

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

НОБЕЛЕВСКИЕ ЛЕКЦИИ ПО ФИЗИКЕ — 1990

539.171.017

**ГЛУБОКО-НЕУПРУГОЕ РАССЕЯНИЕ:
РАННИЕ ГОДЫ**

P.Э. Тэйлор

(Стэнфордский Центр линейного ускорителя, Стэнфорд, шт. Калифорния, США)

*(Нобелевская лекция. Стокгольм, 12 декабря 1990 г.
Текст Нобелевского комитета, датированный марта 1991 г.)*

Предисловие. Вскоре после того как была присуждена Нобелевская премия по физике 1990 г. Генри Кендалл, Джерри Фридман и я решили, что каждый из нас расскажет о части экспериментов по глубоко-неупругому рассеянию в своей нобелевской лекции. Мы разделили их в хронологическом порядке. Я расскажу о раннем периоде, описав ту часть работ, которая привела к созданию Стэнфордского линейного ускорителя, где проводились эксперименты, а затем кратко остановлюсь на конструкции аппаратуры, использованной в этих экспериментах, и переоснащении спектрометрического оборудования, использованного ранее в экспериментах по упругому рассеянию.

Во второй части профессор Кендалл опишет "неупругие" эксперименты и важное наблюдение масштабной инвариантности, которая была открыта при изучении первых электрон-протонных данных.

В последней части профессор Фридман коснется более поздних экспериментов в СЛАКе (Stanford Linear Accelerator Center), а также экспериментов, проводимых другими группами, использующими мюонные и нейтринные пучки. Он расскажет и о том, как эти эксперименты вместе с достижениями теории привели к широкому признанию кварковой модели как наилучшего описания структуры адрона.

Таким образом, данная статья является лишь отдельной частью и ее следует читать совместно с лекциями Г.У. Кендалла [1] и Дж. А. Фридмана [2].

Много людей внесло существенный вклад в эту работу. Наши благодарности некоторым из них приведены в [3].

* * *

Сорок лет эксперименты по рассеянию электрона оказывают существенное влияние на понимание основных структур материи. Прогресс в экспериментальной физике высоких энергий часто непосредственно связывается с улучшениями в технологии ускорителей и экспериментальной аппаратуры.

© The Nobel Foundation 1991

© Перевод на русский язык,

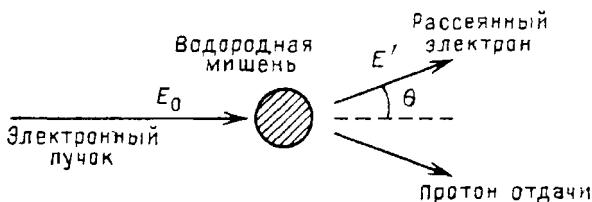
Академия наук СССР,

"Успехи физических наук" 1991

Эксперименты по рассеянию электронов, включая глубоко-неупругое рассеяние, отмеченное в этом году Королевской Шведской Академией наук, — хороший пример именно такого прогресса. Ставшие возможными в результате повышения энергии электронов интенсивности, а также улучшения качества детекторов эксперименты проливали все больше света на структуру ядер и нуклонов. Много дополнительной информации было получено в экспериментах, использующих вторичные пучки мюонов и нейтрино от протонных ускорителей.

Истоки экспериментов по рассеянию можно отследить еще в экспериментах с α -частицами [4], проводившихся в лаборатории Резерфорда и приведших к гипотезе о наличии у атома ядра [5]. Источники α -частиц, используемые в то время, одновременно с α -частицами излучали и электроны, но импульс электрона был слишком мал, чтобы преодолеть электронное облако атома, и электронное рассеяние было лишь досаждавшим фоном в тех экспериментах.

В последовавших затем известных экспериментах Франка и Герца [6] по взаимодействию электронов с атомами различных газов, рассеяние электронов было широко использовано для изучения электронных конфигураций атомов. Позже, когда на ускорителях стало возможным получать электроны высоких энергий, возрос интерес к ним как к инструменту для зондирования ядер. Впервые этот новый подход использовал Роуз в 1948 г. [7], следом за ним Шифф [8] исследовал возможности для экспериментирования на новом линейном ускорителе в Стэнфорде. Шифф подчеркнул важность $e-p$ -измерений, которые могут зондировать структуру протона, используя известное электромагнитное взаимодействие. Вскоре Розенблат [9] вычислил вероятность того, что электрон с энергией E_0 рассеивается на угол θ при упругом соударении с протоном — в соответствии со следующим идеальным экспериментом:



Энергия E' рассеянного электрона меньше начальной энергии E_0 , так как энергия передалась протону отдачи (массы M)

$$E' = \frac{E_0}{1 + (2E_0/M)\sin^2(\theta/2)}.$$

Квадрат переданного четырех-импульса Q^2 измеряет возможность прозондировать структуру протона. Принцип неопределенности ограничивает пространственную область процесса рассеяния до $\sim \hbar/Q$, так что Q^2 (а значит и E_0) должны быть большими, чтобы удалось различить малые структуры:

$$Q^2 = 4E_0 E' \sin^2 \frac{\theta}{2}.$$

Когда регистрируется только рассеянный электрон, упругое дифференциальное сечение рассеяния $d\sigma/d\Omega$, полученное Розенблатом, дается простым вы-



Ричард Э. Тэйлор

ражением, близким к оригинальной формуле Резерфорда:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{\alpha^2}{4E_0^2 \sin^4(\theta/2)} \cos^2 \frac{\theta}{2} \cdot \frac{E'}{E_0} \left(\frac{G_E^2 + \tau G_M^2}{1 + \tau} + 2\tau G_M^2 \tan^2 \frac{\theta}{2} \right),$$

где

$$\tau = Q^2/4M^2;$$

G_E и G_M — формфакторы, описывающие распределение заряда и магнитного момента соответственно. Они зависят только от переданного импульса Q^2 :

$$G_E = G_E(Q^2), \quad G_M = G_M(Q^2),$$

$$G_E(0) = 1, \quad G_M(0) = \mu_p,$$

где μ_p — магнитный момент протона (в единицах \hbar). Если области распределения заряда и магнитного момента малы по сравнению с \hbar/Q , то G_E и G_M не меняются при изменении Q^2 , но если характерный масштаб распределения сравним с \hbar/Q , тогда формфакторы убывают при возрастании Q^2 .

Хансен, Лайман и Скотт [10] первыми обнаружили (упругое) рассеяние электрона на ядре, используя внешний пучок с энергией 15,7 МэВ от 22 МэВ-ного бетатрона в Иллинойсе. Они исследовали рассеяние электронов на электронах и обнаружили два пика в спектре энергий рассеянных электронов (рис. 1).

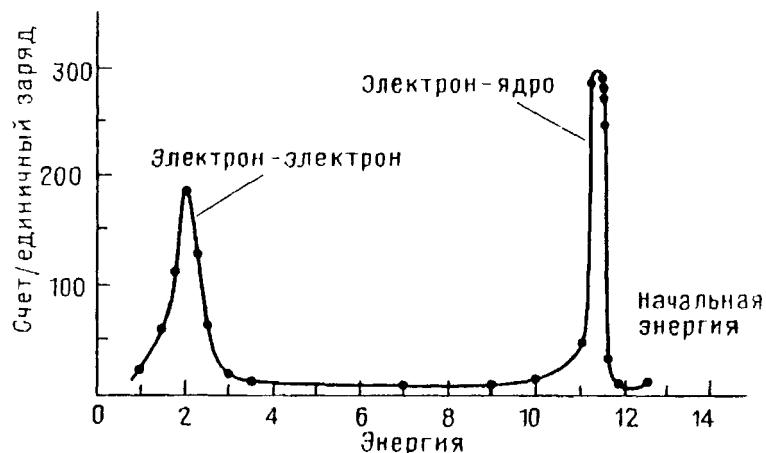


Рис 1 Первое наблюдение упругого электронного рассеяния на ядре, с электронами энергии 5,6 МэВ, рассеянными на D^0 на бетатроне в Иллинойсе

В 1953 г. в результате ввода в строй первой половины нового линейного ускорителя Mark III в Лаборатории физики высоких энергий (HEPL) в Стэнфорде был получен электронный пучок беспрецедентной интенсивности и энергии вплоть до 225 МэВ. В дополнение к этому достижению ускорительной техники Хоффшадтер с сотрудниками создали квази-перманентную установку для измерения рассеяния (рис. 2), основанную на магнитном спектре в 180°

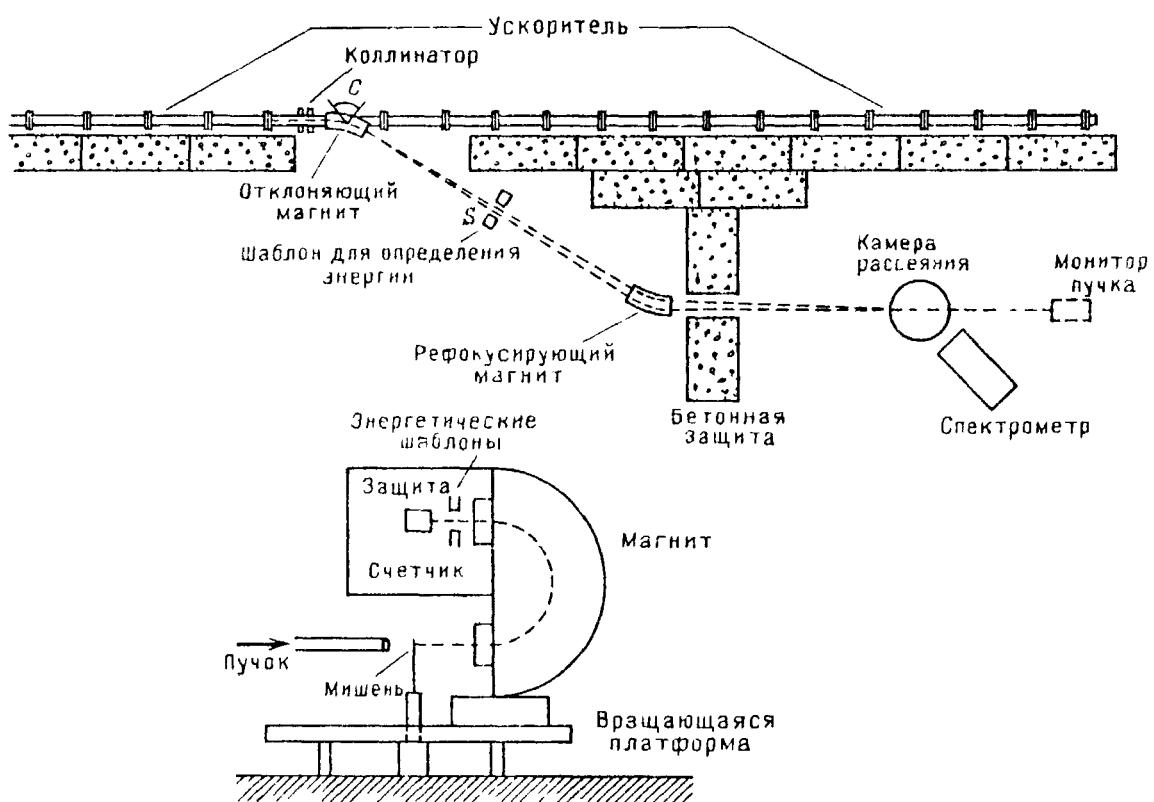


Рис. 2 Схема оборудования для изучения электронного рассеяния, расположенного в средней точке линейного ускорителя Mark III в Лаборатории физики высоких энергий в Стэнфорде. Радиус центральной орбиты спектрометра — 18 дюймов

(С радиусом отклонения = 18 дюймам). Этот спектрометр может вращаться вокруг мишени, допуская измерения различных углов рассеяния. Можно менять и магнитное поле, варьируя тем самым энергию детектируемых элект-

ронов, Эта аппаратура использовалась с очень небольшими модификациями для целой серии экспериментов.

Пользуясь этими приборами, легко наблюдать рассеяние на ядре. При малых углах рассеяния наиболее важное особенностью энергетического спектра является упругий пик рассеянных электронов, хотя очевидно и наличие рассеяния с возбуждением внутренних состояний ядра [11] (рис. 3). Из по-

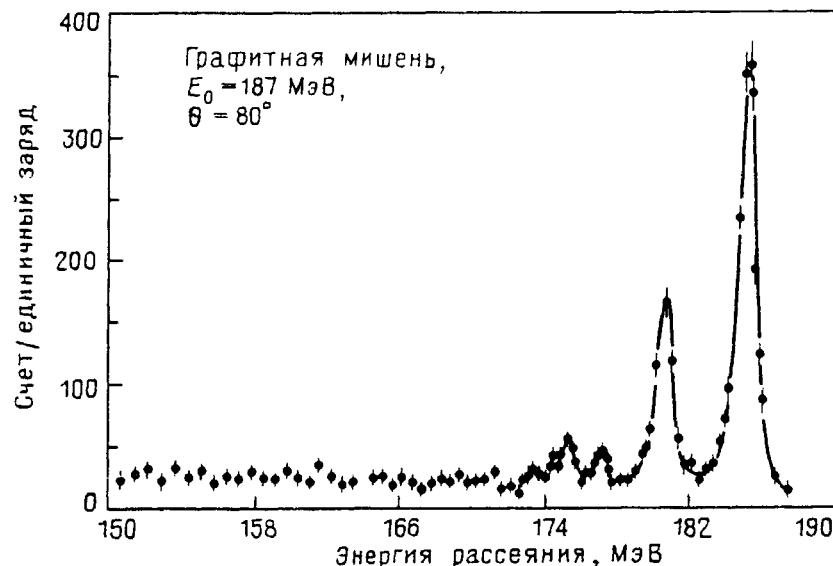


Рис. 3. Спектр энергии электронов с 187 МэВ, рассеянных на 80° на графитовой мишени при использовании аппарата на рис. 2

ведения сечений рассеяния при различных энергиях пучка и различных углах рассеяния Хоффштадтер с сотрудниками измерили размер и другие простые параметры, характеризующие форму многих нуклидов.

В 1953 г. на этой установке были получены первые свидетельства упругого рассеяния на протоне, используя полиэтиленовую мишень [12], как показано на рис. 4. Затем была сконструирована водородная газообразная мишень, чтобы уменьшить фон под упругим пиком, и в 1955 г. Хоффштадтер и Мак-Аллистер [13] представили данные, демонстрирующие, что формфакторы в сечении рассеяния Розенблата меньше единицы (рис. 5) — и уменьшаются с возрастанием переданного импульса. Они оценили размер протона равным $(0,7 + 0,2) \cdot 10^{-13}$ см.

В 1955 г. появились новые возможности в HEPL. Энергия в экспериментах по рассеянию была удвоена. Пучки с полной длины линейного ускорителя попадали в новую установку с энергией 550 МэВ (рис. 6). Новое спектрометрическое оборудование было установлено группой Хоффштадтера, оно включало магнит с удвоенным радиусом отклонения пучка (36 дюймов) у спектрометра, стоящего на середине пути. Была создана и установлена жидкостная водородная мишень. Все это явилось существенным улучшением условий эксперимента (рис. 7), и теперь основные усилия были сосредоточены на изучении рассеяния на водороде [14]. График измеренных формфакторов показан на рис. 8, где приведены данные для различных значений Q^2 , сравниваемые с моделью протона "размером" $0,8 \times 10^{-13}$ см.

Эти эксперименты ознаменовали начало изучения внутренней структуры протона. В частности, они показали, что протон не точечный, а протяженный объект. Это фундаментальное открытие было быстро принято физической общественностью. Считалось общепринятым, что существует связь между пространственной протяженностью и внутренней структурой, хотя я не думаю, что кто-нибудь всерьез сомневался в "элементарности" протона в то время. Достижимые энергии электрона были еще недостаточны для исследования неупругого рассеяния на протоне, и только "упругие" эксперименты постав-

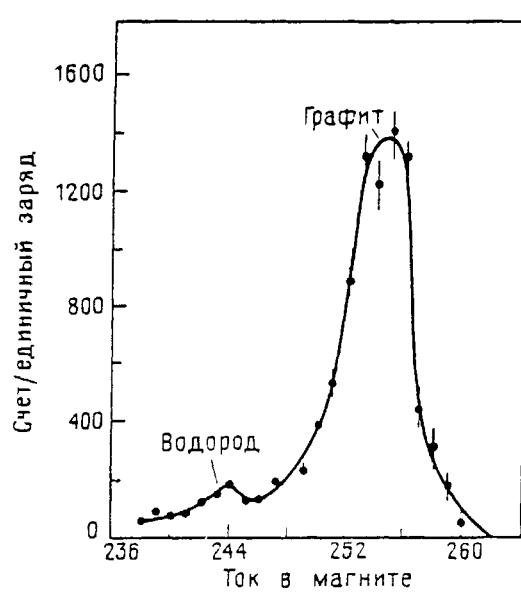


Рис. 4. Спектр электронов, рассеянных на CH_2 -мишени, показывающий наличие электрон-протонного рассеяния (около 1954 г.)

