

Г.И.Будкер, Е.А.Кушниренко, Р.Л.Лебедев,
А.А.Наумов, А.П.Онучин, С.Г.Попов,
В.А.Сидоров, А.Н.Скринский,
Г.М.Тумайкин

**Проверка квантовой электродинамики
в рассеянии электронов на электронах**

Препринт

Г.И.Будкер, Е.А.Кушниренко, Р.Л.Лебедев,
А.А.Наумов, А.П.Онучин, С.Г.Попов,
В.А.Сидоров, А.Н.Скринский, Г.М.Тумайкин

ПРОВЕРКА КВАНТОВОЙ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ
В РАССЕЯНИИ ЭЛЕКТРОНОВ НА ЭЛЕКТРОНАХ

г.Новосибирск
1967

А Н Н О Т А Ц И Я

На встречных электронных пучках накопителя ВЭП-I измерено угловое распределение рассеяния электронов на электронах в диапазоне углов 40° - 90° при трех значениях энергии 2x43, 2x135 и 2x160 Мэв. Измерения проведены при помощи системы искровых камер с фотографической регистрацией. Результаты эксперимента подтверждают справедливость законов квантовой электродинамики вплоть до расстояний 0,5 ферми с достоверностью 95%.

Основной задачей создания первой в Институте ядерной физики Сибирского отделения АН СССР установки ВЭП-I со встречными пучками электронов /1/ явилась разработка метода встречных пучков, открывающего новые возможности для экспериментов по физике высоких энергий. Успешное проведение на этой установке первых измерений электрон-электронного рассеяния /2/ так же, как и аналогичные результаты принстон-станфордской группы физиков /3/, доказали практическую осуществимость нового метода.

В точности экспериментов по проверке применимости квантовой электродинамики на малых расстояниях наша установка уступает принстон-станфордской из-за меньшей предельной энергии. Несмотря на это, актуальность вопроса и новизна метода делают измерения углового распределения электрон-электронного рассеяния на установке ВЭП-I не только оправданными, но и представляющими значительный интерес.

Во второй половине 1965 г. и первой половине 1966 г. на установке проведены три серии таких измерений при энергии электронов 2x43, 2x135 и 2x160 Мэв. Первое значение соответствует энергии инжекции электронов в накопитель, второе - номинальному режиму, третье было достигнуто после форсирования магнитной системы накопителя. Результаты предварительной обработки первых двух серий измерений уже опубликованы /2,4/; настоящая статья подводит итоги обработки всех трех серий.

Магнитные дорожки накопителя установки ВЭП-I имеют радиус 43 см и расположены таким образом, что их медианная плоскость вертикальна и одно кольцо находится над другим. Против точки ка-

сания орбит в общей части полжсов магнита сделаны щели для вывода электронов, претерпевших рассеяние в области встречи.

На рис.1 изображена схема эксперимента по измерению углового распределения электрон-электронного рассеяния в диапазоне углов 50° - 140° . Регистрация рассеянных электронов производится системой цилиндрических искровых камер, расположенных концентрично вокруг вертикальной оси, проходящей через центр области встречи. Объектив фотокамеры расположен на той же оси. Используемая система призм имеет аксиальную симметрию. Пластины искровых камер изготовлены из листов дюралюминия толщиной 0,3 мм. Большие камеры имеют по 4 искровых промежутка шириной 1 см, малые - по 2. Радиус центральной пластины большой камеры 82 см, малой - 41 см. Каждая камера имеет шкалу с градусными делениями. Вторая координата трека измеряется при помощи наклонных зеркал, расположенных под искровыми камерами.

Запуск искровых камер производится системой из 10 сцинтилляционных счетчиков, включенных в схему совпадений. Разрешающее время схемы совпадений $2\tau = 10$ нсек, эффективность регистрации не ниже 95%. Расположение регистрирующей системы в горизонтальной плоскости служит достаточно хорошей защитой от космического излучения.

При работе на энергии инжекции каждый импульс инжектора используется для добавления электронов на одну из дорожек накопителя. Работа при более высокой энергии распадается на отдельные циклы измерений длительностью около 400 сек. Половина этого времени затрачивалась на накопление электронов и подъем энергии. Измерения начинались при токах около 50 ма и прекращались при снижении произведения токов в 10 раз.

Настройка оптимальных условий встречи пучков и оперативный контроль за сохранением этих условий во время эксперимента проводились при помощи системы сцинтилляционных счетчиков, регистрирующих электрон-электронное рассеяние под малым углом /5/.

Измерения велись в трех режимах: основном рабочем режиме - "эффект", при разведении электронных пучков по фазе или в аксиальном направлении - "фон" и в отсутствии пучков - "космика". Циклы измерений эффекта и фона непрерывно чередовались. Удобным

монитором при этом служил куламетр- прибор для измерения "дебита" установки, определенного как интеграл по времени от произведения токов пучков /4/. Естественной единицей измерения дебита является кулам (кулон x ампер).

