

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ УСКОРЕНИЯ АТОМНЫХ ЧАСТИЦ *)

В. И. Векслер

В течение последних лет экспериментальная физика достигла необычайных успехов в задаче искусственного получения частиц с энергиями во много миллиардов электрон-вольт. Еще несколько лет назад такие частицы могли наблюдаться только в космическом излучении, и притом с ничтожной интенсивностью.

Искусственное получение пучков протонов и электронов огромной энергии дало возможность исследовать и открыть ряд явлений, имеющих принципиальное значение для физики атомного ядра и естествознания в целом. Возникла новая, пожалуй, наиболее перспективная область современной ядерной физики—физика частиц высоких энергий. Темпы развития этой новой области необычайны. Создание мощных пучков мезонов позволило пролить новый свет на природу ядерных сил, было открыто существование новых элементарных частиц—тяжелых нейтральных мезонов, антипротонов и антинейтронов. Весь этот поток новых фактов обусловлен развитием методов ускорения заряженных частиц. Возник самостоятельный раздел экспериментальной физики, посвященный ускорителям. Этот раздел опирается на новейшие достижения радиотехники и теснейшим образом связан с мощной электротехнической и радиотехнической индустрией.

Впервые значение быстрых частиц для исследований свойств атомного ядра выяснилось в результате знаменитых опытов, в которых Резерфорду удалось осуществить расщепление атомных ядер азота, бомбардируя их α -частицами, возникающими при естественном распаде радия-С¹.

Быстрое развитие ядерной физики сопровождалось созданием искусственной ядерной артиллерии—приборов, которые позволяют сообщать атомным частицам—электронам и протонам—высокие энергии.

Решающий шаг в этом направлении был сделан создателем циклотрона Лоуренсом, впервые предложившим резонансный метод для ускорения заряженных частиц. Как известно, физика атомного ядра обязана циклотрону многими важнейшими достижениями. Однако уже в конце 30-х годов стало ясно, что решение проблемы ядерных сил требует создания ускорителей, способных обеспечить поток частиц гораздо большей энергии, чем те, которые могут быть получены с помощью циклотрона. Начиная с этого момента, физики все время стремятся создавать ускорители, дающие поток частиц со все большими и большими энергиями.

Позвольте в нескольких словах пояснить причины такого положения.

*) Докл ад на общем собрании Академии наук СССР 27 марта 1958 г.

В 1937 г. в космических лучах впервые были обнаружены заряженные частицы с массой, промежуточной между массами электрона и протона. Эти частицы были названы мезонами. Сравнительно скоро было установлено существование нескольких видов мезонов. Это открытие по существу явилось началом новой главы в развитии наших представлений о природе ядерных сил и структуре нуклонов. Перед физиками со всей остротой встала задача разработки и создания таких ускорителей, которые давали бы возможность искусственно получать мезоны, используя их как инструмент для исследования природы ядерных сил.

Изучение космических лучей показало, что эффективным методом генерации мезонов являются процессы соударения нуклонов большой энергии с ядрами атомов. Установленное теорией относительности соотношение между массой и энергией показывает, что для генерации каких-то новых частиц соударением частицы-«снаряда» с покоящимся нуклоном или ядром ускоренной частице необходимо сообщить энергию, по крайней мере равную (а на самом деле даже большую)

$$W = M_0 c^2,$$

где M_0 —масса покоя той частицы, которая должна быть порождена в процессе соударения, а c —скорость света.

Масса покоя мезонов в несколько сот раз превышает массу электрона и соответствует энергии, приблизительно равной 150 *Мэв*. К моменту обнаружения мезонов физики не имели средств для искусственной генерации этих частиц. Невозможно было решить эту задачу, используя циклотроны.

Как известно, принцип работы циклотрона основан на использовании резонанса между частотой обращения протонов, двигающихся в магнитном поле циклотрона, и частотой переменного электрического поля, которое ускоряет протоны в этом приборе.

Такой резонанс существует, грубо говоря, только до тех пор, пока скорость протонов, двигающихся внутри циклотрона, достаточно мала по сравнению со скоростью света. Однако по мере возрастания энергии скорость частицы растет и при этом, в согласии с теорией относительности, возрастает масса протонов. Это приводит к тому, что соответствие между периодом обращения частиц и частотой ускоряющего эти частицы электрического поля постепенно все больше и больше нарушается, пока, наконец, накапливающаяся расстройка резонанса не приводит к тому, что дальнейшее ускорение делается уже невозможным.

Максимальная энергия, до которой могут быть ускорены протоны в циклотроне, близка к 10 млн. электрон-вольт и, таким образом, оказывается в 20 раз меньше той энергии, которой надо располагать для искусственной генерации мезонов.

