

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

К 60-ЛЕТИЮ АКАДЕМИКА В. И. ВЕКслера

3 и 4 марта с. г. Отделение ядерной физики АН СССР, Физический институт им. П. Н. Лебедева АН СССР и Объединенный институт ядерных исследований провели научную сессию, посвященную 60-летию со дня рождения выдающегося советского ученого академика В. И. Векслера.

После вступительного слова вице-президента АН СССР академика Б. П. Константинова на сессии были заслушаны следующие доклады:

А. А. Коломенский «Развитие идей В. И. Векслера в области ускорителей».

И. В. Чувило «В. И. Векслер и исследования по физике высоких энергий».

А. И. Алиханян «Ереванский электронный синхротрон на 6 Гэв».

А. Л. Минц «Кибернетический ускоритель».

П. А. Черенков «В. И. Векслер и исследования по фоторождению мезонов и фоторасщеплению легких ядер».

Я. Б. Файнберг «Ускорение частиц в плазме».

Ю. М. Адо «Серпуховский протонный синхротрон на 70 Гэв».

Н. Л. Григоров «Изучение взаимодействия с ядрами нуклонов космических лучей высокой энергии».

В настоящем выпуске нашего журнала мы публикуем доклады А. А. Коломенского, А. Л. Минца и Я. Б. Файнберга.

621.384.6

РАЗВИТИЕ ИДЕЙ В. И. ВЕКслера В ОБЛАСТИ УСКОРИТЕЛЕЙ

А. А. Коломенский

Фундаментальные работы В. И. Векслера положили начало быстрому и широкому развитию современных ускорителей. Перед появлением этих работ, в начале сороковых годов, были известны и действовали бетатроны для ускорения электронов, циклотроны для ускорения тяжелых частиц и линейные ускорители. Последние в то время находились на начальном, примитивном уровне. Существенное увеличение энергии частиц не могло быть достигнуто ни с помощью циклотронов, ни с помощью бетатронов. Для дальнейшего прогресса нужно было искать новые пути. Они были указаны в 1944 г. В. И. Векслером¹, который предложил ряд новых типов ускорителей, основанных на открытом им принципе а в т о ф а и р о в к и. Этому широко известному теперь принципу можно давать различные трактовки, например, рассматривая эффективную ускоряющую

волну продольного электрического поля и частицу, взаимодействующую с этой волной. Волна и частица могут распространяться вдоль прямой (случай линейного ускорителя) или совершать периодическое движение (случай циклического ускорителя). Вообще говоря, существует некоторое выделенное движение частицы, называемое резонансным или равновесным. При этом частица, находясь в определенной равновесной фазе по отношению к волне, движется в точном синхронизме с этой волной и резонансным образом получает от нее энергию. Принцип автофазировки утверждает, что при выполнении некоторых нежестких требований отклонение условий

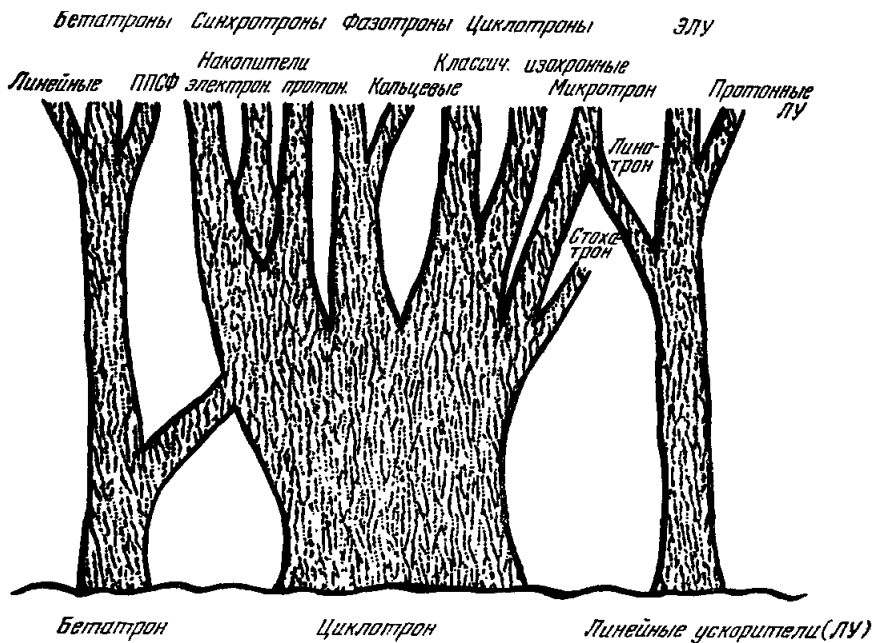


Рис. 1. «Эволюционное дерево» ускорителей.

(ППСФ — постоянное поле, сильная фокусировка или кольцевые фазотроны.)

движения от равновесных не нарушает механизма увеличения энергии частицы. Точный синхронизм заменяется синхронизмом в среднем и различные характеристики движения частицы, такие, как фаза, энергия, радиус, осциллируют устойчивым образом около равновесных значений.

Открытие автофазировки позволило разработать, а затем создать многочисленные ускорители различных типов: фазотроны (синхроциклотроны) — ускорители с постоянным во времени магнитным полем циклотронного типа и переменной частотой ускоряющего электрического поля; синхрофазотроны (протонные синхротроны) — кольцевые ускорители с переменной частотой ускоряющего поля и переменным во времени магнитным полем; синхротроны — ускорители с переменным во времени магнитным полем и постоянной частотой ускоряющего поля; микротроны — ускорители с постоянным во времени магнитным полем и переменной кратностью — отношением частоты обращения к постоянной частоте ускоряющего поля. С появлением этих машин начался современный этап в развитии ускорителей, который в конечном счете привел к расцвету новой фундаментальной области науки — физики высоких энергий.

Возникновение и развитие семейства современных ускорителей разных типов и масштабов можно проиллюстрировать, например, с помощью схематической картины — «эволюционного дерева» ускорителей (рис.

Заметим, что работы В. И. Векслера позволили подойти по-новому с точки зрения автофазировки и к «старым» ускорителям — таким, как циклотрон и линейные ускорители. Они также получили большое развитие за истекшие двадцать лет.

Какие основные достижения имеются к настоящему времени по сравнению с тем периодом, когда В. И. Векслер и его сотрудники закладывали основы современных автофазирующих машин?

Первое, что бросается в глаза, это — повышение энергии частиц, получаемых в ускорителях, на 3 — 4 порядка. В разные годы наибольшей энергии частиц удавалось достичь на машинах разных типов. Это можно показать с помощью специального графика (рис. 2), охватывающего последние тридцать — сорок лет, начиная с появления циклотрона. Любопытно, что максимальная энергия частиц, полученная на ускорителях, увеличивалась на порядок величины примерно за каждые шесть — семь лет. Лишь в последние годы темп начал замедляться. Однако если учесть запущенные и сооружаемые установки на встречных пучках и взять эквивалентную энергию для одного пучка, что, конечно, несколько условно, то окажется, что указанный закон остается справедливым в настоящее время и на ближайшие несколько лет.

Другое важнейшее достижение, характеризующее современный этап, — это появление сильноточных ускорителей и накопителей частиц. Повышение интенсивности проявляется в трех различных аспектах. Во-первых, сокращаются сроки проведения экспериментов, повышается их точность, появляется возможность изучения редких явлений и реакций, имеющих малые сечения и ранее недоступных для исследований. Все это в конечном счете поднимает физику высоких (и не только высоких) энергий на новый уровень. Во-вторых, по-новому и очень серьезно встают вопросы защиты от излучений, радиационных повреждений, влияния фона, дистанционного управления, вывода пучка, к эффективности которого в сильноточных машинах предъявляются очень высокие требования. В-третьих, усложняется сам процесс ускорения, возникают новые эффекты, обязанные взаимодействиям частиц, появляются различные неустойчивости, в связи с чем возникает необходимость введения специальных устройств для подавления нежелательных и опасных эффектов. К этому вопросу мы еще вернемся.

