

Таким образом, все существующие типы источников элементарных частиц (и ядер) разделяются на: радиоактивные препараты (первичные и вторичные частицы), ускорители (первичные, вторичные, третичные пучки и т. д.), ядерные реакторы и космические лучи. Для изучения реакций сейчас используются только ускорители и реакторы. В прикладных исследованиях широко используются радиоактивные источники.

3. *Детектором*, или, что то же, *регистратором ядерных частиц*, мы будем называть устройство, дающее информацию о прохождении отдельных частиц через определенные макроскопические области пространства. Основная трудность регистрации состоит в том, что эффект воздействия отдельной частицы на вещество с макроскопической точки зрения крайне мал. Наиболее заметным эффектом такого рода является ионизация вещества заряженной частицей. Поэтому работа подавляющего большинства существующих типов детекторов заряженных частиц основана на принципе использования ионизационной способности частиц. В немногих типах детекторов используется электромагнитное излучение заряженных частиц в среде. Действие нейтральных частиц на вещество слишком ничтожно для того, чтобы их можно было регистрировать непосредственно. Поэтому нейтральные частицы регистрируются по вторичным процессам: исследуемые нейтральные частицы порождают заряженные, которые регистрируются по их ионизирующему действию.

Из-за малости ионизационного действия отдельной частицы для регистрации необходимо высокоэффективное усиление. Поэтому в ядерной радиотехнике широко используются импульсные радиотехнические усилители. Но на первой ступени усиления обычно радиотехнические усилители непригодны. В таких случаях используются усилители, главной частью которых является то или иное неустойчивое состояние физической системы: переохлажденный пар, перегретая жидкость, газ в предразрядном состоянии и т. д. В этом отношении регистрационный прибор похож на заряженное ружье. Пролетающая частица, образно говоря, нажимает на спусковой крючок, высвобождая большую энергию, за счет которой и производится регистрация.

§ 2. Источники заряженных частиц и γ -квантов

1. Теория ускорителей составляет предмет не ядерной и даже не общей физики, а относится к технической физике электромагнитных явлений. Поэтому мы будем вести изложение в потребительском плане, подчеркивая главным образом, что именно можно получить от ускорителя того или иного типа.

Результатом действия ускорителя является образование пучка заряженных частиц с энергией от нескольких МэВ до десятков

ГэВ и выше. Главными характеристиками ускорителя являются *энергия частиц* и *интенсивность*, т. е. количество частиц, вылетающих за одну секунду. Интенсивность часто характеризуют полным электрическим током, создаваемым пучком. Для получения тока, очевидно, надо умножить число частиц, вылетающих за одну секунду, на заряд отдельной частицы.

Все ускорители подразделяются на *непрерывные* или непрерывного действия и *импульсные*. Ускоритель непрерывного действия создает равномерный во времени пучок. Из импульсного ускорителя частицы вылетают порциями — импульсами. Как правило, ускорители непрерывного действия дают более высокие токи, а импульсные ускорители — более высокие энергии. Интенсивность импульсного ускорителя характеризуется двумя параметрами: количеством импульсов в секунду (или в минуту) и количеством частиц в отдельном импульсе. Очевидно, что средний ток j в импульсном ускорителе определяется формулой

$$j = Zenv, \quad (9.1)$$

где Ze — заряд ускоряемых частиц, n — число частиц в импульсе, v — число импульсов в секунду.

К более тонким характеристикам пучка относятся разброс частиц по энергиям, а для импульсных ускорителей еще и длительность каждого импульса. Малая длительность мощного импульса часто является недостатком, поскольку при каждом импульсе за очень короткое время происходит слишком много актов исследуемых процессов, так что регистрирующая аппаратура успевает «засечь» лишь их небольшую долю. Поэтому, например, третичные (см. ниже п. 14) электронные пучки, получаемые на больших протонных ускорителях, из-за большой растяжки импульсов способны конкурировать с электронными пучками больших электронных ускорителей, дающих в миллионы раз более сильные средние токи.

2. В ускорителях на частицу действуют электрические и магнитные поля. Как известно, частица с массой M , зарядом Ze и скоростью v при движении вдоль электрического поля \mathcal{E} ускоряется, так что ее энергия E возрастает в соответствии с формулой

$$\frac{dE}{dt} = Zev\mathcal{E}.$$

При движении поперек магнитного поля H частица равномерно движется по окружности радиуса R , где

$$R = \frac{Mvc}{ZeH\sqrt{1-v^2/c^2}} = \frac{pc}{ZeH}, \quad (9.2)$$

причем период T одного оборота определяется формулой

$$T = \frac{2\pi Mc}{ZeH\sqrt{1-v^2/c^2}}. \quad (9.3)$$

На основе этих элементарных фактов можно объяснить принцип действия любого ускорителя. Фактически расчет и конструирование реальных ускорителей, особенно дающих частицы высоких энергий, очень сложен. Основными трудностями являются обеспечение *фокусировки*, препятствующей пучку расплываться, и *фазировки*, препятствующей выбыванию пучка из режима ускорения по времени.

