

Из истории физики

Синхротрон.

Принцип работы синхротрона используется во всех ускорителях на высокие энергии, начиная от 1 Гэв, за исключением линейных ускорителей электронов, подобных имеющемуся в Станфорде. Синхротрон представляет собой устройство, предназначенное для ускорения частиц до высоких энергий. Для этой цели необходимо, чтобы либо индукция магнитного поля, либо налагаемая частота изменялись в процессе ускорения с тем, чтобы фаза частицы по отношению к высокочастотному электрическому полю принимала значение, обеспечивающее ускорение.

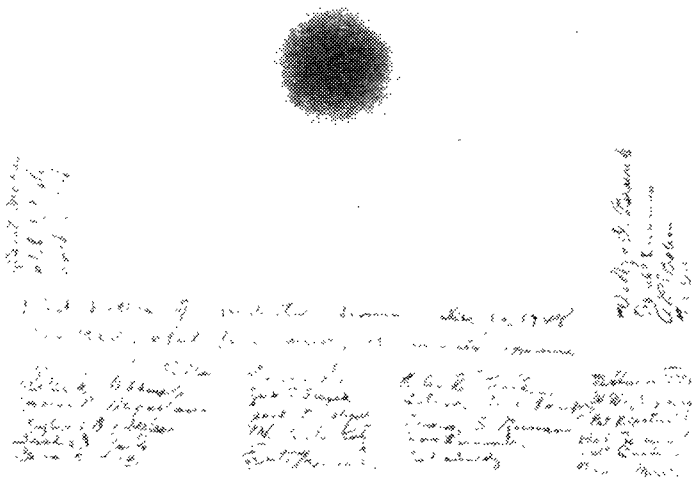


Рис. 13.7. Первая фотография пучка в синхротроне. (Фото Радиационной лаборатории им Лоуренса.)

Идея модуляции частоты или поля была не нова; новостью было установление того факта, что орбита частицы могла быть устойчивой в процессе этой модуляции. Принцип синхротрона был открыт В. Векслером в Москве и независимо, несколько позже, Э. М. Макмилланом в Беркли. Полное изложение работы Векслера было опубликовано в «Journal of Physics (USSR)» 9, 153—158 (1945). Работа Макмиллана появилась в «Physical Review» 68, 143 (1945). Ниже воспроизводится статья Макмиллана.

СИНХРОТРОН ПРЕДЛАГАЕМЫЙ УСКОРИТЕЛЬ ЧАСТИЦ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

Эдвин М. Макмиллан

Калифорнийский университет, Беркли, Калифорния
5 сентября 1945 г.

Один из наиболее эффективных методов ускорения заряженных частиц до весьма высоких энергий основан на повторном наложении переменного электрического поля, как это осуществляется, например, в циклотроне. Если при этом требуется весьма большое число повторных актов ускорения, то может возникнуть затруднение с обеспечением синхронности между движением частиц и колебаниями поля. В случае циклотрона это затруднение появляется, когда изменение релятивистской массы вызывает заметное изменение угловой скорости частиц.

Предлагаемое устройство основано на «фазовой устойчивости» некоторых орбит в циклотроне. Рассмотрим, например, частицу, энергия которой такова, что ее угловая скорость как раз соответствует угловой частоте электрического поля. Назовем эту энергию равновесной. Пусть, далее, частица пересекает ускоряющий зазор как раз в тот момент, когда электрическое поле проходит через нуль, изменяясь в таком направлении, что более ранний подход частицы вызвал бы ее

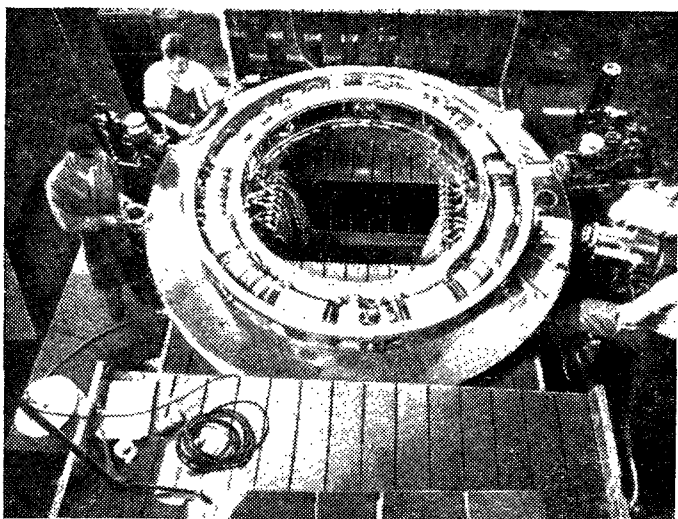


Рис. 13.8. Первый электронный синхротрон. (Фото Радиационной лаборатории им. Лоуренса.)

ускорение. Такая орбита является безусловно стационарной. Чтобы это показать, предположим, что сдвиг по фазе таков, что частица подходит к зазору слишком рано. Тогда она получает ускорение; рост энергии вызывает уменьшение угловой скорости, что задерживает подход к зазору. Аналогичное рассуждение доказывает, что и отклонение энергии от равновесного значения вызывает самокоррекцию.

Смещенные подобным образом орбиты будут продолжать колебаться с периодическими изменениями как фазы, так и энергии около их средних равновесных значений.

В этих условиях для ускорения частиц необходимо изменять значение равновесной энергии, что может осуществляться изменением либо магнитного поля, либо частоты. При изменении равновесной энергии фаза движения будет смещаться вперед как раз на величину, достаточную для приложения необходимой ускоряющей силы; сходство этого поведения с работой синхронного двигателя и подсказало название установки.

