1) Трубка ВП детектора
- (2) Траектория
- (3) Точка столкновения
- (4) Трековый детектор
- (5) Протонные пучки
- ⊗ Магнитное поле

Рисунок 3. Экспериментальная установка для идентификации частиц с помощью трековой камеры и ВП детектора. Оба детектора представляют собой трубки, окружающие точку столкновения в центре. Слева: Поперечный вид (перпендикулярно линии пучка). Справа: Продольный вид, (параллельно линии пучка). Образовавшаяся частица движется в плоскости, перпендикулярной линии пучка.

**B.3** Выразите массу частицы через магнитную индукцию  $B$ , радиус время-пролётной трубки  $R$ , физические постоянные и измеренные величины: радиус траектории  $r$  и время пролёта  $t$ . 1.7pt

В этом пункте вам предлагается идентифицировать четыре зарегистрированные частицы. Магнитная индукция в трековом детекторе составляла  $B = 0.500$  Тл, радиус трубки ВП-детектора  $R = 3.70$  м. Результаты измерений указаны ниже ( $1 \text{ нс} = 10^{-9} \text{ с}$ ):

Частица	Радиус траектории $r$ [м]	Время пролёта $t$ [нс]
A	5.10	20
B	2.94	14
C	6.06	18
D	2.31	25

**B.4** Вычислите массы четырёх частиц и определите их тип. 0.8pt