

3-895

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

1 - 6750

ЗРЕЛОВ

Валентин Петрович

ПРЕЦИЗИОННЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ  
СРЕДНЕЙ ЭНЕРГИИ ПРОТОНОВ 660 МЭВ  
ПО ИЗЛУЧЕНИЮ ВАВИЛОВА-ЧЕРЕНКОВА  
И ИССЛЕДОВАНИЕ ЕГО СВОЙСТВ  
В АНИЗОТРОПНЫХ СРЕДАХ

Специальность 01.04.01 - экспериментальная физика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

(Диссертация написана на русском языке)

Дубна 1972

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований.

Официальные оппоненты:  
член-корреспондент АН СССР,  
доктор физико-математических наук Ю.Д.Прокошкни,  
доктор физико-математических наук Б.М.Болотовский.

Ведущее предприятие:  
Московский ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени  
государственный университет им. М.В.Ломоносова.

Автореферат разослан "17" *октября* 1972 года  
Защита диссертации состоится "7" *декабря* 1972 года  
в 11.00 часов на заседании Ученого совета Лаборатории ядерных  
проблем Объединенного института ядерных исследований, г.Дубна,  
Московской области, Лаборатория ядерных проблем ОИЯИ, кон-  
ференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Ученый секретарь Совета

*Ю.А.Батусов*

1 - 6750

ЗРЕЛОВ  
Валентин Петрович

ПРЕЦИЗИОННЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ  
СРЕДНЕЙ ЭНЕРГИИ ПРОТОНОВ 660 МЭВ  
ПО ИЗЛУЧЕНИЮ ВАВИЛОВА-ЧЕРЕНКОВА  
И ИССЛЕДОВАНИЕ ЕГО СВОЙСТВ  
В АНИЗОТРОПНЫХ СРЕДАХ

Специальность 01.04.01 - экспериментальная физика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

(Диссертация написана на русском языке)



Уникальное физическое явление, открытое П.А.Черенковым<sup>/1/</sup> под руководством С.И.Вавилова в 1934 году и теоретически объясненное И.Е.Таммом и И.М.Франком<sup>/2/</sup> в 1937 году, впоследствии названное излучением Вавилова-Черенкова, не сразу нашло применение в исследованиях с элементарными частицами.

Только на определенном этапе развития ускорительной техники, а именно, в связи с вводом в действие в конце 40-х годов синхроциклотронов сначала на энергию протонов 340 Мэв /Беркли, США/, а вскоре на еще большую энергию - 460 Мэв /1950 г./ и 660 Мэв /1953 г./ /Дубна, Советский Союз/, экспериментальная ядерная физика получила базу для развертывания исследований с релятивистскими частицами.

Поскольку протоны в пучках от этих ускорителей имели скорости выше порога возникновения излучения Вавилова-Черенкова практически во всех твердых и жидких прозрачных средах, естественно, появились идеи и возможности использования основного свойства излучения Вавилова-Черенкова - резкой направленности для точного измерения скоростей частиц сначала в пучках, а затем, в связи с успехами в развитии электронных методов экспериментальной физики высоких энергий, и одиночных частиц.

В дальнейшем с прогрессом в области ускорителей существенно раздвинулся диапазон скоростей различных частиц, способных испускать излучение Вавилова-Черенкова, что повлекло за собой создание различных типов счетчиков Черенкова, основанных на всем многообразии свойств этого эффекта.

В настоящее время излучение Вавилова-Черенкова настолько прочно вошло в арсенал средств, используемых в опытах с элементарными частицами /в особенности, если это касается исследований в физике средних и высоких энергий/, что практически стала

немыслимой постановка эксперимента при помощи электронной методики без применения того или иного типа счетчиков Черенкова.

Диссертационная работа посвящена проблеме использования излучения Вавилова-Черенкова для измерения энергии протонов в области  $\approx 1$  Гэв в коллимированных пучках, изучению его свойств в анизотропных средах, а также одному из новых методов поиска магнитных зарядов по излучению Вавилова-Черенкова на ускорителях в сотни Гэв и некоторым актуальным задачам по проверке теории излучения Вавилова-Черенкова.

