

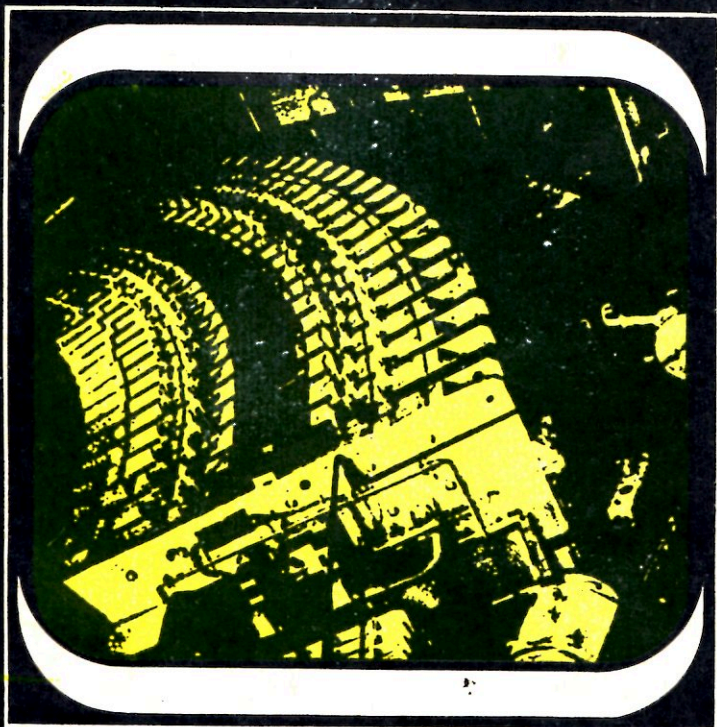
ФИЗИКА

ПОДПИСНАЯ НАУЧНО-ПОПУЛЯРНАЯ СЕРИЯ



1982/ 12

Л.Л. Гольдин
В.И. Николаев
ОБ УСКОРИТЕЛЯХ



ЗНАНИЕ

НОВОЕ В ЖИЗНИ, НАУКЕ, ТЕХНИКЕ

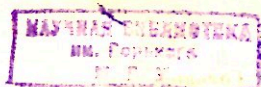
ФИЗИКА

12/1982

Издается ежемесячно с 1967 г.

ЗДН2
Г631

Л. Л. Гольдин,
В. И. Николаев

ОБ УСКОРИТЕЛЯХ

ББК 22.38

Г 63

Авторы: ГОЛЬДИН Лев Лазаревич — доктор физико-математических наук, профессор, руководитель отдела протонного синхротрона ИТЭФ, специалист в области ускорителей заряженных частиц.

Николаев Владимир Иванович — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник ИТЭФ, специалист в области ускорителей.

Рецензент: Лебедев А. Н. — доктор физико-математических наук, профессор.

Гольдин Л. Л., Николаев В. И.

Г 63 Об ускорителях. — М.: Знание, 1982. — 64 с. — (Новое в жизни, науке, технике. Сер. «Физика»; № 12).

11 к.

В брошюре рассказывается о назначении и принципах устройства ускорителей заряженных частиц и практическом их применении, о теории ускорителей. Описываются накопительные кольца и связанные с ними проблемы, опыт и перспективы создания сверхпроводящих ускорителей.

Брошюра рассчитана на читателей, интересующихся достижениями современной физики, лекторов и пропагандистов, слушателей и преподавателей народных университетов.

1704070000

ББК 22.38
530.4

© Издательство «Знание», 1982 г.

В течение последних десятилетий физика ядра и элементарных частиц в основном базируется на экспериментах, проводимых на ускорителях. За это время получены сотни новых ядер, исследованы их основные и возбужденные состояния. Открыты антипротоны и антинейтроны, стало ясно, что наряду с веществом существует и антивещество. Обнаружено более 300 элементарных частиц, создана их классификация. Предложена модель, согласно которой все способные к ядерным взаимодействиям элементарные частицы состоят из нескольких пра-частиц — кварков и глюонов, причем легкие частицы содержат кварки трех типов. Затем были обнаружены частицы, для описания структуры которых были введены еще два типа кварков. Есть все основания думать, что с ростом энергии ускорителей будет обнаружен и шестой кварк. Имеются ли в природе еще какие-либо кварки, пока неизвестно.

В последние годы создана новая замечательная физическая теория, объединяющая электромагнитные силы и силы так называемого «слабого» взаимодействия, ответственного за бета-распад ядер и за распад многих элементарных частиц. Создание этой теории представляет собой такой же крупный шаг в физику, как объединение электрических, магнитных и световых явлений в единую теорию электромагнетизма, проведенное Максвеллом в прошлом столетии. Новая теория связана с именами многих ученых, прежде всего Вайнберга и Салама. Сейчас делаются попытки построить теорию, объединяющую электромагнитные и «слабые» силы с ядерными и даже с гравитационными.

Каждый шаг в развитии физики элементарных частиц опирался на успехи ускорительной техники. Для исследования атомных ядер достаточно ускорителей на энергии несколько десятков мегаэлектронвольт. Чтобы

открыть антипротон и антинейтрон, потребовались энергии в несколько гигаэлектронвольт (несколько тысяч мегаэлектронвольт). Для обнаружения частиц, содержащих четвертый кварк («очарованный»), понадобились ускорители на энергии, измеряемые десятками ГэВ (гигаэлектронвольт), а для частиц, связанных с пятым кварком (соответствующее квантовое число принято называть «прелестью»), оказались нужны встречные кольца.

Новые физические теории для своей проверки и подтверждения требуют еще более высоких энергий. Теория электрослабого взаимодействия предсказывает существование ряда тяжелых частиц (Z - и W -бозоны, частицы Хиггса), для рождения которых недостаточна энергия существующих ускорителей и встречных колец. Возникает своего рода спираль. Каждое открытие приводит к новым фундаментальным предсказаниям, которые должны быть проверены. Для этого нужны все более мощные ускорители. На этих ускорителях делаются открытия, приводящие к новым предсказаниям, проверка которых требует еще больших энергий. Сейчас мы находимся где-то посередине этого пути, который привел и приводит — к беспрецедентно быстрому проникновению во все новые тайны природы. Указанный путь был бы невозможен без быстрого и успешного развития ускорительной техники.

Совершенствование ускорителей преобразует не только физику, но также технику и технологию. Ускорители для модификации свойств материалов (резина, полиэтилен и т. д.), ускорители для стерилизации (пищевая промышленность, животноводство, медицина), ускорители для наработки радиоактивных изотопов и для облучения больных (диагностика, терапия) — без таких ускорителей уже невозможно себе представить современное производство и современную клинику. При сооружении ускорителей, входящих в состав технологической цепи, возникают новые требования, такие, как надежность и экономичность. Внедрение ускорителей в производство оказывается многообещающим и выгодным.

В последние годы в ускорительной технике произошли разительные перемены. Размеры крупных ускорительных установок измеряются уже не метрами, а десятками километров. Работу современных ускорителей обеспечивают сотни людей. Крупные ускорители потреб-

ляют больше энергии, чем целые города (в качестве примера укажем, что электрическая мощность, потребляемая одной только первой очередью сооружаемого накопительного кольца LEP, составит около 200 МВт, в то время как мощность Днепрогэса после реконструкции равна ~ 560 МВт). На них занято больше компьютеров, чем в специальных вычислительных центрах, и т. д.

Ускорительная техника быстро совершенствуется.

Физики, исследующие элементарные частицы, все чаще прибегают к методу столкновения встречных пучков, когда генерация новых частиц происходит не на неподвижных мишенях, а при соударении летящих друг навстречу другу частиц, ускоренных до одной и той же — колоссальной — энергии. Все крупные ускорители строятся теперь по принципу жесткой фокусировки. Отживают свой век фазотроны — ускорители с постоянным магнитным и качающимся по частоте высокочастотным полем. Их заменяют изохронные циклотроны. Разработаны методы «охлаждения» пучков. От вакуума $\sim 10^{-6}$ Торр (в ускорителях) перешли к вакууму 10^{-10} — 10^{-11} Торр (в накопительных кольцах). В начальных участках линейных ускорителей старая техника уступает место новой, базирующейся на принципе пространственно однородной фокусировки. В средних и окончательных каскадах линейных ускорителей утверждаются резонаторы с боковой связью.

Предельные энергии ускорителей непрерывно растут. Двадцать лет назад в самых крупных установках протоны ускорялись до энергии около 30 ГэВ. При соударении таких протонов с неподвижными протонами и нейтронами освобождается энергия около 5 ГэВ. Сейчас при соударении протонных и антипротонных пучков в большом ускорительно-накопительном кольце SPS Европейского центра ядерных исследований (ЦЕРН, Швейцария) высвобождается энергия около 540 ГэВ, а через несколько лет в Лаборатории им. Э. Ферми (США) станут доступны энерговыделения ~ 2000 ГэВ.

Вместе с ростом энергии ускорителей растет и их стоимость. Сооружение крупных ускорителей становится непосильно отдельным странам. Гигантский ускорительный комплекс ЦЕРНа финансируется коллективом западноевропейских стран. Страны социалистического содружества создали свой центр — Объединенный ин-

ститут ядерных исследований в г. Дубне (СССР). Все чаще поднимаются разговоры о сооружении всемирного ускорителя.

Представление о масштабе и сложности современных ускорительных комплексов дает изображенная на рис. 1 схема устройства и расположения ускорительно-накопительного комплекса ЦЕРН. Протоны начинают свой путь в линейном ускорителе, ускоряются в промежуточном ускорителе — бустере и затем инжектируются в PS (протонный синхротрон на энергию 28 ГэВ). Пучок ускоренных протонов может быть выведен в экспериментальные залы или переведен в следующие кольца: в пересекающиеся накопительные кольца ISR (энергия 2×30 ГэВ) для организации протон-протонных соударений или в кольцо SPS для ускорения до энергии 500 ГэВ. При желании пучок, выпущенный из PS, может быть направлен на внешнюю мишень, чтобы генерировать в ней антипротоны, которые собираются в антипротонном накопителе. Антипротонный накопитель — это относительно небольшое кольцо, в котором накапливаются и охлаждаются пучки антипротонов перед тем, как они будут впрыснуты в PS, а затем переданы в SPS в качестве одного из встречных пучков. Другой пучок состоит из протонов. Рядом с PS располагается еще одно маленькое кольцо — замедлитель антипротонов LEAR, т. е. генератор антипротонов малых энергий (5—1700 МэВ).

Остается добавить, что в 1981 г. принято решение о сооружении в ЦЕРНе огромного встречного кольца LEP (с периметром ~ 30 км), в котором должны сталкиваться электроны и позитроны.

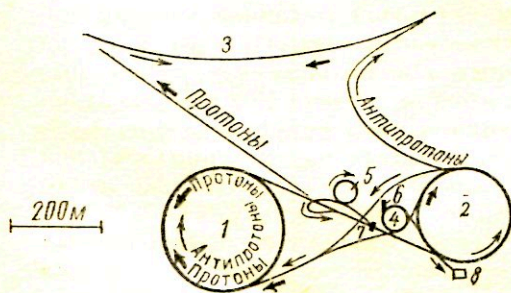


Рис. 1. Схема ускорительного комплекса ЦЕРН: 1 — накопительные кольца ISR; 2 — протонный синхротрон PS; 3 — большой протонный синхротрон SPS; 4 — бустер; 5 — антипротонный накопитель; 6 — линейный ускоритель; 7 — мишень для генерации антипротонов; 8 — замедлитель антипротонов

В небольшой брошюре нет возможности сколько-нибудь подробно обсуждать все вопросы, связанные с сооружением ускорителей и с их применением. В этом нет и надобности, поскольку большинство из них интересно только специалистам. Вместе с тем мы постараемся ввести читателя в круг основных идей и проблем современной физики ускорителей.

1. НАЗНАЧЕНИЕ И ЭНЕРГИЯ УСКОРИТЕЛЕЙ

Ускорители, используемые в научных целях, сооружаются для изучения элементарных частиц и атомных ядер. Назначение ускорителей определяет их энергию (т. е. энергию, до которой они могут ускорять частицы). Для проникновения в ядро положительно заряженные частицы должны преодолеть энергию электростатического отталкивания, которая равна

$$E_{э.с} = Z_1 \cdot Z_2 e^2 / R, \quad (1)$$

где Z_1 и Z_2 — заряды ускоренной частицы и бомбардируемого ядра (выраженные в зарядах электрона), R — сумма радиусов ядра и частицы, e — заряд электрона. Эту формулу удобнее записать в виде

$$E_{э.с} (\text{МэВ}) = 1,4 \frac{Z_1 Z_2}{R_{(\text{ферми})}} \quad (2)$$

(1 ферми = 10^{-13} см).

Из формулы (2) видно, что даже для проникновения протонов в ядра элементов, расположенных в середине таблицы Менделеева, необходимы энергии в несколько мегаэлектронвольт и лишь для протон-протонных соударений годятся энергии, меньшие 1 МэВ.

Согласно законам квантовой механики частицы могут проникать в ядро и туннельным способом, т. е. при энергиях, недостаточных для преодоления кулоновского барьера. Именно благодаря этому Кокрофт получил первые ядерные реакции взаимодействия протонов с ядрами лития. Однако вероятность подбарьерных реакций крайне мала, и для подробных исследований они не годятся.

Соударения тяжелых ядер, например бомбардировка урана $^{238}\text{U}_{92}$ ионами $^{12}\text{C}_6$ (так был получен нуклид $^{246}\text{Cf}_{98}$), происходят при существенно больших энергиях.

В приведенной реакции использовались ионы $^{12}\text{C}_6$, ускоренные до 120 МэВ. Чтобы получить такие частицы, нужны довольно крупные ускорители.

Для генерации элементарных частиц нужны еще большие энергии — порядка сотен мегаэлектронвольт (исключение составляют лишь электрон-позитронные пары, рождение которых может происходить уже при энергиях ~ 1 МэВ). Обратимся к одной из самых простых реакций — к рождению π -мезонов в протон-протонных соударениях: $p + p = p + p + \pi$.

Рассмотрим случай, когда энергии налетающего протона едва хватает для образования π -мезона, а на разлет образовавшихся частиц ее уже не остается. Даже в этом наиболее благоприятном случае кинетическая энергия налетающего протона должна существенно (более чем в 2 раза!) превосходить энергию покоя рождаемой частицы. Это происходит потому, что заметная часть энергии налетающей частицы дает вклад в общую энергию движения центра масс рассматриваемых частиц и «пропадает бесполезно».

Как уже отмечалось, в настоящий момент важно выяснить, существуют ли W - и Z -бозоны — гипотетические переносчики слабого взаимодействия — и ряд других частиц, предсказываемых современной теорией. Ближайшая задача ускорительной техники должна заключаться в том, чтобы научиться генерировать эти частицы (их масса составляет около 100 ГэВ). Для генерации таких частиц на обычных ускорителях (не на встречных кольцах!) нужна огромная энергия $5,5 \cdot 10^3$ ГэВ.

2. РАЗМЕРЫ УСКОРИТЕЛЕЙ

По своим конструктивным особенностям ускорители естественно делятся на два больших класса: линейные и циклические. Не вдаваясь в подробности, можно сказать, что в линейных ускорителях частицы движутся прямолинейно от источника к выводному устройству, а в циклических — по замкнутой кривой (или по спирали), совершая в процессе ускорения многие тысячи, а порой даже миллионы оборотов. Чтобы обеспечить такое движение частиц, в циклических ускорителях приходится применять сильные магнитные поля, создаваемые специальными магнитами.

Обратимся сначала к линейным ускорителям. Их

длина определяется средней напряженностью достигнутого без пробоя электрического поля.

Наибольший из работающих в настоящее время линейных ускорителей — ускоритель электронов Стэнфордского университета SLAC имеет длину ~ 3 км и ускоряет электроны до энергии 24 ГэВ¹. Этот ускоритель построен в 1966 г. Из-за высокой стоимости изготовления и больших технических сложностей нигде в мире таких ускорителей больше не строили.