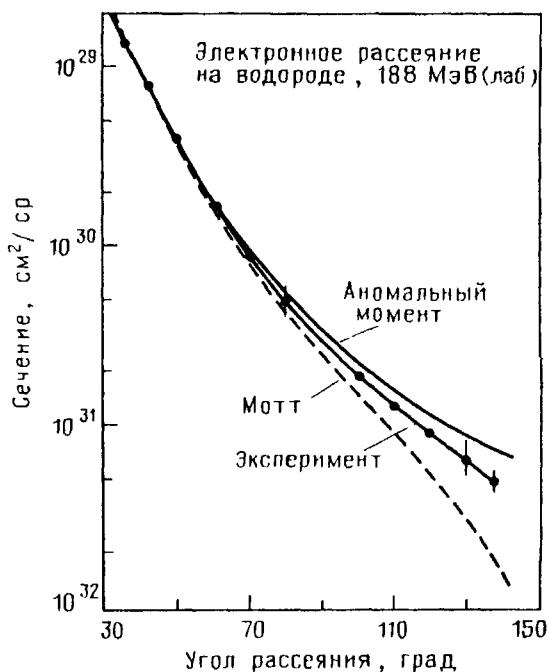


Рис. 5. Сечение упругого электронного рассеяния в сравнении с формулой рассеяния Мотта (где электроны рассеиваются на частице с единичным зарядом и без магнитного момента) и сечением рассеяния Розенблата на точечном протоне с аномальным магнитным моментом. Экспериментальные данные попадают между кривыми, показывая наличие магнитного рассеяния, но в то же время демонстрируя, что эффект магнитного рассеяния меньше, чем ожидался бы на точечном протоне

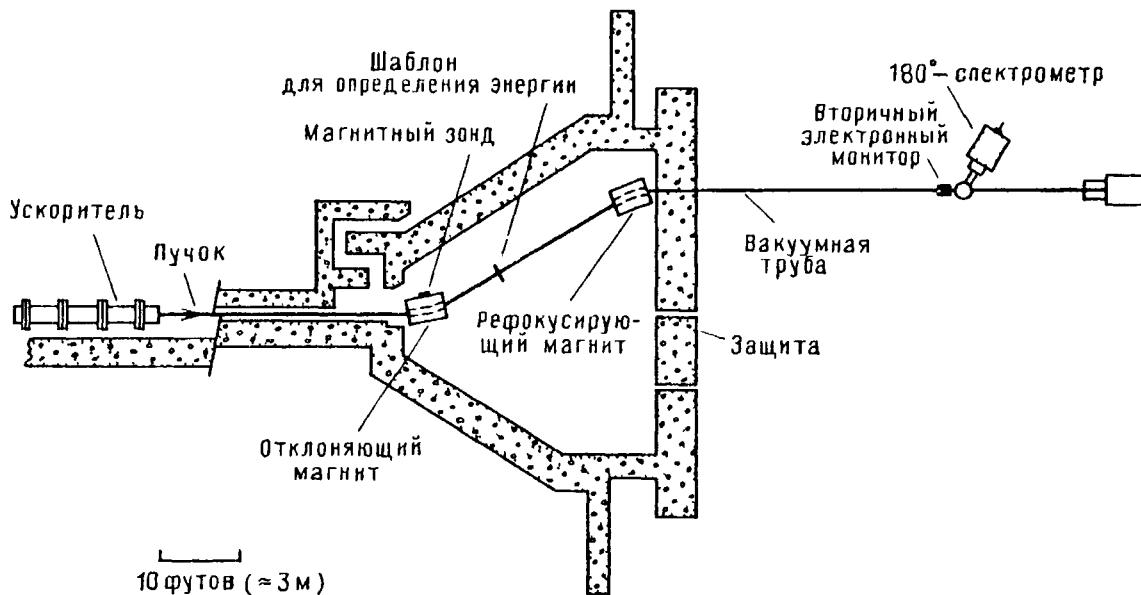


Рис. 6. Выход пучка и 36-дюймовый спектрометр на конечной станции в Лаборатории физики высоких энергий. Это оборудование использовалось для экспериментов по электронному рассеянию более десяти лет Р. Хоффштадтером с сотрудниками (в 1960 г был добавлен 72-дюймовый спектрометр для анализа рассеянных электронов с энергией 1000 МэВ)

ляли материал о структуре протона в течение нескольких последующих лет. Новая установка использовалась также для изучения рассеяния на дей-

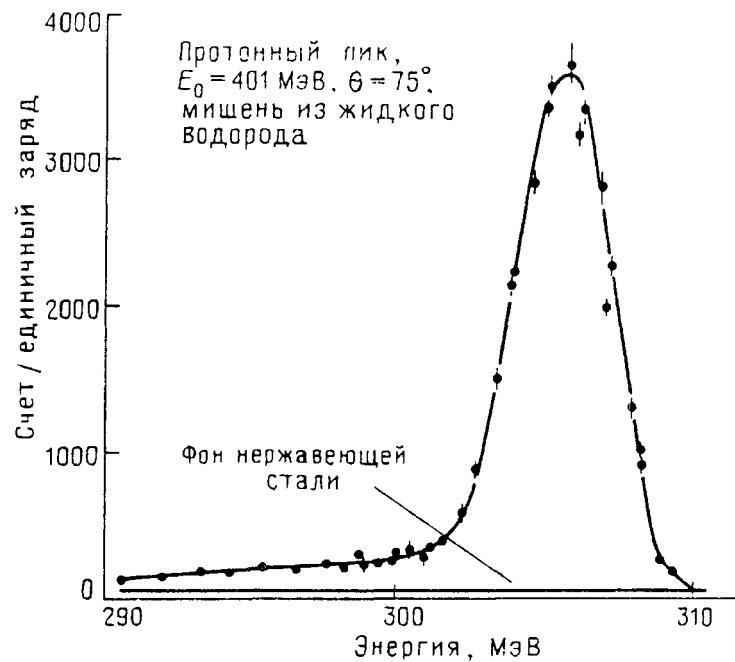


Рис. 7. Спектр энергий электрон-протонного рассеяния, полученный с помощью техники рис. 6 и жидко-водородной мишени. Контеинер для жидкого водорода из нержавеющей стали дает очень малый фон. Радиационный хвост упругого пика ясно виден на низко-энергетической стороне пика

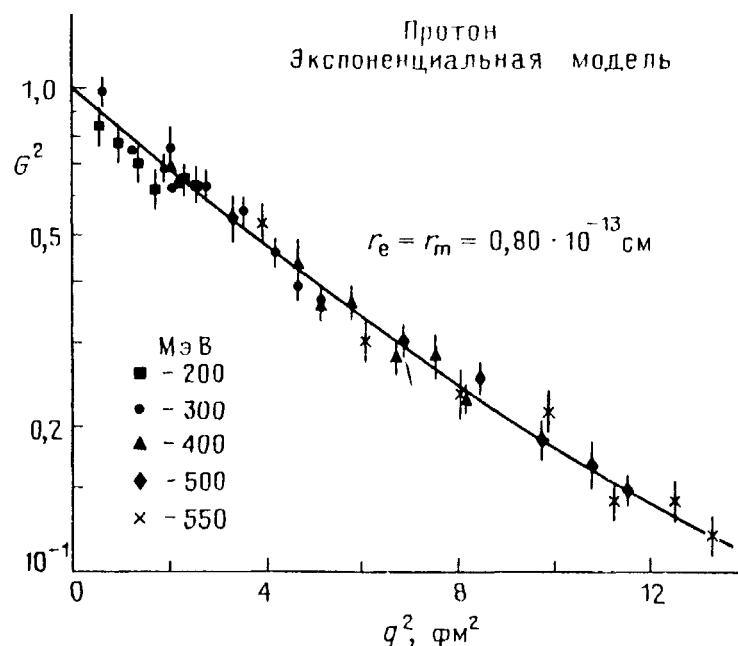


Рис. 8. Протонный формфактор для различных энергий и переданных импульсов, измеренный в ранних экспериментах, использующих 36-дюймовый спектрометр в НЕПЛ. Значение F^2 было вычислено, пользуясь оригинальной формулой Розенблата, определяющей формфакторы $F_1(Q^2)$ и $F_2(Q^2)$. F_1 отвечает формфактору дираковского протона (со спином 1/2), а F_2 – формфактору аномального магнитного момента. При анализе данных предполагалось $F_1 = F_2$. При больших значениях Q^2 очевидно, что $F_1 \neq F_2$, но для протона $G_E = G_M/\mu_p$, и тем самым использование формфакторов G остается универсальным. ($G_M = F_1 + KF_2$, $G_B \approx F_1$ для малых Q^2 .) Показанная на рисунке кривая основана на модели, предполагающей экспоненциальное падение распределения заряда и магнитного момента при значении как одного, так и другого радиуса в $0,8 \cdot 10^{-13}$ см (1 фм = 10^{-13} см, $1 \text{ фм}^{-2} = 0,0388 \text{ ГэВ}^2$)

терии, чтобы извлечь информацию о нейтроне. Формфактор упругого рассеяния на слабосвязанных ядрахдейтерия уменьшался очень быстро с ростом переданного импульса, так что нейтрон исследовался с помощью квазиупру-

гого рассеяния, т.е. рассеяния либо на протоне, либо на нейтроне, которые вместе образовывали ядро дейтерия. Квазиупругое рассеяние достигает максимума вблизи пика электрон-протонного рассеяния, так как рассеяние происходит на одиночном нуклоне, и энергия отдачи в большой степени определяется массой нуклона (рис. 9). Заметны также эффекты движения нуклонов

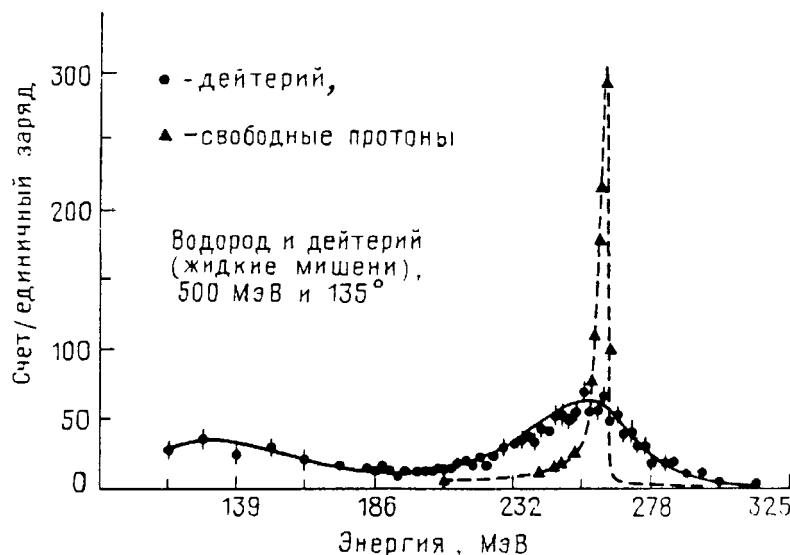


Рис. 9. Сравнивается рассеяние электронов на протоне и квазиупругое рассеяние на отдельных нуклонах в ядре дейтерия. Упругое рассеяние на ядре дейтерия было бы заметно при энергиях больших, чем максимальная из приведенных на графике, и оказалось бы пренебрежимо малым по сравнению с сечениями, приведенными на рисунке. Квазиупругое рассеяние на протоне или нейтроне в дейтерии существенно в более широком диапазоне энергий, чем рассеяние на свободном протоне, из-за распределения импульсов нуклонов в ядре дейтерия

в дейтронах, и одним из результатов опытов явилось измерение импульсного распределения нуклона в ядре дейтерия.

Большой успех программы рассеяния в НЕПЛ привел к трем последствиям: эксперименты по изучению рассеяния стали более популярными на существующих электронных синхротронах, кроме того были запланированы новые синхротроны более высоких энергий, и, наконец, начались обсуждения планов создания существенно большего линейного ускорителя — длиной в две мили и питаемого тысячей клистронов.

После годичных дискуссий и расчетов инженеры и физики Лаборатории физики высоких энергий подготовили первые предложения по двухмилльному линейному ускорителю в Стэнфорде [15]. Э.Л. Гинзтон, В.К.Х. Пановский и Р.Б. Нил возглавили эти усилия, а Пановский и Нил стали во главе строительства того, что стало называться Стэнфордским линейным ускорительным центром (СЛАКом) — безусловно одним из величайших инженерных достижений ранних шестидесятых годов [16]. Новая машина была ярким продолжением существующей техники. Проект был консервативным в том смысле, что работающие прототипы всех компонент машины были "на руках", но он смотрелся вызывающе из-за резкого возрастания масштабов.

Исследование структуры протона и нейтрона было главной задачей новой машины. Энергия ускорителя в 20 ГэВ представляла возможность проведения как "упругих", так и "неупругих" экспериментов в новой области значений Q^2 , и для нашей группы открылась замечательная возможность проводить исследование структуры нуклона.

В то время двухмилльный линейный ускоритель был самым большим и

наиболее дорогим проектом в физике высоких энергий. До этого доминировали протонные ускорители, а электронных машин было немного, и были они относительно небольшими. Электроны становились все более конкурентоспособными. Одновременно со Стэнфордским ускорителем были спроектированы и построены еще два больших электронных синхротрона: Кембриджский электронный ускоритель (CEA) и Немецкий электронный синхротрон (DESY) в Гамбурге с максимальной энергией в 5 и 6 ГэВ соответственно. Создание СЛАКа в шестидесятые годы открыло соревнование между электронной физикой и самыми большими протонными ускорителями того времени: Брукхевенским AGS и ЦЕРНовским PS, построенными в конце пятидесятых годов. Новые электронные ускорители дали физикам много новых возможностей.

Новый линейный ускоритель состоял из ускоряющей трубы длиной в две мили, проложенной в туннеле на глубине 25 футов. На начальном участке ускорение производилось с помощью 240 клистронов, мощностью по 20 – 30 МВт каждый, которые находились на первом этаже здания. Ускоритель был построен на холмах около Стэнфорда, на земле, принадлежащей университету, и, возможно, оказался последним из ускорителей в США, построенным в университетах (рис. 10 и 11).

Конструктивные параметры новой машины – энергия 20 ГэВ и средний ток около 100 мА – предоставили экспериментаторам много новых проблем. Два экспериментальных зала (названные конечными станциями на рис. 12) были задуманы с самого начала – первый, хорошо защищенный зал, где вторичные пучки адронов и мюонов могли регистрироваться различными детекторами, и второй – для экспериментов с электронными и протонными пучками. "Переключатель" пучков связывал каждый зал с ускорителем с помощью магнитной системы проводки пучка, которая устанавливалась разброс импульсов в каждом пучке меньшим 0,2%, была ахроматичной и изохронной (для того чтобы сохранить РЧ временную структуру пучка). Транспортные системы питались системой пульсирующих магнитов, так что любой заданный импульс ускорителя мог быть направлен в любой из двух экспериментальных залов. Неизбежные потери пучка в этой системе приводили к высоким уровням радиоактивности, а также вызвали тепловые проблемы при ожидаемых величинах токов. Разработка этой "переключающей" области была окончена к 1963 г. вместе с проектом защиты зданий конечной станции (см. [13]).

Экспериментальный зал, который предназначался для электронного рассеяния и экспериментов по фоторождению, использующий первичный пучок, должен был отвечать экспериментальным требованиям нескольких групп экспериментаторов. Задача заключалась в создании установки, позволявшей быстрый и эффективный сбор информации в новой, ставшей доступной, области значения энергии. Стоимость работы на новом ускорителе (не говоря уже об амортизации объекта стоимостью более 100 миллионов долларов) измерялась тысячами долларов в день, так что было важно сбалансировать расходы так, чтобы эксперименты давали хорошую отдачу – так спектрометр с малым углом был дешевле, но мог потребовать больше времени для проведения нужного измерения. Основная часть стоимости набиралась за счет больших магнитных спектрометров и защитных установок, так что некоторые менее дорогостоящие части могли быть развиты до более совершенного уровня, чем это было возможно в малых лабораториях, давая при этом лишь небольшой вклад в общую стоимость.

