

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

СОВЕЩАНИЯ И КОНФЕРЕНЦИИ

СОВЕЩАНИЕ ПО ФИЗИКЕ ЧАСТИЦ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ *)

ПЕРВАЯ СЕКЦИЯ

Первое заседание секции «Элементарные частицы и их взаимодействие» было посвящено вопросам образования π -мезонов нуклонами. В докладах М. Г. Мещерякова, Б. С. Неганова, В. П. Зрелова, И. К. Взорова, О. В. Савченко и А. Ф. Шабудина «Спектры вторичных протонов и дейтронов от $(p-p)$ -соударений при энергии 660 Мэв» и «Энергетические спектры π^+ -мезонов в реакции $p+p \rightarrow p+n+\pi^+$ при 556 и 657 Мэв» рассказывалось об изучении процесса мезонообразования, проводимом на синхроциклотроне Института ядерных проблем. С помощью большого магнитного спектрометра измерялись спектры продуктов следующих реакций:

$$p+p \rightarrow p+n+\pi^+, \quad (1)$$

$$p+p \rightarrow p+p+\pi^0 \quad (2)$$

и

$$p+p \rightarrow d+\pi^+. \quad (3)$$

Кроме того, изучение спектра π -мезонов в реакции (1) производилось с помощью телескопа сцинтилляционных счетчиков (по пробегу в поглотителе). Опыты поставлены на протонном пучке, выведенном из камеры синхроциклотрона. Интенсивность выведенного пучка составила до $3 \cdot 10^9$ частиц/см²сек. Угловое распределение протонов, возникающих в реакциях (1) и (2), описывается законом $0,8 + \cos^2 \theta$. Протоны с импульсом больше 250 Мэв/с испускаются преимущественно вперед и назад, а протоны с меньшей энергией испускаются почти изотропно. Анализ спектра π^+ -мезонов показывает, что матричный элемент образования π^+ -линейно зависит от импульса мезона. Угловое распределение близко к $0,43 + \cos^2 \theta$. Эти факты говорят о том, что рождение π -мезонов в реакции (1) происходит, в основном, в P -состоянии. Дальнейший анализ результатов показывает, что на процессе образования мезонов сказывается сильное взаимодействие мезонов с нуклонами в состоянии с полным моментом $3/2$ и изотопическим спином $3/2$. Кроме того, в докладах были сообщены результаты исследования спектров π^+ - и π^- -мезонов, образующихся при бомбардировке ядер бериллия и углерода.

В обсуждении докладов выступил А. Г. Мешковский, указавший, что в выполненной им с группой сотрудников аналогичной работе по изучению реакций (1) и (3) было получено угловое распределение мезонов в реакции (1), близкое к изотропному.

Доклад Р. Маршака (США) был посвящен образованию заряженных мезонов на ядрах Li^6 и Li^7 протонами с энергией 240 Мэв. Целью опытов являлась проверка ряда следствий гипотезы зарядовой независимости. Измерялось отношение сечений образования π^+ - и π^- -мезонов под углом 90° . Для Li^6 это отношение равно 64 при энергии мезонов 40 Мэв и 48 при энергии 52 Мэв. В случае мишени из Li^7 отношение равно 9,5 при энергии 45 Мэв и 1,7 при энергии 52 Мэв. Это различие может быть объяснено с учетом принципа Паули. Действительно, при образовании на Li^7 π^+ -мезонов образуется 3 протона и 5 нейтронов, а при образовании π^- -мезонов, наоборот, 3 нейтрона и 5 протонов. При рождении π^+ - и π^- -мезонов на Li^6 комбинации оказываются не столь симметричными: 3 протона и 4 нейтрона для π^+ -мезонов и 5 протонов и 2 нейтрона для π^- -мезонов. Поэтому в этом случае вероятности образования π^+ - и π^- -мезонов должны сильно различаться.

*) Совещание по физике частиц высоких энергий происходило в Москве с 14-го по 22-е мая 1956 г.

В докладе Л. Риддифорда (Англия) излагались результаты исследования взаимодействия протонов с протонами при энергии 650 Мэв, выполненные на ускорителе в Бирмингеме. Изучение производилось с помощью диффузионной камеры Вильсона диаметром 18 дюймов, наполненной водородом до давления 26 атм и помещенной в импульсное магнитное поле. Всего наблюдалось 317 случаев взаимодействия с двумя лучами в конце. Они анализировались как упругое рассеяние и образование одного π -мезона. Результаты согласуются с полученными в других лабораториях. Докладчик привел также данные, полученные при энергии 950 Мэв. Они подтверждают интерпретацию взаимодействия нуклонов на основе изобарной гипотезы. В заключение докладчик рассказал о работах, ведущихся в настоящее время. Среди них изучение $(p \rightarrow p)$ -и $(p \rightarrow d)$ -взаимодействий при энергии 900 Мэв, опыты с поляризованным пучком протонов с энергией 950 Мэв, а также создание водородной пузырьковой камеры.

Доклад С. З. Беленького был посвящен теории множественного образования частиц. В докладе рассматривалось применение статистической теории Ферми к области энергий 1—5 Бэв. Как известно, сформулированная Ферми теория резко противоречит опыту в этой области энергий. Автор модифицировал теорию Ферми, учтя сильное взаимодействие π -мезонов с нуклоном при энергии ~ 200 Мэв в состоянии с полным моментом и изотопическим спином $3/2$. Развита таким путем теория согласуется с результатами изучения взаимодействия между нуклонами при энергиях 1—3 Бэв. Кроме того, докладчик привел результаты расчетов по образованию звезд при аннигиляции антинуклонов.

С интересом участники совещания прослушали доклад Л. Смита (США) об исследованиях, выполненных на космотроне в Брукхейвене. Прежде всего докладчик рассказал об изучении углового распределения при рассеянии протонов протонами при энергиях вплоть до 3 Бэв. Измерения проводились в области малых углов, до 15° , в системе центра инерции. Угловое распределение обнаруживает резкий максимум при малых углах. Были сделаны попытки проанализировать эти результаты в рамках оптической модели. Затем докладчик перешел к изложению данных о взаимодействиях, полученных с помощью диффузионной камеры Вильсона. К сожалению, число наблюдаемых случаев невелико, так что нельзя говорить о результатах сравнения с теорией. Кроме того, проводились работы по изучению взаимодействия π -мезонов с энергией 1,9 Бэв. Мезоны впускались в камеру Вильсона диаметром 1 м, в которой помещались углеродные и свинцовые пластинки. В этой работе были измерены времена жизни Δ^0 - и θ^0 -частиц. Докладчик познакомил также слушателей с аппаратурой, предназначенной для изучения времени жизни K -частиц. На этой же аппаратуре изучалось рассеяние K -мезонов. Опыты показали, что в пределах ошибок все K -мезоны рассеиваются одинаково. Затем был изложен оригинальный метод вывода пучка из камеры космотрона, позволяющий получить пучок, содержащий $1/3 - 1/2$ от числа ускоренных частиц. На этом пучке будет работать жидкая водородная мишень.

Большое число опытов по рассеянию K -мезонов было проделано с фотоэмульсиями. В лаборатории работает несколько пропановых пузырьковых камер и в ближайшее время в строй вступят три водородные пузырьковые камеры. В заключение Л. Смит рассказал об исследовании связи между ионизацией и плотностью пузырьков в камере.

Следующим был доклад Ю. Д. Баякова, М. С. Козодаева и А. А. Тяпкина «Энергетические спектры γ -квантов от распада π^0 -мезонов, образованных протонами с энергиями 470 и 660 Мэв». С помощью парного спектрометра измерялось энергетическое распределение γ -квантов от распада π^0 -мезонов, генерируемых протонами с энергией 660 Мэв в углеродной мишени ускорителя для углов 0 и 180° . Эти спектры сильно отличаются от измеренных ранее при энергии 470 Мэв. Спектры γ -квантов пересчитывались по известным формулам на спектры π^0 -мезонов. Угловое распределение π^0 -мезонов при энергии 660 Мэв оказалось близким к изотропному, в то время как при энергии 470 Мэв распределение имеет вид $(0,3 \pm 0,1) + \cos^2 \theta$.

Кроме того, в работе измерялся (разностным способом) спектр γ -квантов от распада π^0 -мезонов, генерируемых при $(p \rightarrow p)$ -столкновениях. В системе центра масс угловое распределение π^0 -мезонов имеет вид $1 + (0,3 \pm 0,2) \cos^2 \theta$.

В докладах Ю. Д. Прокошкина и А. А. Тяпкина сообщались результаты исследования образования π^0 -мезонов протонами на водороде и сложных ядрах. Измерения производились с помощью телескопа, составленного из сцинтиляционного и черенковского счетчиков. Абсолютные сечения для водорода и дейтерия измерялись разностным методом, путем регистрации потока γ -квантов, испускаемых под углом

$\theta = \arccos \frac{1}{\sqrt{3}}$ (в системе центра масс). Оказалось, что при энергии 660 Мэв:

$$\sigma(p + p \rightarrow \pi^0) = (3,6 \pm 0,3) 10^{-27} \text{ см}^2,$$

$$\sigma(p + d \rightarrow \pi^0) = (10,6 \pm 1,4) 10^{-27} \text{ см}^2.$$

Вычитанием было получено сечение

$$\sigma(p + p \rightarrow \pi^0) = 7,0 \cdot 10^{-27} \text{ см}^2.$$

Отношение сечений образования π^0 -мезонов на протоне и нейтроне равно 0,5. Авторы получили также данные о зависимости сечения образования π^0 -мезонов от энергии в области 390—660 Мэв. Угловое распределение π^0 -мезонов при энергии 660 Мэв близко к изотропному. При уменьшении энергии в угловом распределении появляется член $\sim \cos^2 \theta$.

При исследовании образования π^0 -мезонов на сложных ядрах протонами с энергией 660 Мэв была обнаружена зависимость углового распределения π^0 -мезонов от массового числа ядра мишени. Это объясняется торможением падающих протонов в ядерном веществе.

Доклад В. П. Желепова, К. О. Оганесяна и В. Б. Флягина был посвящен образованию π^0 -мезонов, под действием нейтронов с эффективной энергией 580 Мэв. γ -кванты регистрировались телескопом из черенковского и сцинтилляционного счетчиков. Сечение образования π^0 -мезонов при $(p - p)$ -столкновениях оказалось равным $(5,7 \pm 1,5) 10^{-27} \text{ см}^2$. Результаты исследования рождения π^0 -мезонов на дейтерии показывают, что сечения $(p - p)$ - и $(p - n)$ -взаимодействий в пределах ошибок совпадают. Был измерен также относительный выход γ -квантов от распада π^0 -мезонов при бомбардировке нейтронами ряда элементов. Результаты согласуются с предположением, что мезоны рождаются только на поверхности ядра. Для тяжелых элементов наблюдается отклонение от закона $A^{2/3}$.

На следующих заседаниях обсуждались вопросы взаимодействия нуклонов с нуклонами.

С большим вниманием участники прослушали доклад Э. Сегре (США) об антипротоне. Докладчик подробно рассказал о состоянии опытов по исследованию антипротонов. Одним из наиболее интересных результатов является то обстоятельство, что сечение взаимодействия для антипротонов примерно в два раза превышает сечение для протона. Значительная часть доклада была посвящена результатам, полученным фотографическим методом. Сегре продемонстрировал ряд снимков, показывающих механизмы аннигиляции в эмульсии, в том числе случаи аннигиляции только на π -мезоны. Анализ показывает, что среднее число π -мезонов, приходящихся на одну аннигиляционную звезду, равно 5 ± 1 . Доклад вызвал оживленную дискуссию.

Следующий доклад, прочитанный Я. А. Сморodinским, был посвящен обзору экспериментальных данных по рассеянию быстрых нуклонов нуклонами. Докладчик сделал также ряд замечаний о том, какие выводы могут быть получены из этих данных и каких экспериментов в настоящее время недостает для того, чтобы завершить этот анализ. К сожалению, очень плохо исследована область энергий меньше 100 Мэв, где необходимы дальнейшие исследования. Как известно, основной факт, установленный в результате анализа экспериментальных данных, это различие во взаимодействии в состояниях с изотопическим спином $T = 1$ и $T = 0$. Сечение, отвечающее $T = 1$, не зависит в широком интервале энергий ни от угла, ни от энергии. Это говорит о том, что рассеяние происходит в состояниях 1S_0 и 3P_0 . В настоящее время необходимо произвести разделение по обычному спину. Для полного разделения синглетного и триплетного состояний необходимо определить пять функций. Докладчик считает, что наиболее непосредственными опытами, позволяющими получить необходимые результаты, являются опыты по корреляции поляризаций. Существующий фазовый анализ является неоднозначным. Кроме того, возникает вопрос, не существует ли в случае рассеяния нуклонов нуклонами неоднозначности фаз, установленной для случая рассеяния мезонов нуклонами. Как показал Р. М. Рындин, такой однозначности в случае нуклонов не существует.

Сечение, отвечающее $T = 0$, сходно с тем, которое получается в борновском приближении.

В докладе В. П. Желепова излагались результаты исследования упругого рассеяния нейтронов с энергией 580 Мэв протонами и нейтронами. Нейтроны регистрировались по протонам отдачи с помощью сцинтилляционного телескопа. Измерения в случае водорода производились разностным способом. Сечение рассеяния нейтронов нейтронами определялось из сечения рассеяния дейтонами в области углов, где имеет место аддитивность сечений. Сечение упругого рассеяния нейтронов нейтронами при энергии 590 Мэв совпадает с сечением упругого рассеяния протонов протонами при той же энергии.

Угловое распределение при рассеянии нейтронов с энергией 590 Мэв протонами показывает, что обычное и обменное взаимодействия вносят в рассеяние вклад одного порядка. Однако при переходе от энергии 300—400 Мэв к энергии 600 Мэв картина меняется. Сечение при угле 0° увеличивается с ростом энергии, а сечение при угле 180° уменьшается. Как указали Л. Окунь и И. Померанчук, это обстоятельство обусловлено увеличением роли неупругих процессов при энергиях ~ 500 —600 Мэв и выше. Анализ результатов по $(p - p)$ -взаимодействию позволяет сделать следующие выводы: 1) сечение взаимодействия в состояниях с изотопическим спином $T = 0$ и $T = 1$ сильно

различаются, причем различие уменьшается с увеличением энергии нейтронов; 2) поведение сечения для $T=1$ является аномальным, в то время как поведение сечения для $T=0$ близко к вычисленному в борновском приближении; 3) сечения рождения мезонов при энергии 580 Мэв мало различаются для состояний с $T=0$ и $T=1$. Кроме того, при этой энергии сечения упругого рассеяния на углы $\sim 90^\circ$ оказываются близкими в состояниях с $T=0$ и $T=1$. Эти факты ставят под сомнение вывод о слабом взаимодействии нуклонов в состоянии с $T=0$. Докладчик указал также, что для объяснения углового распределения при упругом рассеянии нейтронов протонами нужно учитывать моменты падающих частиц вплоть до $l=6$.

В докладе Р. Маршака (США) были изложены результаты, полученные при изучении дифференциального сечения рассеяния нейтронов протонами при энергии 180 Мэв. Кроме того, докладчик привел данные по рассеянию поляризованных протонов при 150 Мэв и данные по $(n-p)$ -поляризации. Поляризация является положительной при малых углах и отрицательной при больших углах. Были приведены результаты фазового анализа при энергии 150 Мэв.

Результаты фазового анализа данных по рассеянию протонов протонами были изложены также в докладе Э. Клементаля (Италия). Использовались экспериментальные результаты в области энергий от 18 до 260 Мэв. Анализ учитывает только S - и P -волны. Полученный набор фаз не совпадает с фазами, приведенными в докладе Маршака. Следует отметить, что вообще количество допустимых наборов фаз велико и произвести какой-либо выбор весьма затруднительно.