В последние годы выяснилось, что линейные ускорители электронов на сверхвысокие энергии, несмотря на огромную стоимость (полная стоимость оборудования SLAC оценивается в 114 млн. долларов), обладают целым рядом достоинств, и вопрос о сооружении линейных ускорителей электронов на большие энергии вновь возник.

В протонных ускорителях в течение многих лет не удавалось получать среднюю напряженность больше 1 МВ на метр длины ускорителя, сейчас эта величина приближается к 1,5 МВ. Для того чтобы получить скромную по сегодняшним масштабам энергию 150 ГэВ, нужно построить линейный ускоритель длиной около 100 км. Вдоль всех этих 100 км необходимо установить мощные высокочастотные станции, создающие ускоряющее поле. Такие станции очень дороги в изготовлении и потребляют чрезвычайно много энергии. Поэтому создание линейных протонных ускорителей на сверхвысокие энергии оказывается экономически невыгодным. При ускорении протонов (и тяжелых ионов) линейные ускорители используются практически только в качестве инжекторов или в так называемых мезонных фабриках — ускорителях, рассчитанных на очень большие токи.

Для ускорения частиц до высоких энергий в настоящее время используются только кольцевые ускорители, в которых частицы многократно возвращаются к одним и тем же ускоряющим станциям с помощью поперечного магнитного поля. Возвращение ускоряемых частиц к прежним ускоряющим устройствам оказывается выгоднее, чем сооружение новых (количество уско-

¹ При использовании специальных резонаторов, накапливающих мощность, электроны могут быть ускорены до энергии 30 ГэВ при импульсном значении тока пучка 200 мА и до 33,4 ГэВ при более низком токе.

ренных частиц в единицу времени при этом, конечно, соответственно снижается).

В циклических ускорителях магнитное поле направлено перпендикулярно плоскости, в которой лежат траектории ускоряемых частиц. Поэтому в зазоре магнита на частицу действует сила, заставляющая ее двигаться по дуге окружности. Радиус окружности ρ зависит от импульса частицы и величины магнитного поля. Радиус окружности, индукция поля и импульс частиц связаны соотношением

$$pc[\text{эВ}] = 300 B\rho[\text{Гс} \cdot \text{см}]. \quad (3)$$

Здесь p — импульс, c — скорость света, B — индукция магнитного поля. В ускорителях, использующих железные магнитопроводы, индукция магнитного поля не может быть сделана выше ~ 20 кГс из-за насыщения железа. В протонных синхротронах часть длины кольца используется для установки ускоряющих промежутков, магнитных линз, корректирующих элементов и устройств для ввода и вывода пучка. Среднее магнитное поле оказывается при этом еще меньше — не более 12 кГс. С помощью формулы (3) нетрудно рассчитать, что ускоритель на энергию 30 ГэВ (например, протонный синхротрон PS в ЦЕРНе) должен иметь радиус ~ 100 м, ускоритель на 76 ГэВ (Протвино, СССР) — 200 м, ускоритель на 500 ГэВ (Лаборатория им. Ферми в США) — ~ 1500 м.

Кольцевые ускорители электронов еще крупнее, так как для них становятся существенными потери энергии на излучение. Эти потери в ускорителях, рассчитанных на энергии, измеряемые гигаэлектронвольтами, оказываются столь большими, что вырастают в целую проблему: частицы излучают на каждом обороте энергию порядка нескольких мегаэлектронвольт. Излучение энергии связано с их ускорением при движении по криволинейной траектории. С ростом радиуса ускорителя потери соответственно уменьшаются.

В ускорителях тяжелых частиц потери на излучение несущественны, поэтому радиусы кривизны траекторий таких частиц, а соответственно и размеры самих ускорителей могут быть значительно уменьшены. Это настолько снижает стоимость установки, что оказывается выгодным даже использование для получения высоких магнитных полей дорогих и сложных сверхпроводящих

магнитов. Магнитная индукция в сверхпроводящих магнитах может быть поднята до 50—60 кГс, и размеры ускорителей соответственно в 2,5—3 раза уменьшены. Электрическая мощность, затрачиваемая на возбуждение магнитного поля, тоже, конечно, резко падает. Современная криогенная техника достигла такой степени развития, что охлаждение до нескольких градусов Кельвина целого ускорителя оказывается не только возможно, но и экономически оправданно.

3. ВСТРЕЧНЫЕ ПУЧКИ И НАКОПИТЕЛИ

Известны только два подхода, которые могут позволить строить гигантские ускорители, пригодные для генерации самых тяжелых частиц, не накладывая непосильного бремени на бюджет страны. Один из них — сооружение уже упомянутых сверхпроводящих ускорителей, второй — применение встречных пучков. Идея встречных пучков заключается в том, чтобы сталкивать друг с другом частицы, движущиеся в противоположных направлениях. При этом центр масс системы неподвижен, и на его движение не затрачивается энергии.

На рис. 2 изображена доля энергии, которая полезно используется на рождение новых частиц в «обычных» ускорителях, т. е. в ускорителях, в которых ускоренная частица сталкивается с неподвижной. Из рисунка следует, что чем выше энергия частиц, тем меньшая ее доля используется полезно. Этот результат представляется вполне естественным, так как при быстром движении частица увеличивает свою массу, а при столкновении тяжелой быстрой частицы с легкой, неускоренной выделяется мало энергии.

Дело обстоит бы иначе, если бы можно было, например, сталки-

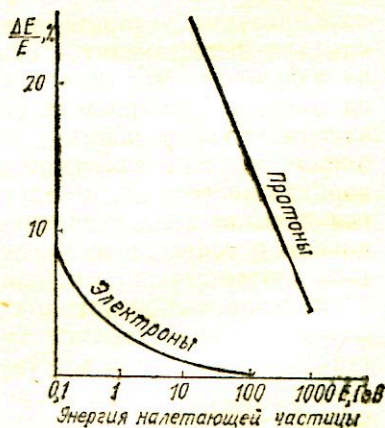


Рис. 2. Доля энергии, полезно используемой при соударении быстрой частицы с неподвижной

вать ускоренную тяжелую частицу с тяжелым же атомным ядром. Однако нуклоны внутри атомного ядра слишком слабо связаны, чтобы его можно было себе представлять как монолит. Выход из положения найден в столкновении частиц, ускоренных до одинаковой энергии во встречных направлениях.

При соударении частиц встречных пучков критическую роль играет их плотность — число частиц в 1 см^3 . Частицы в разреженных пучках могут многие сутки двигаться навстречу друг другу, почти не испытывая соударений. Из-за этого вероятность рождения новых частиц оказывается слишком низкой.

Эффективность встречных колец удобно характеризовать величиной, которая носит название «светимости» и обозначается буквой L ($\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$). Число реакций, происходящих в сталкивающихся пучках, по определению равно

$$N = L\sigma t,$$

где t — время, а σ — поперечное сечение изучаемой реакции. Величина светимости пропорциональна произведению количества частиц в обоих сталкивающихся пучках и обратно пропорциональна поперечному размеру пучков (основную роль играет размер в направлении вдоль магнитного поля). Светимость современных электронных ускорителей достигает $10^{32} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$. Это означает, что при сечении $1 \text{ мкб} = 10^{-30} \text{ см}^2$ в установке наблюдается 100 событий в секунду.

Первые установки со встречными пучками использовали для столкновений электронов и позитронов. Это связано с тем, что при движении электронов и позитронов в кольцевой камере их пучки вследствие излучения постепенно уменьшают свои поперечные размеры, что очень важно по двум причинам. Во-первых, в вакуумной камере освобождается место для впрыскивания все новых и новых частиц и, во-вторых, увеличивается плотность частиц в пучках, а следовательно, растет вероятность их взаимодействия.

Здесь следует сказать, что поперечные размеры электронных пучков определяются двумя физическими причинами — взаимным электрическим отталкиванием электронов и их излучением. В ускорителях на большие энергии (многие сотни мегаэлектронвольт или гигаэлектронвольт) электрическое взаимодействие электронов,

находящихся в одном пучке, оказывается ничтожным, электростатические силы их отталкивания почти полностью компенсируются притяжением параллельных токов. Фокусирующие линзы, имеющиеся во всяком ускорителе, легко компенсируют слабое остаточное электростатическое расталкивание.

В результате излучения размеры электронных пучков уменьшаются до малых долей миллиметра (дальнейшему сжатию пучков мешают квантовые флуктуации).

Во встречных кольцах соударения происходят не по всему периметру колец, а в «местах встречи», где пересекаются траектории пучков, движущихся друг другу навстречу. В местах встречи возникает сильное возмущение движения частиц из-за их электрического и магнитного взаимодействия. Этот эффект является основной причиной, препятствующей повышению светимости. Как уже отмечалось, при данных размерах пучка светимость пропорциональна квадрату числа частиц, в то время как число частиц, естественно, пропорционально первой степени времени их накопления. Поэтому выгодно, как можно дольше накапливать частицы перед встречей. Предел накоплению кладет отмеченное выше взаимодействие частиц встречных пучков между собой и связанное с ним возмущение их движения. Никаких методов борьбы с «эффектом встречи» не придумано.

Встречные пучки электронов и встречные электрон-позитронные пучки могут применяться с равным успехом. Соударения электронов и позитронов имеют некоторые преимущества, поскольку система сталкивающихся частиц обладает при этом нулевым лептонным числом². Позитроны отсутствуют в природе, поэтому их получают искусственно, генерируя электрон-позитронные пары в электрическом поле атомных ядер. Для генерации используются быстрые электроны (с энергией, заметно превосходящей порог реакции, т. е. 1 МэВ). После рождения позитроны, естественно, разлетаются во все стороны. Из них для формирования пучков от-

² Лептонным числом называется разность чисел, участвующих в реакции лептонов (электрон и электронное нейтрино; μ^- -мюон и его нейтрино; τ^- -лептон и его нейтрино) и антилептонов (позитрон и электронное антинейтрино, μ^+ -мюон и мюонное антинейтрино и т. д.). В реакции сохраняется не только суммарное лептонное число, но также лептонные числа каждого типа частиц (электронов и их нейтрино, мюонов и их нейтрино и т. д.) в отдельности.

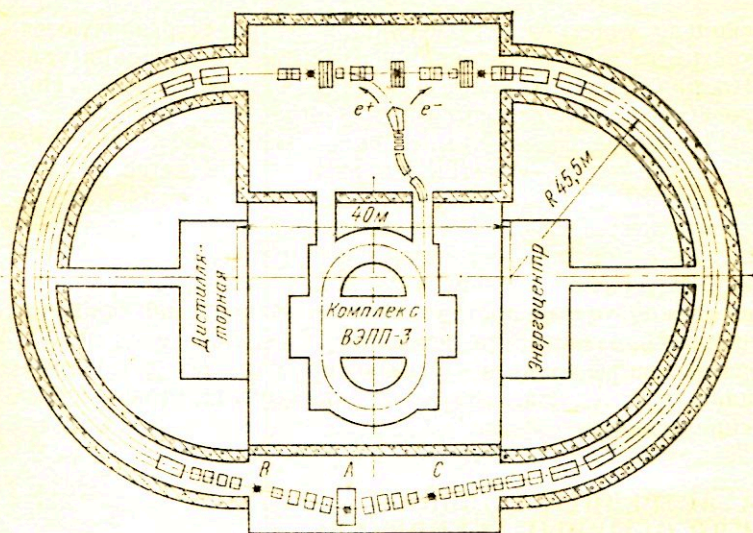


Рис. 3. Схема расположения ускорительно-накопительных колец ВЭПП-III и ВЭПП-IV: А, В, С — места встреч e^- и e^+

бирают частицы, летящие в нужном направлении. Таких частиц, конечно, немного, но их число можно увеличивать, продолжая процесс накопления достаточно долго.

В электрон-позитронных встречных пучках, как и во всех установках типа «частица — античастица», и ускорение и встречи частиц происходят в одном кольце. Частицы и античастицы движутся в нем в противоположных направлениях, ускоряются и заворачиваются одними и теми же электрическими и магнитными полями. Задача в этом случае заключается не в том, чтобы обеспечить их одновременное ускорение и удержание в вакуумной камере, а в том, чтобы развести пучки друг от друга на предварительных стадиях и помешать непрерывному — по кольцу — взаимопересечению. Обычно это делают с помощью электростатического поля, смещающего электроны и позитроны от центра вакуумной камеры в противоположные стороны.

Для создания встречных пучков из частиц одного сорта необходимы два кольца, в которых частицы движутся навстречу друг другу. Кольца должны иметь не-

сколько участков пересечения, в которых организуются «встречи» и устанавливается измерительная аппаратура. На рис. 3 изображены встречные кольца ВЭПП в Новосибирске (электроны и позитроны).

Наибольшие из ныне работающих электрон-позитронных колец — PETRA и PEP — находятся в Гамбурге (ФРГ) и Стэнфорде (США). Эти кольца рассчитаны на энергии 18—19 ГэВ. Их периметры составляют 2,3 км, а средние электрические мощности равны 8 и 10 МВт. Использование этих колец открывает широкие возможности для постановки опытов при очень больших энергиях, в частности, позволяет тщательно исследовать семейство мезонов, в состав которых входят уже упоминавшиеся недавно открытые кварки (квантовое число «ирелесь»).

4. ВСТРЕЧНЫЕ КОЛЬЦА ИЛИ ОБЫЧНЫЕ УСКОРИТЕЛИ?

После того как мы подробно обсудили достоинства встречных колец, вернемся к обычным ускорителям, чтобы понять, осталась ли у них достаточная область применимости. Основное преимущество обычных ускорителей перед встречными кольцами заключается в количестве регистрируемых событий. Обычные интенсивности пучков в ускорителях приближаются сейчас к 10^{13} частиц в секунду. Почти все эти частицы реагируют с мишенями, т. е. полезно используются. Это во всяком случае так, если речь идет о ядерно-активных частицах — протонах и легких ядрах, для которых вероятность избежать соударения с ядрами мишени существенно меньше единицы.

В накопительных кольцах столкновения происходят значительно реже. При типичных для протонов значениях светимости $L = 10^{31}$ см⁻²с⁻¹ и поперечного сечения реакции $\sigma = 40$ мб число событий в секунду $N = 10^{31} \cdot 40 \cdot 10^{-27} = 4 \cdot 10^5$ вместо $\sim 10^{13}$. Оно уменьшается, следовательно, в 10^7 раз!

Таким образом, накопительные кольца позволяют проникать в мир сверхвысоких энергий, но дают возможность наблюдать только самые частые, самые обычные в этом мире события. В обычных ускорителях не достигаются столь высокие энергии, зато с их по-

мощью можно изучать детали реакций или видеть редкие события. Накопительные кольца как бы прокалывают булавкой дырку в стене, отделяющей «обычный» мир от мира сверхвысоких энергий. К сожалению, в эту дырочку многого не увидишь. Ускорители обычного типа открывают перед экспериментатором широкую дверь, сквозь которую он свободно проходит со всеми своими приборами. Такая работа, конечно, намного продуктивнее, но ведь как важно порой заглянуть в неведомое — даже через дырочку!

Уместно задать вопрос, правильно ли сформулирован заголовок этого раздела. Действительно ли «нормальные ускорители или встречные кольца»? Может быть, не «или встречные кольца», а «и встречные кольца»? Вопрос, конечно, задан правильно. При огромных размерах — и стоимости — ускорителей строить отдельно ускорители, а отдельно — встречные кольца — слишком дорого. В последнее время ускорители строятся так, чтобы они могли также служить в качестве встречного (для частиц и античастиц) или одного из встречных колец. Так сделан ускоритель SPS на энергию 400 ГэВ в ЦЕРНе, так строится и даблер — сверхпроводящий ускоритель на энергию 1000 ГэВ — в Лаборатории им. Э. Ферми в США, так проектируется ускорительно-накопительный комплекс (УНК) в Серпухове.