* Был предпринят ряд попыток преодоления трудностей, связанных с релятивистским приращением массы ускоряемых частиц. Однако они оказались безуспешными. Стало казаться (и такая точка зрения господствовала много лет), что релятивистское возрастание массы вообще является принципиальной трудностью и ограничивает возможность ускорения протонов до высоких энергий.

В 1944 г. мне и (несколько позднее) Мак-Миллану удалось показать, что релятивистское возрастание массы не только не является препятствием для осуществления эффективных методов ускорения заряженных частиц, но, наоборот, этот релятивистский эффект обеспечивает возможность осуществить резонансное ускорение электронов и протонов до весьма высоких энергий. Ключом к успеху явилось обнаружение явления автофазировки. Автофазировка позволила создать множество различных типов

ускорителей, используемых как для ускорения электронов, так и для ускорения ядерных частиц, протонов и дейтронов.

Я не буду перечислять все типы ускорителей, основанные на использовании автофазировки, а укажу только главнейшие из них.

Первый—это циклические ускорители электронов, называемые синхротронами. Один из первых в мире приборов такого типа на энергию 30 *Мэв* был построен еще в 1947 г. в Физическом институте им. П. Н. Лебедева АН СССР.

Во многих странах мира в настоящее время работает множество различных синхротронов, дающих пучки электронов с энергией до нескольких сот миллионов электрон-вольт. Уже существуют синхротроны, дающие пучки электронов с энергией до 1,5 *Бэв*, и строятся синхротроны на энергию до 7 *Бэв*. В Советском Союзе, как известно, много лет работают синхротрон Физического института на 280 *Мэв* и синхротрон Ленинградского физико-технического института на 100 *Мэв*.

Синхротроны позволяют получать ультражесткое электромагнитное излучение. С помощью этих приборов было установлено существование нейтрального π -мезона. Электроны и фотоны высоких энергий являются одним из наиболее эффективных способов исследования структуры нуклонов—тех основных кирпичей, из которых построены ядра атомов.

Следующий важнейший тип ускорителя—это фазотрон (или синхродиклотрон). Он используется для ускорения протонов, дейтронов и α -частиц и является наиболее эффективным генератором π -мезонов. В настоящее время во всем мире работает свыше десяти фазотронов. Самый большой фазотрон построен у нас в Советском Союзе под руководством Мещерякова, Д. В. Ефремова и А. А. Минца. В сущности говоря, все, что мы знаем о роли π -мезонов в проблеме ядерных сил, выяснено в результате создания мощных пучков мезонов, генерируемых с помощью фазотронов.

Третий тип ускорителей—это широко известные синхрофазотроны, такие, как американский космотрон на 3 млрд. электрон-вольт, беватрон на 6,3 млрд. электрон-вольт и, наконец, построенный в нашей стране синхрофазотрон, дающий пучок протонов с энергией в 10 млрд. электрон-вольт. Как известно, синхрофазотрон на 10 млрд. электрон-вольт принадлежит Объединенному институту ядерных исследований. Его параметры много раз приводились в печати, поэтому я не буду о них говорить. На этом ускорителе достигнуты интенсивности приблизительно 10^9 частиц в импульсе и уже начаты физические исследования, масштабы которых будут быстро расширяться. Именно ускорителям подобных типов мы обязаны важнейшими сведениями, касающимися физики элементарных частиц. Они привели к открытию долгоживущих нейтральных мезонов, антипротонов, антинейтронов.

Все перечисленные выше ускорители называются циклическими. Все они характеризуются тем, что ускоряемые частицы, двигаясь по замкнутым траекториям, много раз проходят одно и то же ускоряющее электрическое поле. Существует еще один вид резонансных ускорителей—линейные, в которых ускоряемые частицы двигаются по прямой линии. Быстрое развитие этих приборов также связано с открытием явления автофазировки.

Я попытаюсь дать самое общее представление о принципе автофазировки, не детализируя конкретные особенности действия этого механизма в том или другом типе ускорителей.

Всякий циклический ускоритель содержит два основных элемента:

1. Магнитное поле, обеспечивающее циклический характер движения заряженных частиц.

2. Ускоряющее устройство, в котором возбуждается переменное электрическое поле, предназначенное для того, чтобы сообщать заряженным частицам энергию. Частота электрического поля может быть постоянной либо варьироваться. Магнитное поле также может быть постоянным либо нарастать во времени. Этим двух элементов достаточно, чтобы возник механизм автофазировки.

Для того чтобы сделать ясным механизм действия автофазировки, разрешите мне воспользоваться несколькими самыми простыми соотношениями.