Во всех трех сериях измерений было получено около 100 тысяч фотокадров. На рис.2 изображена фотография типичного случая электрон-электронного рассеяния. При просмотре в качестве "подозрительных" были выделены кадры, на которых траектории разлета двух электронов грубо коллинеарны. Информация о подозрительных кадрах введена в электронную вычислительную машину, которая, восстанавливая пространственную картину события, проверяет выполнение некоторых геометрических условий. Для события рассеяния траектории обоих электронов должны быть коллинеарны (условия на $\Delta\theta$ и $\Delta\psi$) и пересекать медианную плоскость накопителя в одной точке (условия на ΔX и ΔY), эта точка должна находиться в области встречи пучков (условия на \bar{X} и \bar{Y}).

По сравнению с предварительной обработкой /4/ критерии события рассеяния были сделаны более жесткими, что позволило снизить фон до пренебрежимо малой величины и тем избавило нас от возможных ошибок при его нормировке. Дело в том, что нормировка фона по куламетру не совсем корректна из-за неизбежного влияния на время жизни электронов в накопителе эффектов, связанных со взаимодействием двух пучков между собой.

Для иллюстрации эффективности выделения событий рассеяния на рис.3 показаны гистограммы распределения по параметру $\Delta\theta$, характеризующему отклонение от коллинеарности в плоскости рассеяния, до процесса выделения и после для серии измерений при энергии 2×160 Мэв.

Апертура регистрирующей системы ограничивается размером довольно узких щелей в магнитной системе накопителя, сделанных для вывода электронов, претерпевших рассеяние. Определение эффективной ширины апертуры осложняется тем, что движение электронов в области встречи происходит по круговым орбитам. Поэтому лишь для центра этой области электроны, претерпевшие упругое рассеяние, разлетаются коллинеарно в лабораторной системе координат. Легко показать, что для случая равной апертуры ($\Delta\psi = \Delta\psi \sin\theta = const$) этот эффект не искажает углового распределения. В общем случае

сания орбит в общей части полюсов магнита сделаны щели для вывода электронов, претерпевших рассеяние в области встречи.

На рис.1 изображена схема эксперимента по измерению углового распределения электрон-электронного рассеяния в диапазоне углов 50° - 140° . Регистрация рассеянных электронов производится системой цилиндрических искровых камер, расположенных концентрично вокруг вертикальной оси, проходящей через центр области встречи. Объектив фотокамеры расположен на той же оси. Используемая система призм имеет аксиальную симметрию. Пластины искровых камер изготовлены из листов дюралюминия толщиной 0,3 мм. Большие камеры имеют по 4 искровых промежутка шириной 1 см, малые - по 2. Радиус центральной пластины большой камеры 82 см, малой - 41 см. Каждая камера имеет шкалу с градусными делениями. Вторая координата трека измеряется при помощи наклонных зеркал, расположенных под искровыми камерами.

Запуск искровых камер производится системой из 10 сцинтилляционных счетчиков, включенных в схему совпадений. Разрешающее время схемы совпадений $2\tau = 10$ нсек, эффективность регистрации не ниже 95%. Расположение регистрирующей системы в горизонтальной плоскости служит достаточно хорошей защитой от космического излучения.

При работе на энергии инжекции каждый импульс инжектора используется для добавления электронов на одну из дорожек накопителя. Работа при более высокой энергии распадается на отдельные циклы измерений длительностью около 400 сек. Половина этого времени затрачивалась на накопление электронов и подъем энергии. Измерения начинались при токах около 50 ма и прекращались при снижении произведения токов в 10 раз.

Настройка оптимальных условий встречи пучков и оперативный контроль за сохранением этих условий во время эксперимента проводились при помощи системы сцинтилляционных счетчиков, регистрирующих электрон-электронное рассеяние под малым углом /5/.

Измерения велись в трех режимах: основном рабочем режиме - "эффект", при разведении электронных пучков по фазе или в аксиальном направлении - "фон" и в отсутствии пучков - "космика". Циклы измерений эффекта и фона непрерывно чередовались. Удобным

монитором при этом служил куламетр- прибор для измерения "дебита" установки, определенного как интеграл по времени от произведения токов пучков /4/. Естественной единицей измерения дебита является кулам (кулон x ампер).

Во всех трех сериях измерений было получено около 100 тысяч фотокадров. На рис.2 изображена фотография типичного случая электрон-электронного рассеяния. При просмотре в качестве "подозрительных" были выделены кадры, на которых траектории разлета двух электронов грубо коллинеарны. Информация о подозрительных кадрах введена в электронную вычислительную машину, которая, восстанавливая пространственную картину события, проверяет выполнение некоторых геометрических условий. Для события рассеяния траектории обоих электронов должны быть коллинеарны (условия на $\Delta\theta$ и $\Delta\psi$) и пересекать медианную плоскость накопителя в одной точке (условия на ΔX и ΔY), эта точка должна находиться в области встречи пучков (условия на \bar{X} и \bar{Y}).

