ООО "ELECTRON LABORATORY"
Научная школа "Электрон"

ФИЗИКА УСКОРИТЕЛЕЙ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

ФИЗИК - ЭТО СПОСОБ АТОМОВ ДУМАТЬ ОБ АТОМАХ.
БИЛЛ БРАЙСОН

ИБРАТЖОН ХАТАМОВИЧ АЛИЕВ
БОХОДИР ХОШИМОВИЧ КАРИМОВ

Боходир Хошимович Каримов
Ибратжон Хатамович Алиев

Физика ускорителей заряженных частиц. Учебное пособие

http://www.litres.ru/pages/biblio_book/?art=67920335
ISBN 9785005681249

Аннотация

В учебном пособии представлен курс физики ускорителей заряженных частиц. Рассмотрены всевозможные модели ускорителей, а также история развития самой науки до настоящего времени. Указано состояние работ в области физики резонансных ядерных реакций и моноэнергетических ускорителей. Книга адресована студентам, специалистам в данной области, преподавателям ВУЗов, магистрам, студентам и иным исследователям.

Содержание

ФИЗИКА УСКОРИТЕЛЕЙ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ 7
Лекция 1 7
Введение 7
Рекомендуемая литература 9
Тема: Зарождение ускорителей заряженных частиц 10
Контрольные вопросы 21
Лекция 2 22
Тема: Физика ускорительной техники с половины XX века 22
Контрольные вопросы 34
Лекция 3 35
Тема: Физика ускорителей до сегодняшнего дня 35
Контрольные вопросы 48
Лекция 4 50
Тема. Вакуумные механизмы 50
Конец ознакомительного фрагмента. 55

Физика ускорителей заряженных частиц Учебное пособие

Ибратжон Хатамович Алиев
Боходир Хошимович Каримов

Редактор Салим Мадрахимович Отажонов

Дизайнер обложки Ибратжон Хатамович Алиев

Иллюстратор Ибратжон Хатамович Алиев

Рецензент, доктор технических наук, доцент научно-исследовательского института полупроводников и микроэлектроники при Национальном Университете Узбекистана Оббосхон Хокимвич Кулдошев

Рецензент, старший научный сотрудник лаборатории ускорительной техники при Научно-исследовательском институте полупроводников и микроэлектроники при Национальном Университете Узбекистана Ринад Фуадович Руми

Рецензент, доктор физико-математических наук, профессор физико-технического факультета Ферганского Государственного Университета Салим Мадрахимович Отажонов

Рецензент, кандидат физико-математических наук, доцент факультета Систем компьютерного проектирования Ферганского Политехнического Института Султонали Мукарамович Абдурахмонов

Рецензент, доктор философии по физико-математическим наукам, старший преподаватель физико-технического факультета Ферганского Государственного Университета Сапура Маликовна Зайнолобидинова

Рецензент, преподаватель физико-технического факультета Ферганского Государственного Университета Дилшод Кулдошалиевич Юлдошалиев

Экономический руководитель Фаррух Муроджонович Шарофутдинов

Энокомический консультант Ботирали Рустамович Жалолов

Корректор Абдурасул Абдусолиевич Эргашев

© Ибратжон Хатамович Алиев, 2023
© Боходир Хошимович Каримов, 2023
© Ибратжон Хатамович Алиев, дизайн обложки, 2023
© Ибратжон Хатамович Алиев, иллюстрации, 2023

ISBN 978-5-0056-8124-9
Создано в интеллектуальной издательской системе Ridero

ФИЗИКА УСКОРИТЕЛЕЙ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

Лекция 1

Введение

Изучение окружающего мира человеком началось с момента его первого появления и продолжается по сей день, становясь причиной создания новейших изобретений в лице мельчайших микропроцессоров до исполинский коллайдеров, которые позволяют человеку изучать как необъятные просторы космоса, так и проникать в самую глубину атомных и даже ядерных структур. Среди различных методов изучения окружающего мира часто преобладало наблюдение за определённым экспериментом, что позволяло учёным определить различные постоянные, закономерности, вывести их математическую интерпретацию.

Но с уменьшением размеров и входом уже на молекулярных, атомных и ядерные уровни, наблюдения часто оказываются невозможными из-за предельных возможностей глаза, лупы, микроскопа и именно тут на помощь приходят уско-

рители частиц, которые и позволяют разбить сами частицы давая возможность по определению продуктов их распада построить модель их структуры. Именно по этой причине на сегодняшний день развитие физики ускорителей, физики ядерных реакций и иных областей физики связанных с изучением мельчайших структур становиться максимально актуальным и важна максимальная популяризация этой области знаний.

Данный курс предназначен для студентов, которые будут заниматься ядерной физикой, физикой элементарных частиц и атомного ядра, а также новоявленной физикой резонансных ядерных реакций. Каждый специалист обязан полностью понимать и знать все явления и природу экспериментов, проводимых на ускорителях, а также саму физику ускорителей. Сами по себе ускорители заряженных частиц представляются довольно сложными устройствами, действующие поэтапно и генерирующие пучки самых различных заряженных частиц, среди которых известными являются протоны, дейтроны, электроны, тритоны и прочие. Наряду с перечисленным экспериментатор обязан полноценно понимать все теоретические расчёты и математический аппарат физики, с которой он контактирует, что позволяет ему действовать также самостоятельно без какой бы то ни было дополнительной консультации.

Читаемый курс является вводным в физику ускорителей, с представлением начальных характеристик, видов и прин-

ципов действия самих устройств, а также с редким упоминанием примером физических явлений, а именно ядерных реакций, осуществляемые на них. Будет также представлен и начальный математический аппарат относительно некоторых физических явлений, которые будут представляться слушателям. Необходимо наличие у слушателей записных тетрадей лекций, а также рекомендуется наличие записных книжек для специальной терминологии и формул.

Также рекомендуется для личностей, посветивших свою жизнь в одну из самых величественных областей человеческой деятельности, как наука, ознакомиться и с художественной литературой по этой области.

Рекомендуемая литература

1. И. Б. Иссинский. Введение в физику ускорителей заряженных частиц. 2012.

2. А. Н. Лебедев, А. В. Шальной. Основы физики и техники ускорителей. 1991.

3. Ахмедова Г., Холбаев И., Маматкулов О. Б. Атомная физика. 2012.

4. Алиев И. Х., Шарофутдинов Ф. М. Использование ускорителей и явлений столкновения элементарных частиц с энергией высокого порядка для генерации электрической энергии. Проекта «Электрон». 2021.

5. Алиев И. Х. Новые параметры по ядерным реакциям

для осуществления на ускорителях заряженных частиц типа ЛЦУ-ЭПД-300. Проект «Электрон». 2022.

Тема: Зарождение ускорителей заряженных частиц

История ускорительной техники берёт своё начало ещё во времена самых первых исследований в области изучения строения вещества, и, хотя вопрос о строении материи был поставлен ещё в глубокой древности, его активное развитие начинается лишь чуть ранее открытия радиоактивности Анри Беккерелем. Самые первые попытки в области увеличения энергии генерируемых частиц были приложены ещё во времена первых трубок Крукса, в которых обеспечивался высокий вакуум, что позволяло обеспечить вылет приличного потока электронов под действием термоэлектронной эмиссии.

Но если исходить из самого начала, то в истории ускорителей можно найти немало выдающихся изобретений, новых и ярких физических идей, в некоторых случаях, имеющих характер научного открытия. Однако развитие методов ускорения заряженных частиц и стремление ко всё большим энергиям никогда не были самоцелью и обязательно подчинялись в основном, логике развития ядерной физики и возникшей из неё физики высоких энергий.