По принципу действия ускорители разделяются на два класса: а) *ускорители прямого действия* (используется также термин *высоковольтные ускорители*) и б) *ускорители многократного действия*. В ускорителях прямого действия частицы разгоняются в вакууме под действием электростатического поля, создаваемого постоянной разностью потенциалов. В ускорителях многократного действия частицы разгоняются переменными электрическими полями.

В свою очередь ускорители многократного действия делятся на *линейные* и *циклические*. В линейных ускорителях частицы движутся по прямой, а в циклических — по окружности или спиралям.

Основным типом ускорителя прямого действия является *генератор Ван-де-Граафа*, работающий в непрерывном режиме. Все линейные ускорители являются импульсными. К циклическим ускорителям относятся: *циклотрон*, его усовершенствованные варианты — *фазотрон*, *синхротрон*, *синхрофазотрон*, *изохронный циклотрон*, а также *бетатрон* и *микротрон*. Из них циклотрон и изохронный циклотрон обычно являются ускорителями непрерывного действия, микротроны могут работать как в непрерывном, так и в импульсном режиме, а все остальные циклические ускорители — существенно импульсные.

3. В *генераторе Ван-де-Граафа* ускорение осуществляется электростатическим полем. Полый металлический шар заряжается до очень высокого потенциала. Изнутри шара выходит многосекционная вакуумная трубка, из которой и вылетает пучок частиц. Энергия частиц пучка в электронвольтах по определению этой единицы равна потенциалу шара для протонов и дейтронов, а для α -частиц — в два раза больше.

Максимальная энергия частиц в генераторе Ван-де-Граафа, как и во всяком ускорителе прямого действия, ограничена напряжением пробоя между шаром и окружающими предметами. Даже при самых тщательных предосторожностях в существующих установках напряжение пробоя не удается поднимать выше десяти миллионов вольт. Поэтому генераторы Ван-де-Граафа обычно дают пучки однозарядных ионов с энергиями 2—5 МэВ, усовершенствованные генераторы — до 20 МэВ. Ток пучка доходит до нескольких сотен мкА, т. е. довольно велик.

Интересным усовершенствованием генератора Ван-де-Граафа является тандем. В тандеме используется явление перезарядки ионов. Например, отрицательные ионы водорода H^- ускоряются в направлении положительного высоковольтного электрода. На этом

электроде они проходят через тонкую фольгу, где многие из них теряют по два электрона, превращаясь в положительно заряженные протоны. Эти протоны уже отталкиваются электродом, т. е. ускоряются еще раз. В результате получается пучок удвоенной энергии. Известны тандемы с неоднократной перезарядкой, дающие однозарядные ионы с утроенной энергией.

Очевидным недостатком генератора Ван-де-Граафа является жесткое ограничение энергии пучка. Но электростатические генераторы обладают рядом преимуществ, главными из которых являются высокая монохроматичность пучка (до 10^{-6} , выше, чем на любом другом ускорителе) и легкость регулирования энергии. Именно на генераторе Ван-де-Граафа сечение протон — протон при низких энергиях было измерено с точностью, с которой не измерено ни одно другое сечение во всей ядерной физике (см. гл. V, § 4). Поэтому генераторы Ван-де-Граафа до сих пор широко используются для исследований при низких энергиях.

Важным для прикладных целей преимуществом генератора Ван-де-Граафа и других высоковольтных ускорителей является возможность получения больших мощностей при высоком к. п. д.

4. В *линейных резонансных* ускорителях частицы разгоняются прямолинейно переменным электрическим полем. Ускоряющая камера электронного ускорителя представляет собой волновод, в котором возбуждается волна электрического типа, т. е. такая, у которой электрическое поле имеет компоненту, направленную по оси камеры. Фазовая скорость этой волны подбирается так, чтобы она все время совпадала со скоростью частиц, а частицы подаются в камеру в такие моменты, чтобы они все время «сидели» близко к максимуму электрического поля. Таким образом, сгустки частиц движутся на гребнях волн. Имеются и другие варианты линейных резонансных ускорителей. Например, у ускорителей протонов и других тяжелых заряженных частиц фазовая скорость волны может быть бесконечной. В этом случае в камеру вставляются металлические дрейфовые трубки, размеры и расположение которых таковы, что частицы «прячутся» внутрь трубок, когда поле направлено против движения. Трубки экранируют поле, так что внутри них частицы движутся свободно (рис. 9.1). В линейных ускорителях удается получать прирост энергии до 10—15 МэВ на метр длины. Теоретически можно, построив достаточно длинный ускоритель, получить пучок сколь угодно большой энергии. Практические ограничения связаны с конструктивной сложностью и высокой стоимостью длинных ускорителей. Линейный резонансный ускоритель является импульсным. Средний ток обычно составляет несколько мкА (иногда до 20—30 мкА), а ток в импульсе — до 50 мА.