По сравнению с предварительной обработкой /4/ критерии события рассеяния были сделаны более жесткими, что позволило снизить фон до пренебрежимо малой величины и тем избавило нас от возможных ошибок при его нормировке. Дело в том, что нормировка фона по куламетру не совсем корректна из-за неизбежного влияния на время жизни электронов в накопителе эффектов, связанных со взаимодействием двух пучков между собой.

Для иллюстрации эффективности выделения событий рассеяния на рис.3 показаны гистограммы распределения по параметру $\Delta\theta$, характеризующему отклонение от коллинеарности в плоскости рассеяния, до процесса выделения и после для серии измерений при энергии 2×160 Мэв.

Апертура регистрирующей системы ограничивается размером довольно узких щелей в магнитной системе накопителя, сделанных для вывода электронов, претерпевших рассеяние. Определение эффективной ширины апертуры осложняется тем, что движение электронов в области встречи происходит по круговым орбитам. Поэтому лишь для центра этой области электроны, претерпевшие упругое рассеяние, разлетаются коллинеарно в лабораторной системе координат. Легко показать, что для случая ровной апертуры ($\Delta\psi = \Delta\varphi \sin\theta = const$) этот эффект не искажает углового распределения. В общем случае

для вычисления влияния этого эффекта на измеряемое угловое распределение необходимо знать форму области взаимодействия, определение которой с достаточной точностью представляет значительные трудности. Поэтому оказалось целесообразным пожертвовать значительной частью зарегистрированных событий рассеяния, выделив для дальнейшей обработки группу, соответствующую равной ($\Delta\psi = 6,6^\circ$) и свободной от краевых эффектов рабочей апертуры.

В таблице показано последовательное уменьшение числа фотографий для всего процесса отбраковки. Зарегистрированное число событий согласуется с ожидаемым, но точность такого сравнения невелика из-за трудностей измерения поперечных размеров пучков.

Для количественной характеристики точности эксперимента по проверке применимости квантовой электродинамики на малых расстояниях, по аналогии с процедурой обработки, принятой принстон-стенфордской группой физиков /6/, использован фейнмановский регулятор функции распространения фотона:

$$\frac{1}{q^2} \rightarrow \frac{1}{q^2} \cdot \frac{1}{1-\lambda^2 q^2}$$

Методом наибольшего правдоподобия по экспериментальному угловому распределению рассеяния электронов на электронах было определено оптимальное значение λ^2 и его статистическая ошибка. В расчетах приняты во внимание радиационные поправки /7/, хотя их угловая зависимость очень слаба и не приводит к изменению углового распределения меллеровского рассеяния больше чем на 2%.

Результаты расчетов по каждой серии измерений приведены в таблице. На рис.4 показаны расчетные кривые угловых распределений для значений λ^2 , отличающихся от оптимального на одно средне-квадратичное отклонение, и наши экспериментальные результаты. Оценивая в 5% возможную величину систематической ошибки при измерении углового распределения, получаем по результатам всех измерений

$$\lambda^2 = 0,10 \pm 0,10 \text{ ферми}^2.$$

Таким образом с достоверностью 95% гипотетический предел применимости квантовой электродинамики на малых расстояниях $\lambda < 0,5$ ферми ($\lambda^{-1} > 0,4$ Гэв/с).

Авторы считают своим приятным долгом поблагодарить всех со-трудников, принимавших участие в проведении измерений и их обработке.

Таблица

	2x43 Мэв		2x135 Мэв		2x160 Мэв		космика
	эффект	ф о н	эффект	ф о н	эффект	ф о н	
Дебит (кулам)	126,9	59,5	62,7	27,6	104,4	47,8	-
Время (час)	29,2	12,3	44,5	17,3	44,1	22,4	59,7
Полное число кадров	23956	7734	20620	8734	19680	10154	7766
Число "подозрительных" кадров	4938	1229	4596	1664	4013	1616	294
Число "событий рассеяния"	880	25	932	4	848	4	16
Вне краевой зоны	349	9	425	0	393	0	0
λ^2 (ферми ²)	-1,0±1,4		0,14±0,15		0,09±0,10		

Подписи к рисункам

Рис.1. Схема расположения регистрирующей системы:

- 1 - магнит накопителя, 2 - область встречи пучков,
3 - искровые камеры, 4 - зеркала, 5 - призмы,
6 - сцинтилляционные счетчики, 7 - фотокамера.

Рис.2. Типичная фотография события электрон-электронного рассеяния.

Рис.3. Гистограмма распределения $\Delta\theta$ (отклонение от коллинеарности) для "подозрительных" фотокадров (а) и после процедуры выделения событий рассеяния (б).

Рис.4. Угловое распределение электрон-электронного рассеяния при энергии 2×160 Мэв. Показаны кривые для двух значений λ^2 , соответствующих отклонению от оптимального значения на одно среднеквадратичное отклонение.

