

С 344.13

З-895

Зрелов В.П.

749/76

Б1-13-9433



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Б1-13-9433

ДЕПОНИРОВАННАЯ ПУБЛИКАЦИЯ

Дубна 1976

В.П.ЗРЕЛОВ

Б1-13-1483

А Л Ь Б О М

ФОТОГРАФИЙ ИЗЛУЧЕНИЯ ВАВИЛОВА-ЧЕРЕНКОВА И
ПРИБОРОВ, РАЗРАБОТАННЫХ НА ОСНОВЕ ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
В ЛАБОРАТОРИИ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ О И Я И
С 1953 ПО 1975 гг

31 дек. 75

Объединенный институт
ядерных исследований
БНП И Я И

Дубна, 1975 г.

П Р Е Д И С Л О В И Е

В 1934 году П.А.Черенков^{/1/}, работая под руководством С.И.Вавилова в Физическом институте им. П.Н.Лебедева АН СССР, при исследовании свойств люминесценции растворов ураниловых солей под действием γ -излучения радия, обнаружил необычное видимое свечение чистых жидкостей.

Тонкие опыты, проведенные П.А.Черенковым по определению длительности свечения (на основе критериев, разработанных С.И.Вавиловым), его поляризации и спектров, показали, что эти свойства нового свечения резко отличаются от аналогичных свойств, присущих обычной радиoluminesценции. В частности, было установлено, что длительность свечения необычайно коротка - $\tau < 10^{-11}$ сек, спектр излучения имеет наибольшую интенсивность в фиолетовой и ультрафиолетовой частях спектра, электрический вектор свечения преимущественно направлен вдоль плоскости, содержащей направление испускания излучения и направление потока возбуждающих γ -лучей.

С.И.Вавилов^{/2/} в статье "О природе синего свечения" выдвинул глубокую идею о том, что источником необычного свечения являются быстрые комптоны-электроны. Эта идея нашла полное подтверждение в последующих опытах П.А.Черенкова^{/3,4/}, приведших к обнаружению одного из основных свойств нового свечения - его направленности вперед, т.е. вдоль движения комптон-электронов.

Советские физики - теоретики И.Е.Тамм и И.М.Франк^{/5/} в 1937 г. в рамках классической электродинамики создали теорию, которая не только объяснила все свойства нового вида свечения, но и предсказала ряд новых свойств, также проверенных и подтвержденных дополни-

тельными опытами П.А.Черенкова^{/6/}.

Согласно теории Тамма-Франка сущность нового эффекта заключалась в том, что любая заряженная частица, движущаяся в однородной прозрачной среде, характеризуемой показателем преломления n , со скоростью v , превышающей фазовую скорость распространения света ($\frac{c}{n}$) в данной среде, излучает свет вперед в виде полого конуса ("кулька") с половиной угла раствора при его вершине $\cos \theta = \frac{1}{n\beta}$, где $\beta = \frac{v}{c}$.

В настоящее время неизвестно ни одного факта, который противоречил бы выводам теории Тамма-Франка, а экспериментальные исследования П.А.Черенкова по изучению свойств излучения в изотропных средах были выполнены в свое время настолько полно и тщательно, что последующие опыты либо их подтверждали, либо несколько уточняли.

За фундаментальное открытие нового вида свечения, названного впоследствии излучением Вавилова-Черенкова, и за создание его теории П.А.Черенкову, С.И.Вавилову, И.Е.Тамму и И.М.Франку в 1943 году была присуждена Государственная премия.

В конце 1958 года советским физикам П.А.Черенкову, И.Е.Тамму и И.М.Франку за открытие и объяснение эффекта Вавилова-Черенкова Шведской Академией наук была присуждена Нобелевская премия.

В.Л.Гинзбург^{/7/} в 1940 году развил теорию излучения Вавилова-Черенкова для анизотропной среды и предсказал, что при движении быстрой частицы перпендикулярно оптической оси одноосного кристалла должно возникать два конуса излучения.

Значительный вклад в развитие теории излучения Вавилова-Черенкова внесли советские физики Б.М.Болотовский, А.Б.Куканов, В.Е.Пафомов, А.А.Коломенский и др., а также чешские физики Ч.Музикарж

и Я.Обдржалек.

Эффект Вавилова-Черенкова нашел широкое применение в различных областях физики и особенно эффективно используется в детекторах частиц - счетчиках Черенкова при постановке экспериментов на крупнейших ускорителях мира.

В настоящем альбоме собраны краткие данные, как о результатах исследований свойств излучения Вавилова-Черенкова в изотропных и анизотропных средах, так и о различных черенковских приборах, разработанных и созданных автором (и при его участии) в Лаборатории ядерных проблем в период с 1953 по 1974 год.

І. В В Е Д Е Н И Е

В первой (вводной) части альбома приводятся несколько фотографий (рис. 1,2,3), полученных в простом опыте, методически мало отличающемся от первых опытов П.А.Черенкова. Используемый в них высокоэнергичный и коллимированный пучок протонов с энергией 660 МэВ от синхроциклотрона Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ позволил получать весьма наглядные иллюстрации таких основных свойств излучения Вавилова-Черенкова, как резкая направленность конуса, зависимость угла его раскрытия от показателя преломления, поляризация.

ІІ. Методы измерения средней энергии в пучках релятивистских частиц по излучению Вавилова-Черенкова

Вторая часть альбома посвящена приборам, основанным на использовании излучения Вавилова-Черенкова и позволяющим измерять среднюю энергию протонов в области ~ 1 ГэВ с высокой точностью ($\sim 0,03\%$).

Интересно, что излучение Вавилова-Черенкова нашло свое первое практическое применение именно в измерениях средней энергии релятивистских протонов в коллимированных пучках от ускорителей. Важным шагом в этом направлении явились расчеты, произведенные Л.И.Лапидусом в 1950 году вскоре после запуска в Советском Союзе крупнейшего в то время синхроциклотрона на энергию 480 МэВ, в которых было впервые указано на эту возможность и оценены достижимые высокие точности такой методики.

Первая экспериментальная установка для измерения энергии коллимированных частиц от ускорителей по излучению Вавилова-Черенкова была построена американским физиком Мазером^{/8/} в 1951 году, который с её помощью измерил среднюю энергию протонов в выведенном пучке из фазотрона в Беркли с точностью $(340 \pm 0,8)$ МэВ. Автором аналогичным методом впервые в СССР были проведены измерения средней энергии протонов в пучке от синхроциклотрона в Дубне при двух вариантах его работы: в 1953 году - $(460,0 \pm 0,8)$ МэВ и в 1954 году - $(658,0 \pm 2,0)$ МэВ.

Несмотря на сравнительно высокую точность, достигнутую этим методом, он обладал существенными и принципиально неустранимыми недостатками, связанными как с уменьшением точности измерений при возрастании энергии пучков частиц, так и с необходимостью проведения измерения энергии за две экспозиции. На протяжении длительного времени этот метод не подвергался никакой модификации.

В 1965 году в работе^{/9/} был предложен способ повышения точности измерения средней энергии пучков, основанный на сочетании свойств резкой направленности излучения Вавилова-Черенкова, его поляризованных свойств и явления преломления излучения на границе раздела сред вблизи угла полного внутреннего отражения.

На основе этих соображений впоследствии в Лаборатории ядерных проблем были разработаны несколько прецизионных методов измерения энергии пучков протонов. Во всех методах заложены оригинальные идеи, позволившие создать простые и портативные оптические устройства и достигнуть точности измерений $\sim 0,03\%$, что почти на порядок превосходит точность метода Мазера.

Вначале был разработан, так называемый, монохроматический метод ^{/10/}, сущность которого заключается в том, что при пролете быстрой частицы нормально к грани плоскопараллельной пластинки на выходе из неё измеряется полный угол раствора конуса излучения Вавилова-Черенкова для узкого диапазона длин волн, который весьма чувствителен к скорости частицы, если угол черенковского излучения внутри радиатора близок к углу полного внутреннего отражения. Схема прибора показана на рис. 7, а результаты экспонирования на пучке протонов и фотометрирования изображений излучения приведены на рис.8. Точность метода $\sim 0,03\%$.

Монохроматический метод измерения средней энергии, обеспечивая высокую точность, страдает одним недостатком, связанным с необходимостью пропускать через радиатор значительные потоки частиц (до $\sim 10^{12}$).

В другом методе регистрировался весь видимый спектр излучения Вавилова-Черенкова, а влияние дисперсии радиатора на точность измерения энергии устранялось с помощью ахроматической оптической системы, что позволяло значительно сократить время экспонирования при сохранении высокой точности измерения энергии.

Теория апохроматических систем в различного рода черенковских устройствах была разработана в работе ^{/11/}. На основе этих расчетов

В 1971 году был осуществлен апохроматический метод^{/12/} измерения средней энергии протонов по излучению Вавилова-Черенкова. Схема прибора и его общий вид показаны на рис. 9 и 10. Изображение излучения Вавилова-Черенкова, полученное с этим прибором, и его фотометрическая кривая приведены на рис. 11 а) и б). Метод обеспечивает измерение энергии протонов с точностью $\sim 0,03\%$ и может быть применен для определения ионизационных потерь протонов в различных веществах. Пример использования такого прибора показан на рис. 12, на котором видны хорошо разделенные конуса излучения от первичного пучка протонов с энергией 657 МэВ и протонов, прошедших через фильтры углерода (сброс $\Delta E = 20$ МэВ) и полиэтилена (сброс $\Delta E = 40$ МэВ).

Ахроматическая система устранения влияния дисперсии радиатора на точность измерения энергии использовалась в другом методе^{/13/}. В этом случае при одной ахроматической оптической системе путем подбора радиатора можно было измерить энергию частиц в более широком, чем методом^{/12/}, диапазоне энергий. Схема прибора и его общий вид показаны на рис. 13 и 14, а результаты измерений - на рис. 15 и 16. Точность ахроматического метода такая же, как и методов^{/10/} и ^{/12/}, но он интересен тем, что позволяет автоматизировать процесс измерения энергии непосредственно в момент прохождения частиц через радиатор прибора, как это и сделано в работе^{/14/}.

Наконец, автором был предложен^{/15/} и осуществлен простой метод измерения средней энергии, или метод двойных отражений (также черенковский), принцип действия которого и схема прибора приведены соответственно на рис. 17 и 18. Результаты испытаний этого метода, приведены в работе^{/16/} и показаны на рис. 19. Точность метода составляет $\pm 0,4$ МэВ.

Методы измерения средней энергии в пучках коллимированных

частиц с использованием излучения Вавилова-Черенкова дают в настоящее время наивысшую точность и находят применение в опытах по проверке соотношения пробег-энергия^{/17,18/}.

Прогресс в развитии методов измерения средней энергии протонов с применением излучения Вавилова-Черенкова виден из табл. I.

Таблица I.

№№ п/п	М е т о д	Год	Энергия и точность, МэВ	Примечание
1.	Метод Мазера	1951	$340 \pm 0,8$	Беркли
2.	Метод Мазера	1953	$460 \pm 0,9$	Дубна
		1954	$658 \pm 2,0$	Дубна
3.	Монохроматический ^{/10/}	1971	$665 \pm 0,14$	Дубна
4.	Апохроматический ^{/12/}	1971	$657 \pm 0,22$	Дубна
5.	Ахроматический ^{/13/}	1971	$654 \pm 0,20$	Дубна
6.	Простой метод ^{/15/}	1975	$635,2 \pm 0,4$	Дубна
7.	Автоматический ^{/14/}	1975	$635,2 \pm 0,6$	Дубна

Разнообразные черенковские методы измерения средней энергии в коллимированных пучках, развитые в работах^{/10,12,13,14,15/}, безусловно, найдут применение в физических исследованиях на ускорителях типа мезонных фабрик, так как в них заложены широкие возможности достижения более высших точностей, которые могут потребоваться от такого рода методов в обозримом будущем.

III. Излучение Вавилова-Черенкова в анизотропных средах

Эта часть альбома посвящена исследованиям свойств излучения Вавилова-Черенкова в анизотропных средах, приведшим к обнаружению двухконусного излучения и одной из его интересных разновидностей - "игольчатого" излучения.