Рассмотрим, как будет выражаться время, затрачиваемое частицами, движущимися в магнитном поле, на то, чтобы совершить один оборот. Это время T , очевидно, будет определяться отношением пути s , проходимого частицей за время одного оборота, к скорости этой частицы v , т. е. будет

$$T = \frac{s}{v}.$$

Для заряженных частиц, движущихся в однородном постоянном (или почти постоянном во времени) магнитном поле, траектория, как известно, является окружностью, радиус которой R выражается так:

$$R = \frac{Mv}{He} = \frac{M_0vc}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}He},$$

где H — напряженность магнитного поля, $M = \frac{M_0}{\sqrt{1-v^2/c^2}}$ — полная масса частицы, e — ее заряд и v — скорость.

Таким образом, путь, проходимый частицами за один оборот, будет $s = 2\pi R = \frac{2\pi M_0vc}{He}$. Следовательно, время T , затрачиваемое на оборот, получим, разделив путь s на скорость частиц, т. е.

$$T = \frac{2\pi M_0c}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}He}.$$

В соответствии с теорией относительности $Mc^2 = \omega$, поэтому для T получим $T = \frac{2\pi}{He} \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{ec} \frac{\omega}{H}$.

В этой формуле, в сущности, уже содержится все необходимое для понимания механизма автофазировки. Она показывает, что во всяком циклическом ускорителе существует простое соотношение, связывающее три основные величины: напряженность магнитного поля, которое управляет движением частиц, период их обращения и энергию частиц. Задача состоит, следовательно, в том, чтобы используя связь этих величин, найти и осуществить такие условия, при которых энергия частиц могла бы непрерывно возрастать за счет соответствующего изменения одного или двух других параметров. Оказывается, что решение задачи, в сущности, необычно просто. Необходимо воспользоваться уже известным резонансным способом ускорения. Однако амплитуда разности потенциалов электрического поля, ускоряющего частицы, не может теперь выбираться произвольной, но должна удовлетворять некоторому простому требованию.

Самое замечательное в таком методе ускорения состоит в том, что, благодаря зависимости массы частиц от скорости, всякое отклонение длительности обращения частиц от резонансного сейчас же приводит к такому изменению прироста энергии, получаемого частицами от электрического поля, что период обращения снова автоматически возвращается к резонанс-

ному. Оказывается, что для создания такого автоматизма достаточно медленно менять магнитное поле или частоту ускоряющего электрического поля либо при постоянных значениях того и другого приложить достаточно высокую разность потенциалов к ускоряющему устройству. Если в процессе ускорения частица почему-либо приобретает энергию слишком быстро, то резонанс между временем ее обращения и частотой ускоряющего ее поля несколько ухудшается, частица при каждом обороте начинает приобретать меньшую энергию, что ведет к восстановлению резонанса. Наоборот, если энергия частицы в процессе ускорения почему-либо нарастает несколько медленнее, чем это необходимо для поддержания резонанса, то данная частица начинает получать от электрического поля большие порции энергии, чем раньше, и таким образом ей принудительно сообщается некоторая дополнительная энергия.

Такое автоматическое поддержание баланса между периодом обращения частицы и периодом ускоряющего ее электрического поля может быть обеспечено в циклических ускорителях самого разного типа. Можно, например, сохранить магнитное поле, управляющее движением частиц, постоянным во времени и по произвольному закону уменьшать частоту ускоряющего электрического поля. Можно осуществить и обратное: увеличивать значение магнитного поля и поддерживать частоту постоянной. Наконец, можно менять и то и другое. К приборам первого типа, с постоянным магнитным полем, относятся фазотроны, а приборам второго типа, с постоянной частотой,—синхротроны, а ускорители третьего вида—это те синхрофазотроны, о которых я уже упоминал.

Во всех этих случаях для возникновения механизма автофазировки достаточно выполнить очень простое неравенство, связывающее разность потенциалов электрического поля, ускоряющего частицы, со скоростью изменения магнитного поля или частоты.

Автофазирующие ускорители позволили повысить предел энергии по сравнению с циклотроном примерно в тысячу раз, и, по-видимому, эта цифра не является пределом.

Позвольте перейти теперь к другой характерной особенности автофазирующих ускорителей, на которую важно обратить внимание с точки зрения перспектив будущего развития ускорителей заряженных частиц.