В докладе В. П. Силина, И. Е. Тамма и В. Я. Файнберга содержался анализ современного состояния мезонной теории и результатов сравнения теории с экспериментом. По мнению авторов, несмотря на неудовлетворительное состояние современной мезонной теории с количественной точки зрения, она качественно хорошо описывает действительность. Например, было предсказано существование изобарного состояния, наличие отталкивания во взаимодействии на малых расстояниях и т. п. С количественной стороны в теории развивается направление, которое пытается получить результаты не из каких-либо приближений, а из общих положений. В качестве примера упоминаются дисперсионные соотношения и предельные теоремы. Таким путем удалось установить, что константа связи близка к 15. Кроме того, в докладе была дана краткая характеристика приближенных методов Чу-Лоу и Тамма — Данкова — Дайсона.

Современному состоянию теории ядерных сил был посвящен доклад К. Брюкнера (США). Автор изложил теоретические результаты касающиеся взаимодействия между нуклонами и сравнение с экспериментом. Выступивший в обсуждении Я. А. Смородинский указал на необоснованность выводов, сделанных докладчиком как при теоретическом рассмотрении, так и при сравнении с экспериментом.

В докладе М. Г. Мещерякова и Н. П. Богачева были изложены результаты исследования упругого рассеяния протонов протонами при энергиях 460—660 Мэв. Как известно, в области энергий 150—360 Мэв сечение $(p-p)$ -рассеяния является изотропным и не зависит от энергии. При энергии 460 Мэв наблюдается отступление от изотропии, которое увеличивается по мере увеличения энергии. Измерения при энергиях 560 и 660 Мэв показали, что дифференциальное сечение увеличивается с уменьшением угла. Дифференциальные сечения рассеяния на большие углы уменьшаются. Полное сечение в интервале 460—660 Мэв остается постоянным.

Упругое рассеяние протонов с энергией 660 Мэв в области малых углов исследовалось также в работе Е. Г. Богомолова, С. М. Замбковского, С. Я. Никитина и Я. М. Селектора. Результаты совпадают с полученными Мещеряковым и Богачевым.

В докладе В. П. Желепова, В. И. Москалева, В. И. Сатарова, Б. М. Головина и С. В. Медведя приводились данные о полных сечениях взаимодействия нуклонов с нуклонами, дейтронами и ядрами в интервале энергий 370—660 Мэв. Полные сечения определялись по выбыванию из пучка в условиях хорошей геометрии. Благодаря образованию мезонов полное сечение $(p-p)$ -взаимодействия растет с энергией. Полное сечение $(n-p)$ -взаимодействия остается в том же интервале энергии примерно постоянным. Это обусловлено уменьшением сечения упругого взаимодействия нуклонов в состоянии с изотопическим спином $T=0$. Сечения $(p-d)$ - и $(p-d)$ -взаимодействий близки друг к другу.

Заключительным в этой группе докладов был доклад Л. И. Лapidуса «К теории обменных столкновений быстрых нуклонов с дейтронами».

Затем совещание перешло к обсуждению проблем взаимодействия π -мезонов с нуклонами.

В. Вайскопф (США) сообщил о результатах исследования рассеяния γ -квантов с энергией 140 Мэв на водороде и сложных ядрах в Массачусетском технологическом институте. Измерения проводились ниже порога рождения π^0 -мезонов с помощью сцинтилляционных счетчиков, позволявших определять энергию рассеянного γ -кванта. Предварительные результаты, полученные для водорода, показывают, что рассеяние близко к томпсоновскому. Теоретическая интерпретация учитывает томпсоновский механизм, а также резонансное рассеяние мезонным облаком, описываемое формулой типа Брейта — Вигнера.

Доклад К. Брюкнера (США) «Мезон-нуклонное и нуклон-нуклонное упругое и неупругое рассеяние в интервале энергий до 1,5 Бэв» содержал анализ и интерпретацию экспериментальных данных на основе грубых моделей. Максимумы в сечениях мезон-нуклонного взаимодействия обусловлены сильным взаимодействием в состоянии с полным моментом и изотопическим спином $3/2$ (первый) и рождением дополнительных мезонов (последующие). Угловое распределение при упругом рассеянии при энергии 1 Бэв, обнаруживающее сильную направленность вперед, подтверждает наличие неупругого взаимодействия.

Для нуклон-нуклонного взаимодействия характерно быстрое увеличение сечения в области энергии 500 Мэв, сопровождающееся деформацией углового распределения при упругом рассеянии в направлении вперед. Из анализа данных докладчик приходит к выводу, что неупругие процессы, в основном, относятся к состоянию с изотопическим спином $T=1$. Следует заметить, что такой вывод не согласуется с выводами из работ Джелепова с сотрудниками. Если, однако, это так, то наиболее простое объяснение можно получить на основе изобарной модели, согласно которой мезоны рождаются через промежуточное состояние с изотопическим спином $3/2$.

В докладе Е. Л. Григорьева и Н. А. Митина были приведены результаты исследования рассеяния π^+ -мезонов протонами при энергии 310 Мэв. Угловое распределение изучалось с помощью фотоэмульсий. Экспериментальные результаты можно описать с помощью ряда полиномов Лежандра, в котором присутствуют члены нулевого, первого и второго порядка. Кроме того, с помощью БЭСМ был произведен фазовый анализ. При учете S - и P -волн получились следующие фазовые сдвиги: $\alpha_3 = 22,7^\circ$, $\alpha_{33} = 130,9'$ и $\alpha_{31} = -11,2^\circ$. Учет D -волны не вносит больших изменений.

В докладах А. И. Мухина, Е. Б. Озерова, Б. Понтекорво, И. В. Поповой и Г. Н. Тентюковой излагались результаты исследований рассеяния π^+ -мезонов на протонах при энергиях 176, 200, 240, 270 и 307 Мэв, выполненных с помощью сцинтилляционных счетчиков. Авторы подробно проанализировали поведение фазовых сдвигов с изменением энергии.

В докладе Э. Клемента (Италия) «Фазовый анализ реакций, идущих только по одному каналу», обсуждался вопрос о нахождении фаз из экспериментальных данных по рассеянию мезонов на протонах и применении аналогичного анализа к ядерным реакциям.

Доклад Л. С. Дульковой, Т. А. Романовой, И. Б. Соколовой, Л. В. Сухова, К. Д. Толстого и М. Г. Шафрановой был посвящен взаимодействию отрицательных и положительных π -мезонов с энергией около 300 Мэв с водородом, дейтерием и ядрами фотоэмульсий. Полное сечение, угловое распределение и фазы, полученные при анализе результатов по π^+ -мезонам, согласуются с результатами других авторов. В докладе приводятся также фазы для состояния с изотопическим спином $1/2$, полученные из данных по рассеянию π^- -мезонов. Угловое распределение при упругом рассеянии дейтонами имеет максимум в направлении вперед. Сечение взаимодействия с ядрами эмульсии по измерениям авторов составляет 87% геометрического сечения.

В докладе Л. Розенфельда (Англия) «Рассеяние быстрых частиц ядрами» были сообщены результаты теоретических исследований рассеяния электронов и μ -мезонов ядрами*). Эксперименты по рассеянию электронов могут дать и дают чрезвычайно интересные сведения о распределении заряда по ядру. Было найдено, что в области энергий около 70 Мэв изменения фаз, обусловленные структурой ядра, составляют около 30%. При более высоких энергиях (где уже производились эксперименты) эти изменения составляют $\sim 20\%$. В заключение докладчик коснулся вопроса о рассеянии быстрых нейтронов ядрами.

Доклад Р. Маршака (США) касался результатов измерения дифференциальных сечений рассеяния π^+ - и π^- -мезонов с энергией 40 Мэв водородом и π^+ -мезонов с энергией 28 Мэв углеродом. Исследование рассеяния π -мезонов нуклонами при малых энергиях представляет большой интерес с точки зрения определения S -фаз, поведение которых не объясняется современными теориями. В случае водорода сечение для π^+ -мезонов с энергией 40 Мэв оказывается гораздо больше сечения для π^- -мезонов. Эксперимент дает для α_3 значение, отличающееся от экстраполяции Орира.

Доклад М. С. Козодаева, Р. М. Суляева, А. И. Филиппова и Ю. А. Щербак ова был посвящен результатам изучения взаимодействия π^- -мезонов с энергией 300 Мэв с ядрами гелия. Исследование производилось в диффузионной камере Вильсона диаметром 270 мм, наполненной до давления 14 атм гелием. Сечение упругого рассеяния ($\pi^- + \text{He}^4 \rightarrow \pi^- + \text{He}^4$) и всех типов неупругого рас-

*) Доклад опубликован в УФН 60, вып. 4 (1956).

сеяния оказались равными соответственно 51 и $99 \cdot 10^{-27} \text{ см}^2$. Сечение образования π^+ -мезона равно $3 \cdot 10^{-27} \text{ см}^2$ (с ошибкой $\pm 2 \cdot 10^{-27} \text{ см}^2$). Анализ углового распределения при неупругом рассеянии и другие факторы показывают, что π -мезоны взаимодействуют с отдельными нуклонами в ядре.

В докладе В. П. Дзелянова, В. Г. Иванова, М. С. Козодаева, В. Т. Осипенкова, Н. И. Петрова и В. А. Русакова сообщалось о результатах исследования взаимодействия π -мезонов с ядрами углерода и свинца при энергиях 230 — 250 Мэв . Измерения производились в камере Вильсона, помещенной в магнитное поле. Пластинки из исследуемого вещества помещались посредине камеры.

Поискам случаев образования π^+ -мезонов на углероде π^- -мезонами с энергией 308 Мэв была посвящена работа В. В. Кривицкого и А. А. Реута. Соответствующее сечение оказалось равным $2,6 (\pm 1,3) \cdot 10^{-27} \text{ см}^2$.

Последним в этой серии докладов было сообщение А. Е. Игнатенко, А. И. Мухина, Е. Б. Озерова и Б. Понтекорово об исследовании зависимости пробега π -мезонов в ядерном веществе. Измерялись полные сечения взаимодействия π -мезонов с ядрами бериллия, углерода, кислорода и сечения неупругих взаимодействий для ядер бериллия, углерода, меди и свинца в интервале энергий 140 — 400 Мэв . Ход сечения с энергией в общих чертах копирует зависимость полных сечений рассеяния π -мезонов на водороде и дейтерии. Длина свободного пробега определялась из сечений неупругого взаимодействия. Сравнение полученных значений длин свободного пробега с вычисленными из сечений взаимодействия с нуклонами показывает, что π -мезоны взаимодействуют, в основном, с отдельными нуклонами ядра.

Следующее заседание было посвящено докладам, касающимся взаимодействия нуклонов с ядрами.

Первым был заслушан доклад О. Чемберлена (США) о поляризационных экспериментах с нуклонами высоких энергий. Докладчик рассказал о работах по рассеянию протонов протонами. Целью работ являлось получение всей совокупности данных при одной энергии, необходимых для произведения полного фазового анализа (включая F -волны). Подробно были описаны опыты по тройному рассеянию. Кроме того, докладчик сообщил данные предварительного фазового анализа, в результате которого было получено три набора фаз. Были приведены также результаты вычислений на электронной машине. Докладчик указал, что S -фаза может быть получена на основе модели потенциала с отталкиванием на малых расстояниях. Следующим этапом работы является попытка перейти к более низким энергиям, с тем чтобы получить зависимость фаз от энергии.

Доклад М. Г. Мещерякова, Г. Д. Столетова и С. Б. Нурушева касался вопросов, связанных с поляризацией протонов с энергией 660 Мэв . В опытах изучалась азимутальная асимметрия протонов при двойном рассеянии на бериллии, а также зависимость поляризации от атомного веса второго рассеивателя. Авторы нашли, что поляризация возникает как при дифракционном, так и при квазиупругом рассеянии, причем ее знак такой же, как и в случае $(p-p)$ -рассеяния. При этом степень поляризации оказывается наибольшей у упруго рассеянных протонов. При изменении энергии от 300 до 635 Мэв поляризация при упругом рассеянии на бериллии заметно не изменяется (она составляет не менее 60%). Поляризация при квазиупругом рассеянии возрастает в этом интервале энергии более чем в два раза и достигает значений, близких к величине поляризации при свободном $(p-p)$ -рассеянии.

Затем участники совещания прослушали доклад Р. Маршака (США) «Поляризационные эффекты в $(p-p)$ -рассеянии при 210 Мэв и в рассеянии протонов ядрами углерода и кальция при 215 Мэв ». Помимо полученных данных, докладчик привел результаты теоретической обработки с помощью оптической модели.

Доклад И. И. Левинтова «О величине ядерного спин-орбитального взаимодействия» был посвящен анализу экспериментов, позволяющих определить величину спин-орбитального взаимодействия. Докладчик исследовал два явления: поляризацию нуклонов при рассеянии на ядрах и спин-орбитальное расщепление одночастичных уровней. В обоих случаях получаются близкие значения постоянной взаимодействия.

В докладе Н. А. Гулиева речь шла о поляризации нейтронов высоких энергий при рассеянии на углероде C^{12} с учетом объема ядра. Вычисления производились в скалярном варианте мезонной теории при различных распределениях плотности по ядру.

В работе И. Г. Ланга и К. А. Тер-Мартirosяна теоретически изучено взаимодействие быстрых нейтронов и дейтронов с несферическими четно-четными ядрами. Несферичность приводит к изменению сечения рассеяния и к появлению ротационного спектра. В случае рассеяния нейтронов авторы получили формулы для полупрозрачного ядра, в случае рассеяния дейтронов — для черного ядра. Результаты могут оказаться полезными при определении размеров и формы несферических ядер из опытов по рассеянию.

Доклад Эль-Нади (Египет) был посвящен теоретическому изучению стриппинг-реакций. Автор рассмотрел обратные процессы, при которых падающий нуклон или дейтрон отрывает от ядра две частицы, образуя изотопы гелия.

Взаимодействие протонов с энергией 1 Бэв с ядрами фотоэмульсий был посвящен доклад Ж. Фильбера. Работа проводилась на ускорителе в Бирмингеме.

Последним в этом разделе был заслушан доклад Н. А. Перфилова и О. В. Ложкина «Тяжелые ядерные осколки в расщеплениях, создаваемых быстрыми протонами в ядерных эмульсиях».

Большое количество докладов было прочитано на заседаниях, посвященных фото-ядерным реакциям.

Обзорный доклад А. М. Балдина был посвящен фоторождению мезонов на протонах и дейтронах. Анализ данных по фоторождению π -мезонов основывается, с одной стороны, на использовании общих свойств матрицы рассеяния и, с другой стороны, на весьма общих предположениях о физической природе явлений: ограничении при малых энергиях низшими парциальными волнами, изотопической инвариантности, резонансном взаимодействии мезонов с нуклонами в состоянии с полным моментом $3/2$ и изотопическим спином $3/2$. Такой подход позволяет выявить основные особенности процесса фоторождения мезонов, которые сводятся к следующим: при реакции $\gamma + p \rightarrow \pi^+ + p$ мезоны вблизи порога рождаются в S -состоянии за счет перехода $E1$. При энергиях 200—300 Мэв существенную роль играют переходы $M1$ и $E2$ в состояние $P_{3/2}$. Основную роль в реакции $\gamma + p \rightarrow \pi^0 + p$ играют переходы $M1$ и $E2$ в состояние $P_{3/2}$. Рождение π^0 -мезонов в S -состоянии маловероятно. Кроме того, исследование реакции $\gamma + p \rightarrow \pi^+ + p$ вблизи порога фоторождения позволило определить с помощью предельной теоремы константу связи. Исследование фоторождения π^- -мезонов на дейтерии представляет большой интерес вследствие различия электромагнитных свойств нейтрона и протона. Докладчик перечислил также имеющиеся в этой области результаты.