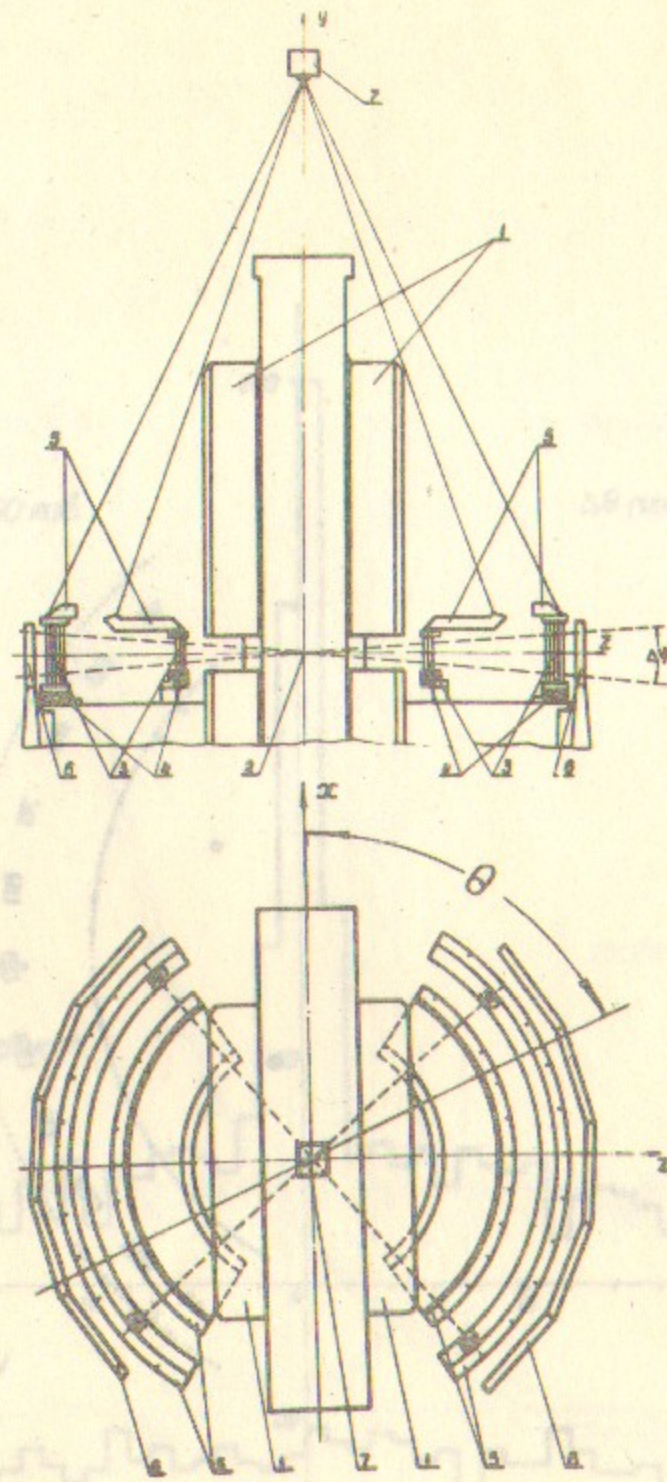


Рис.1

Рис.3(а)

Методы накопления информации о событиях электрон-электронного рассеяния, распределение рассеянных электронов, оптимальное значение λ^2 для данного значения энергии, анализ данных, полученных в результате эксперимента, определение угла рассеяния, определение угла отклонения от оптимального значения, определение угла отклонения от оптимального значения, определение угла отклонения от оптимального значения.

Угловое распределение электрон-электронного рассеяния при энергии 2×160 Мэв. Показаны кривые для двух значений λ^2 , соответствующих отклонению от оптимального значения на одно среднеквадратичное отклонение.

$$\lambda^2 = 0,10 \pm 0,10$$

Такой образ с достаточной точностью описывает поведение системы в области $\lambda^2 < 0,5$ берки ($\lambda^2 > 0,4$ бер/с).

Авторы считают своим долгом выразить благодарность коллегам из ЦЕРН, принимавшим участие в проведении работ по исследованию электрон-электронного рассеяния.

Рис. 1. Схема расположения элементов системы:
1 - магнит линзы, 2 - область жгучих точек,
3 - ионная камера, 4 - детектор, 5 - кристалл,
6 - анализатор спектров, 7 - фотокамера.

Рис. 2. Типичная фотография спектра электронов.

