

53738

К-893

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

1-95-200

На правах рукописи
УДК 539.1.074.4

КУЗЬМИН
Евгений Сергеевич

ИССЛЕДОВАНИЕ АППАРАТНОЙ ФУНКЦИИ
И РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ
ЧЕРЕНКОВСКИХ СПЕКТРОМЕТРОВ

Специальность: 01.04.01 — техника физического
эксперимента, физика приборов,
автоматизация физических исследований

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна 1995

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем
Объединенного института ядерных исследований

Научный руководитель:

кандидат физико-математических наук

А.В. Тарасов

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор

кандидат физико-математических наук

С.М. Коренченко

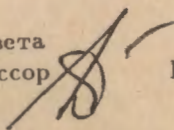
А.Н. Прокофьев

Ведущее научно-исследовательское учреждение:
Институт физики высоких энергий (г. Серпухов)

Защита диссертации состоится " _____ " _____ 1995 года в
_____ часов на заседании Специализированного совета Д-047.01.03 при
Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных ис-
следований, г. Дубна Московской области. С диссертацией можно озна-
комиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан " _____ " _____ 1995 г.

Ученый секретарь Специализированного совета
доктор физико-математических наук, профессор


Ю.А. Батусов

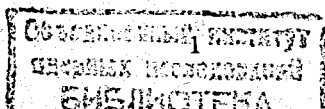
1. Общая характеристика работы

Актуальность проблемы. В современной экспериментальной физике регистрация и разделение частиц по скоростям с помощью излучения Вавилова - Черенкова (ИВЧ) является одним из наиболее распространенных методов. Расчет черенковских спектрометров и обработка результатов, полученных с их помощью, выполняется, как правило, в рамках теории Тамма - Франка.

Разрешение черенковского спектрометра определяется "наблюдаемым" угловым распределением ИВЧ, в формировании которого участвуют "аппаратная функция" спектрометра (реакция прибора на параллельный моноэнергетичный поток частиц), а также угловой и энергетический разброс пучка. В расчетах аппаратной функции спектрометров, построенных для регистрации однозарядных частиц высоких энергий основную роль играет черенковская дисперсия и, как правило, пренебрегается взаимодействием частиц с радиатором. Однако, например, при рассмотрении углового распределения ИВЧ от многозарядных ионов становится ясно, что в результате упругих и неупругих процессов в радиаторе угловой разброс излучения увеличивается настолько, что торможение частиц может стать доминирующим фактором при оценке разрешения спектрометра. Более того, исследование влияния процессов взаимодействия частиц с радиатором на разрешение черенковского спектрометра становится актуальным и для однозарядных частиц, когда оптическая схема спектрометров строится с компенсацией дисперсии.

В диссертации рассмотрены вопросы расчета аппаратной функции спектрометров с учетом многократного рассеяния и торможения частиц в радиаторе, учета вклада углового и энергетического разброса частиц в наблюдаемое распределение и на примере двух черенковских приборов с компенсацией дисперсии продемонстрировано моделирование оптических систем спектрометров.

Цель работы. Моделирование "комбинированного" черенковского прибора и обработка результатов измерения средней энергии пучка протонов. Моделирование "прибора для одновременного определения средней энергии и направления протонного пучка", обработка результатов измерений. Изучение возможностей фоторегистратора состоящего из электронно - оптического преобразователя и диссектора для наблюдения распределения ИВЧ от выведенного пучка протонов фазотрона ЛЯП. Расчет углового распределения ИВЧ с учетом потерь энергии частицей в радиаторе. Расчет углового распределения ИВЧ с учетом одновременно потерь энергии и многократного рассеяния частиц в радиаторе. Вычисление вклада углового и энергетического разброса частиц в наблюдае-



мое распределение излучения.

Научная новизна. Предложен и реализован способ моделирования оптической системы и обработки результатов для "комбинированного" черенковского прибора и "прибора для одновременного измерения энергии и направления пучка протонов".

Показано, что фоторегистрирующая система, составленная из электронно - оптического преобразователя на микроканальной пластине и диссектора позволяет в течение одного макроимпульса ускорителя наблюдать распределение черенковского излучения для пучка протонов со средней интенсивностью 10^8 прот/сек.

Впервые получены формулы для угловой плотности ИВЧ с учетом торможения частиц в радиаторе. Предсказан эффект изменения формы углового распределения черенковского излучения тяжелых ионов в зависимости от их заряда и энергии.

Впервые получены формулы, описывающие угловое распределение черенковского излучения с учетом торможения и многократного рассеяния частиц в радиаторе.

Получены выражения, описывающие вклад углового и энергетического разброса частиц в наблюдаемое распределение излучения.

Практическая ценность. Предложенные способы обработки позволили повысить точность определения средней энергии и угла падения пучка на радиатор.

Положительный результат испытаний фоторегистрирующей системы позволит перейти на электронную методику при измерении средней энергии.

Эффект изменения формы углового распределения ИВЧ тяжелых ионов в зависимости от их заряда дает новую возможность идентификации типа иона по угловому разбросу черенковского излучения.

Формулы для углового распределения ИВЧ с учетом торможения и многократного рассеяния частиц в радиаторе позволяют рассчитывать аппаратную функцию и разрешение черенковских спектрометров многозарядных частиц.

Выражения, описывающие наблюдаемое распределение черенковского излучения с учетом углового и энергетического распределения частиц в пучке дают возможность измерять вместе со средней энергией частиц энергетический разброс пучка.