Доклад А. А. Абрикосова «Эффекты в квантовой электродинамике при больших энергиях» рассматривает проблемы, связанные с отклонением от существующей теории при сверхвысоких энергиях.

Большой интерес вызвал доклад И. Я. Померанчука «Трудности электродинамики и мезонной теории и опыты со слабо взаимодействующими частицами». Как известно, успехи теории ренормализации в квантовой электродинамике породили надежду на успешное построение последовательной теории мезонных взаимодействий. Однако в этих случаях в отличие от электродинамики речь идет о сильных взаимодействиях, так что теория возмущений оказывается неприменимой. Попытка найти путь решения уравнений, не использующий теорию возмущений, привела к выводу, что если существующая теория (электро- и мезодинамика) справедлива до неограниченно высоких энергий, то такие непосредственно наблюдаемые величины, как электрический и мезонный заряды, должны быть равны нулю. Таким образом, современная теория является внутренне противоречивой. Энергии, при которых могут появляться новые эффекты, в случае мезонных явлений, по-видимому, должны приходиться на интервал 10^8 — 10^9 эв. Предполагается, что новые эффекты будут появляться и в процессах с участием слабо взаимодействующих частиц (электроны, μ -мезоны, γ -кванты). В качестве примера докладчик указал на Комптон-эффект и рассеяние электронов электронами. Однако энергии, при которых представляет интерес изучение этих процессов, составляют несколько десятков Бэв. Существуют опыты более доступные, однако и более сложные. Речь идет о случаях образования пар (при энергиях ~ 1 Бэв), при которых электрон и позитрон разлетаются с большим относительным импульсом (под большими углами). Аналогичный интерес представляют и опыты по образованию пар μ -мезонов.

Доклад А. Б. Мигдала был посвящен тормозному излучению и образованию пар в конденсированном веществе. При больших энергиях для этих процессов существенны большие продольные расстояния, что приводит к ряду физических следствий: зависимости тормозного излучения в кристаллической среде от ориентации относительно осей кристалла и влиянию многократного рассеяния, существенно уменьшающему вероятность этих процессов.

В. Пановский (США) сообщил о предварительных результатах исследования множественного фоторождения π -мезонов. Исследования выполнены на стенфордском линейном ускорителе. Образование пар π -мезонов на водороде регистрировалось по появлению отрицательных π -мезонов. Кроме того, наблюдалась зависимость выхода положительных π -мезонов от энергии электронов. Полученные результаты свидетельствуют о несимметричном распределении энергии между π^+ - и π^- -мезонами. Можно показать, что π -мезон испускается в виде S -волны, а π^+ -мезон в виде P -волны.

С большим вниманием собравшиеся прослушали доклад М. Леви (Франция) о работах, проделанных в Стенфорде (США) по рассеянию электронов высокой энергии на водороде и дейтерии, и их теоретическом истолковании. Эти работы представляют большой интерес, так как они, возможно, указывают на нарушение гипотезы зарядовой

независимости. Для объяснения экспериментальных результатов необходимо сделать предположение о структуре нуклонов. Наилучшее согласие в случае протонов получается при использовании одинакового формфактора для заряда и магнитного момента, причем радиус распределения $\sim 0,8 \cdot 10^{-13}$ см. Однако если использовать эту величину радиуса в случае нейтрона, то не удастся получить правильной величины взаимодействия электрон-нейтрон. Это подтверждается также результатами исследования рассеяния быстрых электронов на дейтонах. Для получения согласия с экспериментом нейтрон можно считать точечным (радиус гораздо меньше, чем у протона). По мнению докладчика, взаимодействие только с π -мезонами не может дать полного объяснения. Привлечение K -частиц благодаря асимметрии их свойств приводит к увеличению радиуса протона и уменьшению радиуса нейтрона. Результаты можно также объяснить на основе гипотезы о том, что радиус нуклона мал, а на расстоянии $\sim 0,5 \cdot 10^{-14}$ см нарушается закон Кулона. Однако окончательного вывода пока сделать нельзя.

На совещании были заслушаны три доклада В. Пановского (США) о работах, проводимых на стейфордском линейном ускорителе. В первом докладе были сообщены данные о прямом электромагнитном образовании пар μ -мезонов. Для отличия μ -мезонов при прямом образовании от μ -мезонов, возникающих при распаде, использовалось то обстоятельство, что угловое распределение μ -пар оказывается сильно вытянутым вперед, в то время как π -мезоны, образующиеся на ядрах, имеют в области малых углов почти изотропное распределение. Докладчик подробно изложил экспериментальную процедуру и продемонстрировал снимки аппаратуры. Полученные значения сечений для водорода на 30% выше теоретических. Во второй серии измерений изучалась функция возбуждения процесса образования μ -пар. Изучение образования μ -пар на свинце не обнаружило существования каких-либо аномальных эффектов.

Второй доклад был посвящен исследованию прямого образования π -мезонов электронами. Наконец, в последнем докладе были приведены данные о тормозном излучении при больших энергиях.

В докладе Н. Б. Делона излагались результаты исследования фоторасщепления дейтона γ -квантами с энергией 50—150 Мэв. Результаты согласуются с опубликованными ранее в литературе.

Фоторасщепление дейтона исследовалось также в работе В. С. Роганова и П. С. Баранова путем регистрации нейтронов, возникающих при развале дейтона. Нейтроны регистрировались по пороговой реакции $C^{12}(n, 2n)C^{11}$. Поэтому при измерениях выше мезонного порога наряду с процессом фоторасщепления регистрируются также нейтроны, возникающие при фотообразовании π -мезонов. Результаты по фоторасщеплению дейтона согласуются с опубликованными в литературе.

Сообщение Р. Вильсона (США) было посвящено теоретической интерпретации данных по фоторасщеплению дейтона при больших энергиях. Как известно, в области энергий выше 50—70 Мэв наблюдается превышение экспериментальных сечений над теоретическими, вычисленными в предположении чисто электромагнитного механизма. Автор привлек мезонный механизм и, используя экспериментальные данные по порождению π -мезонов на нуклонах, получил удовлетворительное согласие с экспериментальными результатами.

В докладе А. Н. Горбунова, К. В. Косыревой и В. М. Спиридонова «Фоторасщепление гелия γ -лучами высокой энергии» излагались результаты, полученные в камере Вильсона. Исследование угловых и энергетических распределений протонов и нейтронов, возникающих при взаимодействии γ -квантов с ядрами гелия, показывает, что интегральное сечение поглощения совпадает с предсказанным из дисперсионных соотношений и что основную роль играет электрический дипольный механизм расщепления. Кроме того, результаты позволяют оценить отношение S/V_3 в операторе взаимодействия электромагнитного поля с ядром. Это отношение составляет примерно 0,1.

Последнее заседание было посвящено новым частицам. В докладе Менона (Индия) были сообщены результаты по исследованию S -частиц с помощью камеры Вильсона. Затем докладчик осветил данные по взаимодействию быстрых α -частиц в космических лучах с веществом.

В докладе А. И. Алиханяна излагались результаты изучения спектра масс частиц космического излучения, выполненные на горе Алагёз.

Доклад Ван Гань-чан и Чжу Хунь-юань (Китай) был посвящен предварительным результатам по образованию тяжелых мезонов и гиперонов в космических лучах.

В докладе Цу (Китай) сообщалось о возможном варианте теории элементарных частиц.

О результатах исследований гиперфрагментов, включающих Λ^0 -частицы, сообщил Р. Пайерлс (Англия).

Заключительным был доклад Дж. Стейнбергера об изучении образования странных частиц π -мезонами с энергией 1,3 Бэв.

Е. М. Лейкин.

ВТОРАЯ СЕКЦИЯ

На заседаниях второй секции более чем в 60 докладах и сообщениях советских и зарубежных ученых разбирались вопросы, связанные с конструкцией и теорией различных типов ускорителей элементарных частиц. Тематику отдельных заседаний секции были ускорители, линейные ускорители, установки с сильной фокусировкой, а также методы эксперимента с частицами высоких энергий.

Доклад «Шестиметровый синхроциклотрон Института ядерных проблем АН СССР» представили на пленарное заседание Д. В. Ефремов, М. Г. Мещеряков, А. Л. Минц, В. П. Желепов, П. П. Иванов, В. С. Катышев, Е. Г. Комар, И. Ф. Малышев, Н. А. Моносзон, И. Х. Невяжский, Б. И. Поляков и А. В. Честной (Академия наук СССР). Он посвящен описанию мощного ускорителя, сооруженного в Институте ядерных проблем в 1949 г. и переданного в настоящее время Советским правительством недавно организованному Объединенному институту ядерных исследований. Синхроциклотрон позволяет получать протоны с энергией 680 Мэв и применяется для изучения взаимодействия нуклонов с нуклонами высокой энергии, исследования свойств мезонов и т. д.

Диаметр полюсов электромагнита равен 6 м. В зазоре между ними, составляющем 60 см, создается магнитное поле напряженностью 16 800 эрстед в центре и спадающее к периферии на 5%, причем область используемого поля доведена по радиусу до 278 см. Вакуумная камера объемом около 30 м³ имеет разборную конструкцию и выполнена из латунных плит с уплотнением из резины. Откачка производится двумя высоковакуумными насосами со скоростью до 30 000 л/сек. Давление вблизи ионного источника около 10⁻³ мм рт. ст., рабочее давление в камере 6·10⁻⁶ мм рт. ст., а при перекрытии подачи водорода к ионному источнику (1—2)·10⁻⁶ мм рт. ст.

Высокочастотное ускоряющее поле между краем дуанта и заземленной рамкой получается благодаря возбуждению радиочастотных колебаний в полуволновой резонансной системе. Синхроциклотрон снабжен оборудованием, которое позволяет выключать высокочастотное питание в течение нерабочей части цикла ускорения, получать одиночные циклы ускорения, управлять напряжением, подводимым к ионному источнику, и включать приборы и установки для исследований, расположенные на выведенных пучках частиц. Все эти процессы при помощи специальной системы «привязаны» к циклу изменения частоты высокочастотного генератора, который питает резонансную систему. Включение высокочастотного напряжения производится перед каждым циклом ускорения фотоэлектрическим устройством, которое расположено в кожухе вариатора так, что луч света, падающий на фотоэлектронный умножитель, пересекается лопатками вращающегося ротора вариатора.

Управление ускорителем (включая насосы и холодильные установки) автоматизировано и производится из специального здания, которое удалено от синхроциклотрона на расстояние около 400 м. Кроме агрегатов питания, там размещены установки контроля и управления тем оборудованием, которое не может быть отнесено от ускорителя. Сам ускоритель расположен в большом зале, где размещена также часть аппаратуры для физических исследований. Основная аппаратура и приборы для ядерных исследований находятся за защитной бетонной стеной толщиной 5,5 м и управляется дистанционно. Примененная на синхроциклотроне система вывода позволяет выпускать наружу около 6% пучка протонов, циркулирующего в камере. В защите синхроциклотрона и в ядре его электромагнита имеется 16 коллиматоров, через которые выводятся неполяризованные и поляризованные пучки нуклонов, пучки $\pi^{\pm}$ -мезонов и пучки гамма-квантов от распада π^0 -мезонов. Ускорительная камера снабжена четырьмя пробниками, при помощи которых можно облучать образцы из различных веществ пучком протонов, ускоренных до желаемой энергии.

На ускорителе можно одновременно проводить опыты на нескольких пучках одинаковых или различных частиц.

На синхроциклотроне Института ядерных проблем был проведен ряд интересных и важных работ, в частности, исследование упругого рассеяния протонов протонами, нейтронов нейтронами и протонами; исследование процессов образования заряженных и нейтральных π -мезонов в соударениях нуклонов с нуклонами и дейтонами; исследование процессов взаимодействия π -мезонов с нуклонами.

В докладе А. Л. Минца, И. Х. Невяжского и Б. И. Полякова (Академия наук СССР) «Некоторые особенности и основные данные высокочастотной системы шестиметрового синхроциклотрона» указывалось, что для расширения диапазона частот оказалось необходимым усложнение простой высокочастотной схемы дейтонного синхроциклотрона. Резонансная система спроектирована в виде неоднородной линии, волновое сопротивление которой определенным образом меняется вдоль ее длины. Параллельно переменной емкости подключена относительно большая индуктивность благодаря тому, что опоры, поддерживающие элементы системы, выполнены в виде спиральных пружинок.

Резонансная система состоит из дуанта с заземленной рамкой, соединительной линии и вариатора частоты, вес которого около 1 т. Напряжение на дуанте 15 кв. Средняя мощность генератора 50 квт, в нерабочую часть цикла он запирается модулятором, и мощность снижается вдвое. Чтобы сократить путь тока в системе, уменьшить начальную емкость переменного конденсатора и увеличить его коэффициент перекрытия, ротор вариатора укреплен на внутреннем стебле соединительной линии. Для уменьшения силы высокочастотного тока, проходящего через шариковые подшипники, последние шунтируются специальным коаксиальным конденсатором емкостью в 0,2—0,3 микрофарды. Кроме того, дуанту, так же как и переходу от дуанта к соединительной линии, придана специальная конфигурация. Конструктивные особенности ускорительной камеры, дуанта и линии, а также соответствующий выбор элементов цепи связи резонансной системы с генератором позволили удалить большинство резонансных частот за пределы рабочего диапазона.

Чтобы устранить возбуждение системы на паразитных частотах, лежащих за пределами рабочего диапазона, предложена новая схема «полосного» автогенератора, в которой самовозбуждение происходит только в пределах заданного широкого рабочего диапазона частот. Схема позволяет регулировать коэффициент обратной связи в широких пределах, даже если паразитные частоты системы находятся в непосредственной близости к верхней границе рабочего диапазона. В высокочастотной системе ускорителя переменная связь с генератором обеспечивает необходимое изменение импеданса системы при уменьшении частоты ускоряющего напряжения от 26,5 до 13,0 Мгц.

В докладах сотрудников Института ядерных проблем В. П. Дмитриевского, В. И. Данилова, Ю. Н. Денисова, Н. Л. Заплатина, В. С. Катышева, А. А. Кропина и А. В. Честного «Вывод пучка протонов из шестиметрового синхроциклотрона посредством возбуждения радиальных колебаний» и В. И. Данилова, В. П. Дмитриевского и А. В. Честного «Об одном методе повышения плотности пучка протонов, введенного из шестиметрового синхроциклотрона» излагались результаты теоретической и экспериментальной разработки нового метода вывода ускоренных частиц из камеры синхроциклотрона Института ядерных проблем.

При помощи искусственно вызываемой азимутальной неоднородности магнитного поля в ускорителе возбуждаются дополнительные колебания частиц в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Увеличение амплитуды радиальных колебаний в районе этого возмущения используется для заброса частиц в магнитный канал. Необходимая неоднородность магнитного поля создается при помощи железных масс, расположенных вблизи границы рабочей области ускорителя. После выхода пучка из магнитного канала он фокусируется в горизонтальной плоскости магнитным полем с постоянным градиентом. Расчеты показали, что оптимальное фокусирующее действие на пучок протонов с энергией 680 Мэв получается при градиенте магнитного поля в интервале 750—1000 эрстед/см в области протяженностью 45 см и шириной 5—8 см. Это оптимальное значение градиента было найдено также из экспериментов с пучком, которые показали, что фокусирующее устройство увеличивает плотность пучка в два-три раза. После применения описанного метода в 1954 г. коэффициент вывода протонов, ускоренных до энергии 680 Мэв, из камеры составил примерно 6%, а интенсивность пучка достигла $7 \cdot 10^7$ протонов/сек. Авторы указали, что аналогичная методика может быть применена для вывода и ввода частиц в других ускорителях с постоянным во времени магнитным полем.