Общее представление о современном состоянии ускорителей можно получить, рассматривая положение отдельных установок на графиках с координатами энергия — интенсивность. Подавляющее большинство действующих теперь ускорителей (как циклических, так и линейных) дает частицы в течение коротких импульсов, разделенных относительно

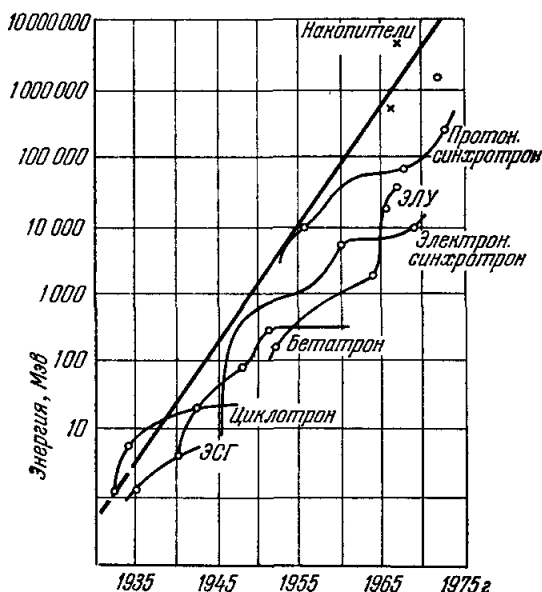


Рис. 2. Максимальная энергия частиц, достигнутая на ускорителях различных типов в разные годы.

большой паузой. Поэтому следует отличать интенсивность в импульсе от средней интенсивности (числа частиц, ускоряемых в секунду). На рис. 3—6

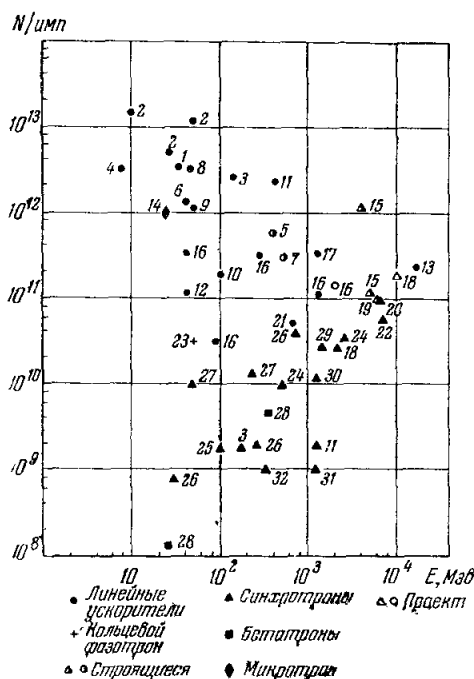


Рис. 3. Распределение электронных ускорителей по энергии и интенсивности (импульсной).

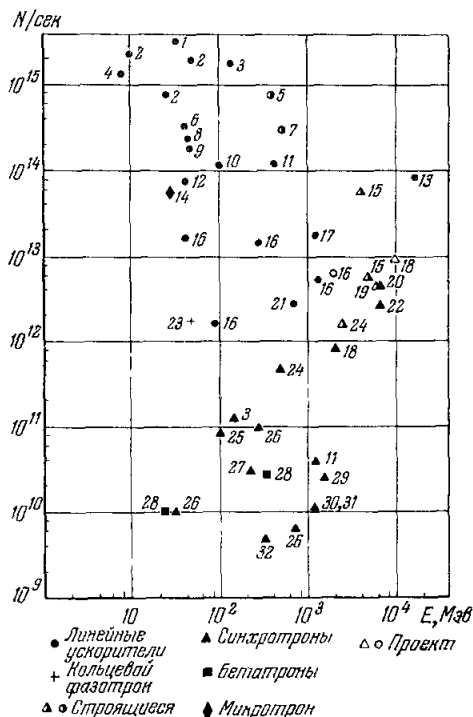


Рис. 4. Распределение электронных ускорителей по энергии и интенсивности (средней).

Для линейных ускорителей интенсивность приведена к энергетическому разбросу с полушириной $\pm 0,5\%$. Энергия линейных ускорителей принята той, для которой в литературных источниках приведены значения интенсивности.

1. Ун-т Торонто (Торонто, Канада). 2. Ускорители, выпускаемые фирмой «Дженерал Дайнемикс Корп.» (США). 3. Национальное бюро стандартов (Гайтесберг, США). 4. Радиационный центр Осака (Осака, Япония). 5. Массачусетский технологический ин-т (Кембридж, США). 6. Иельский ун-т (Нью-Хейвен). 7. Национальный ин-т ядерной физики и техники (Сакле, Франция). 8. Репселерский политехнический ин-т (Трой, США). 9. Ин-т технической ядерной физики (Дармштадт, ФРГ). 10. Саскачеванский ун-т (Саскатун, Канада). 11. Национальная лаборатория во Фраскати (Фраскати, Италия). 12. Исследовательская лаборатория Флота (Вашингтон, США). 13. СЛАК — Стэнфордский центр линейного ускорителя Стэнфордского ун-та (Стэнфорд, США). 14. Объединенный ин-т ядерных исследований (Дерсбери, Великобритания). 15. НИНА — Национальный ин-т ядерных исследований (Дубна, СССР). 16. Ускорители физико-технического ин-та АН УССР (Харьков, СССР). 17. Лаборатория линейного ускорителя Парижского ун-та (Орсэ, Франция). 18. Ускорители Корнельского ун-та (Итака, США). 19. Физический ин-т (Ереван, СССР). 20. ЦЕА — Кембриджский электронный ускоритель, Массачусетский технологический ин-т и Гарвардский ун-т (Кембридж, США). 21. Стэнфордский ун-т (Стэнфорд, США). 22. ДЕЗИ — Немецкий электронный синхротрон (Гамбург, ФРГ). 23. Ассоциация ун-тов Среднего Запада (Мэдиссон, США). 24. Ускорители Боннского ун-та (Бонн, ФРГ). 25. Ун-т Турина (Турин, Италия). 26. Ускорители Физического ин-та им. П. Н. Лебедева АН СССР (Москва, СССР). 27. Синхротроны-инжекторы накопительных колец Ин-та ядерной физики СО АН СССР (Новосибирск, СССР). 28. Иллинойский ун-т (Урбана, США). 29. Калифорнийский технологический ин-т (Пасадена, США). 30. НИИ ядерной физики Томского политехнического ин-та (Томск, СССР). 31. Ун-т Лунда (Лунд, Швеция). 32. Ун-т Глазго (Глазго, Великобритания).

показано отдельно распределение электронных и крупных протонных ускорителей по средней и импульсной интенсивности (при разных энер-

гиях). Графики показывают (особенно для электронных машин) очень большое разнообразие типов и их основных характеристик. Так, по средней интенсивности электронные ускорители различаются примерно на шесть порядков, а по энергии — почти на четыре порядка *).

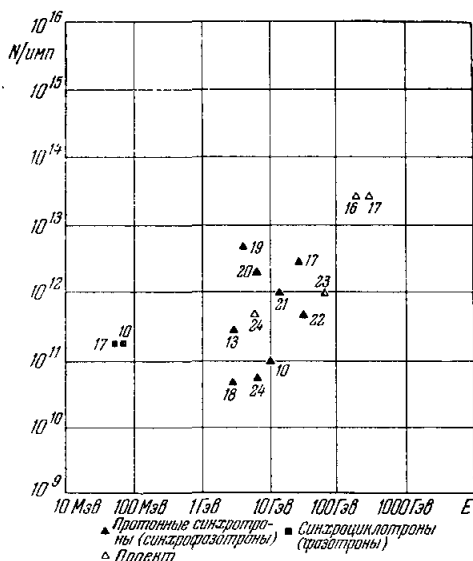


Рис. 5. Распределение крупных протонных ускорителей по энергии и интенсивности (импульсной).

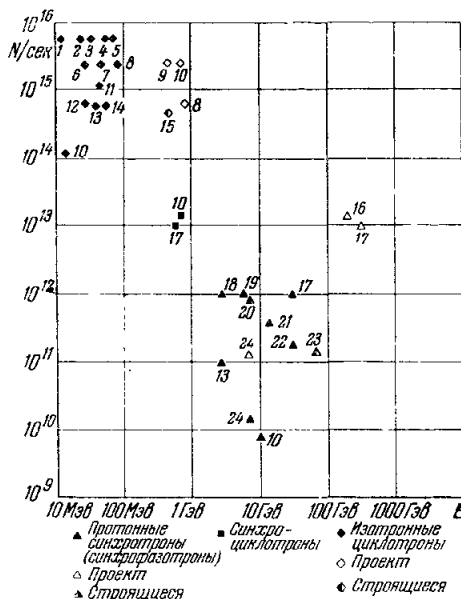


Рис. 6. Распределение крупных протонных ускорителей по энергии и интенсивности (средней).

