

3-895

2/III-71

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

2634/2-71

P13 - 5866



В.П. Зрелов, П. Павлович, П. Шулк

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

АХРОМАТИЧЕСКИЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ
СРЕДНЕЙ ЭНЕРГИИ ПРОТОНОВ
В ПУЧКЕ 654 МЭВ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИЗЛУЧЕНИЯ
БАВИЛОВА-ЧЕРЕНКОВА

1971

P13 - 5866

В.П. Зрелов, П. Павлович,* П. Шулек *

**АХРОМАТИЧЕСКИЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ
СРЕДНЕЙ ЭНЕРГИИ ПРОТОНОВ
В ПУЧКЕ 654 МЭВ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИЗЛУЧЕНИЯ
БАВИЛОВА-ЧЕРЕНКОВА**

*Направлено в Nuclear Instruments
and Methods*

* Постоянный адрес: кафедра ядерной физики Университета им. Коменского, Братислава (ЧССР).

1. В в е д е н и е

В работах^{/1,2/} уже описаны соответственно монохроматический и апохроматический методы измерения средней энергии протонов в пучке ≈ 660 Мэв от синхроциклотрона Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Ахроматический метод измерения средней энергии протонов по излучению Вавилова-Черенкова, излагаемый в настоящей работе, фактически основан на идеях методов^{/1,2/}.

В этом методе для устранения влияния дисперсии радиатора на точность измерения скоростей частиц используется только одна кольцевая призма аналогично тому, как это предлагалось ранее для счётчиков Черенкова^{/3,4/}.

Такая призма устраняет первый порядок хроматического эффекта. Влияние же остаточного хроматизма на точность измерения уменьшается с помощью широкополосных светофильтров.

В итоге это позволяет получить точность измерения средней энергии протонов в пучке ≈ 660 Мэв, равную $\pm 0,20$ Мэв (т.е. такую же, как и при использовании метода, описанного в^{/2/}), при сравнительно короткой экспозиции (около 2 минут).

II. Метод расчёта ахроматической системы

Пусть заряженная частица движется со скоростью β в оптически изотропной среде с абсолютным показателем преломления n_1 . Тогда, если $\beta n_1 > 1$, то в среде n_1 возникает конус излучения Вавилова-Черенкова с углом при вершине 2θ . Связь между θ , β и n_1 определяется согласно теории Тамма-Франка^{/5/} соотношением

$$\cos \theta(\lambda) = 1 / \beta n(\lambda).$$

Поскольку спектр излучения Вавилова-Черенкова имеет непрерывный характер, то n_1 и θ при заданном β зависят от λ .

Для устранения влияния дисперсии радиатора на точность измерения β в настоящей работе используется ахроматическая кольцевая призма.

Расчёт такой призмы выполнен при следующих условиях:

- а) частица с заданной скоростью β пересекает плоско-параллельный радиатор под углом 90° ;
- б) грань призмы, на которую падает излучение (вышедшее из радиатора) параллельна плоскости радиатора (т.е. плоская);
- в) преломляющий угол призмы обеспечивает одинаковый угол выхода излучения из призмы для двух разных длин волн (такую призму в соответствии с общепринятой терминологией в оптике мы называем ахроматической).

Следует, однако, заметить, что условие расчёта б) приводит к тому, что угол выхода излучения после призмы (при соблюдении условий а) и в)) не может быть выбран произвольно, как это имеет место в апохроматической системе^{/2/}.

Преломляющий угол призмы V и угол ν , под которым (относительно нормали \vec{R}' к плоскости радиатора) излучение распространяется после выхода из призмы, должны удовлетворять законам преломления на гранях призмы (рис. 1).

$$n_1 \sin \theta = n_3 \sin \gamma,$$

$$n_3 \sin(V - \gamma) = n_2 \sin(V - \nu)$$

(1)

и условию ахроматизации $\Delta \nu_{\lambda_1, \lambda_2} = 0$, которое приводит к формуле:

$$\sin^2(V - \nu) = \frac{\left(\frac{n_3}{n_2}\right)^2 (d\gamma_1)^2}{(d\gamma_1)^2 + \left(\frac{dn_2}{n_2} - \frac{dn_3}{n_3}\right)^2},$$

