

Ускорители.

Ускорители — не так давно это слово мало кому что-нибудь говорило. А сегодня — начиная со старших классов школы — оно знакомо, наверное, всем. Целые разделы науки, целые отрасли промышленности не могли бы развиваться без ускорителей. На ускорителях получены почти все сведения об элементарных частицах и большая часть того, что мы знаем об атомных ядрах. Ускорители для улучшения свойств резины и полиэтилена, ускорители для стерилизации, ускорители для борьбы с вредителями зерна, ускорители для лечения злокачественных опухолей — всюду мы встречаемся теперь с ускорителями. Но самые крупные, самые замечательные, поражающие человеческое воображение ускорители строятся для научных целей. Еще недавно длина магнитной дорожки крупнейших ускорителей едва достигала нескольких сот метров — сегодня это уже десятки километров. Крупные ускорители потребляют больше электроэнергии, чем целые города. Гигантские ускорители, может быть, так же характерны для нашей эпохи, как пирамиды для древнего Египта..

Как ни велики, как ни дороги гигантские современные ускорители, каждые несколько лет то в одной, то в другой стране вступают в строй новые ускорители, еще более интересные, еще более замечательные, еще более крупные. Пуск каждого из них означает новые открытия, иногда очень глубокие и неожиданные.

Потребность в более мощных ускорителях сегодня оказывается даже более острой, чем когда-либо ранее. Благодаря ускорителям открыты кварки (кварками называются мельчайшие частицы материи, из которых состоят почти все известные «элементарные» частицы, в том числе — протоны, нейтроны, мезоны и гипероны). Опыты, проделанные на существующих ускорителях, позволили создать теорию, которая объединила электромагнитные явления и т.н. «слабое» взаимодействие, ответственное за бета-распад ядер, за распады пионов и мюонов и др. взаимодействия. Эта теория постулирует существование очень тяжелых частиц, для исследования которых энергии, достижимые на существующих ускорителях, недостаточны. Для этого нужны более крупные ускорители. БОЛЬШИЕ НАДЕЖДЫ СВЯЗАНЫ С ПУСКОМ ПРОТОННОГО КОЛЛАЙДЕРА. Опыты на крупных ускорителях непрерывно выясняют новые, фундаментальные результаты, предсказать которые невозможно.

Единицы и масштабы

Прежде всего, вспомним некоторые сведения об основных величинах и об основных единицах, которыми придется пользоваться при характеристике ускоренных частиц. Энергию частиц в атомной и в ядерной физике принято измерять в электронвольтах (эВ). Как известно, эВ — это энергия, которую приобретает частица, имеющая заряд, равный заряду электрона, пройдя разность потенциалов 1 вольт. Заряд электрона равен $1,6 \cdot 10^{-19}$ кулона, поэтому

$$1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ джоуля.} \quad (1)$$

Эта величина для макроскопических масштабов очень мала. Даже пылинка массой 0,01 миллиграмма при скорости всего 10 см/с обладает кинетической энергией

$$T = 1/2 mv^2 = 1/2 \cdot 10^{-8} \cdot 10^{-2} = 5 \cdot 10^{-11} \text{ джоуля,}$$

т. е. энергией около 300 миллионов эВ.

Для описания атомных явлений эВ очень удобны. Энергия связи наружных электронов у почти всех атомов составляет несколько эВ. Эта энергия — в пересчете на молекулу — характерна для большинства химических реакций, например, для горения. Фотоны видимого света несут энергию около 2 эВ. Энергия 1 эВ, кажется нам такой маленькой, потому что мы привыкли иметь дело с телами, содержащими огромное число атомов. Вспомним, что в одном моле вещества находится фантастическое количество — $6 \cdot 10^{23}$ молекул. Макроскопические энергии так велики по сравнению с эВ только потому, что они характерны для очень больших — с атомной точки зрения — тел.

При ядерных реакциях мы имеем дело с существенно большими энергиями. Энергия связи протонов и нейтронов в ядре составляет несколько миллионов эВ. (МэВ).