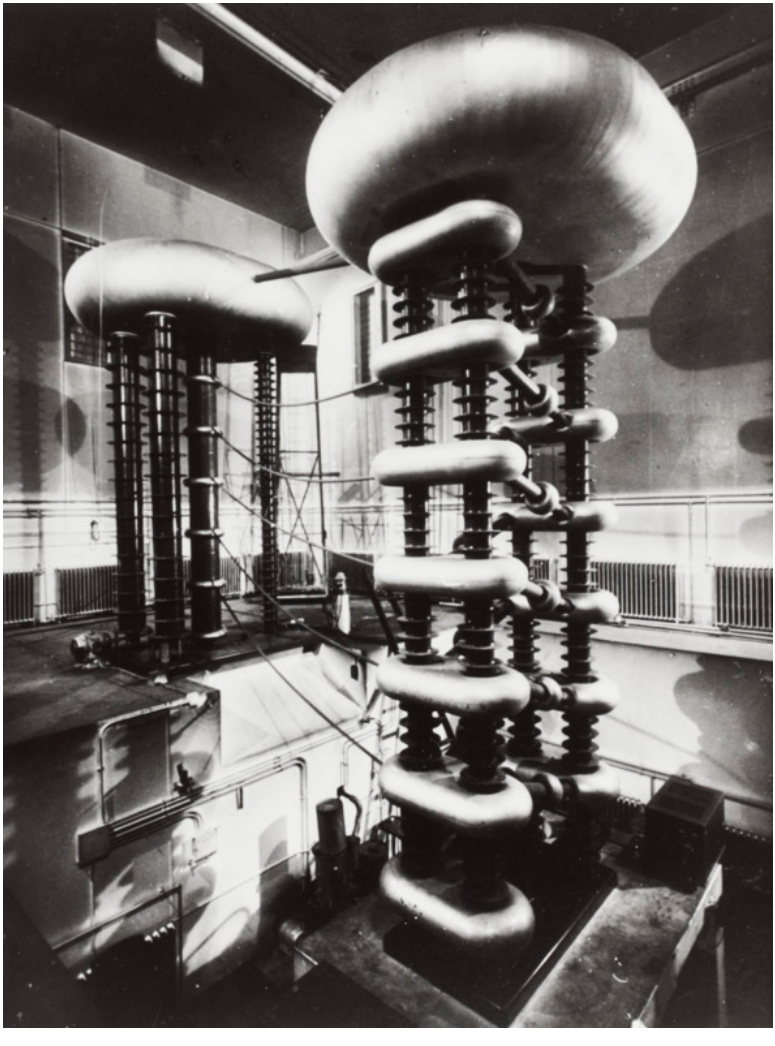
Ранее проводимые исследования и постройки в области

ускорительной физики можно изобразить при помощи диаграммы, таким образом в существовании объективных закономерностей развития ускорительной техники просто и наглядно убеждает такая зависимость от времени максимальной энергии, достигнутой в лабораторных условиях. В логарифмическом масштабе эта зависимость отражается прямой линией, на которую с некоторыми оговорками попадают и существующие установки, и проектируемые машины. То есть, энергия искусственно ускоренных элементарных частиц экспоненциально возрастает на порядок каждые семь-восемь лет, что отражает объективную закономерность развития науки и физики высоких энергий. При всей важности новых идей в физике ускорителей нельзя отметить, что заметных изломов на этой прямо их появление не вызвало и не привело к подобному случае, наличия каких-либо явных отклонений.

Вероятно, первые соображения о получении искусственно ускоренных частиц появились вместе с зарождением экспериментальной ядерной физики после исторических опытов Э. Резерфорда в 1919 г., хотя к этому времени уже существовали высоковольтные рентгеновские трубки и установки для получения «канальных лучей», в определённой степени, заслуживающие названия ускорителей. Возможности высоковольтной техники того времени, и энергия альфа-частиц естественных радиоактивных изотопов, с которыми ускорители были призваны конкурировать, определяли

и ближайшую цель – получение частиц с энергией порядка нескольких МэВ. Впрочем, были, конечно, ясны и принципиальные преимущества ускорителей – возможность ускорения протонов, иных элементарных частиц, а также направленность и большая интенсивность пучка, эквивалентная десяткам и сотням килограмм естественных радиоактивных препаратов. Интересно, что в 20-е годы было высказано довольно много идей ускорения до большой энергии, опередивших своё время и воплощённых в конкретных установках лишь по прошествии многих лет.

Тем не менее, первая искусственная ядерная реакция – расщепление ядра лития протонами с энергией 700 кэВ – была осуществлена сотрудниками Резерфорда Дж. Кокрофтом и Э. Уотсоном в 1931 году и сразу же повторена в нескольких лабораториях. Эту дату и можно считать началом истории ускорителей.



Умножитель Кокрофта-Уолтона

Установка Кокрофта-Уолтона состояла из двух основных элементов – генератора высокого напряжения и ускорительной трубки. Оба они в техническом отношении претерпели в дальнейшем существенные модификации. Одним из основных этапов в развитии электростатических ускорителей было изобретение в 1929 году Р. Ван-де-Граафом из Пристонского университета в США генератора высокого напряжения с механическим переносом заряда. Повышение энергии в этих машинах сдерживалось в основном электрической прочностью опорных изоляторов и ускорительной трубки, по применение принудительного распределения потенциала позволило вскоре получить энергию 2,5 МэВ. В СССР в 1938 году в Харькове был запущен электростатических ускоритель на 3,6 МэВ. Важно также отметить, что к концу 50-х годов ускорительная трубка серийного электростатического ускорителя выдерживала уже на порядок больше, а именно 16 МВ.

Тем не менее, ограниченные возможности метода электростатического ускорения были очевидны, а развитие физики ядра настоятельно требовало перехода к энергиям порядка десятка МэВ, сравнимой со средней энергией связи нуклона в ядре. Поэтому качественно новым этапов в развитии ускорителей следует считать появление резонансных методов, не требующих высоких напряжений. Первые идеи

такого рода были высказаны, как показывают исследования, шведским учёным Изингом в 1924 году, но не привели к созданию работоспособной модели. Линейным вариантом резонансного ускорителя занимался также шведский физик Р. Видерое, внёсший вклад и для разработки бетатрона. В их схемах не было никаких принципиальных недостатков, но увы, лишь отсутствие в конце 20-х годов мощных коротковолновых генераторов не позволило осуществить их на практике. Выше уже упоминалось об обилии появившихся в то время идей, к большому сожалению, не нашедших технического воплощения. В этой связи следует упомянуть и имя американского инженера Дж. Слепяна, в патентах которого можно найти прообразы некоторых будущих ускорителей, в том числе известного бетатрона и линейного резонансного ускорителя.

На реальную основу резонансное ускорение было поставлено в работах Э. Лоуренса, проводившихся в лаборатории Калифорнийского университета в Беркли. Практически одновременно в 1930—1932 гг. в этой лаборатории появились работающие модели циклотрона – первого циклического ускорителя, в создании которого важную роль сыграл М. Ливингстон, и линейного резонансного ускорителя с трубками дрейфа (Д. Слоан). Однако линейные системы вскоре отошли на второй план из-за недостаточного развития техники СВЧ по сравнению с циклотроном, который уже начал поистине своё большое триумфальное шествие.

Уже в 1935 году была получена энергия альфа-частиц, равная 11 МэВ и впервые превысившая максимальную энергию естественных радиоактивных изотопов, а в 1938 году был запущен циклотрон с диаметром полюсов 1,52 м, на котором были получены альфа-частицы с энергией 32 МэВ. Перед началом второй мировой войны было начато сооружение циклотрона для дейтронов на энергию 100 МэВ. Первый циклотрон в Европе был запущен в Ленинграде в 1936 году в Радиевом институте на энергию 6 МэВ.