Тут необходимо сделать важное замечание. Мы уже выяснили, что сами по себе — из-за излучения — сжимаются только электронные (и позитронные) пучки. Пучки других частиц в процессе ускорения сжимаются слабо, а при накоплении даже разбухают. В результате этого применение встречных колец для опытов с частицами и античастицами (исключая электроны и позитроны) долгое время казалось невозможным. Кроме электрон-позитронных колец, были построены только кольца ISR для протон-протонных соударений в ЦЕРНе и начато сооружение гигантских (400×400 ГэВ) протон-протонных накопительных колец Isabelle в Брукхейвене (США). Однако позже были придуманы методы искусственного уменьшения поперечных размеров пучков любых частиц, и в ускорителях PS и SPS в ЦЕРНе уже изучаются события, происходящие при соударениях протонных и антипротонных встречных пучков.

5. ТЕОРЕМА ЛИУВИЛЛЯ И ОХЛАЖДЕНИЕ ПУЧКОВ

Путь, проходимый частицами в кольцевых ускорителях, очень велик. Он составляет сотни тысяч километров в ускорителях обычного типа и сотни миллиардов километров в накопительных кольцах. Этот путь частицы должны проделать в вакуумной камере с поперечными размерами не более 10×15 см². Ясно, что невозможно так точно «прицелиться», чтобы обеспечить правильные координаты частиц во все время движения. Нужны силы, притягивающие частицу к основной орбите и автоматически поправляющие ее движение. Эти силы создаются магнитными линзами, образующими систему фокусировки, без которой не может работать ни один современный ускоритель.

Под действием фокусирующих сил частицы в камере совершают колебания — в фазовой плоскости³ они описывают некоторый эллипс. Выбором масштабов этот эллипс можно превратить в круг. За время оборота по орбите ускорителя частица успевает несколько раз описать круг своего фазового движения. Соответствующее число называется «числом колебаний на один оборот» Q . В современных ускорителях Q составляет от 9 до 60.

Движение частиц в ускорителе подчиняется теореме Лиувилля. В этой теореме рассматривается многомерное пространство, по осям которого отложены все координаты и все импульсы, характеризующие все степени свободы рассматриваемой физической системы. В том случае, если частицы не взаимодействуют друг с другом, каждая из них представляет собой отдельную систему, и фазовое пространство шестимерно. Две координаты описывают смещение частицы от расчетной орбиты. Так как во всех крупных ускорителях эти орбиты располагаются в плоскости (она носит название медианной), то в качестве этих двух координат обычно рассматривают z — смещение частицы от медианной плоскости и r — ее смещение в этой плоскости. Кроме того, существенна, конечно, координата φ , величина которой

³ Фазовой называется плоскость, в которой введены две координатные оси. По одной из них откладывается расстояние частицы от оси вакуумной камеры, а по другой — импульс частицы (или угол, составляемый ее траекторией этой осью).

говорит о том, опережает частица изменение ускоряющего электрического поля или отстает от него. Для симметрии лучше и в этом случае рассматривать линейную координату s , отсчитываемую вдоль расчетной траектории. Этим трем координатам соответствуют три импульса — p_z , p_r и p_s . Последний обычно просто называют импульсом, так как продольная, направленная по движению пучка, составляющая импульса, конечно, во много раз превосходит другие его составляющие.

Указанные шесть переменных естественно разбиваются на две группы: на координаты, описывающие поперечное (четыре) и продольное (две) движение частицы. Конечно, между этими видами движения имеется связь, но ее выяснение представляет собой довольно сложную задачу и не очень существенно для нашего рассмотрения.

Частицы, образующие ускоряемый пучок, занимают в поперечной фазовой плоскости некоторый четырехмерный объем (фазовый). Согласно теореме Лиувилля в отсутствие трения и излучения этот объем в процессе ускорения частиц не меняется (на самом деле из-за различных шумов и помех фазовый объем, занятый частицами, приобретает сложную форму, так что эффективно он несколько увеличивается со временем).

Если движения частицы в пучке по r и по z не связаны между собой, то тогда согласно теореме Лиувилля должны сохраняться площади, занимаемые пучком в плоскостях r, p_r ; z, p_z и s, p_s в отдельности.

Наибольший интерес представляет не распределение частиц пучка по координатам и импульсам r, p_r ; z, p_z , а их распределение по линейным и угловым координатам — по r и α_r , z и α_z соответственно, где α_r и α_z — углы, составляемые траекториями частиц с равновесной орбитой.

Эти углы приближенно можно представить отношением импульсов:

$$\alpha_r \simeq \frac{p_r}{p_s} \quad \text{и} \quad \alpha_z \simeq \frac{p_z}{p_s} .$$

По мере ускорения частиц в ускорителе их энергия резко возрастает, а число Q не меняется. При этом фазовый объем, занимаемый пучком частиц, в координатах

r , p_r и z , p_z не изменяется, а в наших координатах r , α_r и z , α_z уменьшается. Уменьшение связано с тем, что постоянные по величине импульсы p_r и p_z делятся на растущий импульс p_s . Форма фазовой траектории во время ускорения не меняется. Площадь фазового круга поэтому уменьшается в процессе ускорения в $p_s / (p_s)_0$, т. е. в соответствии с формулой (3) в V/V_0 раз, где V — индукция магнитного поля, пропорциональная импульсу частиц, а V_0 — начальное значение индукции. Таким образом, во время движения размеры пучка уменьшаются как $\sqrt{V/V_0}$.

Мы получили очень неприятный результат. Измеренная в плоскости «координата—угол» площадь, занятая пучком частиц, уменьшается только по мере ускорения пучка. В рабочий объем, уже занятый пучком, в силу теоремы Лиувилля нельзя поместить новых частиц, не потеряв старых. Таким образом, мы приходим к серьезному противоречию: метод встречных пучков эффективен только при плотных пучках, а увеличить эту плотность можно лишь незначительно.

Особенно плохо обстоит дело, если в качестве одного из встречных пучков нужно использовать частицы, рожденные в ядерных реакциях, например антипротоны. В реакциях они рождаются под всевозможными углами и с большим разбросом по энергии, а значит, с малой плотностью в фазовом пространстве. Поэтому сооружение ускорителей с протон-антипротонными встречными пучками долгое время казалось безнадежной задачей, пока из этой ситуации не было придумано сразу два выхода — метод электронного охлаждения (Будкер) и метод стохастического затухания (Ван-дер-Меер).

Метод электронного охлаждения заключается в следующем. Параллельно пучку, который должен быть сжат (или, как чаще говорят, охлажден), например антипротонному пучку, пропускается «холодный» пучок электронов, имеющих ту же скорость, что и охлаждаемый пучок. (В соответствии с общепринятой терминологией холодным называется пучок, частицы которого медленно двигаются друг относительно друга. Все частицы вместе (как целое), могут при этом двигаться сколь угодно быстро.) Столкновения между «холодными» электронами и «горячими» частицами основного пучка приводят к выравниванию их температур; анти-

протонный пучок сжимается, и в камере остается место, куда без нарушения теоремы Лиувилля можно впустить новые антипротоны, снова их охладить и т. д. Таким образом, можно получить пучки высокой плотности. Этот метод был с успехом испытан в Институте ядерной физики Сибирского отделения АН СССР.

Метод стохастического охлаждения основан на том, что в камере накопительного кольца обращается конечное число частиц. Пусть вначале речь идет всего об одной частице. Ее траектория может быть измерена невозмущающими движения датчиками, например электродами, на которые эта частица наводит электрические заряды. Сигнал с измерительных электродов можно подвести к толкающему устройству, которое направит частицу по равновесной орбите.

Рассмотренный случай ничем не отличается от случая, когда в камере обращается много частиц, но не на столько много, чтобы рядом с измеряющим электродом (и соответственно толкателем) пролетало несколько частиц одновременно.

Если частиц еще больше и у измерительного электрода оказывается несколько или даже сразу много частиц, то электрод измеряет положение их электрического центра, а толкатель исправляет движение этого центра. При этом движение частиц в среднем улучшается, пучок несколько «охлаждается», но не в полной мере. Более того, исправляя положение электрического центра, мы можем ухудшать траектории отдельных частиц. Часть из них при этом может быть даже потеряна, но пучок в целом будет охлаждаться.

В процессе ускорения одни частицы обгоняют другие, так что набор частиц, находящихся у измерительного электрода, непрерывно изменяется. Это способствует охлаждению пучка. Как ясно из сказанного, эффективность метода стохастического охлаждения тем выше, чем меньше частиц находится в камере (одновременно исправляется одна координата, так что общее улучшение зависит от того, сколько при этом имеется других, неисправляемых, координат).

Метод стохастического охлаждения антипротонного пучка успешно испытан в ЦЕРНе и привел к постановке первых опытов по столкновениям протонных и антипротонов.

6. СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ УСКОРИТЕЛИ

Как мы уже выяснили, размеры кольцевых ускорителей определяются величиной достижимого магнитного поля. При нынешнем состоянии техники крупные ускорители требуют многокилометровых тоннелей, проложенных глубоко под землей. К тоннелям примыкают подземные экспериментальные залы. В тоннелях располагаются заворачивающие магниты и ускоряющие станции, потребляющие десятки если не сотни мегаватт электроэнергии. Переход к сверхпроводящей технике решает сразу две задачи: периметр ускорителей уменьшается в несколько раз и резко падает потребление электроэнергии. При этом возникают, конечно, новые проблемы, главная из которых заключается в том, что приходится охлаждать до гелиевых температур огромные массы, расположенные на больших площадях.

Идея сверхпроводящих ускорителей стала пробивать себе дорогу после того, как в 50-х годах были получены соединения $NbTi$ и Nb_3Sn , способные сохранять сверхпроводящие свойства до полей порядка 90 кГс (известные до этого сверхпроводники возвращались в нормальное состояние уже при нескольких сотнях гаусс). После этого появилась возможность поднять поле в заворачивающих магнитах с 20 до 50 кГс.

Опишем для иллюстрации проект УНК. Его основное кольцо рассчитано на ускорение протонов до энергии 3000 ГэВ. Расчетная величина поля $5 \cdot 10^4$ Гс. Кольцевой сверхпроводящий заворачивающий магнит, охватывающий вакуумную камеру с периметром 19,3 км, составлен из сверхпроводящих магнитных блоков. Основной кольцевой ускоритель получает частицы из бустера — вспомогательного ускорителя с обычными «железными» магнитами (400 ГэВ). Эти магниты образуют второй кольцевой ускоритель, расположенный в том же тоннеле (рис. 4). Сверхпроводящие магнитные блоки (рис. 5) будут иметь длину 6 м и охлаждаться гелием до 4 К.

Сделать магниты, способные выдержать охлаждение до столь низких температур, отнюдь не просто. Магнитные поля, применяемые в ускорителях, должны быть выдержаны с точностью несколько сотых долей процента.

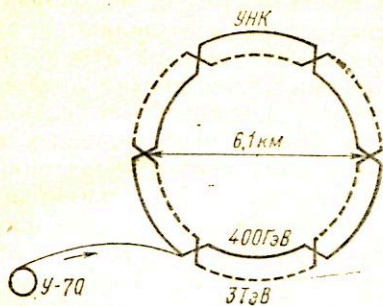


Рис. 4. Схема расположения ускорительных колец УНК

В то же время размеры магнитов при охлаждении сильно изменяются — их длина уменьшается на несколько сантиметров. Конструкция сверхпроводящих магнитов усложняется из-за огромных сил, действующих на сверхпроводники со стороны магнитного поля: эти силы составляют многие тонны. Сверхпроводящая обмотка магнитных блоков наматывается из многожильного провода NbTi, зажатого в медной матрице. Толщина нитей сверхпроводника равна 10 мкм, их число в одной жиле — 2970. Для уменьшения токов Фуко, возникающих при изменении магнитного поля, проводники в жиле плотно скручиваются.

Изготовление сверхпроводящих магнитов для уско-

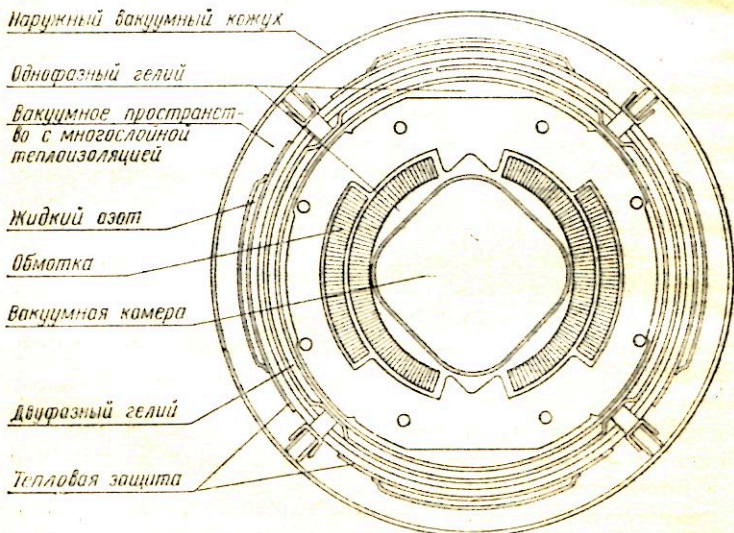


Рис. 5. Схема устройства внутренней части дипольного сверхпроводящего магнита

рителей является сложным делом и требует высокоразвитой технологии. Магнитные блоки изготавливаются из двух половин. Перед окончательной сборкой эти половинки сжимаются прецизионными многотонными прессами и в сжатом виде свариваются или скрепляются болтами. 350 первых магнитных блоков, изготовленных и установленных в пробную эксплуатацию в Лаборатории им. Э. Ферми (США), разрушилось под действием динамических нагрузок. На сверхпроводящих встречных кольцах Isabelle (Брукхейвен, США) конструкция магнитных блоков несколько раз изменялась. Уже на нескольких конференциях по ускорителям (они происходят раз в 2 года) мы слышали, что, наконец, отработана конструкция, пригодная для передачи в промышленность, но на каждой следующей конференции мы вновь это слышим.

Ввод сверхпроводящих магнитных блоков в работу требует так называемой тренировки. Первые попытки получить в магнитных блоках высокое поле кончаются обычно внезапными переходами сверхпроводника в нормальное состояние. После каждого такого перехода достижимая величина поля несколько увеличивается. При конструировании сверхпроводящих магнитов и систем их питания такие внезапные переходы обмотки в нормальное состояние должны заранее приниматься во внимание. Запасенная в магнитном поле энергия может составлять сотни мегаджоулей. Мгновенное выделение этой энергии в виде тепла при потере сверхпроводимости грозит серьезными неприятностями. Обычно заботятся о том, чтобы большая часть этой энергии выделялась в специально предусмотренных резисторах. Медная матрица, в которой расположены сверхпроводящие нити, служит для уменьшения доли энергии, выделяющейся в обмотке.

Другая важная проблема, возникающая при изготовлении сверхпроводящих магнитов, заключается в том, что они должны мало отличаться друг от друга. В ускорителях с железным ярмом расположение обмотки слабо влияет на распределение магнитного поля в рабочем зазоре и не ограничено жесткими допусками, так что вся проблема идентичности магнитных блоков сводится к обработке полюсов — сравнительно простой технологической операции. Не представляет серьезной проблемы обработка полюса с точностью 100 или даже не-

сколько десятков микрон, что оказывается вполне достаточным.

В сверхпроводящих магнитах правильность конфигурации магнитного поля связана именно с расположением обмотки. В УНК для их установки принят допуск 50 мкм. Выдержать этот допуск в напряженной, охлаждаемой до низких температур конструкции оказывается невероятно трудно.

Серьезную проблему представляет и выбор материала. NbTi более технологичен, но при тех же индукциях требует более низких температур, чем Nb₃Sn. Сплав ниобия с оловом позволяет — при тех же температурах — получить в 1,5 раза большие индукции, но хрупок и не технологичен: при толщине 0,2 мм его нельзя сгибать с радиусом менее 5 см. В настоящее время во всех действующих сверхпроводящих магнитах используется проволока NbTi.