Массу элементарных частиц также принято выражать в эВ. При этом, говоря о массе частиц, физики на самом деле имеют обычно в виду их энергию покоя, т.е. величину mc^2 , где c — скорость света. Эта величина имеет размерность энергии и поэтому может быть выражена в эВ. Для электрона $mc^2 = 0,51$ МэВ, для л-мезонов — 140 МэВ, и для протона 938 МэВ.

Импульс частиц также принято измерять в эВ. При этом вместо импульса p рассматривают величину pc , имеющую размерность энергии.

При желании массу частиц можно выразить в килограммах. Для этого энергию покоя, выраженную в эВ, нужно с помощью (1) перевести в джоули и разделить на c^2 . Аналогичную операцию можно произвести и с импульсом. Ни того, ни другого, однако, никогда — или почти никогда — не приходится делать.

Естественной единицей длины в атомной физике является размер атомов: 1 ангстрем = 10^{-10} м (вспомним тот замечательный факт, что размеры всех атомов — от самых легких до самых тяжелых — почти одинаковы!), а в ядерной физике — размеры легких ядер: 1 ферми = 10^{-15} м.

В атомной и ядерной физике время принято измерять в секундах, хотя эта величина совершенно не приспособлена для микромира. Из-за этого могут возникать недоразумения. Известно, например, что характерное время для испускания света атомами составляет по порядку величины 10^{-8} с. Эта величина, на первый взгляд, очень мала, и хочется задать вопрос, почему свет испускается столь быстро. На самом деле, для атомов этот промежуток времени отнюдь не мал. Ожидаемую величину характерного времени для атомных процессов можно получить, деля размер атомов (10^{-10} м) на скорость света ($3 \cdot 10^8$ м/с). Характерное время для атомных процессов составляет, таким образом, около 10^{-18} с, а не 10^{-8} . Следует поэтому спрашивать, почему свет испускается столь медленно, а не столь быстро. После того как вопрос правильно поставлен, на него нетрудно ответить. Объяснение заключается в том, что электромагнитные силы очень слабы по сравнению с «нормальными» ядерными силами. Другая причина связана с тем, что атом является слишком короткой антенной для испускания световых электромагнитных волн. «Нормальная» антенна должна иметь длину, по порядку величины равную длине волны электромагнитных колебаний. Так делают антенны радиостанций, где вопрос об эффективности стоит очень остро. А размер атома в ~ 5000 раз меньше длины волны света; поэтому атомы испускают свет очень неэффективно, атом долго живет в возбужденном состоянии, прежде чем ему «удастся» отдать лишнюю энергию световому кванту.

Выбор энергии ускорителей

Попытаемся рассмотреть вопрос о том, какова должна быть энергия, ускорителей. Ответ на этот вопрос, конечно, зависит от цели, для которой ускоритель строится. Если речь идет об ускорителях для технических целей, то выбор энергии чаще всего зависит от технологических соображений. Рассмотрим, например, ускорители, предназначенные для обеззараживания зерна или для стерилизации медицинского оборудования. В обоих случаях ускоренные частицы (в нашем случае — электроны) нужны для того, чтобы вызвать в белковых молекулах химические изменения. Как уже говорилось ранее для этого достаточно энергии в несколько эВ. На практике, однако, для этих целей применяются ускорители на энергии несколько миллионов или даже десятков миллионов эВ. Такая энергия нужна не для самого воздействия на вещество, а для того, чтобы доставить электроны «к полю битвы». Измеренный в сантиметрах пробег электронов в воде, грубо говоря, вдвое меньше, чем их энергия, выраженная в МэВ. Чтобы пройти через сантиметровый водный слой, электроны должны иметь энергию, по меньшей мере, 2 МэВ. (Пробеги электронов в других веществах в первом приближении могут быть пересчитаны из их пробега в воде путем деления на плотность этих веществ.) Таким образом, энергия ускорителей в нашем случае определяется толщиной слоя, подвергаемого обработке, т. е. технологическими соображениями.