В. И. Данилов, В. П. Дмитриевский, Б. И. Замолдчиков, В. С. Катышев, А. А. Кропин и А. В. Честной (Институт ядерных проблем) представили работу «Исправление медианной поверхности магнитного поля шестиметрового синхроциклотрона», где рассматривается влияние положения и формы медианной поверхности магнитного поля ускорителя на характер движения частиц в вертикальной плоскости. В докладе описаны два метода определения положения и формы медианной поверхности: при помощи токонесущих петли и рамки, подвешенных в магнитном поле зазора электромагнита. Перераспределения токи в катушках электромагнита и производя щиммирование тонкими стальными листами, авторы добились отклонения медианной поверхности от средней плоскости порядка 1 см.

Профессор Баккер (Европейская организация ядерных исследований — CERN) сообщил о системе модуляции частоты в синхроциклотроне CERN*), который рассчитан на ускорение протонов до 600 Мэв и должен войти в строй в 1957 г.

В настоящее время почти закончено сооружение магнита и обмоток синхроциклотрона. Диаметр его полюсов равен 5 м. Поле в центре равно 18 800 эрстед. Частота ускоряющего поля меняется от 27,6 до 16,6 Мгц. Это изменение достигается не при помощи вращающегося конденсатора, как в большинстве подобных ускорителей, а применением своеобразного настроенного камертона. Пластины камертона

*) Описание этого ускорителя см., например, в Suppl. N. Cim., сер. X, 2, 403 (1955).

имеют размеры 54×200 см², толщина пластин уменьшается к краям. Камертон сделан из алюминиевого сплава, который выбран из-за хорошей проводимости и высокой механической прочности. Рассчитано, что изгибающие усилия в пластине составляют 6 кг/мм², в то время как предел упругости равен 12 кг/мм². Колебания камертона на собственной частоте 55 гц поддерживаются механическим возбудителем.

Испытания на модели камертона размером в $\frac{1}{4}$ величины показали, что декремент затухания чрезвычайно мал — меньше $0,25 \cdot 10^{-4}$. Мощность, рассеиваемая в такой системе за счет колебаний, равна 200 вт, причем используется водяное охлаждение. Проф. Баккер отметил, что применение для камертона алюминиевого сплава упростило решение ряда технических задач по сравнению с подобной системой, использованной на синхроциклотроне в Беркли, США. Там камертон изготовлен из специальной стали, закаленной в азоте, и поэтому хорошая проводимость достигается лишь при покрытии его специальным проводящим сплавом, а для создания постоянного температурного градиента нужно разрезать пластины камертона вблизи краев. Проф. Баккер отметил, что одной из основных причин, по которым была выбрана система, о которой он сообщил, является неустойчивость работы вращающегося конденсатора, и сказал, что теперь, после того как он ознакомился с синхроциклотроном Института ядерных проблем, он уже не очень уверен в явном преимуществе настроенного камертона.

Член-корреспондент АН СССР А. Л. Минц, выступивший в дискуссии, заявил, что доклад профессора Баккера посвящен второму направлению разработки высокочастотных систем для синхроциклотронов. Когда в Советском Союзе в 1947—1948 гг. началась разработка такой системы, проектировщики очень опасались проблем, связанных с тем, что вращающийся конденсатор должен находиться в вакууме. Анализ и эксперименты показали, что трудности можно устранить. В синхроциклотроне Института ядерных проблем вращающийся конденсатор работает не менее надежно, чем другие узлы. Вместе с тем вариант с настроенным камертоном очень интересен, так как позволяет провести вакуумное уплотнение очень простым образом.

Х. Тирен (Упсала, Швеция) посвятил свое сообщение описанию синхроциклотрона на 185 Мэв. Синхроциклотрон расположен в подземном зале; помещение для экспериментов также находится под землей и отделено от ускорителя двухметровой бетонной защитой. Управление синхроциклотроном производится из здания, находящегося на поверхности земли сбоку от ускорителя. Вес магнита 650 т, максимальное магнитное поле равно $21\,000$ эрстед. Диаметр полюсных наконечников 2 м, расстояние между ними 20 см. В ускорителе используется вращающийся конденсатор. Напряжение на дуанте 7 кв. Ток при инжекции составляет около 1 ма, ток протонов, ускоренных до энергии 185 Мэв, порядка 1 мка, причем выводится около 1% пучка. Вывод осуществляется при помощи раскочки радиальных колебаний по методу Така и Тенга, примененному в ИЯПАН. Выведенный пучок фокусируется двумя сильнофокусирующими линзами. Первая из них, помещенная в зале, где находится ускоритель (градиент поля линзы 1000 эрстед/см, апертура 12 см, длина около 50 см, вес 600 кг) делает пучок почти параллельным с диаметром 5 см; вторая, расположенная в помещении для экспериментов, доводит сечение пучка до нескольких квадратных миллиметров. На этом ускорителе проводятся, в частности, исследования поляризации протонов высокой энергии, упругое и неупругое рассеяние протонов в углероде и т. д. Проводятся также исследования, носящие медицинский характер. Тирен иллюстрировал свой доклад большим количеством схем и фотографий, подробно ответил на многочисленные вопросы.

В докладах сотрудников Физического института им. П. Н. Лебедева АН СССР Е. М. Мороза и М. С. Рабиновича «О повышении предельной энергии и улучшении фокусировки в циклотроне» и А. К. Бурцева и А. А. Коломенского «К теории кольцевого фазотрона» рассмотрены вопросы, связанные с использованием в ускорителях постоянных магнитных полей. В первом докладе предлагается создать разрезной магнит циклотрона с однородными полями, которые имеют разную напряженность в секторах и в промежутках между ними. Область устойчивости орбит может быть значительно расширена при помощи спирального изгиба границ магнитных секторов. При определенных условиях с помощью такой конструкции можно, по-видимому, ускорять протоны без перехода через наиболее опасные резонансы до энергии порядка 500 Мэв.

Кольцевым фазотроном называется кольцевой сильнофокусирующий ускоритель с постоянным во времени полем, которое в соседних секторах противоположно по направлению (предложен в 1953 г. А. А. Коломенским, В. А. Петуховым и М. С. Рабиновичем). В докладе Бурцева и Коломенского показано, что при условии геометрически подобного изменения замкнутых периодических орбит (когда все орбиты составлены из отрезков окружностей) возможны варианты этой установки, где допуски на различные параметры имеют тот же порядок, что и у обычных сильнофокусирующих синхрофазотронов, но радиус установки в четыре—шесть раз превышает радиус кривизны траектории частицы в секторах. Применение систем, рассмотренных в обоих докладах, возможно, позволит намного уве-

личить интенсивность пучка ускоренных частиц по сравнению с существующими ускорителями.

Сообщение Дмитриева, Краснова и Капрова (МГУ) «К вопросу об отклонении пучка в циклотроне» посвящено выводу внутреннего пучка из камеры циклотрона, который рассчитан на ускорение дейтронов до энергии 10,6 Мэв. Ионный источник смещен относительно центра камеры так, что центр траектории ионов совпадает с центром симметрии поля. Это смещение достигало 60 мм, причем при смещении на 15 мм наблюдалось резкое увеличение интенсивности выведенного пучка. При помощи дополнительного шиммирования на этом циклотроне удалось вывести до 20% пучка.

С небольшим сообщением о 1,5 м циклотроне выступили Калинин, Кондрашев, Наумов, Неменов, Панасюк (АН СССР). В 1947 г. из этого циклотрона вывели пучок дейтронов с энергией 18 Мэв. Максимальное поле ускорителя равно 18 000 эрстед, спад поля составляет 1,7%, зазор между полюсами 18 см. Частицы выводятся с радиуса 67 см. В 1953 г. на циклотроне был установлен дуговой источник, разработанный независимо от Р. С. Ливингстона. Ускорительная система состоит из дуантов и двух коаксиальных линий. Напряжения на дуантах около 180 кВ. Пост управления расположен за водяной защитой, толщина которой 1 м. Пучок ионов фокусируется при помощи секторного магнита (горизонтальная фокусировка) и электростатического устройства (вертикальная фокусировка) и выводится на расстояние 12 м от циклотрона, что позволяет избавиться от фона нейтронов и гамма-квантов. Максимальная плотность тока на мишени 15 мка/см², причем 90% пучка содержится в сечении $2 \times 1,5$ см², а разброс частиц в пучке по энергии составляет 1%. В настоящее время рассматриваются вопросы использования сильной фокусировки и исследуется поведение пучка частиц.

Большое число докладов, представленных на конференцию по ускорительной тематике, было посвящено синхрофазотрону АН СССР на энергию 10 Бэв, также переданному недавно Объединенному институту ядерных исследований. Его общее описание дал в выступлении на пленарном заседании конференции член-корреспондент АН СССР В. И. Векслер от имени группы физиков и инженеров из ряда институтов Академии наук СССР, принимавших участие в разработках, проектировании и строительстве этой установки (В. И. Векслер, Д. В. Ефремов, А. Л. Минц, П. М. Зейдлиц, П. П. Иванов, А. А. Коломенский, Е. Г. Комар, И. Ф. Малышев, Н. А. Монозон, И. Х. Невяжский, В. А. Петухов, М. С. Рабинович, С. М. Рубчинский и К. Д. Синельников).

Синхрофазотрон АН СССР на 10 Бэв, находящийся в настоящее время в стадии запуска, является наиболее мощной установкой подобного типа. Основные характеристики ускорителя:

Максимальная энергия частиц	10 Бэв
Энергия инжектируемых частиц	7,5 Мэв
Радиус орбиты частиц	28 м
Количество прямолинейных участков	4
Длина прямолинейного промежутка	8 м
Вес электромагнита	36 000 т
Длительность цикла ускорения	3,3 сек
Число циклов в минуту	5
Внутренние размеры вакуумной камеры	$0,4 \times 2,0$ м ²
Максимальное магнитное поле в зазоре	13 000 эрстед
Рабочее давление в камере	$(2 \div 3) \cdot 10^{-6}$ мм рт. ст.
Интенсивность пучка ускоренных частиц	$10^9 \div 10^{10}$ протонов в импульсе.

Инжекция частиц в синхрофазотрон производится из линейного ускорителя на 7,5 Мэв с форинжектором на 570 кВ. Управление агрегатами синхрофазотрона — дистанционное. Сама ускорительная установка и оборудование, непосредственно связанное с ней (вакуумная система, инжектор и т. п.), размещаются в специальном здании, к которому примыкает корпус для экспериментальной аппаратуры, отделенный от ускорителя восьмиметровой защитной бетонной стеной. Все остальное оборудование, в том числе и главный пульт, с которого производится дистанционное управление всеми узлами ускорителя, расположено в отдельном здании на расстоянии 100 м от первого.

В докладе В. И. Векслера, А. А. Коломенского, В. А. Петухова и М. С. Рабиновича (Электрофизическая лаборатория) «Физические основы сооружения синхрофазотрона на 10 Бэв» рассмотрены основные требования, предъявляемые к подобному ускорителю.

При проектировании синхрофазотрона в 1949—1950 гг. были решены следующие задачи: о движении частиц на различных этапах цикла ускорения (впуск ча-

стиц из предускорителя, захват частиц, движение в ускорительном режиме, вывод пучка), о влиянии различных возмущений на движение частиц и влияние вредных резонансов с бетатронными и синхротронными колебаниями. Рассмотрены требования и допуски на параметры главных узлов синхрофазотрона (линейного ускорителя, инжекционной оптики, магнита и его системы питания, вакуумной камеры, высокочастотной системы) и вопросы защиты от вредных излучений. В частности, было найдено, что при наличии технических пульсаций скорости нарастания магнитного поля допуск на резонансную гармоническую составляющую с частотой синхротронных колебаний не должен превышать 3,5%. При рассмотрении свободных колебаний применялся так называемый метод огибающих. Были сообщены результаты исследований, проведенных на действующей модели синхрофазотрона (с энергией протонов около 180 Мэв), и результаты сравнения теории, применявшейся при проектировании синхрофазотрона на 10 млрд. эв, с экспериментами на этой установке.

В докладах группы сотрудников НИИ электрофизической аппаратуры МЭП (Е. Г. Комар, Г. А. Зейтленок, И. Ф. Малышев, И. М. Ройфе и Н. С. Стрельцов) и сотрудников Электрофизической лаборатории АН СССР (Л. П. Зиновьев, В. А. Петухов, К. Д. Синельников, Л. И. Болотин, С. К. Есин, Г. А. Зейтленок, П. Н. Зейдлиц, В. С. Кладницкий, И. Ф. Малышев, А. М. Некрашевич, И. М. Ройфе, Л. С. Шуцкевер) освещались вопросы, связанные с техническим осуществлением инжекции частиц в синхрофазотрон АН СССР. В докладах были подробно описаны: инжекторное устройство ускорителя, инжекционная оптика, приведены данные об интенсивности и стабильности пучка инжектируемых протонов, а также его геометрические параметры. Приведены экспериментальные результаты, полученные на ускорителе-модели на 180 Мэв и непосредственно на строящейся установке, по прохождению пучка через инжекционное устройство, а также его впуску в камеру ускорителя. В докладе, представленном сотрудниками НИИ электрофизической аппаратуры МЭП, приведено также описание способа получения высокочастотных импульсов высокого напряжения с крутым фронтом. Импульсы служат для получения пучка с широким угловым раствором, что значительно облегчает наладочные работы в процессе запуска.

Общие технические проблемы, связанные с радиочастотной системой для ускорителя, рассматривались в докладе А. Л. Минца, С. М. Рубчинского, М. М. Вейсбейна, Ф. А. Водопьянова, А. А. Кузьмина, В. А. Уварова (Академия наук) «Система связи частоты ускоряющего поля и напряженности магнитного поля синхрофазотрона». Необходимая связь частоты ускоряющего и магнитного полей в синхрофазотроне должна осуществляться с точностью порядка 0,3—0,1%. Кроме того, ускорение частиц в синхрофазотроне налагает жесткие требования на момент включения различных элементов ускорителя, который должен строго соответствовать определенному значению напряженности магнитного поля. В частности, инжекция частиц в камеру должна осуществляться с точностью 5—10 мксек, что соответствует относительной погрешности в значении напряженности магнитного поля $3 \cdot 10^{-4}$ — $6 \cdot 10^{-4}$. В докладе приведены два способа осуществления требуемой точности «привязки» частоты ускоряющего напряжения к магнитному полю: во-первых, с помощью системы с интеграторным датчиком магнитного поля, диодным функциональным преобразователем и широкодиапазонным частотномодулированным генератором с отрицательной обратной связью через прецизионный частотный детектор и, во-вторых, с помощью системы с вспомогательным электромагнитом, через обмотку которого протекает ток основного магнита ускорителя и в зазоре которого помещена катушка с ферритовым сердечником колебательного контура задающего генератора.

Вторая из предложенных систем описана в докладе А. Л. Минца, С. М. Рубчинского, М. М. Вейсбейна и А. А. Васильева (Академия наук СССР) «Системы управления процессами инжекции в синхрофазотронах». Она обеспечивает привязку моментов инжекции с точностью лучшей $5 \cdot 10^{-4}$. Для формирования управляющих импульсов, не требующих высокой точности включения, используются фантастроны.