(2)

где

$$d\gamma_1 = n_1 \frac{\sin \theta \left(\frac{dn_1}{n_1} - \frac{dn_3}{n_3}\right) + \cos \theta d\theta}{\sqrt{n_3^2 - n_1^2 \sin^2 \theta}}$$

(3)

По формулам (1), (2) и (3) была рассчитана ахроматическая призма. При скорости частиц $\beta_0 = 0,810$ ($E_p = 661,76$ Мэв) и оптических характеристиках радиатора и призмы, приводимых в табл. 1, угол ν должен лежать в пределах от $64^{\circ}38'$ до $65^{\circ}10'$. При этом направление излучения Вавилова-Черенкова $\lambda_1 = 404,7$ нм и $\lambda_2 = 589,3$ нм будет изменяться соответственно в пределах углов ν от $4^{\circ}54'$ до $3^{\circ}59'$ относительно оси призмы.

Таблица 1

Оптическая деталь	Марка стекла	n_1, n_3 для λ в нм		
		404,7	435,8	546,1
Радиатор	ЛК5	1,49037	1,48717	1,48000
Призма	Б46	1,58928	1,58383	1,57208

Показатели преломления были измерены на контрольных призмах, изготовленных из той же партии стекол, из которых изготавливались радиатор и призма. Измерения производились на гониометре типа ГС-5.

III. Условия эксперимента

Измерения производились на пучке протонов с энергией 654 Мэв, выведенном из синхроциклотрона Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ на расстоянии ≈ 16 метров от выпускного окна камеры ускорителя. Пучок протонов до попадания в прибор формировался коллиматором длиной 4 метра. На входе коллиматора диаметр отверстия был 10 мм, а на выходе - 5 мм.

IV. Описание прибора

Схема прибора показана на рис. 2, а общий вид - на рис. 3. Плоско-параллельный радиатор (1) толщиной 1 мм располагался перпендикулярно оси ахроматической кольцевой призмы (2). Материалом радиатора служило стекло марки ЛК5 с плотностью $\rho = 2,27 \text{ г/см}^3$ и радиационной длиной $X_0 \approx 26,5 \text{ г/см}^2$ ($\bar{Z} = 11,27$, $\bar{A} = 22,9$).

В данном приборе мы использовали ахроматическую кольцевую призму из стекла БФ-6 от счётчика Черенкова для протонов в области энергий (400 + 700) Мэв^{/4/} с плоской гранью и углом $V = 64^{\circ}05'$, величина которого несколько ниже расчётных значений. В связи с этим для нашего случая призма не была оптимальной.

Несмотря на это, призма с $V = 64^{\circ}05'$ уменьшила расходимость излучения Вавилова-Черенкова от протонов с энергией 654 Мэв в 48 раз для диапазона длин волн от 380 нм до 540 нм. Так, на входе в призму угловая расходимость излучения составляла почти 3° (что соответствует изменению в энергии протонов $\Delta E = 47,7 \text{ Мэв}$), а на выходе из призмы - $5,2'$ ($\Delta E = 1,0 \text{ Мэв}$).

Суммарные потери излучения на отражение в радиаторе и призме не превосходили 1%.

Излучение Вавилова-Черенкова, возникшее в радиаторе от пучка протонов, после преломления расходилось широким конусом с углом при вершине $2\tau \approx 111^\circ$. Весь конус захватывался кольцевой ахроматической призмой (2) с плоской входной гранью. После призмы слабо расходящийся конус ($\nu = 5^\circ 37'$) попадал на сферическое зеркало с фокусным расстоянием $f = 219,03$ мм. Ось этого зеркала параллельна оси призмы, но смещена относительно нее вниз на 8 мм. Это позволяет с помощью плоского зеркала (4) эллиптической формы, наклоненного под углом 45° к оси зеркала (3), отвести все излучение в сторону. Сферическое зеркало (3) и плоское зеркало (4) имеют отверстия для свободного прохождения пучка. В фокальной плоскости зеркала (3) помещается кассета с фотопластинкой (5), регистрирующей излучение Вавилова-Черенкова. В опыте использовались фотопластинки типа "Изоорто" со светочувствительностью 90 ед. ГОСТ 10691-63.