Говоря же об общей роли циклотрона в развитии ядерной физики, то её трудно переоценить. Особенно важным этапом стало ускорение в циклотроне дейтронов, сначала из-за того интереса, который представляет дейтрон как простейшая ядерная система, а затем из-за открывшихся возможностей генерации интенсивных потоков нейтронов с помощью легко идущих реакций типа (d-n), то есть дейтрон-нейтронных реакций. Значение последнего указанного обстоятельства не требует комментариев, поскольку благодаря ему были впоследствии получены точные количественные сведения о сечениях реакции захвата и деления, ибо реакции с нейтронами привлекли в дальнейшем большое внимание за счёт урановой технологии.

Проблема ускорения электронов стояла несколько особняком и не могла быть решена на пути развития циклотрона, принципиально не пригодного для ускорения релятивистских частиц. Линейные же ускорители пережили своё на-

стоящее второе рождение лишь после второй мировой воны в связи с бурным развитием техники генерации СВЧ-колебаний для целей радиолокации. Однако в 1940 году Д. Керстом в США был запущен циклический индукционный, то есть не резонансный ускоритель – бетатрон на 2,3 МэВ, основная идея которого содержалась в патентах Слепяна. Близко к созданию бетатрона подошёл Видерое, впервые сформулировавший так называемое бетатронное условие, позволяющее сохранить при ускорении радиус орбиты почти постоянным, что оказалось важным с практической точки зрения. Кроме того, в начале 40-х годов были чётко выяснены условия устойчивости движения электронов в бетатроне, что имело принципиальное значение. Дело в том, что ускоряющее электрическое поле в бетатроне в практических условиях оказывается очень малым и для достижения одной и той же энергии частица вместо сотен метров, как в циклотроне, должна пройти полный путь в тысячи километров, на котором, естественно, сильно сказываются даже малые возмущения движения.

Работа Керста была повторена, хотя и не сразу, в нескольких лабораториях, в том числе и в СССР, и бетатрон вскоре стал надёжным и простым источником тормозного излучения, используемым в физики фотоядерных реакций и в технике. Однако главный недостаток циклотрона – небольшое ускоряющее поле, почти неизбежно следующий из нерезонансного характера ускорения, он и определял максималь-

ную энергию на уровне 100 МэВ, когда же крупнейший бетатрон Иллинойского университета в США давал энергию 300 МэВ. Принципиальный характер этого ограничения связан с магнитотормозным или точнее синхротронным излучением частиц, двигающихся по окружности в самой вакуумной камере.

Теория синхротронного излучения, развитая в начале 40-х годов и хорошо подтверждённая экспериментально, указывала на неизбежное возрастание с энергией радиационных потерь, которые не могли быть восполнены относительно малым ускоряющим полем бетатрона. Таким образом, в начале 40-х годов сложилась внешне тупиковая ситуация: казалось, что резонансные методы достигли своего потолка, связанного с релятивистскими эффектами, а нерезонансные сталкивались с непреодолимыми техническими трудностями. В то же время переход в диапазон энергий порядка сотен МэВ был необходим в связи с появлением новой отрасли науки – физики элементарных частиц и требованиями генерации недавно открытых мезонов, когда же энергия покоя μ-мезона составляет 106 МэВ, а π-мезона целых 140 МэВ. Новый качественный этап в истории ускорителей связан с именем В. И. Векслера, работавшего тогда в ФИАН имени П. Н. Лебедева.

Владимир Иосифович Векслер

В 1944 году В. И. Векслер сформулировал свой знаменитый принцип автофазировки, согласно которому резонансное ускорение может быть продлено до сколь угодно больших энергий при весьма умеренных требованиях к параметрам ускоряющего поля. Этот принцип независимо был открыт в США Э. Мак-Милланом в 1945 году. Интересно отметить, что принцип автофазировки использует те самые эффекты зависимости частоты обращения от энергии, которые казались препятствием для повышения энергии частиц в циклотроне. Кроме того, применение основной идеи В. И. Векслера оказалось необходимым для более глубокого понимания работы и линейного резонансного ускорителя, а впоследствии и ряда других физических приборов, где существенно взаимодействие между образуемой в системе электромагнитной волной и ускоряемыми заряжёнными частицами.

Таким образом представляется начальный этап развитие ускорительной техники, с началом собственного зарождения, разделения на несколько видов и образованием первым физико-математических теорий, которые уже нашли свою реализацию. В дальнейшем в при помощи 2 дополнительных тем по истории ускорительной техники будет полностью рассмотрен вопрос о последующих проведённых работах до сегодняшнего дня, после чего можно будет переходить

непосредственно к описанию конструкции самих ускорителей и их математического аппарата.

Контрольные вопросы

1. Опыты какого учёного стали основополагающими в начале работ по проведению ядерных реакций без ускорителей?

2. Когда и кем была осуществлена первая ядерная реакция?

3. Запишите уравнение первой искусственной ядерной реакции.

4. Какой учёный разработал метод генерации высокий напряжений при механического типа в 1929 году?

5. В каком году был сформулирован принцип автофазировки В. И. Векслера?

6. Из каких частей состояла установка Кокрофта-Уолтона?

7. Где был запущен один из первых электростатических ускорителей в 1938 году на энергию 3,6 МэВ?

8. Когда и где был создан первый циклотрон?

9. Укажите энергию покоя μ и π-мезонов.

10. Какие учёные независимо друг от друга разработали принцип автофазировки в 1944 году?

Лекция 2

Тема: Физика ускорительной техники с половины XX века

В прошлый раз было завершено изучение первого этапа развития физики ускорителей, после чего можно переходить к последующему изучению, в частности этот этап начинается с идей В. И. Векслера.

Исходя из основной физической идеи автофазировки, В. И. Векслер предложил несколько конкретные ускорительные схемы. В первую очередь, к ним относится синхротрон – ускоритель с переменным магнитным полем и постоянной частотой ускоряющего поля и фазотрон – модифицированный циклотрон с постоянным полем и переменной частотой, о которых будет подробно рассказано. В синхротроне для тяжёлых частиц, к примеру протонов, чтобы сохранить радиус орбиты постоянным, надо менять и магнитное поле, и частоту, что дало основание назвать его синхрофазотроном, который также будет подробно описываться. Кроме того, В. И. Векслером был предложен микротрон – своеобразный циклотрон для ускорения лёгких частиц, примером которых являются электроны.

Выдвинутые идеи быстро начали претворяться в жизнь,

и уже к началу 1947 году в Великобритании, СССР и в США были запущены первые небольшие синхротроны. В 1949 году в Москве под руководством В. И. Векслера и П. А. Черенкова в ФИАН имени П. Н. Лебедева был запущен электронный синхротрон на энергию 280 МэВ, позволивший начать планомерные исследования по фото-рождению мезонов. Уже к 1960 году в мире существовало несколько огромных электронных синхротронов этого поколения на энергию порядка 1 ГэВ.

Для оценки развития ускорителей техники в те годы важно иметь в виду два обстоятельства.

Во-первых, создание ускорителей перестало быть делом одной лаборатории. Быстро возрастающие вес и мощность питания магнитов, потребность в специализированных защищённых помещениях, новые требования к вакуумным и высокочастотным системам, наконец, большая стоимость и трудоёмкость ускорительных установок привели, по существу, к появлению специализированной промышленности. В СССР значительную роль сыграл Радиотехнический институт, возглавляемый А. Л. Минцем, НИИ электрофизической аппаратуры имени Д. В. Ефремова в Ленинграде, работавший под руководством Е. Г. Комара и другие. Нельзя не отметить также выдающуюся роль людей, координировавших эту деятельность – Д. В. Ефремова, А. М. Петросьянца, К. Н. Мещерякова и многих других.

