

Большой Адронный Коллайдер (10 points)

Пожалуйста, ознакомьтесь с общими инструкциями, содержащимися в отдельном конверте, прежде чем начать решать эту задачу.

В этой задаче мы обсудим физику на ускорителе элементарных частиц БАК (Большой Адронный Коллайдер) в ЦЕРНе. ЦЕРН является крупнейшей в мире лабораторией физики элементарных частиц. Основная задача ЦЕРНа состоит в изучении фундаментальных законов природы. Движущиеся навстречу друг другу по круговой траектории два пучка, состоящие из сгустков протонов, (пучки удерживаются на круговой траектории ускорителя сильным магнитным полем), сначала ускоряются до высоких энергий, а затем сталкиваются друг с другом. Образовавшиеся в результате столкновений протонов частицы наблюдаются с помощью больших детекторов. Некоторые параметры БАК можно найти в таблице 1.

Кольцо БАК	
Длина окружности кольца	26659 m
Количество протонных сгустков в пучке	2808
Число протонов в одном сгустке	1.15×10^{11}
Протонные пучки	
энергия протонов	7.00 TeV
Энергия в системе центра масс	14.0 TeV

Таблица1 - Типичные численные значения некоторых параметров БАК.

В физике элементарных частиц используются следующие единицы измерения для энергии, импульса и массы. Энергия измеряется в электронвольтах [eV]. По определению, 1 eV равен энергии, которую приобретает (или теряет) частица с элементарным зарядом e , при прохождении разности потенциалов в один вольт $1 \text{ eV} = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ kg m}^2/\text{s}^2$.

Импульс измеряется в единицах eV/c , а масса в единицах eV/c^2 , где c - скоростью света в вакууме. Так как 1 eV - очень маленькая энергия, то в физике элементарных частиц часто наряду с электронвольтами используют мегаэлектронвольты MeV ($1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$), гигаэлектронвольты GeV ($1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$) или тераэлектронвольты TeV ($1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV}$).

Часть А задания содержит задачи, связанные с ускорением протонов и электронов. В части В рассматривается каким образом определяются (идентифицируются) типы частиц, рождающиеся в результате столкновений пучков частиц в БАКе.

Часть А. Ускоритель БАК (6 points)

Ускорение:

Рассмотрим протоны, ускоренные напряжением V до скоростей очень близких к скорости света. Будем предполагать, что можно пренебречь потерями энергии протонами вследствие: 1) их столкновений между собой и другими частицами; 2) излучения ими электромагнитных волн, обусловленного ускоренным движением протонов.

- | | | |
|------------|---|-------|
| A.1 | Найдите точное выражение для конечной скорости v протонов как функцию ускоряющего напряжения V и физических констант. | 0.7pt |
|------------|---|-------|

В будущих экспериментах планируется использовать протоны из БАКа для столкновения с электронами, имеющими энергию 60.0 GeV.

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

Вернемся теперь к протонам в БАК. Предположим, что труба, по которой движутся пучки, имеет форму окружности.

- A.3** Выведите выражение для индукции однородного магнитного поля B , которое необходимо для удерживания протонного пучка на круговой орбите. Выражение должно содержать только энергию протонов E , длину кольца L , фундаментальные константы и числа. Используйте только те приближения, которые не изменяют результат с точностью до последней значащей цифры. Вычислите индукцию B для энергии протона равной $E = 7.00$ TeV, пренебрегая взаимодействием протонов между собой. 1.0pt

Мощность излучения:

Ускоренная заряженная частица излучает энергию в виде электромагнитных волн. Мощность излучения P_{rad} заряженной частицы, которая движется по круговой орбите с постоянной угловой скоростью, зависит только от ее ускорения a , заряда q , скорости света c и вакуумной диэлектрической проницаемости ϵ_0 .

- A.4** Используя метод размерностей физических величин, найдите выражение для мощности излучения P_{rad} . 1.0pt

Точная формула для мощности излучения P_{rad} содержит множитель $1/(6\pi)$, а учет релятивистских эффектов приводит к появлению множителя γ^4 , где $\gamma = (1 - v^2/c^2)^{-\frac{1}{2}}$.

- A.5** Вычислите полную мощность излучения P_{tot} большого адронного коллайдера для энергии протонов равной $E = 7.00$ TeV (Обратите внимание на Таблицу 1). Вы можете использовать целесообразные приближения. 1.0pt

Линейный ускоритель

В БАК изначально покоящиеся протоны ускоряются разностью потенциалов $V = 500$ MV в линейном ускорителе, имеющем длину $d = 30.0$ m. Предположим, что электрическое поле однородно, а линейный ускоритель состоит из двух пластин (как изображено на рис. 1).