Хотя прошло уже пять лет с момента первого проекта СЛАКа, основные физические цели остались прежними. Самым используемым методом и сейчас



Рис. 10. Срез двухмильного Станфордского линейного ускорителя, демонстрирующий волновод ускорителя, расположенный в 25 футах под землей, и клистронную галерею на поверхности. Каждый клистрон питает 40 футов волновода ускорителя. Помещение ускорителя соединено с клистронной галереей

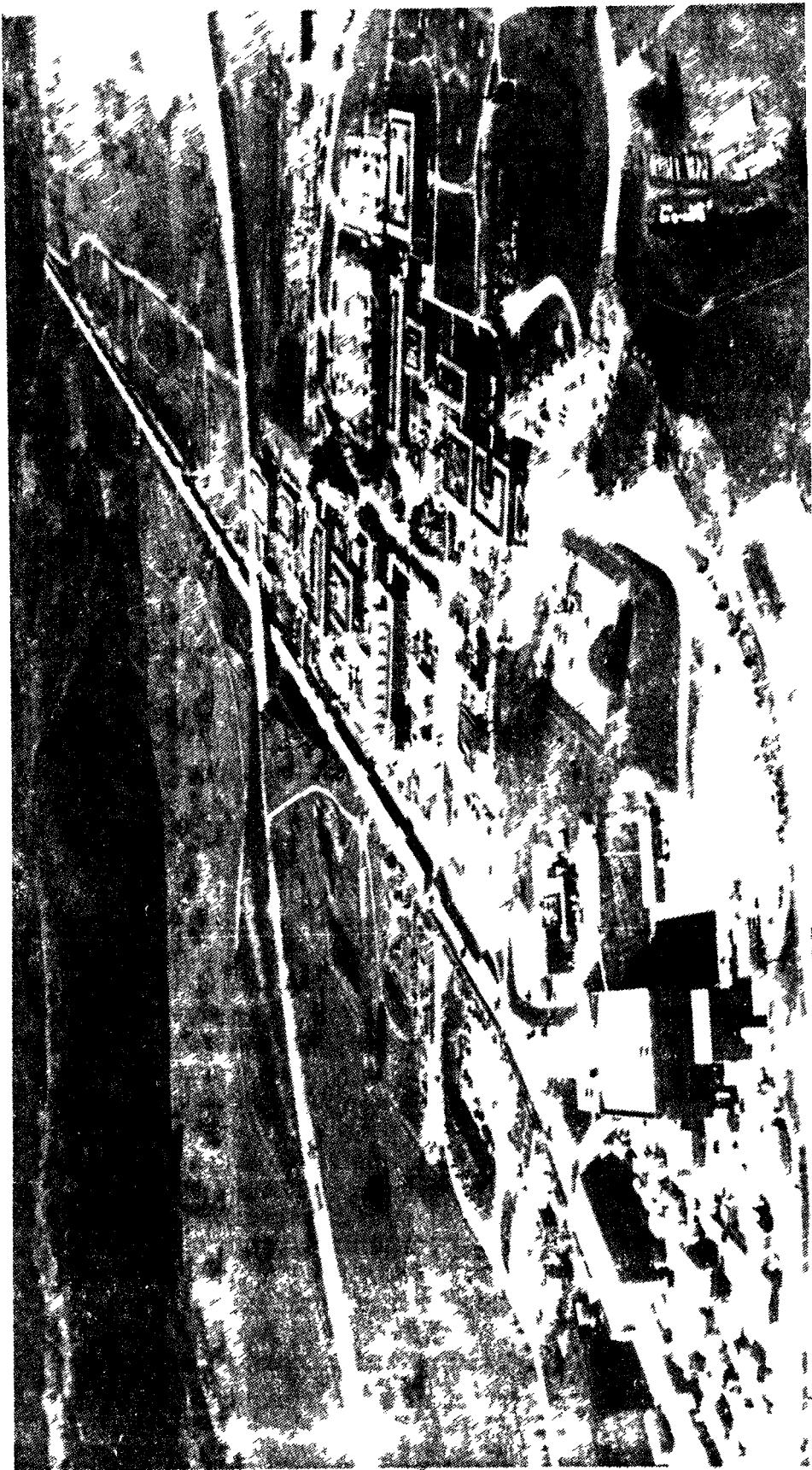


Рис. 11 Вид СЛАКа с воздуха. Слева расположены экспериментальные отсеки, обеспечивающие ускорение электронным пучком. Справа — территория кампуса (помещения для рабочих кабинетов, лаборатории и магазины). Эксперименты по рассеянию проводятся в большом защищенным здании сразу слева от центра в нижней части фотографии. Ускоритель пересекается магистралью, которая строилась в момент фотографии

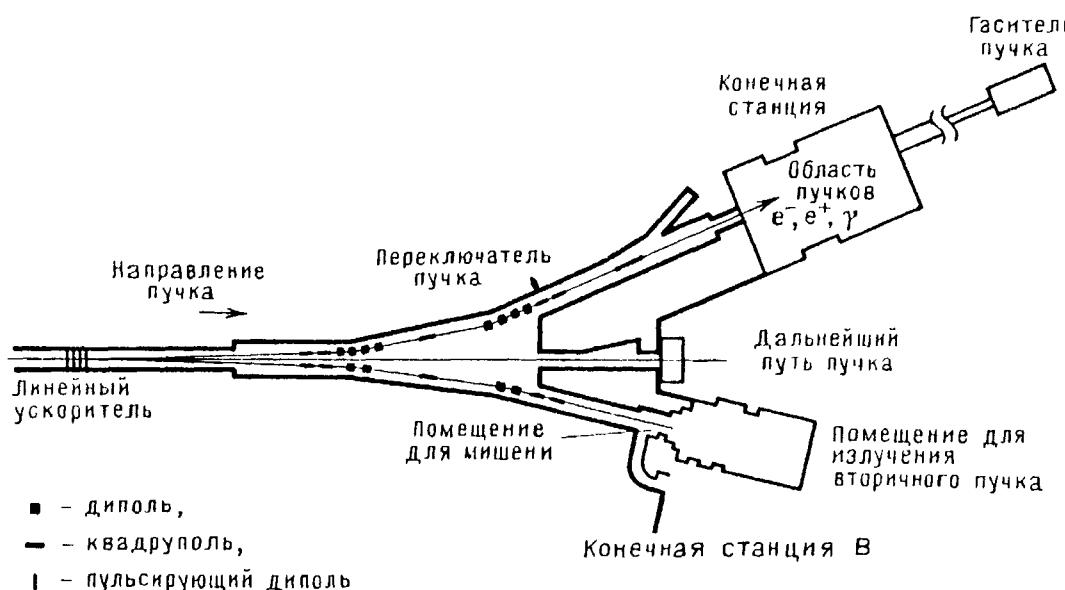


Рис. 12. Расположение экспериментальных залов СЛАКа и управления пучком

является детектирование одной частицы из конкретного процесса взаимодействия. (Рабочий цикл (т.е. рабочее время) линейного ускорителя был мал — клистроны давали импульсы приблизительно в две микросекунды с частотой около 360 раз в секунду. Это приводило к высоким интенсивностям в течение коротких импульсов и затрудняло проведение экспериментов по столкновениям.) Устройство установки требовало приборов, которые определяли бы энергию и угол частиц, летящих от мишени, расположенной внутри электронного импульса. Магнитные спектрометры оставались наиболее эффективным детектором, однако, при этих энергиях они становились громоздкими и сложными устройствами.

Разрешение по энергии ΔE должно было быть гораздо лучше, чем $m_\pi/E_{\max} \approx 0,7\%$, чтобы разделить реакции, отличающиеся числом испущенных пионов. Поскольку энергия частиц, участвующих в данной реакции, является очень крутой функцией угла, необходимо было измерить угол рассеяния с высокой точностью ($\sim 0,15^\circ$). Использовавшиеся спектрометры имели угловой раствор много больший, чем требуемое разрешение по углу. Оптика и детекторы должны быть подобраны таким образом, чтобы наряду с энергией определялся и правильный угол рассеяния.

Было много дискуссий по поводу наиболее эффективного устройства экспериментальной установки. Сохранившиеся записи неполны, но и в них остались следы искренних и серьезных обсуждений. Было предложение, заключающееся в том, что один спектрометр на 2 ГэВ может обслуживать большую часть электронных экспериментов, представляющих интерес для физиков. В то же время другие предлагали комплексную систему с высокоэнергетическим спектром для частиц, летящих вперед, соединенную с огромным соленоидальным детектором для рассеянных назад частиц.

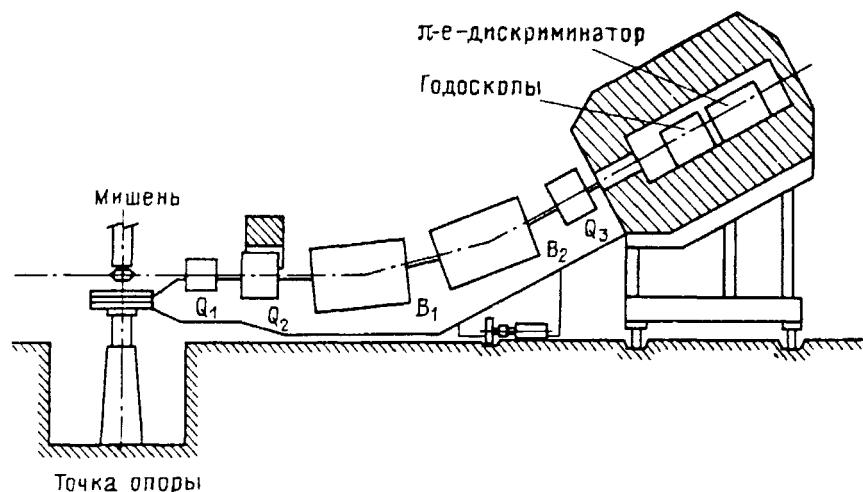
К весне 1964 г. я оказался ответственным за разработку и создание установки на конечной станции А (так назывался больший из двух экспериментальных залов). Это было не слишком завидное положение, так как не существовало согласия в том, что должно быть сделано, и большинство людей были опытнее меня.

Группа, заинтересованная в экспериментах по электронному рассеянию, была уверена, что спектрометр, рассчитанный на максимальную энергию в 8 — 10 ГэВ с телесным углом ≥ 1 мср, даст возможность провести широкую программу измерений параметров рассеяния. Измерения угла рассеяния и им-

пульса могут быть разделены в месте нахождения детекторов перемещением в вертикальную плоскость. Предварительные разработки этой схемы уже были проведены и успели повлиять на конструкцию конечной станции, которая в тот момент находилась в стадии конструкторской разработки. Спектрометр был рассчитан на вертикальное отклонение порядка 30° , фокусировка обеспечивалась разделенными квадрупольями, расположенными до и после отклонения (рис. 13, подъем). Разработка магнитных свойств спектрометра требовала большого количества вычислений, но прошла гладко. После того как были учтены всевозможные практические и финансовые ограничения, максимальный импульс был установлен в 8 ГэВ, а телесный угол в 1,0 мср.

Для того чтобы "покрыть" весь диапазон углов рассеяния, мы постарались поставить спектрометр так, чтобы он мог вращаться вокруг мишени, находясь в отдельном помещении (см. рис. 13, план). Нам нужен был каркас, который мог бы скреплять тысячи тонн магнитов и счетчики и сохранять их взаимное расположение во время движения вокруг конечной станции.

УСТРОЙСТВО СПЕКТРОМЕТРА НА 8 ГэВ



ПЛАН

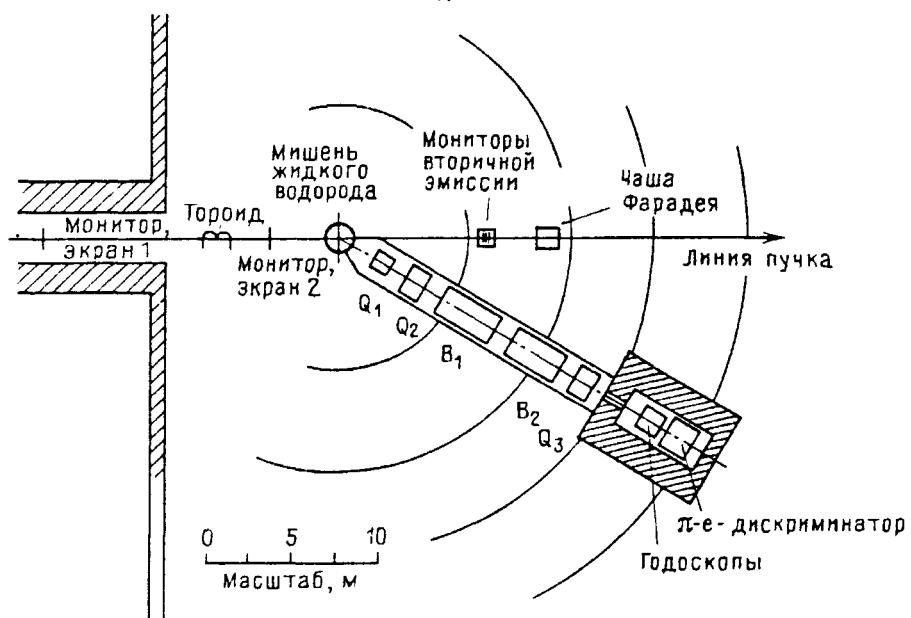


Рис. 13. Схема спектрометра 8 ГэВ. Пять магнитов (два отклоняющих, B , три квадруполя, Q) направляют рассеянные частицы в детекторы, которые установлены в хорошо защищенном месте. Вся система установлена на рельсах и может вращаться вокруг мишени для измерения при разных углах рассеяния регистрируемых электронов

Примерно в это время мы начали собирать команду инженеров и чертежников, для того чтобы перевести наши требования в работающую технику. Эта группа начала детальную разработку спектрометра на 8 ГэВ, параллельно же продолжались дебаты по поводу остального комплекса.

К середине 1964 г. необходимость спектрометра, поставленного спереди, который должен был анализировать частицы с максимальным импульсом 20 ГэВ, больше не обсуждалась. Успешные эксперименты по фоторождению были проведены при энергиях до 5 ГэВ на электронном синхротроне СЕА, а повышение энергии в этих экспериментах было основным стимулом программы СЛАКа. Также предлагались эксперименты по рассеянию на малые углы, необходимые для измерения G_E — электрического формфактора фотона.

Повышение энергии в спектрометре с 8 до 20 ГэВ (с сохранением разрешения 0,1%) потребовало бы больших вертикальных перестановок. Были предприняты некоторые попытки сконструировать шахту в конечном зале, чтобы работать там с установкой, допускающей отклонение частиц вниз, но это было малопривлекательным с механической точки зрения. Остроумное решение было предложено Пановским и Ковардом: горизонтальное отклонение может быть использовано при сохранении независимых измерений импульса и угла в фокусе. Это предложение показалось мне слишком сложным, и я сопротивлялся принятию их варианта. Окончательно меня убедили вычисления К. Брауна по aberrации, которая оказалась слишком велика. Вскоре Браун и Ритчер предложили относительно простой центральный спектрометр, допускающий вертикальное отклонение, но с высотой в разумных пределах. Относительно простая система секступолей помогла откорректировать aberrацию в системе. Эта схема была принята всеми, и окончательная расстановка спектрометров на конечной станции была вскоре проведена (рис. 14).

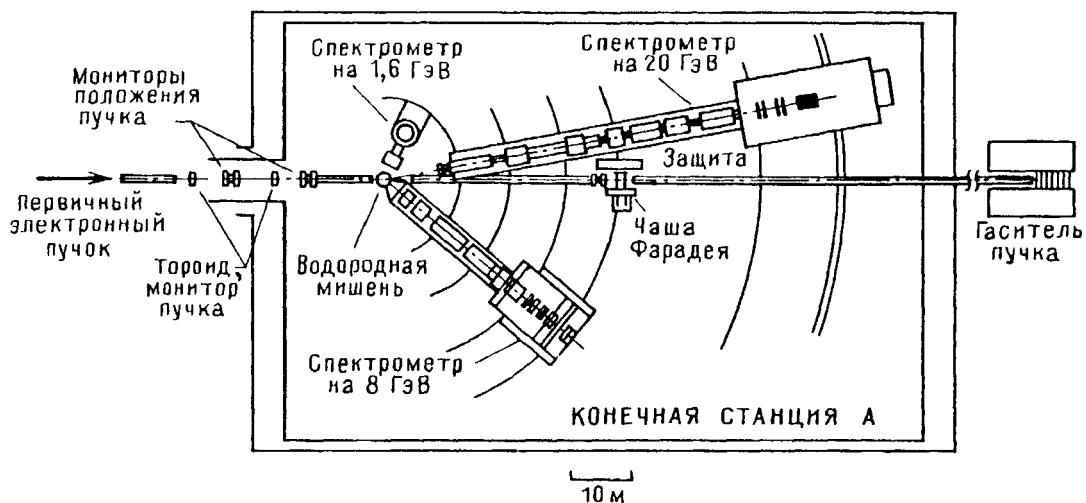


Рис. 14. Планировка спектрометров на конечной станции А. Все фи спектрометра могут вращаться вокруг точки опоры. Спектрометр 20 ГэВ может действовать в интервале от 15 до 25°, спектрометр на 8 ГэВ — от 12 до 90°. Область углов спектрометра 16 ГэВ ~ 50° — 60°

Две большие группы в СЛАКе не были в то время заинтересованы в измерениях в задней полусфере, Д. Ритсон с Физического факультета Стэнфордского университета увидел возможность продолжить программу HEPL по измерению фоторождения при больших энергиях и предложил построить спектрометр на 1,5 ГэВ и большие углы ~ 90°. Предложение было принято в лаборатории после небольшой задержки, и такой спектрометр был добавлен к установке. С разработки магнитной части двух больших спектрометров на-

чалось их конструирование всерьез. Приборы создавались объединенными усилиями групп СЛАК, МИТ (МТИ) и СИТ, группы СЛАК, занимающейся измерениями фоторождения под руководством Б. Рихтера, и Стэнфордской группы, заинтересованной в спектрометре 1,6 ГэВ и руководимой Д. Ритсоном. Оборудование состояло из нескольких частей.