1. Бирмингемский ун-т (Бирмингем, Великобритания). 2. Амершам (Великобритания). 3. Протонный циклотрон с регулируемой энергией фирмы «Филипс» (Эйндховен, Нидерланды). 4. Мичиганский ун-т (Ист-Лансинг, США). 5. Калифорнийский ун-т (Беркли, США). 6. Циклотрон для производства изотопов фирмы «Филипс» (Эйндховен, Нидерланды). 7. Лаборатория высоких энергий им. Э. Резерфорда (Харуэлл, Великобритания). 8. Оксфордская национальная лаборатория (Оксфорд, США). 9. Циклотрон для ускорения отрицательных ионов водорода, Ун-т Калифорнии (Лос-Анжелос, США). 10. Объединенный институт ядерных исследований (Дубна, СССР). 11. Исследовательский ядерный центр (Карлсруэ, ФРГ). 12. Миланский ун-т (Милан, Италия). 13. Национальный институт ядерной физики и техники (Сакле, Франция). 14. Ун-т Манитобы (Виннипег, Канада). 15. Швейцарский федеральный технологический ин-т (Цюрих, Швейцария). 16. Протонный синхротрон на 200 МэВ (Вестон, США). 17. Европейский центр ядерных исследований (ЦЕРН) (Женева, Швейцария). 18. Принстон — Пенсильванский протонный синхротрон (Принстон, США). 19. Беватрон, Калифорнийский ун-т (Беркли, США). 20. НИМРОД, Лаборатория высоких энергий (Чилтон, Великобритания). 21. Синхротрон с нулевым градиентом Аргоńskiej национальной лаборатории (Аргона, США). 22. Брукхейвенская национальная лаборатория (Антон, США). 23. Ин-т физики высоких энергий (Серпухов, СССР). 24. Ин-т теоретической и экспериментальной физики (Москва, СССР). 25. «Сатурн» (Сакле, Франция).

Здесь мы не будем касаться интересных с физической точки зрения работ, связанных с ускорением ступков электронно-ионной плазмы или с ускорением частиц с помощью плазмы. В. И. Векслер был одним из зачинателей этого направления ², которое пока еще не вышло из стадии начальных поисковых работ, и реализация имеющихся идей встречает серьезные трудности. Но в будущем применение плазмы в ускорительной физике может оказаться эффективным. Может быть, оно станет альтернативой той вынужденной гигантомании, которая отличает эту область.

*) Подробности современного состояния электронных ускорителей см. в ²⁰.

Как видно из рис. 12, установки, на которых достигается наибольшая энергия частиц, — это протонные синхротроны, или, по-другому, синхрофазотроны. История их развития началась в ФИАНе, где двадцать лет назад впервые зародился этот тип ускорителей. В 1948—1950 гг. группа физиков во главе с В. И. Векслером^{3, 4} разработала физические принципы и теорию движения частиц, которые легли в основу проектирования беспрецедентного по тому времени ускорителя для получения протонов с энергией 10 Гэв. Выбор энергии диктовался различными соображениями, в частности стремлением заметно превысить пороговое значение для

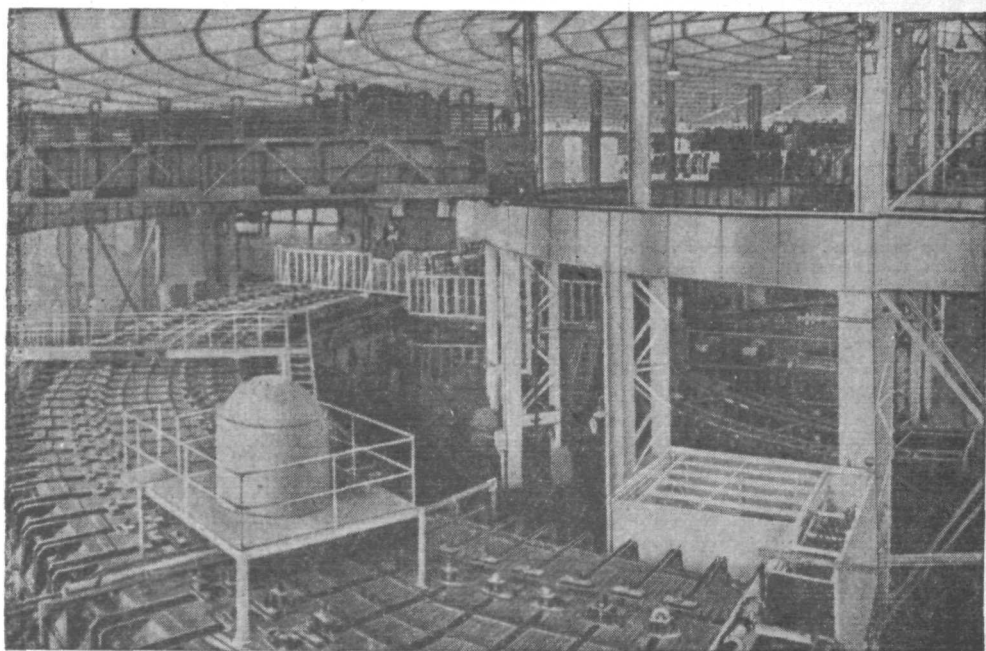


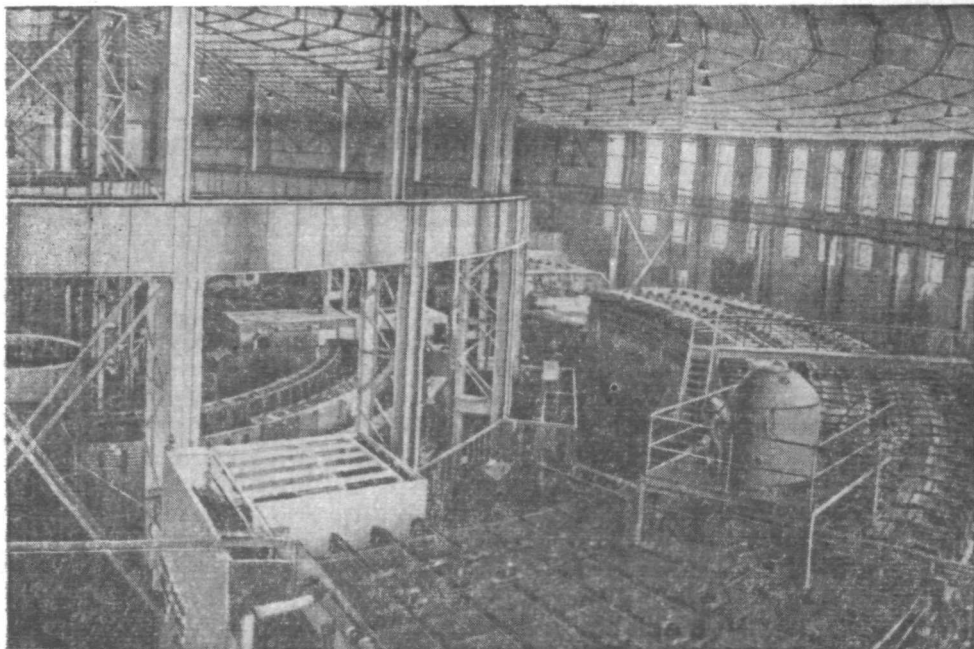
Рис. 7. Общий вид дубненского

рождения пары нуклон-антинуклон на нуклоне (5,6 Гэв) и вместе с тем значительно превзойти значение 6 Гэв, на которое был рассчитан намеченный к сооружению примерно в то же время беватрон — ускоритель Берклиевского университета (США, Калифорния).

В ФИАНе была сооружена и в 1953 г. запущена специальная модельная установка на 180 Мэв для экспериментальной отработки и проверки наиболее важных выводов теории^{*}). В течение ряда лет в процессе проектирования и сооружения в Дубне синхрофазотрона на 10 Гэв были решены многие трудные физические, электротехнические, радиотехнические, вакуумные, строительные и другие проблемы, что потребовало напряженной работы ряда больших научных, инженерных и производственных коллективов. Вся работа проводилась под непосредственным руководством В. И. Векслера, который проявил себя при этом не только как выдающийся физик, но и как талантливый инженер и организатор. В 1957—1958 гг. на дубненском синхрофазотроне были получены проектные значения энергии и интенсивности пучка протонов.

^{*}) Впоследствии эта установка была реконструирована в электронный синхротрон на энергию 680 Мэв¹⁰.

История создания, основные особенности и параметры уникальной дубненской установки хорошо известны. Ее общий вид показан на рис. 7. Значение этой установки, конечно, не исчерпывается тем, что она непосредственно дала и дает для физики высоких энергий. В результате ее сооружения и запуска были заложены физико-технические основы целого нового направления и созданы предпосылки для следующего этапа — создания сильнофокусирующих синхрофазотронов, сначала на 7 Гэв в Москве в Институте теоретической и экспериментальной физики ⁵, а затем на 70 Гэв в Серпухове ⁶. Последний ускоритель, на котором начаты



синхрофазотрона на 10 Гэв.

