

БЕТАТРОН¹⁾

Д. У. Керст

В ядерной физике для осуществления экспериментов по искусственному разложению атомов используется несколько типов установок, различающихся по способу, которым бомбардирующим частицам сообщаются необходимые большие кинетические энергии. За исключением разрушения ядер частицами, испускаемыми естественными радиоактивными препаратами, установки для создания быстрых частиц представляют собой или линейные ускорители, или циклотроны. В линейном ускорителе ускоряемую частицу заставляют двигаться от электрода к электроду вдоль оси длинной вакуумной трубки. Электроды такой трубки представляют собой обычно полые цилиндры, падающие при потенциалах, возрастающих от одного конца трубки к другому. Высокие напряжения подаются либо от больших высоковольтных выпрямителей, либо от электростатических генераторов Ван-де-Граафа, действие которых основано на зарядении хорошо изолированного электрода зарядами, стекающими на него с бесконечного ремня из изолирующего материала. Один из полюсов линейного ускорителя соединяется с этим высоковольтным электродом, тогда как второй полюс поддерживается обычно при потенциале земли. Установки этого типа в настоящее время уже настолько усовершенствованы, что они могут создавать разности потенциалов примерно в $4,5 \cdot 10^6 \text{V}$ при размерах генератора не более 1,65 см в диаметре и 6,6 м длины, при условии, что генератор находится в атмосфере сжатого воздуха под давлением около 8 атм. (сжатый воздух обеспечивает хорошую изоляцию высоковольтного электрода).

Линейный ускоритель, питаемый электростатическими генераторами, в некоторой мере был использован для изучения ядерных реакций, производимых электронами и рентгеновыми лучами с энергиями до $3 \cdot 10^6 \text{eV}$, т. е. около $5 \cdot 10^{-6}$ эрг, но в основном он был использован для работы с положительными ионами. Несмотря на то, что существует большое количество ядерных реакций, возникающих под действием рентгеновых лучей («фоторазложение»), их осуществление требует энергии квантов от $6 \cdot 10^6$ до $8 \cdot 10^6$ eV. Таким образом, для этих реакций необходимо иметь энергии электронов большие, чем осуществимые с электростатическим генератором.

В установках типа циклотрона положительные ионы движутся не по прямолинейным путям. Они отклоняются магнитным полем и описывают

¹⁾ Amer. Journ. of Physics, **10**, 219, 1942, перевод Н. С. Хлебникова.

спиральные траектории, ускоряясь между двумя полыми полукруговыми электродами, на которые подаётся высокочастотное переменное напряжение. Окончательное значение кинетической энергии, приобретаемое в результате этого процесса, может быть определено как произведение числа элементарных зарядов положительного иона, числа переходов от электрода к электроду и разности потенциалов между ускоряющими электродами. С помощью таких установок удавалось ускорить дейтроны до энергий в $16,5 \cdot 10^6$ eV. Эти величины значительно выше максимального потенциала, до которого можно зарядить изолированный электрод электростатического генератора.

Однако, большие ускорения, получаемые с циклотроном, являются неосуществимыми при работе с электронами вместо положительных ионов. Причина этого заключается в том, что электроны уже при сравнительно весьма малых значениях кинетической энергии обнаруживают релятивистское поведение. Всякая частица начинает вести себя релятивистски, когда её кинетическая энергия приближается или превосходит значение, соответствующее её массе. Так, например, масса покоя протона эквивалентна примерно 10^9 eV; поэтому протон с таким значением кинетической энергии будет вести себя как релятивистская частица. С другой стороны, электрон с массой покоя, эквивалентной всего лишь $5 \cdot 10^5$ eV, начинает проявлять релятивистское поведение уже при этих низких значениях энергии, так как уже при этом он кажется движущимся со скоростью, равной около 0,9 верхнего предела скорости — скорости света.

Одним из условий работы циклотрона является то, что скорость ускоримой частицы возрастает пропорционально квадратному корню из числа переходов между ускоряющими электродами, а выполнение этого условия для электрона, скорость которого приближается к верхнему пределу, оказывается невозможным. Результатом этого явилось то, что с помощью циклотрона оказались возможным ускорять электроны лишь до значений энергий, существенно меньших полумиллиона электрон-вольт.