Спектрометр на 8 ГэВ состоял из пяти магнитных элементов — трех квадрополей и двух отклоняющих магнитов (рис. 15). Он обладал фокусировкой

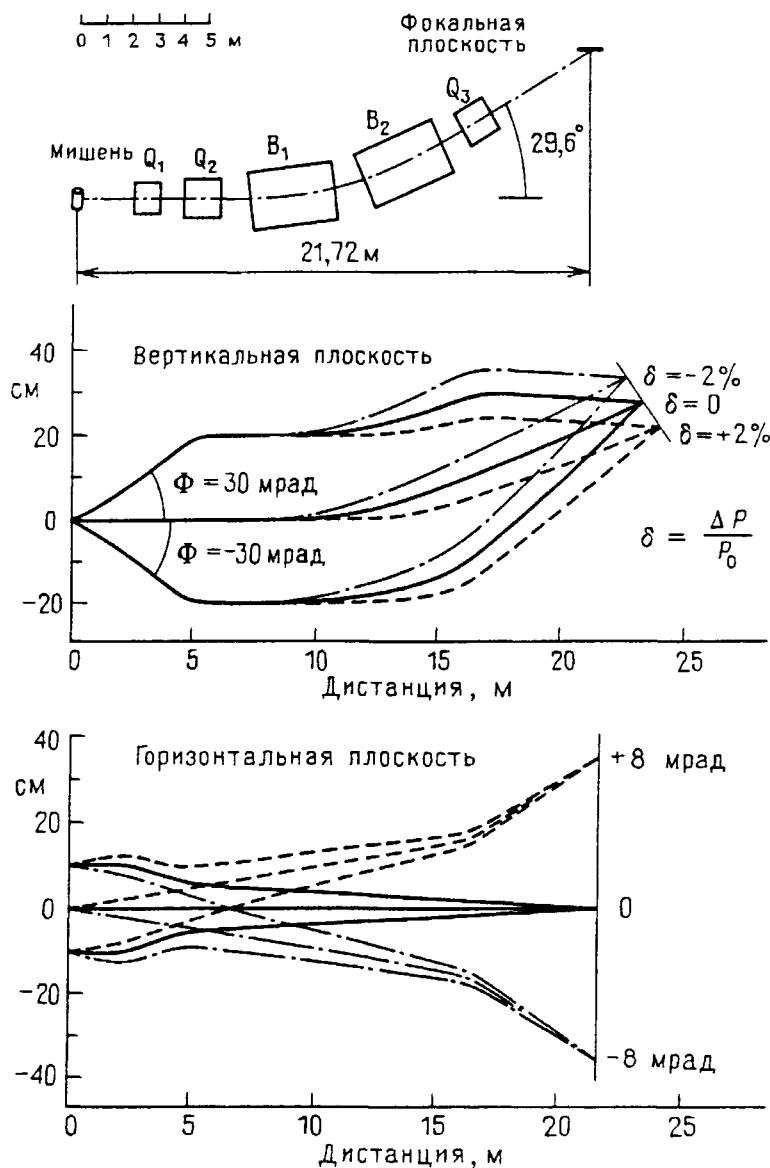


Рис. 15. Магниты и оптика спектрометра на 8 ГэВ. Расположение магнитов показано в верхней части рисунка. В вертикальной плоскости фокусировка устроена "точка в точку", и импульс распределен вдоль фокальной плоскости. В горизонтальной плоскости фокусировка устроена "параллель в точку", углы распределены вдоль фокальной плоскости

"точка в точку" в вертикальной плоскости (плоскости, где наблюдался разброс импульса). Детекторный годоскоп в p -фокальной плоскости определял дифференциальный импульс Δp . В горизонтальной плоскости (плоскости рассеяния) спектрометр давал фокусировку "параллель — в точку", позволяющую использовать протяженную мишень. Второй годоскоп в θ -фокальной плоскости определял угол рассеяния. p - и θ -фокальные плоскости были расположены близко друг к другу, но не совпадали.

В спектрометре на 20 ГэВ были использованы одиннадцать магнитных элементов — четыре отклоняющих магнита, четыре квадруполя и три секступоля — для того, чтобы условия в p - и θ -фокальных плоскостях были близкими (рис. 16). Кроме того, он обладал дополнительной p -фокусировкой в

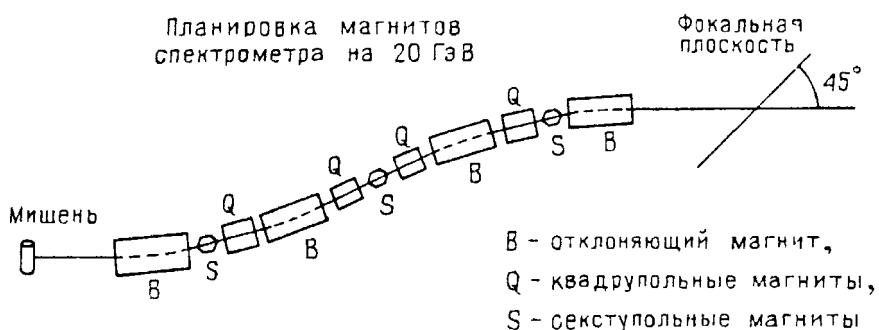


Рис. 16. Магнитная система спектрометра 20 ГэВ. Фокусировка импульса производится центральным секступолем, два последних отклоняющих магнита добавлены для корректировки дисперсии, даже в том случае, если направление отклонения противоположно задаваемому первыми двумя магнитами. Три секступоля используются для подгонки углов фокальной плоскости до подходящего значения

середине магнитной системы. В этой точке мог быть использован шаблон для контроля $\Delta p/p$ -характеристики установки. Система счетчиков, подобная той, что находилась в спектрометре на 8 ГэВ, была установлена в защищенной камере.

Спектрометр на 1,6 ГэВ обладал лишь одним магнитным элементом (рис. 17). Фокусировка достигалась вращением полюсного наконечника от

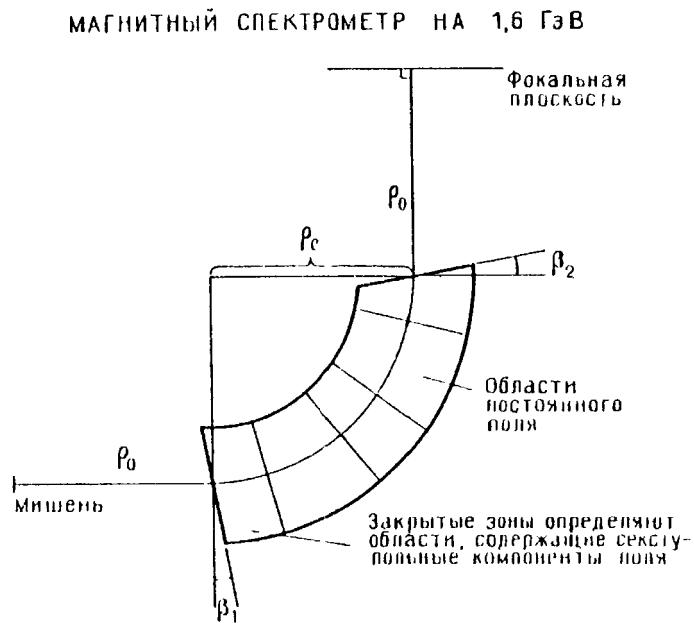


Рис. 17. Схема спектрометра 16 ГэВ. Фокусировка достигается вращением полюсного наконечника (углы β_1 и β_2). Встроенные секступоли подгоняют положение фокальной плоскости, обеспечивая правильный угол центрального луча

нормальной к центральной орбите. Для контроля aberrаций были встроены несколько секступолов.

Применялись жидколоводородные мишени конденсационного типа. Исполь-

зевалась отдельная камера для мишени, которая находилась в контакте с резервуаром жидкого водорода при атмосферном давлении. Газообразный водород (или дейтерий), попадавший в камеру для мишени при давлении, большем, чем атмосферное, начинал сразу конденсироваться.

Первая построенная мишень была очень простой по замыслу. Для передачи тепла, выделяемого при прохождении пучка через резервуар, использовалась конвекция в камере мишени. Оказалось, что этот механизм не эффективен при высоких интенсивностях пучка, которые вызывали флюктуации плотности жидкости. Позже мы стали использовать мишени, где обеспечивалась усиленная циркуляция для поддержания более тесного теплового контакта с резервуаром. Схемы обеих мишеней приведены на рис. 18. (Даже вариант с усиленной циркуляцией вызывал некоторые проблемы при интенсивных пучках.)

Точность измерения сечений рассеяния непосредственно связана с точностью измерения интенсивности падающего пучка. В первых экспериментах использовалась чаша Фарадея (рис. 19,*a*), в которой останавливали электроны с энергией 20 ГэВ, и измерялся полный заряд на хорошем интеграторе тока. Чаша Фарадея не могла быть использована при полной интенсивности пучка линейного ускорителя из-за тепловых ограничений, но она использовалась для калибровки других мониторов при низких интенсивностях.

Новый тороидальный монитор был специально создан для экспериментов на конечной станции А. Принцип его работы приведен на рис. 19,*b*. Пучок использовался как первичная обмотка тороидального трансформатора. Прохождение импульса через тороид приводило к осцилляциям, амплитуды которых проверялись через некоторый фиксированный интервал. Проверка и последовательное считывание сигнала определяли окончательно точность монитора. Аккуратное снятие информации было обеспечено электронной группой СЛАК, и по мере возрастаания опыта общения с этой аппаратурой она превратилась в совершенно стандартную для проведения таких экспериментов, хотя зачастую работа проверялась с помощью чаш Фарадея.

В дополнение к мониторам вдоль линии пучка находились различные коллиматоры и экраны, а "захоронение" высокоэнергетического пучка проходило в холме, находящемся за конечной станцией, детекторы спектрометра с электроникой были в вычислительном центре, находящемся над конечной станцией.

Я надеюсь, что у меня хватит умения передать вам впечатления тех трех лет невероятной работы, которые привели к воплощению бумажных планов 1964 г. в приборы, с которыми велись физические исследования в начале 1967 г. Вопросы проектирования прецизионных магнитов, конструкций гигантских каркасов для этих магнитов, создания массивных защитных устройств для детекторов при невероятно строгих требованиях — все эти, как и многие другие проблемы отступили под напором самоотверженной группы инженеров и механиков. Даже профессиональные группы, нанятые для установки громоздких частей аппаратуры, заразились энтузиазмом инженеров. Я ужасно боялся, что группа управляющих как-нибудь заглянет без доклада и обнаружит слесаря-монтажника, сооружающего деревянный подмост, в то время как плотник возится с краном. На рис. 20 приведен вид экспериментального зала с установленными спектрометрами на 8 и 20 ГэВ.

Детекторы на 8 ГэВ были сконструированы и построены в МТИ (рис.21). Два больших сцинтилляционных счетчика работали как триггеры, сигнализируя о прохождении заряженных частиц через систему счетчиков. Два мно-

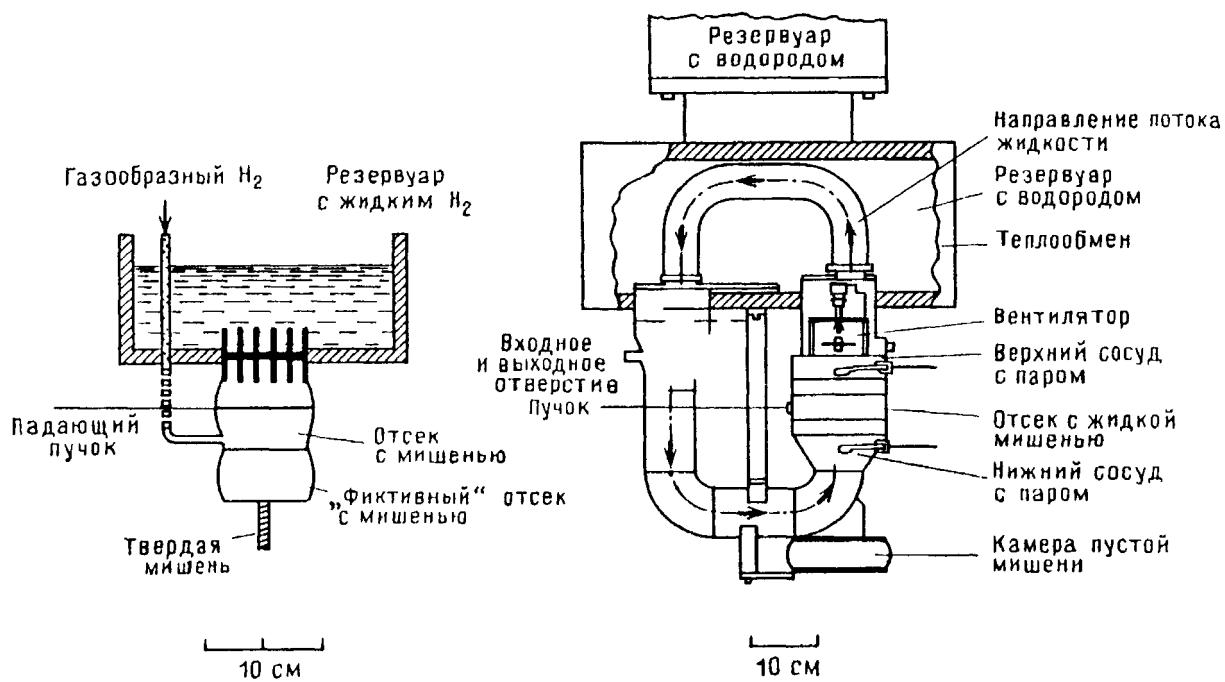


Рис. 18. Слева: схема первой конденсационной водородной мишени, установленной на конечной станции А. Мишень может быть убрана в вертикальном направлении, а на ее месте можно установить твердую или фиктивную мишень. Справа: схема конденсационной мишени с усиленной циркуляцией конденсированного водорода. Как и в случае *a* мишень может быть убрана в вертикальном направлении, с тем чтобы на линии пучка могли быть установлены другие мишени

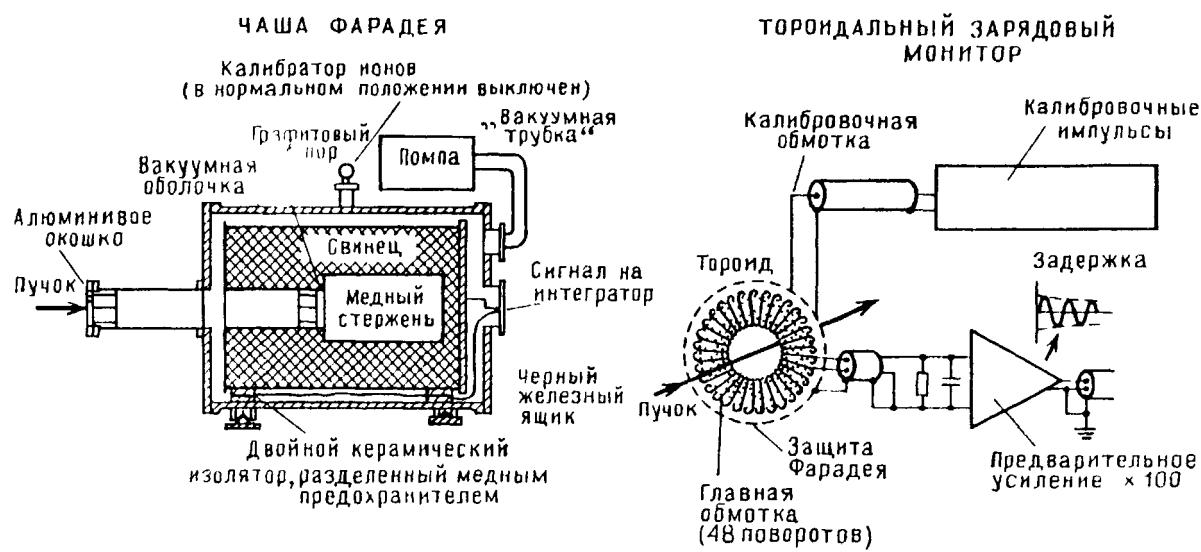


Рис. 19. Слева: схема чаши Фарадея. Пучок останавливается углеродно-медным стержнем в чаше, а свинец поглощает возникающие при этом γ -лучи. Магниты Альнико отклоняют низкоэнергетические электроны, падающие через окошко или из стержня, так что первые не попадают в чашу, а вторые не могут исчезнуть из нее. Справа: схема торoidalного трансформаторного монитора. Пучок действует как первичная обмотка на ферромагнитном стержне. Пучок "прозванивает" LC -цепь, и амплитуда сигнала считывается после трех четвертей цикла