пуско-наладочные работы, является сейчас и останется еще в течение ряда лет крупнейшим в мире.

Остановимся кратко на перспективах дубненского ускорителя. Он был запущен десять лет назад, и энергия 10 Гэв, которая считалась в то время рекордной, была затем превзойдена на некоторых других машинах большего масштаба, сооруженных позже. Однако дубненская установка имеет огромные неиспользованные возможности в смысле увеличения интенсивности пучка протонов. Надо сказать, что на ее ровеснике — американском беватроне на 6 Гэв — соответствующая работа уже была проведена, а на ряде машин более позднего поколения проводится.

На некоторых особенностях циклических машин с большой интенсивностью мы еще остановимся. Пока же необходимо отметить, что современный уровень понимания вопроса позволяет утверждать, что в отношении повышения интенсивности для данной машины имеются благоприятные объективные возможности. Можно и должно сделать дубненский синхрофазотрон ультрарелятивистской машиной — мощным генератором пучков вторичных частиц, в частности, *K*-мезонов. Для этого нужно осуществить такие мероприятия, как поднятие энергии и интенсивности линейного ускорителя-инжектора, усиление защиты, обеспечение эффективного вывода пучка. Важную роль при этом может сыграть реализация сделанного в свое время автором предложения об инжекции из специального накопителя ⁷. В последнем должны накапливаться многочисленные импульсы частиц, которые линейный ускоритель способен давать в течение ~ 10 сек между периодами инжекции. Затем интенсивный накопленный и ускоренный до необходимой энергии пучок вводится в основную машину с применением многооборотной инжекции. Успехи в области накопителей, достигнутые в последнее время, дают

основание рассчитывать на эффективность этого метода, различные модификации которого в последнее время привлекают все большее внимание (см. Труды V Международной конференции по ускорителям, Фраскати, 1965).

Модернизация дубненской машины существенно усилит фронт работ по физике высоких энергий в нашей стране. Вместе с тем будет отдана дань уважения памяти В. И. Векслера, вложившего в эту машину так много сил.

История создания наиболее распространенных электронных ускорителей на высокую энергию — синхротронов — также началась с разработки и запуска первых машин такого типа коллективом лаборатории В. И. Векслера в ФИАНе в 1946—1949 гг. Первый в нашей стране автофазирующий ускоритель — электронный синхротрон на 30 *Мэв* — был разработан и создан в 1945—1947 гг. С тех пор он находится в работе, являясь основным прибором фотоядерной лаборатории. Поскольку на начальной стадии ускорения используется индукционный режим ускорения, эта установка является одновременно и первым бетатроном, запущенным в СССР (описание этой машины см. в ⁸). В течение последующих лет в ФИАНе были разработаны и созданы синхротроны все больших масштабов. В 1947 г. начались работы по проектированию синхротрона на энергию 250 *Мэв*, достаточную для фоторождения π -мезонов. Благодаря опыту, полученному при создании первого синхротрона, этот ускоритель был сооружен за короткое время и запущен в октябре 1949 г. (энергия электронов была доведена затем до 280 *Мэв*). На базе этого синхротрона (описание его см. в ⁹), отличающегося большой средней интенсивностью электронного пучка, была создана фотомезонная лаборатория, занявшая благодаря своим работам ведущее положение в соответствующей области.

Дальнейшее развитие синхротронов неразрывно связано с прогрессом в понимании динамики электронов при наличии синхротронного излучения. В. И. Векслер с самого начала проявил интерес к этому явлению и еще в 1946 г. с группой сотрудников предложил метод генерации миллиметровых волн, основанный на использовании когерентной части синхротронного излучения ¹¹. Нужно сказать, что синхротронное (магнитотормозное) излучение само по себе интереснейшее физическое явление, с которым приходится встречаться в различных областях науки, но для электронных синхротронов, особенно на значительные энергии, оно представляется исключительно важным. Дело не только в том, что радиационные потери достигают больших значений и требуют для своей компенсации мощной ВЧ системы. Кстати сказать, автофазировка и здесь проявляет свои замечательные свойства, обеспечивая автоматическую компенсацию потерь (в тех пределах, какие допускает мощность). Главное же заключается в том, что синхротронное излучение оказывается определяющим для всей динамики электронов — и для фокусировки, и для процесса ускорения. Здесь невозможно останавливаться на соответствующей теории, которая выросла в ФИАНе из работ, связанных сначала с первыми сравнительно небольшими синхротронами. Эта теория, первоначально развитая автором совместно с А. Н. Лебедевым ^{12, 13}, позволила получить выводы о наличии так называемого радиационного трения (положительного или отрицательного). Оказалось, что излучение вместе с электромагнитным полем ускоряющей системы может вызывать либо затухание, либо раскачку бетатронных и синхротронных колебаний в зависимости от структуры магнитной системы ускорителя или накопителя. Эти положения лежат в основе больших современных сильнофокусирующих синхротронов, в которых электроны ускоряются до энергии порядка 5—10 *Гэв*. Особенно существенна концепция радиационного трения для разработки и создания электронных и электронно-позитронных накопителей. Это трение обеспечивает самую возможность накопления

достаточно плотных циркулирующих пучков, ибо без него, согласно теореме Лиувилля, невозможно повышать плотность по сравнению с плотностью вводимых пучков. Оно же обеспечивает необходимое в ускорителях и особенно в накопителях достаточно большое время жизни частиц по отношению к разнообразным возмущающим явлениям — рассеянию и тормозному излучению на остаточном газе, разным кулоновским неустойчивостям, а также по отношению к квантовым статистическим флуктуациям самого излучения, важность которых была впервые отмечена в ¹⁴.

Каковы перспективы синхротронов в смысле получения большей энергии и интенсивности? Дальнейший прогресс в обоих отношениях осложняется из-за радиационных потерь, мощность которых растет пропорционально четвертой степени энергии. Вместе с тем потери за оборот обратно пропорциональны радиусу кривизны орбиты. Поэтому в принципе их всегда можно снизить до разумного уровня ценой соответствующего увеличения радиуса синхротрона. По такому пути идут в последнее время. Кроме того, большие возможности могут открыться при переходе к сверхпроводящим резонаторам. В них практически не будет потерь в стенках и вся ВЧ мощность будет вкладываться в повышение энергии пучка. Во всяком случае получение на синхротронах электронов с энергией 20—25 Гэв, а может быть и больше, является, по-видимому, делом ближайшего будущего.

Теперь несколько слов о микротроне, или, как его первоначально называл В. И. Векслер, кратном резонансном ускорителе. Это был первый из предложенных им ускорителей с автофазировкой ¹. Интересно, что микротрон по некоторым своим свойствам представляет исключение среди прочих ускорителей. Как показывает теория ¹⁵, движение на плоскости, играющей роль фазовой, происходит в нем, вообще говоря, посредством резких скачков, а не плавного перемещения, как обычно. Среди различных модификаций микротрона еще в 1947 г. в ФИАНе рассматривался вариант с так называемым разрезным магнитом для размещения достаточно мощной ускорительной системы. В течение довольно длительного времени микротрон не имел заметного распространения, несмотря на простоту конструкции. В 60-х годах после экспериментальных работ, выполненных в Институте физических проблем, а затем также в ФИАНе, в конструкцию микротрона были внесены некоторые эффективные усовершенствования ^{16, 17}. В результате микротроны на небольшую энергию (5—30 Мэв) стали давать электронные пучки с хорошей импульсной интенсивностью и нашли себе ряд применений. В настоящее время мы являемся свидетелями начала нового этапа в развитии микротрона, который, возможно, в конечном счете приведет к созданию установок, дающих непрерывный ускоренный пучок электронов с энергией порядка сотен Мэв, а может быть и выше. В таком микротроне ускоряющей системой должен служить сверхпроводящий резонатор или линейный ускоритель. Хотя имеется ряд предложений по модификации магнитной системы микротрона с целью создания фокусировки, всерьез пока обсуждается лишь уже упоминавшийся простой вариант с разрезным магнитом ^{18, 19}. Надо сказать, что, несмотря на принципиальную простоту системы, практическая ее реализация потребует больших усилий для обеспечения фазовой и вертикальной устойчивости.