К счастью, в настоящее время мы располагаем другим прибором — бетатроном, действие которого не зависит от того, как ведёт себя ускоримая частица — релятивистски или классически. Энергия, которую бетатрон последней конструкции может сообщить электронам, составляет до $20 \cdot 10^6$ eV. Столь высокие значения энергии дают возможность получать и соответствующие значения энергии рентгеновских квантов, так что становится возможным осуществление ядерных реакций, требующих энергий в $6 \cdot 10^6$ — $6 \cdot 10^8$ eV.

Вообще говоря, при фотодезинтеграции явление заключается в том, что рентгеновский квант, или γ -фотон, с энергией, большей энергии связи нейтрона в ядре разрушаемого атома, реагирует с этим ядром, выбрасывая нейтрон наподобие того, как световой квант вырывает электрон из атома светочувствительного вещества катода обычного фотоэлемента с внешним фотоэффектом. Получающееся в результате этой реакции новое атомное ядро часто оказывается радиоактивным. В этом случае легко определить величину энергии связи нейтрона в исходном ядре по величине энергии, которую бетатрон должен сообщить бомбардирующим электронам для того, чтобы началось образование радиоак-

тивного вещества. Быстрые электроны могут быть использованы для выбивания нейтрона и непосредственно, так как ядро реагирует на прохождение быстрого электрона с сопровождающим его электрическим полем в общем так же, как и на прохождение фотона с большой энергией.

Поскольку бетатрон представляет собой источник весьма проникающих рентгеновых лучей и электронов столь большой энергии, что они могут, например, проникать в человеческое тело примерно на половину его толщи, применения бетатрона оказываются интересными не только с точки зрения экспериментов из области ядерной физики, но имеют и непосредственное практическое значение. Рентгеновы лучи широко применяются в промышленных и терапевтических целях, а излучение, создаваемое бетатроном, более проникающе, чем получавшееся любыми другими способами.

Электроны с большими энергиями, испускаемые бетатроном в результате рассеяния от мишени, где возникают рентгеновы лучи, образуют весьма интенсивный, но слабо направленный пучок. Эти электроны, будучи направлены в человеческое тело, производят на своём пути в нём ионизацию, имеющую то же разрушительное действие, что и рентгеновы лучи, используемые в настоящее время в терапии глубинных опухолей. Одним из недостатков рентгеновых лучей является то, что они не целиком поглощаются внутри. Они проходят насквозь и производят потому своё действие всюду: в месте проникновения самой опухоли и в месте выхода. Для устранения этого различными приёмами пытаются создавать оптимальную ионизацию в области глубоко расположенной злокачественной опухоли.

Пучок электронов с высокой проникающей способностью свободен от этих недостатков, так как глубина его проникновений определяется энергией частиц. Электроны с энергиями в $2 \cdot 10^7$ eV проникают в человеческое тело на 10 см и не глубже. Доктор Ф. Моррисон определил, что при этих условиях они производят максимальную ионизацию на расстоянии от 7 до 8 см от поверхности. Это означает, что по всей вероятности разрушения, производимые электронами, могут быть локализованы именно в самой опухоли, повреждения в месте вхождения пучка будут невелики и будут полностью отсутствовать за облучаемой опухолью. Когда будет найден другой способ выпускать электронный поток из бетатрона (вместо рассеяния от мишени), этот поток будет более однороден по энергиям и менее сильно расходящимся. Это сделает бетатрон более применимым для медицинских целей.

Действие бетатрона

В некоторых отношениях, поскольку бетатрон является магнитным прибором, он напоминает небольшой циклотрон. Существенное его отличие от циклотрона состоит в том, что для работы его необходимо создание не постоянного, но переменного магнитного поля. Теория бетатрона показывает, что заметные релятивистские эффекты, обнаруживающиеся, когда скорость электронов приближается к скорости света, никак не сказываются на его работе.

