

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

ДУБНА



3-895

1/21/75
P13 - 9202

В.П.Зрелов, В.П.Лупильцев, М.Ф.Шабашов

4653/2-75

ИЗМЕРЕНИЕ

СРЕДНЕЙ ЭНЕРГИИ ПРОТОНОВ В ПУЧКЕ
ОТ СИНХРОЦИКЛОТРОНА ОИЯИ
МЕТОДОМ ДВОЙНОГО ОТРАЖЕНИЯ
ПО ИЗЛУЧЕНИЮ ВАВИЛОВА-ЧЕРЕНКОВА

1975

P13 - 9202

В.П.Зрелов, В.П.Лупильцев, М.Ф.Шабашов

ИЗМЕРЕНИЕ
СРЕДНЕЙ ЭНЕРГИИ ПРОТОНОВ В ПУЧКЕ
ОТ СИНХРОЦИКЛОТРОНА ОИЯИ
МЕТОДОМ ДВОЙНОГО ОТРАЖЕНИЯ
ПО ИЗЛУЧЕНИЮ ВАВИЛОВА-ЧЕРЕНКОВА

*Направлено в Nuclear Instruments
and Methods*

1. Краткое описание метода

Подробно простой метод /метод двойных отражений/ измерения средней энергии в пучках релятивистских частиц по излучению Вавилова-Черенкова описан в работе /1/.

В этом методе коллимированные частицы направляются на радиатор с показателем преломления $n_0(\lambda_0)$, выполненный в виде трехгранной призмы с углами a , приблизительно равными углу испускания излучения Вавилова-Черенкова /рис. 1/. Зеркальное покрытие граней II и III призмы позволяет вывести через грань I излучение Вавилова-Черенкова как прямо падающее на нее, так и дважды отраженное от граней II и III.

Углы γ_1 и γ_2 выхода излучения от диаметрально противоположных частей конуса излучения через грань I призмы-радиатора связаны с углами призмы a и a_1 и скоростью частиц β согласно /1/ выражением

$$\theta_0 = a_1 \pm \arcsin \frac{1}{n'_0} \sqrt{\frac{\sin^2 \frac{\gamma_1 + \gamma_2}{2} - n_0^2 \operatorname{tg}^2 \frac{\gamma_1 + \gamma_2}{2} \sin^2(a_1 - a)}{\cos^2(a_1 - a) - \operatorname{tg}^2 \frac{\gamma_1 + \gamma_2}{2} \sin^2(a_1 - a)} / 1/}$$

где $n'_0 = \frac{n_0}{n_1}$ - относительный показатель преломления призмы, углы γ_1 и γ_2 отсчитываются от нормали к грани I, а знак перед корнем берется /+/, если $\theta_0 > a_1$, и /-/, если $\theta_0 < a_1$.