Во-вторых, этот этап развития ускорительной техники

и исторически, и по существу совпадал с развитием работ по прикладной ядерной физике. Это обусловило известную ограниченность информации о конкретных технических проектах и решениях, в значительной мере самостоятельный характер развития ускорительной техники в Советском Союзе.

В 1949 году в хорошо известном ныне городе Дубна был запущен крупнейший в мире ускоритель – фазотрон или же синхроциклотрон на энергию 680 МэВ. Сравнимой по масштабу установкой был в то время также синхроциклотрон Калифорнийского университета в Беркли. Даже к 80-м годам эти установки сохраняют лидирующее, хотя уже и не рекордное, положение в своём классе машин. Крупнейшим синхроциклотроном на момент 80-х годов является машина Института ядерной физики имени Б. П. Константинова в Гатчине под Ленинградом. Диаметр магнитных полюсов этой установки, рассчитанной на энергию 1 ГэВ, составляет около 7,5 м.

Первыми крупными протонными синхротронами были космотрон на 3 ГэВ в Брукхейвенской лаборатории под Нью-Йорком, созданный в 1952 году, синхротрон Бирмингамского университета в Англии на 1 ГэВ, построенный уже в 1953 году и беватрон в Беркли 1954 года. Последняя машина заслуживает особого упоминания, так как максимальная энергия протонов в ней составляющая 6,3 ГэВ, была специально рассчитана на возможность генерации пар протон-ан-

типротон и нейтрон-антинейтрон. Искусственное создание тяжёлых античастиц, впервые осуществлённое Э. Сегре в сотрудничестве, стало триумфом ускорительной физики.

Несколько позже в Дубне завершилось строительство крупнейшего в мире ускорителя – синхрофазотрона на энергию 10 ГэВ. Некоторые цифры, связанные с этой установкой, впечатляли даже в 80-х годах – по прошествии более 20 лет. Кольцевой магнит ускорителя радиусом 28 м по орбите и шириной 7,5 м весит 36 000 тонн, собран из шихтованной тщательно отсортированной стали и установлен с очень высокой точностью. Система питания магнита имеет реактивную мощность порядка 140 МВ*А, а поперечное сечение вакуумной камеры составляет 200*40 см. Говоря же о синхрофазотроне в Дубне, принадлежащий Объединённому институту ядерных исследований (ОИЯИ), он был запущен в 1956 году.

Параллельно циклическим ускорителям в послевоенные годы начали развиваться и линейные ускорители, сразу же разбившиеся на два подкласса, – электронные и ионные машины. Для первых характерной особенностью было постоянство скорости ускоряемых частиц, практически равной скорости света. Наиболее эффективной ускоряющей системой для них оказался диафрагмированный волновод с бегущей электромагнитной волной, возбуждаемой от магнетрона, а позднее от клистронного усилителя мощности, как правило, 10-сантиметрового диапазона.

Без принципиальных изменений физического характера эти системы применяются и теперь. Первый ускоритель на бегущей волне был запущен в 1948 году У. Уолкиншоу с сотрудничеством в Англии, однако максимальная энергия, полученная на таких машинах, долгое время оставалась небольшой, и только в конце 50-х начале 60-х годов в США, СССР и во Франции были построены электронные ускорители на несколько сот МэВ. Крупнейший в СССР линейный ускоритель электронов на энергию 1,8 ГэВ находится в Харьковском Физико-техническом институте (ФТИ). Для развития физики линейного ускорения электронов много сделали Е. Гинцтон, Л. Смит, В. Пановский, Р. Нил, а в СССР – А. И. Ахиезер, В. В. Владимирский, Я. Б. Фейнберг, И. А. Гришаев, О. А. Вальднер, Н. А. Хижняк, Р. М. Воронков и другие.

На развитие линейных ускорителей протонов и иных тяжёлых частиц решающее влияние оказала работа Л. Альвареца – сотрудника Э. Лоуренса, использовавшего в 1947 года для ускорения протонов до 32 МэВ многозазорный резонатор, или систему трубок дрейфа, расположенных в общем баке. Система эта оказалась настолько удачной, что с малосущественными изменениями применяется и теперь для ускорения до средних энергий, меньших 200 МэВ. Однако при ускорении протонов до энергий свыше 100—200 МэВ система Альвареца оказывается малоэффективной, а система типа диафрагмированного волновода, работающая при скоро-

стях порядка скорости света, ещё не может быть применена. Именно из-за этого долгое время энергия в линейных протонных ускорителях не превышала 100 МэВ, а сами они служили, главным образом, как инжекторы для больших протонных синхрофазотронов.

Одновременно с созданием крупных ускорительных установок резко увеличился интерес к теории ускорителей. Это вполне объяснимо, так как без чёткого понимания всех особенностей движения частиц проектирование и сооружение дорогостоящих уникальных машин было бы просто невозможным.

Повышение энергии ускорителей пока что неизбежно связано с увеличением размера установки. Если допустить, что размеры циклического ускорителя линейно растут с максимальной энергией, а это не так уж далеко от реальности, то, скажем, масса магнита должна расти как куб энергии. Возвращаясь к характеристикам синхрофазотрона ОИЯИ, нетрудно видеть, что даже столь прозаические трудности перерастают в принципиально непреодолимые, если на тех же основах проектировать магнит хотя бы на 30—50 ГэВ. Для того чтобы уменьшить поперечное сечение магнита, нужно, прежде всего, уменьшить сечение пучка, т.е. резко улучшить фокусировку частиц около расчётной траектории. Сделать это за счёт известных механизмов оказывалось невозможным. Поэтому очередным качественным этапом в истории ускорителей следует считать появление сильной, или жёст-

кой, фокусировки, принцип которой был сформулирован Р. Курантом, М. Ливингстоном, и Г. Снайдером в 1952 году.

Уменьшение размеров пучка достигалась при этом за счёт серьёзного усложнения магнитной системы, да и сам принцип нельзя считать очень наглядным с физической точки зрения. Последнее обстоятельство оказалось совсем немаловажным: ещё за два года до этого сильная фокусировка была предложена тогда неизвестным греческим инженером Н. Кристофилосом, но его работа в рукописи не привлекла никакого внимание и осталась неопубликованной. Тем не менее работоспособность и реализуемость принципа сильной фокусировки никаких сомнений не вызывали, поскольку базировался он хорошо известных положениях теории устойчивости дифференциальных уравнений с периодическими коэффициентами.

Правда, первоначальные оценки параметров сильнофокусирующего ускорителя оказались слишком оптимистическими, что показал более тщательный анализ требуемой точности изготовления и установки магнита. Тем не менее даже в более скромном варианте принцип сильной фокусировки обещал экономию веса и мощности питания магнита больше, чем на порядок.

Экспериментально принцип сильной фокусировки был быстро проверен Р. Вильсоном с сотрудничеством на реконструированном электронном синхротроне Корнеллького университета. Однако преимуществ его могли полностью

сказаться лишь в больших машинах. К этому новому поколению относились три проекта синхротронов: на 28 ГэВ в ЦЕРНе, Европейском центре по физике высоких энергий в Женеве, на 30 ГэВ в Институте теоретической и экспериментальной физики (ИТЭФ) в Москве. Последняя машина рассматривалась как промежуточный этап для создания ускорителя на энергии порядка 50—60 ГэВ.