Электроны из электронной пушки, называемой инжектором, направляются по круговой траектории магнитным полем небольшой напряжённости. Во время кругового движения этих электронов между полюсами магнита магнитное поле увеличивается и изменение величины магнитного потока, пронизывающего орбиту, даёт приращение энергии за один полный оборот. Этот выигрыш энергии, выраженный в вольтах, равен,

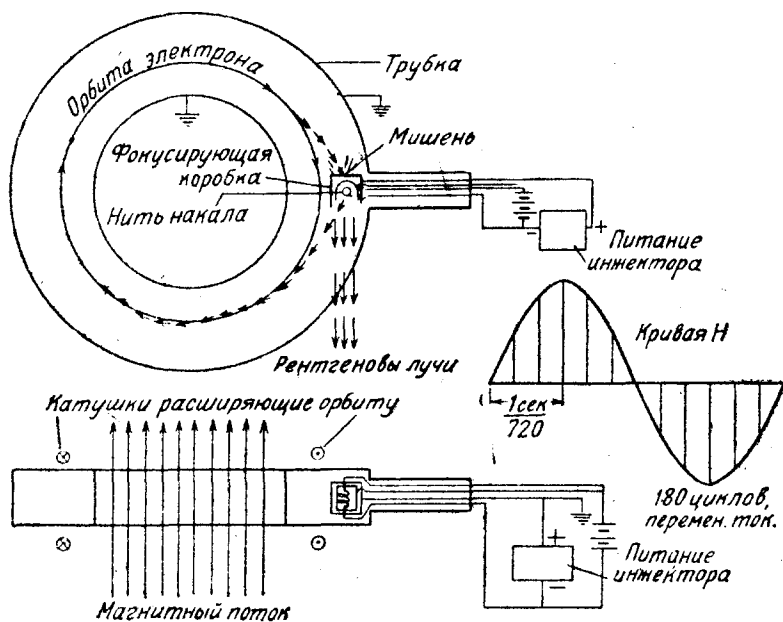


Рис. 1. Вакуумная камера, в которой происходит ускорение электронов. Электроны, поступающие из инжектора на равновесную орбиту, в действительности, прежде чем попасть на неё, совершают внутри камеры много оборотов. То же справедливо в отношении электронов, покидающих орбиту и попадающих на мишень. Электроны покидают инжектор в момент *A*, а орбита расширяется в момент *B* каждого цикла

очевидно, тому мгновенному значению разности потенциалов, которое измерил бы вольтметр, соединённый с одним витком проволоки, расположенной по орбите электрона.

На рис. 1 изображена схема круговой вакуумной камеры, в которой электроны описывают ряд круговых траекторий, накапливая энергию при каждом обороте и ударяясь в конце концов о мишень, расположенную позади инжектора, давая при этом начало рентгеновскому излучению.

Соленоиды, служащие для расширения орбит, не питаются током до тех пор, пока электроны не ускорены в нужной мере. После включения их они искажают распределение магнитного потока вблизи траектории электронов и заставляют их, двигаясь по спиральным путям, попадать на

мишень. Электроны вводятся в магнитное поле в момент A , отмеченный на кривой H рис. 1, а расширение орбиты до её пересечения с мишенью совершается в момент B , когда энергия электронов достигает максимума. Эти процессы повторяются в течение каждого цикла.

Увеличение потока индукции сквозь орбиту создаёт добавочное количество движения у электрона, так что если бы одновременно не происходило увеличения напряжённости поля на орбите электрона, то орбита расширялась бы и весьма скоро электрон попал бы на стенку камеры. Для удержания электрона на его орбите необходимо увеличивать напряжённость магнитного поля H пропорционально увеличению количества движения mv , вызываемому возрастанием потока индукции. Как мы увидим, это требует особого характера распределения плотности магнитного потока. Радиус кривизны r орбиты связан с количеством движения электрона и напряжённостью магнитного поля соотношением

$$mv = \frac{e}{c} H r, \quad (1)$$

где e — заряд электрона и c — скорость света. Согласно второму закону Ньютона производная от количества движения по времени равна силе, действующей на электрон, т. е.

$$\frac{d(mv)}{dt} = f.$$

Но, в свою очередь, сила f равна приращению кинетической энергии электрона на единице длины пути, которое, если принять, что орбита электрона имеет неизменный радиус r , выразится как

$$\frac{1}{2\pi r} \cdot \frac{e}{c} \Phi,$$

где Φ — магнитный поток, пронизывающий орбиту. Таким образом,

$$mv = \int_{t_0}^t f dt = \frac{e}{2\pi r c} \int_{t_0}^t \Phi dt = \frac{e}{2\pi r c} \int_{\Phi_0}^{\Phi} d\Phi$$

или

$$mv = \frac{e}{c} (\Phi - \Phi_0) \frac{1}{2\pi r}; \quad (2)$$

это равенство показывает, что количество движения электрона пропорционально изменению потока сквозь его круговую орбиту.