Преимуществами линейных резонансных ускорителей являются довольно большой ток и простота инжекции (впуска) и выпуска частиц. Кроме того, в линейных ускорителях частицы пучка практи-

чески не испускают электромагнитного излучения из-за прямолинейности их траекторий. Последнее обстоятельство не играет роли для тяжелых частиц, но важно для электронов высоких энергий (от не-

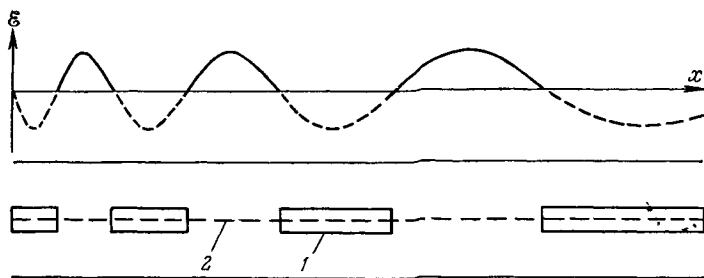


Рис 9.1 Схема резонансного линейного ускорителя с бесконечной фазовой скоростью. 1 — дрейфовые трубки, 2 — зазоры, в которых происходит ускорение частиц. Сверху дан график зависимости напряженности электрического поля в ускорителе от пути x , проходимого ускоряющейся частицей. Пунктиром изображено тормозящее поле.

скольких сотен МэВ и выше). Поэтому линейные ускорители строятся в основном для электронов, так как при энергиях от нескольких ГэВ и выше разгон электронов в кольцевых ускорителях крайне затрудняется потерями на электромагнитное излучение.

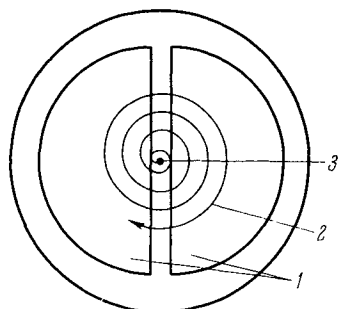


Рис. 9.2. Схема циклотрона.

1 — дуанты, 2 — траектория заряженных частиц, 3 — источник заряженных частиц. Магнитное поле направлено перпендикулярно плоскости дуантов.

Ускорение тяжелых частиц обычно целесообразнее производить на кольцевых ускорителях. Но из-за большой интенсивности и простоты выпуска частиц инжекторы (т. е. предускорители) гигантских циклических ускорителей тяжелых частиц являются линейными. Так, на циклическом ускорителе в Серпухове в качестве инжектора используется линейный ускоритель протонов на 100 МэВ (см. ниже п. 9).

5. Классическим типом *циклического ускорителя* является циклотрон (Э. О. Лоуренс, 1931). В циклотроне существенно используется тот факт, что согласно (9.2), (9.3) для нерелятивистской частицы в постоянном однородном магнитном поле радиус орбиты пропорционален скорости, а период обращения не зависит от энергии. Принцип действия циклотрона таков (рис. 9.2). Ускоряющая камера находится в сильном однородном магнитном поле. Частицы попадают

из инжектора близко к центру камеры и начинают вращаться по орбите малого радиуса. В зазоре между дуантами частицы ускоряются импульсным электрическим полем. В результате энергия и радиус орбиты возрастают. Повторяя ускорение электрическим полем на каждом обороте, энергию и радиус орбиты доводят до максимально допустимых значений. В результате частицы движутся по раскручивающейся спирали. На последнем витке спирали включается отклоняющее электрическое поле, выводящее пучок наружу. Ускоряющие электроды ставятся так, чтобы щель между ними была направлена вдоль радиуса. В этом случае из-за постоянства периода обращения частицы будут синхронно ускоряться на всех витках спирали. Напряжение ускоряющего поля лимитируется возможностью пробоя. Оно обычно не превышает 100 кВ, так что приращение энергии за оборот имеет порядок 100 кэВ. Таким образом, в циклотроне на 20 МэВ частица делает примерно 200 оборотов.

Очевидно, что главным недостатком циклотрона является ограничение существенно нерелятивистскими энергиями частиц, так как даже не очень большие релятивистские поправки в соответствии с (9.3) нарушают синхронность ускорения на разных витках. Поэтому на циклотроне протоны можно эффективно разгонять лишь до энергий 20—25 МэВ, а электроны ускорять практически нельзя.

С другой стороны, в области низких энергий циклотрон значительно превосходит все другие ускорители по интенсивности, так как он может давать токи до 1 мА. Поэтому циклотроны до сих пор широко используются для исследования ядерных реакций при низких энергиях, а также для промышленного получения тех изотопов (как правило, нейтронно-дефицитных, т. е. с количеством нейтронов меньше равновесного), которые нельзя получать в реакторах.