С целью уменьшения остаточного хроматизма (после ахроматической призмы) на пути излучения до его попадания на фотопластинку помещались цветные стекла (6) типа ЖС-4 и СЗС12 толщиной 3 и 5 мм соответственно. Весь прибор во время экспозиции закрывался мягким светонепроницаемым чехлом.

Типичное позитивное изображение кольца от излучения Вавилова-Черенкова, зарегистрированное на фотопластинке, показано на рис. 4.

Для получения почернения в фотослое, достаточного для проведения измерений, через радиатор требовалось пропустить $\approx 10^{11}$ протонов (при этом экспозиция не превышала двух минут).

V. Обработка результатов

Негативные изображения колец излучения Вавилова-Черенкова фотометрировались на микрофотометре типа МФ-4 с объективом $\times 6$ при

Таблица 2

№ эксп.	Результаты измерения фотопластинок вдоль направлений						$\bar{E} = \frac{E_1 + E_2 + E_3}{3}$ Мэв
	1		2		3		
	$d_1, \text{мм}$	$E_1, \text{Мэв}$	$d_2, \text{мм}$	$E_2, \text{Мэв}$	$d_3, \text{мм}$	$E_3, \text{Мэв}$	
I	20,68	653,47	20,60	653,24	20,52	653,03	653,25
	20,62	653,25	20,56	653,10	20,54	653,11	653,15
	20,63	653,28	20,60	653,25	20,62	653,39	653,31
2	20,47	652,70	20,49	652,81	20,57	653,21	652,91
	20,50	652,82	20,54	653,00	20,60	653,34	653,05
3	20,59	653,16	20,55	653,06	20,49	652,92	653,05
	20,55	653,00	20,64	653,37	20,56	653,19	653,19
4	20,69	653,53	20,71	653,63	20,57	653,31	653,49
	20,67	653,43	20,78	653,90	20,54	653,09	653,47

ширине щели 0,05 мм и высоте 0,5 мм. Измерения производились вдоль диаметров изображения кольца с шагом 0,1 мм в 4-х местах через 45° . Точность отсчёта по микрометрическому винту была 0,01 мм. При ширине кольца около 8 мм измерялось до 80 значений почернений. Типичная фотометрическая кривая приведена на рис. 5. Значения почернений, полученные на микрофотометре, поправлялись с учётом характеристической кривой для данного сорта фотопластинок.

Обработка данных фотометрирования заключалась в определении расстояния между центрами тяжести кривых пропускания на противоположных концах диаметра кольца изображения.

При переводе линейного размера на фотопластинке в соответствующее значение энергии протонов в радиаторе учитывалась нелинейная зависимость между ними.

Все расчёты производились на ЭВМ типа CDC -1604A.

Чтобы избежать трудностей, связанных с точными ($\approx \pm 0,2$ мм) измерениями расстояния между плоскостью фотопластинки и вершиной сферического зеркала, а также преломляющего угла V кольцевой призмы, мы прокалибровали прибор с помощью специальной плоской эталонной призмы (калибровочной).

Калибровочная призма была изготовлена из той же заготовки, что и кольцевая ахроматическая призма. Преломляющий угол призмы ϕ выбирался таким, чтобы параллельный пучок монохроматического света $\lambda = 435,8$ нм, падающий на призму так, как показано на рис. 6, выходил из нее под углом, близким к углу излучения Вавилова-Черенкова для предполагаемой энергии протонов ($\phi_1 = 66^{\circ}57'37''$, $\phi_2 = 67^{\circ}02'58''$). Калибровка производилась на оптической скамье. Призма помещалась на место радиатора, и с помощью автоколлимационного устройства выпускная ее грань выставлялась в положение, параллельное плоской грани ахроматической призмы. Перед калибровочной призмой в параллельный пучок света устанавливались диафрагмы. Оптическая система прибора

передавала изображение щелей диафрагм в фокальную плоскость. В результате на 1 фотопластинке получились две узкие реперные риски на расстоянии друг от друга $l = (43,23 \pm 0,02)$ мм.

