

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

ДУБНА



3-895

15/3-76
P13 - 9380

В.П.Зрелов, В.П.Лупильцев, П.Луптак, М.Ф.Шабашов,
Р.Яник

965/2-76

АВТОМАТИЗАЦИЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЭНЕРГИИ ПРОТОНОВ
В ПУЧКЕ ~640 МЭВ
ОТ СИНХРОЦИКЛОТРОНА
ЛАБОРАТОРИИ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ
АХРОМАТИЧЕСКИМ ЧЕРЕНКОВСКИМ МЕТОДОМ

1975

P13 - 9380

В.П.Зрелов, В.П.Лупильцев, П.Луптак, М.Ф.Шабашов,
Р.Яник*

АВТОМАТИЗАЦИЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЭНЕРГИИ ПРОТОНОВ
В ПУЧКЕ ~640 МЭВ
ОТ СИНХРОЦИКЛОТРОНА
ЛАБОРАТОРИИ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ
АХРОМАТИЧЕСКИМ ЧЕРЕНКОВСКИМ МЕТОДОМ

Направлено в "Nuclear Instruments and Methods"

* Университет им. Я.А.Коменского, Братислава (ЧССР)

1. Введение

В работах /1-4/ описаны методы измерения средней энергии протонов в коллимированных пучках от ускорителей в области энергий ~ 640 МэВ с использованием излучения Вавилова-Черенкова. Достоинством указанных методов является высокая точность измерения, составляющая $\sim 3 \cdot 10^{-4}$. Общий же их недостаток - применение фотографических регистраторов излучения.

Целью данной работы являлась автоматизация измерения энергии протонов при сохранении высокой точности.

II. Устройство и принцип действия

Используется ахроматический прибор с единственным отличием от описанного в /3/, состоящим в том, что излучение Вавилова-Черенкова регистрируется фотоумножителем. Оптическая схема прибора приведена на рис. 1. Характеристики оптических деталей и методика их выбора приводятся в работе /3/. Излучение, вышедшее из радиатора /1/, проходит через ахроматическую кольцевую призму /2/, уменьшающую угловую расходимость излучения, и собирается сферическим зеркалом /3/. Плоское зеркало /4/ отводит излучение на плоскость регистрации. По диаметру кольца излучения в этой плоскости перемещается щель /5/ с фотоумножителем /6/, укрепленные на каретке /7/, жестко связанной с линейкой /8/ датчика координаты /9/. При перемещении щели по диаметру кольца излучения на выходе фотоумножителя наблюдается сигнал, пропорциональный освещению.