Циклотроны используются также для получения пучков дейтронов, α -частиц, тяжелых многократно ионизованных ионов, таких, как углерод, азот, кислород. В последнем случае удается получать энергии до нескольких сотен МэВ, так как из-за большой массы ионов релятивистские поправки для них становятся существенными при более высоких (чем для протонов) энергиях.

Для того чтобы сделать циклотронный принцип ускорения пригодным для частиц релятивистских энергий, необходимо менять либо режим ускорения, либо распределение магнитных полей. Это было осуществлено разными способами в фазотронах, синхротронах, синхрофазотронах, изохронных циклотронах.

6. *Фазотрон* (другое употребительное название — *синхроциклотрон*) отличается от циклотрона тем, что резонансное ускорение производится электрическим полем *переменной частоты*. Изменение частоты во времени подбирается так, чтобы в соответствии с (9.3) ускоряющее поле разгоняло частицу на каждом витке даже при наличии заметных релятивистских поправок. Очевидно, что фазо-

трон может работать только в импульсном режиме: в каждый момент в камере может находиться только один сгусток (иногда несколько сгустков) частиц, потому что при каждом значении частоты резонансного поля ускорение происходит только на орбите определенного радиуса.

Фазотроны используются для ускорения тяжелых частиц — протонов, дейтронов, α -частиц. Имеются фазотроны с энергиями до 1 ГэВ для протонов и до 890 МэВ для α -частиц. Часто используется комбинация фазотрона с циклотроном.

В секунду фазотрон дает от нескольких десятков до нескольких сотен импульсов. Поэтому его интенсивность намного меньше, чем у циклотрона, но все же имеет порядок 1 мкА, т. е. довольно велика. В одном импульсе ускорителя содержится 10^9 — 10^{10} частиц.

Ускоряющее поле имеет напряжение 10—30 кВ. Поэтому в фазотроне с энергией 700 МэВ частица должна сделать примерно 10^5 оборотов.

Идея фазотрона была выдвинута В. И. Векслером (1944) в СССР и несколько позднее Е. М. Мак-Милланом (1945) в США. Главным моментом идеи В. И. Векслера является открытый им *принцип автофазировки*, суть которого сводится к следующему. Частицы попадают из инжектора в ускорительную камеру с некоторым разбросом по скоростям. Поэтому в процессе резонансного ускорения часть частиц начнет отставать, а часть убежать вперед. Если, однако, частицы проходят ускоряющий промежуток в период нарастания электрического поля, то — в этом и состоит явление автофазировки — на отстающие и опережающие частицы действуют поля, «загоняющие» эти частицы обратно в резонансный режим.

Принцип автофазировки Векслера — Мак-Миллана справедлив не только для фазотронов, но и для других ускорителей высоких энергий — синхротронов, линейных резонансных ускорителей, микротронов и др.

Верхний предел энергии, достигаемый на фазотроне, определяется не физическими, а экономическими ограничениями и равен примерно 1 ГэВ. Дело в том, что в соответствии с (9.2) при скоростях, близких к c , радиус орбиты пропорционален энергии. Поэтому вес магнита пропорционален кубу энергии, так как магнитное поле должно создаваться во всей камере от центра до краев. Магнит делается из высококачественного трансформаторного железа и является самой дорогой частью ускорителя. Тем самым стоимость фазотрона, грубо говоря, пропорциональна кубу энергии. Из-за этого для получения частиц с энергиями от 1 ГэВ и выше используют *кольцевые* циклические ускорители, в которых частицы разгоняются не по спирали, а по кольцу, что приводит к значительному снижению веса магнита, т. е. стоимости. В области от 25 до сотен МэВ фазотронный метод ускорения протонов, дейтронов и α -частиц сейчас является основным.

7. Электроны становятся ультрарелятивистскими уже при энергиях в несколько МэВ, так что, начиная примерно с 10 МэВ, скорость электрона почти не зависит от энергии и практически равна c . Независимым от энергии становится и период обращения при фиксированном радиусе орбиты:

$$T_{\text{ультрарел}} = 2\pi R/c. \quad (9.4)$$

Поэтому можно так подобрать режим изменения магнитного поля во времени, чтобы и радиус орбиты, и частота ускоряющего поля были постоянны. Электронный ускоритель такого типа называется синхротроном. Очевидным преимуществом синхротрона является сравнительно малый вес магнита, обусловленный тем, что магнитное поле надо создавать только вдоль ускоряющего кольца (но не в середине).

Примерно от энергии 100 МэВ электроны на кольцевой орбите начинают заметно терять энергию на электромагнитное излучение, обусловленное центростремительным ускорением. Это излучение не мешает работе синхротрона (в отличие от бетатрона, см. ниже) в довольно широком диапазоне энергий. Но именно это излучение ставит предел высшей энергии, достижимой в синхротронах.