Криогенные отделения сверхпроводящих ускорителей вырастают в гигантские системы. Так, гелиевый ожижитель, который должен охлаждать сверхпроводящий ускоритель на 1 ТэВ Лаборатория им. Э. Ферми, имеет производительность 4000 л жидкого гелия в час. Главную проблему представляет борьба с теплом, натекающим извне, и с теплом, выделяющимся в охлажденных материалах вследствие радиационных потерь. Если при температуре 4 К в охлажденном материале выделилось некоторое количество тепла, то энергия, которая должна быть затрачена для его удаления, составляет около 500 Вт на 1 Вт. При более низких температурах это соотношение еще ухудшается.

7. ТИПЫ УСКОРИТЕЛЕЙ

По принципу устройства и по конструкции ускорители делятся на несколько семейств. Мы приступаем к их рассмотрению. Неспециалистам нет нужды вдаваться в детали устройства ускорителей разных типов. Поэтому мы расскажем о них в общих чертах, уделяя меньше внимания более старым и подробнее останавливаясь на более новых конструкциях и идеях.

7.1. Ускорители прямого действия

Наиболее просты по принципу работы ускорители прямого действия, в которых частицы набирают энер-

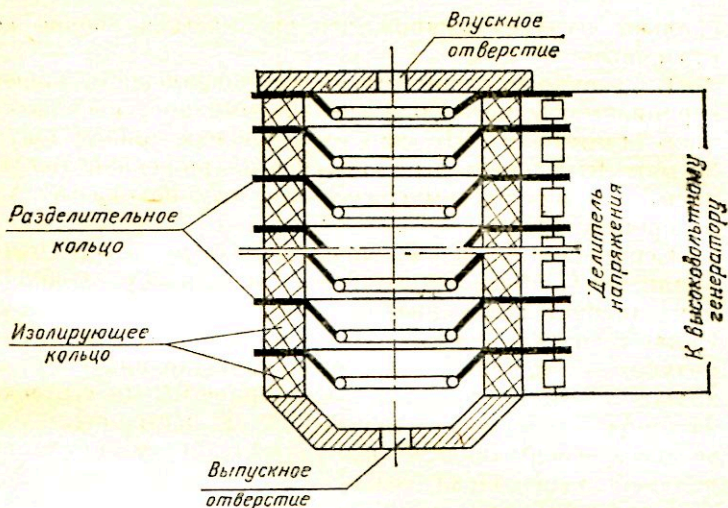


Рис. 6. Ускоряющая трубка

гию, проходя через вакуумированную трубку, к торцам которой приложено постоянное напряжение. Таков ускоритель Кокрофта—Уолтона, на котором впервые были получены ядерные реакции с помощью протонов, ускоренных до 200 кэВ. В качестве генератора высокого напряжения в таких ускорителях применяется каскадный выпрямитель. Выпрямители такого типа и сейчас используются довольно часто: для питания источников и первых каскадов — форнижекторов — более крупных ускорителей, а также для искровых камер и других физических устройств, нуждающихся в повышенном напряжении. Частицы с более высокими энергиями можно получать с помощью электростатических генераторов или, как их еще называют, генераторов Ван-де-Графа. Ускоряющая трубка (рис. 6) электростатического генератора обычно изготавливается из фарфоровых колец, разделенных металлическими прокладками. К торцам трубки прикладываются предельные, а к прокладкам — промежуточные напряжения, которые снимаются с высокоомного делителя, включенного между высоковольтным электродом и землей. С помощью прокладок, соединенных с делителем напряжения, удается выровнять распределение электрического поля в трубке, а значит, уменьшить вероятность электрического пробоя.

Высоковольтный электрод электростатического генератора заряжается при помощи резиновой или пластиковой ленты, проходящей из низковольтной части генератора в высоковольтную. В низковольтной части на эту ленту наносятся заряды, стекающие со специальных иголок: между ними и лентой поддерживается коронный разряд. Лента быстро движется и переносит попавшие на нее заряды в высоковольтную часть генератора, совершая работу против электрических сил. В высоковольтной части заряды снимаются иглками с ленты, увеличивая потенциал высоковольтного электрода.

С помощью электростатических генераторов удается достигать напряжений около 10 МВ. Для предотвращения разряда весь генератор устанавливается под колпак и заполняется тщательно высушенным газом высокого давления. Для увеличения электрической прочности газа разработаны специальные добавки (элегаз).

В обычных электростатических ускорителях источник газа находится при высоком напряжении, а выходной конец ускорительной трубки — при потенциале земли, что позволяет заземлять измерительную аппаратуру. В последнее время заметное распространение получили генераторы тандемного типа. Высоковольтная (несущая положительный потенциал) часть таких генераторов находится посередине ускорительной трубки. Оба ее торца заземляются. С одного из торцов в трубку напускаются отрицательные ионы нужного газа (обычно водорода). Такие ионы представляют собой атом водорода, содержащий второй — лишний — электрон. Проходя до середины трубки, ионы ускоряются ее электрическим полем до потенциала высоковольтного электрода. Затем ионы пропускаются через тонкую фольгу и теряют свои электроны. Из несущих отрицательный заряд ионов водорода образуются «голые» положительно заряженные протоны. Они отталкиваются тем же высоковольтным электродом, которым раньше притягивались, и приходят ко второму концу трубки с удвоенной энергией.

Электростатические генераторы не позволяют получать ни больших токов, ни высоких напряжений (предельные параметры в непрерывном режиме — около 10 мкА и 10 МВ). Их продолжают применять из-за уникальной по сравнению с другими ускорителями монохроматичности пучка ($\Delta E/E \sim 10^{-4}$) и точности, с которой может поддерживаться его энергия ($\sim 10^{-2}\%$).

7.2. Линейные ускорители

С помощью линейных ускорителей можно ускорять частицы до больших — в принципе до сколь угодно больших — энергий. Линейные ускорители применяются для ускорения как электронов, так и тяжелых частиц.

Протонные и электронные линейные ускорители, вообще говоря, существенно отличаются друг от друга и поэтому должны рассматриваться отдельно. Это отличие связано с тем, что в линейных ускорителях скорости протонов почти всегда оказываются существенно меньше скорости света, а скорости электронов к ней близки. Так, для протонов с энергией 50 МэВ (типичная энергия на выходе линейных ускорителей, работающих в качестве инжекторов больших кольцевых машин) скорость протонов составляет 31% скорости света, в то время как скорость электронов даже при сравнительно небольшой энергии 2 МэВ составляет ~98% от скорости света.

Простейший линейный ускоритель протонов состоит из цепи установленных друг за другом металлических трубок (рис. 7). В промежутках между трубками создается высокочастотное продольное электрическое поле, ускоряющее заряженные частицы. Эти пространства называются ускоряющими промежутками. Внутри трубок, как и внутри всякой проводящей оболочки, электрическое поле отсутствует. Поэтому, проходя сквозь них, частицы не меняют своей скорости. Эти трубки называют пролетными трубками или трубками дрейфа.

Частицы в линейных ускорителях движутся сгустками. За время прохождения сгустка через зазор ускоряющее поле изменяется несущественно. Зато когда поле меняет знак и из ускоряющего становится тормозящим, частицы находятся внутри трубок дрейфа. Таким образом, благодаря трубкам дрейфа, экранирующим частицы от поля в «неподходящие» моменты времени, ускоряемые частицы всегда находятся в поле, имеющем одно и то же — ускоряющее — направление. Так удается ускорять частицы до больших энергий с помощью небольших переменных напряжений.

Длина трубок l , скорость частиц v и частота поля должны быть надлежащим образом согласованы. Не-

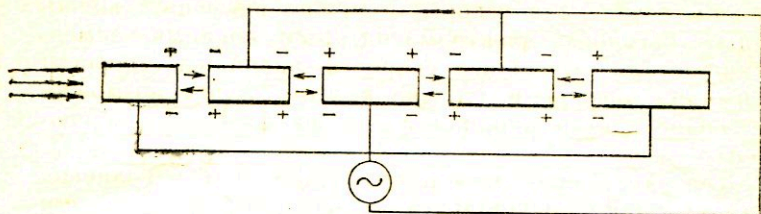


Рис. 7. Схема устройства линейного ускорителя (верхние и нижние знаки напряжения сменяют друг друга)

трудно показать, что соответствующее условие может быть представлено в виде

$$l = \frac{v}{c} \frac{\lambda}{2} (2k + 1), \quad (4)$$

где λ — длина волны электромагнитных колебаний, заряжающих трубки дрейфа, c — скорость света, а k — любое целое число (обычно выбирают $k=0$).

Перезаряжать трубки дрейфа можно, присоединяя их попеременно к полюсам высокочастотного генератора. При низких частотах так и поступают (ускорители Видероз). Из формулы (4) ясно, что низкие частоты имеют смысл применять только при небольших v/c . При этом большие длины волн еще не приводят к неприемлемо длинным трубкам дрейфа.

При увеличении v/c приходится применять все большие частоты ($\lambda=1-1,5$ м для ускорения протонов до энергий, измеряемых десятками мегаэлектронвольт). В этом случае становится выгодно помещать свободные трубки дрейфа в длинном резонаторе электромагнитных колебаний — в голом цилиндре с проводящими стенками (ускорители Альвареца). Длина таких резонаторов измеряется десятками метров, т. е. большим числом половин.

При ускорении частиц до скоростей, приближающихся к c , отказываются от трубок дрейфа и пользуются цепью расположенных друг за другом коротких резонаторов. Так построен ускоритель LAMPF (Лос-Аламос, США). Эти резонаторы так связаны друг с другом, что между ними обеспечены нужные фазовые соотношения и ускорение частиц происходит непрерывно.

В конструкции линейных ускорителей, используемых для ускорения электронов, учитывается то обстоятельство, что, начиная с нескольких мегаэлектронвольт,

скорость электронов мало отличается от скорости света. В этом случае для ускорения можно применять волноводы с бегущими электромагнитными волнами, замедленными так, чтобы их скорости равнялись скорости движения электрона (только в этом случае возможно движение частиц в одной и той же фазе — ускоряющей).

Для замедления электромагнитных волн в волноводы устанавливают специальные диафрагмы, делящие его на отдельные ячейки. Такие ячейки можно рассматривать как полые резонаторы, в которых бегущая волна возбуждает электромагнитное поле. Вследствие неизбежных потерь в стенках амплитуда электромагнитной волны по длине волновода непрерывно падает. Поэтому отдельные ячейки подпитываются от специальных генераторов, расположенных по всей длине ускорителя. На ускорителе SLAC таких генераторов более 80 тыс.

Линейные ускорители стоят очень дорого. Электромагнитное поле в таких ускорителях должно обеспечивать ускорение около 1—1,5 МэВ на метр для протонных ускорителей и ~ 10 МэВ на метр — для электронных ускорителей с бегущей волной. Чтобы создать такое поле, нужны мощные высокочастотные генераторы, непрерывно расставленные вдоль всего ускорителя (если уменьшить величину поля, то мощность станций, конечно, падает, но общая длина установки растет, так что стоимость ускорителя еще более увеличивается). Поэтому при ускорении тяжелых частиц, как уже говорилось, предпочитают пользоваться ускорителями циклического типа, в которых частицы многократно возвращаются к одному и тому же ускоряющему промежутку. Линейные ускорители используются только для первоначального разгона частиц перед их инжекцией в циклический ускоритель или при необходимости иметь пучки, содержащие особенно большое число частиц (при средних токах, превосходящих несколько микроампер), для чего циклические ускорители непригодны.

Самый крупный из построенных к настоящему времени протонных линейных ускорителей работает в Лос-Аламосе. Он ускоряет протоны до энергии 800 МэВ при токе около 1 мА (мощность пучка $\sim 0,8$ МВт!).

Для ускорения электронов линейные ускорители оказываются конкурентоспособными и при более высоких энергиях. Это связано с тем, что электроны, движущиеся

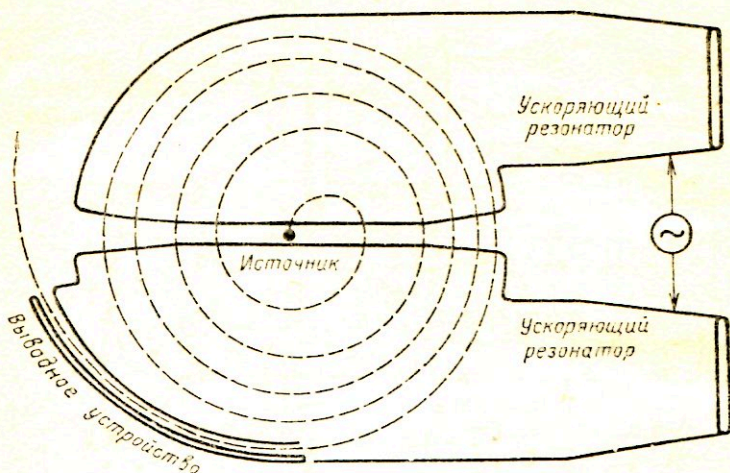


Рис. 8. Схема движения частицы в камере циклотрона

ся по кругу, излучают много энергии, которая должна непрерывно восполняться.

При больших ускоряемых токах линейные ускорители обладают сравнительно высоким КПД (по оценкам — до 50%!). Это открывает дорогу для их технического применения.

7.3. Циклические ускорители

Простейшим представителем — и родоначальником — циклических ускорителей является циклотрон. Вакуумная камера циклотрона помещена в однородное (точнее говоря, в почти однородное постоянное во времени магнитное поле⁴ перпендикулярное крышкам вакуумной камеры.

Ускоряющая система циклотрона состоит из двух электродов, называемых дуантами, имеющих форму половин полого плоского цилиндра, разрезанного по оси. Дуанты, раздвинутые так, что между ними образуется ускоряющий зазор, играют ту же роль, что и трубки дрейфа в линейных ускорителях.

В соответствии с (3), траектории частиц, ускоряемых в циклотроне, имеют вид раскручивающейся спирали (рис. 8): в постоянном магнитном поле радиус траек-

⁴ Однородное магнитное поле не обеспечивает фокусировки частиц в направлении вдоль поля.

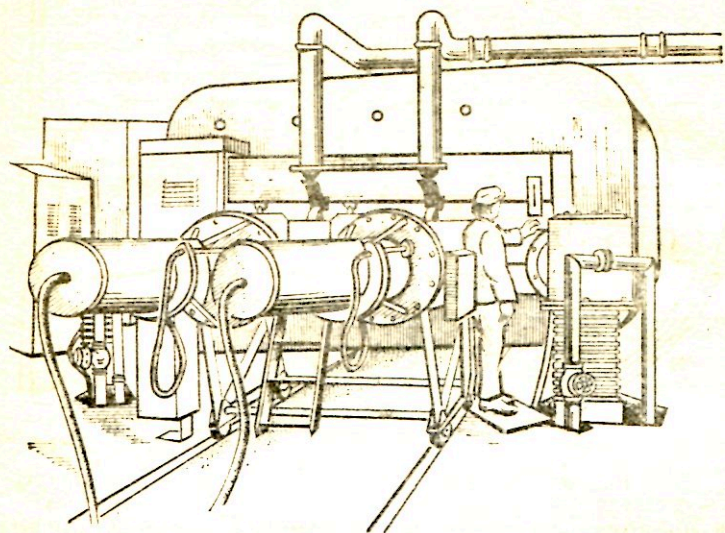


Рис. 9. Внешний вид циклотрона в г. Обнинске

тории увеличивается с импульсом, а импульс — с энергией частицы. Когда частицы подходят к краю вакуумной камеры, они покидают ускоритель. Обычно удается полезно использовать около 30% ускоряемых частиц. Остальные частицы бесполезно теряются, активируя вакуумную камеру и находящиеся в ней детали.