Электронным сильнофокусирующим машинам сначала уделялось относительно меньше внимания из-за больших трудностей, связанных с компенсацией радиационных потерь при высоких энергиях. Однако некоторые преимущества электронных синхротронов, из которых не последнюю роль играет простота интерпретации экспериментов по электромагнитному взаимодействию элементарных частиц, привели к появлению ряда проектов на энергию в несколько ГэВ, первым из которых оказался новых синхротрон Корнелльского университета, построенных под руководством Р. Вильсона. Впоследствии энергия на этой установке превысила 10 ГэВ. Надо отметить, что специфика, создаваемая наличием синхротронного излучения, отнюдь не сводится только к компенсации потерь энергии, и разработка электронных ускорителей на большую энергию потребовала последовательного учёта многих радиационных эффектов.

Принцип сильной фокусировки был быстро обобщён и на другие типы ускорителей. В частности, применение его к циклотрону возродило на новой основе предложение Л.

Томаса, сделанное ещё в 1938 году, и привело к появлению проектов машин нового класса – изохронных циклотронов, обладающих потенциально очень высокой средней интенсивностью пучка. Первые машины такого типа на небольшую энергию были построены в конце 50-х годов в США, Голландии и в СССР в ОИЯИ под руководством В. П. Джелепова и В. П. Дмитриевского. Ещё раньше, в 1953 году А. А. Коломенским, В. А. Путёховым и М. С. Рабиновичем был предложен вариант сильнофокусирующего кольцевого ускорителя с постоянным полем, названного кольцевым фазотроном.

В истории ускорителей во многом примечательным оказался 1956 год – дата первой международной конференции по ускорителям, состоявшейся в ЦЕРНе.

Во-первых, она ознаменовала собой начало более широкого обмена информацией и идеями, личного контакта между специалистами различных стран.

Во-вторых, на ней впервые были доложены принципиально новые идеи, некоторые из них уже осуществлены, а другие создают далёкую перспективу на будущее.

К числу таких идей следует отнести предложение Д. Керста об осуществлении ядерных реакций н встречных пучках ускоренных частиц, что резко увеличивает эффективную энергию их взаимодействия. Собственно говоря, сам этот чисто кинематический эффект был известен ранее. Заслуга Д. Керста состояла в доказательстве того, что вполне реально накопить такой ток релятивистских пучков, цирку-

лирующих в постоянном магнитном поле, при котором скорость отсчёта полезных событий станет вполне доступной для наблюдения, несмотря на крайнюю разрежённость той «мишени», которую представляет собой встречный пучок. Идея была немедленно принята к практической реализации Дж. О'Нейлом, использовавшим пучок от ускорителя Стэнфордского университета, и Г. И. Будкером, возглавившим новый Институт ядерной физики (ИЯФ) в Новосибирске.

На первых этапах речь шла о встречных пучках электронов, что позволило провести только один тип эксперимента – ее-рассеяние. Следующий решающий шаг состоял в осуществлении электро-позитронных частиц позволили резко расширить класс экспериментов, включить в них образование вторичных частиц, в том числе короткоживущих ρ- и φ-мезонов и подробнее войти в процесс изучения антиматерии в экспериментальном смысле.

Ещё более неожиданной была группа работ советских авторов, относящихся к так называемым коллективным методам ускорения. Суть их заключается в том, что для управления движением частиц и их ускорении используются поля пространственного заряда и тока других, медленных частиц, что позволяет снять некоторые принципиальные ограничения, свойственные обычным ускорителям. Так, Я. Б. Фейнбергом было предложено использовать для линейного ускорения ионов медленные волны в плазме, максимальная напряжённость поля в которых намного превышает напряжён-

ность в обычных высокочастотных системах или ВЧ системах. Г. И. Будкер опубликовал свои работы по так называемому стабилизированному пучку – двухкомпонентной электрон-ионной системе с большим током, в которой развиваются очень большие собственные магнитные поля.

Особо следует отметить публикацию серии работ В. И. Векслера в сотрудничестве, начатом в начале 50-х годов и посвящённых ускорению ионов потоками и сгустками электронов, имеющих сравнительно небольшую энергию. Хотя во всех этих случаях речь шла только о теоретических работах, появление нового круга идей вызвало огромный интерес и инициировало начало экспериментов во многих лабораториях. К сожалению, экспериментальные трудности оказались слишком велики, и методы коллективного ускорения до сих пор можно отнести, скорее, к перспективным, чем к освоенным.

В 1959 году под руководством Дж. Адамса был выпущен протонный синхротрон ЦЕРНа на 28 ГэВ – первая большая машина нового поколения, использующая сильную фокусировку. Сразу же за этим последовал запуск Брукхейвенского ускорителя на 30 ГэВ под руководством Г. Грина, а затем появилась серия электронных синхротронов на энергию в несколько ГэВ – уже упоминавшийся Корнелльский синхротрон, Кембриджский синхротрон в США, установка DESY в Гамбурге (ФРГ), английский синхротрон NINA. В Советском Союзе в 1967 году под руководством А. И. Али-

ханяна был запущен синхротрон Ереванского физического института на 6 ГэВ. На этих машинах был получен важный экспериментальный материал, относящийся к физике тяжёлых мезонов, гиперонов, нейтрино и т. д.

В эти годы был сделан качественно новый шаг и в технике линейного ускорения: в 1967 году был торжественно открыт гигантский линейный ускоритель электронов длиной около 3 км в Станфордском ускорительном центре, руководимом В. Пановским. По достигнутой энергии (23 ГэВ) этот ускоритель на момент 80-х годов не имел даже близких конкурентов.

В 60-х годах произошло также некоторое изменение в подходе к основным параметрам ускорителей. Ранее считалось более или менее естественны, что с увеличением энергии у данного класса ускорителей, как правило, падает интенсивность пучка, хотя бы из-за уменьшающейся частоты повторения циклов, относительно меньшей апертуры камеры и т. д.

Это было отмечено на одной из конференций, где рядом с уже упоминавшийся экспоненциальной кривой роста энергии была приведен примерно линейно спадающая интенсивность вводимых в строй машин с рекордной энергией. Линейная экстраполяция приводила к довольно мрачному выводу о том, что в середине 70-х годов может появиться «идеальный» ускоритель с большой энергией и нулевой интенсивностью.

Подобные опасения появлялись после некоторых выступлений, на этой конференции, но их наличие и следствие подводило к образованию нового этапа развития ускорительной техники, вплоть до сегодняшних дней.

Контрольные вопросы

1. Переход на какой порядок энергий пучков частиц в 60-х годах прошлого столетия стало одним из прорывных?
2. Каковы параметры синхрофазотрона Дубны, запущенный в 1956 году на энергию 10 ГэВ?
3. В каком году прошла первая международная конференция по ускорительной технике в ЦЕРНе?
4. Когда и где был создан первый синхротрон?
5. Кто руководил созданием синхротрона на энергию 280 МэВ в Москве?
6. В каком году был создан первый фазотрон в Дубне?
7. Чему была равна энергия первого синхроциклотрона?
8. Какое второе наименование имеет фазотрон?
9. Как назывался первый крупный протонный синхротрон на энергию 3 ГэВ, созданный в 1952 году?
10. Где был создан первый космотрон 1952 года?

Лекция 3

Тема: Физика ускорителей до сегодняшнего дня

Опасения, о которых говорилось в прошлый раз, конечно, не оправдались; больше того, проектная интенсивность стала быстро повышаться, а уже работающие машины подверглись реконструкции для увеличения числа ускоренных частиц. Причина этого проста – дополнительные средства, затраченные на повышение интенсивности уникальных дорогостоящих установок, стали с лихвой окупаться повышением эффективности их использования, сокращением времени эксперимента и увеличением его прецизионной, возможностью проведения качественно новых экспериментов с относительно малым числом полезных событий и т. д. Одновременно возросло также внимание к качеству ускоренных пучков – их энергетическому и угловому разбросу, поляризации, сепарации вторичных частиц и т. д. Первостепенное значение приобрели также вопросы разводки пучков с нескольких мишеней и одновременная постановка на пучке нескольких экспериментальных работ.