При калибровке перед фотопластинкой устанавливались такие же цветные стекла, что и при работе с пучком протонов. Путем поворота калибровочной призмы вместе с щелевыми диафрагмами шириной 0,5 мм можно было наносить реперные риски вдоль диаметров, по которым производилось фотометрирование кольца излучения Вавилова-Черенкова.

Таким образом, калибровка позволила установить связь между направлением выхода излучения с определенной длиной волны из ахроматической призмы (углом ν) и линейным расстоянием на фотопластинке.

Результаты обработки данных нескольких экспозиций, произведенных 15 декабря 1970 года на пучке протонов от синхроциклотрона, собраны в табл. 2. Для уменьшения ошибок определения диаметра кольца каждая фотопластинка фотометрировалась по 2-3 раза.

Наблюдаемый разброс результирующих значений диаметров колец следует отнести к флуктуациям плотности почернения, а также к случайным ошибкам в процессе микрофотометрирования (колебания яркости лампы микрофотометра, механические сотрясения, неточность шага микрометрического винта перемещения столика).

Средние энергии, приведенные в последнем столбце табл. 2, относятся к энергии протонов в центре радиатора. Для получения средней энергии протонов на входе в радиатор надо к этим значениям добавить ионизационные потери протонов на половине толщины радиатора ($\approx 0,23$ Мэв).

VI. Ошибки измерений средней энергии протонов ахроматическим методом

1. Ошибка калибровки с помощью эталонной призмы

В результате обработки многократных измерений расстояний d_0 между реперными рисками на нескольких фотопластинках была определена

ошибка калибровки $\Delta d_0 = \pm 0,02$ мм. Поскольку в области энергии протонов 654 Мэв соотношение между ΔE и Δd характеризуется величиной $\Delta d/\Delta E = 0,265$ мм/Мэв, то ошибка калибровки $\Delta d = \pm 0,02$ соответствует ошибке $\Delta E_{d_0} = 0,076$ Мэв.

2. Ошибка измерения показателя преломления радиатора

Показатель преломления радиатора измерялся на гониометре ГС-5 с точностью $\Delta n_1 = \pm 2 \cdot 10^{-5}$. Этой ошибке соответствует неопределенность в скорости:

$$\Delta \beta = \beta^3 n_1 \Delta n_1. \quad (4)$$

В нашем случае $n_1 = 1,4876$, $\Delta n_1 = \pm 1 \cdot 10^{-5}$, $\beta = 0,8078$, а $\Delta \beta = \pm 0,00000783$.

Такой ошибке в скорости соответствует ошибка в энергии $\Delta E = 0,058$ Мэв (если $E = 654$ Мэв).

3. Ошибка измерения диаметра кольца от излучения Вавилова-Черенкова

Среднее отклонение $\overline{\Delta E}$ от среднего значения энергии \overline{E} , вычисленного на основе данных микрофотометрических измерений фотопластинок в 3-х разных направлениях (см. табл. 2), составит $\overline{\Delta E}_d = \pm 0,14$ Мэв. Этому значению $\overline{\Delta E}_d$ соответствует ошибка в определении диаметра кольца $\Delta d = \pm 0,14$ мм.

4. Остаточный хроматизм

Для определения ошибки, вносимой остаточным хроматизмом в определение энергии, были произведены расчёты по определению эффективного участка спектра излучения Вавилова-Черенкова, регистрируемого фотопластинками.

Эффективным диапазоном длин волн считался участок спектра $\Delta \lambda = 93$ нм от $\lambda_1 = 400$ нм до $\lambda_2 = 493$ нм.

Таблица 3

№ пп	Источники ошибок	Величина ошибок	$\Delta E_i, \text{МэВ}$	$(\Delta E_i)^2, \text{МэВ}^2$
1.	Определение расстояния калибровочных рисок, Δd_1	$\pm 0,02 \text{ мм}$	$\pm 0,04$	0,0016
2.	Измерение показателя преломления радиатора, Δn_1	$\pm 2 \cdot 10^{-5}$	$\pm 0,06$	0,0036
3.	Определение диаметра черенковского кольца путем обработки фото-метрических данных, Δd_2	$\pm 0,074 \text{ мм}$	$\pm 0,14$	0,0196
4.	Неопределенность в диаметре черенковского кольца, вызванная остаточным хроматизмом Δd_3	$\pm 0,071 \text{ мм}$	$\pm 0,13$	0,0169