Комбинируя уравнения (1) и (2), имеем

$$\Phi - \Phi_0 = 2\pi r^2 H. \quad (3)$$

Это означает, что Φ_0 равно нулю при H , равном нулю, и что поток Φ пропорционален напряжённости поля H на орбите и всегда должен быть вдвое больше чем тот, который существовал при H , однородном по всей площади орбиты.

Приведённый результат был получен в предположении, что r является постоянной величиной. Естественно, что, прежде чем построить ускоритель, нужно было убедиться в справедливости обратного, т. е. того, что при заданном магнитном потоке орбита будет иметь постоянный радиус.

Мы никак не оговариваем характер зависимости магнитного потока и напряжённости поля от времени. Необходимо только, чтобы поток Φ возрастал со временем и чтобы пропорционально менялась напряжённость поля H . Это легко осуществить для H и Φ в воздушном зазоре одной и той же магнитной цепи. В реальных условиях электромагнит со своей обмоткой образуют самоиндукцию колебательного контура. Большое число конденсаторов используется для осуществления резонанса при нужной частоте. Первый бетатрон (построенный в Иллинойском университете) работал при частоте в 600 Hz, а новая, дающая электроны с энергиями до $20 \cdot 10^6$ eV установка этого университета работает на частоте в 180 Hz.

Необходимое условие образования потока быстрых электронов у бетатрона состоит в том, что электроны, отклонённые со своей орбиты в результате столкновений с молекулами остаточных газов, должны возвращаться на свои орбиты под действием фокусирующих сил. Каждый рассеянный электрон должен совершать колебания около своей орбиты, которую можно назвать «равновесной орбитой», причём амплитуда этих колебаний должна убывать.

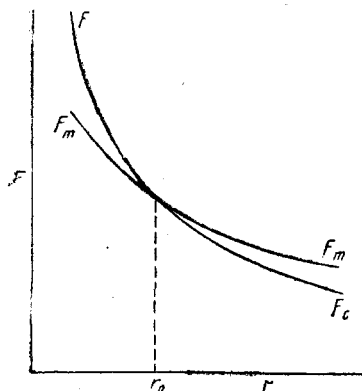


Рис. 2. Сила $F_c \left[= \frac{mv^2}{r} \right]$ представляет собой центростремительную силу, необходимую для удержания электрона на окружности радиуса r ; $F_m \left[= \frac{e}{c} H v \right]$ — сила, с которой магнитное поле действует на электрон в действительности. Равновесная орбита соответствует абсциссе $r = r_0$

Условия для этих колебаний могут быть осуществлены путём создания надлежащего распределения магнитного поля. Для возникновения колебаний в аксиальном направлении магнитные силовые линии между полюсами электромагнита должны изгибаться наружу. В таком поле электрон, вышедший из средней плоскости, оказывается в магнитном поле с небольшой радиальной компонентой. Эта радиальная компонента по разные стороны средней плоскости направлена противоположным образом и поэтому направляет электроны всегда к этой плоскости независимо от того, куда электрон откатился. Для осуществления необходимого изгибания магнитных линий наружу достаточно придать полюсным наконечникам такую форму, при которой расстояние между ними возрастало бы по мере удаления от оси зазора между полюсами. На практике полюсным наконечникам придаётся коническая форма почти по всему сечению. Небольшая закраина оставляется

только на периферии каждого наконечника, с целью создания более медленного ослабления поля, которое весьма резко спадает по краям.

Условие существования колебаний в радиальном направлении состоит в том, что магнитное поле должно убывать не быстрее чем $\frac{1}{r}$. Это можно понять, обратившись к рис. 2, изображающему центростремительную силу F_c , необходимую для удержания электрона на орбите радиуса r^0 .

в функции r . Эта зависимость изображается гиперболой, так как $F_c = \frac{mv^2}{r}$.