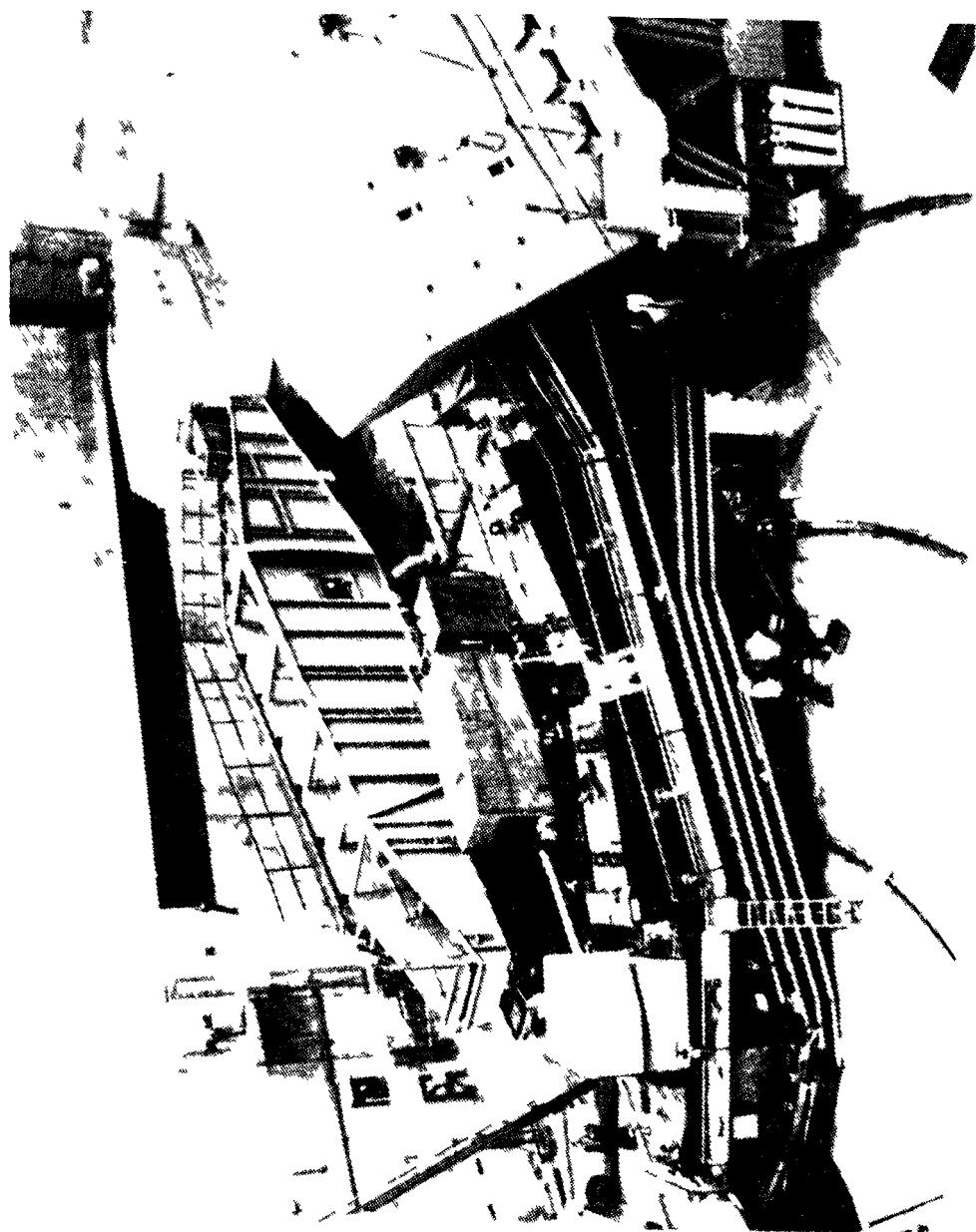


Рис 20 Фотография спектрометров на 8 и 20 ГэВ на конечной станции А

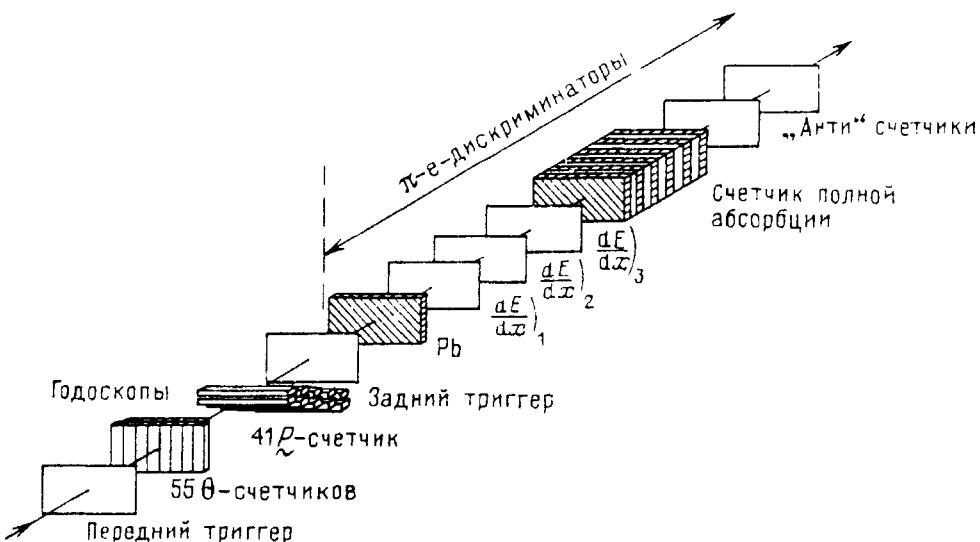


Рис. 21. Схема системы счетчиков внутри защищенной области 8 ГэВ

гокомпонентных сцинтилляционных годоскопа были поставлены между триггерными счетчиками и определяли положение следа в горизонтальной (θ) и вертикальной (h) плоскостях. Каждый годоскоп состоял из двух пластов перекрывающихся счетчиков, так что каждый "щелчок" определял положение с точностью до половины ширины счетчика. Расположение этих щелчков вместе с углом и энергией, регистрируемыми спектрометром, определяло угол рассеяния с точностью до $\pm 0,15$ мср, а импульс рассеянной частицы с точностью до $\pm 0,05\%$. За системой годоскопов находился набор счетчиков для отделения электронов от пионов. Главным элементом в системе был свинцовый ливневый счетчик полного поглощения. Тем самым был установлен барьер, эффективный для электронов на 99%. Этого было достаточно для обеспечения чисто электронного сигнала в экспериментах по упругому рассеянию, однако при неупругом рассеянии возрастал пионный фон, и иногда приходилось применять счетчики dE/dx . Эти счетчики измеряли потерю энергии в сцинтилляторе для частиц, прошедших одну радиационную длину свинца. Электроны часто попадали в радиатор, вызывая импульс большой амплитуды в счетчике. В большинстве случаев пионы не давали ливней, позволяя их идентифицировать практически независимо. Ко времени первых экспериментов по неупругому рассеянию, использующих спектрометр на 8 ГэВ, мы дополнитель но поставили газовый черенковский счетчик и установили его перед триггером для добавочного разделения частиц. Система dE/dx использовалась только для невысоких вторичных энергий, где отношение пионов к электронам было большим. Система счетчиков спектрометра 20 ГэВ (рис. 22) была аналогична системе для спектрометра 8 ГэВ с добавленным газовым черепковским счетчиком и дополнительной системой годоскопов, которые определяли угол рассеяния вне горизонтальной плоскости (φ -годоскоп) и местонахождение центра рассеяния вдоль линии пучка (x -годоскоп). Группа из МИТ отвечала также за вычислительную электронику, подпитку энергией фотометров и многое другое, эта группа оказала неоценимую помощь инженерам-электронщикам из СЛАКа, которые устанавливали электронику и занимались "on-line"-компьютером.

Одним из новшеств, примененных при этих экспериментах, было исполь-

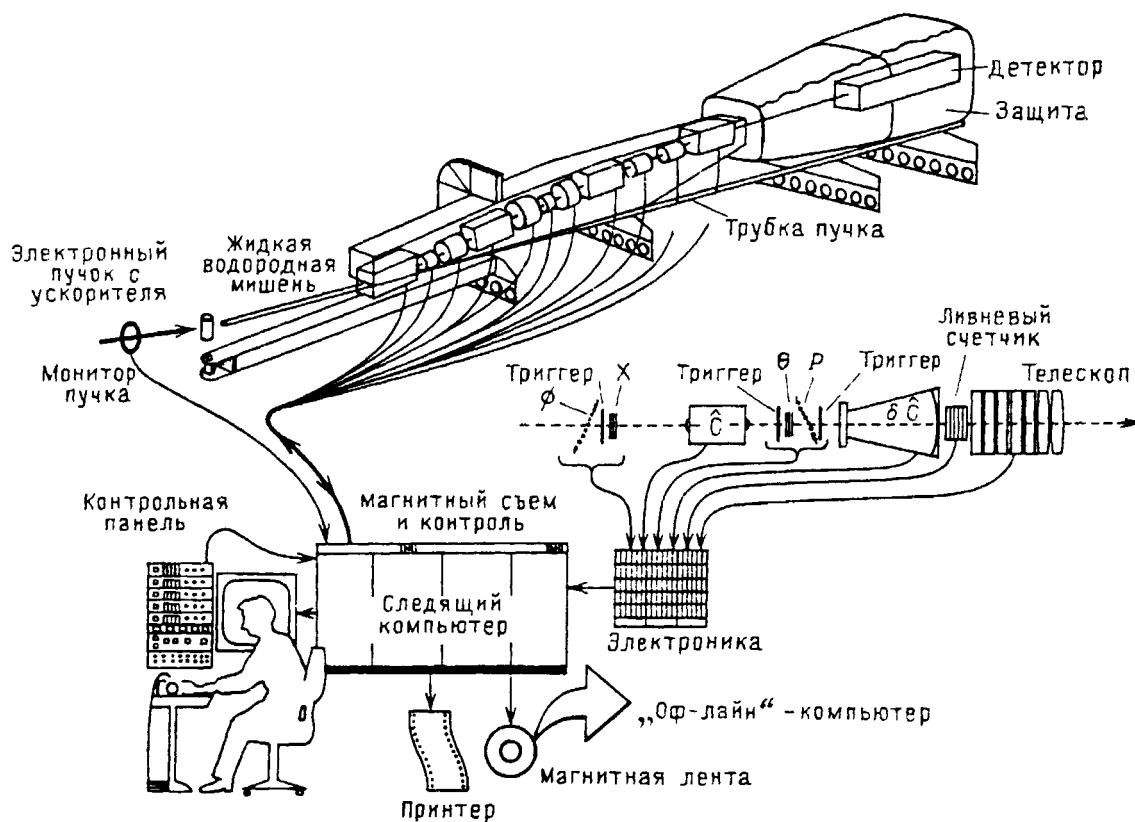


Рис. 22. Схема спектрометра 20 ГэВ с указанием компьютерного контроля и разных считающих устройств. Показана также схема системы счетчиков 20 ГэВ. Идентификация частиц в спектрометре несколько отличается от используемой в спектрометре 8 ГэВ, частично из-за более высоких энергий, но в основном из-за желания в некоторых случаях идентифицировать π -мезоны на фоне электронов

зование непосредственно включенного "on-line" компьютера. Нельзя сказать, что это был первый случай использования такого компьютера, но степень компьютерного контроля была необычной для того времени. Мы закупили замечательную мощную систему, которая работала в каждый данный момент лишь на один эксперимент. Было проведено много работы как с электроникой, так и с программным обеспечением. В результате наши усилия по подготовке и проведению каждого эксперимента значительно сокращались. Моментальный анализ части поступающих данных стал мощным методом проверки успешного хода экспериментов (см. рис. 22).

Летом 1966 г. проводился отбор предложений по использованию СЛАковского пучка. Ускоритель был близок к завершению, и некоторые первоначальные тесты прошли успешно. Хотя первоначальная программа действий на конечной станции А была уже "встроена" в устройство установки, необходимо было распределить время использования ускорителя и подготовить последовательность экспериментов на первый год его работы. Объединенная группа CalTech—MIT—SLAC подготовила программу, состоящую из трех частей:

- Упругое электрон-протонное рассеяние (спектрометр 8 ГэВ).
- Неупругое электрон-протонное рассеяние (спектрометр 20 ГэВ).
- Сравнение сечений электронного и позитронного рассеяния (спектрометр на 8 ГэВ).

Из программы следовало, что упругое рассеяние представлялось в тот момент наиболее интересным. "Мы ожидаем, что основная часть членов группы займется экспериментами по упругому $e-p$ -рассеянию, а остальные эксперименты будут проводиться небольшими подгруппами".

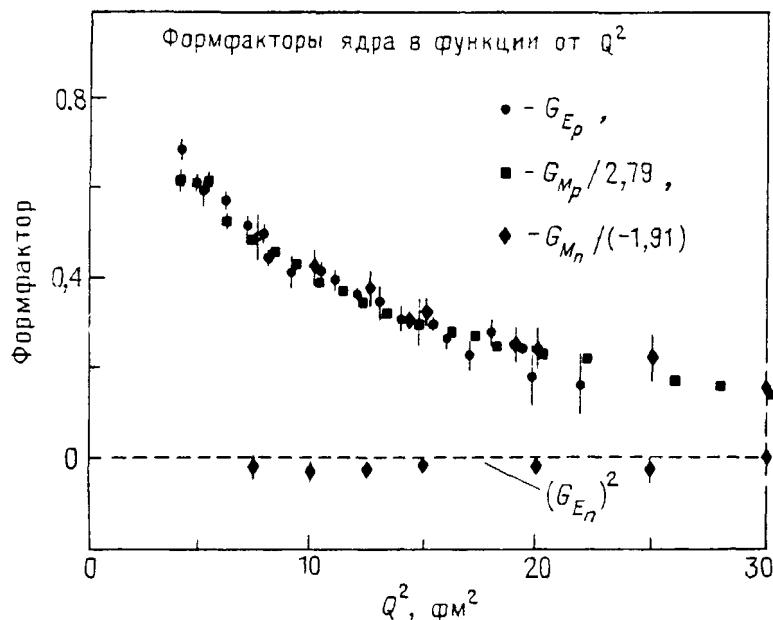


Рис. 23. Результаты по ядерным формфакторам, представленные группой из Стенфорда на Международном симпозиуме по электронным и фотонным взаимодействиям при высоких энергиях в 1965 г. (Передача импульса в 1 ГэВ² эквивалентна 26 фм⁻²)

Во время строительства СЛАКА и подготовки экспериментального оборудования произошел большой прогресс в измерении формфактора нуклона в других лабораториях. Программа в НЕПЛ была продолжена и было получено огромное количество новых данных с помощью установки на конечной станции ускорителя Mark III. Был добавлен новый спектрометр с радиусом 72 дюйма, чтобы приспособиться к возросшей энергии ускорителя. Обширные результаты по протону и дейtronу были обработаны и доложены [17] (рис. 23).

Корнелльский электронный синхротрон (более 1 ГэВ) был самым мощным электронным ускорителем в мире в начале шестидесятых годов. Экспериментаторы провели серию измерений на CH₂-мишениях, использующих квадрупольный спектрометр нового образца [18] (рис. 24) и новый тип монитора для α -частиц [19]. Корнелльские результаты открыли путь к использованию электрического и магнитного формфактора [20] (G_E и G_M), тогда как раньше изучали один формфактор для (дираковского) протона спина 1/2, а в качестве второго использовался формфактор "аномального" магнитного момента протона.

Линейный ускоритель в Орсе начал действовать в 1959 г., и там была проведена активная программа по изучению рассеяния на ядрах и нуклонах. В дальнейшем акцент сдвинулся к экспериментам на встречных пучках, но тем не менее было проведено много экспериментов по рассеянию при промежуточных энергиях этого ускорителя, с использованием электронных пучков до 750 МэВ.