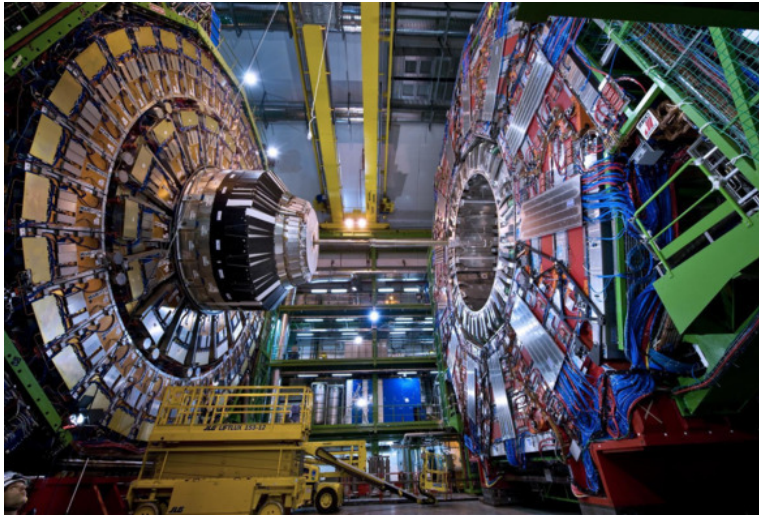
С точки зрения физики ускорения задач повышения интенсивности означала необходимость учёта и использова-

ния этого пучка, которые оказались весьма многообразными. В частности, было обнаружено и исследовано много эффектов неустойчивости когерентных колебаний частиц пучка, сближающих его поведение с поведением плазмы во внешних полях и ограничивающих допустимое число частиц в ускорителях.

Особенно серьёзными эти явления оказались в накопительных установках, предназначенных для экспериментов со встречными пучками. Важную и пионерскую роль здесь сыграли работы Института ядерной физики в Новосибирске, который стал признанным центром в этом направлении. За работы по встречным пучкам и, в частности, за постановку экспериментов по электрон-позитронным соударениям при энергии порядка 600 МэВ Г. И. Будкер, А Н. Скринский, А. А. Наумов, В. А. Сидоров, В. С. Панасюк были удостоены различных премий. Позднее во Франции, Италии, США и Германии появились электрон-позитронные кольца на большую энергию. Крупнейшими из них являются установки PEP на 18 ГэВ при Станфордском линейном ускорителе и PETRA при ускорителе DESY, рассчитанная на энергию до 19 ГэВ в каждом пучке.

Труднее развивались работы по встречным пучкам тяжёлых частиц, поскольку для достижения заметного эффекта в этом методе требуются существенно релятивистские энергии, а даже для протонов это приводит к очень большим размерам накопителя. Только в 1971 году кольца в ЦЕРНе

на энергию 25 ГэВ – единственная в мире на момент 80-х годов, где позже был создан БАК.



Большой Адронный Коллайдер

На начальном этапе развития установок со встречными пучками высказывалось немало разноречивых мнений об их конкурентоспособности с обычными ускорителями с неподвижной мишенью. Острота этих способов постепенно сгладилась, и сейчас общепринято, что эти два типа ускорительных установок не исключают, а взаимно дополняют друг друга. Во всяком случае эксперименты на встречных пучках не только не остановили, но даже стимулировали дальней-

шее развитие традиционных ускорителей, о чём свидетельствую в дальнейшем эффективно разработанные и созданные модели подобных ускорителей.

Крупнейший шаг в этом направлении был сделан в 1967 году, когда к 50-летнему юбилею СССР был введён в строй протонный синхротрон на 76 ГэВ вблизи города Серпухова в Институте физики высоких энергий (ИФВЭ). Инжектором для него служил также крупнейший в то время протонный линейный ускоритель на энергию 100 МэВ. Кольцевая вакуумная камера ускорителя радиусом около 200 метров имеет сечение 195*115 мм, а полный вес магнита составляет 20 000 тонн, причём блоки магнита установлены с точностью до 100 мкм.

Ускоритель в Серпухове

В создании машины, сооружённой за шесть лет, принимали участие многочисленные институты и специализированные организации Советского Союза. Ускоритель бесперебойно работает вот уже свыше 10-ти лет, подвергаясь почти непрерывным усовершенствованиям и модификациям как с точки зрения самой машины, так и в смысле модернизации экспериментального оборудования, по объёму и стоимости вполне сравнимого с самим ускорителем. В экспериментальных работах в Серпухове активно участвуют учёные разных стран.

Несколько нарушая хронологию, что неизбежно при описании работ, которые проводятся в течение нескольких лет, важно остановиться ещё на некоторых направлениях ускорительной техники 60-70-х годов. Выше уже упоминалось об изохронных циклотронах – машинах, способных довести энергию протонов до значений порядка 1 ГэВ и одновременно обладающих основным преимуществом циклотрона – высокой средней интенсивностью. Этими же возможностями обладают также в принципе и линейные ускорители протонов.

Оба типа машин можно использовать в качестве генераторов мезонов, которые непосредственно не могут быть ускорены из-за малого времени жизни. В связи с этим направлением появился даже специальный термин – «мезонные фабрики». Несмотря на трудности, связанные со сложностью магнитной системы изохронного циклотрона и необходимостью разработки новых ускоряющих систем для линейного ускорения протонов до релятивистских энергий, эта задача была успешно решена. Также успешно работал швейцарский циклотрон SIN, канадская машина TRIUMF и изохронный циклотрон в Киеве. В 1972 году под руководством Л. Розена был запущен, хотя и не на полную расчётную интенсивность (1 мА), линейный ускоритель протонов на 800 МэВ в Лос-Аламосской Национальной лаборатории в США.

В СССР в 80-х сооружался линейный ускоритель протонов на большую энергию при участии Института ядер-

ных исследований АН СССР, Московского радиотехнического института и НИИ электрофизической аппаратура имени Д. В. Ефремова. Не сказали своё последнее слово и циклотроны. Помимо традиционного использования для ядерной физики средних энергий, перед ними открылась широкая область ускорения тяжёлых ионов с достижением энергий порядка нескольких МэВ на каждый нуклон, сравнимой со средней энергией связи нуклона в ядре. Передовые позиции в этом направлении принадлежат лаборатории Г. Н. Флерова в Дубне, успешно синтезировавшей с помощью такой техники ряд трансурановых элементов.

В 80-х годах в этой лаборатории был запущен циклотрон с диаметром полюсных наконечников 4 метра изохронного типа, в котором ионы ускоряются в широком диапазоне массовых чисел (свыше 140) до энергии порядка 10 МэВ/нуклон. Вступают в строй и новые специализированные линейные ускорители тяжёлых ионов (Унилак, Германия).

В 1967 году на очередной международной конференции по ускорителям было доложено о советских работах по коллективным методам ускорения, проводившихся в Дубне под руководством В. И. Векслера, а после его смерти в 1967 году – В. П. Саранцева. На этот раз речь шла не об общей идее, а о конкретизации одного из методов В. И. Векслера – так называемого ускорения электронных колец, в которые захватываются ускоряемые ионы. Будучи ускоренными до сравнительно небольшой энергии, электронные сгустки должны

увлекать с собой протоны, получающие при той же скорости гораздо большую энергию. Это сообщение вновь активизировало экспериментальные работы по коллективным методам.