Повышение энергии, достигнутое с помощью принципа автофазировки, дается далеко не даром. Так, например, если обычные циклотроны имеют диаметр полюсов 1—1,5 м и весят от нескольких десятков до сотни тонн, то современные фазотроны обладают уже весом в несколько тысяч тонн, а диаметр их полюсов приближается к 5—7 м. Вес же синхрофазотронов доходит даже до нескольких десятков тысяч тонн, а радиус электромагнита синхрофазотронов составляет десятки и в строящихся ускорителях—сотни метров. Эта тенденция современных ускорителей была остроумно подчеркнута известным итальянским физиком Ферми, в одной из своих последних лекций шутливо указавшим, что если экстраполировать дальше наблюдающееся сейчас соотношение между максимальной энергией частиц и размерами ускорителей, то для получения частиц с энергией в 10^{16} электрон-вольт придется построить ускоритель, диаметр орбиты которого будет равным диаметру земного шара, а вакуумная камера—экватору.

Это шуточная характеристика. Однако она, несомненно, отражает важные физические особенности современных ускорителей. Последние 15 лет физики стремились получать все большие и большие энергии. Автофазировка позволила осуществить эту задачу. Однако автофазировка же приводит к тому, что интенсивность, т. е. поток частиц, который мы можем получать от ускорителя, все время уменьшается с возрастанием максимальной энергии частиц, даваемых этими приборами. Циклотрон, напри-

позволяет получить ток около 100 миллиампер, фазотрон дает уже только микроампер тока. Синхрофазотроны же такого типа, как беватрон или ускоритель Объединенного института, дают ток только 10^{-3} микроампера. Лауренс обратил внимание на то, что если так пойдет дело и дальше, то в том фантастическом ускорителе, о котором говорил Ферми, мы смогли бы получить интенсивность, равную одному протону в сутки.

Таким образом, наряду с гигантским ростом энергии, имеет место резкое уменьшение интенсивности потока ускоряемых частиц. Легко понять причины этого соотношения. Дело в том, что при росте размеров ускорителя и его веса очень быстро растут мощности тех энергетических систем, которые снабжают энергией электромагниты циклических ускорителей и высокочастотные генераторы, используемые для создания электрического поля, ускоряющего частицы. Так как мощности энергетических систем ограничены, то это приводит к тому, что число импульсов ускоренных частиц, даваемых ускорителями в одну секунду, катастрофически уменьшается. В циклоне число импульсов составляет 10^7 в секунду, в фазотроне Объединенного института это число уже только около 100 в секунду, в синхрофазотроне на 10 млрд. электрон-вольт 1 импульс в среднем происходит за 12 секунд.

Это обстоятельство является весьма характерным, так как теснейшим образом связано с таким принципом ускорения, который для повышения энергии частиц требует роста размеров и веса ускорителей.

Имеется два круга вопросов, в сущности, две огромные области, которые требуют и дальнейшего роста энергии заряженных частиц, и вместе с тем увеличения интенсивности, увеличения потока ускоренных частиц. Одна из этих областей—это область научных исследований, область изучения природы элементарных частиц.

Успехи физики последнего времени, о которых я сказал вначале, настойчиво требуют создания ускорителей со все большими энергиями. Если для того, чтобы создать π -мезоны, нужно сообщить частице-«снаряду» всего 150 *Мэв* или несколько больше, то для того, чтобы наблюдать рождение антипротона, необходимо уже около 6 миллиардов, а для рождения пары так называемых каскадных гиперонов необходимо уже около 10 миллиардов. Не приходится сомневаться в том, что дальнейшие открытия подтвердят эту тенденцию и в свою очередь будут требовать все больших и больших энергий от ускорителей.

Вместе с тем есть и второй и, пожалуй, никак не менее важный, круг вопросов, для решения которых необходимо создание мощных ускорителей, обеспечивающих не только очень высокие энергии порядка десятков, миллиардов электрон-вольт, а может быть, и выше, но требующих одновременно большой мощности потока ускоренных частиц.

Я не могу говорить об этих проблемах сколько-нибудь подробно. Укажу только, что они связаны с возможностью практического использования ускорителей и могут охватывать самые разнообразные стороны практической деятельности.