Эксперименты с электронами привели к большим успехам в физике высоких энергий, и новый электронный синхротрон был построен в Гарварде. Кембриджский электронный ускоритель был построен совместно с Гарвардским университетом и МИТ и вошел в строй действующих в 1962 г. с энергией до 5 ГэВ. Вскоре появилась программа экспериментов по электронному рассеянию, использующая внутренние мишени. Новый ускоритель открыл для экспериментов новую область Q^2 , и были использованы различные экспериментальные установки для измерения формфакторов протона и нейтрона. Результаты протонных измерений при высоких Q^2 оказались близкими к тому, что ожидалось при экстраполяции с низких энергий. Выводы [21] были вы-

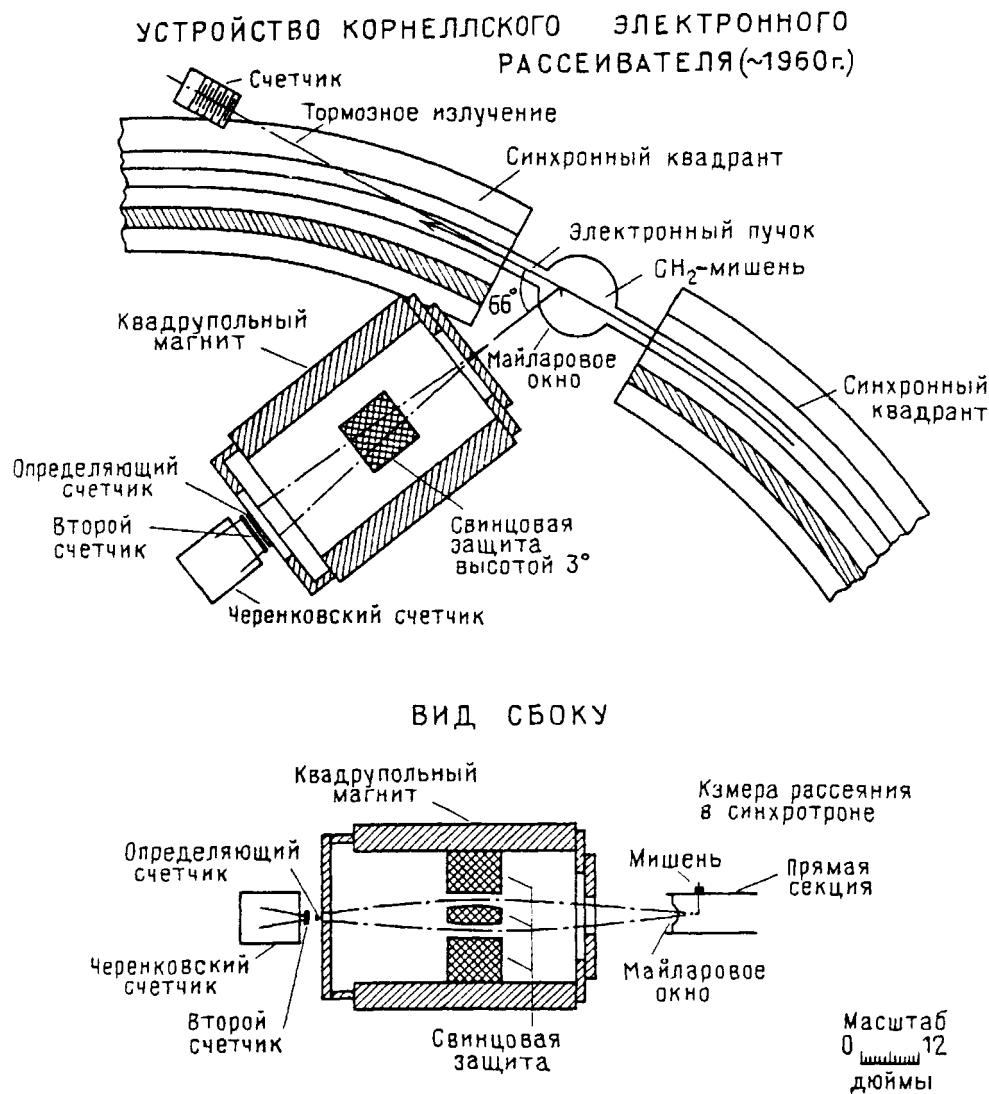
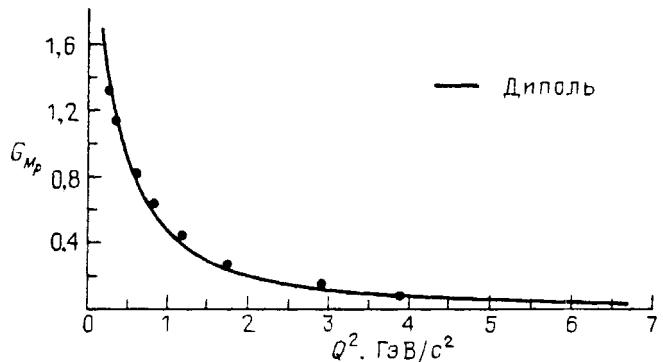


Рис. 24. Схема оборудования для экспериментов по электронному рассеянию, проводившихся в Корнелле в 1960 г. В экспериментах использовался квадрупольный спектрометр для анализа электронов, рассеянных на внутренней мишени в электронном синхротроне. Мишень была установлена в стороне от нормальной орбиты в ускорителе, и пучок после ускорения медленно поворачивали в направлении на мишень

ражены (несколько позже) Ричардом Вильсоном в словах "У персика не оказалось косточки". Эти результаты стали первым наблюдением того, что старая модель протона "с сердцевиной" вряд ли является верной (рис. 25).

Рис. 25. G_M для протонных данных, полученных в СЕА. Кривая, помеченная как "диполь", — подгонка, сделанная в конце 50-х годов, когда максимально допустимое значение Q^2 было ограничено 1 ГэВ². Она имела форму $G_M = \mu_p [1 + + (Q^2/0,71 \text{ ГэВ})^2]$ и находилась в качественном согласии с данными СЕА при наивысших тогда значениях Q^2 , хотя и не являлась вполне удовлетворительной в статистическом смысле



Несколько больший синхротрон был построен в Германии, в Гамбурге, примерно в то же время. DESY был введен в действие в 1964 г. и имел максимальную энергию 6 ГэВ. Была проведена интенсивная серия экспериментов по рассеянию на нуклонах, использовались и внутренние мишени [22] (рис. 26), и внешние пучки [23] (рис. 27).

СХЕМА РАССЕЯНИЯ НА ВНУТРЕННЕЙ МИШЕНИ В DESY

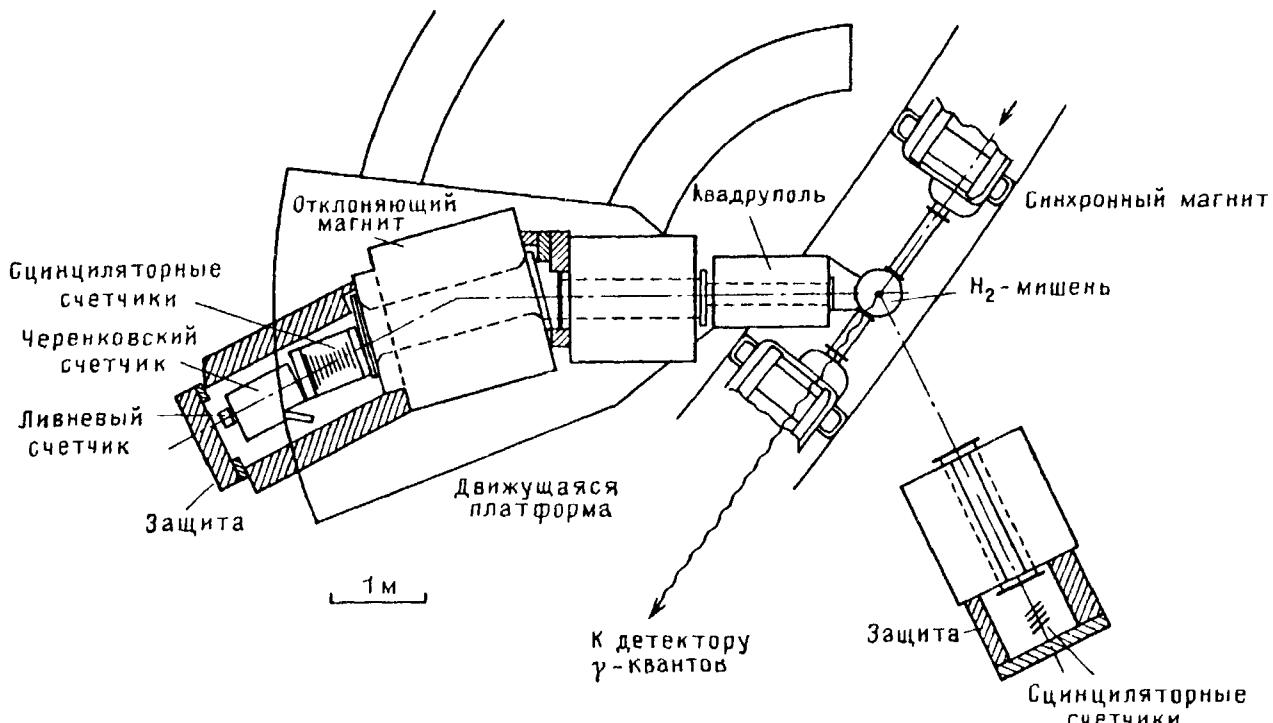


Рис. 26. План установки спектрометра в экспериментах по электронному рассеянию на внутренней мишени в DESY. Позже такая же установка была использована для регистрации электрон-протонных соударений при упругом рассеянии (чтобы уменьшить фон)

С появлением СЕА и DESY количество экспериментальных данных при больших Q^2 (которые существенны для измерения G_M) возросло и по числу, и по точности. Данные по-прежнему согласовывались с так называемой дипольной моделью. К моменту конференции в Гамбурге 1965 г. не было отклонений от того, что

$$G_{E_p} = \frac{G_{M_p}}{\mu_p} = \frac{G_{M_n}}{\mu_n},$$

$$G_{E_n} \approx 0 \text{ при больших } Q^2,$$

$$G_{E_p}(Q^2) \approx \left[\frac{1}{1 + (Q^2/0,71 \text{ ГэВ}^2)} \right]^2 \text{ вплоть до } Q^2 \sim 10 \text{ ГэВ}^2.$$

От СЛАКА ожидали проверки этих условий в новой области Q^2 (рис. 28), которая стала возможной при повышении энергии электронов до 20 ГэВ. Вопросы, которые нуждались в проверке на новом ускорителе, — это наличие "ядра" нуклона и точность дипольного приближения для описания формфак-

УСТРОЙСТВО СПЕКТРОМЕТРА ВНЕШНЕГО ПУЧКА В DESY

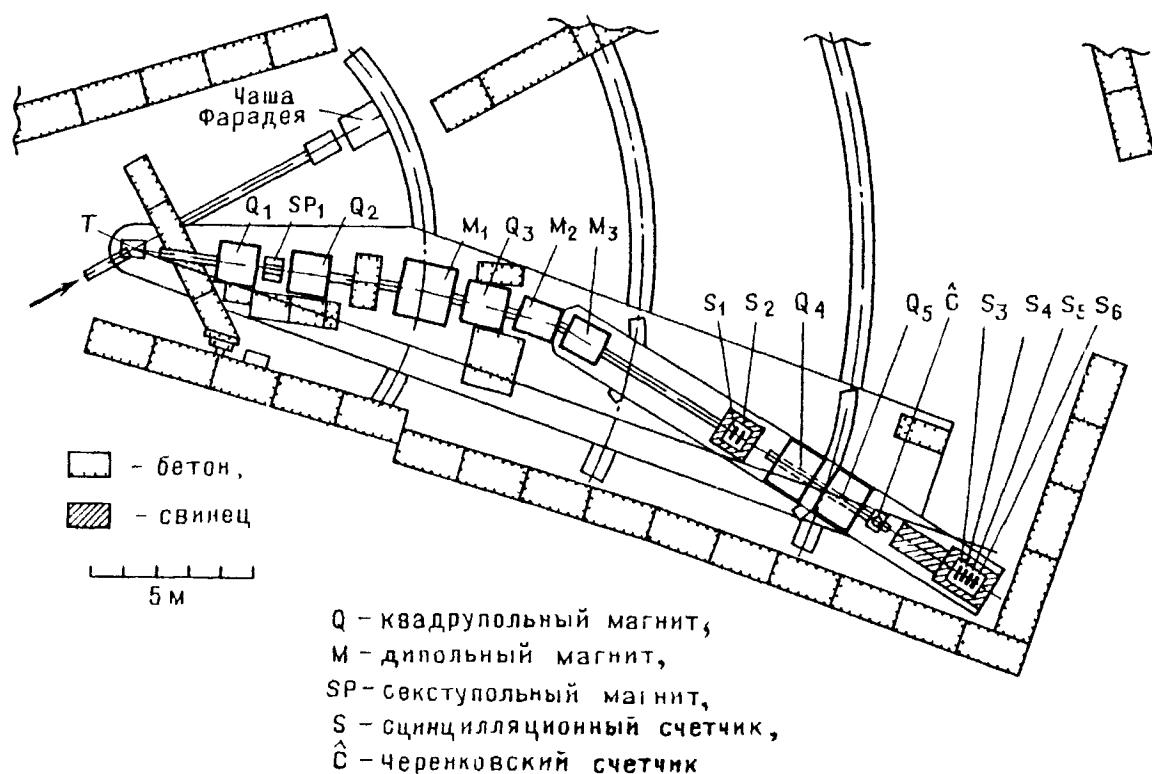


Рис. 27. Оборудование для экспериментов по рассеянию внешнего пучка в DESY. Спектрометр помещен между магнитами M_2 и M_3 . Меняя отклонения, задаваемые M_2 и M_3 , линии, отвечающие постоянному значению недостающей массы, могут быть подобраны так, чтобы обеспечить данный наклон в S_1 для различных рассеиваемых энергий

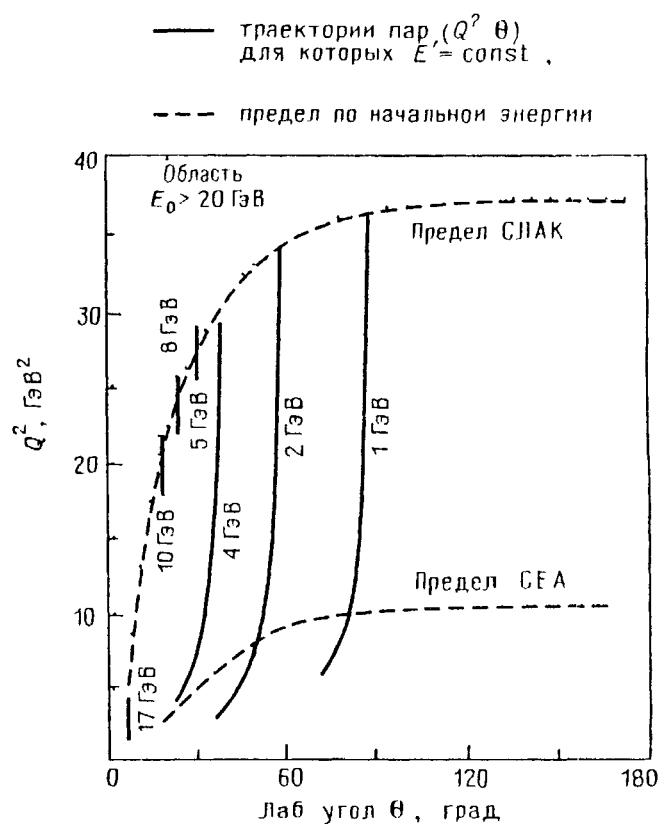


Рис. 28. График области упругой кинематики, показывающий дополнительную кинематическую область, достижимую в СЛАКе для спектрометров различных максимальных энергий (свыше 4 ГэВ обозначено лишь максимальное значение Q^2 , чтобы избежать путаницы на графике)

тора. Воображаемая картина "истинного протона", окруженного мезонным облаком, казалась уже нереальной, но некоторые более тонкие тесты на обнаружение маленького "ядра" были внесены в программу СЛАКа. Другие вопросы были связаны с уже более конкретными моделями формфакторов, и они сегодня не представляют интереса.

Программа СЛАКа требовала определенных характеристик от пучков, используемых в эксперименте, эти характеристики содержались в спецификациях оборудования в СЛАКе, но пока были трудно достижимы из-за "необкатанности" ускорителя. Работа на ускорителе во время первых экспериментов требовала высочайшей квалификации от команды операторов ускорителя, и у многих из них сохранились неизгладимые воспоминания о том времени.

Планируемый эксперимент по упругому рассеянию был направлен на измерение сечения при передачах импульса 16 ГэВ² и выше даже в первой очереди экспериментов. Проводилось интенсивное обсуждение вопроса об измерении углов и энергий таким образом, который позволил бы эффективно разделить G_E и G_M . Обсуждались возможные помехи и ожидалось, что они будут пренебрежимо малыми. Так, ожидалось, что радиационные поправки к упругому рассеянию достигнут 30% в нашей установке при энергии падающих электронов 20 ГэВ. Эти поправки возникали из-за двух связанных, но физически различных процессов:

1. Электроны, проходя через мишень, могут излучать радиацию в результате взаимодействия с отдельными атомами (собственно тормозное излучение), и, в результате, теряют энергию.

2. Рассеянные электроны могут излучать в процессе самого рассеяния ("широкоугольное" тормозное излучение). Этот эффект обсуждался Швингером [24] в 1949 г. и являлся предметом вычислений все возрастающей сложности в течение нескольких лет.

В некоторых случаях энергия испущенного излучения (в каждой реакции) была достаточной, чтобы изменить кинематику рассеяния настолько, что измерительная аппаратура "не узнала" бы взаимодействие. Например, если достаточно много энергии было потеряно в результате излучения при процессе упругого рассеяния, то энергия рассеянного электрона может упасть значительно ниже того уровня, который аппаратура определяла как "упругий пик".

Излучение приводило к характерному "радиационному хвосту" в спектре энергий упругорассеянных электронов, как показано на рис. 29. Сечение рассеяния, измеренное детектированием электронов в определенной области энергий, оказалось меньше ожидаемого, так как некоторые частицы были "потеряны". Обычно экспериментальные сечения подправляются на эти потери путем устранения зависимости сечения от разрешения аппаратуры.

Эту поправку можно продемонстрировать простой формулой первого порядка:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} \Big|_{\text{exp}} = (1 - \delta_s) e^{-\delta_s} \frac{d\sigma}{d\Omega},$$

где поправка на широкоугольное тормозное излучение δ_s есть

$$\delta_s = \frac{2\alpha}{\pi} \left(1 - \ln \frac{Q^2}{m_e^2} \right) \ln \frac{\Delta E}{E};$$

m_e — масса электрона, ΔE — разрешение по энергии, E — начальная энергия (предполагая $E_s \sim E$), а поправка собственного тормозного излучения δ_r :

$$\delta_r = -\frac{t}{\ln 2} \ln \frac{\Delta E}{E};$$

t — толщина мишени в радиационных единицах.