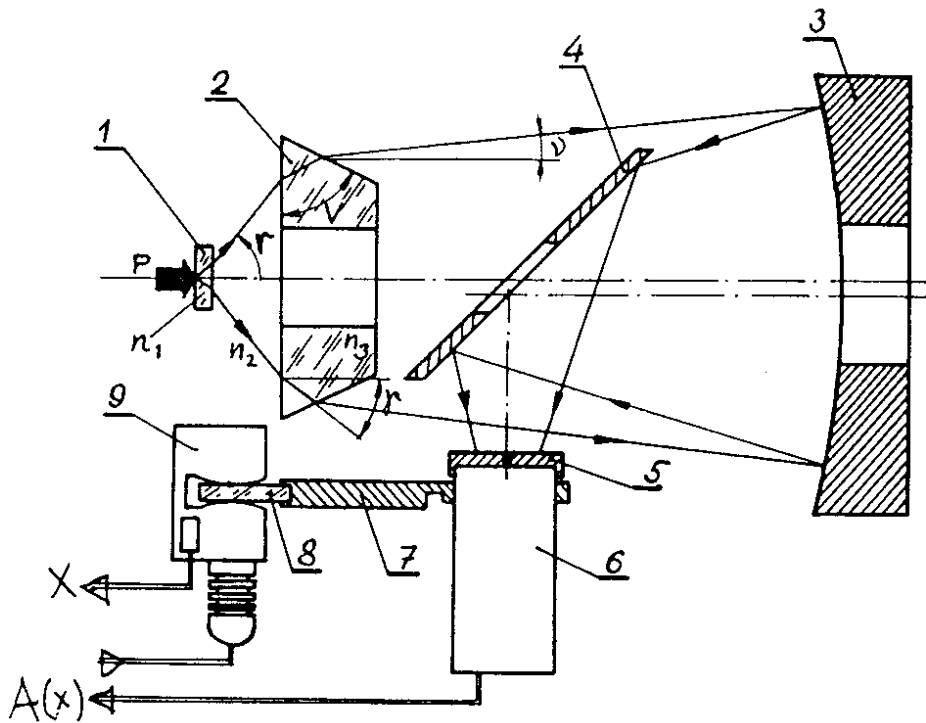


Рис. 1. Схема прибора: 1 - радиатор; 2 - кольцевая ахроматическая призма; 3 - сферическое зеркало; 4 - плоское зеркало; 5 - щель; 6 - фотоумножитель; 7 - каретка; 8 - линейка; 9 - датчик линейных перемещений.

щенности в данном месте кольца. Разность координат пиков освещенности дает диаметр D кольца излучения. Половина угла раствора конуса излучения θ в радиаторе находится из простых соотношений, использующих законы преломления:

$$\cos \theta = \left[1 - \frac{n_3^2(\bar{\lambda})}{n_1^2(\lambda)} \sin^2 \gamma \right]^{1/2}, \quad /1/$$

где

$$\gamma = V - \arcsin \left[\frac{n_2(\bar{\lambda})}{n_3(\bar{\lambda})} \sin(V - \nu) \right], \quad /2/$$

а

$$\nu = \arcsin \frac{D}{2F}. \quad /3/$$

Здесь $n_1(\bar{\lambda})$, $n_2(\bar{\lambda})$, $n_3(\bar{\lambda})$ - абсолютные показатели преломления радиатора, воздуха, ахроматической призмы, D - диаметр кольца излучения, F - расстояние от плоскости регистрации до вершины сферического зеркала, V - преломляющий угол ахроматической призмы. Скорость протонов определяется соотношением

$$\beta = [n_1(\bar{\lambda}) \cos \theta]^{-1}, \quad /4/$$

а кинетическая энергия - соотношением

$$T = m_p [(1 - \beta^2)^{-1/2} - 1]. \quad /5/$$

Средняя длина волны, для которой берутся показатели преломления в формулах /1/, /2/, /4/, вычисляется с учетом энергетического спектра излучения Вавилова-Черенкова ($\approx \lambda^{-3}$), спектральной чувствительности фотокаатода к эквивалентному спектру $S(\lambda)$ и результирующей прозрачности оптической системы $T(\lambda)$:

$$\bar{\lambda} = \frac{\lambda_1 \int \frac{\lambda_2 S(\lambda) T(\lambda)}{\lambda^2} d\lambda}{\int \frac{\lambda_2 S(\lambda) T(\lambda)}{\lambda^3} d\lambda}, \quad /6/$$

Чтобы избежать трудностей точной установки оптических деталей прибора, проводилась оптическая калибровка по методике, описанной в /3/. Как и в /3/, измерялось расстояние D_0 в плоскости регистрации, соответствующее известному углу выхода излучения из радиатора $2\gamma_0$, но в дальнейшем эти величины использовались для расчета (с помощью соотношений /1-3/) величины F ,

предварительно установленной равной фокусному расстоянию сферического зеркала с ошибкой $\pm 0,2$ мм. Оптическая калибровка и юстировка прибора проводилась на оптической скамье.

При вычислении $\bar{\lambda}$ характеристики $S(\lambda)$, $T(\lambda)$ брались паспортными. Поскольку реальные характеристики могут отличаться от паспортных, рассчитанная величина $\bar{\lambda}$ может не совпасть с действительной. С целью устранения этой неопределенности проводилась абсолютная калибровка прибора на пучке протонов с использованием метода двойных отражений^{4/}. Критерием правильного выбора средней длины волны $\bar{\lambda}$ служило совпадение величин средней энергии, измеренных тем и другим способом. Усреднение энергий, полученных автоматическим методом, проводилось в этом случае по числу измерений за время, равное длительности экспозиции при определении энергии методом двойных отражений.