Автор защищает:

1. Разработку метода и создание программ для обработки результатов измерений средней энергии пучка протонов с помощью "комбинированного черенковского прибора" и "прибора для одновремен-

ного измерения средней энергии и направления".

2. Постановку и результат эксперимента по наблюдению угловой плотности ИВЧ от пучка протонов с помощью фотоэлектронной методики.

3. Результат теоретического исследования черенковского излучения тяжелых ионов. Эффект зависимости формы углового распределения ИВЧ от заряда иона.

4. Результат теоретического рассмотрения черенковского излучения тяжелых заряженных частиц с учетом их торможения и многократного рассеяния в радиаторе.

5. Методику расчета наблюдаемого распределения спектрометра.

Апробация работы и публикации. Диссертация написана на основе научных работ, выполненных с участием автора в ЛЯП ОИЯИ в период с 1987 по 1993 гг. Основные результаты, представленные в диссертации докладывались на семинарах ЛЯП и ЛВЭ и опубликованы в 7 работах: в журналах ПТЭ, NIM и сообщениях ОИЯИ[1-7].

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и содержит 61 страницу текста, включая 8 таблиц, 27 рисунков и список цитируемой литературы из 26 наименований.

2. Содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цели работы и описывается структура диссертации.

В первой главе описан "комбинированный метод" и устройство черенковского прибора для измерения средней энергии пучка протонов. Рассмотрены проблемы, возникающие при обработке и моделировании прибора. Описаны алгоритм главной программы и отдельных подпрограмм. Изложены результаты дополнительных оптических измерений, проведенных при обработке. Представлены результаты обработки измерений средней энергии в двух сеансах на выведенном пучке фазотрона.

В описываемом методе (см. Рис 1) радиатором служит трехгранная призма, ориентированная плоскостью симметрии по оси пучка. Наклонные грани призмы покрыты зеркальным слоем в шахматном порядке, так что через каждую грань выходит как прямое излучение, так и дважды отраженное от граней призмы.

Для компенсации черенковской дисперсии в оптическую схему добавляется ахроматическая призма, также имеющая трехгранную форму и расположенная таким образом, чтобы ось ее симметрии была направлена перпендикулярно к выпускным грани призмы - радиатора. Регистрация

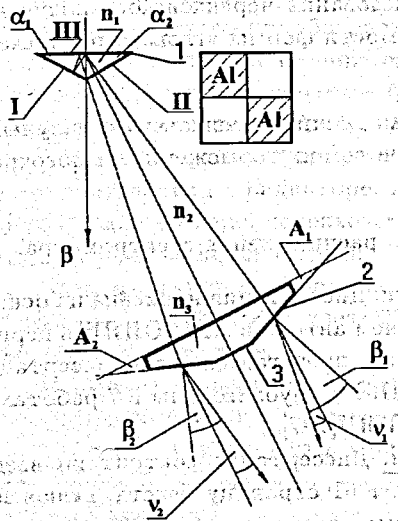


Рис. 1: Схема комбинированного черенковского устройства и ход лучей.

- 1 - призма-радиатор;
 - 2 - спаренная ахроматическая призма;
 - 3 - юстировочная грань;
- Левая ветвь - дважды отраженный луч ИВЧ.

черенковского излучения производилась вблизи плоскости симметрии прибора в небольшой области изменений азимутального угла. Преобразовывая черенковское излучение с помощью объектива можно получить на фотопленке две дуги плотности почернения. Изображение фиксировалось на фотопленке и имело вид, показанный на Рис. 2.

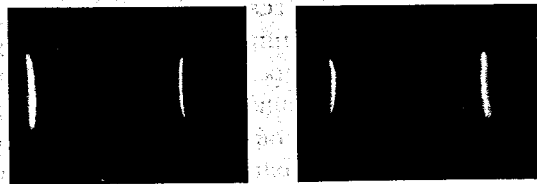


Рис. 2: Фотографии ИВЧ, зарегистрированного в устройстве в плечах I и II. Слева плечо I, справа плечо II.

Фотометрирование дуг производится по оси симметрии и расстояние между пиками почернения на фотометрической кривой взаимнооднозначно соответствует средней энергии пучка, падающих на

радиатор. Измерения производились на выведенном пучке протонов фазотрона ЛЯП ОИЯИ. Непосредственно перед прибором пучок формировался коллиматором диаметром 10 мм и длиной 700 мм.

Обработка экспериментальных данных. Постановка проблемы.

Исходными данными для вычисления средней энергии пучка протонов служили расстояния между центрами пиков на фотометрической кривой черенковских изображений - экспериментальные длины.

При идеальной реализации оптической схемы метода и абсолютной компенсации дисперсии среднюю энергию пучка можно вычислить аналитически исходя из экспериментальных длин. Необходимость использования численных алгоритмов для обработки результатов объясняется нарушениями симметрии использованных призм (неизбежные при практическом изготовлении) и остаточной хроматической дисперсией оптической схемы. Для реального прибора не существует простой аналитической зависимости между расстояниями на пленке и энергией пучка.

Алгоритм главной программы:

1. Чтение экспериментальных длин, констант, параметров прибора и пр.
2. Вычисление средней энергии пучка для монохроматического луча.
3. Вычисление "оптической" аппаратной функции.
4. Определение центра тяжести оптической а.ф.
5. Определение длины волны, соответствующей центру тяжести а.ф.
6. Окончательное вычисление средней энергии.
7. Расчет погрешностей.

Расчет средней энергии пучка для монохроматического излучения.