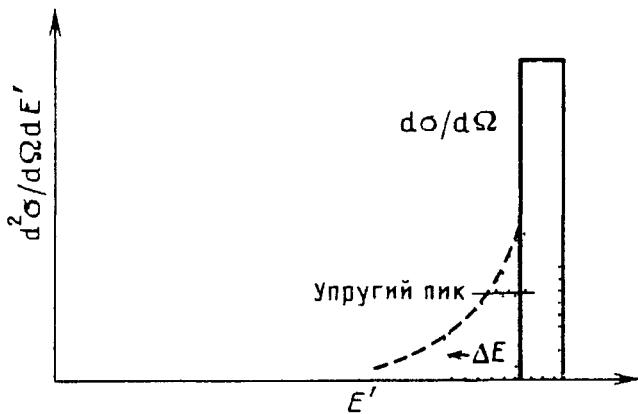


Рис. 29. Радиационные эффекты при упругом рассеянии. При их отсутствии все электроны рассеялись бы в **прямоугольник $d\sigma/d\Omega$** (ширина которого зависит от разрешения в падающем пучке и детектора). Радиационные процессы вызывают потери энергии у некоторых рассеянных электронов, в результате эти электроны оказываются в "хвосте" на низкоэнергетической стороне пика. Измерение электронов в заштрихованной области приводит к сечению, несколько меньшему $d\sigma/d\Omega$. Это **уменьшенное $d\sigma/d\Omega$** может быть подправлено на радиационные поправки, результат дает точное $d\sigma/d\Omega$

Поскольку эти поправки могут быть рассчитаны с достаточной точностью, они безобидны при упругом рассеянии, и упругие формфакторы определяются достаточно просто.

Наша программа включала возможное измерение G_E и G_m при значениях Q^2 , достигающих 15 ГэВ². (При более высоких Q^2 можно наткнуться на верхний предел для G_E , а не измерить его значение.) Ожидалось, что программа займет около 350 часов ускорительного времени, поэтому предлагалось сделать первый запуск на 200 часов, а затем скорректировать, пользуясь измеренными параметрами, а не предварительными оценками. Этот эксперимент проводился первым на новом оборудовании.

Вторая часть программы состояла в измерении неупругого рассеяния на протоне. История неупругого рассеяния на нуклоне к тому времени была гораздо более короткой, чем история упругого рассеяния, поэтому у нас было меньше опыта при составлении этой части программы.

Неупругое рассеяние на ядре было типичной чертой данных ранних экспериментов в HEPL. Возбуждение ядерных уровней и квазиупругое рассеяние на конституентных протонах и нейтронах ядра наблюдалось в более ранних экспериментах. Например, возбуждение уровней ядер углерода можно про наблюдать на рис. 4. Квазиупругое рассеяние становится более очевидным при возрастании передачи импульса. На рис. 30 показано рассеяние на той же самой мишени, что и на рис. 4 и приблизительно той же падающей энергии, но угол рассеяния теперь 135°. Сравнение двух рисунков ясно демонстрирует рост квазиупругой части с ростом угла (а тем самым и передачи). Когда электроны рассеиваются на 135°, упругий пик очень мал, а также меняется характер возбужденных уровней, так как различные мультипольные переходы обладают различными угловыми характеристиками. Наиболее важной чертой спектра является наличие широкого квазиупругого пика на рис. 30, который появляется благодаря рассеянию на отдельных протонах и нейтронах. Ширина пика отражает фермиевский импульс нуклонов в ядре.

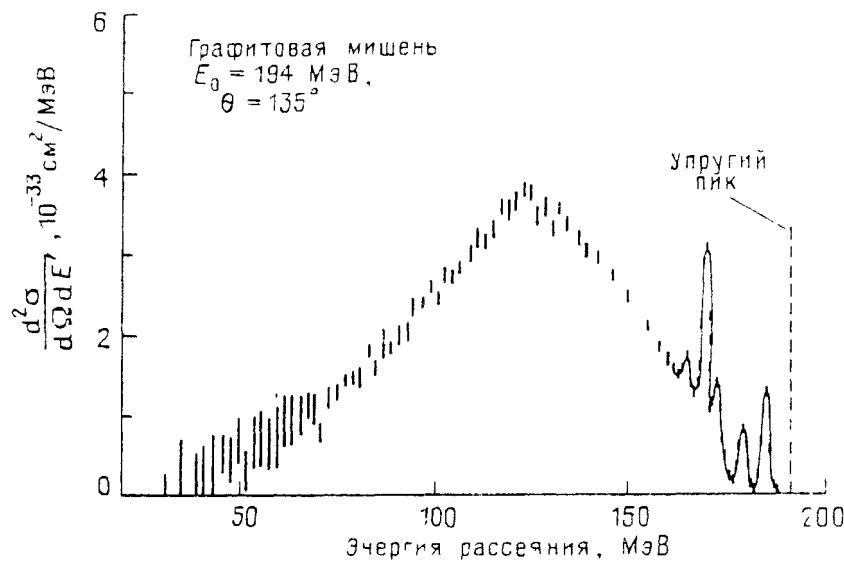


Рис. 30. Спектр неупругорассеянных электронов на углероде. Ясно видно возбуждение ядерных уровней. Большой и широкий пик между 50 и 60 ГэВ обусловлен квазиупругим рассеянием на отдельных нейтронах и протонах ядра углерода

Ранние эксперименты по неупрочному рассеянию электронов на протонах проводились Пановским с авторами в НЕПЛ во второй половине 50-х годов [25 — 27]. Эти эксперименты были основаны на сравнении рождения фотонов и электронов при рассеянии положительных пионов в литиевых и (позже) водородных мишениях. Эти эксперименты проверили вычисления электромагнитных полей вокруг релятивистского электрона, но лишь немного добавили к нашим знаниям динамики мезонов сверх того, что было известно из фотогенерации (поскольку главный вклад в рождение электронов давался виртуальными фотонами с малыми значениями Q^2). Авторы отметили, что именно наблюдение за рассеянными электронами (а не за пионами) может привести к интересным результатам, и вскоре такой эксперимент был приведен.

Примерно в это время в НЕПЛ был установлен новый магнитный спектрометр [26], который и был использован в новых экспериментах (рис. 31).

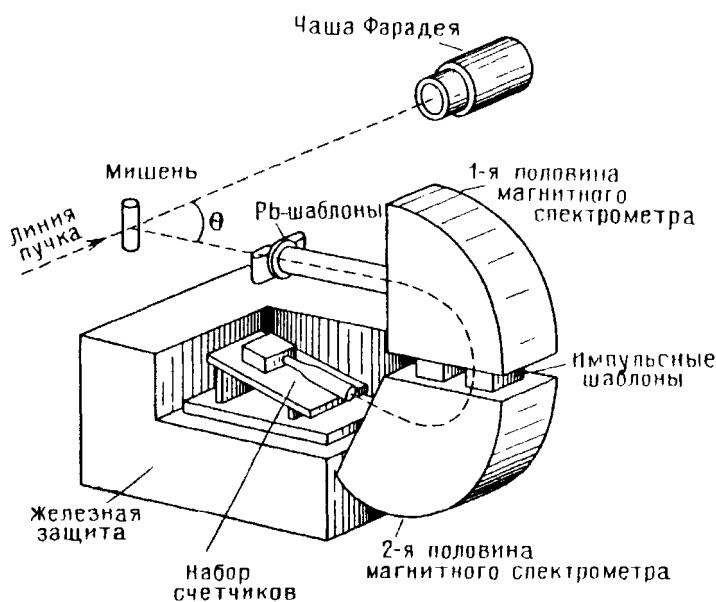
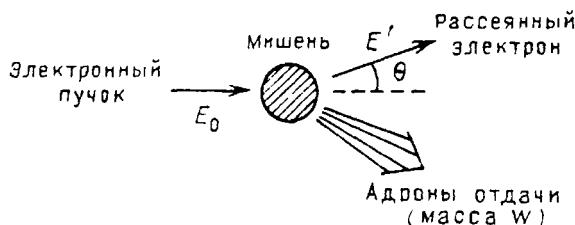


Рис. 31. Магнитный спектрометр с нулевой дисперсией, используемый в экспериментах по неупрочному рассеянию в НЕПЛ. Разделение магнита на части позволило ввести шаблоны, определяющие импульс, в середине отклоняющего участка пути

Пановский и Олтон [29] провели измерения неупрогое рассеяния электронов на водороде в области у порога рождения пионов. Возможная энергия электронов была недостаточно высока, чтобы залить за порог рождения пионов, но этот эксперимент установил, что "хвост" от упругого пика происходит из-за двух (вычислимых) радиационных процессов, которые были упомянуты выше. Один из них — упругое рассеяние, предваряющее испускание тормозного излучения (или следующее за ним в материале мишени), другой — "широкоугольное" тормозное излучение — испускание фотона при рассеянии. Эксперимент явился количественной проверкой вычислений радиационного хвоста упругого пика в области около пионного порога.

В это время максимальная энергия электронов на ускорителе Mark III устойчиво повышалась, и в 1959 г. Ольсен [30] с помощью 32-дюймового спектрометра провел эксперимент, аналогичный эксперименту Пановского—Олтона, на оборудовании группы Хоффштадтера (см. рис. 5). При возросшей энергии стало возможным провести измерения в области, покрывающей первый π - p -резонанс, и при резонансной энергии ясно обнаружился новый пик. В этих экспериментах была также измерена грубая зависимость пикового сечения рассеяния от Q^2 .

В 1962 г. Хэнд доложил материалы похожего эксперимента (с использованием того же спектрометра, что и у Олтона), и результаты были обсуждены с новой точки зрения. В частности, появилось неупругое обобщение формулы Розенблата, содержащее два формфактора, являющихся функциями Q^2 и v , потерей энергии, уносимой рассеянным электроном. Измеримыми величинами являются E_0 , E' и θ :



Кинематика рассеяния описывается формулой

$$E' = \frac{E_0 - [(W^2 - M^2)/2M]}{1 + (2E_0/M)\sin^2(\theta/2)},$$

где W — масса конечного состояния системы адронов отдачи (при $W^2 = M^2$ восстанавливается упругая кинематика). Квадрат переданного импульса

$$Q^2 = 4E_0 E' \sin^2 \frac{\theta}{2},$$

потеря энергии

$$\nu = E_0 - E'$$

и W^2 являются релятивистски-инвариантными величинами в процессе рассеяния.

Существуют две эквивалентные общепринятые формулировки описания сечения рассеяния. Одна принадлежит Дреллу и Валеске [31] и по форме очень напоминает выражение Розенблата

$$\frac{d^2\sigma}{d\Omega dE} = \frac{\alpha^2}{4E_0^2 \sin(\theta/2)} \cos^2\theta \left[2(W_2 + W_1) \operatorname{tg}^2 \frac{\theta}{2} \right]^{-1}.$$

Структурные функции W_1 и W_2 являются функциями переданного импульса и потери энергии $W_{1,2}(Q^2, \nu)$. Это наиболее общая форма для сечения в (сохраняющем четность) однофотонном приближении.

Хенд [32] сделал популярной другую эквивалентную форму сечения рассеяния, в которой один из формфакторов сводится к сечению фоторождения при $Q^2=0$

$$\frac{d\sigma}{d\Omega dE} = \frac{\alpha^2}{4\pi^2} \frac{(W^2 - M^2)E'}{MQ^2 E_0(1-\epsilon)} (\sigma_T + \epsilon\sigma_L),$$

где

$$\epsilon = \frac{1}{1 + \{2 \operatorname{tg}^2(\theta/2) [1 + (\nu^2/Q^2)]\}}.$$

Здесь σ_L и σ_T (отвечающие сечениям рассеяния для поперечно и продольно поляризованного фотона) являются функциями переданного импульса и потери энергии рассеянного электрона $\sigma_{L,T}(Q^2, \nu)$ со значениями при $Q^2 = 0$

$$\sigma_T(0) = \sigma_{\delta_p} \sigma_{L(0)} = 0,$$

$$\sigma_L(0) = 0.$$

Эти ранние эксперименты и связанные с ними теоретические исследования проложили путь к тому, чтобы проводить эксперименты по неупругому рассеянию в СЛАКе. При первых экспериментах допустимая энергия позволяла проводить исследования вблизи π -р-резонанса 1238 МэВ.

Важное влияние оказала Лаборатория линейного ускорителя в Орсе, где эксперименты по неупругому рассеянию на ядре привели к изучению радиационных процессов и к определению подправленных таким образом сечений из экспериментальных данных.

Основными проблемами экспериментов по неупругому рассеянию, которые мы обдумывали во время сооружения установок, были резонансные возбуждения и Q^2 зависимость формфакторов перехода (из основного состояния нуклона в возбужденное). Мы надеялись узнать больше о каждом из наблюдавшихся резонансов, а также обнаружить новые резонансы, не наблюдавшиеся ранее в электронных экспериментах, и, более того, в других реакциях. Непосредственно перед принятием программы исследований были опубликованы данные СЕА [33], демонстрирующие наличие трех резонансных состояний, возникающих при неупругом рассеянии электрона. Группа СЕА использовала квадрупольный спектрометр и получила спектр, аналогичный приведенному на рис. 32. Существенен был фон радиационных событий. Очень интересный спектр, полученный в DESY [34] и показывающий большие нерезонансные вклады в сечение неупругого рассеяния, появился позже, как раз примерно в то время, когда начались первые эксперименты в СЛАКе.

Наша программа была утверждена в 1966 г. наряду с программами других групп. Время проведения различных частей нашей программы было согласо-

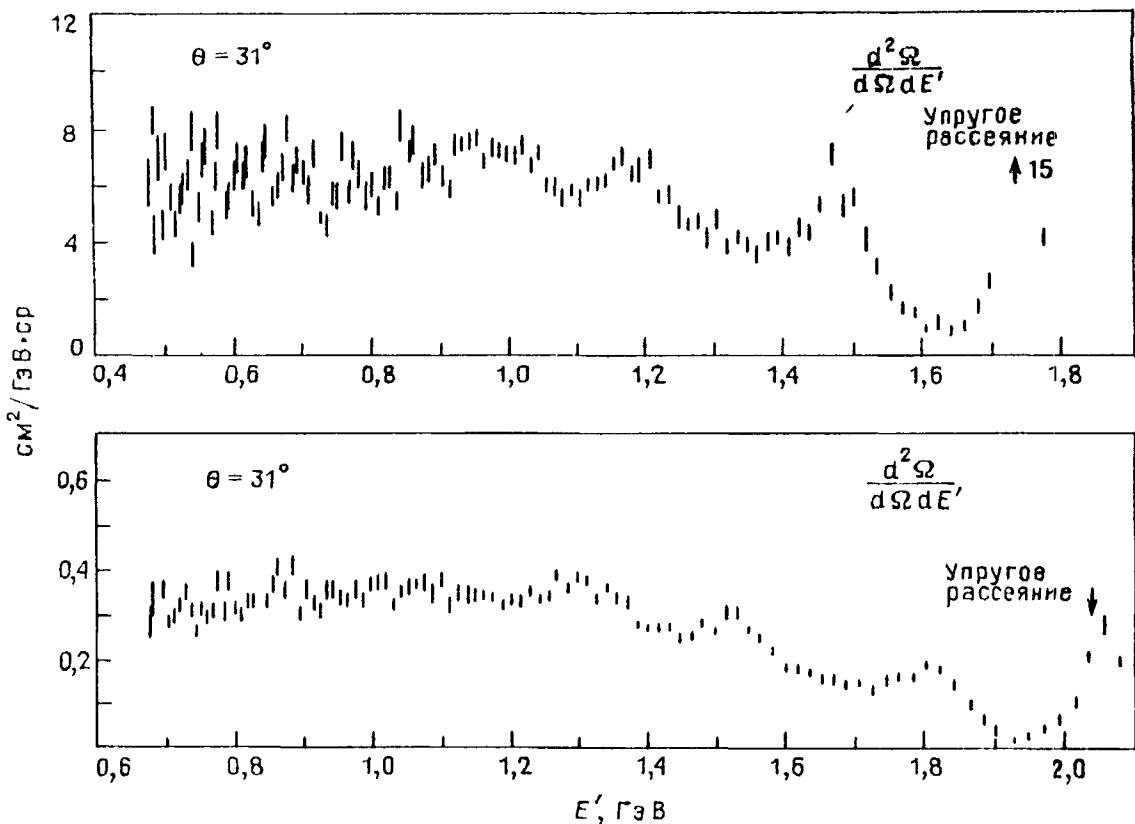


Рис. 32. Спектр неупрогоего рассеяния на 31° , полученный в СЕА для начальных энергий 24 и 30 ГэВ. Ясно просматриваются три пика, отвечающих резонансным возбуждениям протона

вано с расписанием изучения фоторождения, с работой спектрометров и с экспериментами на стримерной камере, занимавшей здание за конечной станцией А и использовавшей тот же пучок.

К январю 1967 г. спектрометр 8 ГэВ был практически готов, и мы начали подготовку к первому эксперименту по упруному рассеянию.