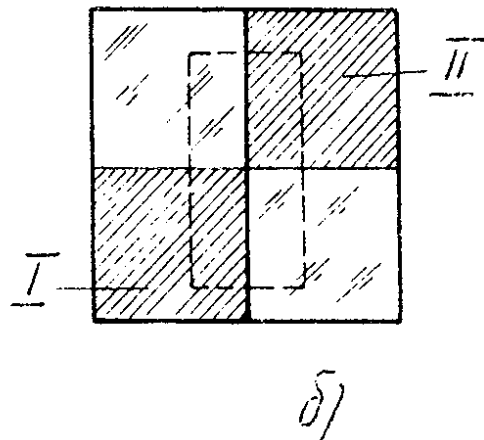
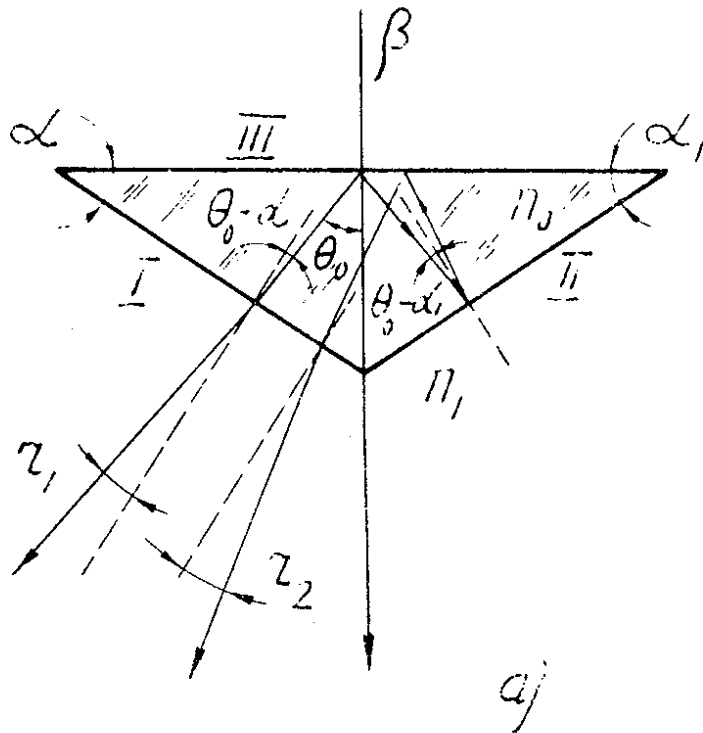


Рис. 1. а/ Ход лучей в призме-радиаторе, б/ вид призмы со стороны выхода пучка.

2. Условия и схема эксперимента

Измерения производились на выведенном коллимированном пучке протонов от синхроциклотрона Лаборатории ядерных проблем. Прибор располагался на расстоянии ≈ 16 м от выпускного окна камеры ускорителя за бетонной защитой. Входное отверстие 4-метрового коллиматора имело диаметр 20 мм, а выходное - 10 мм.

Схема прибора показана на рис. 2. Пучок протонов /1/ проходил через призму - радиатор /2/ с углами $\alpha = 30^\circ 0' 40''$ и $\alpha_1 = 30^\circ 0' 31''$, измеренными с точностью $\Delta\alpha = \pm 5''$ на гониометре ГС-5. Высота призмы была равна 20 мм, а толщина по оси пучка - 4 мм. Излучение Вавилова-Черенкова, вышедшее из призмы, отклонялось плоскими зеркалами /4/ в сторону от пучка и фотографировалось двумя фотоаппаратами "Зенит-3М" /5/ с объективами "Гелиос-40" /f = 85 мм, светосила 1:1,5/, настроенными на бесконечность. Перед объективами располагались интерференционные фильтры /6/ с полосой пропускания $\Delta\lambda = 90 \text{ \AA}$ около $\lambda \approx 6000 \text{ \AA}$ /полные характеристики фильтров приведены в работе /2/.