В соответствии со всеми этими проблемами работа разбита на три самостоятельных раздела.

## I.

Раздел посвящен прецизионным методам измерения средней энергии протонов в области  $\approx 1$  Гэв по излучению Вавилова-Черенкова. Согласно теории Тамма-Франка, имеет место простая связь между половиной угла  $\theta$  при вершине конуса излучения Вавилова-Черенкова, возникающего от частицы при ее движении в среде с абсолютным показателем преломления  $n$  со скоростью  $\beta > n^{-1}$ , которая выражается формулой  $\cos \theta = 1 / n\beta$ .

Однако непрерывный характер спектра излучения Вавилова-Черенкова приводит к тому, что показатель преломления  $n(\lambda)$  в этой формуле, а, следовательно, и угол излучения  $\theta(\lambda)$  зависят от длины волны регистрируемого излучения. Это обстоятельство накладывает серьезные ограничения на точность измерения скоростей частиц по углу излучения Вавилова-Черенкова.

Есть две возможности, позволяющие устранить влияние дисперсии среды на точность измерения угла излучения: а/ монохроматизация излучения; б/ ахроматизация /или апохроматизация/ излучения. Используя вторую возможность, впервые эту трудность преодолел в 1951 году Мазер <sup>/3/</sup>, создав ахроматический прибор, с помощью которого была измерена средняя энергия протонов в пучке от фазотрона в Беркли с высокой точностью  $\approx \pm 0,2\%$  /340 $\pm$ 0,8/ Мэв. Этим же методом <sup>/19/</sup> была измерена энергия протонов в пучках от синхротрона Лаборатории ядерных проблем: /460 $\pm$ 0,9/ Мэв /1953 г./ и /658 $\pm$ 2,0/ Мэв /1954 г./.

Способ Мазера интересен не только в методическом отношении. Он нашел применение в прикладных задачах по проверке соотношения пробег - энергия для протонов 660 Мэв <sup>/4/</sup>. Уместно

отметить, что именно эти измерения послужили основанием для серьезной постановки проблемы зависимости потенциала ионизации от скорости частицы, что представляет интерес как для теории ионизационных потерь, так и для расчетов таблиц пробегов и тормозных способностей частиц в различных веществах. Кроме того, в работе <sup>/5/</sup> этот метод использовался для измерения массы движущегося протона.

Хотя метод Мазера и позволяет измерять среднюю энергию протонов с точностью  $\approx 0,2\%$ , он все же несовершенен и имеет ряд существенных недостатков. Один из них заключается в том, что с увеличением энергии частиц точность измерения /при одних и тех же ошибках измерения угла излучения  $\Delta\theta$  и показателя преломления  $\Delta n$  / уменьшается. Другой недостаток связан с необходимостью проведения двух экспозиций /отличающихся друг от друга поворотом прибора относительно его оси на угол  $\pi$  /, исключающих несоосность оси прибора и направления протонов в пучке. Это вносит дополнительную погрешность, связанную с возможным изменением средней энергии протонов при повторной экспозиции.

На протяжении более чем 20 лет метод Мазера не подвергался никакой модификации. В работе <sup>/6/</sup> были рассмотрены два других возможных способа измерения энергии пучков частиц с использованием излучения Вавилова-Черенкова в области энергий до 1 Гэв, но они не позволяли получить точность лучше, чем  $\approx 0,2\%$ . Более плодотворными оказались идеи, изложенные в работе <sup>/10/</sup>. В частности, в ней было обращено внимание на то, что использование сочетания свойства резкой направленности излучения Вавилова-Черенкова и явления преломления излучения на границе раздела сред вблизи угла полного внутреннего отражения позволяет создать счетчики Черенкова с высоким разрешением по скоростям. На основе соображений, содержащихся в работе <sup>/10/</sup>, была разработана программа создания прецизионных методов измерения средней энергии протонов от синхротрона Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ, которая последовательно была реализована в работах <sup>/11/</sup>, <sup>/7.8.12/</sup>.