Последовавший затем доклад Ф. А. Водопьянова (АН СССР) был посвящен техническому осуществлению одной из частей системы связи частоты и магнитного поля — задающему генератору. Широкодиапазонную модуляцию частоты с прецизионной зависимостью ее от модулирующего сигнала можно осуществить либо с помощью прецизионного задающего генератора, либо с помощью стабилизации модуляционной характеристики, используя отрицательную обратную связь при обычном генераторе. В процессе разработки была выбрана блок-схема с отрицательной обратной связью. Стабильность в такой схеме обеспечивается прецизионным частотным детектором в цепи отрицательной обратной связи. Результаты экспериментальной проверки описанного задающего генератора показали, что его модуляционная характеристика линейна с точностью порядка процента в диапазоне частот от 0,15 до 1,5 Мгц и имеет крутизну порядка 70 кгц/в. Стабильность характеристики лучше, чем 0,07%, за 100 часов работы. Уровень паразитной модуляции частоты

на частотах синхротронных колебаний (600—2000 гц) меньше $5 \cdot 10^{-7}$. Спектральная плотность шумовой модуляции в том же диапазоне частот меньше $0,05 \text{ гц}^2/\text{гц}$.

Вопрос об ускоряющих элементах синхрофазотрона и основных проблемах их питания напряжением высокой частоты был разобран в докладе Ю. М. Лебедева-Красина (АН СССР). Необходимость получения значительных высокочастотных ускоряющих напряжений при большом перекрытии диапазона частот питающего напряжения, которое доходит до 10—20, является значительной трудностью, так как колебательная мощность при этом достигает сотен киловатт, а мощность потребления доходит до тысяч киловатт. В докладе указано, что параметры ускоряющих элементов в значительной мере определяют принципы построения и мощность питающей аппаратуры, поэтому их выбор является одним из важных моментов при проектировании синхрофазотронов. С этой точки зрения рассмотрены различные типы ускорительных элементов и систем. Показано, что необходима общая мощность выходных каскадов многоканальной системы питания при увеличении числа каналов убывает обратно пропорционально их числу, а мощность отдельного канала — обратно пропорционально квадрату числа каналов. Автором установлено, что при небольшом перекрытии частот (меньше 10), в синхрофазотронах, рассчитанных на энергию меньше 10 Бэв, целесообразно применение ускорительных электродов и апериодических систем высокочастотного питания, сконструированных на основе устройств типа трансформатор — электрод. В частности, что применение в синхрофазотроне АН СССР на 10 Бэв системы питания, состоящей из двух ускорительных электродов, уменьшило необходимую мощность питания примерно в два раза, а количество феррита на 18 т по сравнению с одним ускорительным трансформатором, который применен на космотроне *).

Для каскадов предварительного усиления высокочастотного напряжения разработаны цепи, использующие новый широкополосный радиочастотный трансформатор.

Доклад И. Х. Невяжского, Г. М. Драбкина, В. Ф. Трубецкого, А. С. Темкина (Академия наук СССР) был посвящен применению индуктивностей с ферритовыми сердечниками в контурах мощного каскада синхрофазотрона АН СССР. При проектировании установки возникла задача построения мощных каскадов высокочастотных генераторов по схеме с настроенным анодным контуром, содержащим индуктивности с ферритовыми сердечниками. С помощью сердечников частота контура перестраивается на частоту задающего генератора, изменяющуюся в пределах 0,18—1,5 Мгц. Реактивная мощность катушки индуктивности при емкости ускоряющего электрода 1500 пикофард и амплитуде высокочастотного напряжения 20 кВ достигает 3000 кВА. Все это потребовало изучения поведения ферритов в сильных полях. Были исследованы никель-цинковые ферриты с начальными магнитными проницаемостями от 200 до 800, с целью определения условий, при которых амплитуда колебаний устойчива на склонах резонансной кривой контура, содержащего феррит, и рассмотрены вопросы, связанные с намагничиванием. Было найдено, что для изоляции цепи подмагничивания от высокочастотного поля целесообразно применить систему из двух параллельных индуктивностей с обмоткой подмагничивания, заложенной в середину высокочастотных токопроводов.

В высокочастотном устройстве синхрофазотрона на 10 Бэв переменная индуктивность была осуществлена в виде отрезка коаксиальной линии, частично заполненной ферритом. Вес феррита одного контура составляет 800 кг.

Вопросы, связанные с электромагнитом синхрофазотрона на 10 Бэв, разбирались в докладах сотрудников НИИ электрофизической аппаратуры МЭП СССР Е. Г. Комара, Н. А. Моносзона, Н. С. Стрельцова и Г. М. Федотова «Некоторые особенности конструкции электромагнита синхрофазотрона Электрофизической лаборатории на 10 Бэв», А. А. Журавлева, Е. Г. Комара, И. А. Мозалева, Н. А. Моносзона и А. М. Столова «Магнитные характеристики синхрофазотрона ЭФЛАН на 10 Бэв», М. А. Гашева, Е. Г. Комара, Н. А. Моносзона, А. М. Столова и Ф. М. Слеваковой «Система питания электромагнита синхрофазотрона ЭФЛАН на 10 Бэв» и сотрудников Электрофизической лаборатории М. Д. Веселова, А. А. Журавлева, И. А. Мозалева, Э. А. Мяз, А. М. Столова и С. В. Федуква «Методы и результаты экспериментального исследования магнитного поля синхрофазотрона на 10 Бэв».

Внешний диаметр магнитного кольца синхрофазотрона равен 72 м. Магнит состоит из 48 блоков Ш-образного сечения весом по 800 т каждый, блоки объединены в четыре квадранта. Зазор между полюсами магнита равен 40 см, при ширине полюсов 2 м. В вертикальных частях блоков имеются овальные вырезы: половина из них используется для размещения элементов вакуумной системы, а другая — для облегчения доступа персонала к камере при установке аппаратуры и проведения в камере

*) Космотрон — ускоритель синхрофазотронного типа на энергию 3 Бэв, расположенный в Брукхейвене (США) и запущенный в 1952 г. Подробное описание этой установки см. в специальном номере журнала Rev. Sci. Instr. 24, № 9 (1953); перевод в сборнике «Проблемы современной физики», № 11, 1954

необходимых работ. Медная обмотка блока весом 57 т помещена в кожух, который в случае пожара автоматически наполняется азотом. Магнит выполнен из листов электротехнической стали с содержанием кремния 4% для уменьшения коэрцитивной силы, толщина этих листов 4 и 1 см. Максимальное поле равно 13 000 эрстед на радиусе 28 м, поле при инжекции равно 150 эрстед. Пригодные для использования значения магнитного поля занимают по радиусу при инжекции 150 см, в конце ускорения 40 см. Для компенсации искажений, вызванных влиянием остаточного магнетизма, насыщения стали, динамическими искажениями и ошибками установки блоков, использованы специальные корректирующие обмотки. Коррекция искажений позволила увеличить на 40—70 см по радиусу область пригодных значений показателя магнитного поля. Для исследования поведения параметров магнитного поля применяются измерительные катушки, пермаллоевые зонды и датчики, основанные на явлении ядерного парамагнитного резонанса.

Серьезной проблемой в системе питания синхрофазотрона явилось создание преобразователей большой мощности, состоящих из четырех параллельно соединенных двенадцатифазных преобразователей и четырех электромашинных агрегатов с маховиками большой массы на общую пиковую мощность 140 000 квт. В установке используются специальные запаянные игнитроны. Пульсации магнитного поля подавляются при помощи отрицательной обратной связи. Как сообщил на конференции тов. Столов, на ускорителе заканчивается наладка системы питания. Опробовано питание двух блоков, соединенных параллельно, и получен ток в 6300 а. Скоро будут включены все четыре блока системы питания.

Основные требования к вакуумной камере были изложены в докладе Е. Г. Комара, И. Ф. Малышева, Я. Л. Михелиса, А. В. Попковича (НИИ электрофизической аппаратуры МЭП СССР) «Вакуумная камера синхрофазотрона ЭФЛАН на 10 Бэв». Вакуумная камера двойная. Форвакуумная камера, стенками которой являются полюсные башмаки, уплотненные текстолитом, гетинаксом и технической резиной, позволяет поддерживать разрежение до 1 мм рт. ст. Высоковакуумная камера выполнена из тонких листов нержавеющей стали с уплотнением на стыках листов специальной резиной: здесь давление не превышает $2 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст.

Все доклады, связанные с конструкцией синхрофазотрона на 10 Бэв, вызвали большой интерес как у советских, так и у иностранных ученых. Докладчики подробно отвечали на многочисленные вопросы по технике выполнения узлов и деталей, о способах поддержания допусков и мерах борьбы с усадкой фундамента, течучестью грунта и т. д.

А. Л. Минц, выступивший в дискуссии, указал, что работы, связанные с проектированием и строительством синхрофазотрона АН СССР на 10 Бэв, проводились в тесном контакте с ведомственными организациями, так что ряд докладов, представленных на конференцию, является результатом совместной работы. В результате длительной общей работы жесткие требования, поставленные физиками перед радиотехниками, были выполнены. Сейчас синхрофазотрон АН СССР находится в стадии пусковых работ, однако радиотехническая аппаратура уже опробована и дала ожидаемые результаты.

На пленарном заседании с интересом было выслушано сообщение американского ученого Дж. Маршалла (Чикаго, США) о проекте протонного синхротрона на 10—15 Бэв, который разрабатывается сейчас в Аргоннской национальной лаборатории, США. Оригинальность проекта, где принят ряд мер для уменьшения веса магнита, привлекла большое внимание.

По-видимому, в этом отношении в проекте наиболее полно использованы возможности слабофокусирующих ускорителей. В описываемом ускорителе с однородным по радиусу магнитным полем горизонтальная и вертикальная фокусировка частиц осуществляется с помощью специально выбранной формы магнитных секторов, т. е. используется так называемая «краевая» фокусировка, применяемая, например, в некоторых типах масс-спектрометров. В настоящем проекте края всех восьми секторов магнита составляют с радиусом кривизны траектории частиц угол около 11° . Ядро электромагнита не имеет специальных полюсных башмаков: оно будет состоять только из двух горизонтальных и двух вертикальных частей и иметь в поперечном сечении форму буквы «О». Внешние размеры ядра: ширина около 2,3 м, высота около 1,3 м. Внутри ядра размещены две обмотки размером по 30×18 см² каждая и между ними ускорительная камера (ее размеры 64×18 см²). Магнитный поток создает в воздушном зазоре ядра однородное поле на всей ширине ускорительной камеры. Напряженность магнитного поля в начале ускорения около 400 эрстед, в конце — около 19 000 эрстед. Радиус кривизны траектории частиц равен 24 м. Предполагаемая энергия инжекции 50 Мэв. В качестве инжектора будет использован линейный ускоритель или циклотрон с фокусировкой при помощи переменного по азимуту магнитного поля. Время ускорения 1 сек, длительность цикла ускорения 3 сек. Вес железа магнита составляет примерно 3500 т. Кольцевой магнит будет окружен защитными бетонными стенами, толщина которых снаружи кольца равна 12 м, а внутри — 8 м.

С. А. Векшинский и М. С. Рабинович (Научно-исследовательский вакуумный институт МРТИ СССР) в докладе «Вакуумные откачные агрегаты для ускорителей» отметили, что для улучшения работы насосов ими используется непротравливаемая ловушка, непрерывно охлаждаемая жидким азотом. Эта ловушка почти полностью прекращает вынос масляных паров из насоса в откачиваемый объем. Описанные агрегаты удобны в использовании на ускорителях, хотя скорость откачки с применением ловушки снижается с 5000 до 3000 л/сек.

Четыре доклада представляли собой экспериментальное и теоретическое исследование механизма захвата в бетатронный режим ускорения.

Сотрудники Физического института им. П. Н. Лебедева и 2-го Научно-исследовательского физического института МГУ В. И. Векслер, Ю. Н. Лобанов, В. Н. Логунов, Е. П. Овчинников, В. А. Петухов, М. С. Рабинович и В. Д. Русанов (доклад «Физические основы захвата электронов в бетатронный режим ускорения») и Ю. Н. Лобанов и В. А. Петухов (доклад «Экспериментальные основы теории захвата частиц в бетатронный режим ускорения») сообщили, что изучение влияния тока инжектированных электронов на эффективность захвата позволило установить наличие двух существенно различных механизмов захвата и определить их границы. Один из них определяется только адиабатическим сжатием мгновенных орбит, связанным с ростом магнитного поля бетатрона, другой — коллективным взаимодействием электронов пучка с имеющимися в камере неоднородностями пространственного заряда.

Опыты показали, что захват всегда наблюдается как на переднем и заднем фронте импульса инжекции, так и на его плоской части, но вклад, вносимый этими участками, различен и зависит от различных параметров инжекции. Авторы отмечают высокую эффективность коллективного механизма захвата, который, как установлено опытами с подвижной радиальной заслонкой, обеспечивает сжатие орбит на величину около 1 мм за оборот. В этих опытах заслонку без существенного уменьшения интенсивности можно было вводить внутрь камеры на 6—7 мм за край анода инжектора. Было обнаружено, что наблюдаемый при увеличении частоты тока, питающего магнит (в этих опытах от 200 до 800 гц), рост интенсивности не связан с увеличением скорости нарастания магнитного поля в период инжекции.

Чехословацкий ученый М. Сейдл (Научно-исследовательский институт вакуумной электротехники, Прага) сообщил, что на бетатроне лаборатории ускорителей этого института изучалось влияние градиента поля, меняющегося во времени и по азимуту, на затухание бетатронных колебаний. Азимутальное изменение градиента поля создавалось искусственно при помощи электростатической линзы с сильной фокусировкой. К линзе было подведено импульсное напряжение, которое можно было включать с различной задержкой относительно импульса инжекции. Было установлено, что влияние пространственного заряда электронов можно полностью компенсировать изменением градиента поля во времени и по радиусу даже при таких малых токах инжекции, когда естественный захват электронов практически равен нулю. Результаты опытов, как отметил Сейдл, подтверждают правильность гипотезы Бардена о том, что изменение градиента поля по азимуту и во времени, созданное пространственным зарядом в момент инжекции, может играть решающую роль при захвате электронов в бетатронах.

В докладе П. А. Рязина (Физический институт им. П. Н. Лебедева) «О захвате электронов в бетатронный режим ускорения» была сделана попытка теоретически объяснить захват с учетом эффекта самондукции и адиабатического изменения параметров во время ускорения.

Выступивший с замечанием В. И. Векслер отметил, что работа П. А. Рязина обсуждалась на ряде семинаров в Физическом институте. Было отмечено существенное расхождение экспериментальных данных с предсказаниями теории. Расчеты, по мнению теоретиков института, во многих пунктах ошибочны или неясны. В связи с этим представление о механизме захвата, изложенное П. А. Рязиным, видимо, не соответствует действительности.

Чучалин (Томский политехнический институт) сообщил о методе увеличения интенсивности примерно в два раза, примененном на бетатроне, который рассчитан на энергию 15 Мэв. Импульс инжекции имеет два максимума. Увеличение интенсивности объясняется, по-видимому, двойным захватом на переднем фронте импульса. Докладчик отметил, что оптимальные условия захвата наблюдаются при резком росте и медленном спаде импульса. Не исключена также возможность захвата на плоской части импульса.

В циклических ускорителях электронов на энергии свыше 1 Бэв основная трудность заключается в компенсации растущих пропорционально четвертой степени энергии потерь на излучение. Потери достигают, например, при 10 Бэв величины около 30 Мэв за оборот. Вместе с этим излучение, а именно квантовый, дискретный характер потерь энергии, влияет на движение электронов в ускорителе, приводя, как показывают расчеты, к раскачке бетатронных и синхротронных колебаний.