Уравнения, описывающие изменение фазы и энергии, выведены с учетом изменения магнитного поля и частоты во времени, а также с учетом ускорения за счет «бетатронного эффекта» (быстроты изменения потока), изменения этого ускорения при изменениях радиуса орбиты в процессе колебаний и, наконец, потерь энергии на ионизацию и излучение. Было принято, что период колебаний фазы велик по сравнению с периодом движения по орбите. Для заряда частицы был принят заряд электрона. Уравнение (1) определяет равновесную энергию; уравнение (2) определяет мгновенную энергию через равновесное значение и изменение фазы; уравнение (3) является «уравнением движения» для фазы. Уравнение (4)

определяет радиус орбиты:

$$E_0 = (300cH)/(2\pi f), \quad (1)$$

$$E = E_0 [1 - (d\varphi)/(d\theta)], \quad (2)$$

$$2\pi \frac{d}{d\theta} \left(E_0 \frac{d\varphi}{d\theta} \right) + V \sin \varphi = \left[\frac{1}{f} \frac{dE_0}{dt} - \frac{300}{c} \frac{dF_0}{dt} + L \right] + \left[\frac{E_0}{f^2} \cdot \frac{df}{dt} \right] \frac{d\varphi}{d\theta}, \quad (3)$$

$$R = (E^2 - E_f^2)^{1/2} / 300H. \quad (4)$$

Использованы следующие обозначения:

E — полная энергия частицы (кинетическая плюс энергия покоя), E_0 — равновесное значение E , E_f — энергия покоя, V — выигрыш энергии за счет электрического поля за один оборот при наиболее благоприятной для ускорения фазе, L — потеря энергии за один оборот на ионизацию и излучение, H — напряженность магнитного поля на орбите, F_0 — поток магнитной индукции сквозь равновесную орбиту, φ — фаза частицы (угловое положение относительно зазора в момент, когда электрическое поле отсутствует), θ — угловое смещение частицы, f — частота электрического поля, c — скорость света, R — радиус орбиты. (Энергия выражена в электрон-вольтах, магнитные величины — в единицах СГСМ, углы — в радианах, остальные величины — в системе СГС.)

Как видно, уравнение (3) одинаково с уравнением движения маятника при неограниченной амплитуде, в котором члены правой части выражают постоянный крутящий момент и демпфирующую силу. Таким образом, изменение фазы имеет колебательный характер, пока амплитуда не слишком велика, причем допустимая амплитуда составляет $\pm \pi$, когда выражение в первых скобках в правой части равно нулю, и стремится к нулю, когда это же выражение стремится к V . По теореме для адиабатного процесса амплитуда должна изменяться обратно пропорционально корню четвертой степени из E_0 , поскольку E_0 играет роль медленно-изменяющейся массы в первом члене уравнения; при уменьшении частоты последний член правой части обуславливает дополнительное затухание.

Применение данного метода будет зависеть от типа частиц, подлежащих ускорению, поскольку начальная энергия в любом случае близка к энергии покоя. В случае электронов E_0 будет изменяться в процессе ускорения во много раз. Изменить частоту во столько же раз нецелесообразно. Таким образом, в этом случае следует предпочесть изменение H , что имеет то дополнительное преимущество, что орбита должна приближаться к постоянному значению радиуса. В случае тяжелых частиц E_0 будет изменяться гораздо слабее; например, при ускорении протонов до 300 Мэв E_0 изменяется на 30%. Поэтому при ускорении тяжелых частиц может оказаться целесообразным изменять частоту.

Параметры одного из возможных типов ускорителя электронов на 300 Мэв приведены ниже:

амплитудное значение индукции — 10 000 гс,

конечный радиус орбиты — 100 см,

частота — 48 Мгц,

энергия инъекции — 300 кв,

начальный радиус орбиты — 78 см.

Поскольку при ускорении в этом случае радиус расширяется на 22 см, магнитное поле должно захватывать только кольцо этой ширины — разумеется, с некоторой добавочной шириной для правильного формирования поля. Для придания орбитам радиальной и осевой устойчивости поле должно несколько ослабевать в направлении возрастающего радиуса. Полный магнитный поток приблизительно в 5 раз меньше, чем потребовалось бы в бетатроне при той же конечной энергии.

Необходимое напряжение на ускоряющих электродах зависит от скорости изменения магнитного поля. Если магнит возбуждается за 60 циклов, то амплитудное значение величины $(1/f)(dE_0/dt)$ составляет 2300 в. (Бетатронный член, содержащий dE_0/dt , составляет примерно 1/5 этой величины, и им можно пренебречь.) Если положить $V=10\,000$ в, наибольший сдвиг фазы будет 13° . Число-

оборотов на одно колебание фазы будет колебаться в процессе ускорения в пределах от 22 до 440. Относительное изменение E_0 за один период колебания фазы составляет 6,3% во время инъекции, с последующим уменьшением. Таким образом, остается в силе предположение о медленном изменении за период, сделанное при выводе уравнений. Потеря энергии на излучение рассматривается в следующем письме в редакцию, в котором показано, что в данном случае она не существенна.

Применение к тяжелым частицам не рассматривается подробно, но представляется вероятным, что наилучший путь будет заключаться в изменении частоты. Поскольку не потребуется особенно быстрого изменения, оно смогло бы осуществляться механическим вращающим приспособлением, приводимым в действие электродвигателем.

Синхротрон открывает возможность достижения энергий в гигаэлектрон-вольтовом диапазоне как для электронов, так и для тяжелых частиц; в первом случае эта цель будет достигаться при меньших затратах на материалы и энергию, чем в бетатроне; во втором случае устраняется релятивистское ограничение, существующее для циклотрона.

Постройка основанного на описанном принципе ускорителя для электронов на 300 Мэв планируется в Радиационной лаборатории при Калифорнийском университете в Беркли.