Я хотел бы попытаться очень коротко, почти конспективно охарактеризовать перспективы развития в обоих указанных только что направлениях. Позвольте начать с вопроса о максимальных энергиях. В настоящее время частицы с небольшими энергиями дают циклические ускорители. Максимальная энергия частиц, которая может быть получена в циклическом ускорителе с магнитным полем напряженностью H , практически не зависит от типа ускорителя и определяется только величиной напряженности магнитного поля, которое может быть использовано для удержания частиц на орбите, и радиусом траектории частиц. Во всех до сих пор известных нам

материалах величина предельной напряженности поля не превосходит 30 тыс. эрстед. Поэтому, если с помощью существующих методов мы хотим продвигаться в сторону увеличения максимальной энергии частиц, то нам практически остается один путь—путь простого увеличения размеров ускорителя. Однако здесь мы очень быстро подходим к пределу разумного и уже сейчас мы близки к этому пределу. Физикам раньше не приходилось встречаться с проблемами экономического характера. Однако при проектировании все более мощных ускорителей, в сущности, только чисто технические и экономические факторы являются сейчас определяющими. Каждый поймет, что если магнит ускорителя весит около 40 тыс. тонн, если для него требуется сооружение огромных зданий, фундаментов, требуется сооружение мощной подстанции, запаасающей в импульсе сотни тысяч киловатт энергии, то, к сожалению, эти вопросы не могут не интересовать физиков. Однако не только чисто экономические факторы ограничивают движение в сторону простого увеличения размеров существующих ускорителей. Можно показать, что технические трудности создания гигантских электромагнитов, их веса, жесткость допусков на магнитные характеристики и т. п.—все эти факторы с ростом размеров электромагнита возрастают, грубо говоря, приблизительно, как предельная энергия в степени 2,5—3.

Чем же определяется столь быстрый рост масштабов ускорителей? Оказывается, что он обусловлен одним важным физическим явлением. Речь идет о выполнении условий устойчивости движения частиц. В любом циклическом ускорителе и особенно в ускорителе, использующем принцип автофазировки, частицы совершают в процессе ускорения огромное число оборотов. Так, например, в синхрофазотроне Объединенного института за время ускорения, которое длится 3,3 секунды, частицы совершают несколько миллионов оборотов и за это время проходят путь в один миллион километров. Для того чтобы на столь большом пути всякие случайные причины, например столкновения с молекулами газа, возмущения движения, связанные с неоднородностью магнитного поля и т. п., не вызвали катастрофических потерь ускоренных частиц, нужно, чтобы движение частиц было устойчивым. Известно, что для осуществления условий устойчивости необходимо придать магнитному полю, которое обеспечивает цикличность движения частиц, некоторую вполне определенную конфигурацию.

Теория показывает, что во всех существующих синхрофазотронах магнитные силы, обеспечивающие устойчивость и удерживающие частицы около равновесной траектории, в общем, очень малы, и в силу этого амплитуды колебаний частиц около равновесных траекторий велики. Поэтому область пространства, в которой движутся частицы и в которой конфигурация магнитного поля должна удовлетворять условиям устойчивости, также приходится делать достаточно большой. Увеличение энергии частиц и соответственно увеличение радиуса орбиты ускорителя ведет за собой необходимость увеличения высоты и ширины той области пространства, в которой движутся частицы. Это приводит к возрастанию веса электромагнита пропорционально кубу радиуса орбиты частиц. В синхрофазотроне Объединенного института ширина «дорожки», в которой движутся частицы, составляет около полутора метров. Если бы мы пожелали увеличить максимальную энергию частиц до 30—50 млрд. электрон-вольт, используя те же самые условия устойчивости, которые использует синхрофазотрон Объединенного института, то потребовалось бы соорудить электромагнит, вес которого был бы близок к миллиону тонн, что очевидно уже является совершенно нереальным.

Несколько лет тому назад группа американских физиков предложила очень остроумную идею для обхода этой трудности. Разработанный этими физиками метод позволил по-новому подойти к вопросам устойчивости движения и получил название жесткой фокусировки. Было показано, что возможно резко увеличить магнитные силы, обеспечивающие устойчивость движения частиц, если сделать конфигурацию магнитного поля синхрофазотронов периодически меняющейся по азимуту.

Я не могу останавливаться на изложении этого вопроса сколько-нибудь подробно. Укажу только, что осуществление этой идеи позволяет почти на порядок уменьшить амплитуду колебаний частиц около их равновесных орбит и дает возможность соответственно уменьшить вес электромагнитов и потребляемую ими мощность. Это позволяет, следовательно, продвинуться в сторону получения еще более высоких энергий.

В настоящее время во всем мире проектируются и строятся ускорители, использующие принцип жесткой фокусировки. В Советском Союзе под руководством В. В. Владимирского, Е. Г. Комара, Минца и при участии Ефремова также проектируется ускоритель на 50 млрд. электрон-вольт, использующий метод жесткой фокусировки. Предполагается, что вес такого ускорителя будет составлять около 30 тыс. тонн. Однако размер зазора будет всего только около 10 см по ширине и 6 см по высоте, хотя радиус равновесной орбиты будет равным приблизительно 250 м. Аналогичного типа ускорители, рассчитанные на энергию 30 млрд. электрон-вольт, быстрыми темпами сооружаются в Швейцарии и Америке. В этих ускорителях, также как и в обычных синхрофазотронах, ускорение осуществляется путем использования принципа автофазировки. Можно ожидать, по-видимому, что метод жесткой фокусировки позволит продвинуться вверх по шкале энергий еще в несколько раз по сравнению с максимальной энергией, уже достигнутой в настоящее время.