Как отметил в дискуссии В. И. Векслер, этот вопрос не является абстрактным. Неслучайно поэтому, что выяснение степени опасности раскачки проходило на конференции в обстановке оживленной дискуссии.

А. А. Соколов (МГУ), выступая с изложением своего доклада «Движение электронов в циклических ускорителях с учетом квантовых эффектов» и доклада Д. Д. Иваненко, А. А. Соколова и И. М. Тернова (МГУ) «Теория светящегося электрона», сообщил, что, согласно квантомеханическим расчетам этих авторов, амплитуда бетатронных колебаний из-за квантового характера излучения растет пропорционально корню квадратному из времени ускорения и сильно ($\sim E^{1/2}$) зависит от энергии. Дополнительное радиационное затухание, вызываемое излучением, по мнению авторов, мало и характеризуется временем затухания порядка $\frac{E^3}{(mc^2)^3 W}$,

где W — интенсивность излучения. В связи с этим становится практически невозможным ускорение в слабофокусирующем магните до энергии больше $2 \div 3$ Бэв и накладываются довольно жесткие условия на режим работы сильнофокусирующих синхротронов.

Этим результатом пользовался также А. Н. Матвеев (МГУ) в докладе «Движение электронов в циклических ускорителях как стохастический процесс».

А. А. Коломенский и А. Н. Лебедев (ФИАН им. П. Н. Лебедева) в своем докладе «Некоторые особенности электронных циклических ускорителей на больших энергиях» отметили ошибочность результатов А. А. Соколова и его сотрудников. Авторы в классические уравнения движения ввели статистические члены, описывающие квантовые флуктуации излучения. Кроме того, чрезвычайно существенным оказался учет совместного действия ускоряющей системы установки и реакции излучения. Вызванное этим «радиационное трение» в слабофокусирующих магнитах сильно ограничивает рост амплитуд бетатронных колебаний. Однако в сильнофокусирующих магнитах для того, чтобы реакция излучения вызвала затухание колебаний, необходимы специальные меры, не создающие, впрочем, дополнительных трудности. По вычислениям авторов время затухания бетатронных колебаний при-

мерно равно $\frac{E}{W}$, благодаря чему раскачка колебаний не представляет серьезной опасности для ускорителей.

Выступившие в дискуссии В. Л. Гинзбург и М. С. Рабинович отметили правильность предположений и расчетов Коломенского и Лебедева и указали на ошибки, допущенные Соколовым и его сотрудниками.

Темой доклада по линейным ускорителям, который был представлен группой сотрудников Института химической физики АН СССР (Н. Н. Семенов, И. Л. Зельманов, Б. М. Степанов, Б. К. Шембель и А. С. Компанеев), явились некоторые результаты разработки линейных ускорителей на больших токи. В ходе этой работы был решен ряд важных технических вопросов, связанных, например, с постройкой инжектора, дающего токи порядка долей ампера при напряжении 10^6 в, разработкой специальных ускоряющих резонаторов и т. д. Кроме того, А. С. Компанецу удалось провести точное решение уравнений совместно для фазового и радиального движения в ускорителе с учетом кулоновского взаимодействия. В разрабатываемом ускорителе предполагается получать ток около 50 ма в импульсе (для протонов). Для выяснения оптимальных соотношений между параметрами машины были проведены специальные исследования при пониженном ускоряющем напряжении на электронной модели, на выходе которой достигался средний ток 0,1 а. Многие выводы доложенной работы совпадают с результатами аналогичных американских исследований — об этом сообщил конференции проф. Пановский (Стенфорд, США).

В прениях по докладу Хижняк сделал сообщение о линейном протонном ускорителе, построенном в Харькове. В этом ускорителе, работающем на бегущей волне, фокусировка пучка основана на разностном (скоростном) эффекте. На выходе машина дает ток протонов с энергией 5 Мэв силой около 10 а. Предполагается, что применение резонаторов, нагруженных диэлектриком, позволит довести ток до 100 а.

Профессор Пановский (США) коротко сообщил об американских линейных ускорителях на большие токи. Кроме ускорителей протонов (7 Мэв, 0,1 а) и электронов (15 Мэв, 0,2 а), в США намечается построить сильнофокусирующий ускоритель для тяжелых многозарядных ионов (вплоть до неона), в котором они должны получать энергию около 10 Мэв на нуклон. Машина состоит из двух секций: в первой ионы с малым зарядом ускоряются в одном резонаторе. После этого они попадают в область повышенного давления, где с них «обдирается» заряд; основное ускорение происходит на пути 20 м. Задача получения больших токов в этой машине потребовала конструирования специальных ионных источников. Протонные ускорители на большие энергии не рассматривались. Профессор Пановский ответил также на вопросы, касающиеся стенфордского линейного ускорителя,

дающего электроны с энергией до 660 Мэв*), и продемонстрировал ряд фотографий основных узлов установки. Эксплуатационные расходы на этой машине составляют примерно 50% общей стоимости исследований; выход из строя к्लитронов (среднее время их работы 1500 часов) ведет к тому, что ускоритель работает около 350 часов в месяц. В результате стоимость работы на нем в два раза выше, чем для синхротрона на такую же энергию, но средний ток получается около 1 мка.

Работа сотрудников НИИ электрофизической аппаратуры МЭП И. А. Гришаева, П. М. Зейдлица, Г. А. Зейтленка, В. В. Румянцева, В. Л. Смирнова, Л. П. Фомина и В. К. Хохлова была посвящена экономическим и техническим основаниям для выбора параметров линейных ускорителей на большие энергии, причем отмечалось, что вопрос стоимости сооружения имеет решающее значение. В рассмотренных случаях наиболее эффективной системой оказывался волновод с бегущей волной, нагруженный диафрагмами. Целесообразнее всего осуществить независимое питание секций такого ускорителя от отдельных высокочастотных генераторов, причем количество их растет пропорционально конечной энергии частиц. Несмотря на то, что ускоряющее поле в настоящее время может быть доведено до 300 кВ/см, оказывается невыгодным применять поле больше 140 кВ/см, так как при этом резко возрастают эксплуатационные расходы.

В докладе А. Д. Власова (Академия наук СССР) излагалась линейная теория сильной фокусировки в линейных протонных ускорителях, основанная на методе отгибающих. Теория относится к установкам, в которых ускоряюще-фокусирующая система разбивается на чередующиеся участки, в каждом из которых движение устойчиво либо в продольном, либо в поперечном направлении. Известно, что надлежащим выбором параметров можно получить в такой системе устойчивость как для фазового, так и для радиального движения. Весьма наглядным является построение области устойчивости в координатах: ускоряющее поле — градиент в фокусирующих линзах. Такая область устойчивости была приведена в докладе для простейшего случая, когда период ускоряюще-фокусирующей системы имеет прямоугольную характеристику. Из необходимости удерживать рабочую точку в середине этой области вытекают, с одной стороны, определенные значения для градиента магнитного поля и, с другой стороны, — предел для напряженности высокочастотного ускоряющего поля, который, как было выяснено, нельзя повысить увеличением поля в линзах. В работе были получены также некоторые общие соотношения, относящиеся к произвольной структуре ускоряюще-фокусирующего поля.

Теории сильной фокусировки в линейных ускорителях были посвящены также доклад Л. С. Соловьева и Э. Л. Бурштейна (Академия наук СССР) и работа А. А. Шаршанова и К. Н. Степанова (Физико-технический институт АН УССР).

Несколько в стороне от основной тематики стоял вынесенный на секцию ускорителей доклад Л. Н. Розенцвейга, Г. Л. Высоцкого и А. А. Креснина (Физико-технический институт АН УССР), в котором был предложен новый метод получения и анализа поляризованных пучков электронов. Проведение экспериментов с поляризованными частицами может дать ряд интересных результатов, однако существующая методика оказывается практически непригодной при релятивистских энергиях. В докладе предлагалось использовать явление холодной эмиссии из металла при низкой температуре. Если при этом наложить настолько сильное магнитное поле, что энергия магнитного взаимодействия будет больше тепловой, то вероятность выхода окажется довольно сильно зависящей от спина электрона. Полученная в работе формула показывает, что при $E = 10^6$ в/см, $H = 10^5$ эрстед и водородных температурах пучок должен быть поляризован примерно на $10 \div 20\%$.

На специальном заседании секция ускорителей обсуждала один из наиболее важных в настоящее время вопросов — вопросы теории и осуществления ускорителей с сильной фокусировкой. Хорошо известно, что задача построения кольцевых ускорителей обычного типа на энергию порядка десятков Бэв сталкивается с необходимостью сильно увеличивать размеры ускорительной камеры и, следовательно, вес магнита. Хотя доклад Маршалла (США) на пленарном заседании и показал, что на основе обычных методов далеко не все возможности для снижения веса были использованы до конца, все же наиболее перспективным в ближайшем будущем является, по-видимому, переход к сильной фокусировке, позволяющей значительно уменьшить размеры камеры.

В связи с этим вполне понятен тот интерес, который вызвал на конференции доклад Р. Вильсона (Итака, США) о первом работающем сильнофокусирующем синхротроне Корнелльского университета, дающем электроны с энергией 1 Бэв. Применение сильной фокусировки, т. е. чередующихся больших отрицательных и положительных градиентов поля, требует, как было выяснено, высоких точностей

*) Подробное описание этого ускорителя см., например, в журнале Rev. Sci. Instr. 26, 134 (1955).

изготовления и установки машины. Естественно поэтому, что в первых ускорителях подобного типа показатель спадания магнитного поля λ берется сравнительно небольшим, в частности, в этой машине он равен 20. Такое значение определялось здесь, кроме того, и структурой магнита, который первоначально конструировался как слабофокусирующий. Выбранные параметры позволили получить довольно широкую ячейку устойчивости, в которой находится рабочая точка; ее ширина $\Delta\lambda = \pm 2$. Точность, с которой собрана машина, можно характеризовать, например, тем, что фундамент установлен с допуском ± 1 мм. Сильнофокусирующие полюсные башмаки магнита можно менять на слабофокусирующие, причем перемещение и крепление их осуществляются очень простым и надежным методом с помощью сжатого воздуха. Малый размер зазора, а также узкая дорожка (сечение камеры ускорителя 3×7 см²) позволили сильно снизить вес магнита: он составляет всего 20 т, что в несколько раз меньше веса магнита слабофокусирующего синхротрона на 300–400 Мэв. Инжекция в ускоритель осуществляется при 2 Мэв из генератора Ван де Граафа, дающего ток 10 ма в импульсе, который длится в течение одного оборота частиц. Поле на равновесной орбите равно в этот момент примерно 20 эрстед.

При выбранной начальной энергии ускоряемые электроны еще заметно меняют свою скорость (при инжекции $\beta = 0,9$), поэтому применена специальная конструкция сдвоенного ускоряющего резонатора. Вначале работает только одна его половина, имеющая низкую добротность и питаемая от отдельного генератора с модулированной частотой. Вторая половина с высокой добротностью, в которой и происходит основное ускорение, включается лишь при 10 Мэв, причем, как было выяснено, нет необходимости точно выдерживать момент перехода от одного резонатора к другому. Рабочая частота, начиная с этого момента, равна 80 Мгц (восьмая гармоника частоты обращения). В начале ускорения, когда потери электрона на излучение еще пренебрежимо малы, амплитуда напряжения на резонаторе составляет всего 5 кв, к концу цикла она поднимается до 24 кв.

Проф. Вильсон отметил, что, как выяснилось в процессе наладки машины, ускоритель построен с чрезмерно большим запасом, поскольку большую часть цикла ускорения (при энергии, большей 100 Мэв) диаметр поперечного сечения пучка меньше 1 мм, причем размеры пучка существенно не меняются. При энергии около 100 Мэв пучок можно уже наблюдать визуально по его излучению: вакуумная камера изготовлена из стекла. Магнитное поле ускорителя в дальнейшем предполагается поднять до 13 000 эрстед (в настоящее время его напряженность равна 8800 эрстед), с тем чтобы довести энергию до 1,5 Бэв. Остаточные поля при инжекции компенсируются четырьмя специальными катушками, надобность в которых отпадает, если в дальнейшем будет осуществлен переход к инжекции при 10 Мэв; кроме того предусмотрена компенсация магнитного поля Земли. Нелинейности поля малы, колебания показателя поля во всем рабочем пространстве не превышают 5%.

Цикл ускорения повторяется 30 раз в секунду, причем в каждом импульсе машина дает $3 \cdot 10^8$ частиц. В дальнейшем интенсивность предполагается довести до 10^{10} частиц в импульсе. Интересно, что наладка и доводка ускорителя заняли полтора года, в то время как его монтаж продолжался всего 6 месяцев.

О. Веригольм (Стокгольм, Швеция) сообщил о конструкции электронного синхротрона с сильной фокусировкой на энергию 1,2 Бэв, строящегося в Швеции. Радиус секторов этой установки составляет 3,65 м. Максимальное поле равно 11 000 эрстед. Показатель спадания магнитного поля составляет 10,6. По конструкции и расположению элементов магнит описываемого ускорителя практически аналогичен ускорителю, описанному Р. Вильсоном. Оригинальной особенностью установки является микротронный инжектор на энергию 6 Мэв. Ток инжектора — микротрона составляет 20 ма. Частицы совершают в нем 10 оборотов. Разброс по энергии у частиц на выходе из микротрона равен примерно 0,5%. Высокая энергия частиц при инжекции позволяет обойтись в этом синхротроне без модуляции частоты ускоряющего поля. Камера ускорителя имеет размеры 7×4 см². Ускоритель будет работать с подмагничиванием на частоте 25 гц. Запуск намечен на 1957 г.

Один из самых больших протонных сильнофокусирующих ускорителей сооружается в настоящее время близ Женевы международной организацией CERN. О его основных параметрах рассказал на конференции один из авторов проекта — М. Регенштейн. Ускоритель рассчитан на максимальную энергию 25 Бэв. В сильнофокусирующем магните трудно получить поле больше 12 000 эрстед, поэтому радиус кривизны траектории протонов такой энергии будет равен 70 м. Соответственно этому кольцевой магнит синхрофазотрона, углубленный в землю, имеет средний радиус 100 м. Высокое значение показателя магнитного поля, характеризующего силу фокусировки, равное 282, налагает довольно жесткие требования на точность установки; авторы проекта предполагают выдержать в течение всего цикла ускорения расчетные размеры магнита с точностью до 1 мм. С этой целью разработан в настоящее время сооружается специальный фундамент, представляющий собой бетонное кольцо на углубленных в скальный грунт сваях, причем приняты некоторые

меры, предусматривающие компенсацию возможного смещения отдельных участков грунта.

Элемент периодичности магнитной системы состоит из фокусирующего и дефокусирующего секторов, разделенных пополам прямолинейными промежутками, — при таком расположении они вносят наименьшие возмущения. Всего в магните 100 таких элементов периодичности. Фокусировка частиц достаточно сильна: за каждый оборот частицы совершают примерно шесть полных колебаний около замкнутой орбиты, поэтому сечение вакуумной камеры имеет небольшие размеры — 8×16 см. Интересно, что рабочая точка ускорителя выбрана не в центре области устойчивости, а несколько в стороне; так, известный характеристический параметр

$\mu = \frac{\pi}{4}$. Это дает возможность за счет некоторого увеличения амплитуды колебаний облегчить допуск на параметры магнита. Питание магнита будет осуществляться от мотор-генераторов общей мощностью 40 000 квт.