Для начала расчетов необходимо было сделать оценку энергии пучка. Эта оценка проводилась в предположении моноэнергетичности излучения (фильтрации) для длины волны $\lambda_m = 0,5$ мкм. Алгоритм основан на том, что прямой расчет прибора (от энергии к экспериментальным длинам) не представляет трудности и может быть реализован в достаточно короткое время. В результате прямого расчета была получена в численном виде функциональная зависимость $l = f(T, \lambda_m)$ расстояния между пиками l от энергии пучка T . Далее отыскивался нуль функции $w = f(T) - l_e$, где l_e - экспериментальная длина, и определялось значение энергии.

Расчет оптической аппаратной функции.

Ко времени выполнения обработки результатов измерений еще не были известны формулы, описывающие наблюдаемое распределение черенковского излучения. Поэтому моделирование прибора выполнялось в следующих упрощающих предположениях: пучок протонов считался моноэнергетическим и параллельным а угловое распределение ИВЧ заимствовалось из теории Тамма - Франка. В расчетах были учтены спектральное распределение и дисперсия ИВЧ, а также оптика спектрометра. Рассчитанное таким способом распределение плотности излучения представляет собой "оптическую" составляющую а.ф. При вычислениях средней энергии центр тяжести "оптической" а.ф. сравнивался с центром тяжести наблюдаемого распределения, полученного в эксперименте.

Функция $I(l, T)$ - модельная оптическая а.ф. рассчитывалась в геометрическом приближении исходя из интенсивности луча ИВЧ, который испускается с длиной волны λ и под углом θ соответствующих координате l .

Далее, по мере прохождения луча по оптическому каналу, интенсивность луча ослабляется при пересечении оптических поверхностей, при поглощении света в оптических средах на пути луча в радиаторе, призме - монохроматоре и в объективе, как целом. Попадая на поверхность фотопленки луч вызывает ее почернение пропорциональное интенсивности луча $I(l, T)$ и спектральной чувствительности фотопленки S_λ .

Деление светового потока при падении на поверхность оптических элементов рассчитывалось по формулам Френеля.

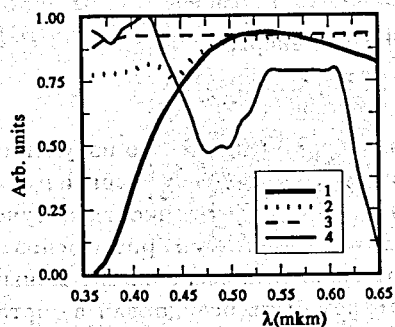


Рис. 3: Спектры пропускания элементов прибора.

- 1 - Объектив Гелиос-40; 2 - стекло ТФ-5 толщиной 10 мм; 3 - кварц КВ толщиной 2 мм; 4 - спектральная чувствительность кинопленки КН-3.

Для учета поглощения света в материале оптических элементов были произведены измерения спектров пропускания образцов плавленного кварца и оптического стекла вырезанных из тех же заготовок, которые использовались при изготовлении радиатора и монохроматической призмы и объектива, использованного в эксперименте. Результаты

измерений показаны на Рис. 3. Далее эти данные использовались для вычисления центра тяжести аппаратной функции. Рассчитанная аппаратная функция интегрировалась для определения центра тяжести l_c и вычислялась длина волны λ_c , соответствующая этому центру тяжести.

Окончательное вычисление энергии проводилось как для монохроматического излучения с "эффективной" длиной волны λ_c . Для вновь полученного значения энергии вновь вычислялась эффективная длина волны и цикл повторялся до совпадения двух последних значений энергии в пределах 0,05 МэВ.

Коэффициенты преломления оптических элементов.

Значения используемых в вычислениях коэффициентов преломления сильно влияют на конечный результат расчетов. Для поддержания необходимой точности следовало определить коэффициенты преломления оптических элементов с погрешностью не хуже $5 \cdot 10^{-5}$. С этой целью коэффициенты преломления элементов оптического тракта измерялись непосредственно на самих элементах для шести значений длин волн и измеренные значения фиксировались зависимостью:

$$n(\lambda) = n_0 + k_1 \lambda^{-2} + k_2 \lambda^{-4}$$

Результаты и погрешности обработки.

Всего на протяжении полутора лет было проведено 3 серии измерений средней энергии выведенного пучка протонов фазотрона ОИЯИ с различными вариантами компенсации дисперсии.

Результаты обработки этих измерений приведены в Табл. 1, где номер плеча указывает, в какое положение относительно радиатора была установлена призма, l - здесь измеренное на пленке расстояние между пиками - экспериментальная длина.

Таблица 1: Результаты обработки измерений.

| Дата | № плеча | № призмы | l , мм | T , МэВ | T , МэВ |
|----------|---------|----------|----------|-----------|-----------|
| 12.01.86 | 1 | 1 | 23,20 | 657,4 | |
| | 2 | 2 | 23,27 | 658,4 | 657,9 |
| 12.06.87 | 1 | 3 | 22,22 | 654,1 | |
| | 2 | 4 | 22,31 | 654,8 | 654,5 |

С целью определения влияния погрешностей отдельных параметров прибора на результат вычислений в программу обработки была вклю-