Надо, однако, сказать, что успех метода жесткой фокусировки достигается довольно дорогой ценой. Я имею в виду крайне трудную проблему устранения резонансной раскачки колебаний частиц. Как показывает теория, в подобных системах в огромной степени возрастают требования к точности выполнения всех узлов ускорителя.

Для того чтобы дать качественную оценку тех трудностей, с которыми придется встретиться, укажу, что для жесткофокусирующего синхрофазотрона, рассчитанного на энергию 50 млрд. электрон-вольт, при радиусе кольцевого магнита примерно в 250 м необходимо, чтобы равномерность осадки фундамента, на котором будет установлен электромагнит, поддерживалась постоянной (строго говоря, необходимо поддержание постоянства 30-й гармоники) с точностью до 0,1 мм, при общем весе электромагнита в несколько десятков тысяч тонн и длине периметра электромагнита около 1,5 км. Такие же чрезвычайно высокие требования необходимо предъявлять к постоянству конфигурации магнитного поля электромагнита и к точности целого ряда других узлов этого гигантского ускорителя. Как видите, хотя эти задачи, по-видимому, технически осуществимы, но все же их решение является необычайно трудным делом.

Именно поэтому вряд ли метод жесткой фокусировки позволит резко продвинуться вперед по шкале энергии. Несмотря на все остроумие этого метода, его использование позволит всего в несколько раз увеличить максимальную энергию частиц. Задача резкого увеличения интенсивности пучков частиц и перехода к ультрарелятивистским частицам с энергиями в сотни и тысячи миллиардов электрон-вольт, важная со многих точек зрения, не может быть решена теми методами, о которых я здесь рассказал. Нужно искать каких-то совсем новых путей, если мы желаем рассчитывать на быстрое движение вперед.

Я перехожу теперь к заключительной части, которая по необходимости будет содержать сравнительно большой элемент фантазии и которая касается перспектив развития ускорителей.

Прежде всего я расскажу сейчас об одной идее, в которой удивительным образом оказываются связанными две задачи—задача получения больших токов и больших энергий ускоренных частиц.

Поставим перед физиком-экспериментатором такой простой вопрос: «Что вы хотите делать, имея в своих руках частицу большой энергии?». Экспериментатор дает на него тривиальный ответ, который будет заключаться в том, что ускоренную частицу он использует в качестве снаряда, с тем чтобы воздействовать им на покоящуюся частицу, используемую в качестве мишени, и наблюдать рассеянные частицы, генерацию мезонов, антинуклонов и т. п.

Почему, однако, мишень должна покоиться? Оказывается, что возникают возможности наблюдения процессов, происходящих при ультравысоких энергиях, если мишень (которая до сих пор всегда покоилась) сама будет двигаться с большой скоростью навстречу тому пучку частиц, которые мы используем в качестве снарядов.

Рассмотрим, что произойдет, если снаряд и мишень будут двигаться навстречу друг другу с равной и уже релятивистской скоростью. Легко показать, что если два протона, каждый из которых обладает, например, энергией в 10 млрд. электрон-вольт и которые движутся навстречу друг другу, будут сталкиваться, то весь процесс взаимодействия будет происходить так, как если бы один из протонов покоился, а другой двигался с энергией, равной приблизительно 20 млрд. электрон-вольт. Таким образом, заставив пучки частиц с большими энергиями двигаться навстречу друг другу и наблюдая процессы, происходящие при столкновении частиц, мы сможем исследовать явления, которые происходили бы, если бы в нашем распоряжении был ускоритель, дающий частицы с ультравысокой энергией, равной удвоенному произведению энергии частиц каждого из встречных пучков в отдельности.

Такой метод осуществления процессов, которые могли бы вызываться только частицами, обладающими сверхвысокими энергиями, мне кажется крайне перспективным. Однако его не так легко реализовать практически. Это обусловлено тем, что эффективный поперечник сечения, характеризующий, например, вероятность соударения двух протонов, имеет ничтожную величину. Поэтому для того, чтобы можно было наблюдать такие соударения, необходимо, как показывает расчет, иметь в каждом из сталкивающихся встречных пучков огромные токи, порядка 50—100 ампер. Вряд ли возможно с помощью существующих сейчас автофазирующих ускорителей обеспечить получение таких токов. Максимальные импульсные токи, которые сейчас могут быть реализованы, это токи порядка 0,1—0,01 ампера. Поясню, что речь идет о мгновенных токах, а не о среднем токе, о котором я говорил раньше.