В США, например, под руководством Э. Сесслера, Д. Кифа и других начал интенсивно разрабатываться проект под символическим названием ERA. Аналогичные работы были несколько позднее развёрнуты в Германии. Эти исследования много дали для понимания физики коллективного ускорения и связанных с ним трудностей, но к заметному успеху все же не привели. Наибольших успехов пока добились В. П. Саранцев и его сотрудники, ими были получены эффективные ускоряющие поля порядка 10 МВ/м, используемые для ускорения тяжёлых ионов.

На новом уровне возродились и некоторые старые идеи, приведшие к появлению новых типов ускорителей. Так, для создания электронных сгустков с большим числом частиц, требующихся для коллективных методов ускорения, наиболее подходящим инструментов оказался линейный индукционный ускоритель, предложенный А. Буверсом ещё в 1929 году. В современном техническом исполнении эта машина сейчас довольно широко используется для получения сильноточных (10^2—10^3 А) импульсов электронов с небольшой энергией порядка нескольких МэВ. Весьма удобной и надёжной машиной на малые энергии оказался также микротрон, для модернизации которого много было сделано ла-

бораторией С. П. Капицы в Институте физических проблем.

Некоторые прикладные задачи, требующие получения очень мощных импульсов коротковолнового рентгеновского излучения, привели в середине 60-х годов к появлению сверх сильноточных электронных машин с токами до МА в импульсе при энергии от 1 до нескольких МэВ. Первые работы в этом направлении были, по-видимому, проведены Дж. Мартином в Олдермастонской лаборатории в Англии. Впоследствии эта техника была распространена и на ионные пучки. Являясь сейчас одним из наиболее мощных энергоносителей, которые осуществимы в лабораторных условиях, сильноточные электронные и ионные пучки используются в некоторых исследованиях, включая проблему управляемого термоядерного синтеза.

Однако в развитии ускорителей доминантными всегда оставались требования физики высоких энергий, под влиянием которых были осуществлены два протонных машин в диапазоне 0,1—1 ТэВ. Первым из них был запущенный в 1972 году синхротрон в Национальной лаборатории имени Ферми в Батейвии, недалеко от Чикаго, руководимой тогда Р. Вильсоном. Радиус орбиты этой машины, постепенно наращивавший свою энергию от 200 до 500 ГэВ, составляет 1 километр. Вслед за ним в конце 1976 года вступил в строй аналогичный ускоритель в ЦЕРНе на энергию 400 ГэВ. Этой работой руководил Дж. Адамс.

Также отмечая и крупнейший БАК, на энергию 6,3 ТэВ,

созданный уже в 2008 году в том же ЦЕРН. При этом являясь ускорителем на встречных пучках, с радиусом 26 656 м, на протон-протонные реакции.

Необходимо обратить внимание на некоторые новые важные тенденции в современной ускорительной технике. Прежде всего, работа современного крупного ускорителя невозможна без высокой степени его автоматизации, под которой следует понимать не только автоматизацию проведения эксперимента и обработки накапливаемого «сырого» материала очень большого объёма, но и автоматическое управление режимом самого ускорителя. Мощным средством в этом направлении является непрерывное получение информации о динамике циркулирующего пучка, оперативная её переработка с помощью быстродействующей ЭВМ и автоматическое введение корректирующего воздействия на те или иные подсистемы установки. Разработка систем автоматизации стала сейчас самостоятельной отраслью, не менее важной, чем, скажем, конструирование магнита или высокочастотной системы.

Вторым необходимым требованием к современному большому ускорителю является его универсальность, под которой понимается возможность использования не только первичного пучка, но и разнообразных вторичных частиц. Особенно широкие возможности предоставляет здесь метод накопления вторичных частиц и установки со встречными пучками, комбинируемые с основным ускорителем. Фактически

большая машина является сейчас центром целого ускорительного комплекса, состоящего из нескольких ускорительных и накопительных установок с возможностью постановки самых разнообразных экспериментов, идущих одновременно.

Наконец, надо отметить, что создание больших ускорителей сейчас оказывается под силу лишь крупным государствам, как было отмечено, развитым в промышленном отношении, но и для них сопутствующие материальные и трудовые затраты весьма ощутимы. Поэтому для уникальных машин, исчисляемых единицами, всё больше значение приобретают вопросы интернациональной кооперации и привлечение в процессы реализации проектов международные собрания.

Первыми примерами такого рода стал ЦЕРН – организация двенадцати стран Западной Европы и ОИЯИ в Дубне. В подготовке и проведении экспериментов на ускорителе ИФВЭ в Серпухове активное участие принимают учёные во Франции, ЦЕРНа и США. Примером активного сотрудничества учёных разных политических систем может служить участие советских специалистов в экспериментах на ускорителях ЦЕРН и в Батейвии. Можно надеяться, что в дальнейшем эти традиции будут всё больше укрепляться и развиваться.

Ближайшие перспективы развития ускорителей пока не предвещают качественного изменения основных тен-

денций. Серьёзные надежды возлагаются на использование сверхпроводящих магнитных систем с большим магнитным полем, позволяющим уменьшить радиус кольца и существенно сократить потребляемую мощность. Сейчас, например, интенсивно идёт сооружение сверхпроводящего магнита в Батейвии, который должен быть расположен в том же туннеле и при поле порядка 4 Тл позволит удвоить максимальную энергию, доведя её до 1 ТэВ.

Особенно перспективно использование сверхпроводящих систем в накопительных системах, предусматриваемое, например, для протонного накопителя ISABELLE с энергией по 400 ГэВ в каждом пучке, инжектором для которого должен служить Брукхейвенский синхротрон. Имеется также несколько интересных проектов протонных и протон-антипротонных накопительных систем в Новосибирске и ЦЕРНе. Существенно подняты энергии для электрон-позитронных пучков с вводом в строй накопителей RETRA в Гамбурге (до 19 ГэВ) и PEP в Станфордском центре (18—24 ГэВ).

Крупнейшим из осуществляемых проектов, отражающим развитие ускорительной физики на ближайшее десятилетие, является советский проект ускорительно-накопительного комплекса (УНК) в Серпухове. В основе его лежит протонный сверхпроводящий синхротрон на 3 ТэВ (радиус около 3 км). В том же туннеле должен быть размещён предварительный ускоритель – бустер с электромагнитом обычного типа, инжектором для которого будет существу-

ющих в Серпуховский синхротрон. Предусматривается возможность создания без специального накопительного кольца встречных pp-пучков с энергией 1,5 ТэВ в системе центра инерции. Кроме того, бустер можно использовать для накопления электронов и ep-столкновений. Изучается также возможность осуществления в УНК протон-антипротонных соударений, а также сооружения дополнительного кольца с постоянным полем, равным 5 Тл, что позволит получить встречные протонные пучки с энергией 2—3 ТэВ.

Кажущийся естественным вопрос, какая же энергия нужна физикам-экспериментаторам, вообще лишён физического смысла. Ответ на него всегда один – нужна энергия в 5 раз больше, чем уже достигнутая. Причина этого проста: эксперимент на ново качественном уровне (в данном случае энергии) всегда ставит больше вопросов, чем даёт ответов. Поэтому сомневаться в дальнейшем росте энергии ускоренных частиц нет никаких оснований.

Данный короткий обзор призван дать лишь представление об общей логике развития ускорителей и ни в коей мере не претендует на полноту. Мы не могли даже перечислить все установки с рекордными параметрами или с интересными физическими и техническими особенностями.

И делая некоторое примечание, важно указать, что в некоторых случаях указываемые данные ссылались на момент 80-х годов и по прошествии не малого количества времени важно отметить возможность создания нового типа ускори-

телей – системы из циклотрона и линейного ускорителя – ускорителя типа ЛЦУ, высокоточного типа, с большими токами, в котором пучок вылетающий из самого циклотрона контролировался бы добавлением необходимой порции энергий уже на линейном ускорителе, либо наоборот.