I. Одноосные кристаллы

Теория излучения Вавилова-Черенкова, развитая В.Л.Гинзбургом в 1940 году для анизотропных сред, предсказывала^{/17/} для движения частицы перпендикулярно оптической оси одноосного кристалла возникновение двух конусов излучения Вавилова-Черенкова: одного кругового конуса обыкновенных волн и другого - некругового конуса необыкновенных волн с неравномерным распределением интенсивности излучения по азимутальному углу. Построения Гюйгенса для определения нормалей \vec{N} и лучей \vec{S} обыкновенных (o) и необыкновенных (e) волн, произведенные в двух плоскостях, $XOY (\varphi=0)$ и $ZOY (\varphi=\frac{\pi}{2})$, показаны на рис. 20.

Выводы теории В.Л.Гинзбурга^{/17/} были в 1969 году подвергнуты автором экспериментальной проверке в опыте^{/19/}, схематически изображенном на рис. 21. Эксперимент проводился с протонами 660 МэВ от синхроциклотрона Лаборатории ядерных проблем. Расчетное азимутальное распределение излучения для случая движения частиц с $\beta = 0,81$ перпендикулярно оптической оси одноосного кристалла показано на рис. 22, а на рис. 23 дана цветная фотография излучения, зарегистрированного при прохождении пучка протонов 660 МэВ через пластинку исландского шпата ($n_o = 1,6585$; $n_e = 1,48635$ для $\lambda = 5893 \text{ \AA}$) толщиной 4,5 мм, вырезанную параллельно оптической

оси.

Предсказания теории, дополненной чешским физиком Ч.Музикар-
жем^{/20/}, относительно поляризации излучения обыкновенных и необык-
новенных волн проверялись в опыте, аналогичном показанному на рис.
2I, но с добавлением поляроида между выводящей линзой и фотоплен-
кой.

Результаты опыта приведены на рис. 24 и 25. В согласии с тео-
рией при ориентировке поляроида вдоль оптической оси исчезают
обыкновенные волны (поляризованные строго в направлении, перпен-
дикулярном оптической оси), а при повороте поляроида на 90° исче-
зает необыкновенные (поляризованы преимущественно вдоль оптической
оси). В последнем случае обыкновенные волны проходят полностью
(без учета ослабления их поляроидом за счет поглощения).

Для случая движения частиц вдоль оптической оси теория В.Л.
Гинзбурга^{/7/} предсказывала испускание только одного конуса необык-
новенных волн с равномерным по образующим конуса распределением
интенсивности излучения и поляризацией с электрическим вектором
в плоскости, проходящей через направление испускания излучения и
вектор скорости частицы, т.е. такие же свойства, как и в изотроп-
ной среде.

На рис. 26 показана пластинка кристалла исландского шпата,
вырезанная перпендикулярно оптической оси с построениями Гюйгенса
для определения направления необыкновенных волн (\vec{N}^e), испускае-
мых частицей, летящей вдоль оптической оси. Результаты эксперимен-
та, выполненного по схеме рис. 2I на пучке протонов 660 МэВ, даны
на рис. 27, из которого видно, что качественно предсказания теории
подтверждаются.

Свойства направленности и поляризации излучения Вавилова-Черенкова в одноосном гиротропном кристалле, предсказываемые теорией, развитой А.Г.Ситенко и А.А.Коломенским^{/21/}, также были проверены и подтверждены автором в опытах с гиротропным кристаллом кварца, которые описаны в книге^{/22/}. Причем примечательным в этих опытах оказалось то, что для случая движения протонов 660 МэВ перпендикулярно оптической оси кристалла кварца конуса обыкновенных и необыкновенных волн, имеющих разницу в углах раскрытия конусов всего в $0,5^\circ$, удалось обнаружить только благодаря существенно различной их поляризации. Результаты такого эксперимента показаны на рис. 28. Следует отметить, что поскольку кристалл кварца - положительный, т.е. у него $n_e > n_o$, то коническая поверхность необыкновенных волн отгибает конус обыкновенных волн (видно, что зазор между реперным излучением от линзы и "дугами" излучения от кристалла на рис. 28 а) больше, чем на рис. 28 б).

2. Двухосные кристаллы

Теория излучения Вавилова-Черенкова для двухосных кристаллов, развитая двумя чешскими физиками - Ч.Музикаржем^{/22/} (стр. 205) и Я.Обдржалек^{/23/}, предсказывала, что релятивистские частицы в таких кристаллах испускают двухконусное излучение только необыкновенных волн двух поляризаций.

Выводы теории были экспериментально проверены в опытах^{/24/} с двухосными кристаллами триглицинсульфата (ТГС) и сегнетовой соли^{/25/}.

Кристалл ТГС

Проверка свойств излучения Вавилова-Черенкова в отрицатель-

ном кристалле ТГС, имеющим значительную разницу в главных диэлектрических проницаемостях ($\Delta n_{max} \sim 0,09$) и угол между осями $2V = 61,1^\circ$, была проведена для трех частных случаев движения частиц: а) вдоль малой биссектрисы; б) перпендикулярно плоскости оптических осей; в) вдоль большой биссектрисы. Схема опыта оставалась прежней (рис. 21), так как простым способом позволяла видеть полную картину сложных азимутальных распределений излучения.

Построения Гюйгенса для случая движения протонов с $\beta = 0,81$ вдоль оси X_1 (малой биссектрисы) кристалла ТГС, выполненные в плоскости осей (X_1, OX_3) и плоскости X_1, OX_2 , приведены на рис. 29.

Расчетные и экспериментальные распределения для случая движения протонов 660 МэВ вдоль X_1 показаны на рис. 30.

Фотографии, иллюстрирующие поляризационные свойства излучения Вавилова-Черенкова, возникающего при прохождении протонов с $\beta = 0,81$ вдоль оси X_1 кристалла ТГС, приведены на рис. 31: а) ось поляроида направлена вдоль оси X_3 ; б) ось поляроида - вдоль оси X_2 . В первом случае в согласии с теорией пропускаются необыкновенные волны (E_-), примыкающие к плоскости X_1, OX_3 , и частично необыкновенные волны (E_+) при $\varphi \approx 45^\circ$, а во втором случае пропускаются волны (E_-), примыкающие к плоскости X_1, OX_2 , и частично волны (E_+), излучаемые вблизи плоскости X_1, OX_3 ($\varphi = \pi/2$).

При движении протонов вдоль оси X_2 кристалла ТГС, т.е. перпендикулярно плоскости оптических осей (X_1, OX_3), построения Гюйгенса имеют вид, показанный на рис. 32. Расчетное и экспериментальное распределение интенсивности излучения Вавилова-Черенкова по образующим конусов приведено на рис. 33. Результаты экспериментальной проверки поляризационных свойств излучения при движении протонов 660 МэВ вдоль оси X_2 кристалла изображены на рис. 34.

В случае прохождения протонов с $\beta = 0,81$ вдоль большой биссектрисы (оси X_3) кристалла ТГС расчетные и экспериментальные распределения излучения хорошо согласуются, как это видно из рис. 35. Фотографии, иллюстрирующие поляризационные свойства излучения в этом случае, показаны на рис. 36.

Экспериментально измеренные углы испускания волн F_+ и F_- вдоль основных плоскостей двухосного кристалла ТГС (для всех трех случаев движения частиц вдоль главных осей) в пределах ошибок опыта ($\Delta\theta = \pm 12'$), согласуются с расчетными углами, вычисленными по формулам Музикаржа^{/22/}.

Кристалл сегнетовой соли (КСС)

Аналогичной методикой были изучены свойства излучения Вавилова-Черенкова в другом двухосном кристалле - кристалле сегнетовой соли с доменной структурой^{/25/}. Вследствие низкой оптической анизотропии этого кристалла, характеризуемой максимальной разницей в главных показателях преломления ($\Delta n \sim 5 \cdot 10^{-3}$), двухконусное излучение удалось обнаружить только по поляризационным свойствам.

Опыты производились по схеме, приведенной на рис. 21 для двух случаев: а) протоны движутся вдоль оси X_3 КСС (вдоль малой биссектрисы); б) протоны движутся вдоль оси X_2 (т.е. перпендикулярно плоскости оптических осей). Для пластинки КСС X_2 - среза (частицы движутся вдоль оси X_2) в опыте получено согласие с теоретическими расчетами, т.е. азимутальное распределение волн напоминало то, что имело место в случае кристалла ТГС.

Для случая а) ожидаемое расчетное распределение волн $F_+(\varphi)$ и $F_-(\varphi)$ показано на рис. 37. Экспериментальные распределения волн $F_+(\varphi)$ и $F_-(\varphi)$ при прохождении протонов с энергией 660 МэВ

($\beta = 0,81$) вдоль оси X_3 кристалла КСС приведены на рис. 38 (поляроид ориентирован вдоль оси X_2 - пропускаются волны F_+) и на рис. 39 для случая, когда поляроид ориентирован вдоль оси X_1 (пропускаются в основном волны F_-).

На фотографии (рис. 39) вблизи оси X_1 внутреннего кольца отчетливо видна особенность азимутального распределения волн $F_+(\varphi)$ в виде двух "щелей". При ориентировке поляроида вдоль оси X_1 (рис. 39) на внутреннем кольце также вблизи оси X имеется своеобразная особенность азимутального распределения волн $F_-(\varphi)$ излучения Вавилова-Черенкова в виде двух светлых "точек". Эта локализованная по двум диаметрально противоположным образующим конуса в пределах $\Delta\varphi = \pm 1,6^\circ$ часть излучения с преимущественной поляризацией в плоскости оптических осей была названа "игольчатым" излучением.

Post factum следует отметить, что указание (к сожалению, не замеченному мной ранее) на возможность возникновения такой особенности излучения Вавилова-Черенкова в двухосных кристаллах содержится в работе В.Л. Гинзбурга¹¹⁾, посвященной теории излучения Вавилова-Черенкова для одноосных кристаллов, где он, в частности, писал:

"В случае двуосного кристалла имеется большое число физически выделенных направлений. Однако качественно картина излучения остается такой же, как в одноосном кристалле за исключением двух особенностей. Первая особенность мало существенна и связана с дисперсией. Дисперсия осей, которая общими формулами (10) и (15) неявно учитывается, должна приводить к хроматическим эффектам. Так, например, если электрон движется по главной оси для частоты ν , то для других частот это направление не будет главной осью; следовательно, характер излучения несколько изменится (например, изменится зависимость ν_0 от φ)^{*}).

Вторая особенность связана с конической рефракцией. Если одна из образующих конуса нормалей излучаемых волн будет направлена по оптической оси двуосного кристалла, то ей будет соответствовать конус лучей. Поэтому поверхность лучей, испускаемых электроном,

*) Эта особенность экспериментально еще не проверена (примечание автора).

будет иметь своеобразные особенности^{жж)} в области, соответствующей волнам, идущим по оптической оси."



^{жж)} Эти своеобразные особенности и проявились на опыте в виде "игольчатого" излучения. (Примечание автора).