В главе I описан монохроматический метод <sup>/11/</sup> измерения средней энергии протонов 665 Мэв по излучению Вавилова-Черенкова, свободный от недостатков метода Мазера. Приводятся основные расчетные формулы и обоснования по выбору оптимального участка спектра излучения для его монохроматизации. Подробно

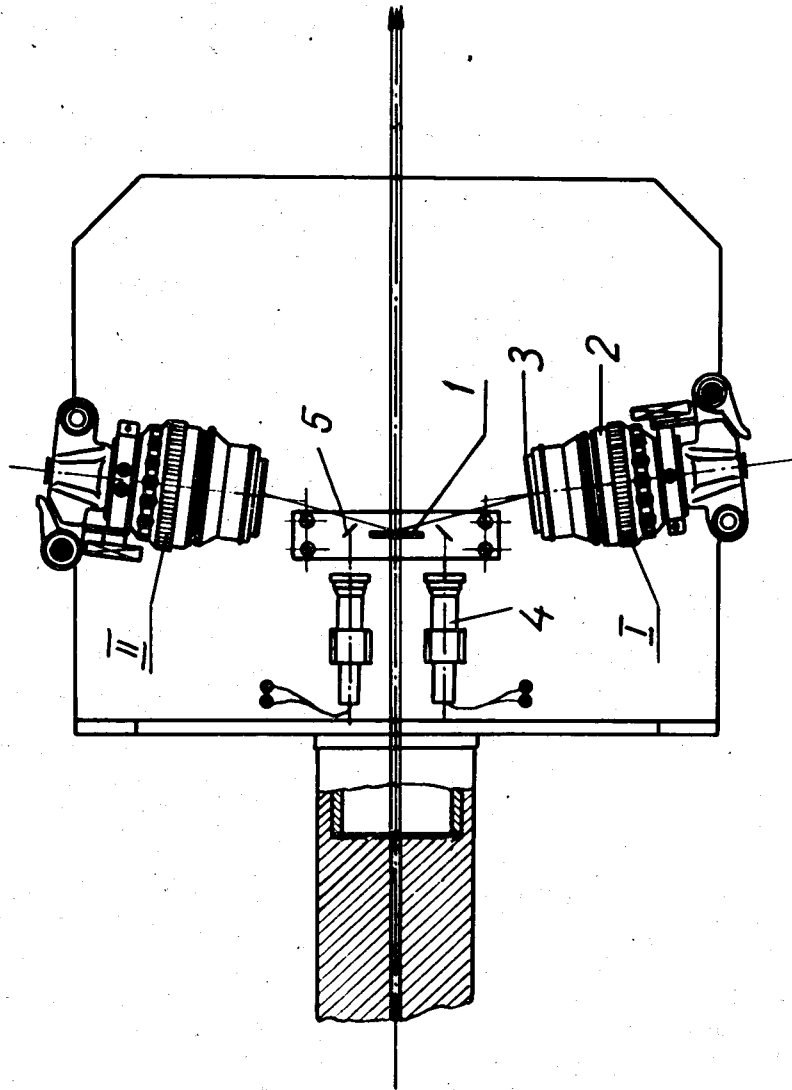


Рис. 1. Схема монохроматического прибора для измерения средней энергии протонов 660 Мэв. 1 - радиатор, 2 - фотоаппарат, 3 - интерференционный фильтр, 4 - проектор, 5 - плоское зеркальце.

описывается устройство /рис. 1/ с оригинальной оптической системой нанесения реперов. Излагаются результаты измерения средней энергии протонов 665 Мэв. Анализируются ошибки измерений и разрешающая способность, вводятся необходимые поправки. Достигнутая точность составила  $\pm 0,02\%$ . Создание этого прецизионного метода измерения энергии позволит вновь вернуться на более высоком уровне точности измерений к проблеме соотношения пробег - энергия для протонов.

Глава II посвящена другому способу измерения средней энергии протонов - ахроматическому /12/. Хотя монохроматический метод и дает высокую точность измерения, все же для параметров протонного пучка от синхроциклотрона ЛЯП он не является оптимальным, так как требует довольно длительной экспозиции /~25 минут/.