$$\sum_i (\Delta E_i)^2 = 0,0417$$

Таблица 4

фактор уширения	Вклад в ширину $\Delta E_i, \text{МэВ}$	$(\Delta E_i)^2, \text{МэВ}^2$
Немонохроматичность первичного пучка протонов ^{16/}	7,0	49,0
Угловая расходимость протонов в пучке	7,6	57,8
Многократное рассеяние протонов в радиаторе	3,6	13,0

$$\sum_i (\Delta E_i)^2 = 119,8$$

При этом вклад в почернение фотослоя от излучения с граничными энергиями λ_1 и λ_2 приблизительно в 5 раз меньше, чем вклад от излучения с $\lambda_{\max} = 435$ нм.

Соответствие между вкладом остаточного хроматизма и неопределенностью радиуса R кольца излучения Вавилова-Черенкова определялось путем тригонометрического расчёта хода лучей с разными λ . Результаты расчёта приведены на рис. 7 в виде зависимостей $R(\lambda)$ и $\nu(\lambda)$. Из этих графиков видно, что в эффективном диапазоне $\Delta\lambda = 93$ нм радиус изменяется в пределах $\Delta R = \pm 0,036$, а энергия $\Delta E_{\Delta\lambda} = \pm 0,14$ Мэв.

Все вышеперечисленные ошибки суммированы в табл. 3.

Результирующая ошибка в определении средней энергии ахроматическим методом, вычисленная как среднеквадратичная ошибка, составляет $\overline{\Delta E} = \pm 0,20$ Мэв.

VII. Разрешающая способность метода

Экспериментальная разрешающая способность ахроматического метода определялась по полной ширине на полувысоте фотометрической кривой, приведенной на рис. 5, и получилась равной $\Delta E_{\text{ПШПВ}} = 12,1$ Мэв. Эта ширина обусловлена факторами, перечисленными в табл. 2, и находится в удовлетворительном согласии с расчётной величиной $\Delta E_{\text{ПШПВ}}^p = 11,0$ Мэв.

Авторы работы благодарны проф. В.П. Желепову за поддержку и внимание к работе, Р. Янику и П. Луптаку за помощь в изготовлении прибора и в проведении измерений, Г. Шулековой за помощь при определении параметров оптической системы, Е.Ю. Агабабян за проведение трудоемких измерений на микрофотометре, Л.П. Писаревой за содействие при выполнении фотографических работ. Авторы благодарят сотрудников фотолaborатории и КБ Laborатории ядерных проблем ОИЯИ за изготовление рисунков, а также сотрудников национального предприятия "Диоптра" (г. Турнов, ЧССР) за изготовление оптических изделий.

Л и т е р а т у р а

1. В.П. Зрелов, М.А. Мусин, П. Павлович, П. Шулек, Р. Яник. Препринт ОИЯИ, Р13-5636, Дубна, 1971.
2. В.П. Зрелов, П. Павлович, П. Шулек. Препринт ОИЯИ, Р13-5637, Дубна, 1971.
3. В.П. Зрелов. Излучение Вавилова-Черенкова и его применение в физике высоких энергий, ч. II, Атомиздат, Москва, 1968, стр. 203.
4. В.П. Зрелов, Д. Коллар, П. Павлович, Я. Ружичка, П. Шулек. Ахроматический счётчик Черенкова с разрешением ± 3 Мэв для протонов в области (400 + 700) Мэв. Сообщение на Международной конференции по аппаратуре в физике высоких энергий, Дубна, сентябрь 1970 г. (Аннотации докладов: Препринт ОИЯИ, 13-5235, Дубна, 1970 г.)
5. И.Е. Тамм, И.М. Франк. ДАН СССР, 14, 107 (1937).
6. И.М. Василевский, Ю.Д. Прокошкин. Препринт ОИЯИ, Р-261, Дубна, 1958.

Рукопись поступила в издательский отдел
14 июня 1971 года.