- A.6** Определите время T , необходимое протонам для прохождения через это электрическое поле. 1.5pt

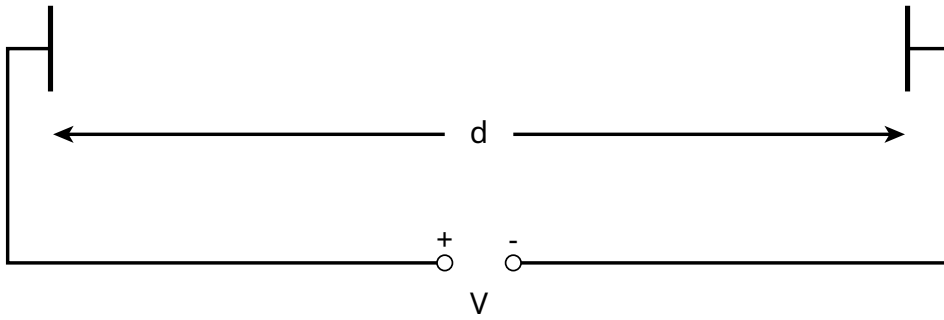


Рисунок 1 - Схема линейного ускорителя

Часть В. Идентификация (отождествление) частиц (4 points)

Пролетное время:

Очень важно уметь для понимания сути взаимодействий, происходящих при столкновениях частиц, определять (идентифицировать) высокоэнергетические частицы, рожденные в результате столкновений протонных пучков.

Одним из простых методов является измерение так называемого **пролетного времени** (t) - времени, которое затрачивается частицей с известным импульсом для прохождения расстояния l в так называемом Time-of-Flight (ВП) детекторе. В Таблице 2 приведен перечень частиц вместе с их массами, которые обычно идентифицируются в таком детекторе.

Частица	Масса [MeV/c ²]
дейтрон	1876
Протон	938
заряженный каон (K-мезон)	498
заряженный пион (пи-мезон)	140
Электрон	0.511

Таблица 2 - Частицы и их массы.

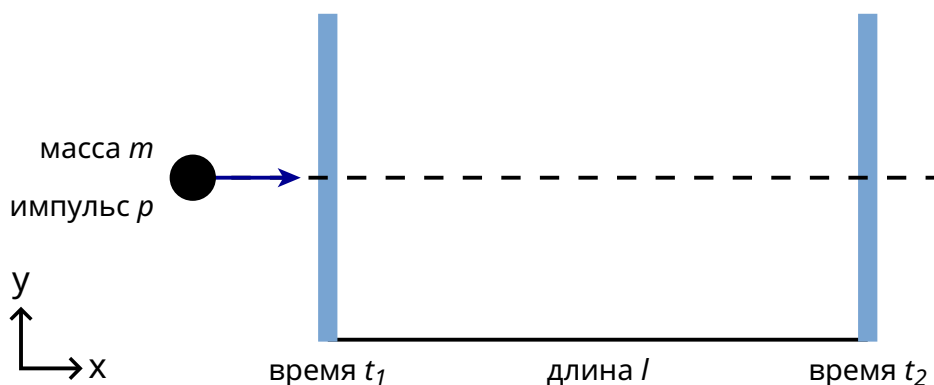


Рисунок 2 - Схема Time-of-Flight (ВП) детектора.

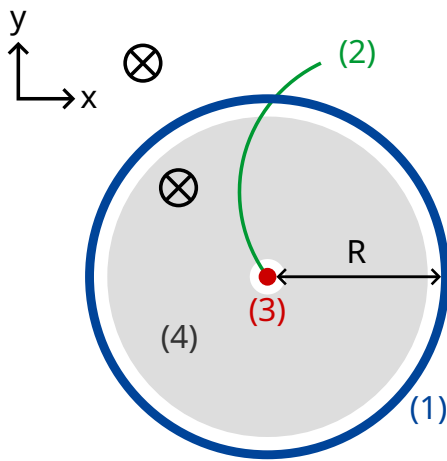
B.1 Выразите массу частицы m через импульс p , расстояние l и пролетное время t , предполагая, что в ВП- детекторе частицы, имеющие элементарный заряд e , движутся со скоростью, близкой к скорости света, по прямолинейным траекториям, перпендикулярным к двум так называемым детектирующим поверхностям (см. Рисунок 2). 0.8pt