Телесный угол спектрометров непосредственно входил в результаты вычислений и сечения рассеяния, и мы хотели проверить расчет отверстия спектрометра 8 ГэВ. Была запланирована специальная проверка для изучения оптики и восприимчивости спектрометра. Спектрометр был установлен на 0° , так что пучок входил в него вдоль центральной орбиты. Энергия пучка была подогнана к установке спектрометра, и пучок наблюдался на светящихся экранах, установленных в фокальных плоскостях. Магниты, помещенные на место мишеней, управляли пучком, отслеживая орбиты и проверяя оптические свойства магнитных полей спектрометра. Определяя крайние орбиты в спектрометре, можно было измерить телесный угол. На рис. 33 показаны результаты для случая импульса, направленного в центр. Было обнаружено хорошее согласие с предсказаниями, тем не менее нашлись небольшие расхождения с расчетными значениями входных отверстий для крайних орбит. После первого пуска в спектрометр были введены свинцовые шаблоны для лучшей фиксации размера отверстия.

После проведения испытаний оптики были установлены счетчики, водородные мишиени и мониторы тока пучка. К маю месяцу были предприняты первые попытки исследования упругоого рассеяния. В это время ускоритель уже работал достаточно хорошо, и мы старались опробовать все характеристики установки.

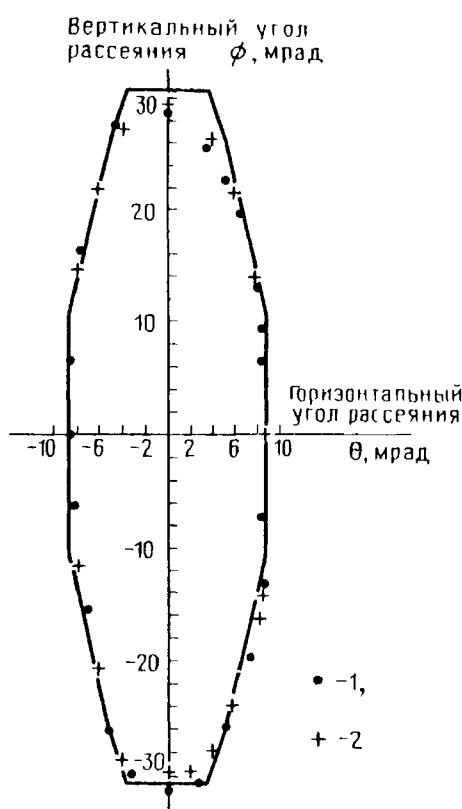


Рис. 33. Области углов, регистрируемых спектрометром на 8 ГэВ для электронов, летящих от центра мишени, и при установке спектрометра так, что падающий пучок направлен вдоль центральной оси. Нанесены точки для двух различных энергий пучка (1 — 8 ГэВ, 2 — 6 ГэВ). Непрерывная линия — результат вычислений на компьютере

энергию, так и угол из вычислительного центра. Усилия, потраченные на обеспечение эффективности работы, оказались не напрасными, и мы были рады наблюдать, как работает наша установка и функционирует ускоритель.

Предварительный анализ полученных данных был проведен за несколько месяцев для доклада на электрон-фотонном симпозиуме в СЛАКе в августе 1967 г. [35]. Сечение упругого рассеяния, измеренное в СЛАКе, вело себя таким же образом, как и измеренное при более низких энергиях — оно следовало экстраполяции ранних наблюдений в CEA и DESY (рис. 36). Мы получили данные для G_{M_p} при значениях Q^2 до 25 ГэВ².

Первая попытка найти в СЛАКе что-нибудь новое и неожиданное привнесла разочарование. Это вполне обычная ситуация в экспериментальной физике. Большинство измерений лишь немного добавляет к нашим значениям. Временами накопленных малых достижений оказывается достаточно, чтобы изменить целиком точку зрения на объект исследований. Внезапные наблюдения неожиданного явления, которые приводят к новому пониманию, довольно редки в науке. Можно стараться подготовиться к таким наблюдениям, но обычно приходится иметь дело с добавлением лишь небольших фрагментов к существующей доктрине. В любом случае, у нас не было времени фило-

Это очень запоминающийся момент — когда новое экспериментальное оборудование вводится в действие на новом ускорителе, особенно когда новый ускоритель дает возможность исследовать неизвестные еще области энергии. Мы были близки к реализации самого обширного из когда-либо планировавшихся физических проектов, чтобы заглянуть в те области, куда еще никто не заглядывал. Около десятилетия раздумий и самоотверженной работы сотен людей должны были проверяться в тот вечер. В такие минуты часто огорчают последние неучтенные проблемы, но нам сопутствовала удача. Подготовка прошла гладко, мишень наполнили водородом, и вскоре компьютер уже анализировал события. Через несколько минут заметный упругий пик показался на $p-\theta$ -дисплее, который сортировал происходящие события по бинам, отвечающим отсчетам счетчиков гадоскопов импульса и угла (рис. 34). Данные на трехмерном графике пересчитывались на двумерный график зависимости счета от недостающей массы (рис. 35), а затем пересчитывались на сечения и формфакторы. Следующие две недели мы обрабатывали данные и проводили различные проверки. Система работала хорошо — мы могли обрабатывать данные достаточно быстро и менять как

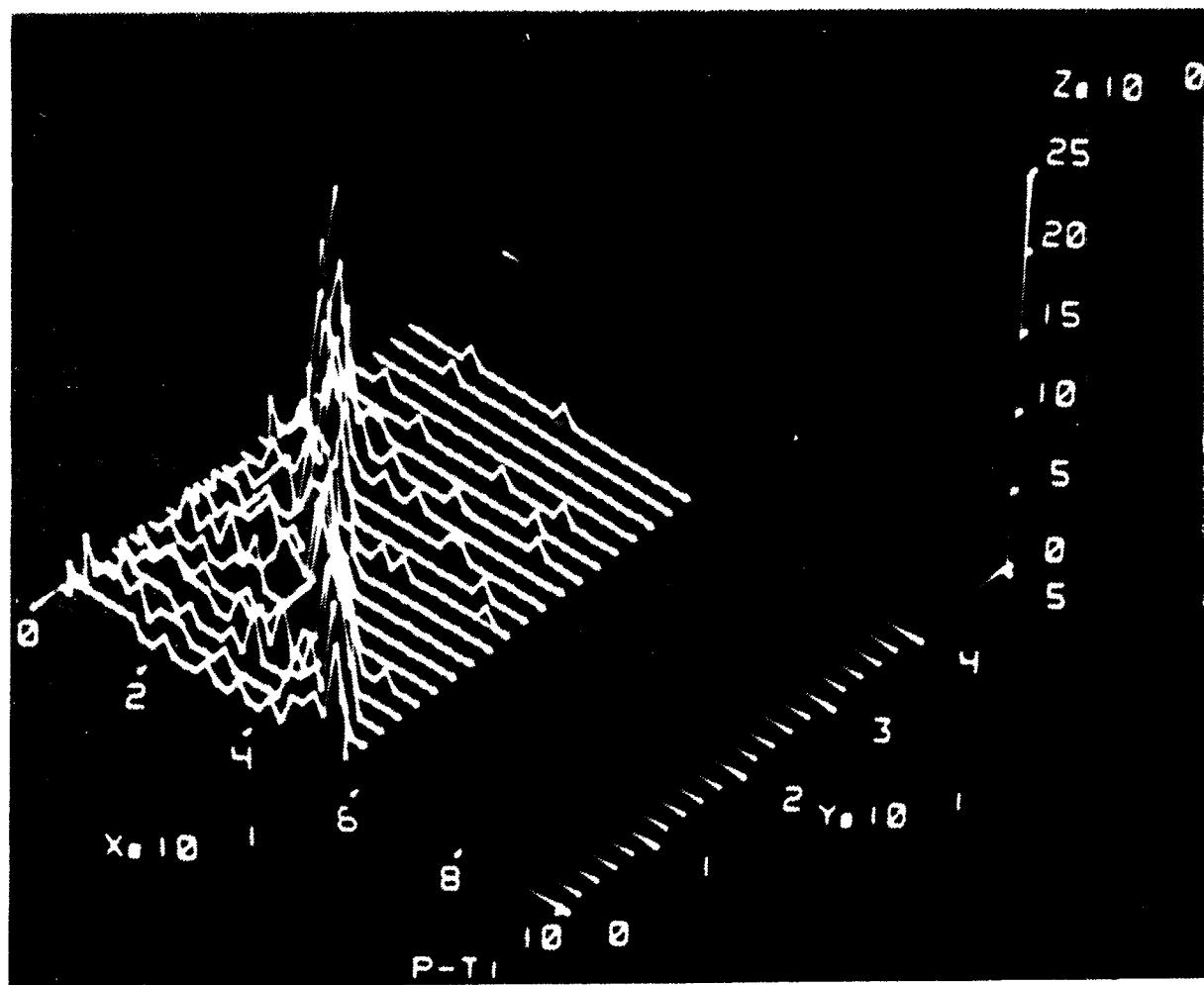


Рис. 34. Демонстрация на дисплее компьютера положения частиц в фокальной плоскости после прохождения p - и θ -голоскопов спектрометра 8 ГэВ. Ясно видна линия, отвечающая упругому рассеянию

софствовать по поводу "упругих" результатов, потому что мы были заняты подготовкой "неупругих" экспериментов. Они начались в августе 1967 г. с использованием спектрометра на 20 ГэВ.

В этой лекции я попытался отметить значение развития ускорителей и экспериментального оборудования для большой серии экспериментов по электронному рассеянию в Стэнфорде и других местах. Полезность многомасштабных экспериментальных лабораторий была продемонстрирована позже в работе по структуре ядра с мюонами и нейтрино в Фермилабе и ЦЕРНе. Сейчас это общепринято в физике высоких энергий, во многом благодаря прошлым успехам подобной организации при изучении электронного рассеяния.

Стэнфордский линейный ускоритель и соответствующий первоначальный комплекс экспериментального оборудования получили финансовую поддержку правительства США через (как он называется сейчас) Департамент энергетики. Нам был дан шанс подготовить аппаратуру, которая подходила бы для исследований, возможных на новом ускорителе. Большие изменения в масштабе научных исследований в течение нашего столетия не затронули одной из важнейших забот физика-экспериментатора — создание качественного экспериментального оборудования, которое подходит к решаемой проблеме. В те дни эффективность аппаратуры представлялась более важной, чем ее цена, и мы надеемся, что "физический выход" с оборудования на ко-

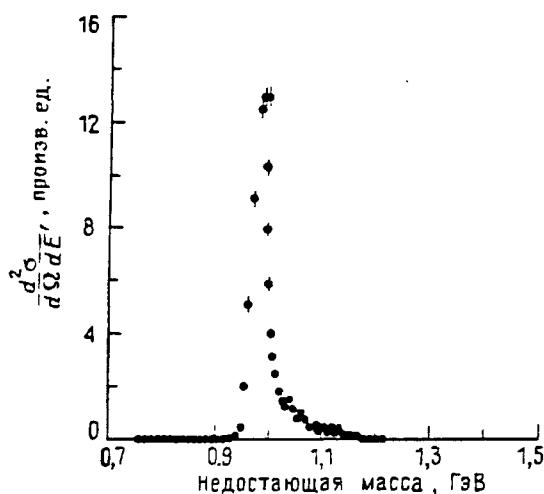


Рис. 35. Те же данные, что на рис. 34, изображенные в зависимости от недостающей массы в каждом событии. (Пик сдвинут с массы протона 938 МэВ из-за небольших расхождений в калибровке энергий у регулировки пучка и спектрометра)

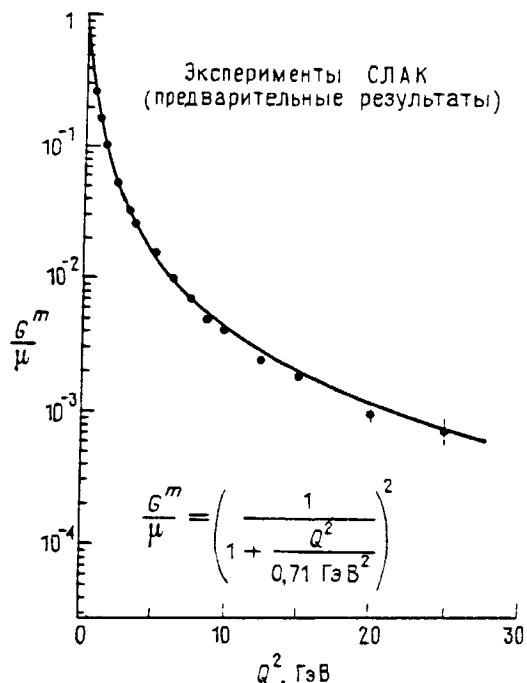


Рис. 36. Магнитный формфактор, измеренный в СЛАКе в 1967 г. "Дипольная" кривая та же, что и на рис. 25, но продолженная здесь до $Q^2 = 25 \text{ ГэВ}^2$. Опять нет полного согласия, но кривая вполне хорошо описывает общее поведение

нечной станции А целиком окупил вложенные в нее средства.

Летом 1967 г. СЛАК начал длительную и продуктивную программу экспериментов. История одного из этих экспериментов будет изложена в лекции профессора Кендалла.

(Перевод в англ. А.В. Маршакова)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] *Kendall H. W. Deep Inelastic Scattering: Experiments on the Proton and the Observation of Scaling.* — 1990 Nobel Lecture in Physics. — (Перевод в этом номере "УФН".)
2. *Friedman J.I. Deep Inelastic Scattering: Comparisons with the Quark Model of Hadrons.* — 1990 Nobel Lecture in Physics — (Перевод там же).
3. *Friedman J.I., Kendall H.W., Taylor R.E. Deep Inelastic Scattering: Acknowledgments.* — (Перевод там же).
4. *Geiger H., Marsden E.//Proc. Roy. Soc., 1909. V. 82. P. 495.*
5. *Rutherford E.//Phil. Mag. 1911. V. 21. P. 669.*
6. *Franck J., Hertz G.//Verh. Dtsch. Phys. Ges. 1914. Bd. 16. S. 457.*
7. *Rose M.E.//Phys. Rev. 1948. V. 73. P. 279.*
8. *Schiff L.I. Summary of Possible Experiments with a High Energy Linear Electron Accelerator. SUML-102.* — Stanford University, Microwave Laboratory, 1949 (unpublished).
9. *Rosenbluth M.N.//Phys. Rev. 1950. V. 79. P. 615.*
10. *Lyman E.M., Hanson A.O., Scott M.B.//Ibidem. 1951. V. 84. P. 626.*
- [11] *Fregeau J.H., Hofstadter R.//Ibidem. 1955. V. 99. P. 1503.*
12. *Hofstadter R., Fechter H.R., McIntyre J.A.// Ibidem. 1953. V. 91. P. 422.*
13. *Hofstadter R., McAllister R.W.//Ibidem. 1955. V. 98. P. 217.*
14. *Hofstadter R.//Rev. Mod. Phys. 1956. V. 28. P. 214.*
15. *Proposal for a Two Mile Linear Electron Accelerator.* — Stanford University, April 1957.
16. *The Stanford Two Mile Accelerator/Ed. R.B. Neal.* — New York: W.A. Benjamin, 1968.
17. *Buchanan C.D. et al.//Proc. of the 1965 Intern. Symposium on Electron and Photon Interactions at High Energies. Hamburg, Germany/Eds. G. Hohler et al.* — Hamburg, Deutsche Phys.

- Gesellschaft, 1965. — P. 20. — Presented by R. Hofstadter. — См. также цит. литературу.
18. Wilson R.R. et al.//Nature. 1960. V. 188. P. 94.
 19. Wilson R.R.//Nucl. Instrum. 1957. V. 1. P. 101.
 20. Berkelman K. et al.//Phys. Rev. 1965. V. 130. P. 2061.
 - [21] Dunning J.R. et al.//Phys. Rev. Lett. 1964. V. 13. P. 631, and op. cit.
 22. Behrend H.J. et al.//Nuovo Cimenlo. 1967. V. A3. P. 140, and op. cit.
 23. Bartel W. et al.//Phys. Rev. Lett. 1966. V. 17. P. 608, and op. cit.
 24. Schwinger J.//Phys. Rev. 1949. V. 75. P. 898.
 25. Panofsky W.K.H., Newton C., Yodh G.B.//Ibidem. 1955. V. 98. P. 751.
 26. Panofsky W.K.H., Woodward W.M., Yodh G.B.//Ibidem. 1956. V. 102. P. 1392.
 27. York G.B., Panofsky W.K.H.//Phys. Rev. 1957. V. 105. P. 731.
 28. Alvarez R.A. et al.//Rev. Sci. Instrum. 1960. V. 31. P. 556.
 29. Panofsky W.K.H., Allton E.A.// Phys. Rev. 1958. V. 110. P. 1155.
 30. Ohlsen G.G.//Ibidem. 1960. V. 120. P. 584.
 - [31] Drell S.D., Walecka J.D.// Ann. Phys. New York. 1964. V. 28. P. 18.
 32. Hand L.//Phys. Rev. 1963. V. 129. P. 1584.
 33. Cone A.A. et al.//Phys. Rev. Lett. 1965. V. 14. P. 326.
 34. Brasse F.W. et al.// Nuovo Cimento, 1968. V. 55. P. 679.
 35. Taylor R.E.//Proc. of the 1967 Intern. Symposium on Electron and Photon Interactions at High Energies. — Stanford Linear Accelerator Center, 1967. — P. 70.