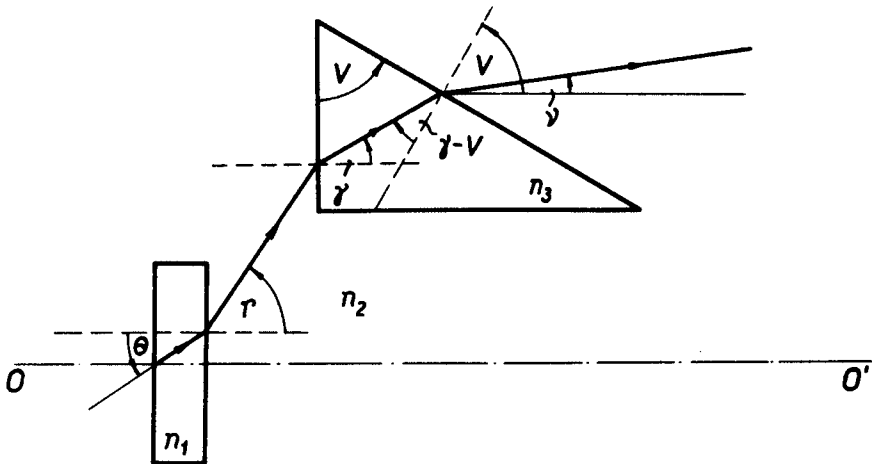


Рис. 1. Ход лучей через радиатор и ахроматическую кольцевую призму.

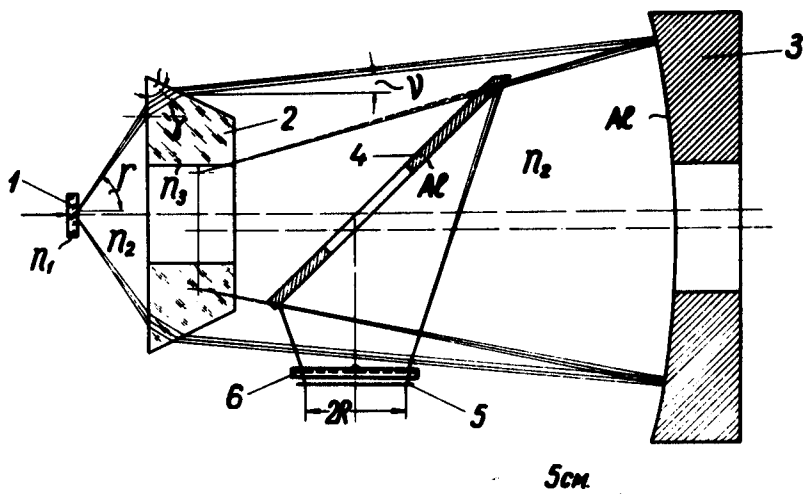


Рис. 2. Схема прибора: 1 - радиатор, 2 - кольцевая ахроматическая призма; 3 - сферическое зеркало с $f = 220$ мм; 4 - плоское эллиптическое зеркало; 5 - фотопластинка; 6 - светофильтры.