Кроме рассмотренных известных методов ускорения частиц, следует еще коротко остановиться на одном менее известном специфическом методе, предложенном Э. Л. Бурштейном, В. И. Векслером и автором. Он хотя и не применялся широко, но интересен с принципиальной точки зрения и встречается также в различных физических явлениях, не связанных непосредственно с ускорителями. Речь идет о так называемом стохастическом методе, впервые предложенном в работе, выполненной в 1948 г.,

но опубликованной позже ²¹. Его отличительной особенностью является применение вероятностного (стохастического) механизма ускорения, который может реализоваться, вообще говоря, и при линейном, и при циклическом ускорении. Рассмотрим простейшую схему, когда частица, обращаясь в постоянном во времени магнитном поле, многократно проходит промежутки с переменным во времени напряжением. Пусть оно может с равной вероятностью принимать два значения $+V$ и $-V$. Вероятность того, что частица k раз подряд попадет в ускоряющее поле и наберет энергию $E_k = keV$, равна 2^{-k} и чрезвычайно мала при значительном k . Однако эффективность ускорения будет определяться не этой вероятностью, а величиной w_k , равной доле числа частиц, достигающих энергии E_k за любое количество оборотов, т. е. при различных случайных последовательностях ускорений и замедлений. Как показывает расчет, величина w_k оказывается порядка $w_k \approx 1/2k$, что соответствует значительной интенсивности пучка на выходе такого ускорителя — стохатрона, поскольку в принципе частицы поступают здесь непрерывно, а не импульсно. При этом среднее число оборотов будет, разумеется, больше k и по порядку величины равняться k^2 . Развита в дальнейшем теория стохастического режима ²² показала, что его эффективность в общем случае существенно зависит от спектра ускоряющего «шума» $V(t)$. Стохастический режим может быть полезен в комбинации с другими методами ускорения: для облегчения условий инжекции в фазотроне ^{23а}, для перехода через критическую энергию ^{23б}, а также для накопления частиц на определенной орбите ²². Механизм, аналогичный рассмотренному стохастическому режиму, ответствен в определенной степени за ускорение электронов при взаимодействии пучков с плазмой (см., например, стр. 617).

Разнообразие типов ускорителей дает возможность, выражаясь языком генетики, производить скрещивания их различных видов между собой с целью получения новых, более эффективных или более экономичных ускорительных машин. Такого рода предложения и разработки начались еще двадцать лет назад при участии В. И. Векслера. Первый пример — синхробетатрон, т. е. сочетание синхротрона и бетатрона. Так одно время называли синхротроны с бетатронным первым этапом, к которому относятся первые ФИАНовские машины. Другой пример — уже упоминавшийся синхрофазотрон, сочетание синхротрона и фазотрона.

И в последние годы, уже без участия В. И. Векслера, семейство ускорителей продолжало и продолжает пополняться новыми видами, представляющими сочетания различных типов. Рассмотрим несколько примеров. Начнем с предложенного нами так называемого линотрона ²⁴. Заметим прежде всего, что масштабы синхротронов и линейных ускорителей, используемых для получения электронов высоких энергий, очень велики: длина линейных ускорителей доходит до нескольких километров, диаметр синхротронов — до нескольких сотен метров. Размеры синхротрона по возможности увеличивают в связи с необходимостью уменьшить потери на упоминавшееся выше синхротронное излучение и сократить мощность и масштабы высокочастотной системы. Отметим, что средняя интенсивность пучка в синхротроне оказывается по крайней мере на два порядка меньше, чем в линейном ускорителе. Еще более резкой станет эта разница при применении криогенных линейных ускорителей непрерывного действия, но затраты на единицу длины криогенных установок будут значительно выше, чем для обычных. Вместе с тем анализ динамики релятивистских частиц в линейном ускорителе показывает, что имеются некоторые благоприятные свойства, на которые не обращалось должного внимания. Во-первых, можно одновременно ускорять частицы, имеющие самые различные релятивистские энергии. Во-вторых, можно ускорять частицы

в обоих направлениях как поочередно в бегущей волне, так и одновременно, для чего должна возбуждаться стоячая волна, представляющая собой сумму волн, бегущих в противоположных направлениях.

Указанные свойства позволяют создать новую эффективную систему, в которой на данном линейном ускорителе можно получать энергию, в несколько раз (в принципе во много раз) большую той, на которую он номинально рассчитан. Для краткости мы назвали эту систему линотроном. Для ее реализации на концах линейного ускорителя должны располагаться «отражатели», т. е. поворотно-фокусирующие каналы

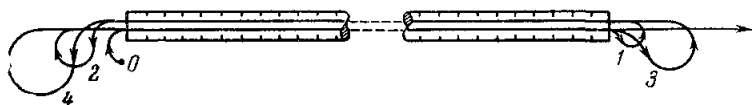


Рис. 8. Схема линотрона:

θ — инжекционный тракт; 1, 2, 3, 4 — магнитные каналы (отражатели).

с постоянным во времени магнитным полем. После очередного прохождения линейного ускорителя сгусток частиц совершает оборот в очередном магнитном канале, снова входит в линейный ускоритель в противоположном направлении и т. д. (рис. 8). Процесс ускорения в линотроне представляет собой резонансный режим с переменной кратностью, в принципе аналогичный тому, который применяется в микротроне¹⁵. Пусть, для примера, имеется линейный ускоритель со стоячей волной на энергию $E_d = 1 \text{ Гэв}$, а необходимо получить $E_m = 3 \text{ Гэв}$, т. е. утроить энергию электронов. В этом случае нужно добавить два кольцевых магнита с радиусами соответственно $R_1 \approx 3 \text{ м}$, $R_2 \approx 6 \text{ м}$, если принять умеренное значение напряженности магнитного поля $H = 10 \text{ кэ}$. Эти магниты относительно невелики по сравнению с самим линейным ускорителем, длина которого составляет $\sim 200 \text{ м}$.

Отметим, что в линейном ускорителе с бегущей волной также можно осуществить линотронный режим многократного ускорения. В этом случае ускорение частиц может происходить при движении в обе стороны — при переменном распространении волны в прямом и обратном направлениях. В принципе можно многократно ускорять частицы и в одну сторону — в направлении заданного распространения волны, когда при движении в обратном направлении — навстречу волне — энергия частиц практически не изменяется.

При ускорении до заданной энергии длина и масштаб системы питания могут быть существенно уменьшены в линотроне по сравнению с линейным ускорителем, рассчитанным на такую же энергию. При этом линотрон сохраняет преимущество в смысле интенсивности, а также простоты ввода и вывода частиц. Важно также, что синхротронное излучение электронов в линотроне не будет играть существенную роль, как в синхротронах, так как число прохождений магнитного поля ограничено, а выигрыш энергии велик. По этой же причине можно применять сильные магнитные поля и тем самым сократить размеры каналов.

В качестве второго примера рассмотрим накопители частиц, предназначенные либо для реализации метода встречных пучков, либо, в принципе, для создания новых или лучших возможностей проведения эксперимента при обычном использовании пучков. Обычно накопители сооружают как отдельные специальные установки — в виде двух колец (восьмерки) для электрон-электронных соударений или одного кольца для электрон-позитронных соударений (описание таких установок см.,

например, в ²⁵). Впуск в них производится из специальных ускорителей-инжекторов. По такому пути пошли в лабораториях Стэнфорда, Фраскати, Новосибирска, Орск. Нужно учитывать, однако, что современные накопители — сложные и дорогостоящие установки, трудности создания которых не меньше тех, которые возникают при создании крупных ускорителей. Это обстоятельство стимулировало работы по другому пути.

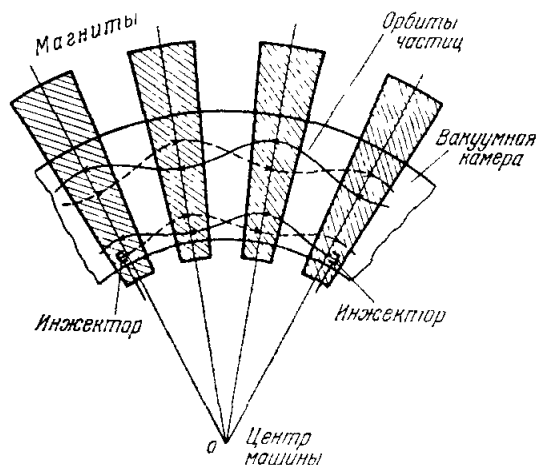


Рис. 9. Схема движения пучков частиц в симметричном ускорителе ²⁶.

Этот путь, который разрабатывается в ФИАНе, заключается в совмещении в одной установке функций ускорения, накопления и встречных соударений частиц.