Иллюстрации

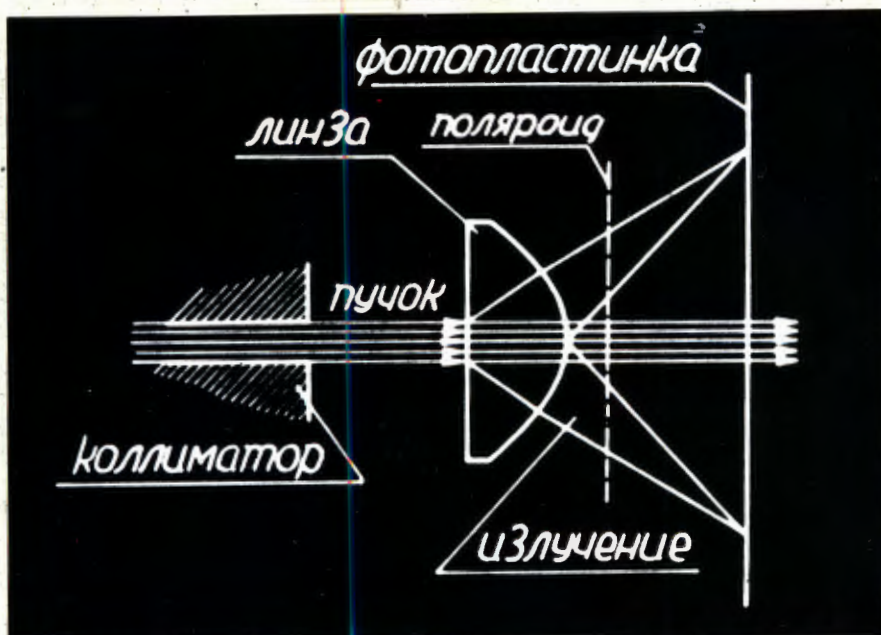


Рис. 1. Схема опыта по наблюдению излучения Вавилова-Черенкова от пучка протонов 660 МэВ / $\beta = 0,81$ / от синхроциклотрона Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

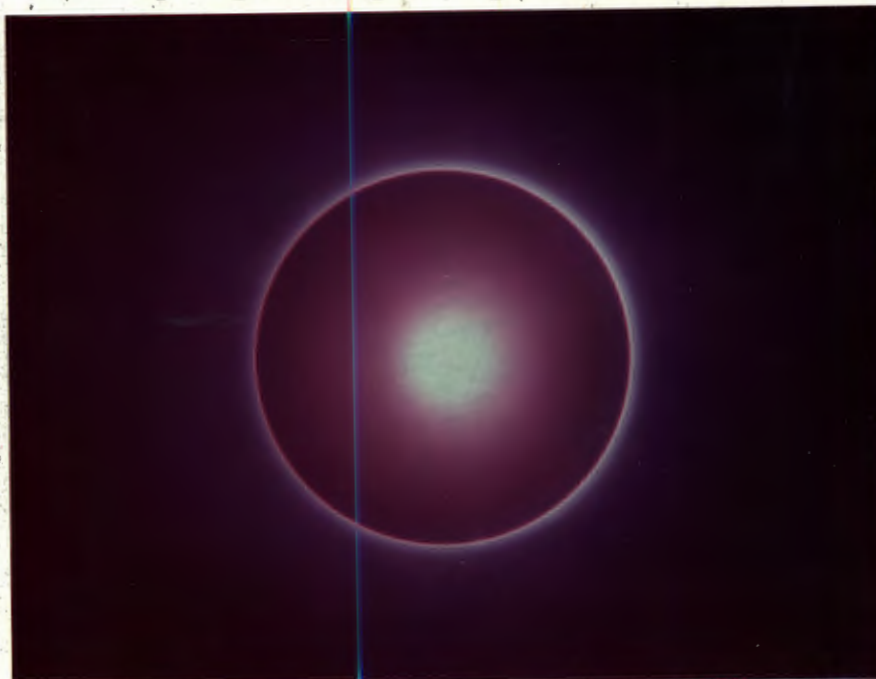


Рис. 2. Фотография кольца излучения Вавилова-Черенкова, полученная в опыте, изображенном на рис. 1, (центральное пятно - автограф пучка).

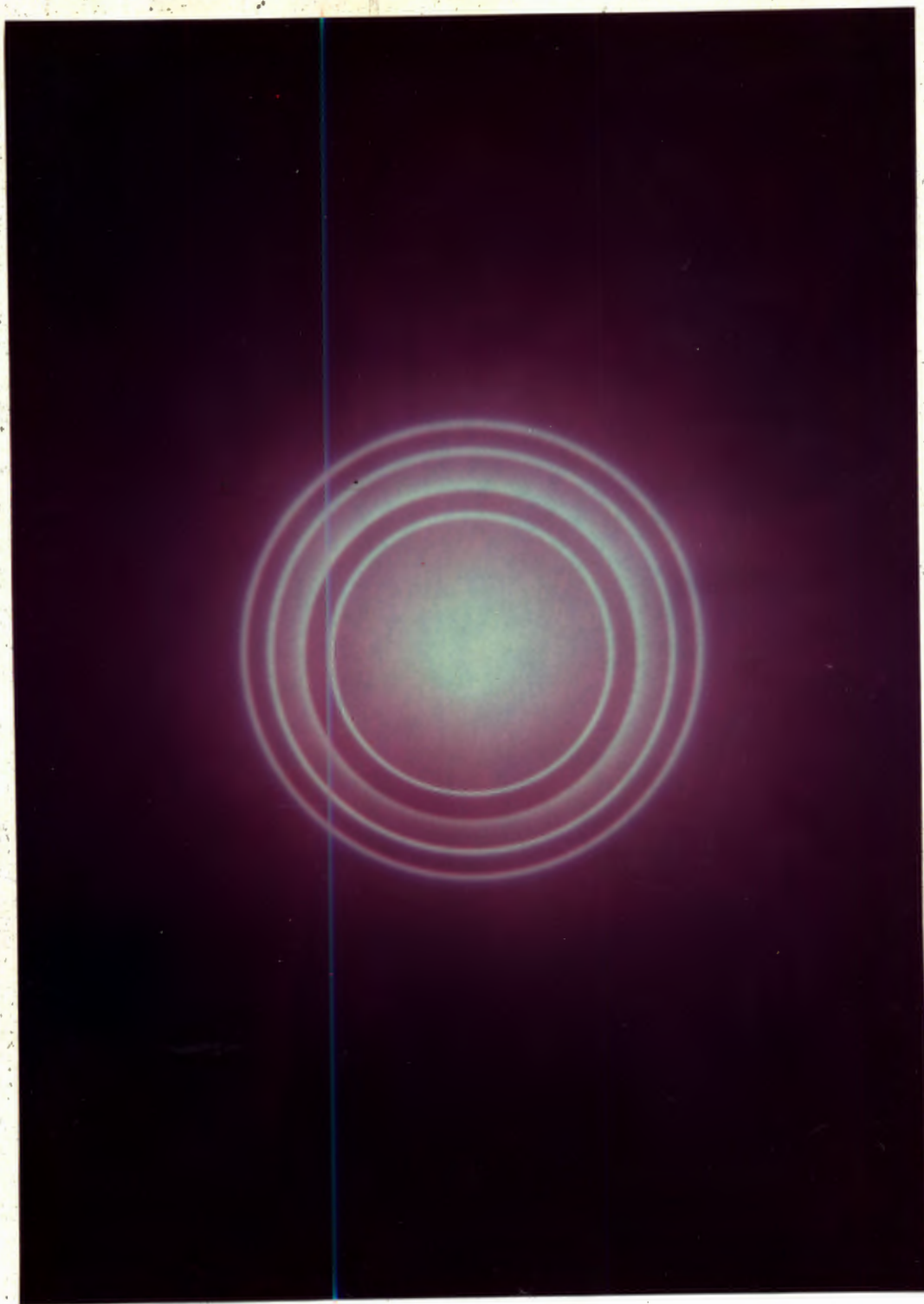


Рис. 3. Фотография колец излучения Вавилова-Черенкова, возникших от протонов 660 МэВ при прохождении через три плоскопараллельных радиатора с $n_1 = 1,459$; $n_2 = 1,568$; $n_3 = 1,611$, поставленных на оптический контакт с плоскопараболической линзой с $n_D = 1,512$ (см. схему опыта рис. 1).

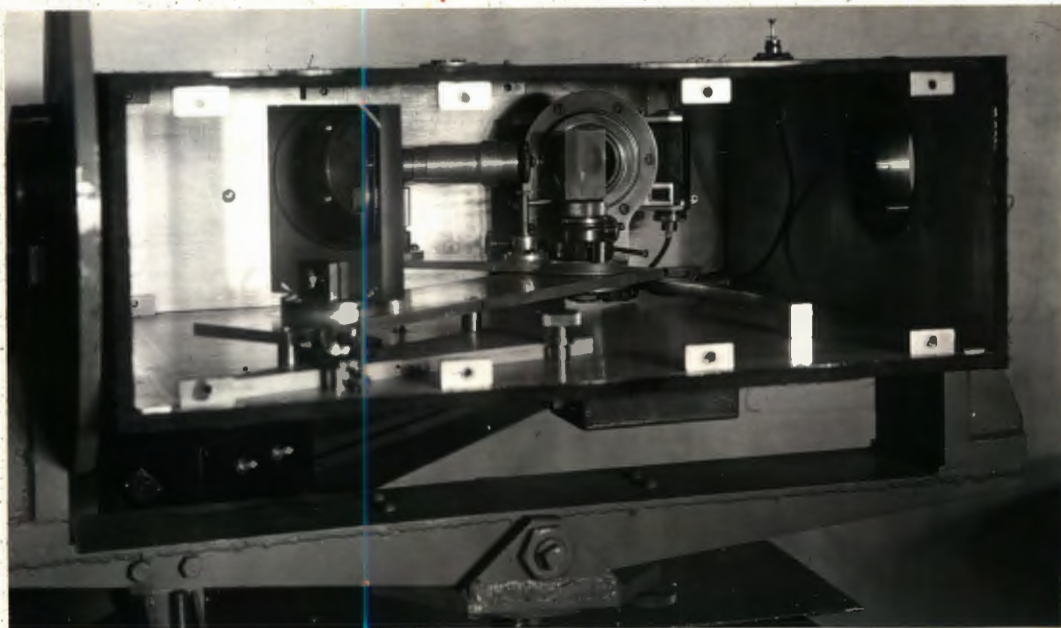
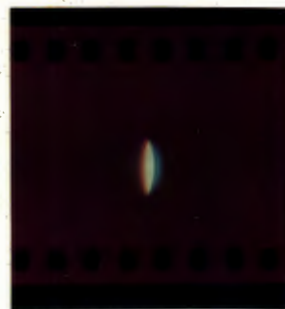


Рис. 4. Общий вид прибора типа Мазера, использовавшийся для измерения энергии дубненского синхротрона на энергии 460 МэВ (1953 год) и 660 МэВ (1954 год).



а)



б)

Рис. 5. Позитивные изображения частей конуса излучения Вавилова-Черенкова, полученные с прибором, изображенным на рис.4: а - с ахроматической призмой; б - без призмы.

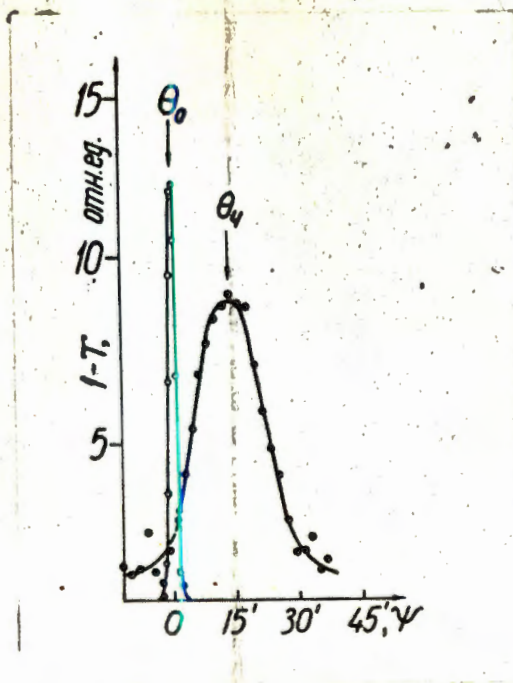


Рис. 6. Типичная фотометрическая кривая изображения излучения Вавилова-Черенкова, зарегистрированного черенковским прибором (рис. 4).
(Узкая линия θ_0 - это реперная метка, θ_4 - угол между репером и черенковским изображением в плоскости объектива "Юпитер-3").