В синхротроне относительно сложными являются проблемы инжекции и выпуска частиц. Инжекция осложняется тем, что в синхротронном режиме могут ускоряться только ультрарелятивистские частицы. Поэтому приходится либо начинать ускорение с другого, бетатронного (см. ниже), режима, либо подавать в синхротрон пучок, предварительно ускоренный до энергии 1—50 МэВ. Задача выпуска пучка осложнена постоянством радиуса орбиты. В настоящее время выпуск частиц осуществляется на большинстве современных синхротронов. Часто пучок электронов в синхротроне направляют на внутреннюю мишень, в которой создается пучок тормозных γ -квантов. Эти γ -кванты используются для разнообразных научных и прикладных исследований.

Электронные синхротроны создают на энергии от 100 МэВ до 12 ГэВ. При меньших энергиях более экономичны описываемые ниже бетатроны и микротроны, а при больших — линейные резонансные ускорители. В синхротронах высоких энергий число частиц в импульсе имеет порядок 10^{10} , а число импульсов в секунду составляет несколько десятков, так что средний ток имеет порядок 0,1 мкА.

8. Для ускорения тяжелых частиц до энергий от 1 ГэВ и выше используется *синхрофазотрон* — кольцевой ускоритель, в котором меняется во времени как магнитное поле, так и частота импульсов ускоряющего электрического поля. Изменение частоты электрического поля здесь необходимо, поскольку протоны с энергией в 1 ГэВ еще не являются достаточно ультрарелятивистскими, так что период их обращения по орбите постоянного радиуса зависит от энергии. В разных странах сооружены протонные синхрофазотроны на энер-

гии от 1 ГэВ до 10 ГэВ. Интенсивность синхрофазотронных пучков относительно низка, особенно при высокой энергии. Синхрофазотрон на 10 ГэВ в Дубне дает в среднем за цикл ускорения $3,3 \cdot 10^{11}$ протонов (7,5 импульса в минуту). Отметим, что Дубненский синхрофазотрон может ускорять не только протоны, но и атомные ядра до энергии 10 ГэВ на один протонный заряд. Так, полностью ионизованный атом изотопа углерода C^{12} ускоряется на этом ускорителе до энергии 5 ГэВ/нуклон (интенсивность в импульсе 10^4 ядер C^{12}). Ускорение атомных ядер до релятивистских энергий положило начало новому направлению в ядерной физике — физике релятивистских ядер.

9. Интенсивность синхрофазотронов удалось заметно повысить путем использования открытого в 1950 г. (Н. Кристофилос) *метода сильной фокусировки* пучков. Идея метода состоит в том, что в ускорительном кольце чередуются фокусирующие и дефокусирующие магнитные линзы. При соответствующем подборе параметров линз такая система создает сильный фокусирующий эффект за счет того, что пучок проходит через рассеивающую линзу ближе к главной оси, чем через предшествующую ей собирающую.

Применение жесткой фокусировки в синхрофазотронах дало возможность строить ускорители на более высокие энергии. При жесткой фокусировке сильно уменьшается диаметр пучка, что на порядок уменьшает вес магнита. Один из крупнейших в мире синхрофазотронов с жесткой фокусировкой пущен в конце 1967 г. в Серпухове (В. В. Владимирский, Д. Г. Кошкарев, А. А. Кузьмин, А. А. Логонов, И. Ф. Малышев, Р. М. Суляев и др.).

Серпуховский ускоритель дает протоны с энергией 76 ГэВ. Средний ток равен $2 \cdot 10^{-2}$ мкА (10^{12} частиц в импульсе, 8 импульсов в минуту). Прирост энергии за один оборот равен 190 кэВ, так что за полный цикл ускорения частица проходит в ускорителе около 400 000 оборотов. Радиус ускорительного кольца равен 236,14 м. В то же время поперечные размеры вакуумной камеры невелики: высота 11,5 см, ширина 17 см (при длине в 1,5 км).

Жесткая фокусировка возможна не только в синхрофазотронах, но и в ускорителях других типов. В настоящее время разрабатываются различные варианты таких ускорителей.

10. Из формул (9.2), (9.3) следует, что если в циклотроне магнитное поле постоянно во времени, но неоднородно в радиальном направлении, а именно растет с увеличением радиуса по закону

$$H(R) = \frac{H_0}{\sqrt{1 - (R/R_\infty)^2}}, \quad (9.5)$$

где $R_\infty = cT/2\pi$, то период T будет оставаться постоянным при любом радиусе. В этом случае возрастание периода за счет релятивистских эффектов компенсируется радиальным возрастанием магнитного поля. Ускорители такого типа называются *изохронными*

циклотронами. Изохронный циклотрон работает в непрерывном режиме. Очевидно, что сильной стороной изохронных циклотронов является возможность получения сильных (примерно таких же, как в циклотронах, т. е. 0,1—1 МА) токов при релятивистских энергиях ускоряемых тяжелых частиц.