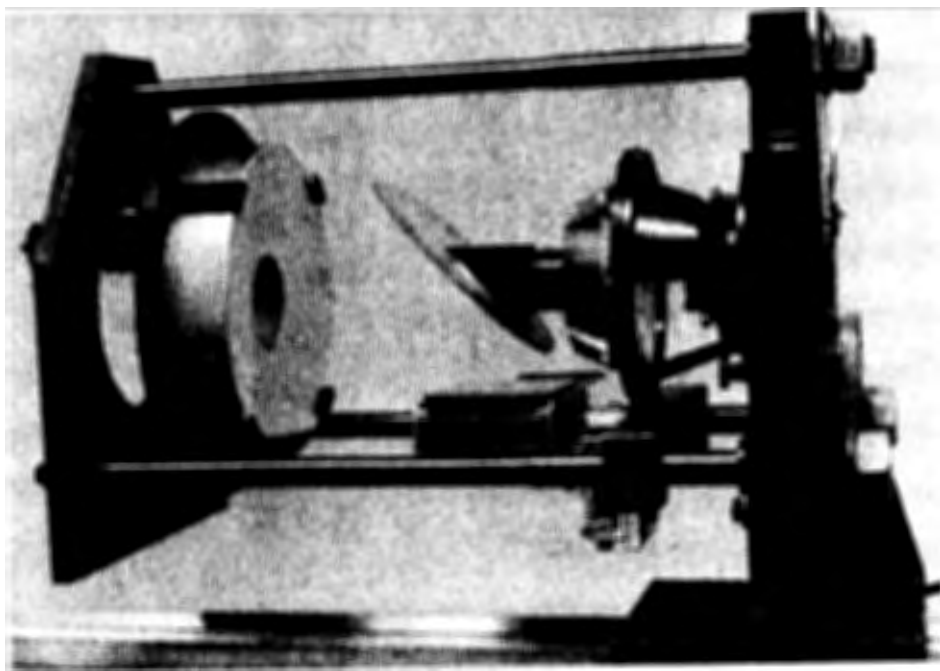


Рис. 3. Общий вид прибора.

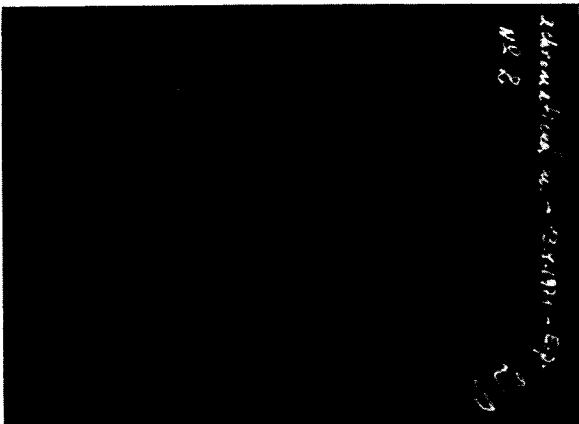


Рис. 4. Типичное позитивное изображение кольца излучения Вавилова-Черенкова, полученное с помощью ахроматического прибора.

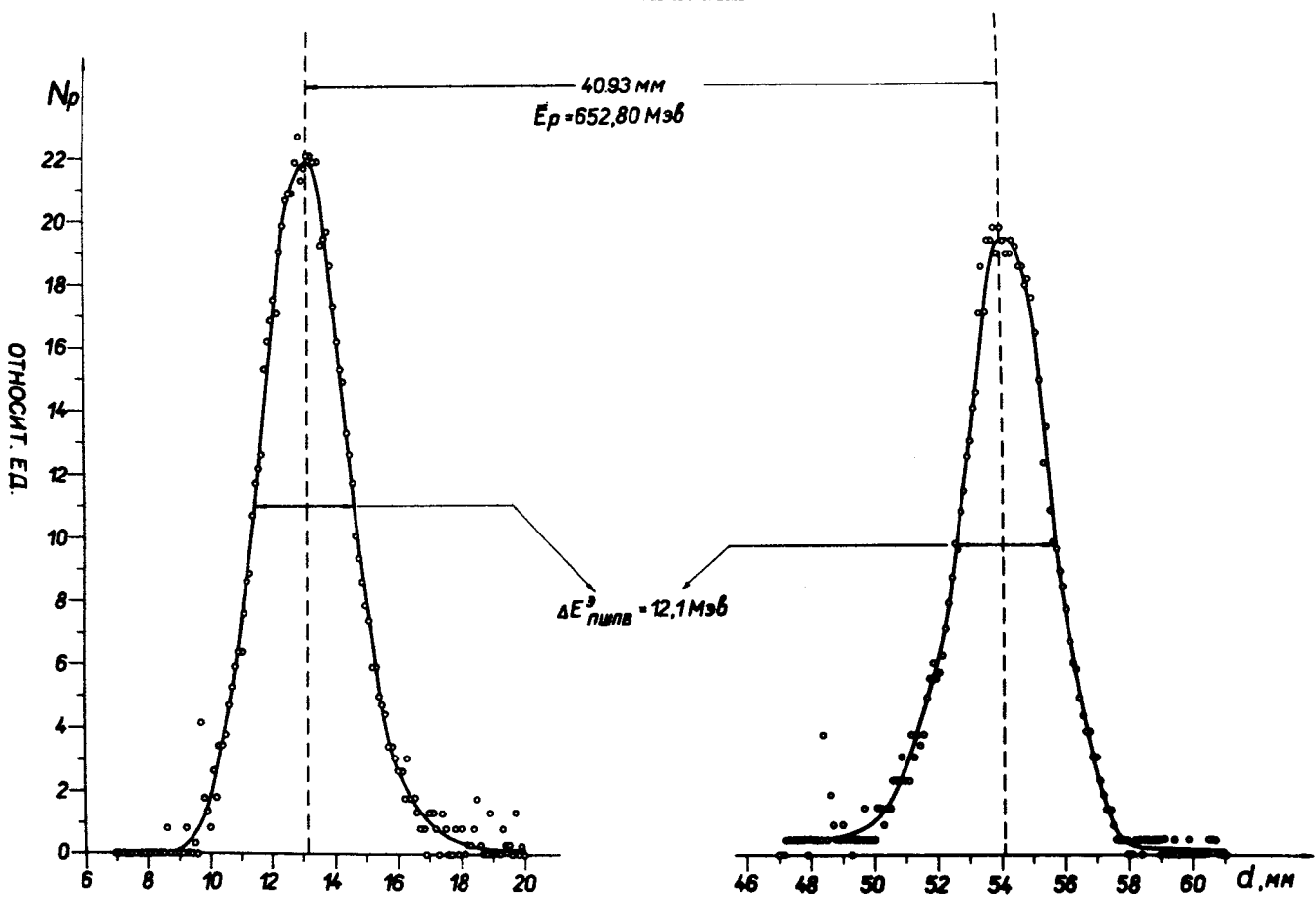


Рис. 5. Типичные фотометрические кривые.

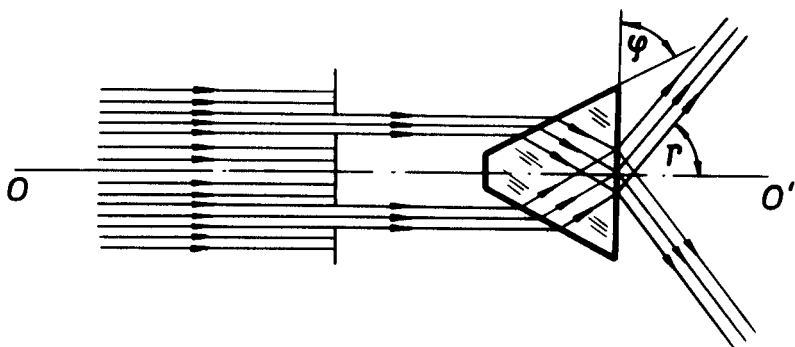


Рис. 6. Ход лучей в калибровочной призме.

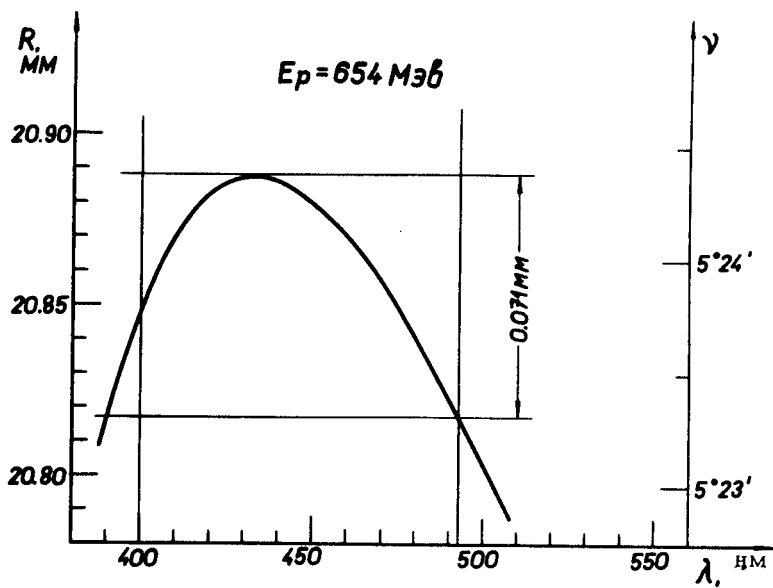


Рис. 7. Зависимости $R(\lambda)$ и $\nu(\lambda)$.