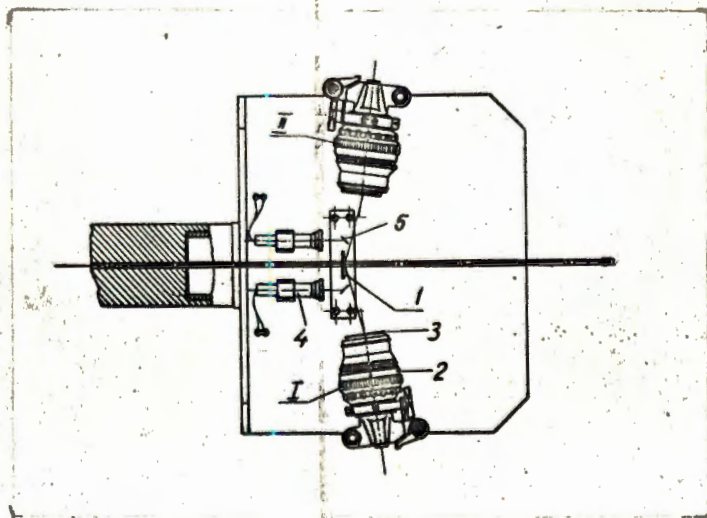
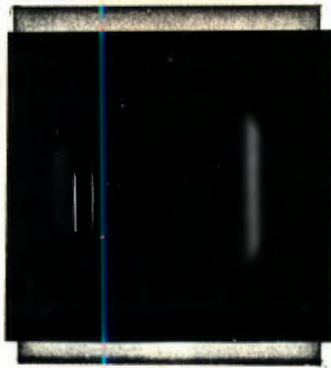
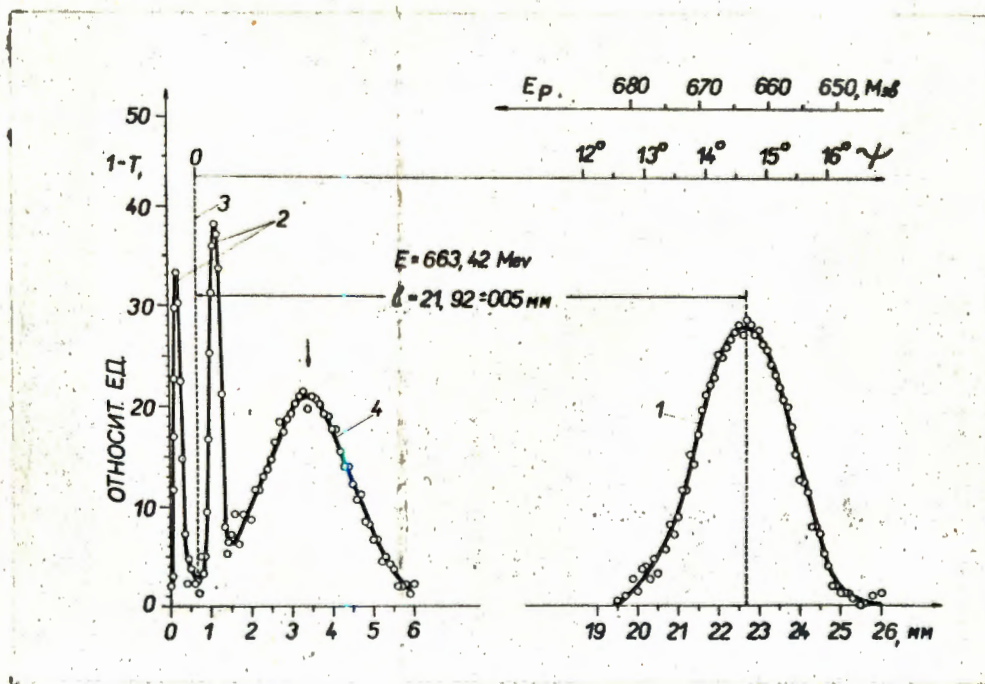


Рис. 7. Схема черенковского монохроматического прибора:
1 - радиатор; 2 - фотоаппараты с объективом "Гелиос-40";
3 - интерференционные фильтры; 4 - проекторы для нанесения реперных меток; 5 - зеркальца.



a)



b)

Рис. 8. Результаты измерений с монохроматическим прибором:
а) фотография излучения Вавилова-Черенкова, зарегистрированного прибором;
б) фотометрическая кривая такого изображения: 1 - пик излучения Вавилова-Черенкова (основной); 2 - реперные метки; 3 - положение выходной плоской грани радиатора; 4 - пик излучения, отраженный от интерференционного фильтра противоположного фотоаппарата (см. слабое изображение на рис. 8 а).

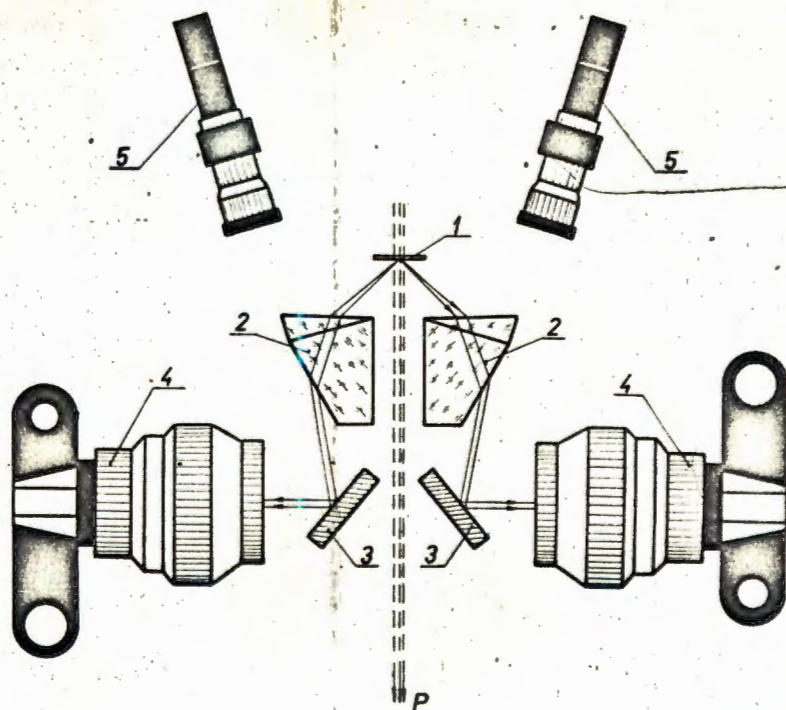


Рис. 9. Схема черенковского прибора с двумя апохроматическими дублетами:
1 - радиатор из LiF ; 2 - дублеты; 3 - зеркала; 4 - фотоаппараты с объективами "Гелиос-40"; 5 - проекторы для нанесения реперных рисок.

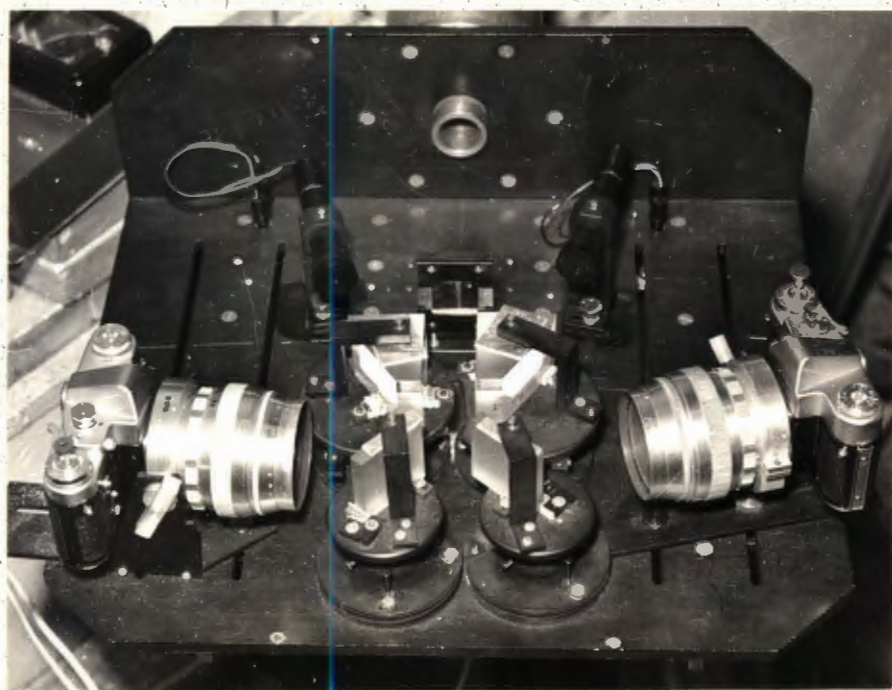
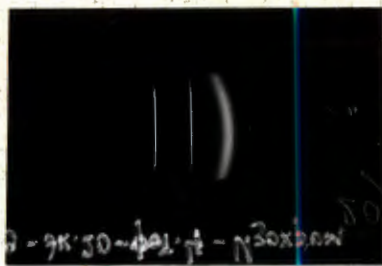
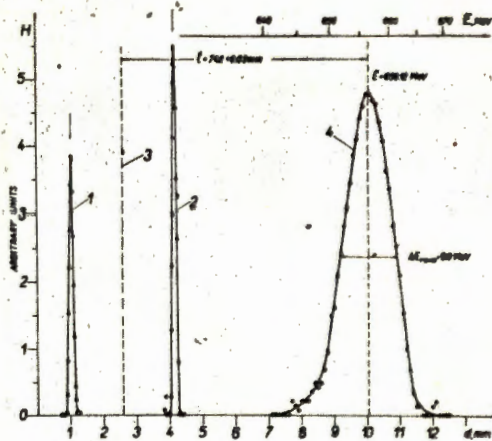


Рис. 10. Общий вид апохроматического прибора.

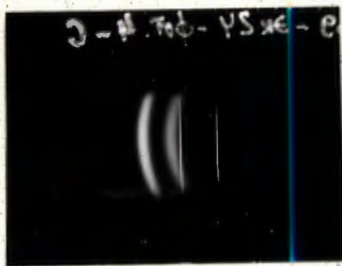


a

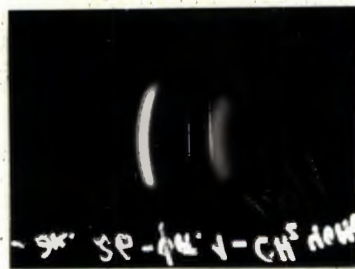


b

Рис. 11. Результаты измерений с апохроматическим прибором:
а) изображение излучения Вавилова-Черенкова и реперных рисок;
б) типичная фотометрическая кривая такого изображения.



a



b

Рис. 12. Пары дуг от конусов излучения Вавилова-Черенкова, полученные апохроматическим методом на пучке протонов с энергией 657 МэВ:
а) сброс на 20 МэВ в С;
б) сброс на 40 МэВ в CH_2 .

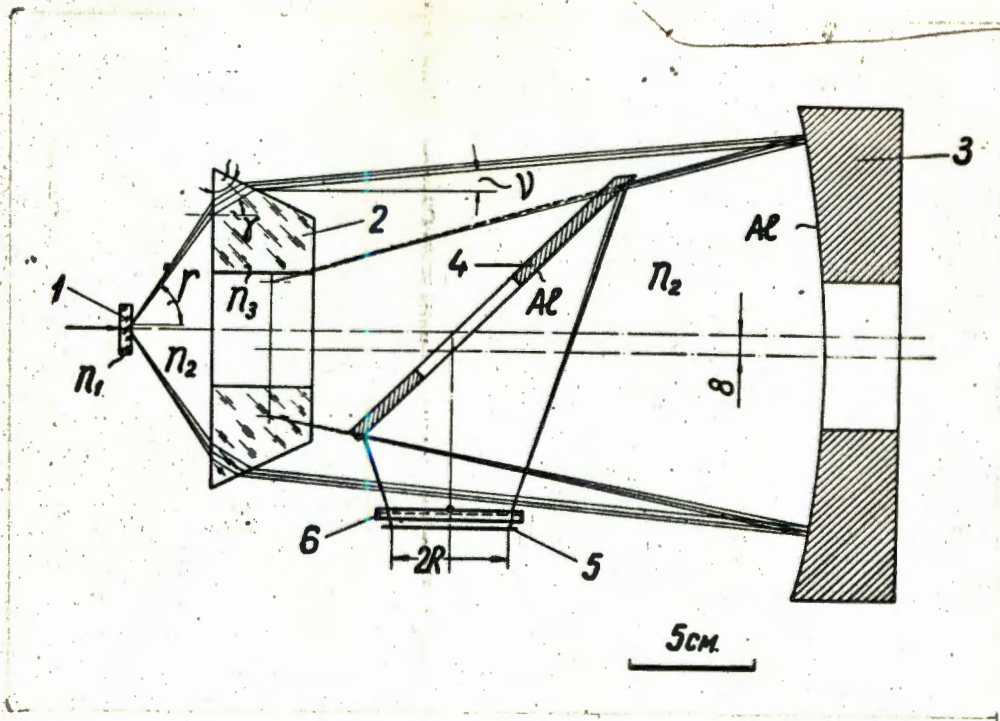


Рис. 13. Схема черенковского ахроматического прибора:
1 - радиатор; 2 - кольцевая ахроматическая призма;
3 - сферическое зеркало; 4 - плоское зеркало;
5 - фотопластинка; 6 - светофильтры.