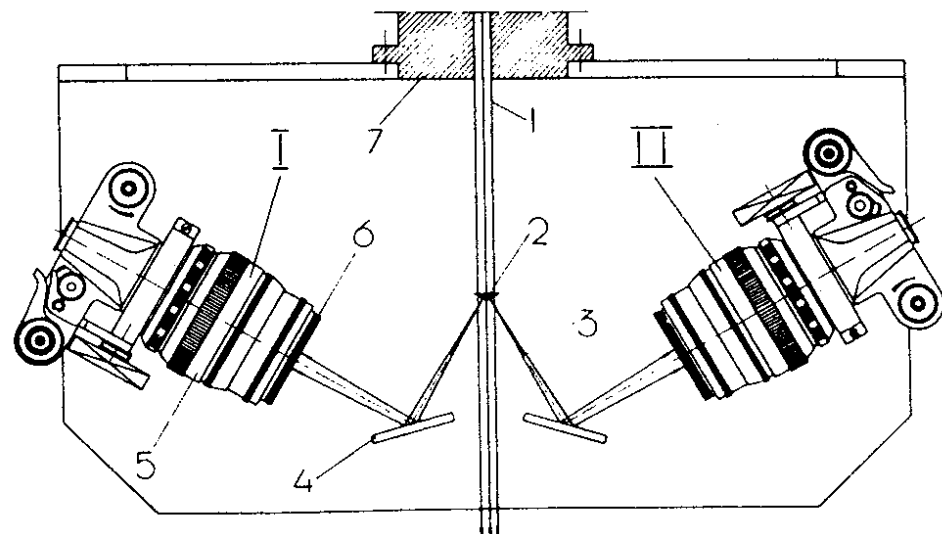


Рис. 2. Схема прибора.

Таблица 1

$\lambda, \text{Å}$	$n(\lambda)$	$\lambda, \text{Å}$	$n(\lambda)$
4047	1,46974	5460	1,460259
4358,34	1,46684	5769,6	1,459063
4916,4	1,46300	-	-

С помощью перекрестия, помещаемого в фокальной плоскости фотоаппаратов, и принципа автоколлимации оси объективов устанавливались по направлению нормали к граням I и II призмы - радиатора.

Призма была изготовлена из плавленного кварца со значениями показателей преломления для пяти длин волн λ , приведенными в табл. 1 /для температуры $t = 22,5^\circ \text{C}$ /.

Экстраполяционная формула для показателя преломления в измеренном диапазоне длин волн имеет вид

$$n(\lambda) = 1,44798 + \frac{3,85765 \cdot 10^{-3}}{\lambda^2} - \frac{7,6973 \cdot 10^{-5}}{\lambda^4} + \frac{4,6543 \cdot 10^{-6}}{\lambda^6}, \quad /2/$$

где λ - в микрометрах. Точность определения n по формуле /2/ составляет $\Delta n = \pm 2 \cdot 10^{-5}$.

Для средних длин волн пропускания, использовавшихся в установке интерференционных фильтров, относительные показатели преломления n'_0 приведены в табл. 2.

Таблица 2

Фотоаппарат	$\lambda, \text{Å}$	n'_0	n воздуха при $t = 30^\circ \text{C}$
I	6065	1,458044	1,000262
II	6020	1,458189	1,000262

Излучение фотографировалось на фотопленку типа "КН-3" с чувствительностью 120 ед. ГОСТ. За время экспозиции ≈ 15 мин через призму-радиатор было пропущено около $3 \cdot 10^{12}$ протонов.

3. Результаты эксперимента

На рис. 3 приведено позитивное изображение "дуг" излучения Вавилова-Черенкова, зарегистрированное фотоаппаратом I. На фотографии правая "дуга" /более яркая/ - излучение, вышедшее прямо через грань 1 призмы-радиатора, а левая "дуга" - излучение дважды отраженное. Взаимное расположение "дуг" указывает на то, что угол излучения $\theta_0 > \alpha_1$. Изображение излучения, зарегистрированное фотоаппаратом II, получилось более слабым и не обрабатывалось. Это могло получиться из-за неравномерности пространственного распределения протонов в пучке и несовпадения его оси с ребром призмы.



Рис. 3. Позитивное изображение излучения Вавилова-Черенкова.

Фотометрическая кривая изображений излучений, измеренная с помощью микрофотометра МФ-4, приведена на рис. 4. Наибольшее расстояние между "дугами" определялось путем фотометрирования черенковских изображений в направлении, перпендикулярном к их оси симметрии, на различных высотах с интервалом в 1 мм. Использовался объектив с увеличением $\times 6$, высота щели микрофотометра $H = 6$ мм, а ширина $b = 0,85$ мм. Результаты фотометрирования приведены на рис. 5. Значение l_{max} , усредненное по четырем l_i в области h , показанной на рис. 5 пунктиром, получилось равным $l_{max} = /5,67 \pm 0,05/$ мм.