Для того чтобы стало возможным практически реализовать метод встречных пучков, нужно увеличить мгновенные токи в 500—1000 раз. По этому поводу есть целый ряд остроумных идей. В Советском Союзе в 1953 г. В. А. Петуховым, М. С. Рабиновичем, А. А. Коломенским и несколько позже в США Керстом, Саймоном и др. были предложены новые магнитные системы с постоянным во времени магнитным полем, позволяющие рассчитывать на значительное увеличение тока ускоренных частиц.

Существуют предложения использовать имеющиеся сейчас ускорители для накопления токов. Предполагают создать специальные магнитные накопители, в которых длительное время можно накапливать пучки частиц, получаемых от современных ускорителей, а затем каким-то

способом заставлять сталкиваться между собой накопленные в двух накопителях потоки частиц. Конечно, до практической реализации этих, иногда достаточно сырых предложений еще далеко, я упоминаю об этом только для того, чтобы показать несколько неожиданную связь двух задач — задачи получения больших потоков и задачи получения ультравысоких энергий.

Принципы действия всех тех ускорителей, о которых я до сих пор рассказывал, в сущности говоря, были связаны с задачей о движении одной изолированной частицы в заданных магнитных и электрических полях. Быстрое развитие ускорителей стало возможно на основании строгой теории, позволяющей точно рассчитать условия движения частиц. Фундамент этой теории был заложен советскими теоретиками М. С. Рабиновичем, А. А. Коломенским, а также некоторыми зарубежными физиками.

Новые идеи, о которых я собираюсь сейчас коротко рассказать, относятся к той области явлений, в которой приходится учитывать коллективное взаимодействие частиц. Поэтому многое здесь рассмотрено еще только качественно. Я имею в виду предложенный А. М. Будкером так называемый релятивистский стабилизированный пучок, когерентный метод ускорения, предложенный автором настоящего доклада, и идею плазменных волноводов Я. И. Фейнберга.

Хотя все эти три идеи, о которых я только что упомянул, совершенно различны, они имеют общую черту. Все они рассматривают использование плазмы для создания мощных пучков частиц высокой энергии.

За недостатком времени во всем предыдущем изложении я касался только вопросов, связанных с состоянием и перспективами развития циклических методов ускорения. В течение последних десяти лет под влиянием бурного прогресса радиотехники и использования принципа автофазировки начали быстро развиваться и линейные ускорители. Несмотря на ряд преимуществ в области больших энергий, линейные ускорители не являются еще столь эффективными, как циклические. Одна из главных причин этого состоит в том, что в обычных резонаторах и волноводах невозможно создать и достаточно эффективно использовать очень высокие напряженности электрического поля. С другой стороны, в этих ускорителях существует трудность одновременного обеспечения условий фазовой и пространственной фокусировки частиц. В 1956 г. Я. И. Фейнберг указал на возможность одновременного преодоления обеих этих трудностей путем использования покоящейся или движущейся плазмы, помещенной в продольное магнитное поле. Оказывается, что такая плазма ведет себя как волновод, обладающий рядом удивительных свойств. По таким плазменным волноводам могут распространяться волны, длина которых гораздо больше поперечных размеров волновода. Появляется возможность создать весьма большие напряженности поля именно в той небольшой области пространства, в которой движутся ускоренные частицы. Исчезает трудность совмещения требований фазовой и радиальной устойчивости пучка ускоряемых частиц.

Все это обещает открыть перед линейными ускорителями совершенно новые перспективы.

Перехожу теперь к стабилизированному пучку.

Выше я указал, что в циклическом ускорителе максимальная энергия, которая может быть сообщена частицам, определяется только напряженностью магнитного поля на орбите.

А. М. Будкер впервые обратил внимание на то, что с помощью релятивистской плазмы можно осуществить магнитное поле, примерно на два порядка больше, чем дает любой ферромагнетик, т. е. получить поля порядка 10^6 эрстед. Идея А. М. Будкера основана на использовании реля-

тивистских свойств потока заряженных частиц. Им показано, что если в циклическом ускорителе с помощью релятивистских электронов создать достаточно большой ток и скомпенсировать взаимное отталкивание электронов положительными ионами, то в такой плазме возникает мощное электромагнитное излучение. Появление излучения приводит к тому, что диаметр плазменного шнура тока резко уменьшится, а внутри плазмы и на ее поверхности появится огромное магнитное поле. Это магнитное поле можно использовать, поместив внутрь такого плазменного шнура частицы, которые затем можно ускорять каким-нибудь обычным способом, например с помощью автофазировки. Эта идея очень красива, но ее осуществление, конечно, потребует преодоления многих трудностей. Вместе с тем, если бы это удалось сделать, то можно было бы рассчитывать получить частицы с энергией примерно в 10^{11} электрон-вольт.