Перейдем к ускорителям, предназначенным для исследования свойств атомных ядер. И в этом случае энергия, которую должны иметь ускоряемые частицы, прежде всего определяется «условиями доставки». Заметим, что для исследования атомных ядер электроны применяются

не очень часто из-за того, что на них не действуют ядерные силы. Взаимодействие ядер и электронов определяется электромагнитными силами и поэтому оказывается сравнительно слабым. Ядерные реакции осуществляются намного эффективнее, если применять для бомбардировки атомных ядер протоны, нейтроны и ядра легких атомов. Нейтроны не обладают электрическим зарядом, и мы их ускорять не умеем. Протоны и ядра заряжены положительно. Они отталкиваются друг от друга. Энергия частицы-снаряда должна быть достаточной для того, чтобы преодолеть это отталкивание. В противном случае электростатические силы разводят «снаряд» и «мишень» еще до того, как сможет произойти ядерная реакция между ними.

Оценим энергию, которую должен иметь протон — или другая частица-снаряд, — чтобы проникнуть в ядро элемента, лежащего в средней части таблицы Менделеева, например изотопа олова ${}_{50}\text{Sn}^{118}$ (число Z , написанное при химическом символе слева внизу, обозначает порядковый номер элемента или, что то же, заряд ядра, а верхнее число A указывает атомный вес изотопа, или, как принято говорить, — нуклида). Энергия, которую должна иметь бомбардирующая частица, чтобы попасть в исследуемое ядро, не может быть меньше, чем энергия их электростатического отталкивания, т. е. чем

$$U_{\text{мин}} = \frac{Q_1 Q_2}{4 \pi \epsilon_0 R} = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{4 \pi \epsilon_0 R} \quad (2)$$

где Q_1 и Q_2 — заряды ускоренной частицы и исследуемого ядра, Z_1 и Z_2 — те же заряды, выраженные через заряд электрона e , R — радиус ядра (при столкновении двух ядер — сумма их радиусов), ϵ_0 — электрическая постоянная.

Радиус ядра можно оценить по формуле

$R = 1,2 \cdot 10^{-15} A^{1/3}$ м. Для радиуса ядра олова найдем

$R_{\text{Sn}} = 1,2 \cdot 10^{-15} (118)^{1/3} = 5,89 \cdot 10^{-15}$ м. Подставим в (2) значения:

$e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, $\epsilon_0 = 8,8 \cdot 10^{-12}$ Ф/м, $Z_2 = 50$, $A = 118$, найдем

$$U_{\text{мин}} = \frac{Z_1 50 (1,6 \cdot 10^{-19})^2}{4 \pi 8,8 \cdot 10^{-12} 5,89 \cdot 10^{-15}} = 1,96 \cdot 10^{-12} Z_1 \text{ Дж} = 12,2 Z_1 \text{ МэВ}$$

Мы видим, таким образом, что для исследования ядер нужны протоны с энергией, измеряемой мегаэлектронвольтами. Если в качестве снарядов используются частицы с $Z_1 > 1$, необходимые энергии оказываются еще выше.

Приведенная оценка страдает двумя недостатками. Прежде всего, заметим, что мы пока определили только минимальную энергию, ниже которой никакие ядерные взаимодействия не могут происходить из-за того, что частицы попросту не доходят до бомбардируемых ядер. Исследование свойств атомных ядер требует, кроме того, некоторой дополнительной энергии, иногда довольно значительной. Так, при исследовании возбужденных состояний атомных ядер проникшая в ядро частица должна сохранить энергию, достаточную для такого возбуждения. Соответствующие энергии лежат, обычно, в диапазоне от ста кило- до нескольких МэВ. При еще большей энергии (порядка 8 мегаэлектронвольт) становится возможным выбивание нейтронов из ядер, что приводит к появлению новых ядерных реакций. Эта энергия должна быть добавлена к энергии электростатического отталкивания. Эффективное исследование ядерных реакций требует поэтому ускорителей на энергии десятки МэВ. Из сказанного не следует, конечно,

что для ядерной физики не представляют интереса еще большие энергии. При более высоких энергиях начинают происходить сложные реакции с выбиванием нескольких нейтронов и протонов и с полным расщеплением ядра-мишени. Такие реакции очень важны как с научной, так и с практической точки зрения.