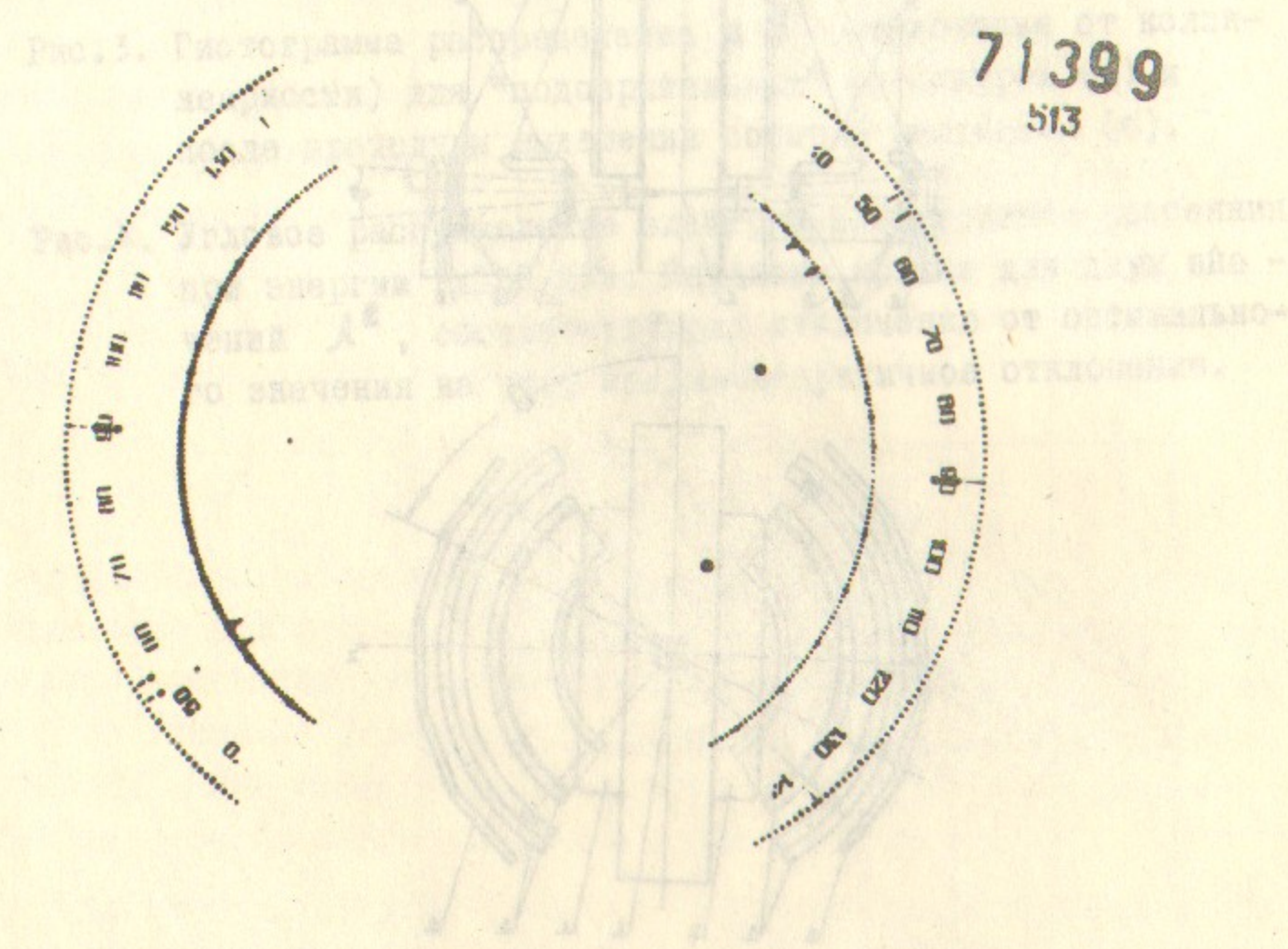


Рис. 2

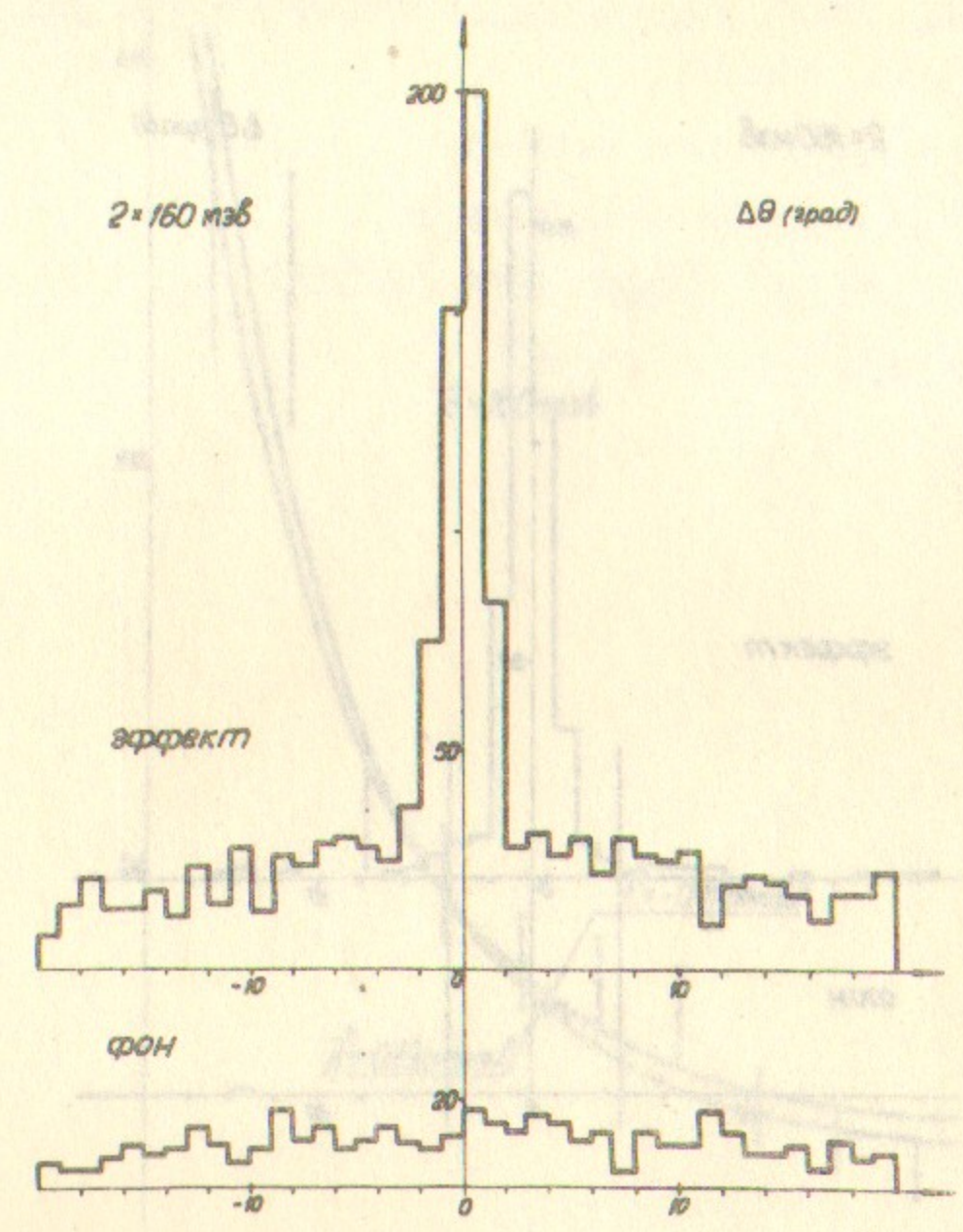


Рис. 3(а)