III. Электрическая блок-схема

На рис. 2 представлена блок-схема электроники, на рис. 3 - временные диаграммы, поясняющие ее работу. Сигнал с выхода ФЭУ-30 интегрируется на емкости 100 пФ с использованием высокого входного сопротивления истокового повторителя. Постоянная интегрирования $\tau = 500$ мкс позволяет эффективно интегрировать весь макроимпульс от ускорителя и уменьшить влияние временного разброса импульсов синхронизации до пренебрежимо малой величины. Флуктуации темнового тока фотоумножителя ограничивают минимальную интенсивность пучка протонов величиной $\geq 10^5$ с⁻¹. Применяемые схемы линейных ворот и кодировщика^{5/} обеспечивают точность измерения амплитуды $\sim 1\%$. Для определения координаты щели используется датчик линейных перемещений LP-*, обеспечивающий точность отсчета координаты

*Производство Физического института Чехословацкой Академии наук.

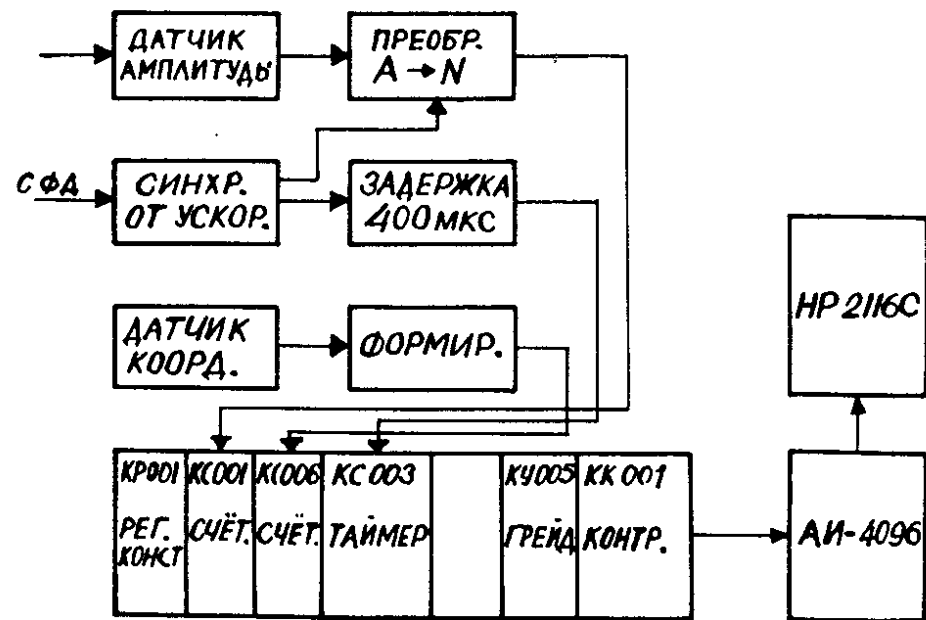


Рис. 2. Электрическая блок-схема.