В ахроматическом методе для устранения влияния дисперсии раднатора на точность измерения скоростей частиц используется одна кольцевая призма аналогично тому, как это предлагалось ранее для счетчиков Черенкова /13/. Такая призма устраняет первый порядок хроматического эффекта. Влияние же остаточного хроматизма на точность измерения уменьшается с помощью широкополосных светофильтров. Схема прибора показана на рис. 2. Приводятся расчеты ахроматической призмы, описание элементов прибора, особенностей его юстировки и калибровки, условия проведения эксперимента и результаты измерения. Точность измерений этим методом составила  $\pm 0,2$  Мэв при энергии протонов 654 Мэв /при сравнительно короткой экспозиции на пучке протонов  $\approx 2$  минут/.

Ахроматический метод по сравнению с монохроматическим обладает важным преимуществом, так как позволяет, помимо точного измерения первоначальной энергии, измерять также энергетические потери протонов в различных веществах при сбросах энергии приблизительно на /20-25/ Мэв.

Сопоставление методов точного измерения энергии протонов /11,8, 12/ проведено в главе III. Основные характеристики их просуммированы в таблице, которая наглядно демонстрирует достигнутый прогресс в этой области. Обсуждаются некоторые возможности автоматизации процесса измерения энергии при использовании для этих целей ахроматического метода как наиболее подходящего. Рассматриваются пути создания простого метода измерения энергии протонов /или метода двойных отражений/ также по излучению Вавилова-Черенкова.

II.

Второй раздел диссертации посвящен исследованиям свойств излучения Вавилова-Черенкова в анизотропных средах. Несмотря на то, что электродинамика анизотропных сред вообще и, в частности, теория излучения Вавилова-Черенкова в одноосных кристаллах, была развита Гинзбургом в 1940 году, т.е. вскоре после создания Таммом и Франком теории излучения в изотропной среде, а впоследствии этот вопрос неоднократно рассматривался в многочисленных работах Коломенского, Пафомова, Болотовского, Франка, Музикаржа, Обдржалека, Куканова и других авторов, до 1964 года ни один вывод теории не был подвергнут экспериментальной проверке.

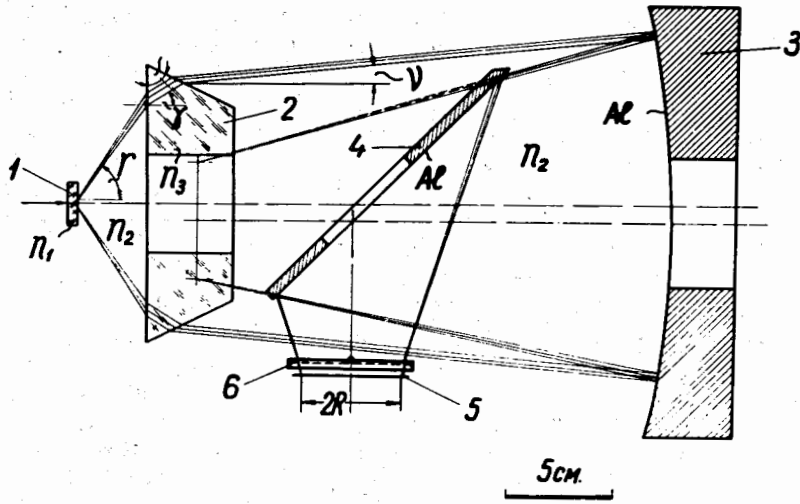


Рис. 2. Схема ахроматического прибора для измерения средней энергии протонов 660 Мэв: 1 - радиатор, 2 - кольцевая ахроматическая призма, 3 - сферическое зеркало, 5 - фотопластинка, 6 - светофильтры.