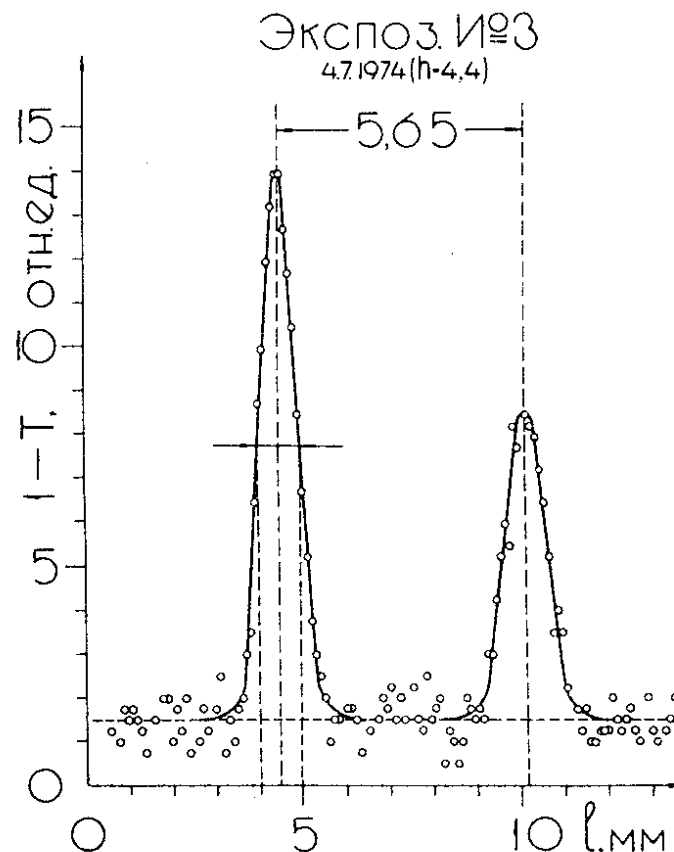


Рис. 4. Фотометрическая кривая негативных изображений "дуг" излучения Вавилова-Черенкова.

В соответствии с калибровкой объективов, т.е. определения соотношения между линейной и угловой мерами в фокальной плоскости объективов "Гелнос-40", была

получена величина $\frac{r_1 + r_2}{2} = 1^\circ 54' 22''$.

Поскольку разность углов $\alpha - \alpha_1$ у использованной в опыте призмы равна $\Delta\alpha = 9''$, расчетную формулу можно было переписать в виде

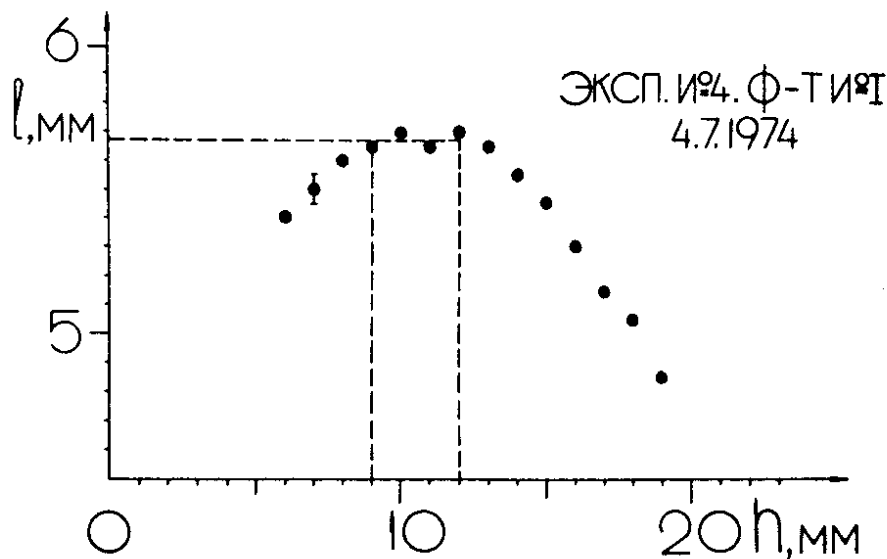


Рис. 5. Зависимость расстояния между "дугами" изображений излучения от уровня фотометрирования.

$$\sin(\theta_0 - \alpha_1) \approx \frac{1}{n'_0} \sin \frac{r_1 + r_2}{2} \quad /3/$$

В связи с тем, что в экспериментальном зале, где находился прибор во время экспозиции, температура $t = 29,2^\circ\text{C}$, показатель преломления призмы - радиатора /приведенный в табл. 2/ был увеличен на величину $\Delta n = 6,7 \cdot 10^{-5}$ с учетом коэффициента приращения показателя преломления плавленого кварца $\frac{\Delta n}{\Delta t} = 1 \cdot 10^{-5} / \text{градC}$.

При подстановке в /3/ величин $\alpha_1 = 30^\circ 0' 31''$, $\frac{r_1 + r_2}{2}$ и $n'_0 = 1,45811$ угол излучения оказался равным $\theta_0 = 31^\circ 18' 55''$. На основании формулы $\cos \theta = 1/n_0 \beta_0$ где n_0 - абсолютный показатель преломления призмы равен: $n_0 = n'_0 = n_{\text{возд.}} = 1,458493$ находим $\beta_0 = 0,802556$.

Этому значению скорости соответствует средняя энергия протонов в центре призмы $E'_0 = 634,48 \text{ МэВ}$ /масса покоя протона принималось согласно /3/ равной $m =$

$= 938,2592 \text{ МэВ}$. При учете того, что средние потери протонов этой энергии в призме из SiO_2 согласно /4/ равны $2,19 \frac{\text{МэВ см}^2}{g}$, их замедление на половине толщины призмы $t/2 = 0,315 \text{ г/см}^2$ составит $\Delta E = 0,69 \text{ МэВ}$. Таким образом, энергия протонов на входе в призму - радиатор $E_0 = 635,2 \text{ МэВ}$ /экспозиция 4.7.1974 г./.

4. Точность определения энергии простым методом

Основная ошибка при измерении энергии этим методом связана с ошибкой измерения суммы углов $(r_1 + r_2)$. При малых величинах $(r_1 + r_2)$ и $\Delta \alpha \ll \delta(r_1 + r_2)$ ошибка определения черенковского угла

$$\Delta \theta_0 \approx \frac{\delta(r_1 + r_2)}{2n'_0} \quad /4/$$

Ошибка в $\Delta l_{\text{max}} = \pm 0,05 \text{ мм}$ приводит к $\delta(r_1 + r_2) = \pm 2'$ /для объективов "Гелиос-40" 1 мм соответствует $40'$ /, а в соответствии с формулой /4/ $\Delta \theta_0 = \pm 0,69$. Такому $\Delta \theta_0$ соответствует неопределенность в энергии $\Delta E_\theta = \pm 0,35 \text{ МэВ}$, так как для радиатора из кварца вблизи энергии протонов 635 МэВ $\Delta \theta / \Delta E = 1,984 \text{ мин/МэВ}$. Остальные погрешности, как это видно из табл. 3, существенно меньше.

Суммарная среднеквадратичная ошибка определения энергии составляет $\Delta E = \pm 0,4 \text{ МэВ}$. Следует заметить, что точность измерения энергии простым методом, как это отмечено в /1/, может быть улучшена в 1,41 раза при регистрации излучения с обеих сторон от пучка. Из систематических ошибок, приводящих к сдвигу средней энергии, укажем на необходимость учета разности температур призмы-радиатора в моменты измерения n и экспонирования на пучке частиц. Для данного прибора этот сдвиг определяется величиной $\Delta E / \Delta t = -0,18 \frac{\text{МэВ}}{1^\circ\text{C}}$.

5. Разрешающая способность метода

Полная ширина на половине высоты /ПШПВ/ пика излучения Вавилова-Черенкова, как это видно из рис. 4, равна 1 мм, что соответствует угловому размытию пика

$$\Delta\gamma = 40', \text{ а } \Delta\theta_{\text{ПШПВ}} = \frac{\Delta\gamma}{2.916} = 13.7', \text{ или } \Delta E_{\text{ПШПВ}} = 6,9 \text{ МэВ.}$$

Вклад некоторых факторов в полную ширину кривой разрешения приведен в табл. 4.

Оставшуюся ширину $\Delta\theta_{\Delta E, \Delta\alpha} = \sqrt{(\Delta\theta_{\text{ПШПВ}})^2 - (11,1)^2} = 8'$ следует отнести к немонохроматичности пучка протонов (ΔE) и его угловой расходимости ($\Delta\alpha$).

Таблица 3

Ошибка	Величина ошибки	Неопределенность в энергии, МэВ
1. $\delta(\eta + \gamma_2)$	$\pm 2'$	$\pm 0,35$
2. $\Delta\alpha$	$\pm 5''$	$\pm 0,04$
3. Калибровка объективов	$\pm 0,6'$	$\pm 0,1$
4. Δn призмы для $\lambda = 6065 \text{ \AA}$	$\pm 2 \cdot 10^{-5}$	$\pm 0,07$
$\sum_1^4 (\Delta E_i)^2 = 0,14 \text{ МэВ}^2$		

Таблица 4

№ пп	Фактор уширения	$\Delta\theta_{i, \text{ минут}}$
1.	Многочасное рассеяние протонов в призме $\Delta\theta = 2\theta_s$	6,24
2.	Конечная ширина интерференционного фильтра $\Delta\lambda = 90 \text{ \AA}$	2,1
3.	Замедление протонов в призме-радиаторе	2,74

Поскольку угловая расходимость пучка протонов неизвестна, то исходя из $\Delta\theta_{\Delta E, \Delta\alpha} = 8'$ можно /полагая $\Delta\alpha = 0$ / определить лишь верхнюю границу немонохроматичности пучка $\Delta E_{\text{max}} < 2,7 \text{ МэВ.}$

Следует отметить, что половина этого разброса $\Delta E_{\max}/2$ существенно ниже величины некогерентности пучка протонов, определенной в работе /5/. По-видимому, это связано с изменениями в системе вывода пучка протонов.

В заключение приведем данные /табл. 5/ по измерениям средней энергии протонов простым методом, которые были выполнены на протяжении года.

Таблица 5

Дата измерения	Средняя энергия, МэВ
4.7.1974	635,2
4.7.1974	634,7
7.12.1974	642,6
16.6.1975	640,7
14.7.1975	641,5
14.8.1975	639,9
19.8.1975	633,3

* Величины энергий относятся к средним энергиям протонов в экспериментальном зале синхроциклотрона / ≈ 16 м от выпускного окна камеры ускорителя/. Для получения энергии протонов на выходе из камеры нужно к величинам, приведенным в табл. 5, добавить потери энергии в воздухе, которые составляют 4,7 МэВ.

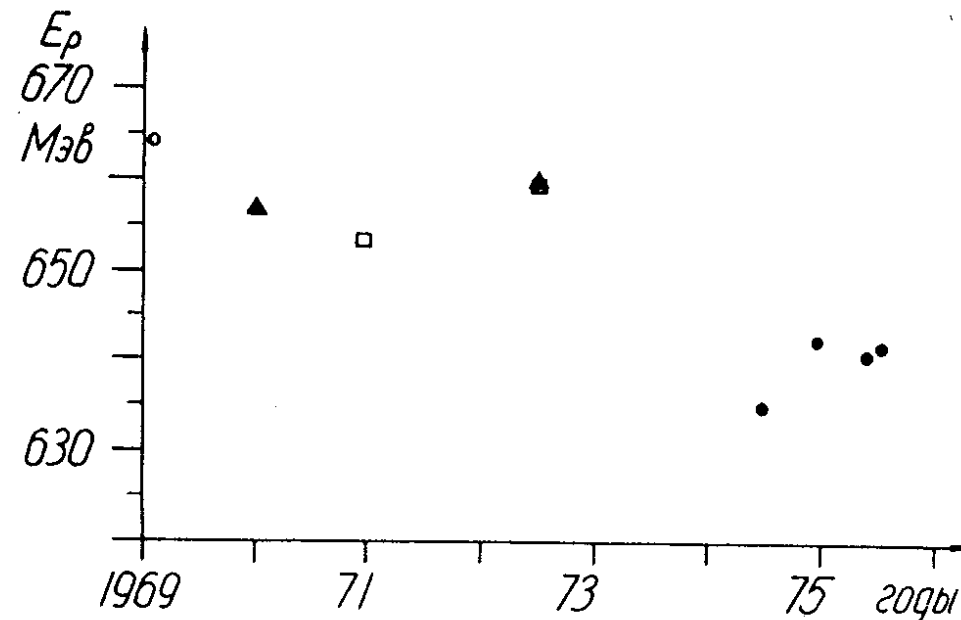


Рис. 6. График зависимости средней энергии протонов в выведенном из синхроциклотрона Лаборатории ядерных проблем пучке, построенный по данным измерений, выполненным различными черенковскими методами в период 1969-1975 гг. \circ - монохроматический метод /2/; \blacktriangle - апохроматический метод /6/; \square - ахроматический метод /7/; \blacktriangle - данные взяты из работы /5/, в которой опубликованы данные измерений энергии протонов в пучке диаметром 10 мм - $E = /660,0 \pm 0,3/$ МэВ только апохроматическим методом. Однако измерения энергии в этой работе были также проведены и ахроматическим методом /7/ / $E = /659,5 \pm 0,3/$ МэВ/, но при диаметре протонного пучка 5 мм.

По-видимому, представляют интерес сводные данные по измерению средней энергии протонов в пучке, выведенном из синхроциклотрона Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ, выполненные с 1969 по 1975 гг. /см. рис.6/ различными методами с применением излучения Вавилова-Черенкова.

Из рис. 6 видно, что в период между 1972-1974 гг. произошло уменьшение средней энергии протонов приблизительно на 20-25 МэВ. Выяснение причин этих изменений требует специальных исследований работы ускорителя в различных режимах его работы.

Авторы благодарны С.П.Денисову /ИФВЭ/ за содействие в изготовлении призм-радиаторов, Б.П.Осипенко - за помощь в напылении зеркал, В.Н.Сошникову за сборку устройства, Е.Фадеевой и Л.Дорошенко за большую помощь в обработке экспериментального материала и П.Луптаку за помощь при работе на ускорителе.

Литература

1. V.P.Zrelou. *Nucl.Instr. and Meth.*, v. 115, 457 (1974).
2. V.P.Zrelou et al. *Nucl.Instr. and Meth.*, v. 103, 261 (1972).
3. T.A.Lasinski et al. *Rev.Mod.Phys. (Suppl.)*, v. 45, N. 2, part II, 29 (1973).
4. *Studies in penetration of charged particles in matter. Publ.1133, Nation. Acad. of Scienc. Washington, 1964.*
5. В.П.Зрелов, С.П.Круглов, К.Ф.Мус, В.Д.Савельев, П.Шулек. *ЯФ*, в. 19, вып. 6, 1276./1974/.
6. V.P.Zrelou, P.Pavlović and P.Sulek. *Nucl.Instr. and Meth.*, v. 105, 109 (1975).
7. V.P.Zrelou, P.Pavlović and P.Sulek. *Nucl.Instr. and Meth.*, v. 107, 279 (1973).

Рукопись поступила в издательский отдел
26 сентября 1975 года.