B.2 Вычислите минимальную длину ВП-детектора l , которая позволяла бы надежно отличать заряженный каон от заряженного пиона в случае если импульсы обеих частиц одинаковы и равны $1.00 \text{ GeV}/c$. Для того, чтобы надежно различать эти частицы необходимо чтобы пролетное время более чем в три раза превышало временное разрешение ВП-детектора. Типичное временное разрешение ВП-детектора составляет 150 ps ($1 \text{ ps} = 10^{-12} \text{ s}$). 0.7pt

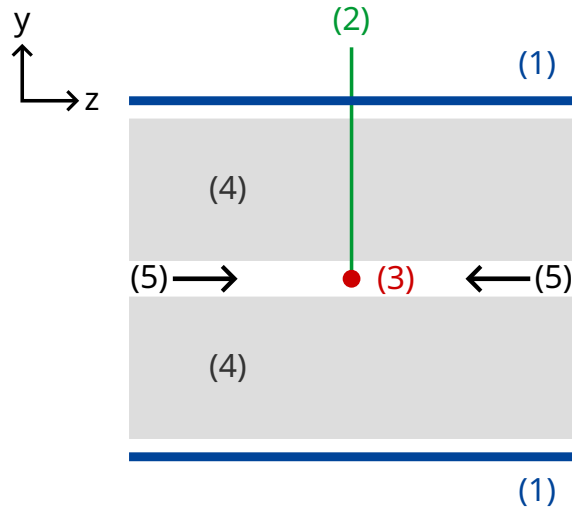
Частицы, наблюдаемые в детекторах БАК, могут быть идентифицированы с помощью двухступенчатого детектора, состоящего из так называемого Трекер-детектора (его еще называют *следящая камера*) и ВП-детектора. На Рисунке 3 строение такого двучступенчатого детектора показано схематически в двух разрезах - поперечном (слева) и продольном (справа), сделанными относительно направления распространения протонных пучков. Оба детектора представляют собой трубки, окружающие область, в которой происходит столкновения и рождения частиц. Пучки протонов движутся вдоль оси трубок.

С помощью Трекер-детектора можно зарегистрировать траекторию заряженной частицы (трек), пролетающей через магнитное поле, направление которого параллельно направлению движения сталкивающихся пучков протонов. Радиус этой траектории r позволяет определить поперечный импульс p_T частицы. Так как момент времени столкновения протонов известен, ВП-детектору требуется только одна детектирующая поверхность для измерения пролетного времени частицы (разницы между моментом времени, когда сталкиваются протоны и моментом времени, когда детектируется рожденная частица)

Эта детектирующая поверхность расположена сразу за Трекер-детектором. В этой задаче будем предполагать, что все частицы, рождающиеся в результате столкновения протонных пучков, движутся перпендикулярно к направлению движения протонных пучков. Это означает, что рожденные частицы не имеют импульса вдоль направления движения протонного пучка.



поперечный разрез по центру



продольный разрез вдоль направл
ния движения протонных пучков

- (1) - ВП трубка
- (2) - Траектория
- (3) - Точка столкновения
- (4) - Трэкер-детектор
- (5) - Протонный пучок
- (6) - \otimes - направление магнитного поля

Рисунок 3 - Экспериментальная установка для идентификации частиц с помощью Трэкер-детектора и ВП детектора. Оба детектора представляют собой трубки, окружающие точку, в которой происходит столкновение частиц. **Слева:** Поперечный разрез, сделанный в направлении перпендикулярном к направлению движения протонных пучков. **Справа:** Продольный разрез, сделанный в направлении параллельном линии протонного пучка. Рожденная частица движется в направлении перпендикулярном оси протонного пучка.

В.3 Выразите массу частицы через индукцию магнитного поля B , радиус ВП-детектора R , физические константы и измеренные в эксперименте величины: радиус траектории r и пролетное время t . 1.7pt

Были детектированы четыре различных частицы, которые необходимо идентифицировать. Индукция магнитного поля в Трэкер-детекторе известна $B = 0.500$ Т. Радиус ВП-детектора равен 3.70 м. Ниже приведены результаты измерений ($1 \text{ ns} = 10^{-9} \text{ s}$):

Частица	Радиус траектории r [m]	Пролетное время t [ns]
A	5.10	20
B	2.91	14
C	6.06	18
D	2.32	25

B.4 Идентифицируйте эти четыре частицы путем вычисления их масс.

0.8pt