Таблица

Год	Метод, лаборатория	Энергия протонов $E, \text{Мэв}$	Точность измерения, Мэв	$\frac{\Delta E}{E}, \%$	$\beta$	$\Delta \beta$	$\frac{\Delta \beta}{\beta}, \%$	Разрешение $\Delta E_{\text{плпб}}, \text{Мэв}$
1951	Метод Мазера /11/, Беркли	340	$\pm 0,8$	$\pm 0,23$	0,68	$\pm 0,00050$	$\pm 0,073$	6,7
1953	Метод Мазера /6/, Дубна	460	$\pm 0,9$	$\pm 0,20$	0,74	$\pm 0,00039$	$\pm 0,053$	13,6
1954	Метод Мазера /6/, Дубна	658	$\pm 2,1$	$\pm 0,32$	0,81	$\pm 0,00055$	$\pm 0,068$	16,3
1971	Монохроматический метод /18/, Дубна, ОИЯИ	665	$\pm 0,14$	$\pm 0,021$	0,81	$\pm 0,000019$	$\pm 0,0024$	12,1
1971	Ахроматический метод /25/, Дубна, ОИЯИ	654	$\pm 0,20$	$\pm 0,03$	0,81	$\pm 0,000027$	$\pm 0,0031$	9,0
1971	Ахроматический метод /28/, Дубна, ОИЯИ	657	$\pm 0,22$	$\pm 0,034$	0,81	$\pm 0,000030$	$\pm 0,0037$	

В известной мере такое положение объясняется тем, что теория излучения Вавилова-Черенкова основывается на уравнениях как классической, так и квантовой электродинамики, поэтому в теоретических выводах, касающихся излучения Вавилова-Черенкова, в общем сомневаться не приходится. Однако все же надо признать, что эти доводы недостаточны для оправдания сложившейся ситуации, особенно если учесть, что в настоящее время имеется гораздо больше, чем это было в распоряжении Черенкова, всесторонне исследовавшего все свойства излучения в изотропной среде почти 40 лет назад. Последнее обстоятельство, безусловно, способствовало успешному внедрению излучения в счетчиках Черенкова с радиаторами из изотропных сред. Аналогично этому изучение свойств излучения Вавилова-Черенкова в анизотропных средах должно послужить толчком к использованию таких сред в качестве радиаторов излучения Вавилова-Черенкова для устройств, применяемых в физических экспериментах, а также дальнейшего развитию теории.

В главах IV, V, VI, VII этого раздела описаны эксперименты по проверке ряда свойств излучения Вавилова-Черенкова в одноосном кристалле исландского шпата /14/, гиротропном кристалле кварца /20/, двухосных кристаллах триглицинсульфата /15/ и сегнетовой соли с полидоменной структурой /16/, которые были первыми исследованиями в этой области и до сих пор являются единственными.

Опыты производились с протонами 663 Мэв на выведенном пучке от синхроциклотрона по схеме, изображенной на рис. 3. Такая схема опыта позволяет наблюдать весьма наглядную картину в целом /особенно при регистрации излучения на цветной пленке/ и сравнивать ее с тем, что имеет место в изотропной среде. В указанных выше кристаллах исследовались свойства направленности излучения Вавилова-Черенкова для случаев движения частиц вдоль главных оптических осей, азимутальные распределения и поляризационные свойства излучения.

В двухосных кристаллах триглицинсульфата и сегнетовой соли делалась попытка воздействия электрического поля и температуры на свойства излучения.

В последнем разделе диссертации излагается метод поиска магнитных зарядов на ускорителях в сотни Гэв по излучению Вавилова-Черенкова /гл. VIII/ и обсуждаются некоторые задачи эксперимента по дальнейшей проверке теории излучения /гл. IX/.

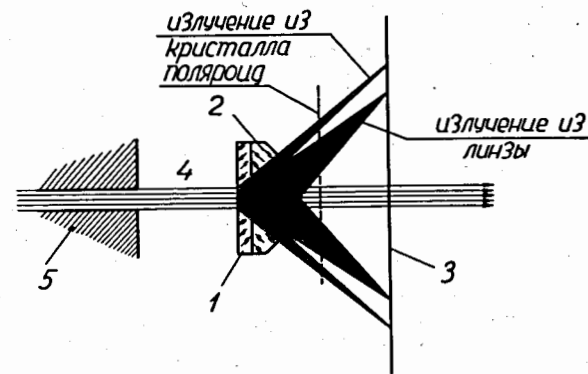


Рис. 3. Схема опыта по исследованию свойств излучения Вавилова-Черенкова в анизотропных средах. 1 - кристалл, 2 - плоскопараболическая линза, 3 - цветная негативная фотопленка, 4 - пучок протонов 663 Мэв, 5 - коллиматор диаметром 5 мм.