В том методе, о котором я только что говорил, решается задача создания очень больших магнитных полей, а ускорение частиц осуществляется прежним способом. Несколько лет назад я обратил внимание на возможность осуществления нового принципа ускорения атомных частиц. Он получил название когерентного. По-видимому, возможны самые разнообразные способы осуществления когерентного ускорения. Этот принцип может быть использован и для ускорения заряженных частиц, и для ускорения квазинейтральных образований. Позвольте очень кратко рассказать о нескольких примерах этого нового механизма.

Представим себе малый по размерам сгусток зарядов, содержащий n положительных ионов. Представим себе далее, что этот сгусток мы обдуваем струей электронов, движущихся со скоростью v мимо сгустка. Легко показать, что в этом случае на каждую частицу сгустка будет действовать ускоряющая сила тем большая, чем больше число зарядов в сгустке. Поэтому эффективное ускоряющее поле, по крайней мере в принципе, может быть сделано очень большим, вплоть до многих миллионов электрон-вольт на сантиметр. Качественная оценка показывает, что коэффициент полезного действия такого механизма ускорения близок к единице. Естественно, что это очень заманчивая идея. Однако следует указать, что на пути ее осуществления имеются большие трудности, связанные главным образом с задачей получения больших токов релятивистских электронов.

Следующий во многих отношениях интересный вариант когерентного ускорения—это ускорение квазинейтральных сгустков. Представим себе квазинейтральный сгусток, состоящий из электронов и положительных ионов или электронов и позитронов. Направим на этот сгусток направленный поток электромагнитных волн, длина которых будет несколько больше размеров сгустка. Электромагнитное поле волны вызовет поляризационные колебания электронов сгустка. Часть импульса электромагнитного поля волны будет рассеяна этими колебаниями, в результате чего сгусток как целое получит импульс и начнет двигаться в направлении распространения волн. Очевидно, что этот вариант когерентного ускорения является, в сущности, своеобразным использованием (конечно, в несколько иных условиях) открытого П. Н. Лебедевым явления светового давления.

Важнейшее преимущество этого метода состоит в том, что при ускорении нейтральных сгустков плазмы может быть ускорено большее число частиц, чем при любых других способах ускорения. Когерентный метод в принципе позволяет думать и о возможности ускорения частиц до энергии 10^{12} электрон-вольт и даже выше. Нам кажется, что единственно возможным способом получить такие огромные энергии является способ ударного ускорения, при котором сгусток (или кольцо с током) релятивистских электронов сталкивается со сгустком или с токовым кольцом,

одержавшим ионы. Можно показать, что если масса релятивистского сгустка электронов будет во много раз больше массы сгустка, содержащего ионы, то при соударении сгустков ионам будет передана огромная ультрарелятивистская энергия.

Существуют и другие варианты когерентного ускорения, о которых я уже не буду упоминать.

Я смог дать, конечно, только очень беглую характеристику тех трех направлений, которые связаны с использованием плазмы и являются еще совершенно новыми для физики ускорителей.

В последнее время все более и более ясной делается важная роль плазменных процессов в природе. Несколько лет тому назад было обращено внимание на возможность генерации электромагнитного излучения, обусловленного эффектом Черенкова, а также ускорения заряженных частиц при движении потоков плазмы в магнитных полях звезд. Много раз делались попытки связать с этими процессами механизм генерации космических частиц. Существенную роль здесь может играть стохастический, вероятностный механизм ускорения. Известно, что в плазме газового разряда очень часто возникают быстрые частицы, энергия которых несравненно выше, чем приложенная к плазме разность потенциалов. Можно показать, что движение сгустков плазмы в неоднородных магнитных полях космических пространств должно сопровождаться генерацией релятивистских электронов. Вы видите, таким образом, что в астрофизике проблема ускорения заряженных частиц теснейшим образом связана со своеобразными особенностями плазмы.

Стремление достичь тех огромных энергий в миллионы миллиардов электрон-вольт, которые каким-то неизвестным нам механизмом генерируются в космических пространствах, использование этих искусственных снарядов для изучения природы элементарных частиц—таковы интереснейшие задачи, которые стоят перед физиками и инженерами, работающими в этой увлекательной области науки.