Изохронные циклотроны имеют огромные магниты и поэтому довольно дороги. Особенностью изохронных циклотронов является то, что в них орбиты частиц неустойчивы в вертикальном направлении. Для создания вертикальной устойчивости приходится делать магнитное поле азимутально неоднородным, причем с довольно сложной конфигурацией. Но даже и в этом случае вертикальную устойчивость по расчетам удается обеспечить до энергии не выше 1 ГэВ, считающейся в настоящее время верхней границей для изохронных циклотронов. Большинство изохронных циклотронов проектируется и строится для протонов с энергиями 50—100 МэВ. Построены и действуют *мезонные фабрики* — изохронные циклотроны на 520—650 МэВ. Важнейшей проблемой при создании мезонных фабрик является вывод пучка и радиационная защита, так как мощность пучка составляет десятки и даже сотни кВт. Область применимости изохронных циклотронов — изучение редких процессов в реакциях с протонами от 50 до 1000 МэВ, а также изучение реакций на вторичных мезонных пучках (см. п. 14). Серьезными конкурентами изохронных циклотронов являются линейные ускорители тяжелых частиц. Так, в Лос-Аламосе (США) в 1972 г. создан линейный ускоритель с энергией 800 МэВ. В 1978 г. его интенсивность достигла 300 мкА.

11. В циклотроне нельзя ускорять электроны, поскольку они быстро достигают релятивистских скоростей. Тем не менее существуют ускорители, в которых электроны ускоряются импульсами электрического поля в постоянном однородном магнитном поле. Ускорители такого типа называются *микротронами* (иногда употребляется название электронный циклотрон). В микротроне частицы вводятся в ускорительную камеру не в центральной части магнитного поля, а на его краю. В месте вывода частиц помещается полый ускоряющий резонатор. В резонансе при каждом обороте электроны получают энергию 0,511 МэВ, точно равную энергии покоя электрона. Следовательно, в соответствии с (9.3) период T_n n -го оборота кратен периоду первого:

$$T_n = nT_1 = \frac{2\pi nmc}{eH \sqrt{1 - v^2/c^2}}. \quad (9.6)$$

Поэтому электроны попадают в резонатор в момент ускорения на каждом витке. Электроны движутся по окружностям увеличивающегося радиуса, причем все окружности касаются друг друга внутри резонатора (рис. 9.3). Микротроны могут работать как в непрерывном, так и в импульсном режимах. Предельно достижимая

микротронным методом энергия ускорения обычно оценивается в 50—100 МэВ. Дальнейшее повышение энергии в микротронах требует весьма жестких допусков на магнитное поле. Существующие микротроны имеют энергии от 4 до 30 МэВ. Интенсивность микротронов резко падает с ростом энергии. Так, микротрон на 13 МэВ дает ток в импульсе 100 мА, а микротрон на 30 МэВ — всего лишь 0,05 мА. Средний ток обычно на три порядка ниже импульсного значения.

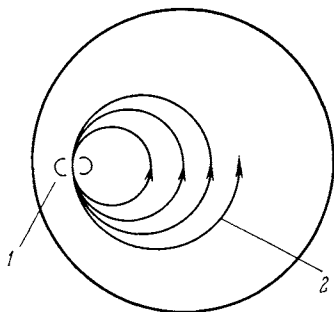


Рис 93 Схема микротрона.

1 — резонатор, 2 — траектория электрона

Достоинствами микротрона являются простота вывода пучка, высокая (уступающая только электростатическим ускорителям) моноэнергетичность пучка и довольно высокая интенсивность при низких энергиях. Поэтому микротрон является перспективным типом ускорителя электронов низких энергий.

12. Распространенным ускорителем электронов низких энергий является *бетатрон*. Бетатрон отличается от всех других ускорителей тем, что в нем необходимое для ускорения электрическое поле не подается извне, а создается быстрым изменением во времени магнитного поля, удерживающего частицы на круговой орбите. Действительно, если аксиально симметричное магнитное поле менять во времени, то в соответствии с уравнением Максвелла

$$\text{rot } \mathcal{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial H}{\partial t}$$

появится электрическое поле \mathcal{E} , силовыми линиями которого являются концентрические окружности. При этом оказывается, что для электронов благодаря их ультрарелятивистским свойствам радиальную зависимость магнитного поля $H(R)$ можно подобрать так, что радиус электронной орбиты будет постоянным во времени.

Бетатроны обычно применяются для ускорения электронов до энергий от нескольких до 50 МэВ. Одно время делались бетатроны и на более высокие энергии, вплоть до 240 МэВ. Однако при таких энергиях бетатронный метод ускорения невыгоден из-за большого (по сравнению с синхротронами) веса магнита, а также из-за того, что при энергиях от 100 МэВ и выше режим ускорения в бетатронах все сильнее и сильнее нарушается электромагнитным излучением электронов.

Интенсивность в бетатронах невелика. Средний ток обычно не превышает 10^{-2} мкА при 10^9 — 10^{10} частиц в импульсе. К недостат-

кам бетатронов относится и практическая невозможность вывода пучка. Поэтому бетатроны используются только как источники тормозных γ -квантов.