Впервые такого рода система — симметричный или двухсторонний ускоритель-накопитель — была предложена нами примерно десять лет назад ²⁶. Это — кольцевая сильнофокусирующая установка с постоянным во времени магнитным полем, представляющая собой специальную модификацию так называемого кольцевого фазотрона ²⁷. Она состоит из магнитных блоков с чередующимися по знаку полями, резко возрастающими по абсолютной величине с ростом радиуса. Отношение полей в соседних блоках близко к единице, благодаря чему возможно одновременное ускорение двух пучков одинаковых частиц, обращающихся в противоположных направлениях, а также накопление и встречные соударения их в одной и той же установке (рис. 9). В ФИАНе был разработан, сооружен и запущен ускоритель-накопитель электронов указанного типа на энергию до 30 Мэв ²⁸. На этой установке (рис. 10) с весьма своеобразной формой магнитного поля были реализованы два ускорительных режима — индукционный (бетатронный) и резонансный (фазотронный), оба обладающие большими возможностями в смысле интенсивности пучка по сравнению с обычными электронными бетатронами и синхротронами того же масштаба. Идея обращения пучков одинаковых частиц в противоположных направлениях в одном кольце с модулированным по знаку (или величине) магнитным полем получила признание. Она, в частности, положена в основу уникального накопителя для встречных соударений протонов с энергией 25 Гэв ²⁹. Эта установка сооружается в ЦЕРНе — Международном европейском центре ядерных исследований (Женева, Швейцария) — с использованием действующего там мощного протонного синхротрона в качестве инжектора (рис. 11).

В ФИАНе Ю. М. Адо был также предложен метод накопления встречных электрон-позитронных пучков непосредственно в синхротроне³⁰. В отличие от обычных накопителей, здесь используется режим не

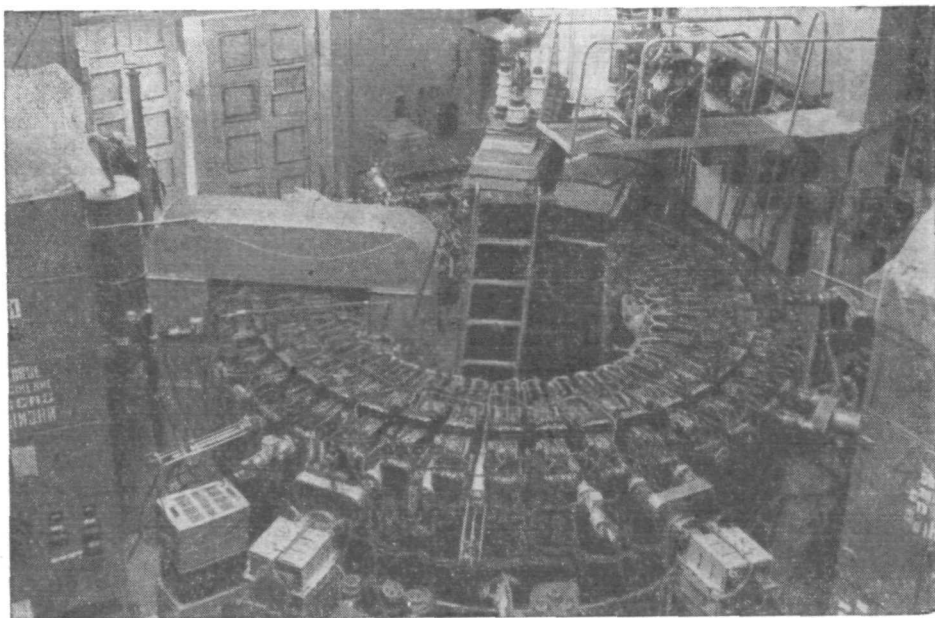


Рис. 10. Общий вид симметричного кольцевого фазотрона ФИАН²⁸.
(Кольцевой магнит, ускоряющий резонатор, бетатронные сердечники, импульсники для питания инжекторов.)

с постоянным, а с переменным во времени магнитным полем одной полярности. Это значит, что на синусоидально изменяющееся магнитное поле накладывается постоянная составляющая. Инжекция частиц производится вблизи минимума магнитного поля, а радиационное затухание бетатронных

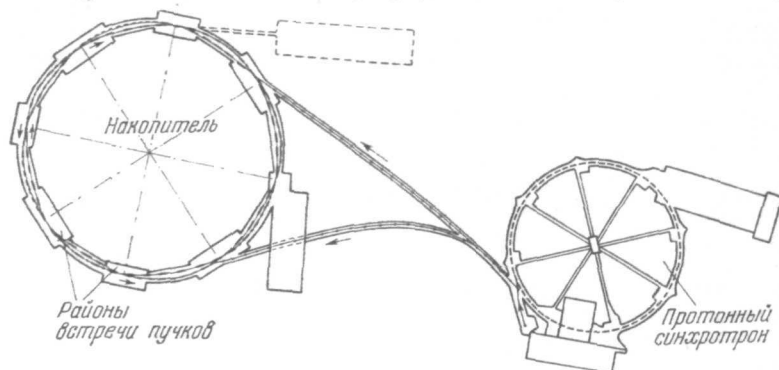


Рис. 11. План накопителя протонов, сооружаемого в ЦЕРНе²⁹.

и синхротронных колебаний происходит в основном в районе максимума поля. Благодаря этому затуханию после каждого цикла ускорения-замедления в фазовом пространстве «освобождается» место для очередной порции инжектируемых частиц. Эксперименты по накоплению электронов и позитронов в синхротроне были выполнены на синхротроне на 280 Мэв.

Результаты этих экспериментов подтвердили, что при обеспечении определенных условий (вакуум, инжекция) эффективность такого метода накопления частиц оказывается достаточно высокой.

В ФИАНе в последнее время разработан проект каскадного электрон-позитронного ускорения-накопления с использованием двух синхротронов-накопителей: бустерного (на энергию ~ 300 Мэв), где происходит предварительное накопление частиц, и основного, где энергия частиц

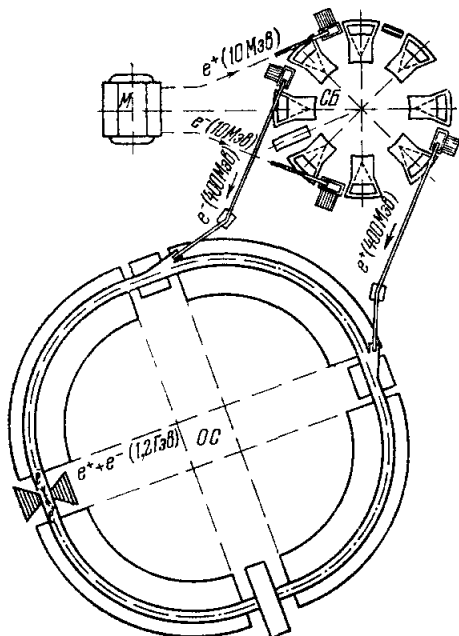


Рис. 12. Система каскадного ускорения-накопления электронов и позитронов³¹.

М — микроотрон, СБ — бустерный синхротрон, ОС — основной синхротрон.

повышается в основном синхротроне. Энергия частиц повышается в основном синхротроне.

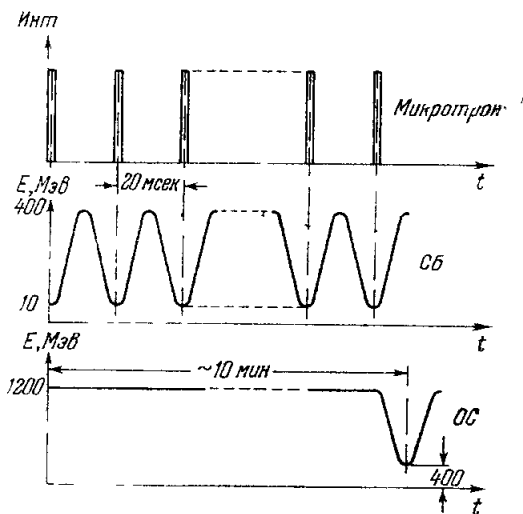


Рис. 13. Временной режим работы системы каскадного ускорения-накопления³¹.

доводится до максимального значения $\sim 1,2$ Гэв³¹. Такая система позволяет избежать применения дорогостоящего линейного ускорителя и в то же время получить необходимый темп накопления в режиме встречных пучков. Общая схема предлагаемой установки, а также временной режим ее работы приведены на рис. 12 и 13.

Положительные результаты первых экспериментов стимулировали развитие такого метода накопления применительно к области высоких энергий. Это нашло отражение в проекте, предполагающем осуществить метод встречных электрон-позитронных пучков на Кембриджском синхротроне на 6 Гэв (США) с применением так называемой системы запасного пути³². При этом накопление частиц с энергией ~ 3 Гэв будет происходить в самом синхротроне, а их встречные соударения должны осуществляться в районе, лежащем в дополнительном специально оборудованном магнитном канале с постоянным полем. После достижения необходимой интенсивности частицы будут переводиться в кольцо, образованное этим каналом с остальной большей частью синхротрона. Там будет поддерживаться постоянное магнитное поле, соответствующее энергии накопления.