Гипотеза о возможном существовании в природе монополей

с магнитным зарядом  $g = \frac{\hbar c}{e^2} \frac{m}{2} = 68,5 \cdot e \cdot m$ , высказанная

впервые Дираком, в последние годы практически непрерывно подвергается экспериментальной проверке. Все опыты, проведенные до сих пор, основывались на идее накопления монополей в различных природных образцах и мишенях с последующей экстракцией их, ускорением в сильных магнитных полях и регистрацией по ожидаемой сильной и характерной ионизации.

На мощных ускорителях протонов  $\approx 70$  Гэв и выше в принципе возможно рождение пар монополь-антимонюль с массами  $m_g = 5 m_p$  и более, обладающих скоростями выше порога испускания излучения Вавилова-Черенкова в прозрачной среде с  $n = 1,5$ . Использование излучения Вавилова-Черенкова облегчает поиск магнитных зарядов на большом фоне заряженных частиц благодаря следующим обстоятельствам:

1. Согласно расчетам И.М.Франка, отношение интенсивностей излучения Вавилова-Черенкова от быстрого монополя с зарядом  $g$  и излучения частицы с электрическим зарядом  $e$  /при одинаковой

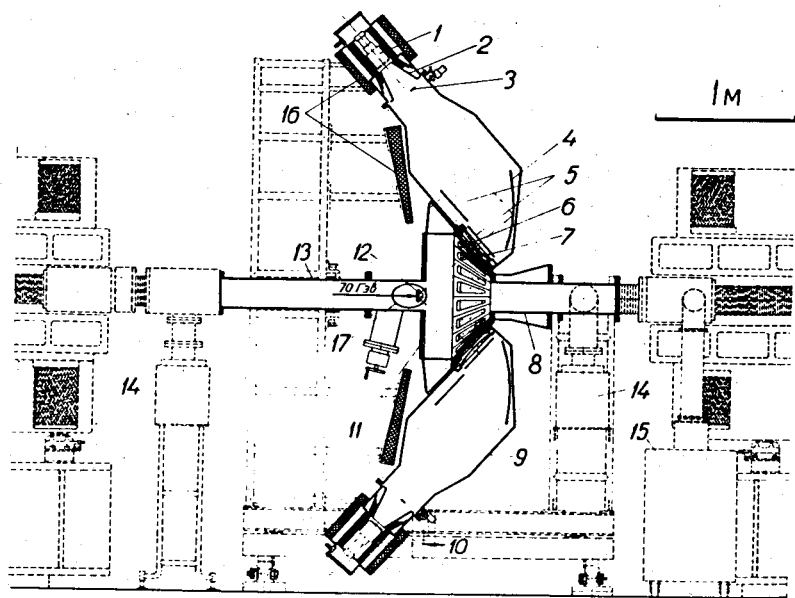


Рис. 4. Схема установки по поиску монополя Дирака на протонном синхротроне 70 ГэВ ИФВЭ /Серпухов/. 1 - фотоумножитель 58 АУР, 2 - собирающее коническое зеркало, 3 - дистанционно перемещающаяся шторка, 4 - составное зеркало, 5 - поляриды с взаимно-перпендикулярной ориентацией, 6 - собирающая линза с  $f = 150$  см, 7 - прозрачное окно для выпуска излучения, 8 - труба из нержавеющей стали, 9 - светонепроницаемый кожух, 10 - магнитная защита ФЭУ, 11 - вакуумная камера, 12 - мишень-радиатор из  $SiO_2$ , 13 - соединительная труба, 14 - титановый насос, 15 - вакуумный агрегат, 16 - свинцовая защита, 17 - шлюз для ввода мишени.

скорости  $\beta$  и пробеге  $d\ell$  равно  $W^g/W^e = \frac{2}{\epsilon} \frac{n^2}{\epsilon^2}$ . При  $\epsilon = 68,5$  и показателе преломления  $n = 1,5$   $W^g = 10^4 W^e$ .