В настоящее время бетатроны в основном используются не в самой ядерной физике, а в прикладных исследованиях.

13. Для изучения процессов при ультрарелятивистских энергиях очень перспективны ускорители на встречных пучках. В этих ускорителях изучаются не столкновения пучка частиц с мишенью, а столкновения двух встречных пучков, имеющих одинаковую энергию.

Выгодность использования встречных пучков становится понятной, если учесть, что при столкновении двух частиц физически существенной является кинетическая энергия в системе центра инерции, в то время как энергия движения самого центра инерции ни к каким новым физическим явлениям не приводит, т. е. является бесполезной для изучения процесса столкновения (но не бесполезной вообще, см. следующий пункт).

В обычном ускорителе при ультрарелятивистских энергиях основная часть энергии пучка тратится именно на разгон центра инерции. А в ускорителе на встречных пучках, наоборот, вся энергия пучков является полезной. Действительно, из соотношений гл. VII, § 4 для столкновения двух частиц равных масс легко получить, что если обычный ускоритель с кинетической энергией E частиц пучка и ускоритель на встречных пучках с кинетической энергией E_0 в каждом из пучков дают одну и ту же энергию в системе центра инерции, то

$$E = \frac{2E_0^2}{m} + 4E_0. \quad (9.7)$$

Из (9.7) видно, что в нерелятивистской области ($E_0 \ll m$) энергия E растет линейно по E_0 , так что в этой области ускорители на встречных пучках не нужны. Но в ультрарелятивистской области ($E_0 \gg m$) энергия E пропорциональна уже E_0^2 , т. е. растет очень быстро. Например, для Серпуховского ускорителя $E = 76$ ГэВ. Отсюда, учитывая, что энергия покоя протона равна 0,94 ГэВ, получим, что соответствующее значение E_0 равно 5,5 ГэВ. Это значит, что ускоритель на встречных протонных пучках с энергиями по 5,5 ГэВ в отношении исследования протон-протонных столкновений был бы эквивалентен Серпуховскому. Еще более разительные цифры получаются для электронов и позитронов из-за их очень малых масс. Так, при столкновении двух электронов с энергиями по 1,5 ГэВ энергия в системе центра инерции такая же, как при столкновении электрона с энергией около 9000 ГэВ с покоящимся. Неудивительно поэтому, что ускорители на встречных пучках в первую очередь делаются для электронов и позитронов.

Важнейшей характеристикой ускорителя на встречных пучках является *светимость* L , определяемая соотношением

$$N = L\sigma, \quad (9.8)$$

где σ — сечение, а N — число интересующих нас событий в 1 с.

Очевидно, что одной из главных трудностей на пути создания ускорителей на встречных пучках является проблема обеспечения достаточной светимости, так как плотность частиц в пучке на много порядков ниже, чем в мишени. Для эффективного повышения светимости применяются *накопительные кольца*. Накопительное кольцо — это синхротрон, в котором поток частиц не ускоряется, а сравнительно долго (до нескольких часов) обращается с постоянной энергией.

Для физических исследований наиболее интересны встречные пучки частиц с противоположными зарядами всех сортов, т. е. $e^-—e^+$ и $p—\bar{p}$. Именно на $e^-—e^+$ -пучках был открыт и исследован спектр шармония (см. гл. VII, § 7). Большая информация о столкновениях адронов самых высоких достигнутых энергий была получена на встречных $p—p$ -пучках.

14. В физических работах на ускорителях широко используются не только первичные, но и *вторичные пучки*.

Так, для получения пучка γ -излучения высокой энергии электронный пучок направляют на тугоплавкую мишень, из которой вылетает мощный, но, к сожалению, сильнейшим образом размытый по энергии пучок γ -квантов. Большинство электронных ускорителей в настоящее время используется именно как источники γ -излучения, а не электронов. Получающиеся на электронных ускорителях пучки тормозного γ -излучения хорошо коллимированы и имеют интенсивность, достаточную для проведения исследования различных фотоядерных, фотомезонных и других фотореакций. Серьезным недостатком пучка тормозного излучения является неудачная форма его энергетического спектра. Спектр размазан по всей допустимой области энергий от энергии электронов E_{\max} до нуля. При этом наибольшая часть фотонов приходится на область низких энергий, так как везде, за исключением краев, кривая энергетического распределения фотонов ведет себя как E^{-1} (рис. 9.4). Эта размазанность тормозного спектра сильно осложняет экспериментальные исследования взаимодействий γ -квантов с ядрами и элементарными частицами.