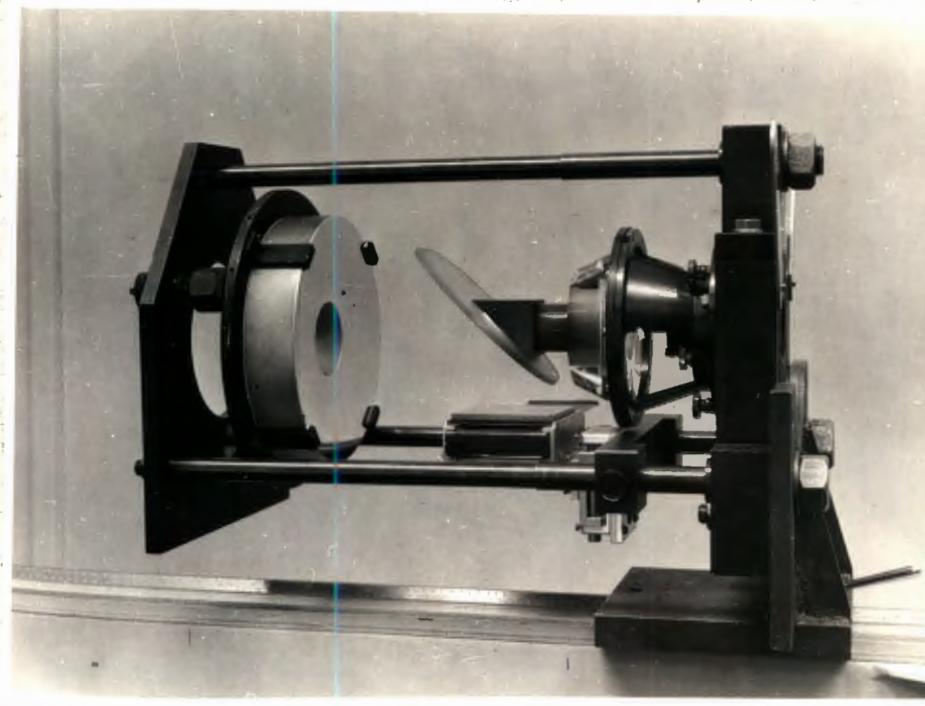


Рис. 14. Общий вид ахроматического прибора.

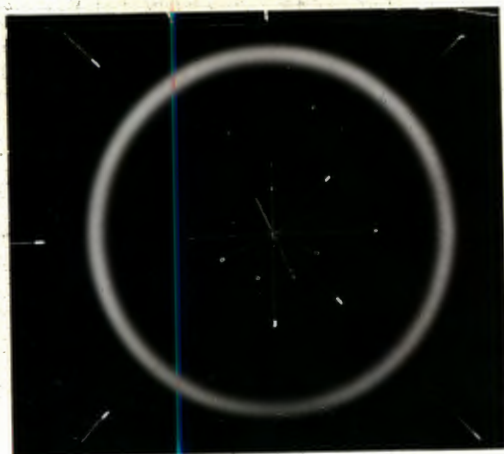


Рис. 15. Типичное изображение кольца излучения Вавилова-Черенкова, полученное с помощью ахроматического прибора.

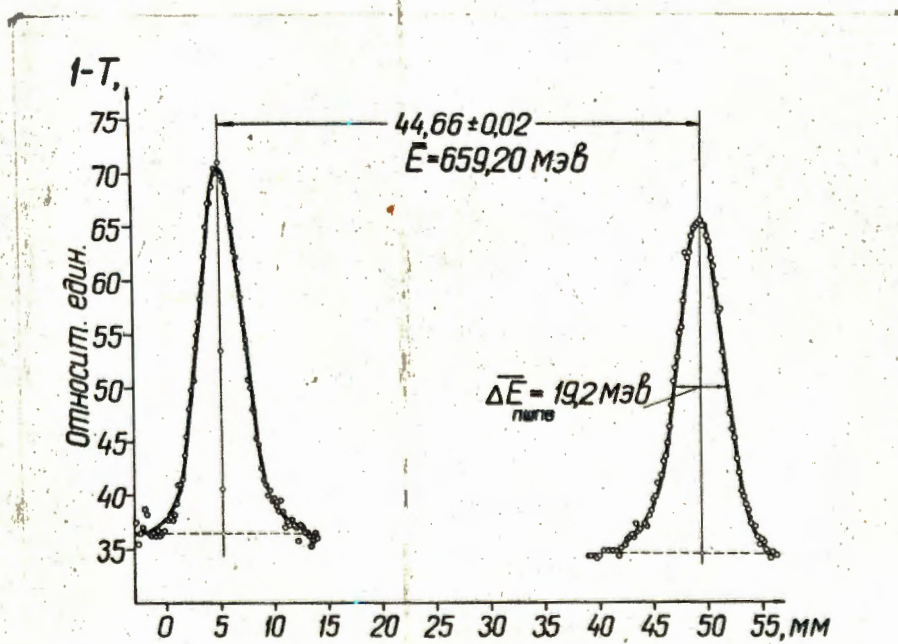


Рис. 16. Фотометрическая кривая изображения кольца излучения Вавилова-Черенкова, показанного на рис. 15.

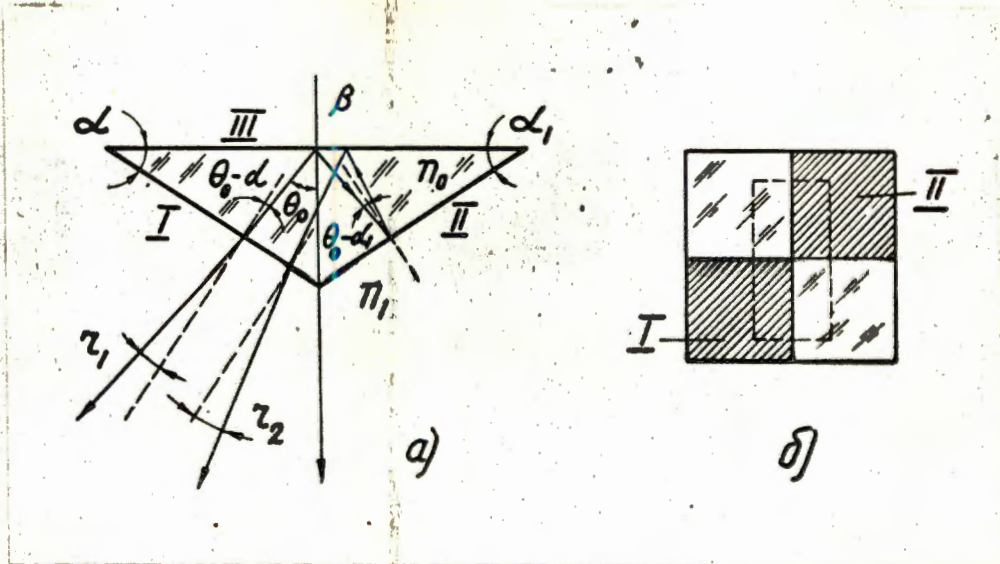


Рис. 17. Схема простого черенковского метода:
а) ход лучей в призме - радиаторе;
б) вид на призму - радиатор против пучка.

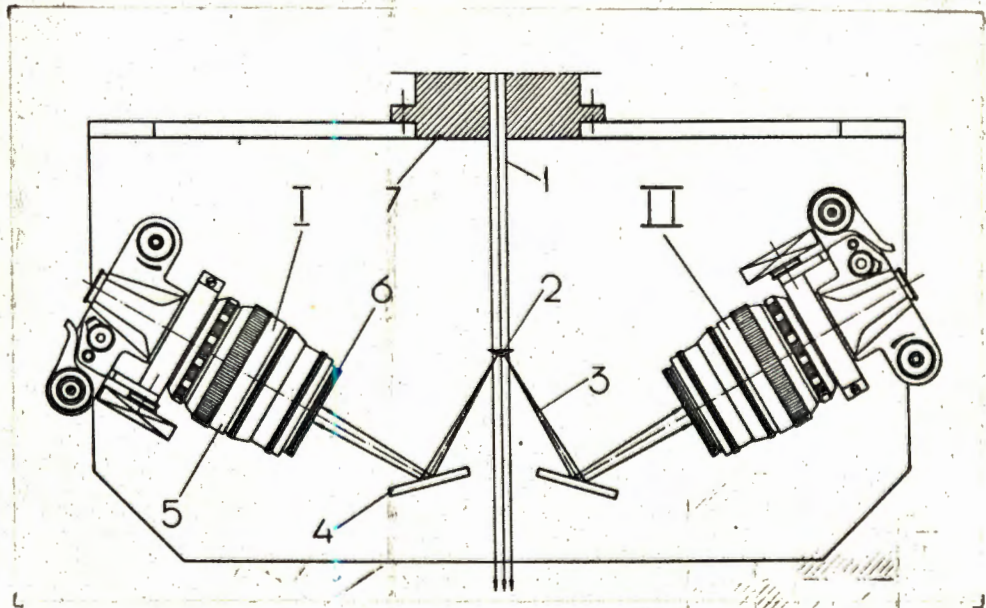
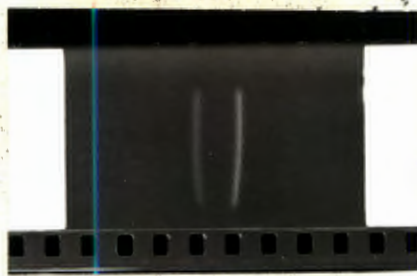
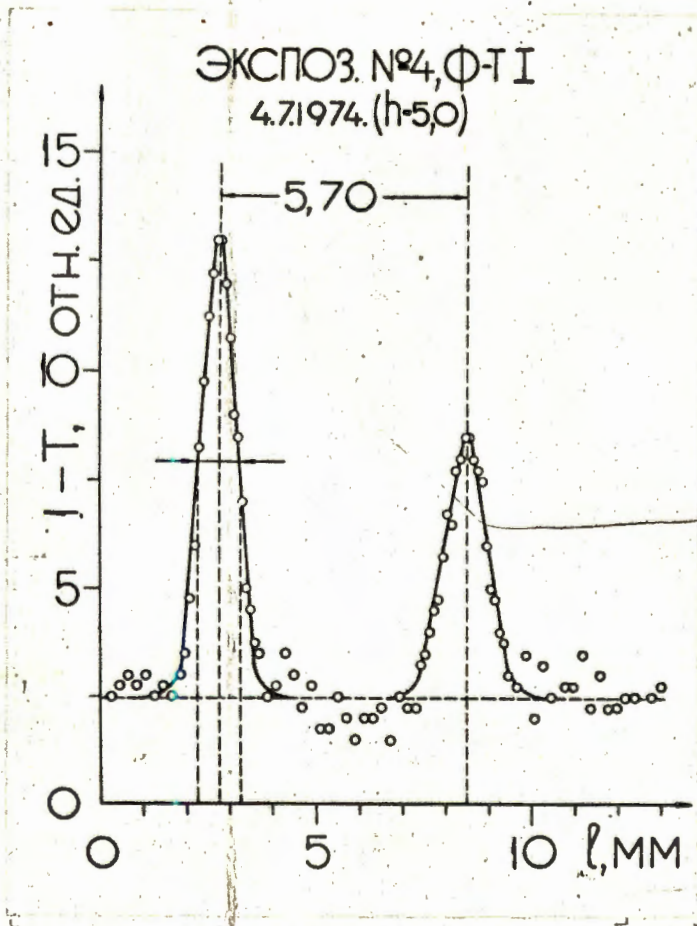


Рис. 18. Схема черенковского прибора, в котором используется метод двойного отражения: I - пучок протонов; 2 - призма-радиатор; 3 - излучение Вавилова-Черенкова; 4 - плоские зеркала; 5 - фотоаппараты "Зенит-3М" с объективами "Гелиос-40", настроенными на бесконечность; 6 - интерференционные фильтры.