чена дополнительная часть, с помощью которой каждый параметр раздельно варьировался на величину его среднеквадратичного отклонения и затем повторялся полный цикл обработки до вычисления энергии пучка. Отклонение вычисленного таким образом значения энергии от основного значения интерпретировалось как среднеквадратическая составляющая для полной погрешности энергии. Подобная процедура была проделана и с исходными данными. Результаты этих расчетов приведены в Табл. 2, где приведены погрешности отдельных параметров (обозначены в соответствии с Рис. 1), имеющих наибольшее влияние на ошибку в определении энергии. Среднеквадратическая ошибка значения средней энергии

Таблица 2: Источники погрешностей обработки.

| Параметр | Величина | $\Delta T, \text{МэВ}$ |
|-----------------|-----------------------|------------------------|
| ΔA | $\pm 10''$ | $\pm 0,027$ |
| $\Delta \alpha$ | $\pm 5''$ | $\pm 0,047$ |
| Δn_1 | $\pm 5 \cdot 10^{-5}$ | $\pm 0,109$ |
| Δn_3 | $\pm 5 \cdot 10^{-5}$ | $\pm 0,024$ |
| Δl | $\pm 0,03 \text{мм}$ | $\pm 0,207$ |
| Калибровка | $\pm 0,02 \text{мм}$ | $\pm 0,138$ |
| Дисперсия | | $\pm 0,5$ |

гии протонов в предположении некоррелированности параметров равна $\Delta T = \pm 0,60 \text{ МэВ}$.

Во второй главе диссертации дано описание прибора для одновременного измерения энергии и направления протонного пучка. Обсуждается постановка проблемы обработки. Приведено описание алгоритмов программы. Представлены результаты обработки измерений средней энергии и направления пучка протонов.

В этом методе измерения черенковского излучения проводятся вблизи плоскости, проведенной через нормаль к поверхности плоского радиатора и траекторию частицы в области небольших изменений азимутального угла. Если частица со скоростью β падает на плоскопараллельный радиатор под углом α и выполняется условие, что $\beta > n_1^{-1}$, где n_1 - показатель преломления радиатора, то ИВЧ, испущенное в радиаторе под углом $\theta = \arccos(\beta n_1)^{-1}$ к направлению движения частицы будет выходить из пластины радиатора под углами γ_1 и γ_2 , (см. Рис. 4). В таком случае, измеряя в эксперименте углы выхода излучения γ_1 и γ_2 мы можем

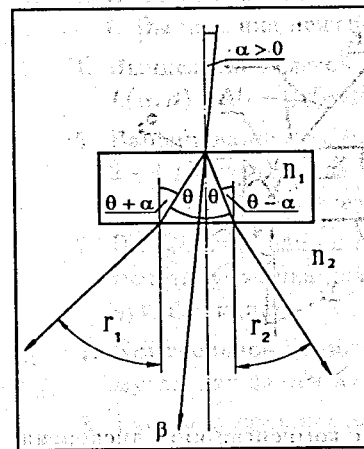


Рис. 4: Ход лучей ИВЧ при прохождении частицей плоскопараллельной пластинки под углом α со скоростью β .

восстановить параметры пучка.

Однако практически использовать этот метод в чистом виде не удастся из-за сильной зависимости углов γ_1 и γ_2 от длины волны ИВЧ. Если диапазон волн $\Delta \lambda$ ограничивается очень сильно, то в таком случае интенсивность света недостаточно велика даже при измерениях пучков протонов с интенсивностью 10^8 прот/сек.

В практических измерениях необходимо использовать дополнительное устройство для компенсации дисперсии - ахроматическую призму. Геометрия ахроматической призмы и ее расположение относительно радиатора показано на Рис. 5. Плоскопараллельный радиатор был изготовлен из фтористого лития толщиной 1,5 мм., ахроматическая призма из оптического стекла марки ЛК-4. Измерения проводились на выведенном пучке протонов 660 МэВ фазотрона ЛЯП ОИЯИ.

Обработка экспериментальных данных. Постановка проблемы.

Исходными данными для вычислений средней энергии и угла падения пучка на радиатор служили экспериментальные длины - расстояния от начала отсчета до центра пика черенковского изображения на фотометрической кривой.

В предположении полной компенсации дисперсии скорость β и угол падения пучка на радиатор α можно определить аналитически. Однако точность определения энергии таким способом невысока. Дело в том, что при регистрации ИВЧ в широком спектральном диапазоне и значительных углах падения частиц на плоский радиатор автоматический компенсатор имеет остаточную дисперсию второго порядка которая и ограничивает точность измерений.

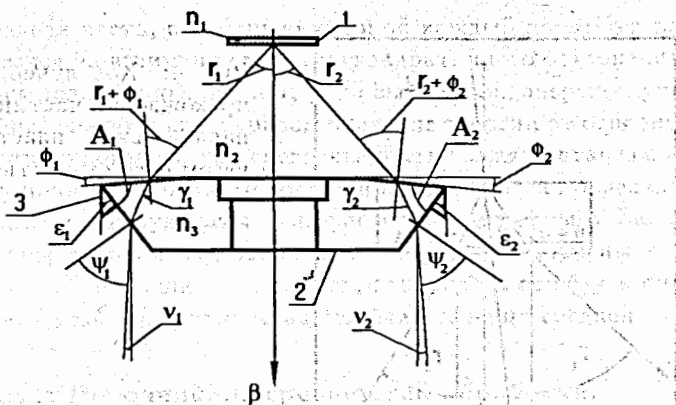


Рис. 5: Схема черенковского устройства с компенсатором дисперсии; 1 - радиатор из LiF; 2 - ахроматическая призма из стекла ЛК-4; 3 - реперная призмочка.