Общий вид циклотрона в Обнинске приведен на рис. 9. Частота ускоряющего поля циклотрона должна совпадать с частотой обращения ω частицы:

$$\omega = \frac{e}{c} \frac{V}{m}, \quad (5)$$

Магнитное поле в циклотроне почти однородно, а m меняется мало. Поэтому частота ускоряющего поля в циклотроне постоянна.

Обычные циклотроны могут ускорять протоны только до энергии около 20 МэВ (частицы с большими зарядами — до соответственно больших энергий). Дальнейшему ускорению мешают две причины. Во-первых, релятивистское увеличение массы, как оно ни мало, несколько уменьшает частоту обращения частиц на больших радиусах.

Во-вторых, для фокусировки необходимо некоторое уменьшение B к периферии ускорителя (мы уже говорили, что магнитное поле в циклотроне не может быть вполне однородным). Обе эти причины приводят к тому, что при движении от центра к периферии частота обращения частицы несколько уменьшается, в то время как ускоряющая частота неизменна. Различие в частотах рано или поздно приводит к смещению по фазе, в результате которого дальнейшее ускорение оказывается невозможным.

До более высоких энергий можно ускорять частицы в фазотронах, т. е. в ускорителях с периодически меняющейся частотой ускоряющего поля. Фазотроны ускоряют частицы сгустками. Частота ускоряющего поля меняется вместе с частотой обращения частиц, уменьшаясь по мере их приближения к периферии ускорительной камеры. После того как ускорение некоторой партии частиц заканчивается, частота электромагнитного поля возвращается к начальному значению и начинается ускорение следующей партии частиц. Такие циклы ускорения непрерывно следуют друг за другом.

Физического предела, ограничивающего величину энергии, до которой можно разгонять частицы в фазотронах, не существует. Однако на пути их использования стоят экономические причины. На рис. 10 изображен внешний вид фазотрона на энергию 680 МэВ в Дубне. Самый большой фазотрон в мире (энергия протонов — 1 ГэВ) работает в Гатчине под Ленинградом.

В соответствии с формулой (3) диаметр вакуумной камеры, а вместе с ней и диаметр полюсов электромагнита возрастает как импульс ускоряемых частиц. При диаметрах ~ 6 м размеры, вес и стоимость фазотронов чрезмерно увеличиваются.

Для ускорения частиц до предельно больших энергий пользуются синхротронами — ускорителями, у которых магнитное поле создается только на узкой кольцевой дорожке, в пределах которой располагается вакуумная камера. В формуле (3), таким образом, ρ постоянно. Ясно, что при этом с увеличением импульса частицы должна возрастать индукция B . Магнитное поле в синхротронах изменяется циклически. Синхротроны ускоряют частицы цикл за циклом. В каждом цикле ускорения находящиеся в вакуумной камере частицы разгоняются от минимальной энергии (от энергии ил-

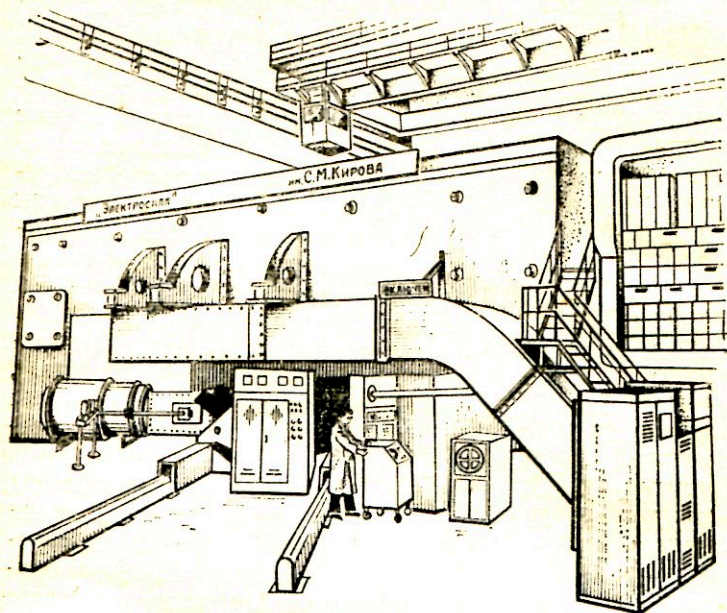


Рис. 10. Внешний вид фазотрона ЛЯП ОИЯИ (Дубна)

жекции) до максимальной. Затем частицы выпускаются (или используются для взаимодействия с внутренними мишенями), магнитное поле вновь снижается для захвата новой партии частиц и т. д. Синхротроны — это медленные машины. Большие синхротроны делают несколько циклов в минуту, маленькие работают существенно чаще — с частотой до 50 Гц. Из-за того что циклы ускорения так редки, полное число ускоренных частиц существенно уменьшается, так что для технических применений они непригодны.

Скорость частиц в синхротронах возрастает сначала быстро, а затем, при приближении к скорости света, — все медленней. При постоянном радиусе траектории это означает, что частота ускоряющего поля должна постепенно увеличиваться, стремясь к предельному значению (соответствующему скорости, равной скорости света) по довольно сложному закону.

Все крупные циклические ускорители принадлежат к числу синхротронов.

Ускорители, предназначенные для электронов, существенно отличаются от ускорителей для всех других частиц. Как отмечалось выше, уже при энергии несколько мегаэлектронвольт скорость электронов очень близка к скорости света. Частота их обращения в синхротроне в процессе ускорительного цикла практически не изменяется, так что нет нужды варьировать частоту ускоряющего электромагнитного поля. Все другие частицы впрыскиваются в синхротроны при скоростях, существенно, чаще всего — в несколько раз меньших скорости света и ускоряются до очень высоких энергий, когда эти скорости различаются на ничтожные доли процента. Поэтому электронные синхротроны имеют высокочастотные ускоряющие станции, настроенные на одну частоту, а все остальные — широкополосные перестраиваемые ускоряющие станции. Первые из них отличаются высокой, а вторые — низкой добротностью.

Не следует, впрочем, думать, что затраты энергии на возбуждение высокочастотного электромагнитного поля у протонных синхротронов со станциями низкой добротности оказываются выше, чем у электронных синхротронов, работающих с ускоряющими станциями высокой добротности. Так обстоит дело только с ускорителями на очень небольшие энергии. Начиная с нескольких гигаэлектронвольт, на мощность ускоряющих станций начинают катастрофически влиять потери на излучение.

8. ПРОБЛЕМА ФОКУСИРОВКИ. РЕЗОНАНСЫ

Как уже отмечалось в разделе 5, устойчивость движения частиц в ускорителях обеспечивают фокусирующие силы. Эти силы регулируют продольное движение частиц (они должны вовремя попадать в ускоряющий промежуток) и движение в обоих поперечных направлениях (частицы не должны далеко уходить от оси вакуумной камеры).

8.1. Продольное движение. Принцип автофазировки

В резонансных ускорителях, а к ним относятся практически все рассмотренные нами установки (кроме генератора Ван-де-Граафа), прирост энергии частицы происходит за счет электрического высокочастотного поля.

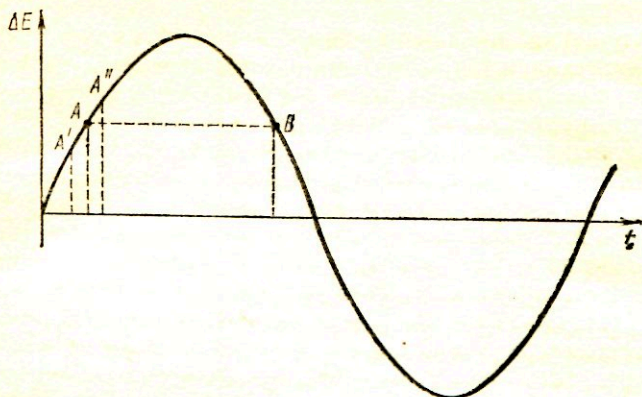


Рис. 11. К пояснению принципа автофазировки

Если частица многократно проходит ускоряющее устройство при самых разных фазах высокочастотного поля, то суммарное приращение энергии за большее число таких прохождений близко к нулю. А в процессе ускорения частицы много раз проходят через ускоряющее устройство. Поэтому необходим какой-то механизм, удерживающий их около вполне определенной фазы ускоряющего поля и заставляющий возвращаться к ней, если по какой-либо причине произойдет расхождение фаз частицы и поля. Такой механизм был найден независимо Векслером и Мак-Милланом и носит название принципа автофазировки.

Суть этого принципа достаточно проста. Обратимся к рис. 11. На нем точками A и B отмечены фазы ускоряющего высокочастотного поля, при которых частица получает от поля расчетную величину энергии. В фазотроне это означает, что она остается в фазе с периодически меняющейся частотой, в синхротроне частица получает в этой точке ровно столько энергии, сколько нужно, чтобы оставаться на неизменной орбите в увеличивающемся со временем магнитном поле. Энергия частиц, постоянно приходящих в зазор в моменты A и B , называется равновесной.

Если частица приходит к зазору раньше (например, в точке A'), она приобретает меньше энергии. От этого сразу изменяются два параметра ее движения: скорость и длина траектории в ускорителе (частицы с энер-

гией, отличной от равновесной, иначе отклоняются магнитным полем, отчего изменяется длина их пути).

В результате действия этих двух факторов, которые частично компенсируют друг друга, частота обращения частиц, имеющих неравновесную энергию, может как увеличиваться, так и уменьшаться. В синхротронах при небольших энергиях частиц изменение скорости их движения обычно сказывается на изменении частоты обращения более существенно, чем изменение длины пути, а при больших энергиях — наоборот. Это происходит потому, что при больших энергиях скорости частиц близки к световым и очень слабо зависят от их энергии.

Рассмотрим сначала первый случай, когда изменение скорости оказывается более существенным, чем изменение пути. Тогда наша частица придет к резонатору позже, чем на первом обороте, т. е. ее отклонение по фазе от точки A уменьшится. Частица, которая на первом обороте пришла к резонатору немного позже, чем в точке A (например, в точке A''), приобретает несколько большую энергию и сделает следующий оборот немного быстрее. На следующем обороте она придет к зазору ближе к точке A , чем в первый раз. Таким образом вокруг A образуется область, в которой происходит «продольная фокусировка». Рассуждая подобным же образом, нетрудно показать, что точка B является в этом случае неустойчивой — с каждым оборотом частицы от нее все более удаляются.

Когда в результате роста энергии ускоряемой частицы изменение длины ее пути оказывается более существенным, чем изменение скорости, устойчивая и неустойчивая точки меняются местами — область устойчивого движения возникает вокруг точки B . Соответствующая энергия частицы носит название критической, или переходной. В этот момент фазу ускоряющего напряжения нужно скачком изменить, чтобы частицы, подошедшие к ускоряющему зазору, встретили ускоряющее поле в устойчивой фазе и без помех продолжили свое движение. В циклотронах, фазотронах и некоторых синхротронах критическая точка лежит вне рабочего диапазона энергий.

Благодаря автофазировке, ускоряемый в вакуумной камере ускорителя пучок вместе с ускоряющим резонатором представляет собой колебательную систему высокой добротности, обладающую собственной частотой

продольных (или, как их иначе называют, синхротронных, а иногда — радиально-фазовых) колебаний.

При большой интенсивности пучка (практически при количестве частиц в камере $> 10^{12}$) на движении частиц начинает сказываться их взаимное отталкивание. Частицы взаимодействуют друг с другом, взаимодействуют со своими (и «чужими») отражениями в металлических стенках вакуумной камеры и с многочисленными паразитными резонаторами, которые всегда присутствуют в вакуумной камере ускорителя (отдельные детали камеры, ее расширенные или, наоборот, суженные участки, разного рода вставки и т. д.). Взаимодействие частиц друг с другом и с камерой при большой интенсивности пучка приводит к неустойчивостям, которые раскачивают пучок, разбивают его на мелкие сгустки частиц, приводят к колебаниям формы пучка и другим нежелательным последствиям.

Циклические ускорители, в которых частицы проходят огромные пути в условиях, почти повторяющихся от оборота к обороту, особенно чувствительны к неустойчивостям самых разных типов.

8.2. Поперечное движение. Резонансы

Реальное магнитное поле, в котором движутся частицы, конечно, не идеально. Различные его искажения приводят к тому, что частицы движутся не точно по расчетной траектории, а совершают вокруг нее периодические колебания. Эти колебания носят название бетатронных. Если частота бетатронных колебаний (в расчете на оборот) равна целому числу или близка к нему, поперечное движение частиц неустойчиво. Действительно, подойдя к месту, где магнитное поле ускорителя искажено, частица отклонится от расчетной траектории и, совершив в течение оборота Q поперечных колебаний вокруг расчетной траектории, вернется к месту искажения поля в той же фазе поперечных колебаний, в которой прошла его на предыдущем обороте, и еще больше отклонится от расчетной траектории. Если Q равно не точно целому числу, а близко к нему, фаза будет не точно той же, но изменится очень незначительно. Таким образом, на каждом обороте амплитуда поперечных колебаний частицы будет увеличиваться, и этот процесс будет продолжаться до тех пор, пока частица не достигнет стенок вакуумной камеры, т. е. не будет потеряна.

Такова природа простейшего из резонансов, целого или, как его еще называют, целочисленного.

Неидеальности фокусирующих полей приводят к потере устойчивости поперечного движения частиц и при полужелтых значениях Q (параметрический резонанс).

Неизбежная нелинейность магнитного поля (и нелинейность других полей, например, полей, действующих на пучок со стороны второго пучка в «месте встречи», нелинейность сил электрического изображения в стенках вакуумной камеры и т. д.), строго говоря, приводит к возникновению неустойчивостей при всех значениях частоты Q , которые являются рациональными числами, т. е. могут быть представлены в виде конечной арифметической дроби.

Впрочем, при знаменателях, больших 3 или во всяком случае 4, резонансы не оказывают серьезного влияния на движение частиц в ускорителях, а при знаменателях, больших 5, они не сказываются и на работе накопительных колец.

8.3. Фокусирующие поля. Акseptанс и эмитанс

Частицы, движущиеся поперек однородного магнитного поля, описывают в нем окружности, радиусы которых (3) определяются их импульсом. Две такие частицы, вылетевшие из одной и той же точки под некоторым

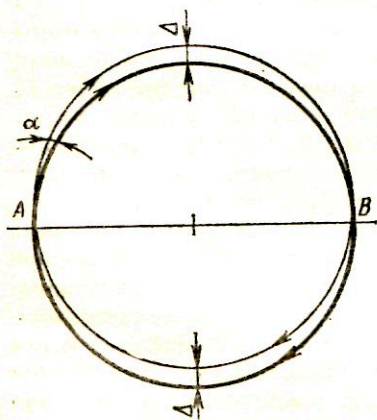


Рис. 12. Траектории двух частиц, вылетевших под небольшим углом друг к другу

углом друг к другу (рис. 12), двигаясь вдоль окружности, никогда не удаляются друг от друга больше, чем на некоторое расстояние Δ . В течение каждого оборота их пути дважды пересекаются. Иначе говоря, одна из них (любая!) совершает вокруг другой колебания с частотой $Q=1$ (одно колебание за оборот). Однородное магнитное поле обладает, таким образом, хорошо выраженной радиальной фокусировкой. (Такая фокусировка называется ци-

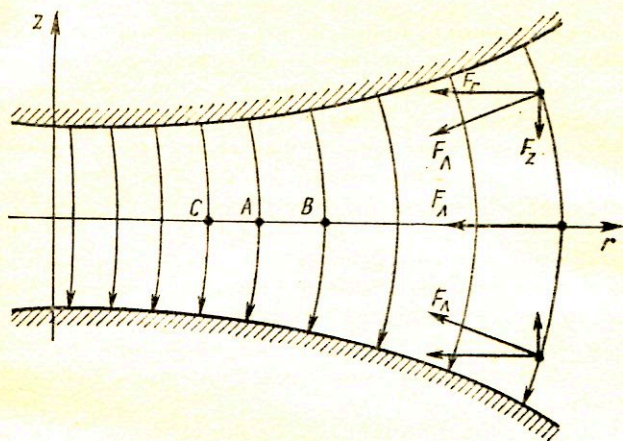


Рис. 13. Магнитное поле между изогнутыми полюсами

цилиндрической.) К сожалению, однако, вертикальная фокусировка у такого поля отсутствует: если у двух частиц были некоторые, не равные друг другу составляющие скорости вдоль магнитного поля, эти составляющие не изменяются во время движения, и частицы неограниченно удаляются друг от друга.