Проектирование ускорителя велось на основе линейной теории. Было построено и исследовано 10 различных моделей магнита; пластины этих моделей делались подвижными, что позволяло легко менять конфигурацию поля. Изучение нелинейного режима машины проводилось с помощью специально сконструированного моделирующего устройства, в котором металлизированный кварцевый шарик движется в электрическом поле 12 электродов. В результате этого были, в частности, подробно изучены резонансы связи разных порядков и выделены наиболее опасные среди них. Экспериментально на модели было подтверждено, что резонансы различного типа не опасны для работы машины. Численные расчеты, проведенные в результате этих исследований, дают основание предполагать, что амплитуда колебаний при действии нелинейностей будет несколько больше, чем это предсказывается теорией возмущений. В проекте машины предусмотрена возможность установки дополнительных обмоток на полюсах, а также введения нелинейных линз.

Инжекция в этот ускоритель должна производиться при энергии 50 Мэв, которую протоны будут получать в специальном линейном ускорителе с форинжектором на 600 квв. Фокусировка инжектируемого пучка осуществляется с помощью сеток и специальных квадрупольных магнитных линз. Ток инжектора 1 ма.

Частота ускоряющего поля в 21 раз превышает частоту обращения частиц и меняется на протяжении ускорительного цикла с 2,9 до 9,55 Мгц. Продолжительность цикла 1 сек, частота повторения — один импульс в 5 сек.

На этом же заседании рассматривался круг вопросов, связанных с так называемой критической энергией. Из теории сильнофокусирующего ускорителя известно, что в нерелятивистской области устойчивая равновесная фаза имеет один знак, а при энергии, в несколько раз превышающей энергию покоя, — другой. Очевидно, что на протяжении ускорительного цикла равновесная фаза проходит через нуль. В этот момент частота фазовых колебаний тоже обращается в нуль и фазовая устойчивость нарушается, т. е. сколь угодно малые отклонения параметров машины от идеальных будут приводить к потере частиц. Эта проблема, очевидно, несущественна в случае электронных ускорителей, где энергия инжекции может превышать критическую, но для ускорения тяжелых частиц она весьма серьезна.

Вопросу критической энергии был посвящен ряд теоретических и экспериментальных работ, благодаря чему в настоящее время его можно считать решенным. Две из этих работ докладывались на конференции — это доклады А. А. Коломенского и Л. Л. Сабсо́вича (Физический институт им. П. Н. Лебедева АН СССР), а также В. В. Владимирского и Е. К. Тарасова (Академия наук СССР).

В первом докладе рассмотрена физическая картина перехода через критическую энергию. В окрестности критической точки поведение фазы исследовано при учете нелинейного соотношения между приращением энергии и частоты обращения и выяснена качественная картина процесса перехода, наглядно продемонстрированная на ряде диаграмм. Авторы указали на возможность перехода через критическую точку при выключенном высокочастотном напряжении при помощи использования ускоряющего поля бетатронного типа.

В докладе Владимирского и Тарасова рассматривалась возможность устранения критической энергии путем введения в систему специальных компенсирующих магнитов с полем обратного знака и, следовательно, с обратной кривизной траектории. Благодаря соответствующему расположению этих магнитов (с периодом, близким к периоду бетатронных колебаний) можно добиться того, что при отклонении импульса от равновесного длина орбиты не изменяется. Можно показать, что в такой системе критическая энергия отодвинута в бесконечность, т. е. равновесная фаза в процессе ускорения знака не меняет. Достигается это ценой некоторого удлинения магнитной системы и небольшого увеличения амплитуды вынужденных колебаний.

Этот метод использован в двух проектах советских сильнофокусирующих протонных ускорителей, о которых сообщалось на пленарном заседании конференции

в докладе В. В. Владимирского, Е. Г. Комара и А. Л. Минца (Академия наук СССР). Меньший из этих ускорителей рассчитан на энергию 6—7 Бэв, что при сравнительно небольших размерах установки обеспечивает достаточное превышение над порогом рождения антинуклонов. В известной степени этот ускоритель может служить также и моделью для установки на 50—60 Бэв, основные параметры которой также сообщались в докладе. Поэтому для обоих ускорителей применена описанная система компенсации изменения длины орбиты, отодвигающая критическую энергию в бесконечность, хотя ускоритель на 7 Бэв и при обычной схеме можно спроектировать без перехода через критическую энергию.

Энергия инжекции в ускоритель на 7 Бэв выбрана довольно низкой — 4 Мэв, что потребовало специального рассмотрения влияния пространственного заряда и рассеяния на остаточном газе в камере. В докладе рассмотрено влияние различных возмущений на выбор допусков к основным параметрам ускорителя, а также к фундаменту установки.

Ниже мы приводим краткую таблицу основных параметров обоих синхротронов:

Максимальная энергия ускоренных частиц	$7 \cdot 10^9$ эв	(50—60) 10^9 эв
Энергия инжекции	$4 \cdot 10^6$ эв	10^8 эв
Длина орбиты	251 м	1480 м
Число фокусирующих магнитов	112	105
Число компенсирующих магнитов	14	15
Число колебаний за один оборот	12,75	По радиусу 13,752 По вертикали 12,744
Размеры сечения вакуумной камеры	11×8 см ²	—
Вес магнита	2700 т	22 000 т
Допустимое смещение магнитов	0,3 мм	1 мм
Заданная точность магнитного поля	0,4%	0,25%
Число циклов в минуту	12	6
Время нарастания магнитного поля	1,5 сек	3,8 сек
Частота ускоряющего поля	Меняется от 0,65 до 8,5 Мгц	Меняется от 2,624 до 6,063 Мгц

На конференции был заслушан также доклад В. В. Владимирского и С. В. Скачкова (Академия наук СССР) «Расчеты магнитов ускорителей с сильной фокусировкой». Результаты экспериментального исследования таких магнитов содержались в докладе И. А. Мозалевского и Г. В. Трохачева (НИИ электрофизической аппаратуры МЭП СССР), где были приведены данные по влиянию геометрии зазора на распределение магнитного поля, а также рассматривались различные методы измерения поля в сильнофокусирующем магните.

Заседание, на котором обсуждались новые методы ускорения частиц, началось докладом известного физика проф. М. Л. Олифанта (Канберра, Австралия) «Безжелезный протонный синхротрон малых размеров на 10 Бэв*».

Основному докладу было предпослано краткое введение, в котором проф. Олифант отметил, что сооружение ускорителей на высокие энергии при использовании электромагнитов с железным ярмом приводит к большим размерам и большой стоимости установок. В целях экономии средств целесообразен переход к более экономичным безжелезным магнитным системам, поскольку они позволяют использовать более сильные магнитные поля и имеют поэтому меньшие размеры и стоимость.

Примером такого ускорителя является протонный синхротрон, сооружаемый в Канберре. В этом ускорителе магнитное поле на орбите должно создаваться импульсным током, обтекающим специальную систему проводников, состоящую из двух групп. В поперечном сечении обе группы представляют собой два пересекающихся круга радиусом около 25 см. Общая часть сечения этих групп круговых проводников изъята и образует пространство для ускорения частиц, в которое помещается вакуумная камера из нержавеющей стали диаметром 22 см. Ток в круговых группах проводников имеет встречное направление. Деформацией сечения групп удается достичь нужной пространственной конфигурации магнитного поля с показателем спадания около 0,51—0,60. Каждая группа проводников разделена на четыре секции, которые соединены последовательно и образуют, таким образом, четыре витка. Механические усилия, испытываемые обмоткой при прохождении через нее максимального тока, достигают 16 т на сантиметр длины. Поэтому для уменьшения деформаций система проводников, создающих магнитное поле, заключена в плотно пригнанный дюралевый

*) Описание этого ускорителя содержится в Proc. Roy. Soc. 234, 441 (1956).

корпус. Предполагается, что радиальные деформации не будут превышать величины 2 мм, что мало скажется на распределении магнитного поля. В плане магнитная система состоит из четырех секторов, радиус которых 480 см, разделенных прямолинейными промежутками длиной 250 см. Магнитная система рассчитана на получение поля, равного 80 000 эрстед при общем суммарном токе в одной группе кругового сечения около 6 млн. а. Вес меди в установке составляет 80 т (вместе с подводными проводниками, весшими вдвое тяжелее, чем проводники, создающие магнитное поле).

Питание магнитной системы осуществляется от специального униполярного генератора, ротор которого состоит из четырех стальных дисков весом 20 т каждый и диаметром около 3,5 м. Перед началом цикла диски вращаются с угловой скоростью, равной 15 об/сек, что соответствует запасенной кинетической энергии $6 \cdot 10^8$ дж, причем на создание магнитного поля тратится около половины этой энергии. Напряжение на каждом диске униполярного генератора составляет примерно 200 в. Генератор нагруженный на магнитную систему, при напряжении 720 в, развивает ток в импульсе около 1,7 млн. а. Серьезной задачей является коммутация больших токов и изоляция. Ток с ребер дисков униполярного генератора будет сниматься «жидкими щетками» — струями смеси расплавов натрия — калия (от ртути в системе коммутации пришлось отказаться ввиду ее токсичности и большого сопротивления). Система коммутации помещена в атмосферу азота и поддерживается при температуре 100°. За один цикл через коммутирующее устройство протекает около 2,5 т расплава. Между циклами униполярный генератор разгоняется до нужной скорости от ртутного выпрямителя.

Ускоритель будет давать один импульс ускоренных протонов в 10 мин. Длительная пауза между циклами нужна для покрытия потерь: в установке рассеивается примерно $\frac{3}{4}$ поступающей энергии. Однако, в дальнейшем предполагается в результате различных усовершенствований, несмотря на низкую свжажность, достичь средней интегральной интенсивности обычных ускорителей. Длительность цикла ускорения будет составлять приблизительно 0,68 сек. В качестве инжектора предполагается использовать циклотрон с энергией около 8 Мэв. В установке возможно применение инжектора и иного типа, выбор циклотрона обусловлен, по словам Олифанта, лишь имеющимся в этом отношении опытом работы. Пучок ускоренных частиц предполагается получить через два года. В настоящее время заканчивается сооружение униполярного генератора. Кроме того, имеются модели различных элементов установки и модель униполярного генератора, подтвердившие расчетные данные. Для модели униполярного генератора использован магнит циклотрона, который будет позднее применен в качестве инжектора.

Совершенно новые пути для конструирования ускорителей были указаны в докладе Г. И. Будкера и А. А. Наумова (Академия наук СССР) «Теоретические и экспериментальные данные по электронному стабилизированному пучку», где предлагается использовать поля зарядов внутри ускорительной камеры. Так называемый стабилизированный электронный пучок представляет собой пучок релятивистских электронов, в который для компенсации кулоновских сил расталкивания добавлено некоторое количество положительных ионов. Так как кулоновское взаимодействие электронов в пучке сильно ослабляется из-за релятивистских эффектов (в γ^2 раз, где $\gamma = (1 - \beta^2)^{-1/2}$), то число компенсирующих ионов незначительно. В докладе показано, что при определенных ограничениях на величину плотности электронов и ионов стабилизированный пучок устойчив в поперечном сечении, причем его размеры должны быть порядка 0,01 мм при токах пучка около 1000 а. Таким образом, внутри пучка будут существовать магнитные поля порядка 10^5 эрстед и электрические поля порядка 10^5 в/см. Эти поля растут с увеличением расстояния от оси пучка и обладают фокусирующими свойствами. Ввиду того что стабилизированный электронный пучок «прозрачен» для ионов и электромагнитной волны, а время «жизни» пучка, по утверждению авторов, может достигать нескольких часов, его можно использовать в качестве фокусирующей системы циклического резонансного ускорителя. Чтобы поддержать стабилизированный пучок кольцевой формы, потребуются внешнее магнитное поле напряженностью всего около 100 эрстед. Для этой цели авторы предложили использовать магнитное поле бетатронного типа.

Проведенные оценки показывают, что при токе стабилизированного пучка, равном 10 000 а, и радиусе кольца 3 м можно достичь максимальной энергии 100 Бэв при начальной энергии 10 кэв. Наиболее трудными вопросами, связанными с осуществлением стабилизированного пучка, являются вопросы его устойчивости. Авторами показано, что пучок устойчив в области токов до 17 000 а. Возмущения типа перетяжек не нарушают устойчивости пучка. Деформации кольца приводят к неустойчивости, которая, однако, по мнению авторов, неопасна, так как соответствующие возмущения медленно развиваются во времени.

Далее докладчик Г. И. Будкер остановился на экспериментальных работах по созданию стабилизированного пучка, которые ведутся уже в течение полутора лет. С целью получения электронных пучков с большими токами было выбрано два основных направления: накопление большого количества частиц в магнитном поле бета-

тронного типа и использование кольцевого разряда в камере. В последнем случае идея заключается в том, чтобы внезапно приложить сильное вихревое электрическое поле и достигнуть в электрическом разряде отрыва электронов от ионов. Здесь трудность состоит в том, что критерий такого отрыва электронов противоречит условию зажигания разряда. Несколько в стороне от первых двух способов стоит метод так называемой «ионной завесы», который отличается тем, что пространственный заряд внутри камеры создается с помощью сторонней ионизации. Первые опыты с ионной завесой дали ток около 12 а. Данный метод представляется одним из наиболее перспективных.

При обсуждении этого доклада, вызвавшего большой интерес, задавались многочисленными вопросами о способах достижения токов, нужных для создания стабилизированного пучка, о некоторых теоретических вопросах и способах измерений при экспериментах.

Во втором совместном докладе Будкера и Наумова «Импульсный безжелезный синхротрон» были описаны оригинальные конструкции безжелезных импульсных ускорительных установок синхротронного типа, предложенных Г. И. Будкером в 1950 г. Особенностью магнитной системы этих ускорителей является использование для создания магнитного поля лишь одного витка, конструкция которого выбрана так, что равнодействующая механических сил, приложенных к нему, равна нулю. Кроме того, в этих установках облегчается задача получения магнитного поля заданной конфигурации, так как точность последней из-за скин-эффекта обуславливается практически лишь точностью механической обработки витка.

Авторами рассматривались два проекта: с радиусом орбиты, равным 33 см на энергию 1 Бэв, и с радиусом 1 м на энергию 3 Бэв. Установка на энергию 3 Бэв сильнофокусирующая. Проекты этих ускорителей, по утверждению докладчиков, чрезвычайно экономичны. В настоящее время построена модель на 200—300 Мэв. Радиус орбиты в модели равен 17 см. Рабочая область магнитного поля, пригодная для ускорения, имеет размеры 2,5 см × 5 см. Показатель спада магнитного поля $0,57 \pm 0,02$. Вес модели около 150 кг, энергия питания магнитной системы $9 \cdot 10^3$ Дж. Магнитное поле создается импульсным током до 400 000 а, обтекающим один виток специального сечения, который помещается внутри массивной металлической вакуумной камеры. Вакуумная камера одновременно служит обратным проводником для тока, создающего направляющее магнитное поле, и несет все возникающие механические усилия. При разработке камеры были использованы специальные магнитные лабиринты, позволяющие ослабить магнитные поля в 10^4 раз. Кроме того, созданы особые разрядники, управляемые с точностью до 0,1 мксек и выдерживающие в настоящее время 100—200 импульсов. По мнению авторов, создание более долговечных разрядников не встретит серьезных технических трудностей.

В настоящее время все элементы модели изготовлены, опробованы и дали надежные результаты. Модель находится в стадии запуска. Предполагается, что в установках описываемого типа легко осуществить вывод пучка, так как в них имеется простая возможность создания значительных местных неоднородностей в градиенте магнитного поля.

Докладчику были заданы многочисленные вопросы относительно деталей конструкции предлагаемых проектов синхротронов.