Для повышения точности определения энергии и реализации потенциальных возможностей метода нами был использован метод обратной задачи. Суть использованного приема состоит в том, что были построены в приближении геометрической оптики модельные функции $f_{1,2}(\alpha, \beta)$ обоих плеч прибора а затем варьированием свободных параметров (в нашем случае это β и α) минимизировалась сумма квадратов разностей между измеренными расстояниями $l_{1,2}$ на пленке и рассчитанными по модельным функциям.

$$L(\alpha, \beta) = [l_1 - f_1(\alpha, \beta)]^2 + [l_2 - f_2(\alpha, \beta)]^2;$$

Улучшение точности здесь достигается тем, что в модельной функции, существующей в численном виде, можно учесть все значимые эффекты, влияющие на прохождение света в оптическом тракте. Аналитическое представление модельной функции на наш взгляд, невозможно из-за громоздкости и сложности аналитических выражений.

Алгоритм главной программы.

1. Чтение экспериментальных длин, констант, параметров прибора из базы данных. Печать исходных данных.
2. Начало процесса поиска минимума суммы квадратов разностей по переменным β и α . Вычисление минимума функции $l = f(\lambda, T_p, \alpha)$ для произвольных значений энергии и угла лежащих в области $T_p = (660 \pm 20)$ МэВ и $\alpha = (0 \pm 3)$ градуса.

3. Интегрирование распределений плотности ИВЧ по координате l . Вычисление центров тяжести распределений.
4. Вычисление целевой функции в виде $L(\alpha, \beta) = [l_1 - f_1(\alpha, \beta)]^2 + [l_2 - f_2(\alpha, \beta)]^2$
5. Варьирование параметров α и β . Повторение процедуры пп. 2 - 4 до нахождения минимума целевой функции. Определение длины волны, соответствующей центру тяжести пика.
6. Вычисление длины волны, соответствующей центру тяжести модельного пика для значений β и α , минимизирующих целевую функцию.
7. Контрольное вычисление угла и энергии по аналитическим формулам для длины волны центра тяжести.
8. Расчет погрешностей.

Использованный в программе метод поиска минимума функции двух переменных с помощью библиотечной программы MINUIT предполагает использование больших вычислительных ресурсов, поскольку в процессе поиска минимума необходимо проделать вычисления аппаратной функции и прямые расчеты координат пика черенковского излучения до нескольких сот раз. С целью уменьшения вычислительного времени алгоритмы, использованные для вычисления оптической аппаратной функции в Гл. 1 сохраненные в общих чертах и переработанные в соответствии с конструкцией прибора подверглись сокращению и оптимизации. При обработке результатов измерений так же как в комбинированном методе проводилось сравнение координат центра тяжести наблюдаемого распределения и центра тяжести оптической аппаратной функции.

Результаты и погрешности обработки.

С описываемым прибором было проведено две серии испытаний на выведенном пучке протонов фазотрона ОИЯИ. Для исследования возможностей прибора испытания производились следующим образом. База прибора жестко фиксировалась на массивном коллиматоре для обеспечения стабильности положения относительно пучка протонов. Оптические элементы прибора располагались на платформе, которая могла поворачиваться вокруг оси, проходящей через центр ахроматической призмы. Таким образом была обеспечена возможность провести измерения при одной энергии протонного пучка но при разных углах его падения на радиатор. Угол поворота определялся грубо с помощью механической шкалы. В каждом из сеансов проводилась серия измерений при пяти положениях платформы относительно направления пучка. Далее каждое

измерение из серии обрабатывалось независимо. Результаты обработки

Таблица 3: Результаты обработки измерений.

| Дата | $\alpha_{\text{оад}}$ | l_1 мм | l_2 мм | T , МэВ | $\alpha_{\text{оксп}}$ |
|---------|-----------------------|----------|----------|-----------|------------------------|
| 29.6.86 | 0° | 5,19 | 5,67 | 649,18 | -0°05'50" |
| | 1° | 7,59 | 3,17 | 649,08 | 0°50'25" |
| | 2° | 9,92 | 0,57 | 648,96 | 1°46'48" |
| | 3° | 12,48 | -2,41 | 649,26 | 2°49'46" |
| | 4° | 14,71 | -5,10 | 649,99 | 3°45'11" |
| 12.6.87 | 0° | 6,02 | 5,62 | 653,21 | -0°04'19" |
| | 1° | 7,87 | 3,65 | 652,81 | 0°48'23" |
| | 2° | 10,58 | 0,85 | 653,93 | 1°51'54" |
| | 3° | 13,13 | -2,31 | 653,41 | 2°56'59" |

этих измерений приведены в Табл. 3, где $\alpha_{\text{оад}}$ - есть угол (грубо), на который была повернута платформа перед экспозицией, l_1, l_2 - экспериментальные длины, в первой и второй фотокамерах; соответственно, T - вычисленная средняя энергия пучка, α - вычисленный угол падения пучка на радиатор. Из сравнения значений энергии, определенных при различных углах падения пучка видна хорошая воспроизводимость результатов.

С учетом подтормаживания протонов измерения энергии описываемым методом находятся в хорошем соответствии с измерениями, проведенными в этих же сеансах комбинированным методом (Гл.1).