Магнитному полю можно придать способность фокусировать частицы в направлении вдоль поля. С помощью магнитных полюсов, расстояние между которыми увеличивается от центра к периферии, можно получить бочкообразное поле, изображенное на рис. 13. В таком поле Лоренцова сила в дополнение к горизонтальной (центростремительной) приобретает вертикальную слагающую нужного направления: она возвращает к медианной плоскости отошедшие от нее частицы.

Исследуем, как сказывается искривление силовых линий магнитного поля на движении в горизонтальной плоскости. Орбита частицы с равновесной энергией представляет собой окружность, лежащую в медианной плоскости. Центр равновесной орбиты совпадает с центром симметрии магнитного поля. Для частиц, движущихся по равновесным орбитам, при искривлении поля мало что меняется: на них по-прежнему действует сила Лоренца, одинаковая на всех азимутах и направленная точно в центр окружности. Не так обстоит дело с части-

цами, отклонившимися от равновесной орбиты. Выходя наружу, они попадают в более слабое поле, а приближаясь к оси — в более сильное (бочкообразное поле, изображенное на рис. 14, ослабляется к периферии, поскольку с удалением от оси увеличивается расстояние между полюсами магнита и удлиняются магнитные силовые линии).

Во всяком магнитном поле, обладающем осевой симметрией, выполняется соотношение

$$Q_r^2 + Q_z^2 = 1, \quad (6)$$

где Q_r и Q_z — частоты бетатронных колебаний в горизонтальной и вертикальной плоскостях соответственно. В чисто однородном поле фокусировка в направлении «по полю» отсутствует, так что $Q_z = 0$, а $Q_r = 1$. В поле, быстро спадающем к периферии, пропадает радиальная фокусировка: $Q_r = 0$, $Q_z = 1$. В ускорителях оба значения — Q_r и Q_z — больше нуля и меньше единицы. Приведенные рассуждения показывают, что во всех циклических ускорителях с азимутально однородным магнитным полем, в частности в циклотронах, магнитное поле обязательно должно уменьшаться к периферии, что уже отмечалось ранее.

Перейдем теперь к интенсивности ускорителей. Она равна произведению фазового объема пучка на фазовую плотность частиц в пучке. Из источников получать пучки особенно высокой плотности не удается, а, как мы уже выяснили раньше, в процессе ускорения плотность меняется мало. Поэтому пучок большой интенсивности всегда занимает заметный объем в фазовом пространстве, т. е. имеет заметный эмиттанс. Фазовый объем, пропускаемый ускорителем (аксептанс ускорителя), должен быть по крайней мере равен эмиттансу пучка (на самом деле аксептанс ускорителя должен быть в несколько раз больше последнего, чтобы оставить место для колебаний, вызванных несовершенством магнитного поля, соударениями частиц с остаточным газом, заполняющим камеру ускорителя, и по ряду других причин). Все эти соображения заставляют делать ускорители с достаточно большими аксептансами — порядка $10 \div 20$ см·град для каждого из поперечных направлений движения.

Аксептанс ускорителя определяется размерами вакуумной камеры и частотой Q . Увеличивать размеры

камеры невыгодно: большая камера требует больших магнитов и протяженных магнитных полей, а значит, и больших расходов на электроэнергию. Остается увеличивать Q , но это запрещено соотношением (6).

Выход из этого положения заключается в отказе от полей, обладающих осевой симметрией.

8.4. Элементы магнитной оптики.

Принцип жесткой фокусировки

Говоря о магнитных полях, мы до сих пор имели в виду циклические ускорители, в которых поле не зависит от координаты φ цилиндрической системы координат. Теперь мы рассмотрим поля, не зависящие от координаты x декартовой системы. В ускорителях, периметр которых намного превосходит их поперечные размеры, различие между этими системами координат для нашей задачи несущественно.

Мы уже говорили о том, что искривление поля приводит к появлению фокусировки по оси Z (см. рис. 14). Нетрудно показать, что в двумерном поле (т. е. в поле, конфигурация которого не меняется вдоль x) при этом наблюдается фокусировка по координате y . В самом деле, рассмотрим три частицы A , B и C , расположенные для простоты в медианной плоскости ускорителя. В бочкообразном поле индукция к периферии уменьшается. Это означает, что Лоренцова сила, действующая на частицу B , меньше силы, действующей на A , а та, в свою очередь, меньше силы, приложенной к C . Если эти частицы входят в магнитное поле параллельным пучком, то, попадая в него, они начинают двигаться расходящимся веером. Иначе говоря, наше поле в радиальном направлении является дефокусирующим.

Поля, возрастающие к периферии, обладают обратными свойствами: они фокусируют частицы по горизонтали и дефокусируют по вертикали. Теперь мы видим, как сильно отличается магнитная оптика частиц от оптики световых пучков. В обычной оптике мы, как правило, пользуемся сферическими линзами и другими оптическими элементами, свойства которых обладают осевой симметрией (относительно оси оптической системы). Сравнительно редко применяется цилиндрическая оптика, фокусирующая только в одном направлении. В этом смысле аналогами оптических линз являются не поперечные, а продольные магнитные поля. Однако их фоку-

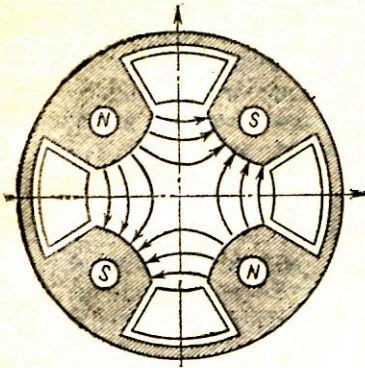


Рис. 15. Схема устройства магнитного квадрупольа

сирующее действие слабо, и в ускорительной технике они применяются редко.

Возвращаясь к оптической модели, можно сказать, что бочкообразное магнитное поле является аналогом сразу двух линз: в одном направлении — собирающей, а в другом — рассеивающей. При заметной неоднородности магнитного поля фокусирующая сила таких линз может быть очень большой. Наиболее ярко выраженными рас-

сеивающе-собирающими свойствами обладает магнитный квадруполь, изображенный на рис. 15. В центре квадрупольа магнитное поле равно нулю, поэтому частицы, проходящие через его центр, не испытывают отклонения, подобно пучку света, проходящему через центр оптической линзы.

Расположим теперь рассеивающие и собирающие линзы на небольших одинаковых расстояниях друг за

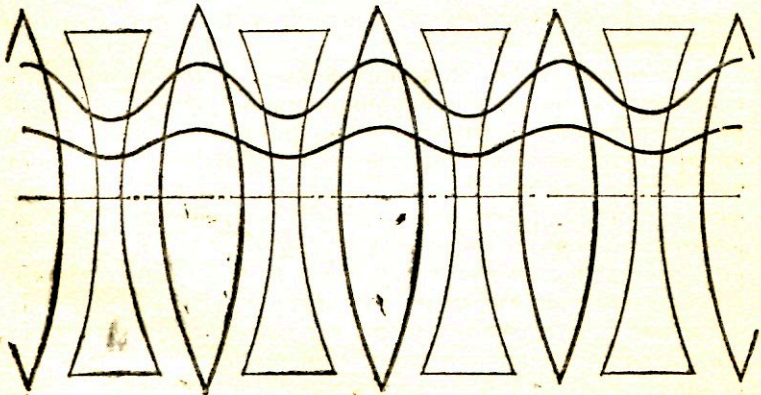


Рис. 16. Лучи, проходящие через систему чередующихся собирающих и рассеивающих линз

другом (рис. 16). На рисунке изображены два проходящих сквозь систему луча, один из которых находится ближе, а другой — дальше от оптической оси, которая сама является одной из возможных траекторий частицы. Лучи выбраны так, что после прохождения любого периодического элемента (двух последовательно расположенных линз), они возвращаются к прежней координате и прежнему углу; далеко не все лучи, конечно, обладают этим свойством.

Из рисунка видно, что рассматриваемая в целом, наша оптическая система является фокусирующей: луч от оси не уходит и колеблется вокруг среднего отклонения. На первый взгляд этот результат представляется неожиданным, поскольку наша система состоит из одинаковых по силе симметрично расположенных рассеивающих и собирающих элементов и, казалось бы, в целом не должна быть ни рассеивающей, ни собирающей. Небольшое размышление показывает, в чем тут дело: лучи всегда проходят в собирающих линзах на большем расстоянии от оптической оси, чем в рассеивающих, а линза тем сильнее отклоняет луч, чем дальше от оси он ее пересекает. Такая оптическая система называется жестко фокусирующей.

Курант, Снайдер и Ливингстон в 1952 г. предложили применять жесткую фокусировку при сооружении ускорителей⁵. Все современные ускорители строятся по принципу жесткой фокусировки, так как благодаря ему вместо $Q \sim 0,7$ удается получить $Q \sim 10$, а при желании и более.

Синхротроны с жесткой фокусировкой содержат в своей структуре как заворачивающие магниты, создающие однородное вертикально направленное поле, так и квадрупольные магнитные линзы. Линзы устанавливаются через одну, так что, скажем, линзы с четными номерами фокусируют частицы по радиусу и дефокусируют по высоте, а линзы с нечетными номерами, наоборот, по радиусу дефокусируют, а по высоте — фокусируют. В каком бы направлении ни отклонилась частица, она встречает на своем пути последовательность чередующихся собирающих и рассеивающих линз, т. е. фокусирующую систему.

⁵ Независимо от них это предложение внес греческий инженер Кристофилос. Работа Кристофилоса, однако, ускользнула от внимания ученых.

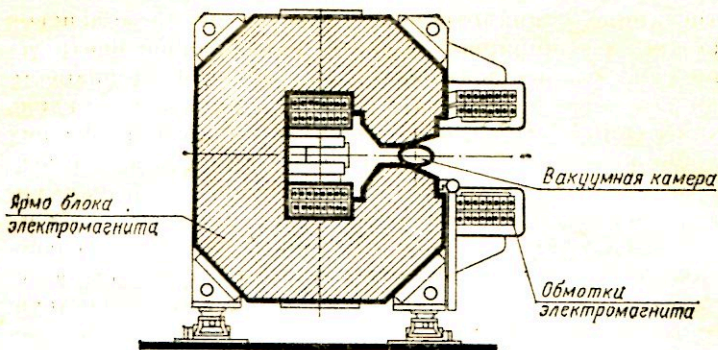


Рис. 17. Магнитный блок ускорителя в г. Протвино

Цилиндрическая радиальная фокусировка, конечно, присутствует и в жесткофокусирующих ускорителях, однако она играет роль небольшой поправки. Вклад в эту фокусировку вносят заворачивающие магниты, а не магнитные линзы.

Иногда вместо магнитных систем с разделенными функциями (магнитные блоки отдельно, а линзы — отдельно) строят магнитные блоки, которые как заворачивают, так и фокусируют частицы. Так построен протонный синхротрон в Протвино (СССР). Разрез его магнитного блока изображен на рис. 17. Чтобы создать жесткофокусирующую систему, полюса электромагнитов должны иметь форму гипербол, которые у соседних магнитных блоков направлены в разные стороны.

8.5. Изохронные циклотроны.

Фокусировка

в линейных протонных ускорителях

Принцип жесткой фокусировки применим не только к синхротронам. Он открыл новые перспективы и перед циклотронами.

Разработанные на основе принципа жесткой фокусировки циклотроны получили название изохронных — частица тратит одно и то же время на обращение вокруг центральной оси, независимо от радиуса траектории, по которой она движется.

Изохронные циклотроны должны включать в свой состав по-разному фокусирующие поля, чередующиеся на длине пути частицы. В отличие от синхротронов маг-

нитное поле у циклотронов создается не на кольцевой дорожке, а в обширной области, включающей центр ускорителя. Анализ показывает, что области одинакового поля выгоднее располагать не вдоль радиусов, а вдоль искривленных, сходящихся в центре линий, образующих подобие розетки. Нет никакой необходимости в том, чтобы магнит такого циклотрона целиком покрывал его вакуумную камеру. Магниты могут занимать отдельные — изогнутые — сектора, между которыми располагаются участки, свободные от поля. При этом ускоритель остается циклотроном, т. е. работает с постоянным магнитным полем и с высокочастотным полем неизменной частоты.

С изобретением изохронных циклотронов отпала необходимость в фазотронах. Более того, имеющиеся фазотроны начинают переделывать. Так реконструируется фазотрон, находящийся в г. Дубне. Однако этот ускоритель и после реконструкции останется фазотроном — частота ускоряющего напряжения будет продолжать несколько изменяться, хотя и в существенно меньшем диапазоне, чем раньше. Это дает возможность более чем на порядок поднять интенсивность ускоряемых в нем пучков.

В заключение скажем несколько слов о применении жесткой фокусировки в линейных ускорителях. В линейных ускорителях протонов жесткая фокусировка применяется с самого ее изобретения. Для этого в них устанавливают обычные квадрупольные магнитные линзы, собранные из электромагнитов или из постоянных магнитов (сплав SmCo).

В последнее время все большее внимание привлекает к себе идея фокусировки частиц самим ускоряющим высокочастотным полем. Такая фокусировка возможна лишь в том случае, если пространственное распределение поля не обладает осевой симметрией. Этот способ фокусировки особенно выгоден при малых скоростях частиц. Он получил название принципа пространственно-однородной фокусировки.

9. СИНХРОТРОННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Электромагнитное излучение, которое испускают заряженные частицы при движении по искривленной траектории с релятивистскими скоростями, носит название

синхротронного. Теория этого излучения была разработана советскими учеными Иваненко и Померанчуком в 1944 г. Оно впервые наблюдалось в 1946 г. на синхротроне, с чем и связано его название.

Спектр синхротронного излучения не ограничен частотой обращения частицы по орбите: поскольку мы имеем дело с точечными зарядами, движущимися с релятивистскими скоростями, существенный вклад в интенсивность излучения вносят гармоники очень высокого порядка. Из-за этого спектр синхротронного излучения простирается от видимой области до области жесткого рентгена. Размытие отдельных гармоник приводит к тому, что спектр излучения оказывается непрерывным.

Широкое применение синхротронного излучения для спектроскопических исследований в различных областях физики началось в первой половине 60-х годов. Для практических целей используется только излучение электронов. Мощность излучения в протонных ускорителях на 12 порядков ниже, чем у электронного ускорителя с той же энергией и с тем же числом ускоряемых частиц.

Перечислим некоторые из свойств синхротронного излучения, благодаря которым оно оказывается столь привлекательным для исследований в различных областях науки.

О непрерывности спектра излучения в области от инфракрасной до рентгеновской мы уже говорили. Необходимо сказать, что это излучение распространяется в направлении движения частиц, линейно поляризовано в плоскости орбиты электрона и характеризуется малой угловой расходимостью. Раствор конуса (в радианах) составляет mc^2/E , т. е. уже при энергиях 0,5 ГэВ не превосходит 1 мрад (напомним, что для электрона $mc^2 = 0,51$ МэВ). И, наконец, синхротронное излучение исключительно стабильно, поскольку в накопительных кольцах электронный пучок сохраняет свои параметры в течение многих часов.