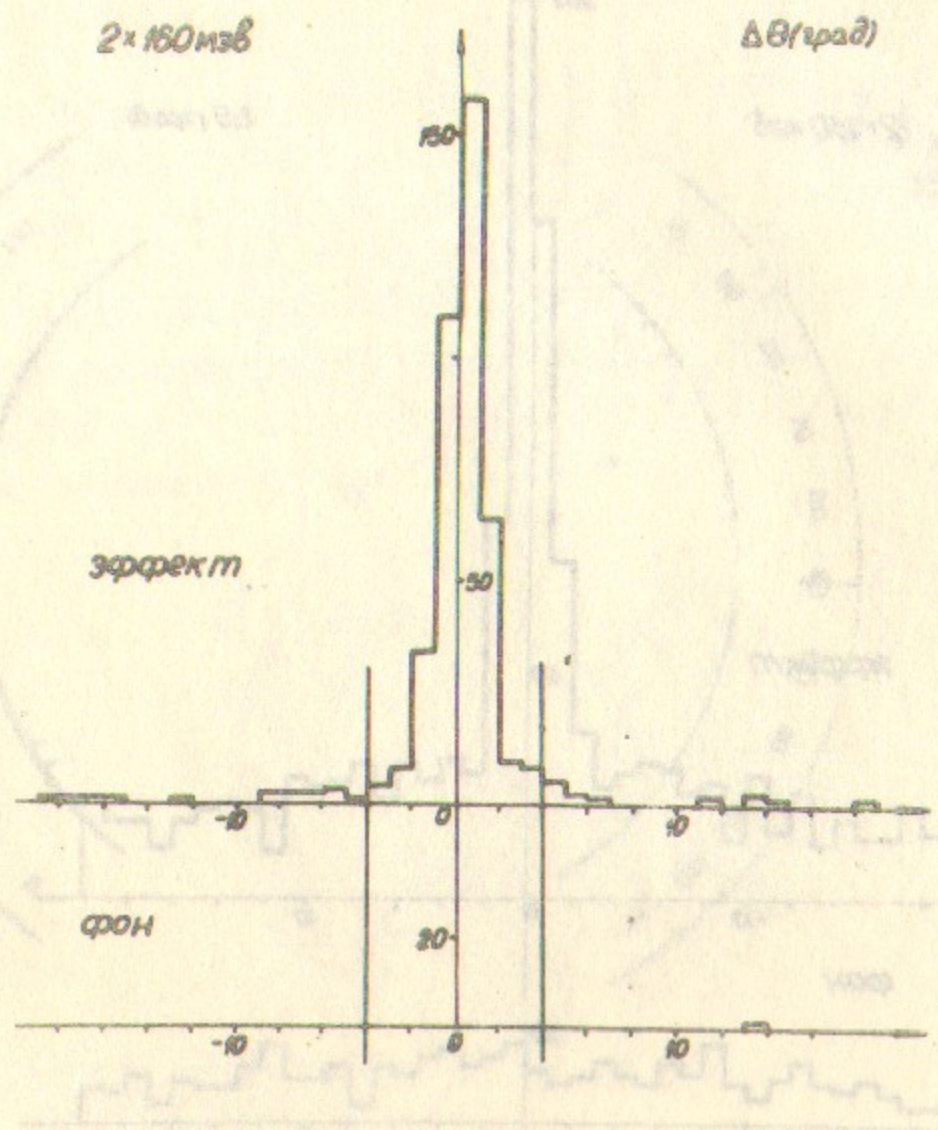


Рис. 3(б)