2. Как впервые отметил И.М.Франк в нобелевской лекции, поляризация излучения Вавилова-Черенкова от магнитного и электрического зарядов отличается поворотом электрического вектора на  $90^\circ$  /  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  меняются местами/.

Из этих соображений был предложен метод поиска магнитных зарядов в опытах на ускорителях с энергией  $\approx 100$  ГэВ и выше /9/. На основе этого метода была разработана установка /17/ по поиску монополя Дирака /УПМД/ на внутреннем пучке протонного синхротрона ИФВЭ /г. Серпухов/, схема которой показана на рис. 4. Достоинством такого эксперимента является также и то, что в нем предусмотрена регистрация излучения Вавилова-Черенкова непосредственно в момент рождения пар  $(\chi, \bar{\chi})$  в совмещенной мишени - радиаторе из радиационно-стойкого плавящего кварца /рис. 5/. Это приводит к большой светосиле установки / $\eta \approx 0,2$ /, а также позволяет использовать многократное прохождение протонов через мишень-радиатор и вести поиск даже нестабильных магнитных зарядов со временем жизни  $\tau_g \gtrsim 10^{-10}$  сек. Приводятся некоторые соображения по использованию в подобного рода экспериментах в качестве мишени-радиатора одноосного кристалла исландского шпата, позволяющего иначе решить вопрос об устранении излучения первичного пучка протонов, нежели это осуществлено в опыте, схема которого показана на рис. 4.

Глава IX содержит обсуждение некоторых задач, связанных с излучением Вавилова-Черенкова. Обращается внимание на важность проверки формулы Тамма-Франка для абсолютной интенсивности с высокой точностью и в связи с этим указывается на необходимость /при сравнении теории с экспериментом/ учета двухфотонного процесса излучения Вавилова-Черенкова, а также дисперсии среды /18/. Приводятся кинематические соотношения для двухфотонного процесса излучения и на их основе даются рекомендации по постановке соответствующего эксперимента.

В заключение обсуждаются вопросы, связанные с аномальным томсоновским рассеянием или рассеянием света на частице, движущейся в преломляющей среде со скоростью, превышающей порог возникновения излучения Вавилова-Черенкова.



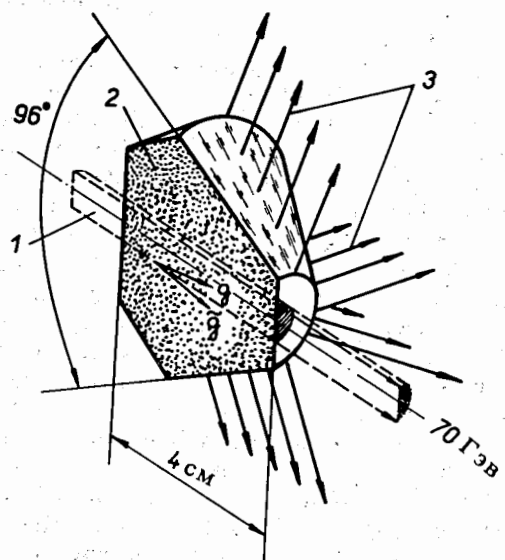


Рис. 5. Мишень-радиатор УПМД. 1 - пучок протонов 70 Гэв, 2 - мишень-радиатор из  $SiO_2$ , 3 - излучение Вавилова-Черенкова.

## Выводы

Выполненные и изложенные в диссертации исследования позволили:

1. Разработать прецизионные методы измерения средней энергии протонов 660 Мэв в коллимированных пучках с использованием излучения Вавилова-Черенкова /монохроматический и ахроматический/, обеспечивающие точность измерения энергии около  $\pm 0,02\%$ , что приблизительно на порядок превосходит точность других методов, ранее использовавшихся для этих целей.

2. Показать, что основные свойства излучения Вавилова-Черенкова в таких анизотропных средах, как одноосный кристалл исландского шпата, гиротропный кристалл кварца, двухосные кристаллы триглицинсульфата и сегнетовой соли с полидоменной структурой, полностью описываются теорией излучения Вавилова-Черенкова для таких сред.