При столкновении с мишенью пучка протонов высокой энергии происходит интенсивное рождение пионов, каонов, гиперонов и т. д. Заряженные вторичные частицы можно сфокусировать в пучки с интенсивностью, достаточной для физических исследований. В настоящее время имеются пионные, каонные, антипротонные пучки. На протонном ускорителе в ЦЕРНе с энергией 400 ГэВ получены

пучки Σ^{\pm} -частиц с энергией 150 ГэВ. Интересно отметить, что Σ -пучки могут существовать только вследствие релятивистского замедления времени, благодаря которому Σ -частицы пролетают расстояние, достаточное для того, чтобы их можно было собрать в пучок. В отсутствие релятивистского замедления времени пролетное расстояние Σ -гиперонов не превышает 2,5 см ($L \leq \tau \cdot c = 0,8 \cdot 10^{-10} \text{ с} \cdot 3 \cdot 10^{10} \text{ см/с} = 2,4 \text{ см}$). Из пионных пучков получают мюонные, нейтринные, антинейтринные и даже электронные третичные пучки (см. § 3, п. 6 этой главы).

Возможность получения широкого спектра высокоэнергетических вторичных пучков является существенным преимуществом ускорителя типа Серпуховского по сравнению с энергетически эквивалентным ему ускорителем на встречных пучках. Ускорители же на встречных пучках позволяют продвигаться в область очень высоких энергий, но из-за отсутствия высокоэнергетических вторичных пучков не могут обеспечить широкого фронта работ в области физики элементарных частиц.

Именно это обстоятельство мы имели в виду, когда отмечали в предыдущем пункте небесполезность затрат энергии на разгон центра масс.

15. В заключение перечислим основные действующие ускорители в различных странах мира:

а) Протонные ускорители.

E , ГэВ	Год ввода в строй	Страна, город
76	1967	СССР, Серпухов
500	1972	США, Батавия
400	1976	Швейцария, Женева

Протонные ускорители могут также использоваться для ускорения атомных ядер.

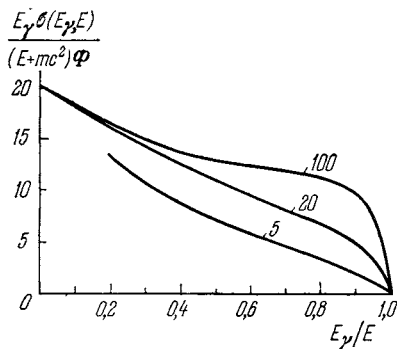


Рис. 9.4. Энергетический спектр тормозного излучения, испускаемого электроном с кинетической энергией E в поле атомного ядра.

$\sigma(E_\gamma, E)$ — эффективное сечение испускания тормозного γ -кванта с энергией E_γ электроном с кинетической энергией E . Нормировочный множитель $\Phi = \frac{1}{137} Z^2 \left(\frac{e^2}{mc^2}\right)^2 = 3,85 \cdot 10^{-24} \text{ см}^2$. Цифры над кривыми дают отношение E/mc^2 .

б) Протонные ускорители на встречных пучках.

Е, ГэВ	Год ввода в строй	Страна, город
30 · 2	1971	Швейцария, Женева

в) Электрон-позитронные ускорители на встречных пучках.

Е, ГэВ	Год ввода в строй	Страна, город
0,55 · 2	1966	СССР, Новосибирск
4,2 · 2	1972	США, Стэнфорд
4,5 · 2	1974	ФРГ, Гамбург
19 · 2	1978	ФРГ, Гамбург

Мощные ускорители представляют весьма дорогостоящее сооружение. Поэтому получает распространение строительство и эксплуатация ускорителей совместно многими странами.

§ 3. Источники нейтронов и других нейтральных частиц

1. Создание хороших (т. е. достаточно интенсивных и монохроматичных) источников нейтронов является сложной задачей, поскольку нейтроны нельзя ни ускорять, ни фокусировать электромагнитными полями. Поэтому точность измерений при работе с нейтронами при одинаковой трудоемкости существенно ниже, чем при работе с заряженными частицами.

Во всех источниках нейтроны образуются в результате ядерных реакций. Возникшие в результате реакции нейтроны либо используются непосредственно, либо предварительно замедляются. В используемых в ядерной физике источниках заряженных частиц и γ -квантов энергия частиц должна быть не ниже нескольких МэВ, а в большинстве случаев выше десяти МэВ, так как в противном случае ядерные реакции не идут из-за пороговых и барьерных эффектов. Напротив, нейтроны не подвержены действию кулоновского барьера и вступают в экзотермические реакции со всеми ядрами (кроме ${}^2\text{He}^3$ и ${}^2\text{He}^4$). Поэтому согласно закону « $1/v$ » (см. гл. IV, § 4, п. 3) взаимодействие нейтронов с ядрами крайне интенсивно при энергии нейтрона, близкой к нулю. Этим объясняется важность источников медленных (с энергией порядка $1/40$ эВ) нейтронов.

Нейтронный источник характеризуется интенсивностью (т. е. числом нейтронов, вылетающих за секунду) и энергетическим спектром. Для многих целей оказываются полезными импульсные источники, интенсивность которых характеризуется числом нейтронов