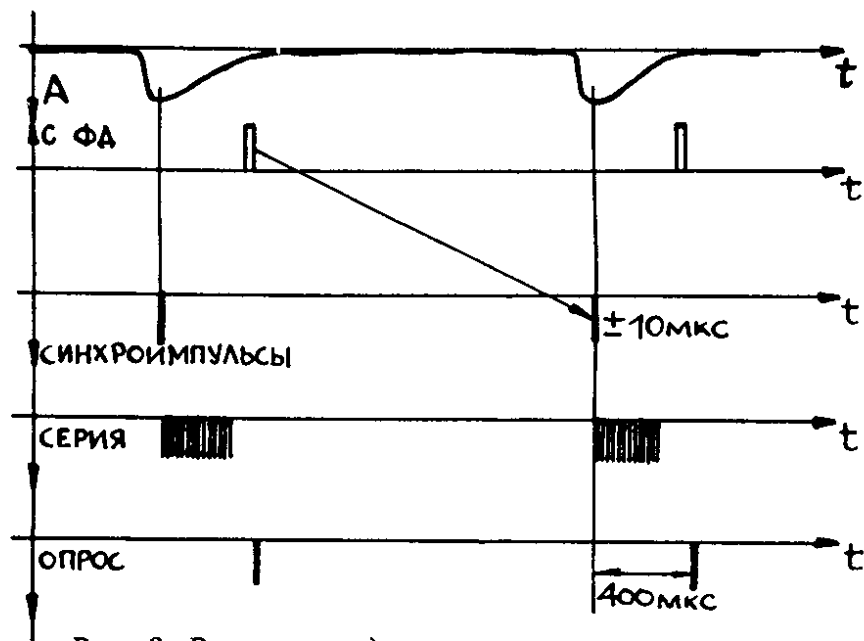


Рис. 3. Временные диаграммы основных сигналов.

наты 5 мкм на базе 100 мм. Поскольку измеряется разность координат двух точек, положение начала отсчета несущественно. Координата записывается в счетчик КС006^{6/}, работающий в режиме накопления, амплитуда - в счетчик КС001^{6/}. Зарегистрированная информация передается в буферное накопительное устройство АИ-4096. Частота опроса крейта задается счетчиком-таймером КС003^{6/}, на вход которого поступают задержанные на время преобразования амплитуды в серию импульсы синхронизации. Для синхронизации используются импульсы с фотодатчика ускорителя, сформированные блоком "Синхронизация от ускорителя" ОО1. Грейдер КУ005^{7/} выбирает для опроса только используемые станции крейта. Установка АИ-4096 работает в режиме автоматического измерения и при переполнении IV регистра передает накопленную информацию в ЭВМ НР 2116С.

IV. Условия и результаты измерений

Измерения проводились на пучке протонов ~ 640 МэВ от синхроциклотрона Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ. Длительность макроимпульсов протонов была равна 200 мкс при частоте следования 160 с^{-1} . Пучок формировался коллиматором длиной 4 м с диаметром отверстия на входе 20 мм, на выходе - 5 мм. Отношение амплитуд сигнала и фона при щели 1,2 мм было ≈ 5 . Шаг перемещения щели был равен 0,1 мм, что позволяло при скорости движения каретки 2 мм/с суммировать сигнал от 8 макроимпульсов ускорителя. Время одной экспозиции - 30 с. Средняя энергия пучка протонов в 16 метрах от выпускного окна камеры ускорителя, измеренная данным методом, составила $634,2 \pm 0,6$ МэВ. Средняя энергия за это же время, измеренная методом двойных отражений, равнялась $634 \pm 0,4$ МэВ. В табл. 1 приведены результаты измерений энергии /11.08.75 г. и 23.09.75 г./ с учетом ионизационных потерь в радиаторе толщиной 3 мм, изготовленном из стекла ЛК-3 ($n_1(\lambda = 4358 \text{ \AA}) = 1,49651$).

Экспериментальная зависимость амплитуды сигнала с интегратора А как функция координаты щели X приведена на рис. 4.