В частности, впервые удалось показать, что при движении частиц перпендикулярно оптической оси одноосного кристалла испускаемое излучение Вавилова-Черенкова распределяется по двум конусам. При движении же протонов с  $\beta = 0,81$  вдоль малой биссектрисы двухосного кристалла сегнетовой соли излучение, поляризованное в плоскости оптических осей, имеет необычный - "игольчатый" характер.

3. Разработать новый метод поиска магнитных зарядов на ускорителях  $\approx 100$  Гэв и выше с использованием характерных поляризационных свойств излучения Вавилова-Черенкова.

Диссертация написана на основе работ, опубликованных в виде препринтов и статей /10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18/, а также частично на материалах книги /19, 20/.

Часть работ /11, 13/ по методам измерения средней энергии протонов и методу поиска магнитных зарядов /17/ докладывалась на Международной конференции по аппаратуре в физике высоких энергий /Дубна, 8-12 сентября 1970 г./.

## Литература

1. П.А.Черенков. ДАН СССР, 2, 451, 1934.
2. И.Е.Тамм, И.М.Франк. ДАН СССР, 14, 107, 1937.
3. R.L.Mather. Phys.Rev., 84, 181, 1951.

4. В.П.Зрелов, Г.Д.Столетов. ЖЭТФ, 36, 658, 1959.
5. В.П.Зрелов, А.А.Тяпкин, П.С.Фараго. ЖЭТФ, 34, вып. 3, 555, 1958.
6. В.П.Зрелов. ПТЭ, №2, 29, 1963.
7. В.П.Зрелов, П.Павлович, П.Шулек. Препринт ОИЯИ, Р13-3488, Дубна, 1967.
8. В.П.Зрелов, П.Павлович, П.Шулек. Препринт ОИЯИ, Р13-5637, Дубна, 1971.
9. В.П.Зрелов, Л.Колларова, Д.Коллар, Я.Ружичка, М.Ф.Шабашов, П.Павлович, П.Шулек, В.И.Сидорова. Изобретение по авторскому свидетельству №330792, Бюллетень изобретений №16, Москва, 1972, стр. 247.
10. В.П.Зрелов. ПТЭ №3, 100, 1965.
11. В.П.Зрелов, М.А.Мусин, П.Павлович, П.Шулек, Р.Яник. Препринт ОИЯИ Р13-5636, Дубна, 1971.
12. В.П.Зрелов, П.Павлович, П.Шулек. Препринт ОИЯИ Р13-5866, Дубна, 1971.
13. В.П.Зрелов, Д.Коллар, П.Павлович, Я.Ружичка, П.Шулек. Труды международной конференции по аппаратуре в физике высоких энергий, Дубна, 8-12 сентября 1970 г./ ОИЯИ, Д-5805, Дубна, 1971, ч. II., стр. 482.
14. В.П.Зрелов. ЖЭТФ, 46, 447, 1964.
15. В.П.Зрелов, П.Павлович, П.Шулек. Препринт ОИЯИ Р1-4364, Дубна, 1969.
16. В.П.Зрелов, П.Павлович, П.Шулек. Препринт ОИЯИ Р1-6552, Дубна, 1972.
17. В.П.Зрелов, Л.Колларова, Д.Коллар, П.Павлович, Я.Ружичка, М.Ф.Шабашов, П.Шулек, Р.Яник. Труды международной конференции по аппаратуре в физике высоких энергий. /Дубна, 8-12 сентября 1970 г./ ОИЯИ, Д-5805, Дубна, 1971, ч. 2, стр. 479.
18. В.П.Зрелов. ЖЭТФ, 45, 291, 1963.
19. В.П.Зрелов. Излучение Вавилова-Черенкова и его применение в физике высоких энергий". ч. II /счетчики Черенкова/, Атомиздат, М., 1968, стр. 10.
20. В.П.Зрелов. Излучение Вавилова-Черенкова и его применение в физике высоких энергий. ч. I, Атомиздат, М., 1968, стр.222.

Рукопись поступила в издательский отдел  
2 октября 1972 года.