Второй недостаток оценки (2) заключается в следующем. Система «ускоренная частица — ядро» в лабораторной (связанной с лабораторией) системе координат движется. С этим движением связана часть энергии частицы-снаряда, так что (2) должно быть равно не всей энергии частицы, а оставшейся ее части. Поясним сказанное. Рассмотрим столкновение двух автомобилей, один из которых движется со скоростью 60, а другой — со скоростью 65 км в час. Если автомобили движутся навстречу друг другу, то удар будет очень сильным и автомобили будут разбиты. Если же автомобили перед столкновением двигались в одном направлении, то удар будет незначительным, хотя суммарная кинетическая энергия автомобилей в обоих случаях одинакова. Дело заключается в том, что в первом случае центр масс двух автомобилей почти не двигался, и их кинетическая энергия была почти целиком связана с *взаимным* движением автомобилей, которое только и существенно для удара. Во втором же случае взаимное движение автомобилей незначительно. Почти вся кинетическая энергия их движения связана с движением центра масс автомобилей в системе координат, связанной с Землей. Эта энергия может при известных условиях стать существенной (например, если автомобили налетят на придорожный камень), но при столкновении автомобилей друг с другом роли не играет. **Для определения силы — и результата — соударения существенно, какую энергию имеют частицы в той системе координат, в которой их общий центр масс покоится.**

Рассчитаем эту энергию для случая, когда частица с массой m_1 соударяется с частицей, имеющей массу m_2 . Пусть вторая частица неподвижна, а первая движется со скоростью V_1 . Расчет проведем в нерелятивистском приближении (более точный расчет рассмотрим). Скорость движения общего центра масс двух частиц равна

$$V_{ц.м} = \frac{m_1 V_1}{m_1 + m_2}$$

В системе, связанной с центром масс, первая частица имеет скорость $V_I - V_{ц.м}$, а вторая — скорость — $V_{ц.м}$. Суммарная кинетическая энергия в этой системе координат равна

$$T_{соуд} = \frac{m_1}{2} (V_I - V_{ц.м})^2 + \frac{m_2}{2} (V_{ц.м})^2$$

Подставляя в эту формулу значение $V_{ц.м}$, после простых преобразований найдем

$$T_{соуд} = \frac{m_1 V_I^2}{2} \frac{m_2}{m_1 + m_2} \quad (\text{нерелятивистский случай}) \quad (3)$$

Формула (3) показывает, что энергия соударения всегда меньше энергии налетающей частицы: их отношение равно $m_2/(m_1+m_2)$. При легкой частице и тяжелой «мишени», ($m_1 \ll m_2$) это отношение близко к 1, при равных массах, оно равно 1/2, а при тяжелом «снаряде» и легкой «мишени» оно много меньше единицы. В релятивистской физике дело обстоит еще хуже, чем в нерелятивистской. При скоростях, близких к скорости света, масса частицы становится намного больше массы покоя и «снаряд» становится массивнее, в то время как неподвижная мишень не меняет своей массы.

Приведенные соображения существенны для уточнения величины энергии, необходимой для того или другого ядерного исследования, но обычно не меняют порядка величины: для изучения ядерных реакций нужны ускорители, способные разгонять

частицы до энергии несколько десятков МэВ или хотя бы до нескольких МэВ.

Перейдем к ускорителям, которые предназначены для рождения или, как принято говорить, для генерации элементарных частиц. Подавляющее большинство частиц, которые в настоящее время известны, в земных условиях не встречаются (или встречаются крайне редко) и генерируются на ускорителях. В состав тел, образующих Землю вместе с окружающей ее атмосферой, входят только протоны, нейтроны и электроны. Солнце посылает на Землю большие потоки нейтрино, которые, однако, слабо взаимодействуют с другими частицами и с трудом наблюдаются. Космические лучи генерируют в атмосфере Земли все элементарные частицы, но изучать эти частицы очень трудно, поскольку их количество невелико, а время и место рождения нельзя заранее предугадать. Поэтому в физике элементарных частиц ускорители являются «основным поставщиком» экспериментального материала. Энергия, которая должна быть затрачена для создания частицы с массой m , определяется формулой Эйнштейна

$$E=mc^2 \quad (4)$$

Как уже говорилось, величина mc^2 равна 0,51 МэВ для электрона, 140 МэВ для я-мезонов, 938 МэВ для протона и еще больше для гиперонов и для ряда новых частиц, открытых в последнее время. Теория предсказывает существование частиц с массой около 100 ГэВ (1 ГэВ == 10⁹ эВ), а возможно, и более тяжелых.

При определении энергии, которую должны иметь ускорители, предназначенные для генерации частиц, следует иметь в виду приведенные выше соображения о различии между энергией соударения — энергией в системе Центра масс сталкивающихся частиц — и энергией частицы, налетающей на неподвижную мишень.

Величина энергии, необходимой для рождения новых частиц, может оказаться еще больше, чем этого требует формула (4), вследствие законов сохранения. Такой случай имеет место при генерации антипротонов: законы сохранения не позволяют генерировать антипротон, если вместе с ним не будет рожден также и протон (или нейтрон). Суммарная масса рождающихся частиц должна быть при этом вдвое больше массы протона.

При энергии, равной mc^2 рождение новых частиц m чинает становиться возможным, Это не значит, однако, что такие энергии достаточны: при указанной энерп вероятность генерации начинает отличаться от нуля, но оказывается очень малой, а затем быстро возрастает. Это приводит к необходимости дополнительно увеличивать энергию ускорителей.

Самые крупные из работающих в настоящее время ускорителей электронов позволяют достичь энергии несколько десятков ГэВ, а самые крупные из ускорителей протонов - сотни ГэВ. В процессе проектирования и строительства находятся еще более крупные установки.

Некоторые сведения о частицах, используемых для ускорения

Начнем с обсуждения некоторых свойств электронов и протонов — частиц, которые чаще всего используются: для ускорения. Проще всего иметь дело с электронами; Источниками электронов обычно служат накаливаемые током катоды, покрытые слоем окислов, уменьшающих работу выхода электронов. Если нужны большие токи, электроны можно отсасывать из плазмы газового разряда. Не представляет труда получать токи в сотни и даже сотни тысяч ампер, поскольку эмиссионная способность катодов и плазмы очень велика.

Даже в незначительных полях электроны приобретают очень большие скорости. Уже при энергии 100 электронвольт скорость электронов равна 0,02 от скорости света, а при энергии 15 килоэлектронвольт (такую энергию имеют электроны в электроннолучевых трубках телевизоров она достигает 1/4 от скорости света. При энергии 3 мегавольта скорость электронов отличается от скорости света, меньше, чем на 1,5%, и при дальнейшем ускорении почти не меняется.

Проходя через вещество, электроны активно взаимодействуют с электронными оболочками и с ядрами встречных атомов. Взаимодействие с электронами ведет к ионизации атомов и, следовательно, к замедлению электронного пучка. Другим важным механизмом, приводящим к потере энергии, является излучение. Электроны излучают электромагнитную энергию в результате резкого торможения, которое они испытывают, приближаясь к атомным ядрам. В результате такого излучения генерируются рентгеновы лучи в рентгеновых трубках. Электроны излучают также, двигаясь в магнитном поле. Это излучение при высоких энергиях электронов (гигаэлектрон-вольты) и при малых радиусах траектории в магнитном поле становится столь сильным, что превращается в настоящее бедствие.

Родные братья электронов — позитроны — на Земле в свободном виде не встречаются. Они имеют ту же массу, что электроны, равный, но противоположный по знаку, электрический заряд. Встречаясь с электронами, позитроны аннигилируют. При этом электрон и позитрон исчезают, а их энергия — включая энергию покоя $2mc^2$ — передается гамма-квантам, рождающимся в процессе аннигиляции. Позитроны часто используют в ускорителях, но прежде чем ускорять, их надо получить.

Большое число ускорителей построено для ускорения протонов. Протоны положительно заряжены и, грубо говоря, в 2000 раз тяжелее электронов. Проходя через вещество, они теряют энергию на ионизацию атомов и рассеиваются при столкновении с ядрами. Однако вследствие своей большой массы протоны почти не излучают электромагнитных волн. Это объясняется тем, что для излучения существенно ускорение (точнее говоря, квадрат ускорения), которое испытывает заряженная частица. При тех же силах ускорение протонов в тысячи раз, а излучение — в миллионы раз слабее, чем у электронов.