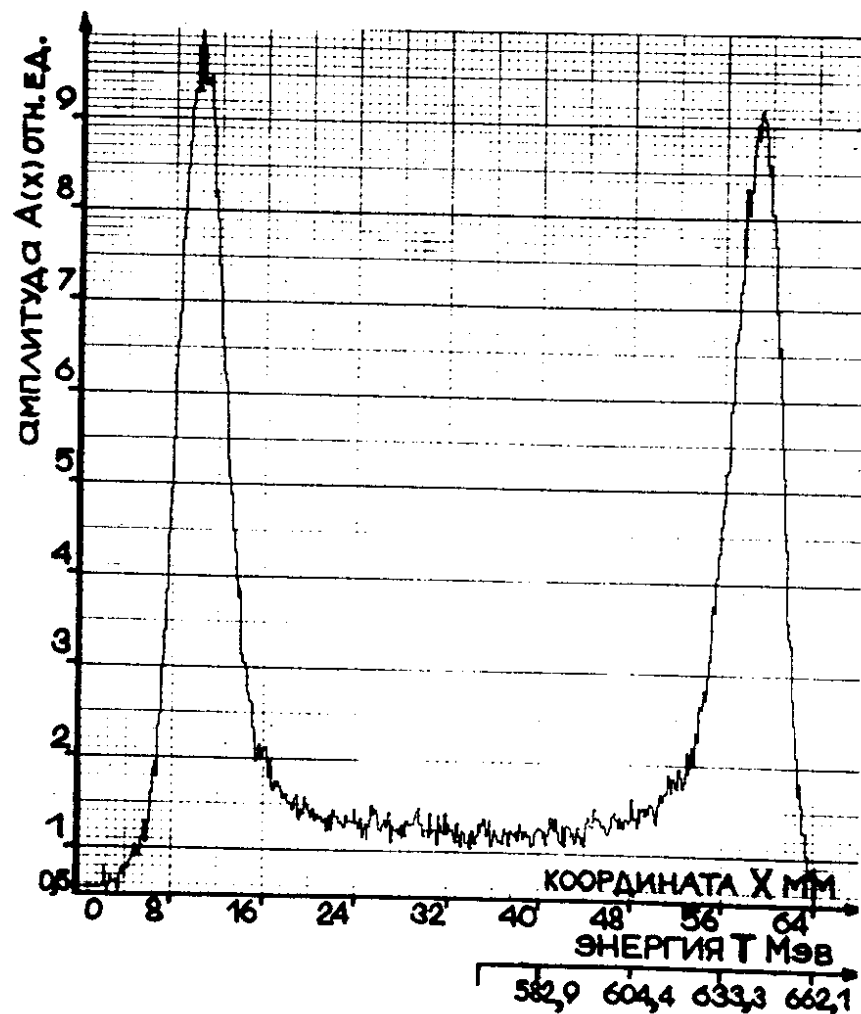


Рис. 4. Экспериментальная кривая $A(x)$.

Таблица 1

i	T_i (МэВ) $ \Delta T_i $ (МэВ)		T_i (МэВ) $ \Delta T_i $ (МэВ)	
	11.08.75		23.09.75	
1	634,5	0,3	645,9	0,2
2	634,1	0,1	645,6	0,1
3	634,2	0,0	645,7	0,0
4	633,8	0,4	645,5	0,2
5	634,0	0,2	645,3	0,4
6	634,3	0,1	645,3	0,4
7	633,8	0,4	646,3	0,6
8	634,1	0,1	645,7	0,0
9	634,6	0,4	645,3	0,4
10	634,8	0,6	645,5	0,2
11	634,4	0,2	646,4	0,7
12	634,0	0,2	645,3	0,4

$\bar{T} = 634,2$ МэВ; $|\overline{\Delta T}| = 0,3$ МэВ $\bar{T} = 645,7$ МэВ; $|\overline{\Delta T}| = 0,3$ МэВ

V. Обработка данных

Прием и обработка поступающей в ЭВМ информации производится по программе EMEAN, блок-схема которой приведена на рис. 5. В программе предусмотрена проверка правильности ввода. В случае ошибки при вводе информации ее признаки выводятся на телетайп. Поступающая информация может быть записана на магнитную ленту или диск. При использовании диска обработка информации производится непосредственно после приема. Энергия вычисляется с помощью соотношений /1-5/. На опыте снимается кривая зависимости амплитуды сигнала с фотоумножителя от координаты щели $A(x)$. В зависимости от требуемой точности измерения координаты пиков определяются одним из трех способов:

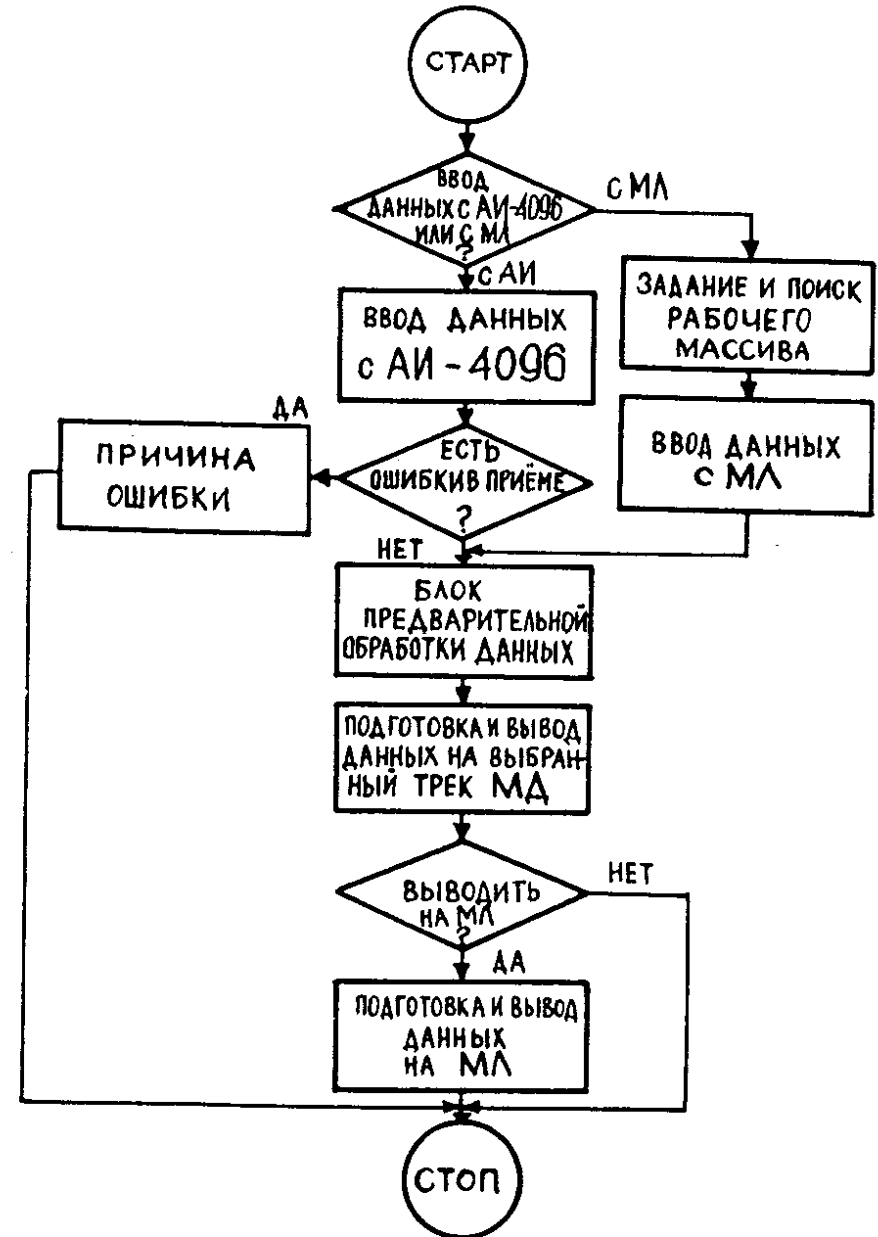


Рис. 5. Блок-схема программы EMEAN.

1/ берется координата, соответствующая максимальной амплитуде;

2/ находится средняя координата

$$\bar{x} = \frac{\sum_i A_i X_i}{\sum_i A_i},$$

причем берутся лишь точки, удовлетворяющие условию $A_i \geq 2/3 A_{\text{макс}}$;

3/ берется средняя координата гауссовой кривой, аппроксимирующей экспериментальный пик.

Кривая $A(x)$ может быть выведена на графопостроитель. Интересующие экспериментатора промежуточные и конечные результаты выводятся на телетайп.

VI. Ошибки измерений

Систематическая ошибка измерений энергии автоматическим методом определяется ошибкой калибровки по методу двойных отражений^{/4/}, составляющей $\pm 0,4$ МэВ. Случайная ошибка обусловлена ошибкой определения диаметра кольца излучения. При аппроксимации пиков кривой $A(x)$ гауссовой кривой расчетная случайная ошибка определения энергии пучка интенсивностью 10^8 с^{-1} с указанной выше временной структурой составляет $\pm 0,4$ МэВ.

Ошибка отдельного измерения, найденная по формуле Питерса^{/9/} для серии измерений, приведенных в табл. 1, составляет $\pm 0,4$ МэВ, что хорошо согласуется с расчетной величиной. Таким образом, полная среднеквадратичная ошибка отдельного измерения равна $\pm 0,6$ МэВ. Необходимо отметить, что с уменьшением интенсивности пучка ошибка в определении диаметра, дающая вклад $\Delta T / \Delta D |_{T=634 \text{ МэВ}} = 1,80 \text{ МэВ/мм}$, увеличивается и при $I = 10^5 \text{ с}^{-1}$ даст ошибку в измерении энергии ≈ 9 МэВ. Уменьшение же полной ошибки измерения при увеличении интенсивности пучка или числа измерений ограничено систематической ошибкой $0,4$ МэВ.

VII. Разрешающая способность метода

Экспериментальная разрешающая способность метода, определенная по полной ширине на половине высоты кривой $A(x)$, составляет $17,2$ МэВ. В табл. 2 приведены факторы уширения кривой $A(x)$ и их вклад в полную ширину, вычисляемую по формуле

$$\Delta T = \Delta T_{\text{щ}} + \Delta T_{\text{хр}} + [(\Delta T_{\text{М.Р.}})^2 + (\Delta T_0)^2]^{1/2}.$$

Приравняв $\Delta T = \Delta T_{\text{эксп}}$, получим $\Delta T_0 = 7,5$ МэВ, что хорошо согласуется с аналогичными данными, полученными в работе^{/10/}.

Авторы благодарны А.Н.Синаеву и А.Г.Петрову за предоставление возможности использования крейта и консультации.

Таблица 2

№	Фактор уширения	Вклад в полную ширину (МэВ)
1.	Остаточный хроматизм $\Delta T_{\text{хр}}$	4,4
2.	Конечная ширина щели $\Delta T_{\text{щ}}$	4,3
3.	Множественное рассеяние ^{/8/} $\Delta T_{\text{М.Р.}}$	1,6
4.	Энергетический разброс и угловая расходимость первичного пучка ΔT_0	7,5

Литература

1. В.П.Зрелов, П.Павлович, П.Шулек. Препринт ОИЯИ, Р13-5637, Дубна, 1971.
2. В.П.Зрелов, М.А.Мусин, П.Павлович, П.Шулек, Р.Яник. Препринт ОИЯИ, Р13-5636, Дубна, 1971.
3. В.П.Зрелов, П.Павлович, П.Шулек. Препринт ОИЯИ, Р13-5866, Дубна, 1971.
4. В.П.Зрелов. Препринт ОИЯИ, Р13-7076, Дубна, 1973.
5. Н.М.Никитюк, В.Попельский, В.Н.Семенов. Препринт ОИЯИ, 13-5083, Дубна, 1970.
6. Н.И.Журавлев, Нгуен Мань Шат, В.Т.Сидоров, А.Н.Синаев, А.А.Стахин, И.Н.Чурин. Сообщение ОИЯИ, 10-7332, Дубна, 1974.
7. Н.И.Журавлев, Ли Зу Эк, Нгуен Мань Шат, А.Г.Петров, В.Т.Сидоров, А.Н.Синаев, А.А.Стахин, И.Н.Чурин. Сообщение ОИЯИ, 10-8114, Дубна, 1974.
8. К.Н.Мухин. Экспериментальная ядерная физика, Атомиздат, 1974.
9. Дж.Сквайрс. Практическая физика, Мир, М., 1971.
10. В.П.Зрелов, В.П.Лупильцев, М.Ф.Шабашов. Препринт ОИЯИ, Р13-9202, Дубна, 1975.

Рукопись поступила в издательский отдел
12 декабря 1975 года.