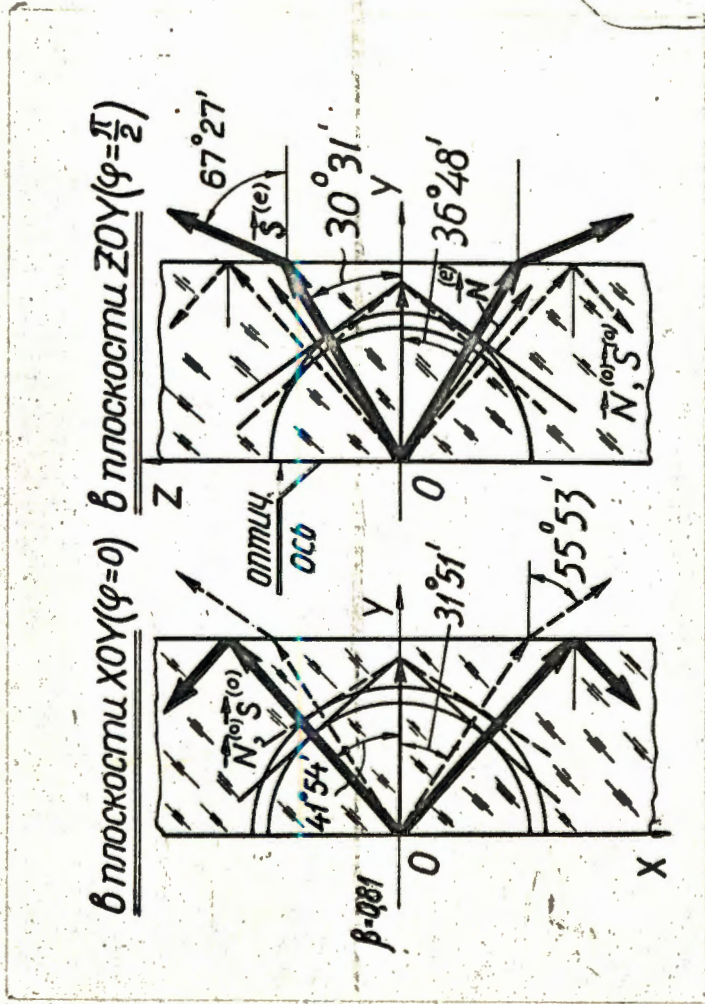


a)



б)

Рис. 19. Результаты измерений энергии протонов простым методом на пучке 635 МэВ:
а) позитивное изображение "дуг" излучения Вавилова-Черенкова;
б) фотометрическая кривая изображений, показанных на рис. 19 а) в месте наибольшего выгиба "дуг" излучения.



а) б)

Рис. 20. Построения Гюйгенса для случая движения частицы с $\beta = 0,81$ перпендикулярно к оптической оси кристалла исландского шпата:

- а) в плоскости, перпендикулярной оптической оси;
- б) в плоскости оптической оси.

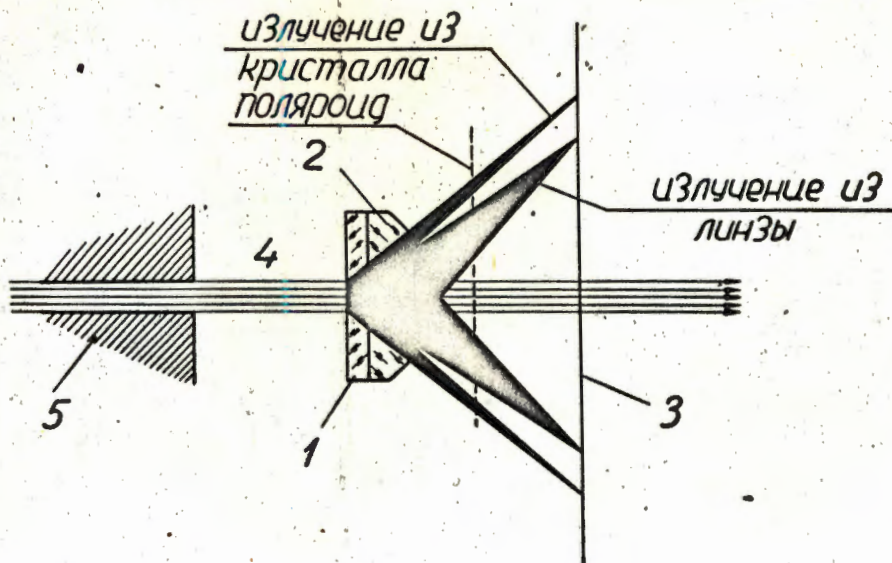


Рис. 21. Схема опыта:
1 - кристалл; 2 - плоскопараболическая линза с $f=22,7$ мм и $n_D = 1,512$; 3 - фотопластинка или фотопленка;
4 - пучок протонов 660 МэВ; 5 - коллиматор диаметром 5 мм.

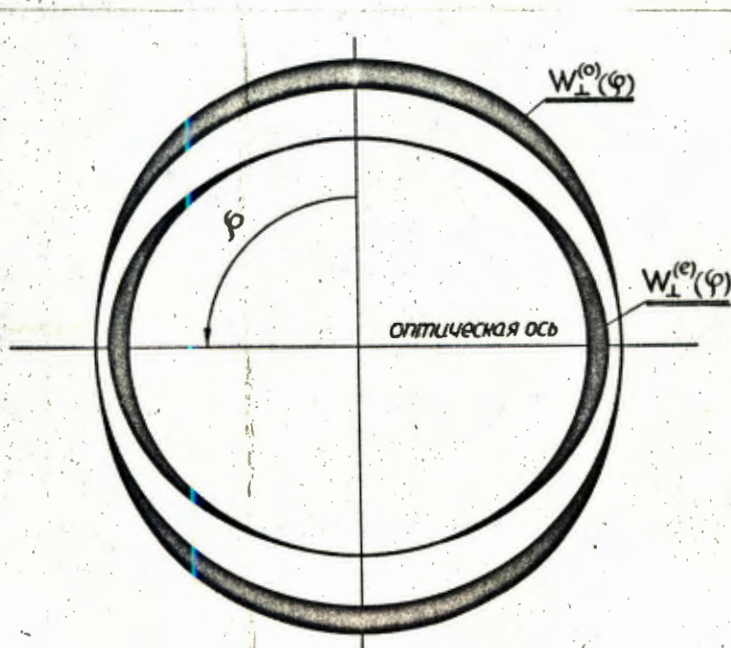


Рис. 22. Расчетные азимутальные распределения обыкновенных (W^o) и необыкновенных (W^e) волн излучения Вавилова-Черенкова, возникающих от движения частиц с $\beta = 0,81$ перпендикулярно оптической оси кристалла исландского шпата (пластинка вырезана параллельно оптической оси).

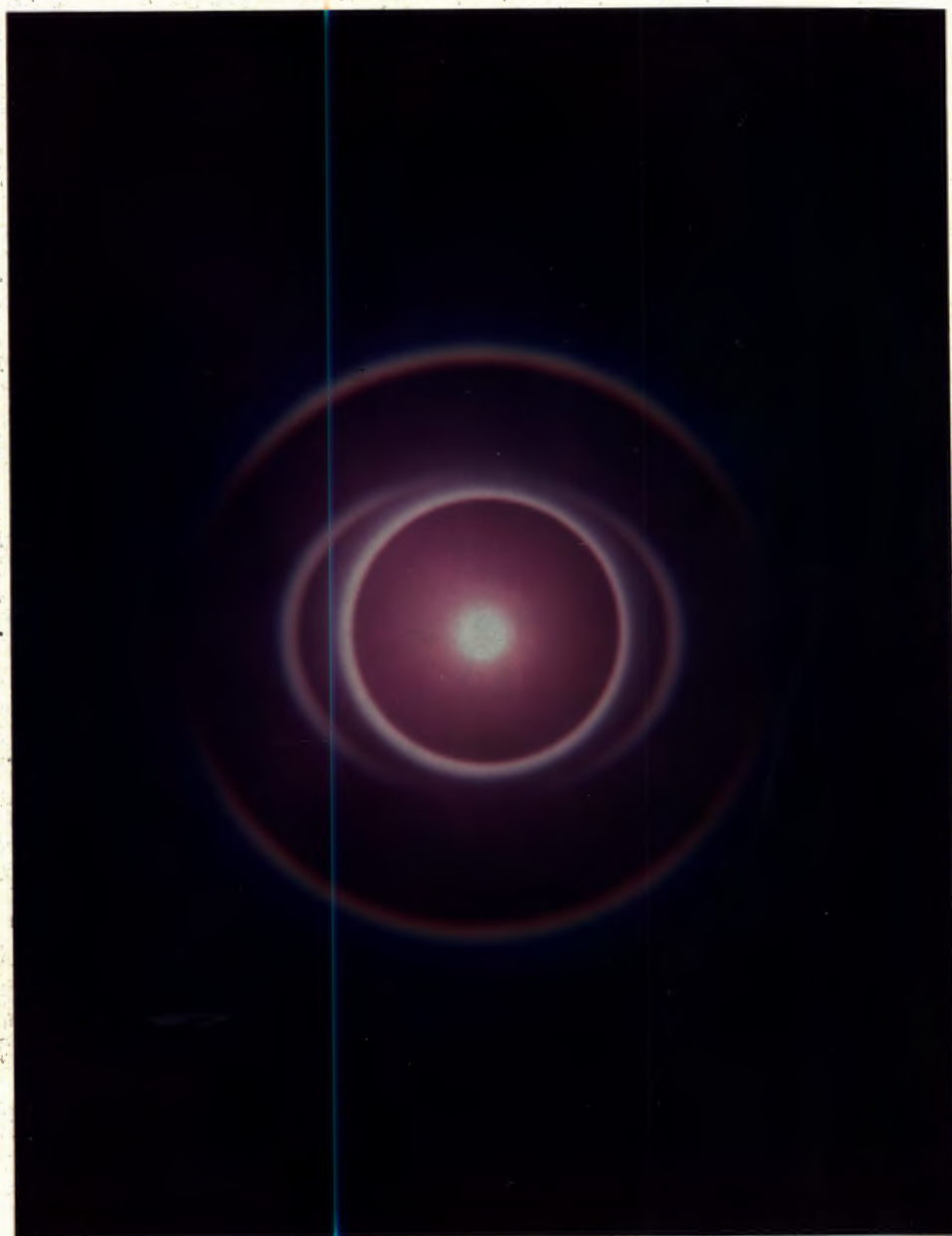


Рис. 23. Фотография излучения Вавилова-Черенкова, полученная для случая движения протонов 660 МэВ перпендикулярно оптической оси кристалла кальцита. (Наружные дуги - обыкновенные волны, "эллипс" - необыкновенные волны, сплошное кольцо - излучение от линзы, центральное пятно - автограф пучка протонов, стрелкой показано направление оптической оси).