Делая заключение к данному обзору, укажем, что важно изучать историю развития науки, в которой осуществляется работа, ибо всегда можно найти аспекты, способные дать своего рода наводку и помощь. В дальнейшем уже начнётся разбор самой физики ускорителей, с подробным их рассмотрением.

Контрольные вопросы

1. Укажите параметры ускорителя, созданного в 1967 году в Серпухове на энергию 76 ГэВ.

2. Какой порядок энергии ста революционным, благодаря созданному ускорителю в 1972 году в Национальной лаборатории имени Ферми в Батейвии?

3. Чему равна энергия пучка протон-протонного типа в БАК?

4. Кто работал над созданием ускорителя по электрон-позитронным соударения на энергию 600 МэВ?

5. Где был создан синхротрон на энергию 76 ГэВ в 1967 году?

6. Чему равна энергия синхротрона в Серпухове, создан-

ный к 50-летию СССР?

7. Какое основное преимущество циклотрона?

8. Какова была расчётная интенсивность линейного ускорителя протонов Л. Розена н энергию 800 МэВ?

9. В каком году и где был создан ускоритель Л. Розена?

10. Чему была равна напряжённость поля в ускорителе В. П. Саранцева для тяжёлых ионов?

Лекция 4

Тема. Вакуумные механизмы

Поскольку изначальная логика исследования мельчайших частиц основана на принципе их разбиения, либо оказания какого-либо более сильного взаимодействия, возникает необходимость в ускорении определённой имеющей заряд частицы, откуда и появляется первая модель электростатического ускорителя, представляющий собой источник заряженных частиц напротив заземления, где создаётся разность потенциалов в вакуумном сосуде. При этом кинетическая энергия пучков испускаемых частиц, определяется по (1).

$$W = qeU \ (1)$$

$W -$ кинетическая энергия частиц;

$q -$ заряд на излучателе, Кл;

$e -$ элементарный заряд, равный $1{,}6 * 10^{19}$ Кл;

$U -$ напряжение между электродами.

При расчёте (1), важно также учитывать фактор наличия

количества заряда в одной частице, к примеру, если у электрона имеется всего один элементарный заряд, то у альфа-частицы или ядра гелия их 2, а у иона алюминия – 13, данное число умножается на общий заряд, откуда и получается общая кинетическая энергия.

Яркими примерами, подобных ускорителей являются ускорители Ван-де-Граафа, подробное их рассмотрение будет в последующих лекциях. Важно лишь указать, что кинетическая энергия не измеряется в Джоулях, а в специальных единицах – электронвольтах (эВ), которая равна $1{,}6*10^{-19}$ Дж с производными в кэВ, МэВ, ГэВ, ТэВ. На электростатическом ускорителе максимальная энергия, которую можно получить для частиц равна 10 МэВ, при дальнейшем увеличении, наблюдается пробой между электродами, при котором невозможно проводить ускорение.

Рассматривая все виды ускорителей, можно разделить их на 3 большие группы, один из которых, ранее рассмотренные высоковольтные ускорители. Следующий вид ускорителей – резонансные.

В группу резонансных ускорителей заряженных частиц входят линейные и циклические ускорители. Если же останавливаться на линейных, то это ускорители, которые используют различные способы, наряду с увеличением числа электронов на пути ускоряющего пучка, с не критическим напряжением на них, что предотвращает факт пробоя, но позволяет ускорять частицу. Поскольку направление

ускорения прямая, это и дало название этой разновидности ускорителей, благодаря чему можно догадываться о форме циклических ускорителей.

Циклические ускорители имеют много разновидностей, но с целью уменьшения масштабов самого устройства в одних разновидностях ускоряют пучки частиц при их движении по спирали из одной точки в двумерной плоскости, всё приближая к выходу из ускорителя. А при автофазировке или удержании на одной круговой траектории, не позволяя частице увеличивать её радиус и лишь в конце выводя из этого круга, выводящими электромагнитами.

Но циклические ускорители также должны увеличиваться свои размеры, поскольку удержать частицы с критическими энергиями и поворачивать их под нужным углом крайне сложный процесс, с которым справляются лишь редкие магниты. К примеру, самый мощный магнит на момент 1981 года имел вектор магнитной индукции в 10 Тл, а сегодня целый 32 Тл и даже при такой результате диаметр БАК почти 8,5 км, с общей длиной 26,7 км.

Конструкции же как этих циклических ускорителей, первый которых именуется циклотроном, а второй синхротроном также будут подробно рассмотрены в последующих лекциях, но важно одно, что ни линейный ускоритель, ни циклотрон и ни синхротрон, не могут функционировать без наличия вакуума. Ни в одном из них частицы не смогут ускоряться, поскольку будут слишком быстро поглощаться окру-

жающей средой, или просто будут приводить к ионизации внешних газов.

Перед переходом к подробному изучению этого вакуумного вопроса, остановимся и на третьем виде ускорителей – индукционном. Этот вид ускорителей является смесью линейных и циклических ускорителей, а как известно, при соединении двух видов движения на двумерной плоскости, в трёхмерном получается нечто изящное, а именно трёхмерная спираль, по которой и передвигаются частицы под действием различных вектором магнитного поля.

Такой вид ускорителей действительно редкий и применяется крайне мало, хотя является одним из основных при проведении термоядерных реакции и работе с плазмой, ионами. Но и этот ускоритель не может обойтись без вакуума. Ровно также как при действии любого ускорителя заряженных частиц, будь это по своей разновидности электростатический, резонансный или индукционный ускоритель, возникает радиация или ионизующее излучение.

Сами по себе частицы невозможно удержать полностью на определённой траектории из-за того, что невозможно создать идеальное магнитное поле, благодаря наличию ряда факторов, этот вопрос также будет рассмотрен в дальнейшем, в лекции посвящённой фокусировке частиц в ускорителе, но говоря кратко, частицы всё равно будут покидать пределы, сталкиваться о стенки ускорителя, в основном некоторая часть и приводить к образованию различных видов и по-

токов частиц, в том числе и не редких гамма-квантов.

Вместе с этим это наблюдается и при проведении ядерных реакций на мишенях, встречных пучках и прочих экспериментах. Наконец же, переходя к вакуумным технологиям, то ясен факт того, что это среда существования элементарных частиц. В обычном состоянии, при комнатной температуре и атмосферном давлении, измеряемое в Паскалях и равное 101 325 Па, частицы поглотятся уже через $6*10^{-5}$ мм, то есть это и есть средняя их длина свободного пробега.

Из этого ясно, что давление измеряется в Паскалях (Па) и для ускорителей представляется уже в порядках. Для начала имея такие соотношения, что некоторые производные единицы как 1 мм. рт. ст. или 1 Торр равняется 133 Па, 1 бар равняется 10^5 Па, можно сказать, что при давлении в 10^{-4} Па, что получить не сложно при современном оборудовании, длина свободного пробега становиться равной примерно 60 м, что уже не плохо, но для современных ускорителей заряженных частиц, необходимо наличие вакуума порядка 10^{-8}

Конец ознакомительного фрагмента.

Текст предоставлен ООО «ЛитРес».

Прочитайте эту книгу целиком, купив полную легальную версию на ЛитРес.

Безопасно оплатить книгу можно банковской картой Visa, MasterCard, Maestro, со счета мобильного телефона, с платежного терминала, в салоне МТС или Связной, через PayPal, WebMoney, Яндекс.Деньги, QIWI Кошелек, бонусными картами или другим удобным Вам способом.