

Большой адронный коллайдер (10 баллов)

Перед началом работы над задачей прочтите Инструкцию в отдельном конверте.

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 состоит в изучении фундаментальных законов природы. В коллайдере два пучка частиц ускоряются до высоких энергий, удерживаясь на круговой траектории ускорителя сильным магнитным полем, а затем сталкиваются друг с другом. 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 пучке протонов	2808
Число протонов в сгустке	1.15×10^{11}
Протонные пучки	
Энергия протонов	7.00 ТэВ
Энергия в системе центра масс (столкновения)	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 I:

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, обладающими энергией 60.0 GeV.

- A.2** Для частиц с высокой энергией и малой массой покоя относительное отклонение $r = (c - v)/c$ конечной скорости v от скорости света очень мало. Найдите подходящее приближение для r и вычислите r для электронов с энергией 60.0 ГэВ. 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 для поддержания протонного пучка на круговой траектории. Выражение должно содержать только энергию протонов E , длину окружности L , фундаментальные константы и числа. Используйте только такие приближения, которые не изменят 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_{rad} заряженной частицы, движущейся по кругу с постоянной угловой скоростью, зависит только от её ускорения a , заряда q , скорости света c и электрической постоянной ϵ_0 .

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

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

- A.5** Вычислите полную излучаемую мощность P_{tot} большого адронного коллайдера для энергии протонов $E = 7.00$ ТэВ (обратите внимание на Таблицу 1). Пользуйтесь целесообразными приближениями. 1.0pt

Линейное ускорение.

В ЦЕРНе изначально покоящиеся протоны ускоряются разностью потенциалов $V = 500$ МэВ линейным ускорителем 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 поле. 1.5pt

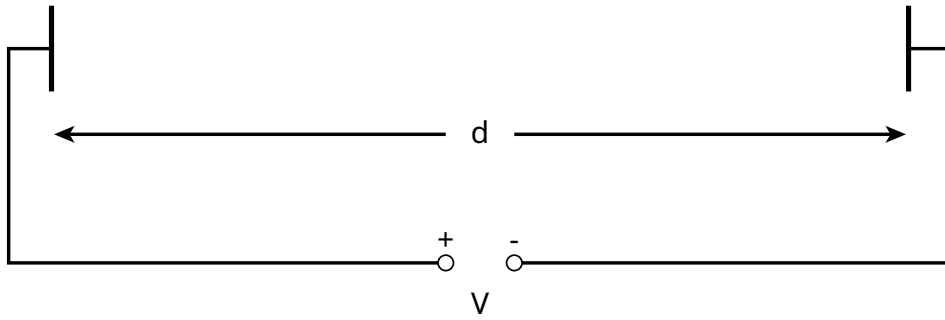


Рисунок 1. Схема ускорительного блока.

Часть В. Идентификация частиц (4 балла)

Время пролёта:

Чтобы правильно интерпретировать процессы взаимодействия при столкновениях, нужно уметь определять, какие при этом высокоэнергетические частицы образуются. Один из простых методов — измерение времени (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 масс.

Частица	Масса [МэВ/ c^2]
Дейтрон (Deuteron)	1876
Протон (p)	938
Заряженный К-мезон (charged Kaon)	494
Заряженный π -мезон (charged Pion)	140
Электрон (electron)	0.511

Таблица 2. Частицы и их массы.

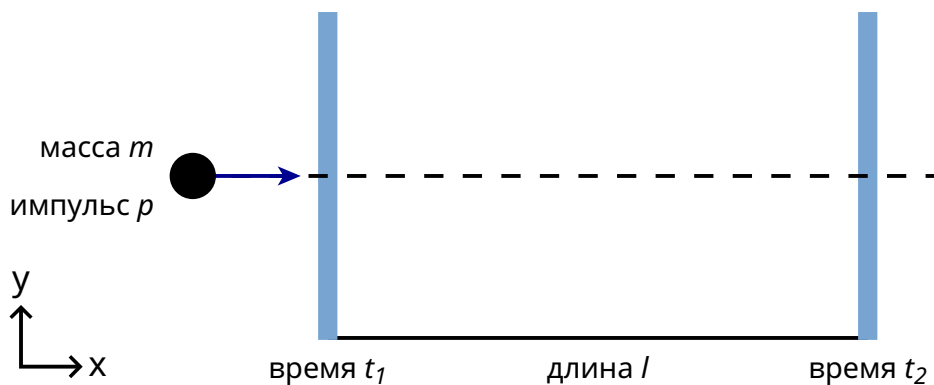


Рисунок 2. Схема время-пролётного детектора.

- 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

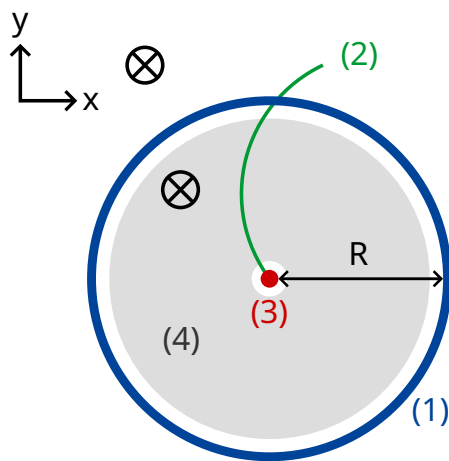
- B.2** Вычислите длину ВП детектора l , которая позволяет надёжно отличить заряженный K-мезон от заряженного π -мезона, если импульсы каждой частицы равен 1.00 ГэВ/с. Для надёжного различения частиц необходимо, чтобы разница во времени пролёта превышала временное разрешение детектора более чем в три раза. Типичное разрешение ВП детектора составляет 150 пс (1 пс = 10^{-12} с) 0.7pt

Ниже рассматривается идентификация частиц в двухступенчатом детекторе, состоящем из трекового детектора и ВП детектора. На Рисунке 3 строение двухступенчатого детектора схематично изображено в поперечной и продольной, относительно протонных пучков, плоскостях. Детекторы представляют собой трубки, окружающие область взаимодействия протонов, а пучки протонов движутся вдоль оси трубок.

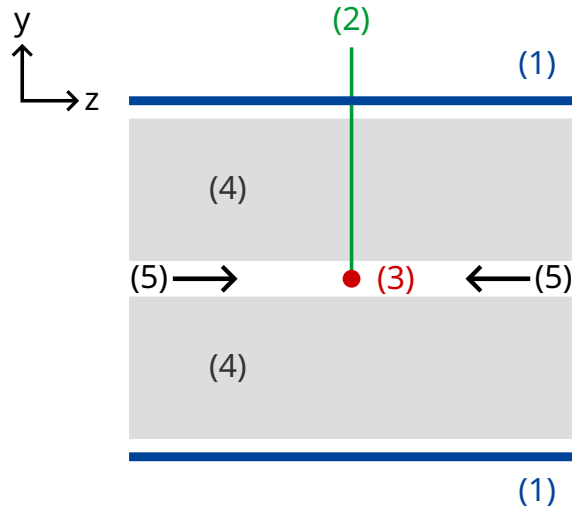
Трековый детектор регистрирует траекторию (трек) заряженной частицы, пролетающей через магнитное поле, параллельное пучку протонов.

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**, расположенной 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.



поперечный вид



cross section of the
продольный вид
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 трекового 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 оси пучка.

В.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 определить тип четырёх зарегистрированных частиц. 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 полета 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