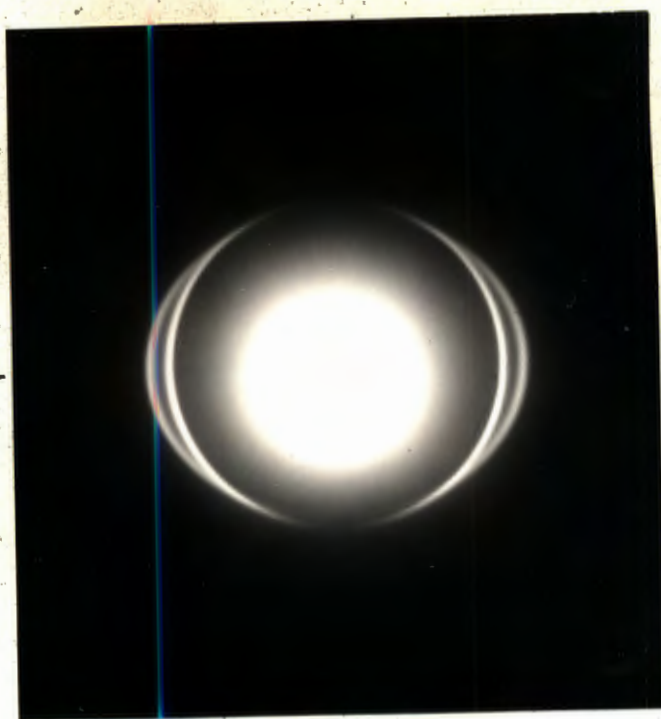


Рис. 24. Фотография излучения Вавилова-Черенкова, возбуждаемого протонами с $\beta = 0,81$, движущимися перпендикулярно оптической оси, но прошедшего поляризатор с осью, параллельной оптической оси (стрелкой показано направление оптической оси).

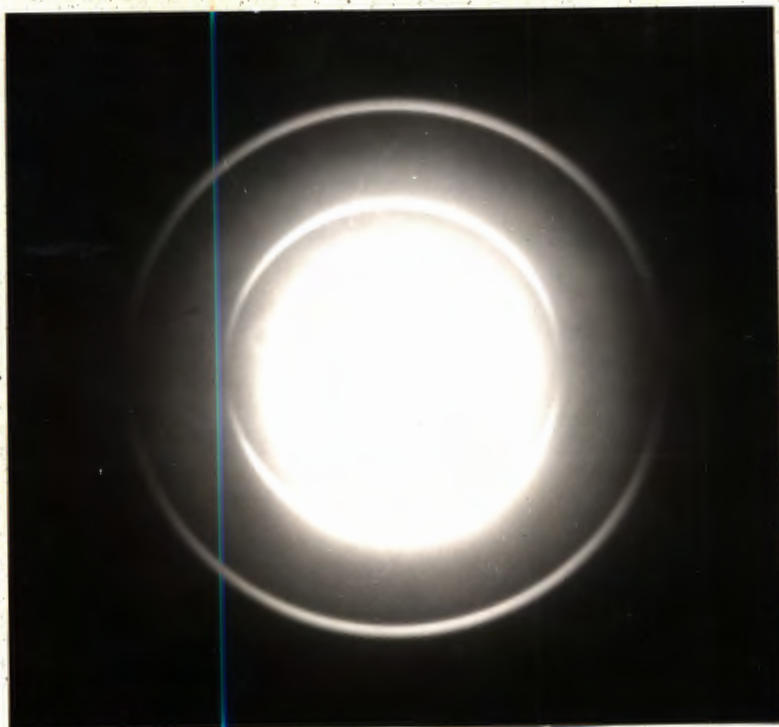


Рис. 25. То же, что и рис. 24, но ось поляризатора повернута на 90° и направлена перпендикулярно оптической оси.

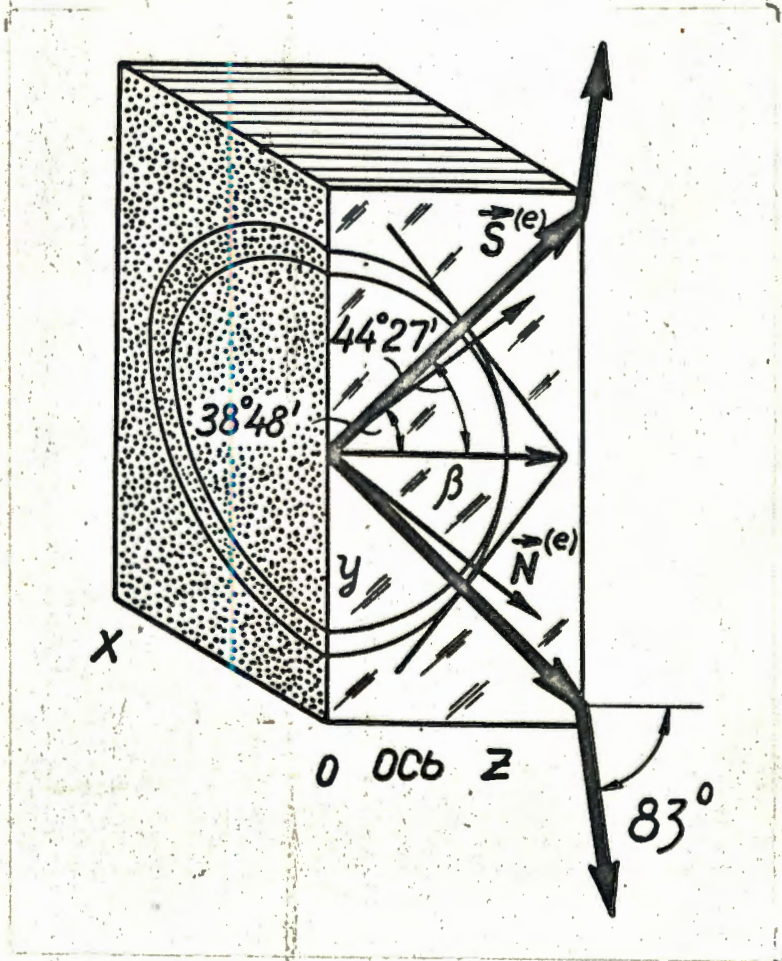
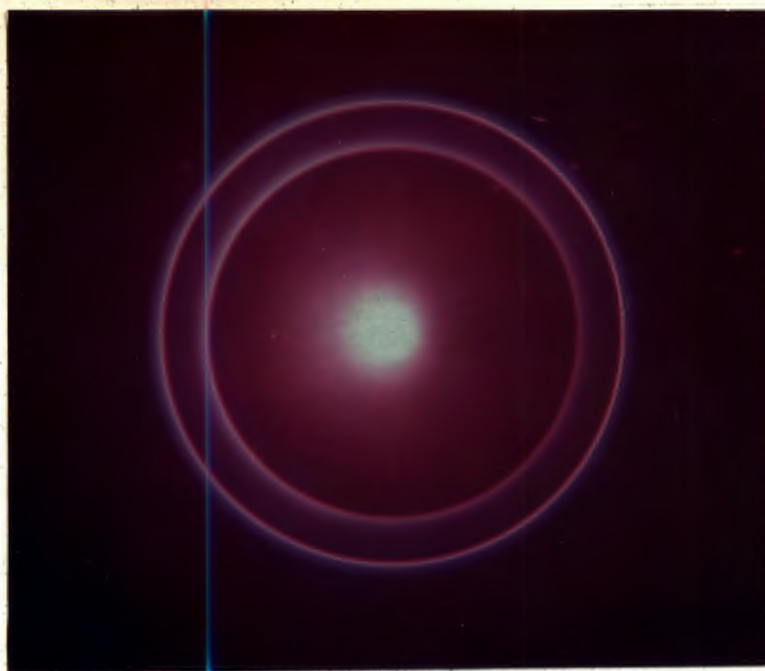


Рис. 26. Вид пластинки кристалла исландского шпата, вырезанной перпендикулярно оптической оси (частицы идут вдоль оси), с построениями Гюйгенса для этого случая.

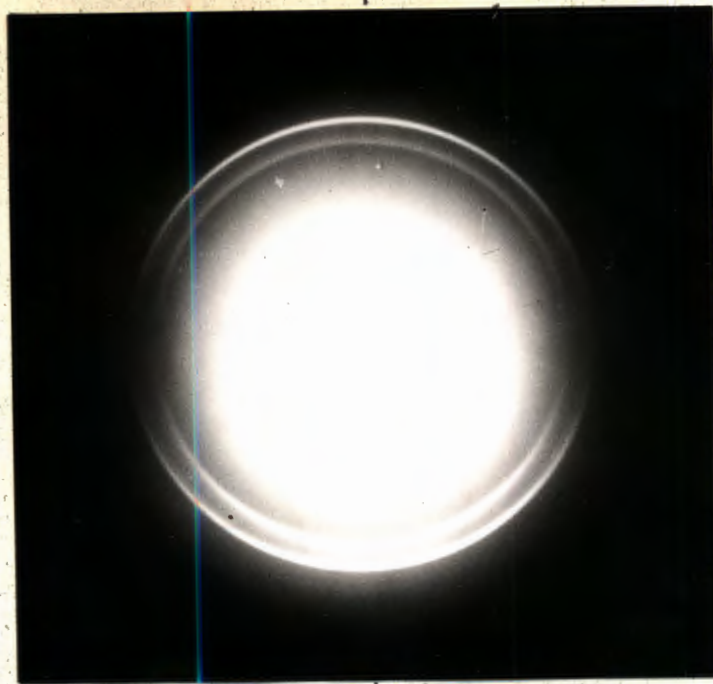


a.

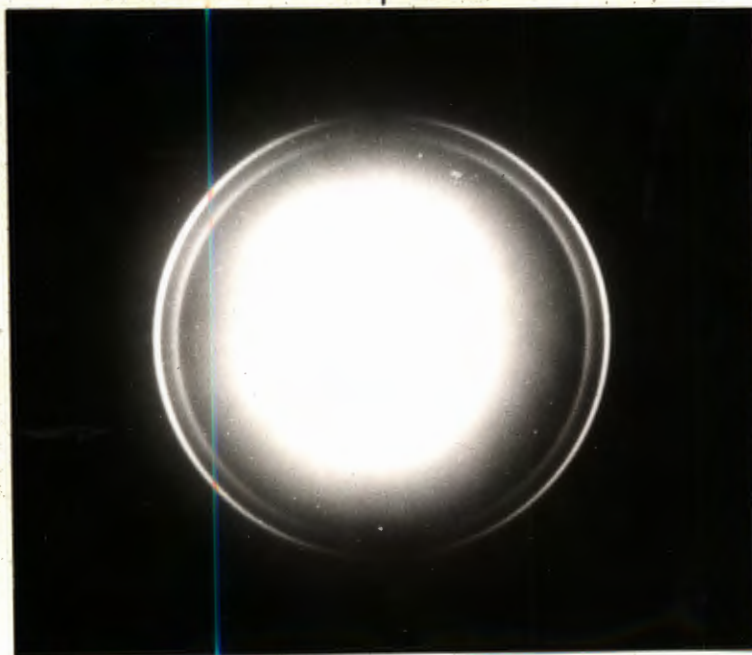


б

Рис. 27. Фотографии излучения Вавилова-Черенкова, полученные на пучке протонов 660 МэВ (по схеме опыта рис. 21) при прохождении частиц вдоль оптической оси кристалла кальцита (пластинка вырезана перпендикулярно оптической оси): а - без поляроида (наружное кольцо - необыкновенные волны, внутреннее - от реперной линзы; в центре - автограф пучка протонов); б - с поляридом.



a



b

Рис. 28. Излучение Вавилова-Черенкова, испущенное протонами с энергией 660 МэВ при прохождении через плоскопараллельную пластинку кварца толщиной 5 мм, вырезанную параллельно оптической оси (частицы идут перпендикулярно к оси). Стрелкой показано направление оптической оси: а - ось поляроида направлена вдоль оптической оси (пропускаются необыкновенные волны); б - ось поляроида направлена перпендикулярно к оптической оси (пропускаются обыкновенные волны).