Для определения погрешностей обработки был использован тот же алгоритм, что и при обработке результатов комбинированного метода. Программа включала в себя отдельный блок вычисления погрешностей, где каждый параметр прибора варьировался отдельно на величину его среднеквадратичного отклонения и затем повторялся полный цикл обработки до вычисления энергии и угла падения пучка. Отклонения вычисленных таким образом значений энергии и угла падения от основных значений (вычисленных при нулевых погрешностях) интерпретировались как среднеквадратические составляющие для полных погрешностей угла и энергии. Подобная процедура была проделана и с исходными данными. Результаты этих расчетов приведены в Табл. 4, где приведены погрешности отдельных параметров, имеющих наибольшее влияние на ошибки в определении энергии и угла. Среднеквадратические ошибки значений средней энергии и угла падения пучка в предположении некоррели-

Таблица 4: Погрешности обработки.

| Параметр | Величина | ΔT , МэВ | $\Delta \alpha$ |
|-------------------|-----------------------|------------------|-----------------|
| Δa | $\pm 5''$ | $\pm 0,022$ | $\pm 3,0''$ |
| $\Delta \phi$ | $\pm 5''$ | $\pm 0,012$ | $\pm 2,0''$ |
| $\Delta n(LiF)$ | $\pm 4 \cdot 10^{-5}$ | $\pm 0,05$ | $\pm 7,0''$ |
| $\Delta n(LK-4)$ | $\pm 4 \cdot 10^{-5}$ | $\pm 0,028$ | $\pm 4,0''$ |
| $\Delta \epsilon$ | $\pm 5''$ | $\pm 0,01$ | $\pm 1,0''$ |
| $\Delta l_{1,2}$ | $\pm 0,03$ мм | $\pm 0,2$ | $\pm 22,0''$ |

рованности ошибок параметров равна соответственно $\Delta T = \pm 0,20$ МэВ, и $\Delta \alpha = 22''$.

В третьей главе дается описание фоторегистрирующей системы, составленной из электронно-оптического преобразователя на микроканальной пластине и диссектора. Описано устройство прибора, использованного для испытаний, и постановка эксперимента. Приведены результаты испытаний.

В описанных в Гл. 1 и 2 методах до настоящего времени для регистрации распределения интенсивности ИВЧ от пучка частиц использовались либо фотоматериалы, либо сканирующий умножитель со щелью. По ряду причин точность сенситометрических измерений при работе с фотоматериалами невысока. Механическое перемещение умножителя по кадровому окну приходится за время около 30 сек., что позволяет производить только усредненные по времени измерения.

Целью проведенного эксперимента являлось изучение возможности наблюдения распределения интенсивности ИВЧ выведенного пучка фазотрона ЛЯП ОИЯИ в одном макроимпульсе ускорителя.

Фоторегистратор.

В качестве фоторегистратора использовалась система (Рис. 6), состоящая из электронно-оптического преобразователя (ЭОП) с микроканальной пластиной (МКП), сочлененного с диссектором ЛИ-605 с помощью волоконно-оптического контакта. Фоторегистратор стыковался с черенковским прибором, устройство которого изложено в Гл. 1. Диссектор работал в однострочном режиме, сканирование экрана осуществлялось за время 40 мксек. Режим работы ЭОПа - статический. Запуск генератора развертки диссектора осуществлялся от синхроимпульса ускорителя. Для запуска генератора развертки с частотой 1 Гц синхроимпульсы ускорителя прореживались одновибратором с мертвым временем

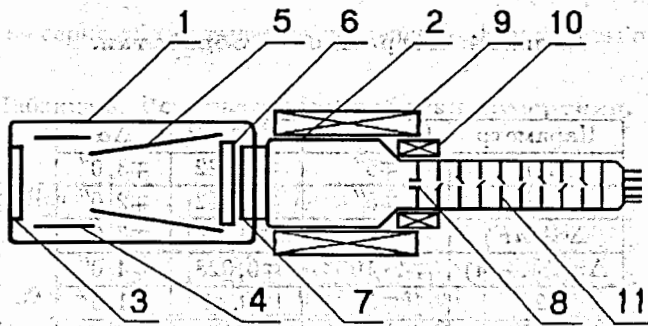


Рис. 6: Сборка ЭОП - диссектор;

1 - электронно-оптический преобразователь; 2 - диссектор; 3 - волоконно-оптическая шайба; 4 - фокусирующий электрод; 5 - анод; 6 - микроканальная пластина; 7 - волоконно-оптическое соединение; 8 - щель диссектора; 9 - фокусирующая катушка; 10 - катушка строчной развертки; 11 - вторично-электронный умножитель.

Для точной синхронизации с реальным пучком и контроля запуска генератора развертки использовался телескоп из трех сцинтилляционных счетчиков. Анодный сигнал с диссектора выводился на запоминающий осциллограф и фотографировался.

В эксперименте на выведенном пучке фазотрона было продемонстрировано, что фоторегистрирующая система, составленная из ЭОПа на МКП и диссектора ЛИ-605, позволяет в течение одного макроимпульса ускорителя (40 мксек) проводить измерения распределения интенсивности черенковского излучения для пучка протонов со средней интенсивностью $J = 10^7$ прот/сек. При этом разрешение в фокальной плоскости объектива $R = 0,1$ мм, а точность измерений определяется статистикой фотонов ($N_{\Phi} \sim 10^6$).

В четвертой главе описываются результаты теоретических исследований аппаратной функции черенковских спектрометров. Приводятся вывод формул, описывающих черенковское излучение тяжелых ионов с учетом потерь энергии в радиаторе. Приводятся расчеты угловых распределений ИВЧ с учетом как многократного рассеяния так и торможения частиц в радиаторе. Изложен метод учета вклада углового и энергетического разброса частиц пучка в наблюдаемую угловую плотность ИВЧ.