Сила, создаваемая магнитным полем, равна $F_m = \frac{e}{c} H v$. В существующих бетатронах изменения v за несколько фокусирующих колебаний настолько незначительны, что ими можно пренебречь. Вследствие этого, если F_m , а значит, и H имеет зависимость от радиуса, изображаемую второй кривой рис. 2, она будет создавать центростремительную силу, большую, чем необходимая F_c , когда r больше чем r_0 , и меньшую в обратном случае. Если электрон находится вне равновесной орбиты, то он оказывается в области, где напряжённость магнитного поля больше чем необходимо для создания кругового пути. Поэтому электрон будет смещаться в направлении к равновесной орбите, но, после того как пересечёт её, окажется в области, где магнитное поле недостаточно для создания кругового пути, и снова будет смещаться в направлении равновесной орбиты. Эти колебания около равновесной орбиты постепенно затухают вследствие того, что магнитное поле за каждый период колебания возрастает, а амплитуда колебаний пропорциональна $H^{-\frac{1}{2}}$. Это

влияние усиливающегося магнитного поля на амплитуду можно уподобить до некоторой степени увеличению жёсткости пружины, на которой подвешена колеблющаяся масса. Демпфирующие свойства возрастающего магнитного поля делают возможным введение электронов в ускорительную камеру с тем, что они попадают на определённую орбиту.

Рассмотренные фокусирующие эффекты ведут к образованию узкого электронного пучка, ударяющегося о мишень на весьма небольшом участке её площади. Благодаря этому испускаемые мишенью рентгеновы лучи дают весьма резкие тени. Мишень не расплавляется под действием выделяемого электронным пучком тепла по той причине, что ток пучка весьма мал. Пучок интенсивности около 1 μ A при энергии в $20 \cdot 10^6$ eV создаёт

16 г/мин. на расстоянии 1 м. При этой энергии ($2 \cdot 10^7$ eV) эффективность пучка в образовании рентгеновых лучей настолько велика, что около 65% общей энергии пучка обращается в энергию рентгеновых квантов и лишь 35% — в тепло, нагревающее мишень.

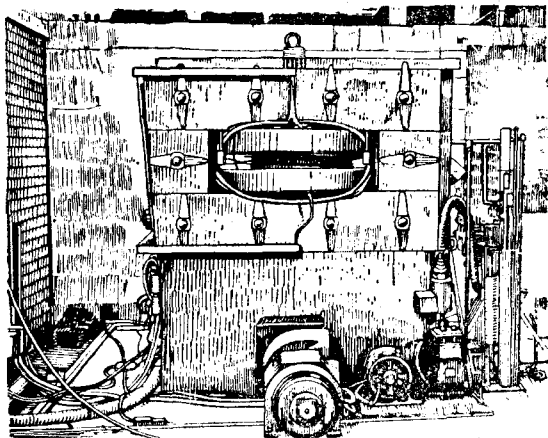


Рис. 3. Новый бетатрон, дающий электроны с энергиями до $20 \cdot 10^6$ eV. Светлое пятнышко на камере между полюсами электромагнита обязано своим происхождением инжектору

Новый бетатрон, снимок которого приведён на рис. 3, имеет полюсные наконечники, диаметром в 47,5 см, и равновесную орбиту в 18,75 см диаметром. Электромагнит имеет сравнительно небольшие размеры: высоту в 900 см и длину в 1500 см; вес его, однако, составляет 3,5 тонны. Мощность, необходимая для генерации электронного пучка с энергией электронов в $2 \cdot 10^7$ eV при частоте 180 Hz, равна около 25 kW. Охлаждение магнитной цепи осуществляется с помощью вентилятора, который можно видеть на рис. 3 у нижней части электромагнита.

Описанный прибор пригоден не только для получения рентгеновых лучей высокой проникающей способности, но также для получения искусственной радиоактивности, возникающей во многих веществах вследствие фотодезинтеграции. Энергия электронов оказывается достаточной также и для проведения в малых масштабах некоторых опытов по космическим лучам.

ЛИТЕРАТУРА

- I. D. W. Kerst, Phys. Rev., **60**, 47, 1941; D. W. Kerst a. R. Serber, Phys. Rev., **60**, 53, 1941.
-