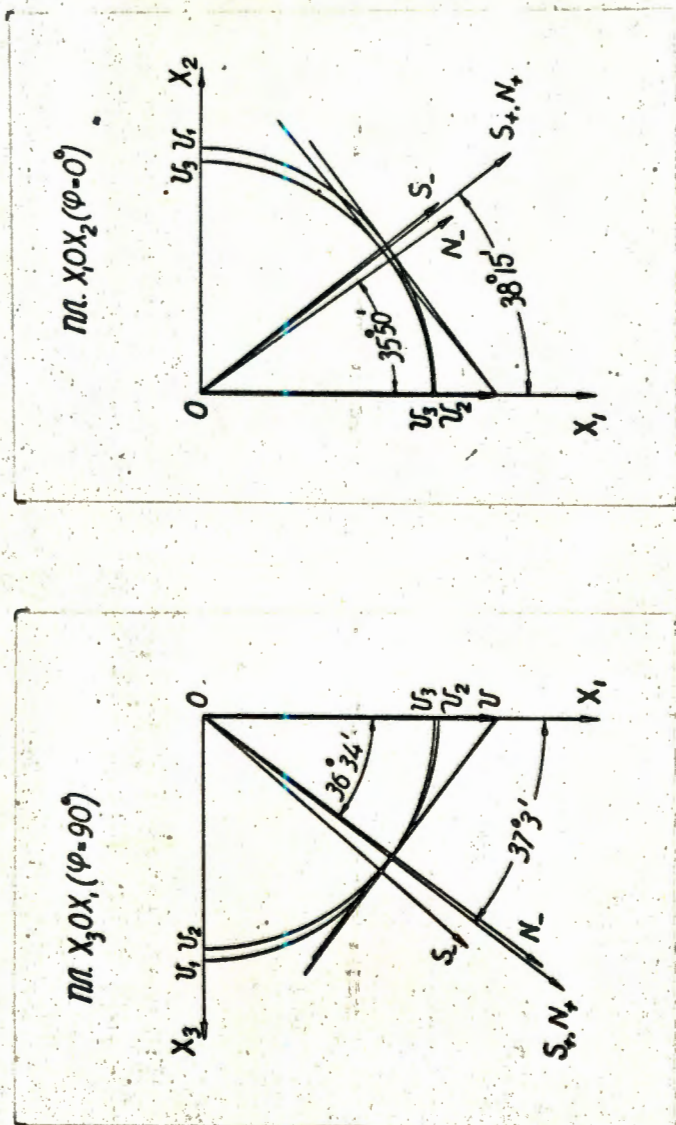


Рис. 29. Построения Гйгенса для случая движения протонов с $\beta = 0,81$ вдоль оси X (малой биссектрисы) кристалла ТГС, выполненные для двух плоскостей X_1OX_2 ($\varphi = 90^\circ$) и X_1OX_2 ($\varphi = 0^\circ$).

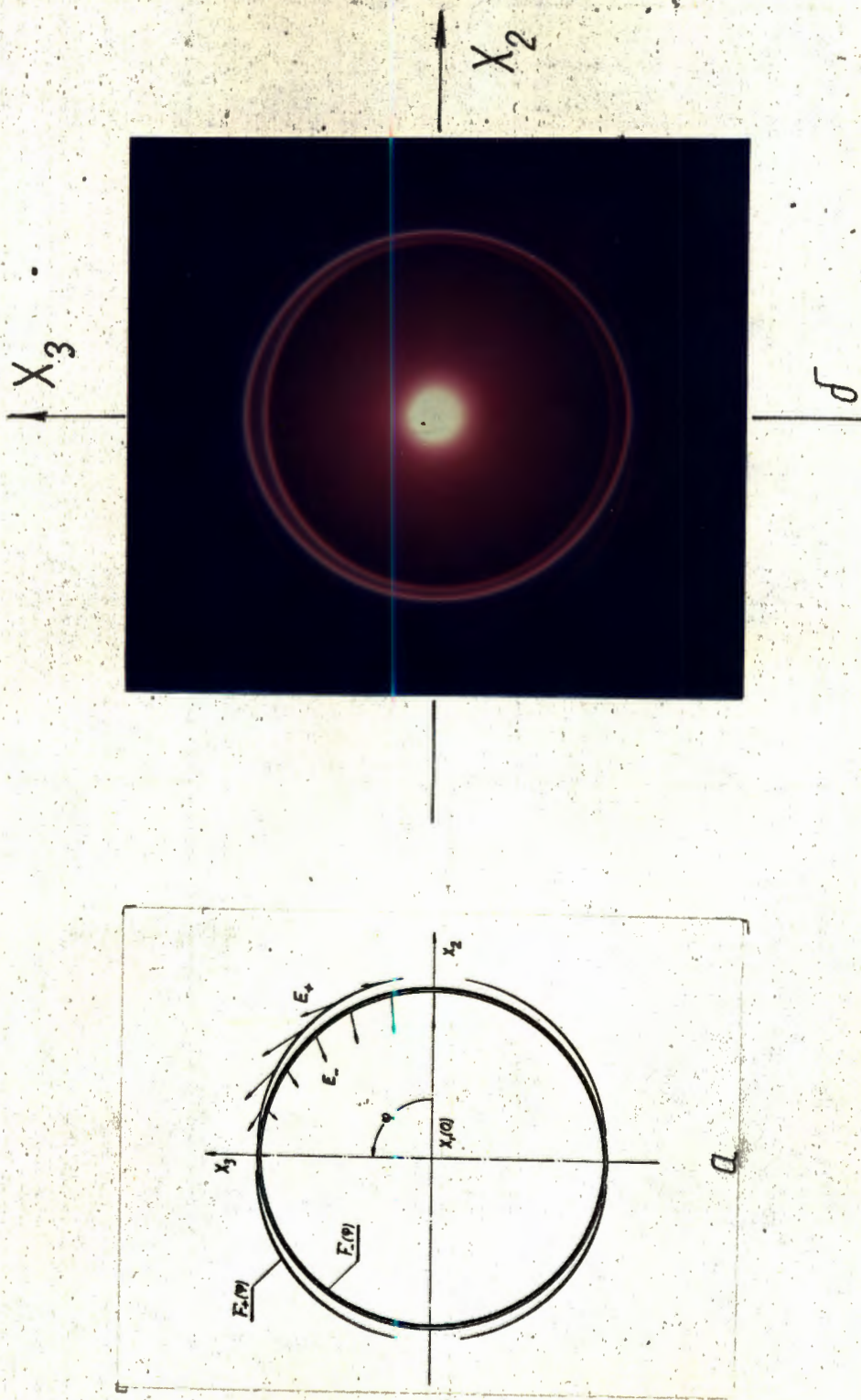
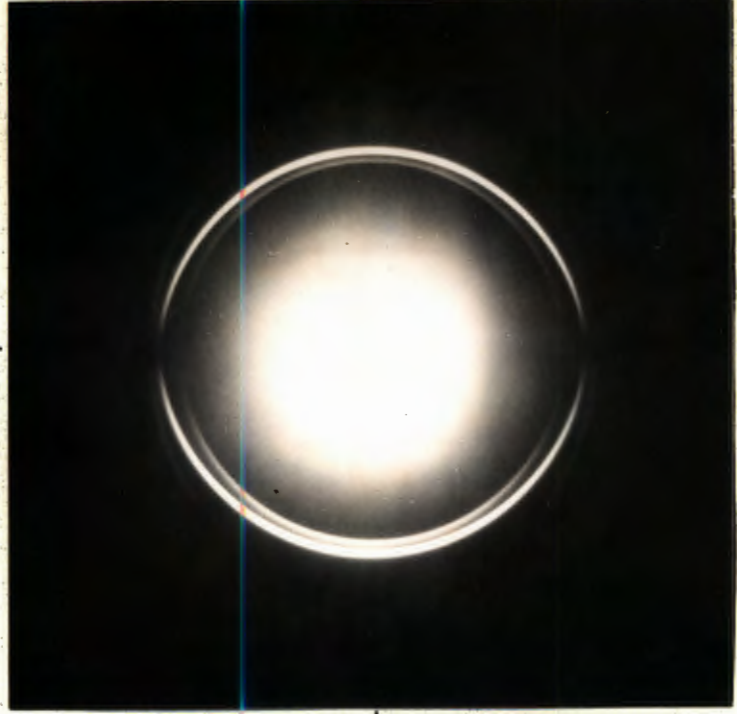
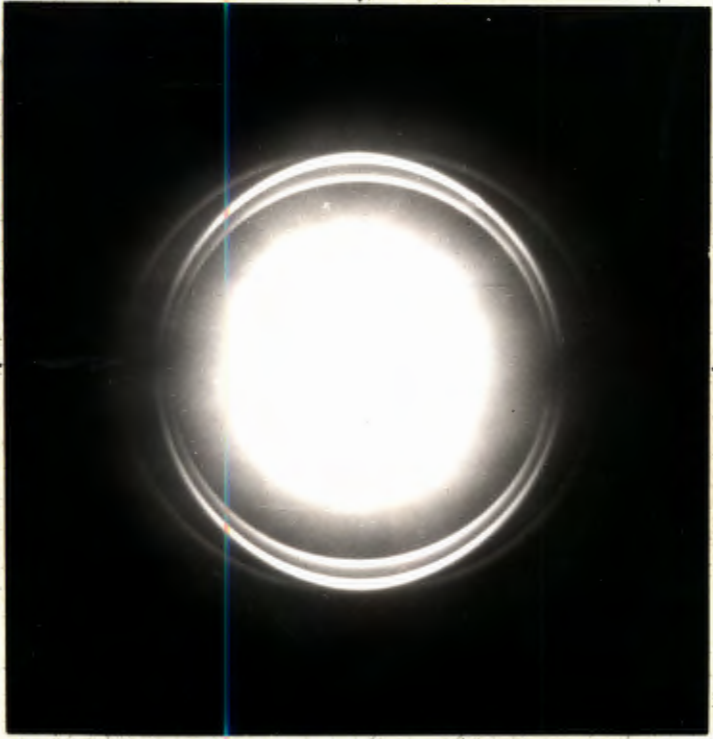


Рис. 30. Расчетное и экспериментальное распределение излучения Вавилова-Черенкова для случая движения протонов с $\beta = 0,81$ вдоль малой биссектрисы (x_1) кристалла ТГС: а) расчетное распределение по формулам Музикаржа; б) экспериментальное распределение, полученное по схеме опыта рис. 21 (центральное пятно - лучок протонов, внутреннее сплошное кольцо - реперное кольцо от линзы).

X_3



X_3

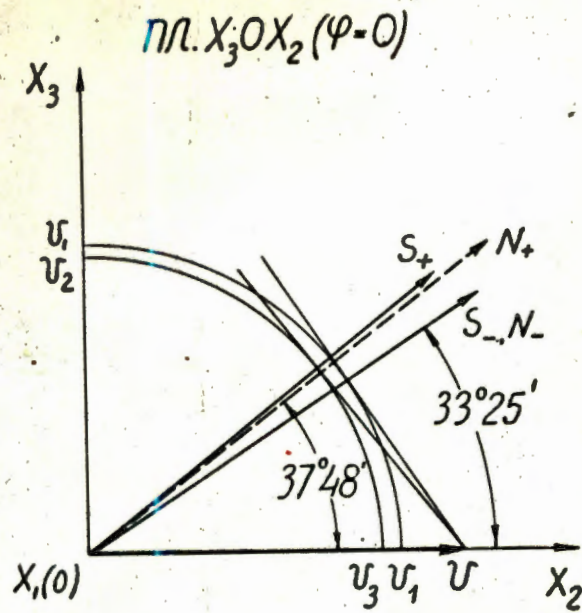


X_2

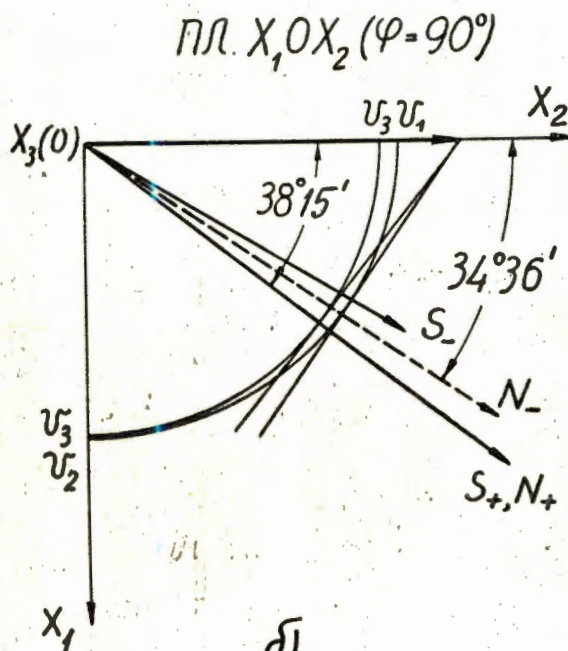
σ

a

Рис. 31. