

сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
дубна

3545/82

2/viii-82

13-82-254

В.П.Зрелов, В.П. Лупильцев, И.В.Мирохин

+

ИЗМЕРЕНИЯ ЭНЕРГИИ
ВЫВЕДЕННОГО ПРОТОННОГО ПУЧКА
(~ 1 ГэВ)
ОТ УСКОРИТЕЛЯ ЛИЯФ (ГАТЧИНА)
ЧЕРЕНКОВСКИМ МЕТОДОМ
ДВОЙНЫХ ОТРАЖЕНИЙ

1982

I. ВВЕДЕНИЕ

Простой черенковский метод ^{1/1} /или метод двойных отражений/ измерения средней энергии был опробован ^{1/2} на пучке протонов (~ 640 МэВ) от синхроциклотрона Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

С целью проверки работоспособности метода при более высоких энергиях был изготовлен и испытан вариант прибора для исследований на пучке протонов (~ 1 ГэВ) гатчинского синхроциклотрона ЛИЯФ.

II. УСЛОВИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

1. Схема эксперимента приведена на рис.1. Пучок протонов с энергией ~ 1 ГэВ, выведенный из камеры ускорителя, проходит в воздухе последовательно фокусирующую секцию магнитного канала, триплет магнитных линз, формирующий целевой коллиматор, дублет магнитных линз и с помощью отклоняющего магнита поворачивался на угол $9^{\circ}40'$ и направлялся в коллиматор длиной 4,5 метра. На входе коллиматор имел диаметр $D_1 = 12$ мм / $L_1 = 1,5$ м/ и на выходе - $D_2 = 5$ мм / $L_2 = 1,0$ м/. Черенковский прибор располагался непосредственно за бетонной защитой на выходе коллиматора. В этих условиях интенсивность пучка составляла $\sim 10^9$ протонов/с.

2. Схема /и принцип работы/ прибора повторяет выбранную ранее /рис.2/. Частицы со скоростью β_0 направляются по нормали ко входной зеркальной грани III призмы-радиатора с абсолютным показателем преломления n_0 для длины волны λ_0 . Излучение Вавилова-Черенкова /ИВЧ/, возникшее в призме, выводилось через грани I и II и регистрировалось двумя фотоаппаратами "Зенит-Е" с объективами "Гелиос-40" /с $f = 8,5$ см/, установленными на бесконечность. Причем в фотоаппарат I попадало как прямое, так и дважды отраженное ИВЧ. Углы выхода ИВЧ /например, через грань I / прямого - γ_1 и дважды отраженного - γ_2 связаны с углом $\theta_0(\lambda) = \arccos [n_0(\lambda)\beta]^{-1}$ выражением, приведенным в работе ^{1/1}:

$$\theta_0 = \alpha_2 \pm \arcsin \frac{1}{n'_0} \left\{ \frac{\sin^2 \frac{\gamma_1 + \gamma_2}{2} - n_0'^2 \operatorname{tg}^2 \frac{\gamma_1 + \gamma_2}{2} \sin^2(\alpha_2 - \alpha_1)}{\cos^2(\alpha_2 - \alpha_1) - \operatorname{tg}^2 \frac{\gamma_1 + \gamma_2}{2} \sin^2(\alpha_2 - \alpha_1)} \right\}^{1/2} \quad //$$

где $n'_0 = \frac{n_0}{n_1}$ - относительный показатель преломления призмы.

λ , нм	$n(\lambda)$	λ , нм	$n(\lambda)$
404,7	1,46955	546,1	1,46020
407,8	1,46924	577,0	1,45898
435,8	1,46671	579,0	1,45887
491,6	1,46292		

Экстраполяционная формула для показателей преломления в измеренном диапазоне длин волн имеет вид:

$$n(\lambda) = 1,44816 + \frac{3,69103 \cdot 10^{-8}}{\lambda^2} - \frac{3,09715 \cdot 10^{-5}}{\lambda^4} \quad /2/$$

где λ - в мкм. Точность определения n по формуле /2/ составляет $\Delta n = \pm 4 \cdot 10^{-5}$. Для средних длин волн пропускания использованных интерференционных фильтров /для нормального падения лучей/ относительные показатели преломления n'_0 призмы-радиатора приведены в табл.2.

Таблица 2

Фотоаппарат	$\bar{\lambda}$, нм	n'_0 при $t=20^\circ\text{C}$	n_1 воздуха при $t=20^\circ\text{C}$
I	605,9	1,457985	1,000272
II	601,3	1,458132	1,000272

Ширина призмы в основании $b = 9,4$ мм, а ее высота - 20 мм.

III. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

1. Средняя энергия. При экспонировании устройства, показанного на рис.3, на пучке протонов ~ 1 ГэВ были получены изображения ИВЧ, зарегистрированные фотоаппаратами I и II и показан-

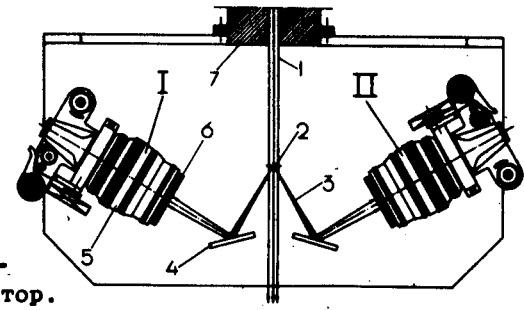


Рис.3. Общий вид прибора: 1 - пучок протонов с энергией 1 ГэВ; 2 - призма-радиатор; 3 - ИВЧ; 4 - плоское зеркало; 5 - фотоаппарат "Зенит-Е" с объективом "Гелиос-40" /1:1,5, $f = 85$ мм/; 6 - интерференционный фильтр; 7 - коллиматор.

α_1 и α_2 - углы при основании призмы. Поскольку в данном приборе углы α_1 и $\alpha_2 > \theta$, то при вычислениях θ_0 в формуле /1/ перед корнем брался знак /-/. Для уменьшения ошибок измерений угла θ_0 перед объективами "Гелиос-40" располагались интерференционные фильтры с полосой пропускания $\Delta\lambda \sim 10$ нм для $\lambda_0 \sim 600$ нм, использовавшиеся ранее /8/. Оптические оси объективов ориентировались по нормали к выходным граням I и II призмы-радиатора. ИВЧ регистрировалось на киноплёнке КН-3 с чувствительностью 130 ед. ГОСТ.

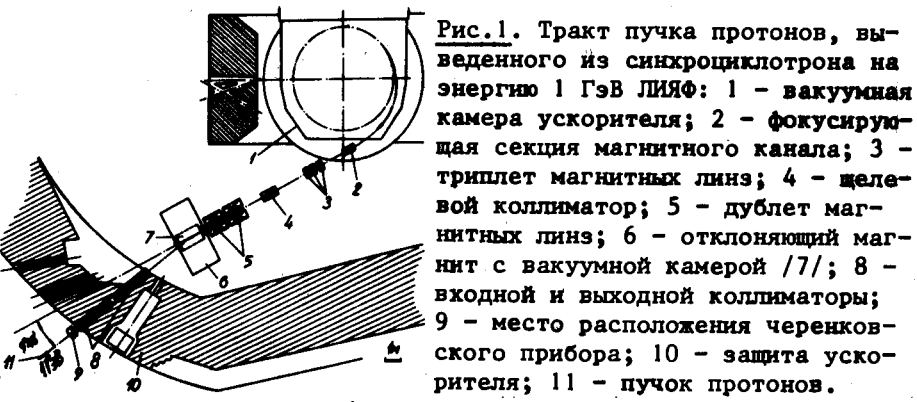


Рис.1. Тракт пучка протонов, выведенного из синхротронного на энергию 1 ГэВ ЛИЯФ: 1 - вакуумная камера ускорителя; 2 - фокусирующая секция магнитного канала; 3 - триплет магнитных линз; 4 - дублет магнитных линз; 5 - отклоняющий магнит с вакуумной камерой /7/; 6 - входной и выходной коллиматоры; 9 - место расположения черенковского прибора; 10 - защита ускорителя; 11 - пучок протонов.

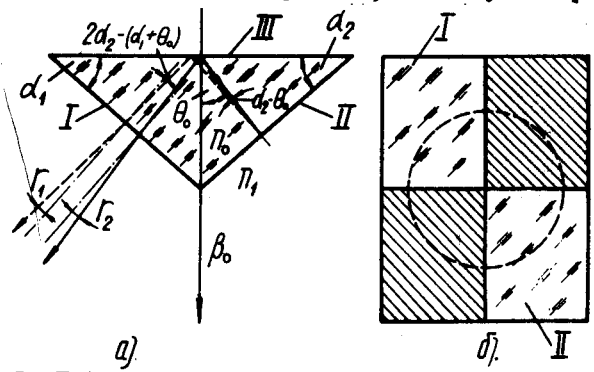


Рис.2. Принцип работы черенковского устройства: а/ ход лучей в призме-радиаторе; б/ вид на призму против пучка /штриховкой показаны зеркальные части граней, а пунктиром - профиль пучка частиц/.

3. Параметры призмы-радиатора. Углы α_1 и α_2 при основании призмы измерялись с помощью гониометра ГС-5 /с точностью $\pm 5''$ / и получились равными: $\alpha_1 = 40^\circ 30' 10''$ и $\alpha_2 = 40^\circ 29' 13''$. Призма-радиатор была изготовлена из плавленного кварца со значениями относительных показателей преломления, приведенными в табл.1 для $t = 20^\circ\text{C}$.

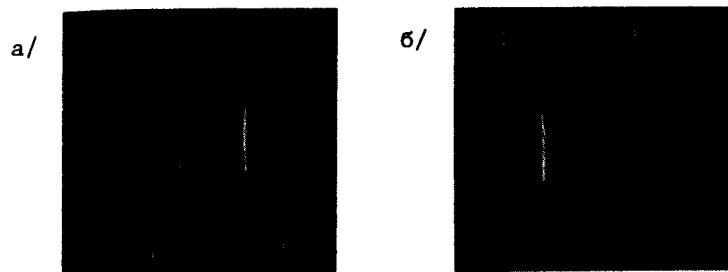


Рис.4. Негативные изображения ИВЧ, зарегистрированные прибором, показанным на рис.3: а/ от фотоаппарата I; б/ от фотоаппарата II.

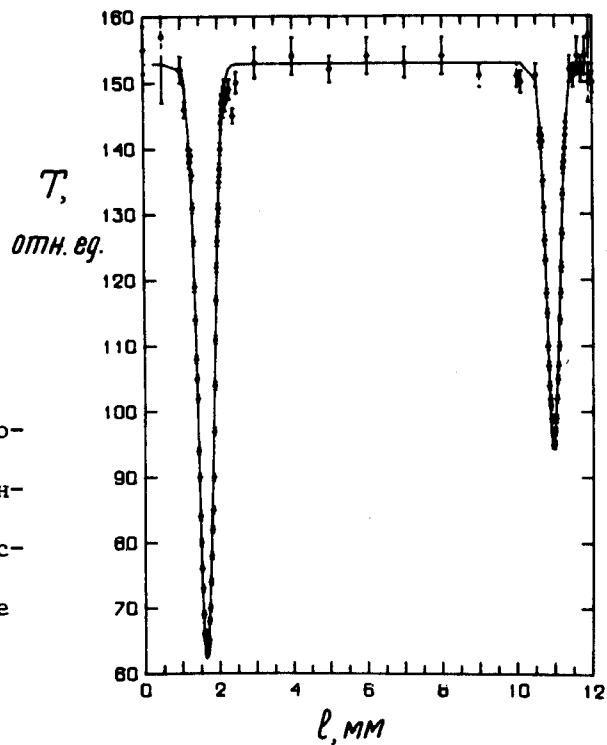


Рис.5. Типичная фотометрическая кривая изображений, показанных на рис.4а,б; по оси ординат - пропускание Т, а по оси абсцисс - расстояние между "дугами" ИВЧ в мм.

ные на рис.4. Взаимное расположение "дуг" ИВЧ /от прямого и дважды отраженного ИВЧ/ характерно для углов испускания ИВЧ $\theta < \alpha$. Среднее расстояние между "дугами" определялось путем фотометрирования на быстродействующем микрофотометре II /Карл Цейсс, Иена/ черенковских изображений в направлении, перпендикулярном к их оси симметрии. Точность измерения расстояний составляла $\pm 0,01$ мм. Типичная фотометрическая кривая показана

на рис.5. Для определения наименьшего расстояния между "дугами" на каждом кадре проводилось несколько измерений на различных высотах через 1 мм. Результаты этих измерений аппроксимировались параболой по методу наименьших квадратов, и отыскивался ее минимум. В соответствии с калибровкой объективов "Гелиос-40", т.е. определением соотношения между линейной и угловой мерами в их фокальных плоскостях, определялся угол $\frac{\Gamma_1 + \Gamma_2}{2}$, входящий в формулу /1/. При подстановке величин α_1 и $\alpha_2 \cdot \frac{\Gamma_1 + \Gamma_2}{2}$ и ρ_0 из табл.2 по этой же формуле определялся угол θ_0 ИВЧ в призме. Из соотношения $\cos \theta_0 = \frac{1}{n_0 \beta}$, где n_0 - абсолютный показатель преломления, находилась средняя скорость протонов в центре призмы - β_0 и соответствующая ей кинетическая энергия протонов $T = m_p(\gamma - 1)$, где m_p - масса покоя протона, принимавшаяся равной 938,2529 МэВ, а $\gamma = (1 - \beta^2)^{-1/2}$.

Зависимость средней энергии Т от наименьшего расстояния между "дугами" ИВЧ для фотоаппаратов I и II показана на рис.6. Отметим, что вблизи энергии $T \approx 1$ ГэВ $\Delta T / \Delta l \approx 20$ МэВ/мм.

2. Ошибки измерений энергии простым методом просуммированы в табл.3.

Суммарная среднеквадратичная ошибка определения средней энергии $\Delta T = \sqrt{\sum \Delta T_i^2}$ с учетом всех перечисленных выше факто-

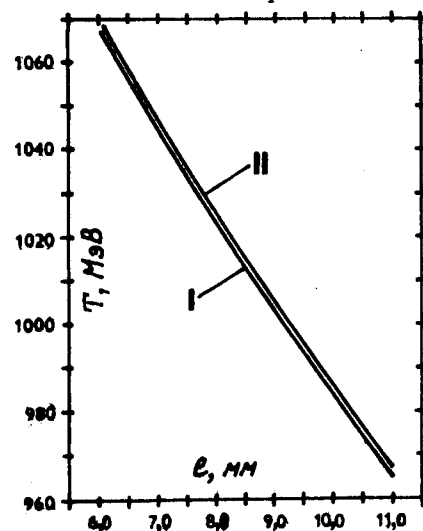


Рис.6. Зависимости средней энергии протонов Т от наименьшего расстояния между "дугами" ИВЧ для фотоаппаратов I и II.

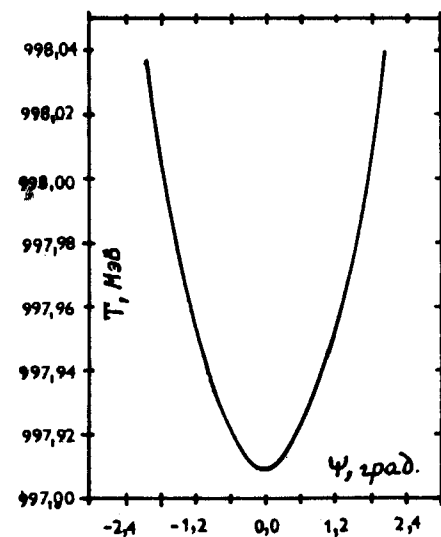


Рис.7. Сдвиг энергии ΔЕ в зависимости от угла отклонения частиц пучка от нормали ко входной грани призмы-радиатора.

ров не превышала $\pm 1,3$ МэВ. При регистрации ИВЧ обоими фотоаппаратами средняя энергия вычислялась как

$$\bar{T} \pm \Delta T = \frac{\left(\frac{1}{\Delta T_1}\right)^2 \cdot T_1 + \left(\frac{1}{\Delta T_2}\right)^2 \cdot T_2}{\left(\frac{1}{\Delta T_1}\right)^2 + \left(\frac{1}{\Delta T_2}\right)^2} \pm \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{\Delta T_1}\right)^2 + \left(\frac{1}{\Delta T_2}\right)^2}}, \quad /3/$$

где T_1 и T_2 - средние энергии, определенные при регистрации ИВЧ фотоаппаратами I и II, а ΔT_1 и ΔT_2 - соответствующие им ошибки. Средняя ошибка в этом случае составляла $\Delta T = 0,9$ МэВ / $\Delta \beta = 1,23 \cdot 10^{-4}$ /.

Кроме указанных в табл.3 ошибок измерений, анализировалось также влияние отклонения направления входа частиц от нормали ко входной грани призмы на точность определения энергии. В работе^{/1/} указывалось, что этот метод нечувствителен к такого рода неопределенностям. Однако при прецизионных измерениях важно знать допустимые отклонения углов наклона частиц $\Delta \psi$ при заданной точности измерения энергии частиц. Поэтому были проведены соответствующие расчеты для параметров данного прибора, результаты которых показаны на рис.7. Из рисунка видно, что при $\psi \leq 0,5^\circ$ величина сдвига ΔE не превосходит 0,016 МэВ. Как правило, при выполнении предварительной юстировки входной грани призмы-радиатора к оси коллиматора, формирующего пучок, величина ψ не превосходит вышеуказанной.

Измерения средней энергии выведенного пучка протонов от ускорителя ЛИЯФ АН СССР простым черенковским методом выполня-

Таблица 3

№ п/п	Ошибка	Величина	Таблица 3	
			ΔT_1 , МэВ	
1.	Измерения углов α_1 и α_2 призмы-радиатора, $\Delta \alpha$	$\pm 5''$	$\pm 0,13$	
2.	Измерения показателей преломления призмы-радиатора, Δn	$\pm 4 \cdot 10^{-5}$	$\pm 0,17$	
3.	Неопределенность показателя преломления воздуха, Δn_B	$\pm 5 \cdot 10^{-6}$	$\pm 0,032$	
4.	Калибровка объективов, ΔC , с/мм	± 3 с/мм	$\pm 0,24$	
5.	Определения минимального расстояния между "дугами" ИВЧ ΔS , мм	$\pm 0,06$	$\pm 1,22$	
6.	Неопределенность в угле падения ИВЧ на интерференционный фильтр, $\Delta \phi = \pm 1^\circ$ ($\Delta \lambda = \pm 10 \text{ \AA}$)	$\pm 3,3 \cdot 10^{-5}$	$\pm 0,14$	

лись несколько раз на протяжении двух лет /1977-1979 гг./. Сводные данные этих измерений представлены в табл.4.

Интересно сравнить полученные результаты измерений с данными работы^{/5/} /рис.8/, где определение средней энергии производилось путем сравнения времен пролета протонов и света на определенной базе. В пределах ошибок измерений данные настоящей работы /экспозиция от 21.01.1979 г./ находятся в согласии с результатами^{/5/}. Необходимо отметить и колебания средней энергии протонов в пределах до 4 МэВ, что, по-видимому, обусловлено в основном различиями в размещении элементов и параметров тракта выведения и формирования пучка.

В заключение необходимо сказать о разрешающей способности прибора. Из рис.5 видно, что полная ширина на полувысоте пика ИВЧ составляет ~ 20 МэВ. Собственное разрешение устройства определяется факторами, приведенными в табл.5, и составляет ~ 12 МэВ.

Остальные 16 МэВ от экспериментальной ширины обусловлены такими параметрами пучка протонов, как его угловая расходимость и энергетическая неоднородность. Однако разделить эти факторы не представляется возможным из-за неопределенности в угловой расходимости пучка /так, например, геометрическая расходимость, оцененная из размеров отверстий и длины исполь-

Таблица 4

Дата измерений	Средняя энергия, МэВ		
	в центре призмы	перед призмой*	на выходе из камеры ускорителя**
14.11.1977 г.	1000,86	1001,50	1006,55
	1001,46	1002,10	1007,15
16.12.1978 г.	1001,78	1002,42	1007,47
	1001,98	1002,62	1007,67
21.01.1979 г.	998,33	998,97	1004,02
	997,70	998,34	1003,39
	998,58	999,22	1004,27
	998,50	999,14	1004,19

* Эти величины получены с учетом замедления протонов 1 ГэВ в призме-радиаторе из SiO_2 на половине ее эффективной толщины $\bar{t}/2 = 0,34$ г/см² и данных по ионизационным потерям^{/4/} ($\Delta E_1 = 0,64$ МэВ).

** Величины получены с учетом замедления протонов в воздухе ($\frac{\Delta E}{\Delta x} = 1,96$ МэВ см²/г) на длине 20 м / $\Delta E_2 = 5,05$ МэВ/.

№ п/п	Фактор уширения	$\Delta\theta_i$, мин	ΔE_i , МэВ
1.	Множественное рассеяние	<u>+4</u>	<u>+5,9</u>
2.	Замедление протонов в призме-радиаторе	-	<u>+0,32</u>
3.	Ширина интерференционного фильтра <u>/+50 Å /</u>	-	<u>+0,72</u>

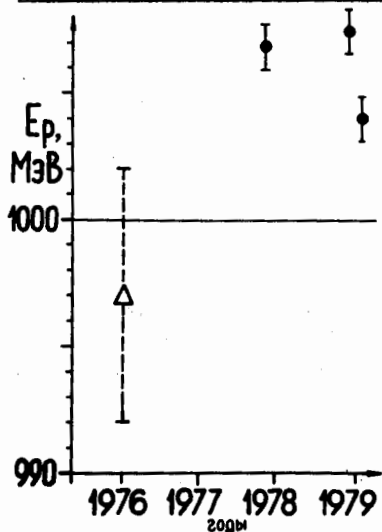


Рис.8. Результаты измерений энергии выведенного пучка протонов от синхроциклотрона ЛИЯФ АН СССР/г.Гатчина/, о — данные настоящей работы, Δ — данные работы /Б/.

зованного коллиматора, составляет $13,1'$, или $19,4$ МэВ, что превосходит ширину, приходящуюся на оба фактора/.

За содействие в выполнении данной работы авторы благодарны члену-корреспонденту АН СССР В.П.Джелепову и Л.М.Онищенко;

за помощь в проведении сеансов работы на ускорителе ЛИЯФ — сотрудникам этого института М.М.Козлову, С.П.Круглову, Е.А.Дамаскинскому, В.А.Гордееву, В.П.Коптеву, С.М.Микиртычянцу, Л.А.Кузьмину, а также сотрудникам ОИЯИ Я.Ружичке, М.Ф.Шабашову, В.С.Надеждину, В.В.Ермакову и Р.В.Столупиной.

ЛИТЕРАТУРА

1. Zrelov V.P. Nucl.Instr. and Meth., 1974, vol.115, p.457.
2. Zrelov V.P., Lupiltsev V.P., Shabashov M.F. Nucl.Instr. and Meth., 1976, vol.134, p.437.
3. Зрелов В.П. и др. ОИЯИ, P13-5636, Дубна, 1971.
4. Studies in Penetration of Charged Particles in Matter. Publ.1133. Nation.Acad.Sc., W., 1964.
5. Денисов А.С. и др. Препринт ЛИЯФ №261, Л., 1976.

Рукопись поступила в издательский отдел
5 апреля 1982 года.