В отличие от электронов и позитронов протоны подвержены действиям ядерных сил. Поэтому протоны являются «эффективными снарядами» для бомбардировки атомных ядер. В процессе соударения протонов с ядрами — при достаточной энергии соударения — с большой вероятностью рождаются мезоны и гипероны — многочисленные нестабильные частицы, исследование которых составляет одну из важнейших задач физики элементарных частиц. Из сказанного не следует, что мезоны и гипероны не рождаются при столкновении электронов или электронов с позитронами. Это не так. Но в поле ядерных сил такое рождение происходит с существенно большей вероятностью, чем при «электромагнитном ударе» между электронами.

В качестве снарядов, ускоряемых современными ускорителями (кроме электронов и позитронов), могут использоваться не только ядра водорода — протоны — но и ядра других атомов, вплоть до самых тяжелых. В самое последнее время начали ускорять антипротоны — частицы, которые аннигилируют при встрече с протонами подобно тому, как аннигилируют позитроны с электронами.

Никакие другие частицы для ускорения не используются. Нейтральные частицы — нейтроны и нейтрино — не пригодны для ускорения вследствие своей нейтральности. Кроме перечисленных, все остальные заряженные частицы нестабильны. За время, которое необходимо для ускорения, они успевают распасться. Дольше других живут мюоны, время распада которых составляет $2 \cdot 10^{-6}$ с. Остальные частицы живут в сотни или во многие тысячи раз меньше.

Современная физика знает уже несколько сот элементарных частиц. Как уже ясно, только некоторые из них (они были перечислены выше) пригодны для ускорения. Для генерации нестабильных элементарных частиц современная наука знает только один метод — столкновении быстро летящих частиц с неподвижными или с летящими навстречу частицами. Для разгона частиц нужны ускорители. Еще 50—60 лет назад важнейшим источником быстрых частиц были космические лучи, ускоренные в гигантских природных ускорителях — во взрывающихся звездах и в электромагнитных полях, наполняющих космическое пространство. В настоящее время основным источником таких

частиц являются ускорители.

Рассмотрим специфику работы важнейших типов ускорителей.

УСКОРИТЕЛИ ПРЯМОГО ДЕЙСТВИЯ

Ускорительные трубки. Ускорители, использующие постоянное — или почти постоянное — электрическое поле, называются ускорителями прямого действия. Энергия, которую в таких ускорителях приобретают частицы, равна их заряду, умноженному на пройденную разность потенциалов. Постоянные: электрические поля используются для ускорения электронов в очень многих приборах, в том числе в кинескопах телевизионных приемников и в рентгеновых трубках. В этих простых приборах ускорение электронов производится с той же целью, что и в более крупных установках: для генерации новых частиц. В кинескопах генерируются фотоны видимого света, а в рентгеновых трубках — фотоны с энергиями, лежащими в киловольтном диапазоне. Кинескопы и рентгеновые трубки являются поэтому ускорителями прямого действия в самом буквальном смысле этого слова, хотя их так никогда и не называют.

Для получения больших энергий ускорители прямого действия не применяют, так как этому мешают электрические пробой. Удержать без пробоя напряжение в несколько сот киловольт уже непросто, при напряжениях около миллиона вольт — очень трудно, а при 10-15 мега-вольтах — почти невозможно. Чтобы продвинуться дальше, нужно применять специальные хитрости, ускоряя частицы до высоких энергий с помощью небольших разностей потенциалов. О таких ускорителях речь пойдет впереди.

Рассмотрим движение частиц в ускорителе прямого действия.

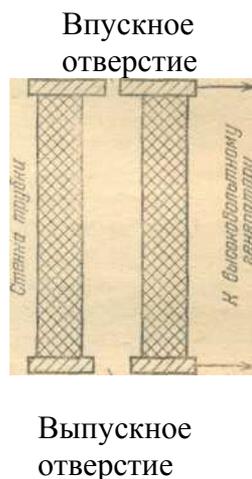


Рис. 1. Упрощенная схема устройства ускорительной трубки

На рис. 1 изображено устройство примитивной ускорительной трубки. Ускорение частиц происходит в откачанном пространстве внутри ускорительной трубки, сделанной из хорошего диэлектрика, например, из фарфора. Сверху и снизу трубка закрыта металлическими крышками, между которыми создается большая разность потенциалов. Частицы вводятся в трубку и выводятся из нее через специальные отверстия. Выпускное отверстие чаще всего закрывают тонкой металлической фольгой, через которую могут проходить ускоренные частицы. Источник частиц (он на рисунке не показан) нельзя отделять от трубки, так как медленные частицы, выходящие из источника, ни через какую фольгу пройти не могут. Крышка, через которую выводятся частицы, должна быть заземлена. Только в этом случае выпущенные через нее в лабораторию частицы не меняют своей энергии, проходя через заземленные экспериментальные установки. Источник частиц находится, следовательно, под высоким напряжением.

Трубки, устроенные так, как это изображено на рис. 1, в ускорителях на большие

энергии применения не находят, и притом сразу по двум причинам.

Первая причина заключается в том, что такие трубки плохо держат высокое напряжение. Как нетрудно понять, электрические пробой зависят не от разности потенциалов между электродами, а от напряженности электрического поля. Если хоть в одном месте напряженность поля окажется слишком большой, пробой неминуемо наступит. При заданной разности потенциалов между электродами всякое понижение поля в одном месте сопровождается его повышением в другом. Большие напряжения могут поэтому выдержать лишь такие трубки, в которых электрическое поле хорошо выровнено по всей длине. Такая равномерность сама собой не возникает. Неодинаковые утечки по поверхности и по толще трубки приводят к неравномерности поля. Частицы пучка и ионы, образованные при прохождении пучка через остающийся в трубке газ, осаждаются на стенках трубки и усугубляют неравномерность поля. В этом состоит первая причина того, что простые двухэлектродные трубки для больших разностей потенциалов непригодны.

Есть еще и вторая причина. Как уже отмечалось, частицы пучка и ионы, образовавшиеся в газе, частично оседают на стенках трубки, изготовленной из изолятора. Эти заряды вызывают появление не только продольных, но и поперечных полей. Продольные поля способствуют пробую, а поперечные отклоняют пучок от оси трубки. Пучок начинает двигаться по непредсказуемой траектории и может вообще не пройти через выходное отверстие

С этим явлением бороться очень непросто. Конструкция, соединяющая анод и катод системы, конечно, должна быть сделана из хорошего изолятора. А чем лучше изолятор, тем большей величины достигают неконтролируемые электрические поля.

Конструкция реальной ускоряющей трубки изображена на рис. 2.

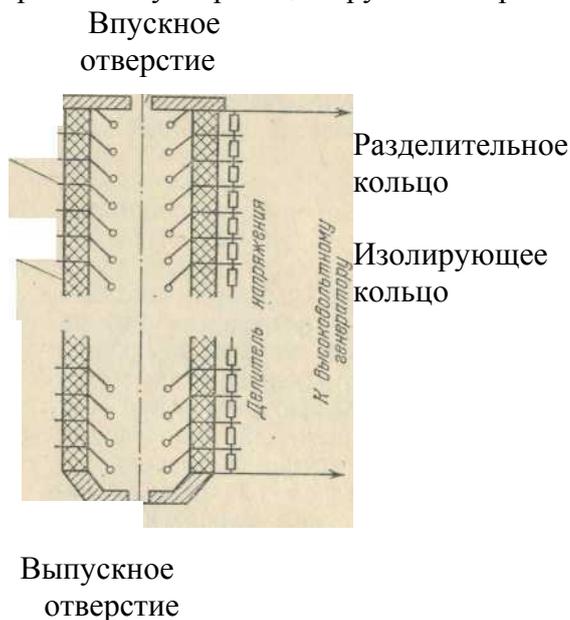


Рис. 2. Реальная схема устройства ускоряющей трубки (разрез).

Трубка делается из непроводящих колец, разделенных металлическими электродами. Напряжение источника подается на высокоомный делитель. Электроды последовательно присоединяются к различным ступеням этого делителя. В такой конструкции распределение потенциала по трубке задается принудительно, и сколько-нибудь серьезная неравномерность поля оказывается невозможной.

Разделительные электроды имеют сложную форму. Их, обращенная во внутрь часть, экранирует пучок от трубки. Из точек, лежащих на пути пучка, изоляторов совсем — или почти совсем — не видно. Заряды, возникающие на поверхности трубки, при этом

не создают заметных электрических полей в области, где проходит ускоряемый пучок.