Характеристика современного этапа развития ускорителей будет неполной, если не остановиться на некоторых физических проблемах, связанных с большой интенсивностью пучка. Заметим, что В. И. Векслер много работал над изысканием возможностей получения больших токов ускоренных частиц, причем основную перспективу он видел не в ускорите-

лях типа синхротрона, а в ускорении плазменных или плазмоподобных заряженных сгустков^{2, 33}. Однако реальные успехи в этом направлении достигнуты пока именно на пути развития и совершенствования циклических и линейных ускорителей обычных типов.

В свое время и в теории, и в практике ускорительных машин можно было пользоваться представлением об одночастичном движении или о системе невзаимодействующих частиц. Теперь пространственный заряд ускоряемого или накапливаемого пучка часто достигает такой большой величины, что учет взаимодействия между частицами, а также с окружающими стенками, полюсными наконечниками, ускоряющей системой становится обязательным. Различные эффекты, связанные с пространственным зарядом и возникающие при движении частиц в ускорительных системах, исследованы в большом числе работ, особенно в последние годы. Поэтому даже краткий обзор этих работ мог бы составить предмет отдельной большой статьи. Здесь мы коснемся этого вопроса кратко и в основном только с точки зрения тех явлений, которые проявляются в автофазировке (для определенности будем иметь в виду движение в синхротроне). Влияние пространственного заряда на продольное (азимутальное) движение частиц существенно определяется видом зависимости частоты обращения ω от энергии E или в первом приближении величиной производной $\partial\omega/\partial E$ и особенно ее знаком. Энергию, при которой $\partial\omega/\partial E = 0$, называют критической, $E_{кр}$. При этом автофазировка исчезает, фазовое движение замирает и частица становится сильно подверженной действию различных возмущений. Ниже $E_{кр}$, т. е. при $E < E_{кр}$, величина $\partial\omega/\partial E$ положительна, $\partial\omega/\partial E > 0$. Выше $E_{кр}$, при $E > E_{кр}$, знак $\partial\omega/\partial E$ меняется, т. е. $\partial\omega/\partial E < 0$. Существуют синхротроны, где все время $\partial\omega/\partial E > 0$ (протонный синхротрон ИТЭФ на 7 Гэв) или где, напротив, все время $\partial\omega/\partial E < 0$ (протонный синхротрон ОИЯИ на 10 Гэв, электронный синхротрон на 6 Гэв в Ереване). Наконец, существуют такие синхротроны, где в процессе ускорения сначала $E < E_{кр}$, потом T при помощи автоподстройки частоты переводятся через значение $E = E_{кр}$ в область $E > E_{кр}$ (протонные синхротроны на 28 Гэв в ЦЕРНе и на 33 Гэв в Брукхэйвене, США).

Предположим, что в магнитном поле обращается пучок кулоновски взаимодействующих частиц, причем это обращение происходит свободно, в отсутствие переменного ускоряющего поля. Можно поставить вопрос о продольной (азимутальной) устойчивости такого пучка. Эта задача была рассмотрена А. Н. Лебедевым и автором в 1959 г.³⁴. В результате было обнаружено явление, получившее название эффекта отрицательной массы. Он заключается в том, что если $\partial\omega/\partial E < 0$, т. е. $E > E_{кр}$, и энергетический (а значит, и радиальный) разброс в пучке достаточно мал, то азимутально однородное распределение пучка оказывается неустойчивым. Это можно качественно пояснить следующим образом. Положительная флуктуация плотности в данной точке вызывает появление азимутально направленных сил, отталкивающих соседние частицы. В результате энергия частицы, движущейся впереди флуктуации, возрастает, что благодаря условию $\partial\omega/\partial E < 0$ приводит к уменьшению ω , т. е. к отставанию частицы в ее обращении. Таким образом, соседние частицы как бы втягиваются в район флуктуации и она нарастает. Можно сказать, что движение соседних с флуктуацией частиц по азимуту происходит так, как если бы они обладали отрицательной массой. Ускорение оказывается направленным противоположно силе. Отсюда и название явления — эффект отрицательной массы, — которое может играть важную роль, в частности, в период инжекции. В отличие от рассмотренного случая, при выполнении противоположного условия $\partial\omega/\partial E > 0$ циркулирующий пучок оказывается устойчивым. Возникшая флуктуация не нарастает, а вызывает

осцилляции плотности — эффект положительной массы, который, кстати, имеет место и для заряженного пучка, движущегося по прямой линии.

Рассмотрим теперь азимутальное движение заряженного пучка частиц при наличии переменного ускоряющего электрического поля, которое

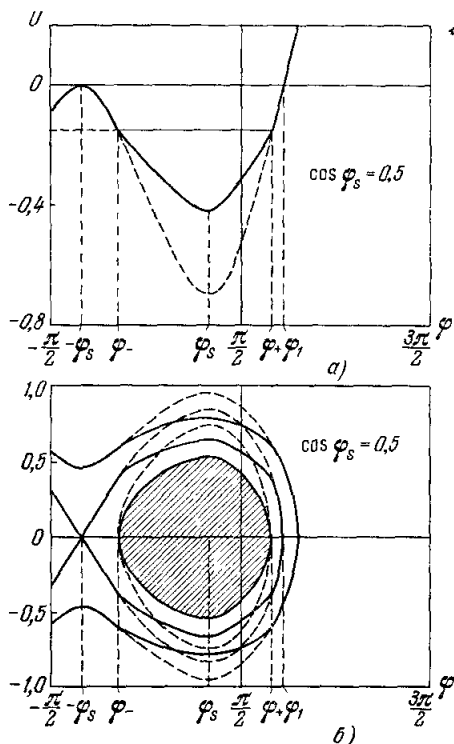


Рис. 14. Влияние пространственного заряда на автофазировку в области $E < E_{кр}$ ³⁵.

а) Потенциальная яма для движения по азимуту. Пунктиром показана форма ямы без учета пространственного заряда. б) Картина на фазовой плоскости. Пунктиром показаны фазовые траектории без учета пространственного заряда. Заштрихована область, занятая пучком.

радиальных размеров, и в уменьшении частоты синхротронных колебаний. в) Существует предельный заряд $N_{прд}$, соответствующий полному выравниванию (вырождению) потенциальной ямы и исчезновению сепаратрисы. Заметим, что в процессе ускорения при приближении к $E_{кр}$ в отсутствие пространственного заряда происходит сильное затухание фазовых колебаний. При наличии пространственного заряда закон затухания изменяется и, если не принять специальных мер, могут возникнуть большие потери частиц. При $E > E_{кр}$ (рис. 15) пространственный заряд влияет совсем по-иному: а) Потенциальная яма углубляется, так что получается парадоксальный на первый взгляд результат: чем большее количество кулоновски взаимодействующих частиц помещается в сгусток, тем для большего их числа там освобождается место. б) Фазовая устойчивость улучшается — сепаратриса расширяется, т. е. ее радиальные размеры возрастают, а частота синхротронных колебаний увеличивается.

Если говорить о продольном движении частиц, то, кроме рассмотренного эффекта, имеются еще такие, как продольная неустойчивость на сопро-

даря ей устойчивое движение частиц относительно равновесного положения происходит в пределах перемещающейся по азимуту потенциальной ямы, ограниченной особой кривой — сепаратрисой (на плоскости с координатами азимут — радиус). Если речь идет об одной частице, то в принципе не существует качественного различия в действии автофазировки в условиях, когда $E < E_{кр}$ или когда, напротив, $E > E_{кр}$. Однако, как показывает теория, подробно развитая в работе ³⁵, ситуация может коренным образом измениться при наличии заметного пространственного заряда. Его влияние проявляется по-разному и в известном смысле противоположным образом в зависимости от того, выше или ниже критической энергии происходит движение, аналогично тому, как было только что показано для свободно обращающегося пучка.

Сказанное можно проиллюстрировать картиной на фазовой плоскости в простейшем предположении, когда плотность заряда в пучке постоянна.

При $E < E_{кр}$ (рис. 14) пространственный заряд проявляет себя следующим образом: а) Потенциальная яма в пределах сгустка уплощается. б) Фазовая устойчивость ухудшается, что проявляется в сплющивании сепаратрисы, т. е. сокращении ее

тивлении, существующая по обе стороны от $E_{кр}$ и обязванная конечной проводимости стенок камеры, неустойчивость из-за взаимодействия пучка с резонатором, особенно важная для электронных синхротронов, и другие явления. Важное значение имеет пространственный заряд также для поперечного движения, т. е. для фокусировки. Благодаря его непосредственному влиянию, а также влиянию сил изображения, изменяются частоты бетатронных колебаний. Допуск на это смещение определяет предельное число частиц. Конечная проводимость стенок камеры также приводит к сильной поперечной неустойчивости как для случая сплошного пучка, так и для случая отдельных сгустков.