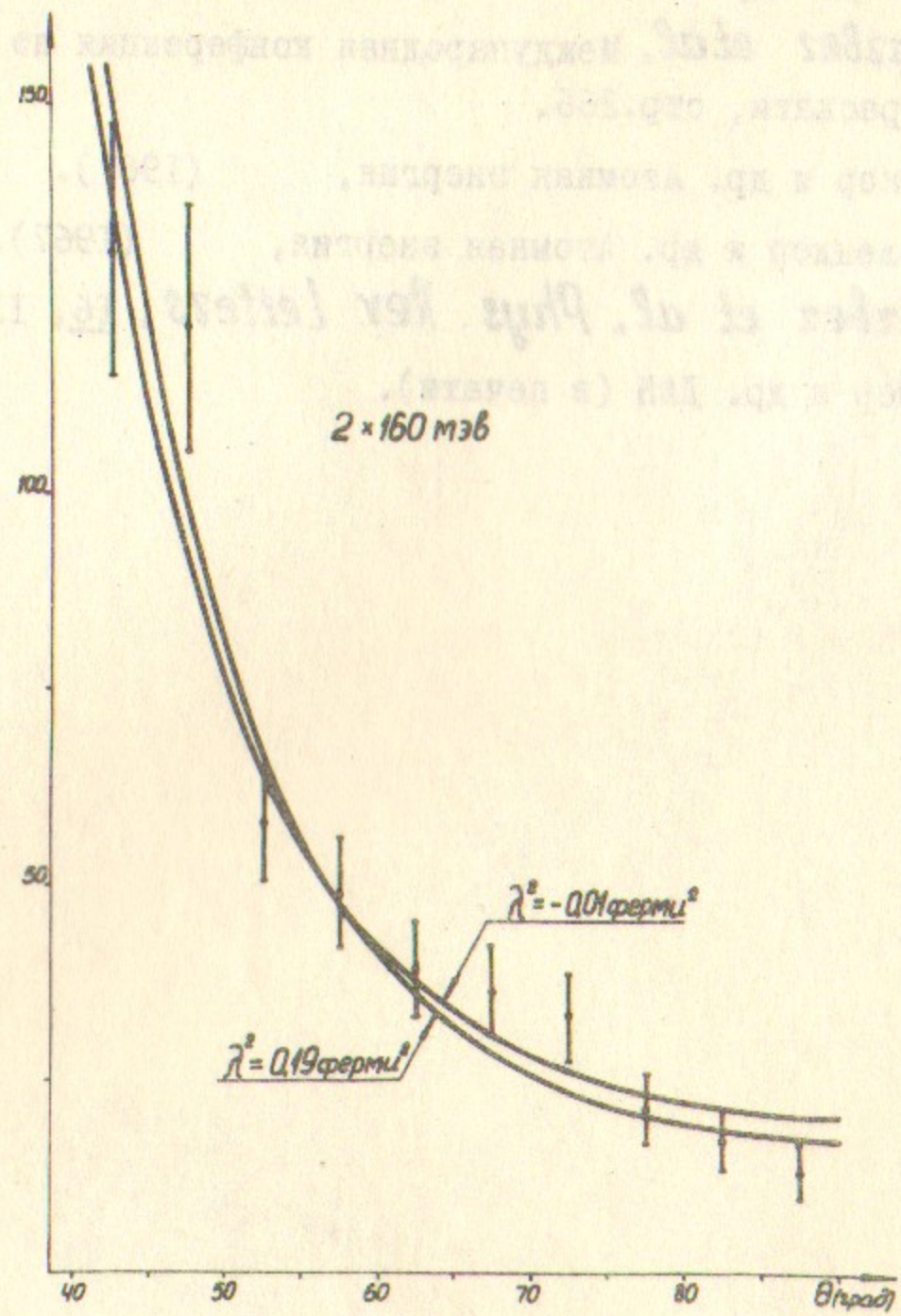


Рис. 4

Л и т е р а т у р а

1. В.Н.Байер и др. Международная конференция по ускорителям, 1963, Дубна, Атомиздат, стр.274.
2. Г.И.Будкер и др. Атомная энергия, 19, 498 (1965)
3. *W.C. Barbez et al.* Международная конференция по ускорителям, 1965, Фраскати, стр.266.
4. Г.И.Будкер и др. Атомная энергия, (1967).
5. В.Л.Ауслендер и др. Атомная энергия, (1967).
6. *W.C. Barbez et al. Phys. Rev. Letters*, 16, 1127 (1966).
7. В.Н.Байер и др. ДАН (в печати).

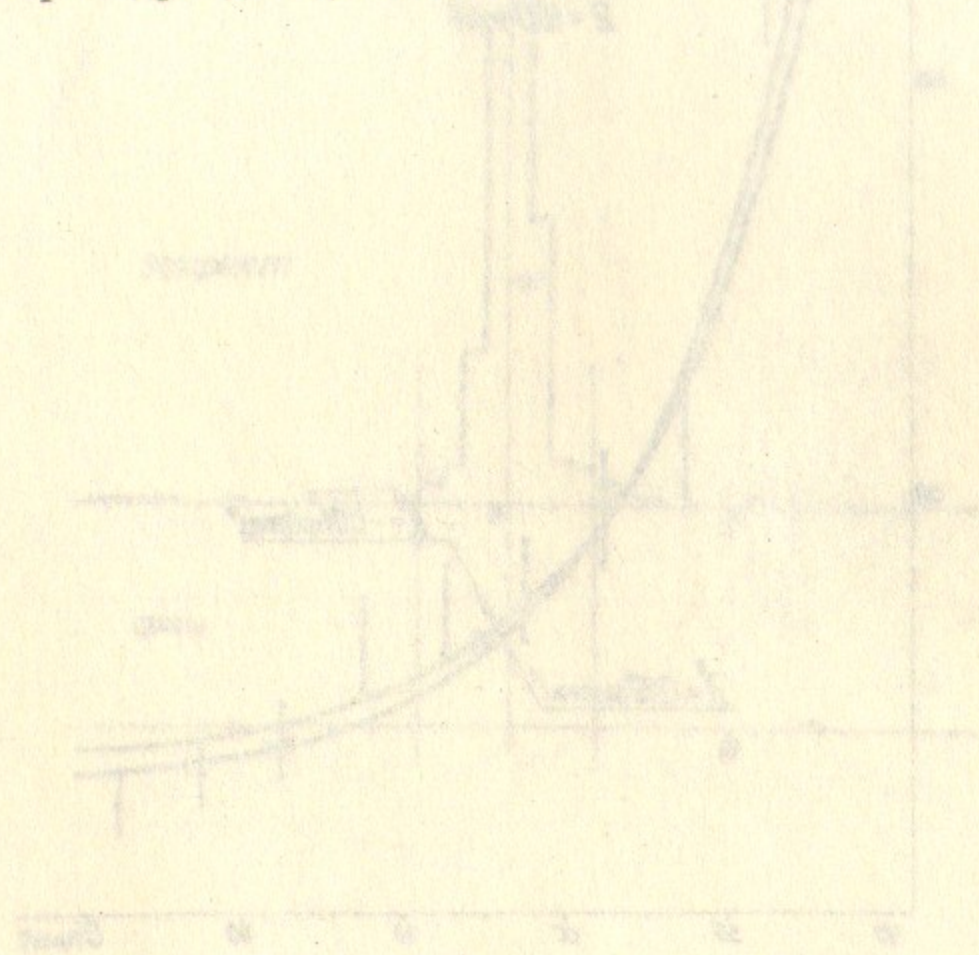


Рис. 1
4. 27

... ..
... ..
... ..
... ..
... ..

Литература

1. В.Я.Васильев и др. Международная конференция по реакциям. 1967, Дубна, Издательство, стр.274.
2. Г.С.Буллард и др. Атомная энергия, 17, 299 (1967).
3. W.C. Barber et al. Международная конференция по реакциям. 1967, Дубна, стр.266.
4. Г.И.Васильев и др. Атомная энергия, (1967).
5. В.Д.Душманов и др. Атомная энергия, (1967).
6. W.C. Barber et al. Phys Rev Letters, 14, 110 (1965).
7. В.Я.Васильев и др. ДАН (в печати).

Ответственный за выпуск Кушниренко Е.А.

Подписано к печати 5.IV-1967 г.

Усл. 0.5 печ.л., тираж 200 экз. Бесплатно

Заказ № 110

Отпечатано на ротапринтере в ИЯФ СО АН СССР