В докладе А. А. Коломенского (Физический институт АН СССР) «Новые модификации кольцевого ускорителя с постоянным магнитным полем» указывалось на возможность создания кольцевого циклотрона для релятивистских частиц — кольцевого сильнофокусирующего ускорителя с постоянным во времени полем и постоянным периметром орбиты. Простейший вариант такого ускорителя представляет собой два соприкасающихся кольцевых фазотрона — прямого и обратного, сопряженных, например, посредством прямолинейных промежутков. С ростом энергии средний радиус орбиты в одной из установок растет, а во второй — уменьшается, так что периметр орбиты, а следовательно, и частота обращения остаются постоянными. Создание такого ускорителя позволило бы значительно увеличить интенсивность ускоренных частиц в сравнении с имеющимися ускорителями. Правда, такое увеличение интенсивности можно было бы получить ценой ужесточения допусков и увеличения размеров установки.

Заключительное заседание секции было посвящено экспериментальным методам. С докладом «Использование счетчиков и водородной пузырьковой камеры в экспериментах с частицами высоких энергий» выступил американский физик Е. Альварец (Беркли, США). В первой части доклада Е. Альварец остановился на некоторых замечаниях по поводу методики экспериментов с мезонами, часть которых в настоящее время уже опубликована. Была описана схема постановки экспериментов, позволяющая отбирать частицы с импульсом 350 Мэв. Затем Альварец рассказал о водородных пузырьковых камерах, используемых при экспериментах на беватроне. В настоящее время работают две камеры: десятисантиметровая, с импульсным полем 8000 эрстед, выполненная из нержавеющей стали, и двадцатипятисантиметровая, подробности конструкции которой не описывались. Автор привел несколько фотографий ядерных процессов, полученных с помощью этих камер. Помимо этого, будет

сооружена 500-литровая водородная камера с магнитным полем порядка 15 000 эрстед. Был приведен схематический вид такой камеры.

Альваресу был задан ряд вопросов относительно экспериментов, проведенных с помощью водородных камер, и вопросов, касающихся технических деталей их конструкции.

В докладе П. М. Морозова, Б. Н. Макова, М. С. Иоффе (Академия наук СССР) была предложена конструкция источника многозарядных ионов азота для циклотрона, разработанная на основе источника для разделения изотопов. Особенности предложенной конструкции являются: распределенная подача рабочего вещества и подогревный катод, позволяющий управлять стабилизацией. Наибольшими трудностями при наладке источника являются выбор оптимального потока газа и тока разрядки. Результаты эксперимента пока не вполне удовлетворительны (ток многозарядных ионов азота меньше 0,1 а).

Следующим был доклад А. А. Глазова и В. С. Катышева (Институт ядерных проблем АН СССР) «Использование ионных источников с холодным катодом в синхроциклотроне». Преимущества такого источника состоят в том, что он стабильнее и долговечнее по сравнению с обычным дуговым источником. В работе исследовано влияние напряжения разряда, расхода газа и материала катода на работу источника. Оказалось, что наиболее приемлемыми материалами для катодов являются Al, Be, Cu, Mg, Ag и другие металлы с большим коэффициентом поверхностной ионизации. Определено, что основным фактором, влияющим на работу источника, является вертикальная составляющая высокочастотного поля дуанта. Зависимость интенсивности ионного пучка от амплитуды ускоряющего напряжения в таком источнике более сильная, чем в обычных источниках. Описанный источник с успехом используется в течение 3 лет в синхроциклотроне АН СССР и дает ток около 0,2 ма.

Как известно, в настоящее время эффективность регистрации быстрых (~ 200 Мэв) нейтронов при обычных методах не превышает 1—2%. В докладе «Детектор быстрых нейтронов с большой эффективностью», представленном Ю. К. Акимовым, А. С. Кузнецовым и Г. А. Лексиним (Институт ядерных проблем), предлагается существенно повысить эффективность регистрации нейтронов путем применения сцинтиллятора с введенным плотным веществом — конвертором. Авторы применили детектор, состоящий из жидкого сцинтиллятора (раствора терфенила в толуоле), залитого в медный контейнер — прямоугольный ящик с размерами $7 \times 7 \times 11$ см³. Конвертор состоял из 10 медных пластин, помещенных на расстоянии 3 мм друг от друга. Эффективность такого детектора составляла 25—30%. Указывается, что увеличение плотности конвертора приводит к увеличению эффективности регистрации нейтронов. Опыты, проведенные с описанным детектором, показали, что во всем интервале энергий нейтронов, которыми могли располагать экспериментаторы (230—330 Мэв), эффективность регистрации была постоянна. Предложенный детектор может применяться в сопряжении с телескопом из сцинтилляционных счетчиков. Детектор работает с двумя или одним фотоумножителем.

В докладе И. Н. Усовой (Физический институт АН СССР) «Об измерении потока энергии тормозного излучения методом тонких конверторов» была описана специальная конструкция ионизационной камеры, позволяющая уменьшить экспериментальную ошибку при измерении потока энергии методом тонких конверторов, возникающую за счет вклада фотоэлектронов. Ошибка уменьшается с помощью поглощения фотоэлектронов алюминиевыми фольгами. Оказалось, что чувствительность предложенной камеры сильно зависит от ориентации в пучке фотонов. Это обстоятельство было использовано для быстрого определения центра пучка γ -излучения с точностью $\pm 0,5$ мм на синхротроне ФИАН на 265 Мэв.

В выступлении М. И. Подгорецкого (Электрофизическая лаборатория) «Об определении момента осуществления событий, регистрируемых при помощи фотоэмульсии» предложен метод определения момента времени события с помощью вращающихся пластинок (эмульсионной камеры). Автор предполагает, что при хорошо коллимированном пучке частиц разрешающая способность метода может быть доведена до 10^{-4} сек. Указывается на возможность создания эмульсионных «камер», управляемых электроникой. При работе с импульсными ускорителями предлагается использовать ступенчатые повороты фотопластинок. Утверждается, что описываемый метод можно эффективно использовать при исследовании редких событий, сопровождаемых большим фоном, и для ускорения решения задач, связанных с необходимостью просмотра вдоль следа. Недостатком способа является необходимость существенного увеличения времени экспозиции.

Доклад Г. М. Страховского (2-НИФИ МГУ) был посвящен описанию установки для исследования процессов с частицами высоких энергий при помощи фотопластинок, помещенных в сильное импульсное магнитное поле. Установка позволяет получать поля порядка 100 000—150 000 эрстед в импульсе длительностью 10 мксек. Импульс магнитного поля может быть синхронизован с моментом попадания частиц на мишень ускорителя с точностью 1 мксек.

А. К. Бурцев, И. С. Данилкин, А. Н. Лебедев

ТРЕТЬЯ СЕКЦИЯ

Заседания третьей секции, посвященные теоретическим работам по физике частиц высоких энергий, проходили в конференц-зале Института физических проблем АН СССР им. С. И. Вавилова. Кроме четырех официальных заседаний, теоретической секции был организован также ряд неофициальных заседаний, на которых были доложены работы, не включенные в повестку дня, но представляющие большой интерес для физиков, работающих в области частиц высоких энергий.

Первое заседание теоретической секции состоялось вечером 15 мая. Все доклады этого заседания, за исключением первого доклада А. Пайса (Принстон, США) «Вариационный метод в мезонной теории», который был посвящен проблеме исследования мезонного поля бесконечно тяжелого протяженного источника, относились к вопросу о дисперсионных соотношениях при рассеянии частиц. Дисперсионные соотношения, которым должны удовлетворять амплитуды рассеяния частиц, являются следствием самых общих физических принципов, таких, как принцип причинности, и могут быть получены без использования теории возмущений, что особенно важно при исследовании взаимодействия π -мезонов и нуклонов, где теория возмущений неприменима. Вывод и исследование дисперсионных соотношений для π -мезонов и нуклонов были даны в последнее время как иностранными теоретиками (Гольдбергер, Гелл-Манн, Тирринг, Салам, Оэме и др.), так и советскими.

В докладе Н. Н. Боголюбова, Б. В. Медведева и М. К. Поливанова «Условие причинности в применении к задачам рассеяния» дан вывод дисперсионных соотношений с помощью метода, который по существу является обобщением на многочастичные состояния известного метода Лемана—Челена. Для рассеяния бозонов на фермионах вычисления доводятся до получения окончательных дисперсионных соотношений. Рассмотрено рассеяние мезонов различного заряда как с перепорачиванием, так и без перепорачивания спина нуклона.

Доклад В. Я. Файнберга и Е. С. Фрадкина «Дисперсионное соотношение для ферми-частиц» содержал вывод дисперсионного соотношения для рассеяния как заряженных, так и нейтральных ферми-частиц. Это соотношение включает в себя амплитуды рассеяния как фермиона на фермионе, так и антифермиона на фермионе.

Е. С. Фрадкин в докладе «О дисперсионном соотношении для произвольного угла рассеяния мезонов нуклонами» сообщил о найденной им связи между мнимой и действительной частями амплитуды рассеяния под произвольным углом.

Доклад В. З. Бланка «Дисперсионные соотношения для рассеяния нуклонов нуклонами» был посвящен рассмотрению возможности получения дисперсионных соотношений для рассеяния протонов на протонах и нейтронов на протонах. Получены приближенные дисперсионные соотношения для рассеяния вперед.

Б. Л. Иоффе в докладе «Дисперсионные соотношения при фоторождении и рассеянии π -мезонов на нуклонах» предложил простой и наглядный вывод дисперсионных соотношений для образования π -мезонов фотонами на нуклонах. Аналогично получаются дисперсионные соотношения для рассеяния π -мезонов (в том числе и на углы, не равные нулю).

Доклад А. А. Логунова и Б. М. Степанова «Дисперсионное уравнение для фоторождения π -мезонов на нуклонах» содержал рассмотрение вопросов фоторождения с помощью метода Н. Н. Боголюбова. Этим методом получены точные дисперсионные соотношения. В предположении, что основной вклад в фоторождение вносят S - и P -волны, выведены приближенные уравнения. Полученные результаты показывают удовлетворительное согласие развиваемой теории с экспериментальными данными.

Оживленное обсуждение докладов показало, что имеется еще ряд нерешенных и спорных вопросов, относящихся к дисперсионным соотношениям, и, в частности, вопрос о том, сохраняются ли дисперсионные соотношения, если на малых расстояниях причинность нарушится.

Второе заседание теоретической секции открылось утром 18 мая докладом Р. Е. Пайерлса (Бирмингем, Англия) «Работы, ведущиеся в Бирмингеме в области теории явлений, происходящих при высоких энергиях». В этом докладе излагались результаты работ по использованию функциональных методов точного решения простых проблем и приближенного решения проблем, связанных с взаимодействиями π -мезонов. Приведены также некоторые результаты, относящиеся к решению уравнения Бете—Сальпетера для взаимодействия мезона и нуклона.

Л. П. Горьков и И. М. Халатников посвятили свой доклад «Квантовая электродинамика заряженных частиц со спином нуль» исследованию электродинамики скалярных частиц в кеммеровском формализме на основе схемы «размазанного» взаимодействия. Показано, что в пределе точечного взаимодействия физический заряд в этой теории обращается в нуль независимо от величины «затравочной» константы взаимодействия.

В докладе И. Т. Дятлова, В. В. Судакова и К. А. Тер-Мартirosяна «Рассеяние мезона мезоном при высоких энергиях» сообщалось о найденном ими уравнении для суммарного вклада всех графиков, соответствующих рассеянию

мезона на мезоне. Это уравнение решается точно, причем оказывается, что суммарный вклад всех графиков того же порядка, что и вклад от одного простейшего графика.

В. С. Барашенков в докладе «О возможности гамильтоновой формулировки теории с форм-фактором» рассмотрел трудности, возникающие при попытках применить метод Гамильтона к теории с нелокальным взаимодействием.

Третье заседание теоретической секции состоялось вечером 18 мая. Были заслушаны доклады М. Леви (Париж, Франция) «Современное состояние исследований теории ядерных сил» и «Проверка потенциала Леви при 150 Мэв», а также доклад В. Тирринга (Берн, Швейцария) «Следствия статической модели в мезонной теории».

Четвертое заседание теоретической секции состоялось утром 21 мая. Оно открылось докладом Д. Д. Иваненко и Н. Н. Колесникова «К теории гипер-ядер». Авторы получают энергию связи Λ -частицы в гипер-ядре, предполагая, что размеры гипер-ядер совпадают с размерами обычных ядер, рассматривая состояния Λ -частицы в прямоугольной яме и подбирая глубину этой ямы. Рассмотрение подсказывает наличие области насыщения энергии связи после массовых чисел порядка 20—30.

В докладе А. М. Бродского и Д. Д. Иваненко «К общей теории рассеяния мезонов» сообщалось о проведенном авторами исследовании уравнений симметричной псевдоскалярной мезонной теории.

Доклад А. А. Соколова и Б. К. Керимова «Теория рассеяния частиц неподвижным центром с учетом затухания» был посвящен решению задачи о рассеянии релятивистской бесспиновой частицы. Найдены выражения для фазовых сдвигов и определено условие, при котором в этой задаче существенно затухание.

Ю. В. Цехминстренко в докладе «Теория рассеяния и фоторождения заряженных и нейтральных мезонов в приближении сильной связи» рассмотрел теорию сильной связи с учетом отдачи нуклона.

Доклад И. М. Шмушкевича «Об изотопической инвариантности» посвящен соотношениям между вероятностями различных процессов, вытекающим из гипотезы об изотопической инвариантности. Предложен элементарный способ получения таких соотношений, основанный на рассмотрении изотопически неполяризованных пучков.

В докладе Л. Б. Окуня «Рассеяние K -мезонов с перезарядкой» в импульсном приближении была рассмотрена перезарядка K -мезонов на дейтерии для различных значений спина и четности K -мезонов.

Доклад Л. Б. Окуня и И. М. Шмушкевича «Захват K -мезонов в дейтерии и взаимодействие гиперонов с нуклонами» содержал проведенный в импульсном приближении расчет захвата K -мезона в дейтерии с образованием нуклона, гиперона и π -мезона.

И. Ю. Кобзарев и Л. Б. Окунь в докладе «К вопросу о спине Λ -частицы» показали, что из факта наблюдения так называемых Λ -ядер следует, что спин Λ -частицы не может быть значительно больше единицы.

В докладе «Соотношение между вероятностями различных процессов с участием тяжелых мезонов, гиперонов и антигиперонов» Л. Б. Окунь сообщил о выводе соотношений, вытекающих из гипотезы об изотопической инвариантности сильных взаимодействий «странных» частиц. Рассмотрены также распады этих частиц.

В. Б. Магалинский и Я. П. Терлецкий в докладе «К статистической теории кратного рождения мезонов» рассмотрели наиболее строгую (с учетом типа статистики частиц) схему подсчета статистических весов различных каналов реакции кратного рождения π -мезонов при столкновении двух нуклонов.

Доклад А. Н. Балдина и М. И. Широкова «К теории реакций с поляризованными частицами» был посвящен дальнейшему исследованию общей теории реакции с поляризованными частицами, развитой Симоном, Велтоном и др.

На неофициальных заседаниях и обсуждениях были заслушаны следующие доклады, посвященные теоретическим вопросам физики высоких энергий:

Л. Д. Ландау и И. Я. Померанчук посвятили свой первый доклад основным проблемам квантовой электродинамики и квантовой теории поля и второй — образованию π -мезонных пар γ -квантами больших энергий и излучению γ -квантов π -мезонами.

Е. Л. Фейнберг и А. И. Ахиезер доложили о теории взаимодействия быстрых дейтронов с ядрами.

М. Гелл-Манн сообщил о последних исследованиях в области «странных» частиц.

Л. Б. Окунь