Теория Тамма - Франка описывает черенковское излучение частицы, движущейся прямолинейно и равномерно в среде с показателем преломле-

ния $n > c/v$ (v - скорость частицы, c - скорость света в вакууме). Иными словами в этой теории пренебрегается эффектами взаимодействия частицы с веществом радиатора, приводящим как к искривлению ее траектории (многократное рассеяние), так и к систематическому уменьшению скорости (ионизационные потери).

В первом разделе четвертой главы диссертации рассматривается предельный случай, когда влияние многократного рассеяния незначительно, а основную роль в формировании углового распределения черенковского излучения играет именно эффект торможения. Такая ситуация реализуется при прохождении через тонкие радиаторы ядер тяжелых элементов ($Z, A \gg 1$).

Задача рассматривалась в следующем приближении. В пренебрежении флуктуациями энергетических потерь, считалось, что в каждый момент времени частица имеет строго определенную энергию и потеря энергии пропорциональна пройденному пути. Поскольку также пренебрегалось и эффектами искривления траектории, задача сводилась к исследованию углового распределения ИВЧ от частицы, движущейся прямолинейно, и равномерно.

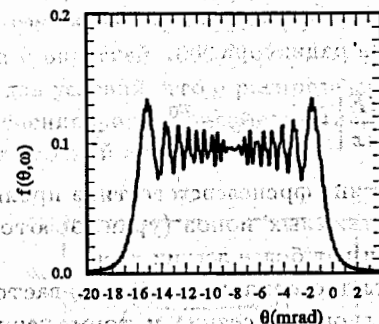


Рис. 7: Угловое распределение излучения, рассчитанное с учетом торможения для ядер золота с энергией 1000 МэВ на нуклон, падающих на радиатор из кварца толщиной 0,5 см.

В результате было получено угловое распределение, изображенное на Рис. 7. На Рис. 8 приведено для сравнения распределение для угловой плотности черенковского излучения, следующее из теории Тамма - Франка. Наиболее существенные отличия распределений на Рис. 7 и 8 на наш взгляд, состоят в следующем. Центр тяжести распределения на Рис. 7 смещен по сравнению с распределением Тамма - Франка в сторону меньших углов. Ширина распределения на Рис. 7 значительно больше, чем у распределения Тамма - Франка и с увеличением толщины радиатора растет пропорционально последней. Для распределения Тамма - Франка характерна обратная ситуация, его ширина убывает обратно пропорционально толщине радиатора.

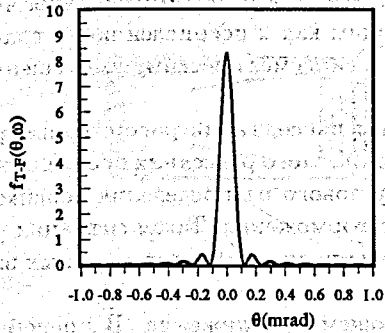


Рис. 8: Распределение Тамма-Франка рассчитанное для ядер золота с энергией 1000 МэВ на нуклон, падающих на радиатор из кварца толщиной 0,5 см.

Если проводить оптическую аналогию, то угловая плотность черенковского излучения частицы движущейся равнозамедленно подобна дифракции Френеля на щели, в то время как излучение частицы движущейся равномерно распределено в соответствии с дифракционной картиной Фраунгофера. Более того, если расстояние между максимумами (параметр дифракции) в теории Тамма - Франка определяется длиной волны и толщиной радиатора, $\delta\theta = \lambda/nL$; то в распределении с учетом торможения частиц выражение для параметра дифракции включает в себя удельные потери энергии в веществе радиатора.

$$\theta_d^2 = \frac{|v_0|\lambda}{\pi c} = \frac{1}{\pi\beta_0} (1 - \beta_0^2) \left| \frac{dE}{dx} \right| \frac{\lambda}{E_0}, \quad \beta_0 = \frac{v_0}{c}$$

Наиболее отчетливо дифракционная картина френелевского типа проявляется в черенковском излучении сверхтяжелых ионов (уран, золото), однако ее проявления можно наблюдать и для более легких ядер.

Во втором разделе четвертой главы диссертации рассматривается задача одновременного учета многократного рассеяния и торможения частиц на формирование углового распределения черенковского излучения.

Задача решалась в следующем приближении: так же, как и при расчетах углового распределения излучения только с учетом торможения считалось, что в рассматриваемой модели частица имеет энергию строго определенную координатой т.е. использовалось так называемое приближение "непрерывного замедления". Кроме того было использовано приближение Фоккера - Планка для описания многократного рассеяния частиц в веществе и предполагалось, что угол черенковского излучения значительно превышает среднеквадратический угол многократного рассеяния. Общий подход к рассмотрению процессов излучения при прохожде-

нии релятивистских частиц через вещество был предложен А.Б. Мигдалом в теории тормозного излучения быстрых частиц в веществе. Согласно этому подходу, чтобы учесть многократное рассеяние частицы в процессе излучения, необходимо произвести усреднение интенсивности по всем возможным траекториям частицы в пространстве координат и скоростей. Результат расчетов продемонстрирован на Рис. 9.

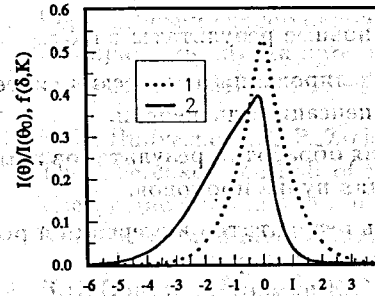


Рис. 9: Угловые распределения, рассчитанные протонов с $E = 660$ МэВ, в радиаторе из LiF, $d = 2$ см, ($\lambda = 400$ нм). 1 - распределение без учета потерь энергии; 2 - распределение, где учтены потери энергии.