Существуют и другие неустойчивости, продольные и поперечные, которые проявляются в разных машинах по-разному. В накопителях сюда добавляются свои специфические неустойчивости, связанные с эффектом встречи пучков. Пока количество неустойчивостей пучка в ускорителях еще не так велико, как в случае плазменных магнитных ловушек, применяемых в термоядерных исследованиях, но число их, обнаруживаемых теоретически и экспериментально, неуклонно растет. Естественно, что разрабатываются методы их стабилизации. Например, когерентные неустойчивости на сопротивлении подавлялись в ряде ускорителей подачей напряжения на специальные электроды с помощью обратной связи. Неустойчивость типа отрицательной массы может быть подавлена, например, при помощи хотя бы частичного диэлектрического покрытия стенок камеры. Можно думать, что с дальнейшим повышением интенсивности пучков на ускорителях вакуумная камера, снабженная соответствующими устройствами, вообще будет становиться все более активным элементом ускорителя, воздействующим на поведение пучка в такой же мере, как магнит и ускоряющая система. Характерно, что и на новом современном этапе, для которого характерными являются сильноточные ускорители, автофазировка В. И. Векслера, соответствующим образом модифицированная, по-прежнему лежит в основе ускорительных режимов.

Как видно из нашего, по необходимости недостаточно полного обзора, идеи и направления в области ускорителей, заложенные В. И. Векслером, оказались чрезвычайно плодотворными. Они успешно развиваются и продолжают оказывать глубокое определяющее влияние на прогресс ускорительной физики и техники.

Физический институт
им. П. Н. Лебедева АН СССР

2 УФН, т. 93, вып. 4

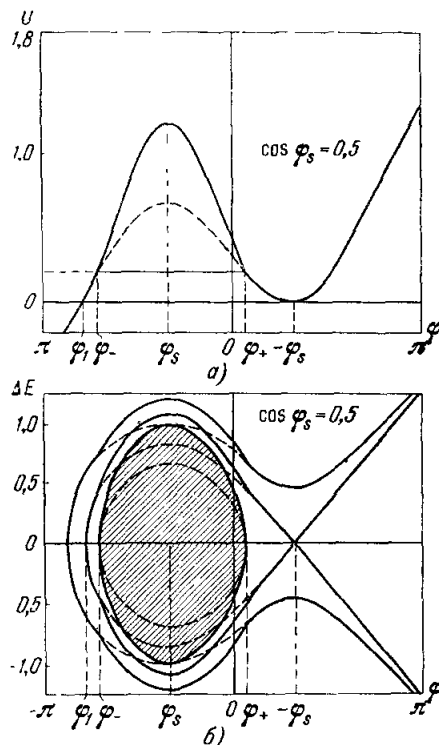


Рис. 15. Влияние пространственного заряда на автофазировку в области $E > E_{кр}$ ³⁵.

а) Потенциальная яма для движения по азимуту. Изображение ямы перевернуто в вертикальном направлении в соответствии с тем, что эффективная масса, входящая в фазовое уравнение, в данном случае отрицательна.
б) Картина на фазовой плоскости. Обозначения те же, что и на рис. 14.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. В. И. Векслер, ДАН СССР 43, 346; 44, 393 (1944).
2. а) В. И. Векслер, Атомная энергия 2, 427 (1957); б) В. И. Векслер и др., Труды Международной конференции по ускорителям, Кембридж, 1967.
3. В. И. Векслер, А. А. Коломенский, В. А. Петухов, М. С. Рабинович, Приложение № 4 к журналу «Атомная энергия», 1957, стр. 5.
4. М. С. Рабинович, Труды ФИАН 10, 23 (1958).
5. Специальный выпуск журнала ПТЭ № 4 (1962).
6. В. В. Владимирский, Е. Г. Комар, А. Л. Минц и др., Труды Международной конференции по ускорителям в Дубне, М., Атомиздат, 1964, стр. 197.
7. А. А. Коломенский, ПТЭ 1, 19 (1961).
8. Синхротрон ФИАН на 30 Мэв, Труды ФИАН 19, 98 (1963).
9. А. Я. Беляк, В. И. Векслер, В. Н. Канунников, П. А. Черенков, Б. Н. Яблоков, Приложение № 4 к журналу «Атомная энергия», 1957, стр. 57.
10. Сб. статей «Синхротрон на 680 Мэв», М., Атомиздат, 1962.
11. Б. В. Белоусов, В. И. Векслер, И. Я. Померанчук, М. Е. Рабинович, Отчет ФИАН 1946 г.
12. А. А. Коломенский, А. Н. Лебедев, Теория циклических ускорителей, М., Физматгиз, 1962, гл. V.
13. А. А. Коломенский, Труды ФИАН 13, 3 (1960).
14. А. А. Соколов, И. М. Тернов, ЖЭТФ 28, 431 (1955).
15. А. А. Коломенский, ЖТФ 30, 1347 (1960).
16. С. П. Капица, В. П. Быков, В. Н. Мелехин, ЖЭТФ 41, 368 (1961).
17. К. А. Беловинцев, Диссертация (ФИАН, 1964).
18. B. H. Week, H. A. Schweitman, P. V. Wilson, Труды V Международной конференции по ускорителям, Фраскати, 1965, стр. 686.
19. C. S. Robinson, Superconducting Microtron, University of Illinois, Report, January 1967.
20. А. А. Коломенский, Труды Международной конференции по электромагнитным взаимодействиям при низких и средних энергиях, Дубна, 1967, стр. 3.
21. Э. Л. Бурштейн, В. И. Векслер, А. А. Коломенский, в сб. «Некоторые вопросы теории циклических ускорителей», М., Изд-во АН СССР, 1955, стр. 3.
22. А. А. Коломенский, А. Н. Лебедев, Труды Международной конференции по ускорителям, ЦЕРН, Женева, 1959, стр. 184.
23. а) R. Keller, см. 22, стр. 636; б) M. Vagbier, см. 22, стр. 636.
24. А. А. Коломенский, Письма ЖЭТФ 5, 204 (1967); см. также 26.
25. А. И. Алиханян, С. К. Есин, С. А. Хейфец, УФН 81, 7 (1963); Г. И. Будкер, УФН 89, 533 (1966); см. также 20.
26. А. А. Коломенский, ЖЭТФ 33, 298 (1957).
27. А. А. Коломенский, В. А. Петухов, М. С. Рабинович, в сб. «Некоторые вопросы теории циклических ускорителей», Изд-во АН СССР, 1955, стр. 7; ПТЭ 2, 26 (1956).
28. А. А. Коломенский, Л. Н. Казанский, В. Н. Канунников, Е. П. Овчинникова, В. А. Пападицев, С. С. Семенов, А. П. Фатеев, Б. Н. Яблоков, Атомная энергия 20, 513; 21, 166 (1966).
29. K. Johnsen, W. C. Middelkoop, B. de Raad, L. Resegotti, A. Schoch, K. R. Symon, C. J. Zilverschoon, Труды Международной конференции по ускорителям, 1963, Дубна, М., Атомиздат, 1964, стр. 312.
30. Ю. М. Адо, Атомная энергия 12, 54 (1962); Ю. М. Адо, К. А. Беловинцев, А. Я. Беляк, Е. Г. Бессонов, О. Б. Демьяновский, В. А. Скорик, П. А. Черенков, В. С. Ширченко, Труды Международной конференции по ускорителям, 1963, Дубна, М., Атомиздат, 1964, стр. 355.
31. К. А. Беловинцев, А. Я. Беляк, Е. Г. Бессонов, А. А. Коломенский, А. Н. Лебедев, А. П. Фатеев, П. А. Черенков, Каскадная система накопления, Препринт ФИАН № 45, 1967; см. также 26.
32. M. S. Livingston, Cambridge Electron Accelerator, CEAL-1028, 1966.
33. В. И. Векслер, В. Н. Цытович, Труды II Международной конференции по ускорителям, ЦЕРН, Женева, 1959, стр. 160.
34. А. А. Коломенский, А. Н. Лебедев, Атомная энергия 7, 549 (1959); Труды II Международной конференции по ускорителям, ЦЕРН, Женева, 1959, стр. 115.
35. А. Н. Лебедев, Э. А. Жильков, Nucl. Instr. 45, 238 (1966).