

## Большой Адронный Коллайдер (10 баллов)

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

В этой задаче мы обсудим физические явления, происходящие на ускорителе элементарных частиц БАК (Большой Адронный Коллайдер) в ЦЕРН. 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	$1.15 \times 10^{11}$
Протонные пучки	
Энергия протонов	7.00 TeV
Энергия в системе центра масс	14.0 TeV

Таблица 1 - 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 этой задачи задания, связанные с ускорением протонов и электронов. В части В рассматривается каким образом определяются (идентифицируются) типы частиц, рождающиеся в результате столкновений пучков протонов в БАКе.

### Часть А. Ускоритель БАК (6 баллов)

#### 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.

- |            |   |       |
|------------|---|-------|
| <b>A.1</b> | 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 приближенное выражение для  $\Delta$  и вычислите  $\Delta$  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** Получите выражение для индукции однородного магнитного поля  $B$ , которое необходимо для удержания протонного пучка на круговой орбите. Выражение должно содержать только энергию протонов  $E$ , длину кольца  $L$ , фундаментальные константы и численные коэффициенты. Вы можете использовать приближения, которые не влияют на количество значащих цифр в ответе. 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  $P_{\text{rad}}$  заряженной частицы, которая движется по круговой орбите с постоянной угловой скоростью, зависит только от ее ускорения  $a$ , заряда  $q$ , скорости света  $c$  и электрической постоянной  $\epsilon_0$ .

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

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

- A.5** Вычислите полную мощность излучения  $P_{\text{tot}}$  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

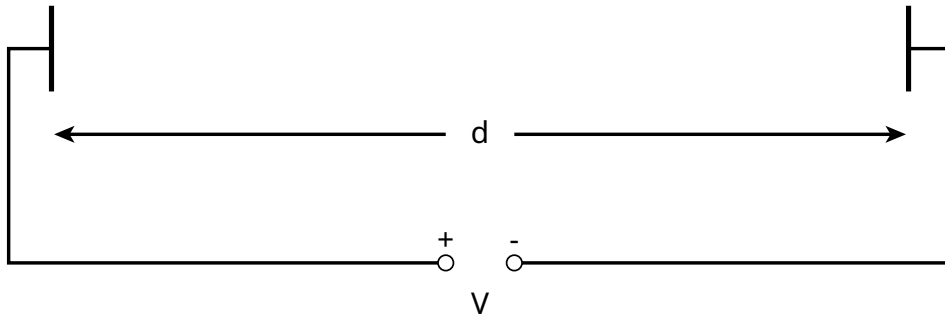


Рисунок 1 - Схема линейного ускорителя.

## Часть В. Идентификация (отождествление) частиц (4 балла)

### Пролетное время:

Для интерпретации физических процессов, происходящих при столкновениях частиц, важно уметь 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 <sup>2</sup> ]
дейтрон	1876
протон	938
заряженный каон (K-мезон)	498
заряженный пион (пи-мезон)	140
электрон	0.511

Таблица 2 - Массы частиц.

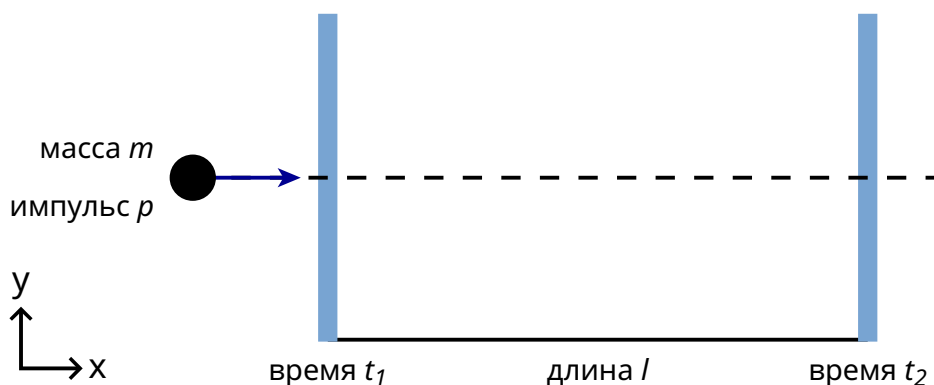


Рисунок 2 - Схема ВП детектора.

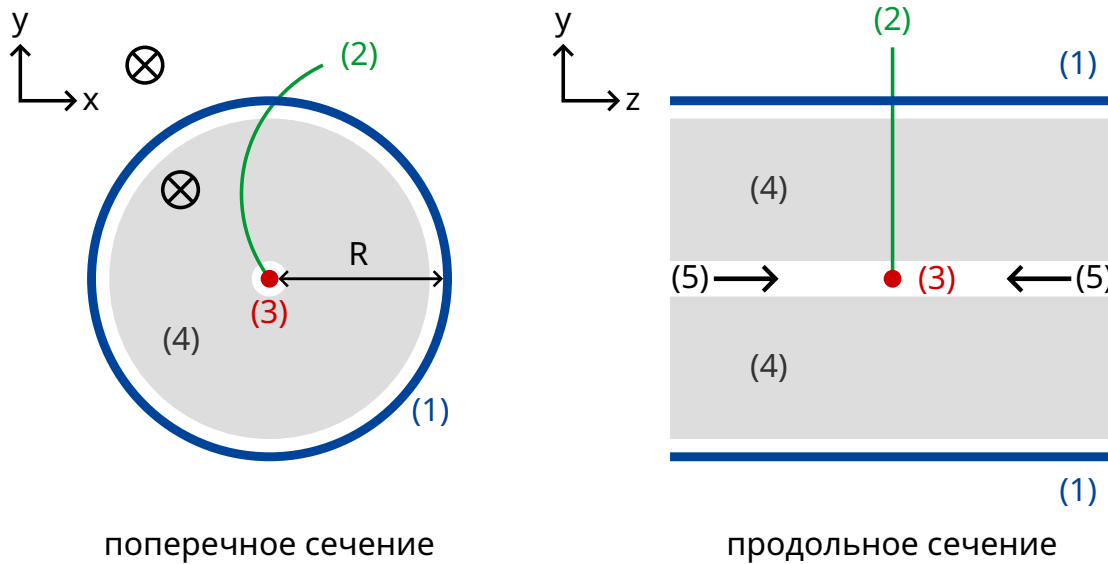
**B.1** Выразите массу частицы  $m$  через импульс  $p$ , расстояние  $l$  и пролетное время  $t$ , предполагая, что в ВП- детекторе частицы, имеющие элементарный заряд  $e$ , движутся со скоростью, близкой к скорости света, по прямолинейным траекториям, перпендикулярным к двум так называемым детектирующим 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  $150 \text{ ps}$  ( $1 \text{ ps} = 10^{-12} \text{ s}$ ). 0.7pt

Далее, 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 происходят 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.



- (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:** Поперечное сечение в направлении, перпендикулярном к направлению движения протонных пучков. **Справа:** Продольное сечение в направлении, параллельном линии протонного пучка. Рожденная частица движется в направлении перпендикулярном оси протонного пучка.

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

Было обнаружено четыре различных частицы, которые необходимо идентифицировать. Напряженность 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