Интересно сравнить синхротронное излучение от электронных накопителей с излучением других стандартных источников в различных областях спектра. В инфракрасной и видимой областях яркость источников синхротронного излучения такого класса, как накопительное кольцо DORIS (ФРГ) на энергию 5 ГэВ

при длине волны 100 мкм приблизительно в 100 раз выше, чем у ртутных ламп высокого давления. Нужно, правда, отметить, что разработанные в последнее время лазеры на красителях в инфракрасной и видимой областях существенно превосходят источники синхротронного излучения.

В области более коротких волн у накопительных колец пока нет конкурентов. В области вакуумного ультрафиолета (длина волны излучения от 1000 до 100 Å) накопитель явно превосходит все другие источники, в особенности, если необходимо вести исследования в широком диапазоне длин волн. В рентгеновской области существуют мощные источники излучения, и сравнивать их с накопителем нужно конкретно для каждого реального опыта.

Какие же задачи решают в настоящее время с помощью синхротронного излучения?

Эксперименты в области вакуумного ультрафиолета и мягкого рентгеновского излучения предоставляют исследователям очень важную информацию для понимания электронной структуры твердого тела. Измерения с помощью синхротронного излучения позволяют определить взаимное расположение атомов в поверхностных слоях твердого тела. Состояние поверхности материалов играет решающую роль в микроэлектронике, явлениях катализа, окисления, фотохимических и фотобиологических процессах и во многих других случаях.

Синхротронное излучение успешно применяется для изучения процессов люминесценции. Эти работы важны для разработки лазеров, способных излучать в области ультрафиолета и вакуумного ультрафиолета. Исследования в этом направлении широко ведутся в Новосибирске на накопителе ВЭПП-3.

Благодаря тому что синхротронное излучение поляризовано, его можно использовать для изучения пространственной анизотропии объектов. Характер поглощения и флюоресценции газов позволяет судить о строении внутренних оболочек атомов. Синхротронное излучение нашло применение при решении ряда задач в биологии, в частности при рентгеноструктурных исследованиях монокристаллов белка. В результате ряда работ, проведенных на накопителе ВЭПП-3, было установлено местоположение атомов цезия внутри молекулы ДНК.

Изучается возможность применения синхротронного излучения для молекулярной хирургии: используя пучки сечением $\sim 0,01$ мкм², можно под микроскопом вырезать отдельные части клеток или хромосом.

Прежде чем закончить беседу о синхротронном излучении, приведем один пример его использования в технике. Мы имеем в виду производство элементов полупроводниковых приборов (интегральных схем, микропроцессоров и т. д.). Применяемый в настоящее время метод литографии состоит в том, что изображение переносится с маски на светочувствительный слой подложки. При освещении маски электронным пучком или лучом лазера нельзя получить разрешение лучше 2 мкм. Рентгеновское излучение повышает разрешение в несколько сот раз, однако из-за недостаточной его мощности экспозиция одной подложки длится несколько часов. Синхротронное излучение повышает разрешение до сотых долей микрона, а время экспозиции не превышает нескольких секунд. Использование синхротронного излучения позволяет создавать качественно новые элементы, повышает плотность элементов на единицу объема и улучшает их временные характеристики.

В качестве источников синхротронного излучения в той или иной мере используются все работающие накопительные кольца. В Советском Союзе для этой цели используются синхротрон Физического института АН СССР, накопители, работающие в Институте ядерной физики Сибирского отделения АН СССР, и электронный синхротрон АРУС Ереванского физического института (6 ГэВ).

В заключение хочется сказать, что сегодня мы находимся в самом начале промышленного и научного использования синхротронного излучения, и многие области его применения еще даже не определены.

10. ПРИМЕНЕНИЕ УСКОРИТЕЛЕЙ В НАРОДНОМ ХОЗЯЙСТВЕ

В предыдущих разделах мы рассказывали об ускорителях, уже созданных и еще только создаваемых для фундаментальных исследований в области физики атомного ядра и элементарных частиц. Именно для этих целей строились как первые ускорители, ускорявшие заряженные частицы до энергий в несколько сот килоэлектронвольт, так и современные ускорители, работающие

при энергиях в сотни гигаэлектронвольт. Однако, как это часто бывает, со временем выяснилось, что ускорители можно успешно использовать в прикладных целях в различных областях техники, медицины, сельского хозяйства и т. д. Это направление в развитии ускорителей осваивается сравнительно недавно, каких-нибудь 10—15 лет, но и за столь короткий срок достигнуты немалые успехи. Практика последних лет показала, что с помощью ускорителей нередко удается достичь существенного экономического эффекта, а в ряде случаев кардинально изменить технологию производства.

Интересен следующий факт: на каждый ускоритель, установленный в физических лабораториях, сейчас приходится около 100 ускорительных установок, работающих в народном хозяйстве.

Для прикладных целей не нужно ускорять частицы до сверхвысоких энергий. Энергии электронов обычно не превышают 10 МэВ, для производства радионуклидов нужны протоны (или дейтоны) с энергией до 70 МэВ, в лучевой терапии используются электроны с энергией до 50 МэВ и протоны, ускоренные до 200—250 МэВ. В то же время для практических нужд важно количество частиц, ускоряемых в единицу времени, т. е. интенсивность пучка.

И, конечно, принципиальное значение приобретают надежность в работе, простота обслуживания, стоимость и коэффициент полезного действия установки.

Наиболее широкое применение в народном хозяйстве нашли электронные ускорители, которые особенно просты, надежны и дешевы. Для электронных ускорителей характерна высокая интенсивность пучков; электроны имеют больший, чем у других частиц, пробег при равной энергии.

В тех случаях, когда электронами обойтись нельзя, например при производстве радионуклидов и при точной, «прицельной» лучевой терапии, используют пучки протонов. Ускорители более тяжелых частиц применяются редко, практически только для имплантации ионов в кристаллическую решетку.

10.1. Применение ускорителей в промышленности

Электронные пучки в химии применяются в основном для ускорения процесса полимеризации и для измене-

ния свойств полимерных материалов. Под воздействием быстрых заряженных частиц в полимерах разрываются химические связи между соседними атомами углерода и между углеродом и водородом. В первом случае образуются две более короткие полимерные цепочки, представляющие собой радикалы. Они подвергаются дальнейшим химическим превращениям, и в конечном счете получают продукты с более короткими цепями. Такой процесс называют деструкцией полимера.

При отщеплении водорода образуются радикалы с прежней длиной цепочки. Если два таких радикала окажутся по соседству, то между ними может образоваться химическая связь, и получается более сложная макромолекула с новыми свойствами. Этот процесс называется сшиванием полимера.

Радиационная модификация полиэтилена была первым примером широкого практического применения ускорителей. Облучение полиэтилена дозами 0,1—0,3 МДж/кг сопровождается образованием большого числа сшивок полимерных цепей. В результате облучения температура размягчения полиэтилена увеличивается с 98 до 350°С, что во многих случаях очень важно. В частности, облучению подвергаются кабели с полиэтиленовой изоляцией. В Советском Союзе для этих целей используют ускорители электронов ЭЛТ — 1,5 на энергию 1,5 МэВ. Стоимость облучения не превышает 5% от стоимости готовой продукции.

На электронных пучках «сшивают» и другие изделия из полиэтилена. Полиэтиленовая изоляция, обработанная электронным пучком, усаживается при нагревании и плотно облегает металлические трубы, на которые она надевается предварительно. Образуется изоляция металлических труб, предохраняющая их от коррозии.

Еще один пример радиационной полимеризации — отверждение красящих покрытий. При радиационной сушке нет нужды в растворителе. Красящий состав содержит компоненты, служащие одновременно и для разжижения краски, и для сшивания полимера. Облучение электронами инициирует процесс полимеризации, в результате чего образуется структура, стойкая к воздействию растворителя.

Коротко перечислим еще некоторые области, в которых применяются пучки ускоренных частиц.

С помощью ускоренных на циклотронах тяжелых

ионов производятся тончайшие фильтры для пищевой промышленности. Технология их производства заключается в следующем. Пластмассовая пленка, из которой изготавливаются фильтры, облучается ускоренными тяжелыми ионами. В месте попадания ионов рвутся внутримолекулярные связи и образуются радикалы. Радикалы активно вступают в химическую реакцию с травителями, и после протравливания на месте повреждений в пленке образуются мельчайшие отверстия правильной формы. Плотность расположения отверстий зависит от числа ионов, прошедших через пленку. Производство обходится недорого и позволяет получать уникальные по качеству фильтры.

Электронными пучками производят микросварку различных изделий. Для сварки используются хорошо сфокусированные пучки с энергией порядка 100 или нескольких сот килоэлектронвольт. Наименьшая площадь нагрева при сварке электронным пучком составляет 10^{-6} — 10^{-7} см², а плотность потока энергии может достигать 10^9 Вт/см². Электронный луч плавит тугоплавкие металлы и сваривает друг с другом разнородные материалы (медь, алюминиевые сплавы и т. д.). Аппараты для электронной сварки выпускаются серийно и широко используются в промышленности.

Пучки ускоренных частиц применяются для технологического контроля за качеством массивных металлических изделий, сквозь которые обычное рентгеновское излучение не проходит. Таким образом проверяются, например, котлы ядерных реакторов.

Мы уже коротко упоминали об использовании ускорительной техники для имплантации примесных ионов. Такая имплантация особенно широко применяется в полупроводниковой микроэлектронике. С помощью указанной техники можно вводить любые вещества в любые матрицы. Глубина имплантации зависит от энергии ионов, поэтому при желании можно располагать примеси тонкими слоями на любой заранее заданной глубине или распределять в веществе по заданному закону. Количество вводимых в матрицу веществ хорошо дозируется.

Имплантация ионов может применяться и для изменения свойств поверхностных слоев различных промышленных изделий, для повышения устойчивости к коррозии, изменения твердости, коэффициента трения и т. д.

10.2. Применение ядерных реакций

Ядерные реакции находят практическое применение для двух целей: для радиоаквационного анализа и получения радиоактивных изотопов. В результате взаимодействия частиц высокой энергии с исследуемым веществом образуются радиоактивные нуклиды. Заметная их часть при переходе в стабильное состояние излучает γ -кванты. По характеру γ -спектров и интенсивности спектральных линий можно судить о химическом составе вещества и о концентрации содержащихся в нем элементов. В последние годы радиоаквационный анализ все более теснит классические химические методы. Это объясняется универсальностью методики, быстротой измерения и очень высокой чувствительностью, которая в отдельных случаях достигает 10^{-7} .

Радиоаквационный метод анализа приобретает всевозрастающее значение в геологоразведке, особенно при исследовании руд, содержащих редкие и драгоценные металлы. Метод успешно применяют в технике. Так, благодаря высокой его чувствительности, удается исследовать скорость износа металлических деталей во много раз быстрее, чем это можно сделать любыми другими методами. Предварительной градуировкой устанавливают соответствие между наблюдаемой активностью и величиной износа. Этот метод применяли при испытаниях на износ железнодорожных рельсов в процессе их эксплуатации. Результат был получен через пять месяцев после начала эксперимента. Обычно подобные исследования занимают около четырех лет.

Метод радиоаквационного анализа дает возможность быстро определять содержание белка в зерне (по содержанию азота).

Для радиоаквационного анализа чаще всего используют ускорители электронов, хотя электроны и слабо взаимодействуют с атомными ядрами. Малая вероятность ядерных реакций в этом случае не играет роли, так как цель заключается в получении лишь небольшого количества радионуклидов, достаточного для обнаружения детекторами, расположенными рядом с объектом исследования.

Укажем, что для исследования химического состава вещества используют не только испускаемые или γ -лу-

чи, но и характеристическое рентгеновское излучение. Это излучение возбуждается при бомбардировке образцов быстрыми электронами.

Некоторые радиоактивные изотопы получают в ядерных реакторах. Однако многие короткоживущие изотопы произвести в реакторах не удается, и для их получения используют высокоинтенсивные пучки протонов или дейтронов, ускоренных в циклотронах. Большинство радионуклидов создается при энергиях до 20 МэВ. Подбирая энергию и мишень для изготовления радионуклидов, обычно стремятся возбудить реакции, в которых получаемый продукт химически отличается от исходного: это облегчает извлечение радиоактивных веществ. Число циклотронов, работающих для производства изотопов, исчисляется сейчас несколькими десятками.

Применение радионуклидов привело к подлинной революции в диагностике. При изотопной диагностике радиоактивное вещество вводится в человеческий организм. Затем его распределение исследуется с помощью детекторов, передвигаемых вдоль тела. Наибольшую ценность имеют короткоживущие радионуклиды, которые не представляют опасности для организма из-за малого периода полураспада. Короткое время жизни существенно еще и потому, что дает возможность проводить повторные исследования, позволяющие изучать динамику болезни. Радионуклиды широко используются в кардиологии и в онкологии. В кардиологии с их помощью устанавливают проводимость кровеносных сосудов в частности сосудов, питающих сердечную мышцу. В онкологии используется аномально сильное поглощение веществ (в том числе радиоактивных) раковыми опухолями.

В настоящее время в диагностике наиболее часто применяются радиоактивные изотопы йода, технеция, ксенона и таллия, периоды полураспада которых варьируются в пределах недели. Еще больший интерес представляют ультракороткоживущие позитроноактивные изотопы углерода, кислорода и азота (^{11}C , ^{15}O , ^{13}N). Все эти элементы входят в состав живых организмов и будучи введены в подходящие соединения, интенсивно участвуют в процессах жизнедеятельности. К сожалению, период полураспада этих нуклидов не превосходит 20 мин, так что они должны использоваться на месте изготовления.

10.3. Пучки заряженных частиц в медицине и биологии

Применение пучков заряженных частиц в медицине, биологии и сельском хозяйстве имеет целый ряд общих черт. Общее состоит в том, что при взаимодействии ионизирующего излучения с живой материей нарушаются межмолекулярные связи, в результате чего живая клетка либо разрушается, либо теряет способность к воспроизводству.

Именно на этом основаны лучевая терапия, стерилизация, обеззараживание отходов.

Лучевая терапия — один из основных методов борьбы с раковыми заболеваниями. Ее цель заключается в подавлении жизнедеятельности клеток с помощью излучения. Для терапии применяется в основном электромагнитное излучение (фотоны), реже — электроны, еще реже — протоны и нейтроны. В последние годы проводились эксперименты и с другими частицами (тяжелыми ионами вплоть до аргона и отрицательными π -мезонами), однако пока неясно, имеют ли эти частицы сколько-нибудь серьезные клинические преимущества по сравнению с протонами, которые стоят существенно дешевле.

Интенсивность фотонного пучка (рентгеновские лучи, γ -лучи, тормозное излучение), проходящего через ткань, в зависимости от глубины проникновения уменьшается по экспоненциальному закону. Экспонента падает тем круче, чем мягче излучение. На первых миллиметрах пути, однако, выделение энергии в тканях не спадает, а, наоборот, возрастает. Это увеличение связано с нарастанием количества мягких электронов, рожденных в среде фотонами (переходный эффект). Положение максимума, вслед за которым происходит экспоненциальный спад, сдвигается в глубь тела с ростом энергии частиц (рис. 17). Энергия излучения, применяемого для лучевой терапии, определяется глубиной залегания опухоли (или другой мишени, подлежащей облучению).

Основной прогресс, достигнутый в области лучевой терапии за последние 30 лет, был связан с переходом к источникам излучения все более высокой энергии: сначала — к более жесткому рентгеновскому излучению, (несколько сот киловольт), затем — к излучению ^{60}Co

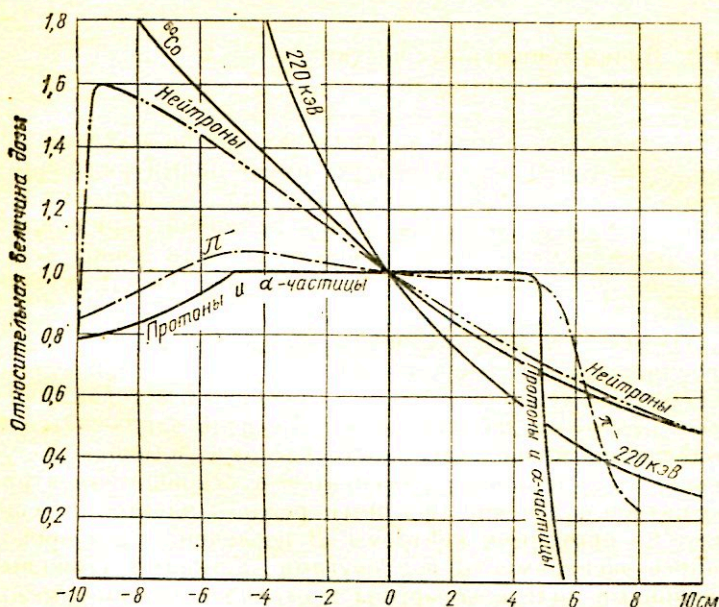


Рис. 17. Глубинное распределение дозы, создаваемой различными типами излучения

($\sim 1,2$ МэВ) и, наконец, к ускорителям электронов (30 МэВ и выше).

В последнее время вызывает большой интерес лучевая терапия с помощью протонов. Протоны, как и другие тяжелые (по сравнению с электронами) заряженные частицы, пробегая в тканях определенный путь, величина которого зависит от их энергии. Ткани, лежащие глубже длины пробега, излучением не повреждаются. Местом остановки протонного пучка управляют, варьируя его энергию.

Ионизационная способность протонов при замедлении увеличивается, так как по мере углубления в ткани поражающее действие протонных пучков возрастает. Ширина области поражения меняется путем подбора энергетического спектра протонов в пучке. Боковое рассеяние протонов невелико, так что при облучении не поражаются ткани, лежащие сбоку от опухоли.

Как и всякие пучки заряженных частиц, протонные пучки хорошо фокусируются и дефокусируются по мере надобности. При желании можно формировать как ши-

рокие (10 и более сантиметров), так и узкие (диаметром несколько миллиметров), почти не расходящиеся пучки. Протонное облучение внутричерепных, внутриглазных и ряда других опухолей с успехом проводится в СССР, США и в Швеции. Особенно следует отметить успехи, достигнутые при облучении гипофиза (железы внутренней секреции, расположенной у основания мозга) и других внутричерепных мишеней. Такое облучение в ряде случаев успешно заменяет хирургическое вмешательство, требующее трепанации черепа.

Радиационная стерилизация медицинских инструментов имеет ряд преимуществ перед обычно применяемым методом высокотемпературной обработки, которая производится либо путем длительного кипячения, либо в специальных автоклавах при повышенных температуре и давлении. При радиационной стерилизации повышение температуры не требуется. Особенно удобно стерилизовать таким методом упакованные изделия одноразового употребления. При этом стерилизация является последним звеном технологического производственного процесса и может производиться прямо на конвейере. В СССР для такой обработки применяют линейный ускоритель электронов ЛУЭ—8/5—В с энергией электронов 8 МэВ и мощностью пучка 5 кВт. Радиационную стерилизацию проходят хирургические инструменты, перевязочные материалы, установки для переливания крови, фармацевтическая посуда, некоторые лекарства и биопрепараты и т. д. При массовом производстве радиационная стерилизация оказывается очень выгодной.

Радиационная обработка пищевых продуктов обычно преследует одну из двух целей: стерилизацию (или пастеризацию) пищи, позволяющую долго хранить ее в герметичной упаковке, или задержку процессов естественного развития, например замедление прорастания картофеля или лука. После облучения бактерии, дрожжевые грибки и даже споры теряют активность. Для стерилизации мясных и рыбных продуктов нужна доза $\sim 4,5 \times 10^4$ Грэй. После такой обработки их можно хранить при комнатной температуре. Однако при такой дозе облучения образуются вещества, сообщающие продукту неприятный привкус. Чтобы этого избежать, облучение производят при понижении температуры до -80°C .

Наряду со стерилизацией успешно применяется пастеризация пищевых продуктов. Для пастеризации нужны значительно меньшие дозы облучения, которые не меняют вкус продукта.

Облучение зерна помогает решить одну из самых трудных задач, возникающих при его хранении: во время облучения зерна погибают вредные насекомые и их личинки.

В ФРГ уже длительное время проводят опыты по радиационной пастеризации рыбы на рыболовецких судах. Время ее хранения в холодильнике увеличивается при облучении с 15 до 25—30 суток.

Радиационная обработка пищевых продуктов быстрыми электронами не создает опасности для здоровья людей. Подсчитано, что, питаясь в течение всей жизни продуктами, подвергавшимися радиационной обработке, человек получит дополнительно не более 0,1% от дозы, которую он получает вследствие естественного радиоактивного фона.

По мере увеличения населения городов, концентрации животноводства и развития химической технологии все более актуальной становится проблема обеззараживания сточных вод и бытовых отходов, проблема разрушения вредных для здоровья человека и для окружающей среды органических соединений, содержащихся в отбросах. Наиболее перспективным методом решения этой задачи является облучение отбросов и сточных вод электронными пучками. Радиационная обработка всех сточных вод, конечно, не рациональна, так как концентрация вредных веществ в них очень мала, и облучению пришлось бы подвергать слишком большие массы и объемы. Более выгодно облучать ил, образующийся в отстойниках. После облучения могут применяться другие химические и механические способы очистки, которые обходятся в этом случае существенно дешевле.

В СССР спроектирована опытно-промышленная установка для облучения воды, прошедшей технологический цикл в процессе производства антибиотиков. В этой воде содержится очень много органических и минеральных веществ, отличающихся высокой токсичностью.

II. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ КРУПНЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

За полвека, прошедшие с начала развития ускорительной техники, энергия ускорителей выросла от долей мегаэлектронвольта до $5 \cdot 10^5$ МэВ и продолжает увеличиваться. С помощью этих установок создана новая область физики — физика элементарных частиц. Открыты фундаментальные составляющие материи — семейства кварков и лептонов. Исследование свойств элементарных частиц позволило создать одну из самых замечательных физических теорий — теорию электрослабого взаимодействия. Успешно развивается и новая фундаментальная теория — квантовая хромодинамика.

Каковы же перспективы развития ускорителей? Обсуждая этот вопрос, прежде всего следует иметь в виду, что перечисленные успехи куплены довольно дорогой ценой: 10% фондов, выделяемых в мире на развитие фундаментальных наук, тратится сейчас на развитие ускорительной техники. Неизвестно, сколь долго такие средства будут выделяться на одно-единственное научное направление, каким бы значительным оно ни представлялось. Не видно также путей существенного удешевления ускорителей.

При современных принципах устройства кольцевых ускорителей не приходится ожидать нового скачка энергии в 10^5 раз. Наибольший из строящихся сейчас электронных ускорителей будет иметь длину кольца ~ 30 км и ускорять электроны до энергий $\sim 10^5$ МэВ. Его периметр всего в тысячу с небольшим раз меньше периметра Земли. Так как радиус ускорителя, грубо говоря, пропорционален энергии ускоряемых частиц, то, чтобы получить новый скачок энергии в $5 \cdot 10^5$ раз, пришлось бы построить ускоритель, размеры которого в 500 раз превысили бы радиус Земли. В то же время нужно существенное повышение энергии для решения вопросов, которые уже сегодня ставятся теоретической физикой. Мы не беремся предсказывать, каким образом будет найден выход из этого положения.

Среди путей, которые сейчас разрабатываются, следует упомянуть о двух. Первый из них — поиски экспериментов, которые могут проводиться без ускорите-

лей. Была высказана идея о более широком использовании космических лучей. В космических лучах имеются частицы очень высоких энергий, но число их крайне мало, а место и время появления заранее неизвестно. Поэтому для экспериментов нужны громадные регистрирующие установки, всегда готовые к работе. В одном из предложений, которое серьезно обсуждается, предлагается использовать в качестве мишени морскую воду и распределить детекторы по объему $\sim 1 \text{ км}^3$. Масса вещества, в котором анализируются взаимодействия, составит при этом 1 млрд. т, в то время как работающие в настоящее время установки используют не более нескольких тысяч тонн. Требования к интенсивности потока быстрых частиц при этом соответственно ослабляются.

Второй возможный путь заключается в поисках новых принципов, на основе которых можно строить ускорители. Рассматриваются, в частности, принципы «коллективного ускорения». Предлагается в плотный сгусток электронов добавить примерно 1% протонов. Электроны должны ускоряться внешним электрическим полем до некоторой выбранной энергии. Протоны, удерживаемые в этом сгустке силами электрического взаимодействия с электронами, будут двигаться со скоростью электронного сгустка. Так как масса протона почти в 2000 раз превышает массу электрона, во столько же раз его энергия превысит энергию электронов сгустка.

Эксперименты, которые проводились в нашей стране и в других странах, показали, что создать такой ускоритель не столь просто, как казалось первоначально. В первую очередь это связано с неустойчивостью пучка, содержащего электроны и тяжелые частицы. Подобные эффекты давно наблюдаются в плазме, и именно они, в основном, затрудняют создание реакторов для управляемого термоядерного синтеза. Работы в этом направлении, как теоретические, так и экспериментальные, продолжаются, но пока остается неясным, возможно ли на этом пути серьезное продвижение, и если возможно, то какой ценой оно покупается. Сегодня, во всяком случае, проектируются и строятся ускорители и накопительные кольца, основанные на уже известных принципах. В ближайшие годы эта тенденция, несомненно, сохранится.

Применение ускорителей в технике, медицине и про-

мышленности фактически только началось, а возможности использования их в этих областях народного хозяйства поистине огромны.

ЛИТЕРАТУРА

Брук Г. Циклические ускорители заряженных частиц. М., Атомиздат, 1970.

Коломенский А. А., Лебедев А. Н. Теория циклических ускорителей. М., Физматгиз, 1962.

Коломенский А. А. Физические основы ускорения заряженных частиц. М., Изд-во МГУ, 1980.

Лебедев А. Н., Шальнов А. В. Основы физики и техники ускорителей. М., Энергоиздат, 1981.

Ливингуд Дж. Принципы работы циклических ускорителей. М., Изд-во Иностранной литературы, 1963.

Териов И. М., Михайлин В. В., Халилов В. Р. Синхротронное излучение и его применение. М., Изд-во МГУ, 1980.

Рябухин Ю. С., Шальнов А. В. Ускоренные пучки и их применение. М., Атомиздат, 1980.

ПРИЛОЖЕНИЕ

В помещенных ниже таблицах перечислены наиболее крупные из функционирующих в настоящее время ускорителей и накопительных колец.

Название и местоположение ускорителя	Год ввода в действие	Ускоряемые частицы и максимальная энергия, ГэВ	Обычная интенсивность, частица/импульс
Синхрофазотрон, Дубна, СССР	1957,	p; 10	10^{12}
	1970 *	d, α , C, O, Ne; 4 ГэВ/пучок	$d-4 \cdot 10^{11}$; $\alpha-2 \cdot 10^{10}$; $C^{6+}-2 \cdot 10^6$; $O-5 \cdot 10^3$;
PS ЦЕРН, Женева, Швейцария	1959	p; 28	$1,5 \cdot 10^{13}$
AGS Нью-Йорк, США	1960	p; 33	$9 \cdot 10^{12}$
Протонный синхротрон, ИТЭФ, Москва, СССР	1961	p; 9,3	10^{12}
SLAC Стэнфорд, США	1961	e ⁻ ; 24	30 мкА
АРУС, Ереван, СССР	1967	e ⁻ ; 6	10^{11}
Синхротрон, Корнельский университет, США	1967	e ⁻ ; 12	10^{11}
Протонный синхротрон, Серпухов, СССР	1967	p; 76	$4,5 \cdot 10^{12}$
Протонный синхротрон, Батавия, США	1972	p; 500	$2 \cdot 10^{13}$
SPS, ЦЕРН, Женева, Швейцария	1976	p; 450	$2 \cdot 10^{13}$
Тэватрон, Батавия, США	Запланирован на 1982 г.	p; 1000	$5 \cdot 10^{13}$
УИК, Серпухов, СССР	Проект	p; 3000	—

* После проведения реконструкции.

Название и местоположение ускорительных колец	Год ввода в действие	Частицы	Энергия, ГэВ	Светимость, см ⁻² с ⁻¹
ISR ЦЕРН, Женева, Швейцария	1971	pp	31	4 · 10 ³¹
То же	1980	p \bar{p}	—	10 ²⁹
ВЭПП-3, Новоси- бирск, СССР	1977	e ⁺ e ⁻	3	10 ³⁰
ВЭПП-4, Новоси- бирск, СССР	1978	e ⁺ e ⁻	7	10 ³¹
PETRA, Гамбург, ФРГ	1978	e ⁺ e ⁻	19	10 ³²
PEP, Стэнфорд, США	1980	e ⁺ e ⁻	18	10 ³²
SPS ЦЕРН, Женева, Швейцария	1981	p \bar{p}	270	10 ³⁰
Тэватрон, Батавия, США	Запланирован на 1982 г.	p \bar{p}	1000	10 ³⁰
LEP, ЦЕРН, Женева, Швейцария	1-я очередь (проект)	e ⁺ e ⁻	86	10 ³²
УНК, Серпухов, СССР	Проект	p \bar{p}	3000	—

СОДЕРЖАНИЕ

1. Назначение и энергия ускорителей	7
2. Размеры ускорителей	8
3. Встречные пучки и накопители	11
4. Встречные кольца или обычные ускорители?	15
5. Теорема Лиувилля и охлаждение пучков	17
6. Сверхпроводящие ускорители	21
7. Типы ускорителей	24
7.1. Ускорители прямого действия	24
7.2. Линейные ускорители	27
7.3. Циклические ускорители	30
8. Проблема фокусировки. Резонансы	34
8.1. Продольное движение. Принцип автофазировки	34
8.2. Поперечное движение. Резонансы	37
8.3. Фокусирующие поля. Аксептанс и эмитанс	38
8.4. Элементы магнитной оптики. Принцип жесткой фокусировки	41
8.5. Изохронные циклотроны. Фокусировка в линейных протонных ускорителях	44
9. Синхротронное излучение	45
10. Применение ускорителей в народном хозяйстве	48
10.1. Применение ускорителей в промышленности	49
10.2. Применение ядерных реакций	52
10.3. Пучки заряженных частиц в медицине и биологии	54
11. Перспективы развития крупных ускорителей. Заключение	58
Литература	60
Приложение	61

**Лев Лазаревич Гольдин,
Владимир Иванович Николаев**

ОБ УСКОРИТЕЛЯХ

Главный отраслевой редактор *Л. А. Ерлыкин*
Редактор *К. А. Кутузова*
Мл. редактор *Г. И. Рюкина*
Обложка художника *А. Е. Григорьева*
Худож. редактор *М. А. Гусева*
Техн. редактор *Л. А. Солнцева*
Корректор *И. Д. Мелешкина*

ИБ № 5277

Сдано в набор 31.08.82. Подписано к печати 17.11.82. Т 17264.
Формат бумаги 84×108^{1/2}. Бумага тип. № 2. Гарнитура
литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 3,36. Усл. кр.-отг.
3,57. Уч.-изд. л. 3,39. Тираж 34030 экз. Заказ 1579. Цена 11 коп.
Издательство «Знание», 101835, ГСП, Москва, Центр, проезд
Серова, д. 4. Индекс заказа 824012.
Типография Всесоюзного общества «Знание», Москва, Центр,
Новая пл., д. 3/4.

ДОРОГОЙ ЧИТАТЕЛЬ!

Брошюры этой серии в розничную продажу не поступают, поэтому своевременно оформляйте подписку. Подписка на брошюры издательства „Знание“ ежеквартальная, принимается в любом отделении „Союзпечати“.

Напоминаем Вам, что сведения о подписке Вы можете найти в „Каталоге советских газет и журналов“ в разделе „Центральные журналы“, рубрика „Брошюры издательства „Знание“.

Цена подписки на год 1 р. 32 к.



СЕРИЯ

ФИЗИКА