Учет многократного рассеяния сильно влияет на форму угловых распределений ИВЧ тяжелых ионов. На Рис. 10 показан результат расчета угловой плотности черенковского излучения при падении ионов золота с энергией 1000 МэВ/н на кварцевый радиатор толщиной 0,5 см, т.е. для условий, что и распределение на Рис. 7. Очевидны значительные изменения формы распределения, которое практически представляет из себя плоский столик.

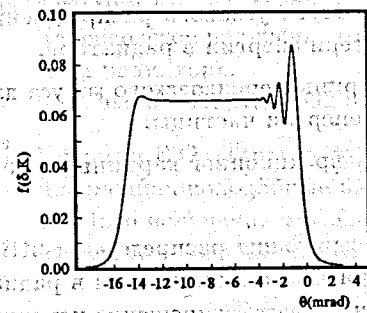


Рис. 10: Угловое распределение ИВЧ с длиной волны $\lambda = 546$ нм для ионов золота с энергией 1000 МэВ на нуклон падающих на кварцевый радиатор толщиной 0,5 см рассчитанное с учетом многократного рассеяния.

Отдельно в диссертации рассмотрен вопрос о влиянии на форму наблюдаемого распределения спектрометра углового и энергетического разброса частиц. Показано, что в формировании наблюдаемого распределения участвует только проекция углового распределения частиц на

плоскость, вблизи которой осуществляется наблюдение ИВЧ.

Если измерения проводятся с пучком, у которого скомпенсирована угловая дисперсия и компенсирована хроматическая абберация, то наблюдаемое угловое распределение излучения от пучка может быть представлено сверткой аппаратной функции спектрометра, проекции углового разброса частиц на плоскость наблюдения, и энергетического разброса в пучке. Таким образом, для восстановления энергетического распределения частиц необходимо проводить дополнительные измерения проекции углового разброса пучка.

В заключении сформулированы основные результаты работы:

1. Предложен и реализован метод моделирования оптических систем черенковских спектрометров с компенсацией дисперсии.

Созданные модели использованы для обработки результатов измерений средней энергии и направления пучка протонов.

Метод позволил повысить точность результатов измерений и реализовать потенциальные возможности приборов.

2. Поставлен и проведен эксперимент по исследованию возможностей высокочувствительного координатного фотоприемника для наблюдения черенковского излучения от пучка протонов.

Были достигнуты следующие результаты: удалось наблюдать распределение ИВЧ в течение одного макроимпульса ускорителя от пучка протонов со средней интенсивностью 10^8 прот/сек, при разрешении $R = 0,1$ мм, и статистике фотонов на фотокатоде $N = 10^6$ фот.

3. Впервые получены формулы для расчета углового распределения ИВЧ от частиц, испытывающих потери энергии в радиаторе.

Предсказан эффект зависимости ширины черенковского конуса для многозарядных частиц от заряда и энергии частицы.

Предсказано изменение характера дифракционной картины по сравнению с теорией Тамма - Франка.

4. Впервые получены выражения, описывающие распределение ИВЧ с учетом торможения и многократного рассеяния частиц в радиаторе. Эти формулы позволяют рассчитывать разрешение черенковских спектрометров с компенсацией дисперсии.

5. Получены формулы для расчета наблюдаемого распределения излучения от пучка частиц обладающего угловым и энергетическим разбросом.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. В.П. Зрелов., Кузьмин Е.С., Лупильцев В.П., Я. Ружичка.
Испытание комбинированного черенковского метода измерения средней энергии протонов 660 МэВ.
Сообщение ОИЯИ 13-87-835, Дубна, 1987.
2. С.Ю. Будашова, В.П. Зрелов., Кузьмин Е.С.
Черенковский способ одновременного определения средней энергии и направления пучка протонов с энергией 660 МэВ.
Сообщение ОИЯИ 13-87-835, Дубна, 1987.
3. S.Yu. Budyashova, V.P. Zrellov, E.S. Kuzmin.
The Cherenkov Method of Simultaneous Determination of the Mean Energy and Direction of a 650 MeV Proton Beam.
Nucl. Instr. and Meth. A277(1989) 304.
4. В.П. Зрелов., Кузьмин Е.С., Тютюнников С.И., Шаляпин В.Н.
Исследование возможностей фотоэлектронного регистратора для измерения интенсивности черенковского излучения.
Сообщение ОИЯИ P13-89-208, Дубна, 1989.
5. Зрелов В.П., Кузьмин Е.С., Лупильцев В.П., Ружичка Я.
Комбинированное черенковское устройство для измерения средней энергии протонов в области 660 МэВ.
Приборы и техника эксперимента, N1, (1990) 72.
6. Кузьмин Е.С., Тарасов А.В.
Черенковское излучение пучка тяжелых заряженных частиц в толстом радиаторе.
Сообщение ОИЯИ P1-92-525, Дубна, 1992.
7. Кузьмин Е.С., Тарасов А.В.
Дифракционноподобные эффекты в угловом распределении черенковского излучения тяжелых ионов.
Краткие сообщения ОИЯИ, N 4[61]-93, Дубна, 1993, с. 64.

Рукопись поступила в издательский отдел
27 апреля 1995 года.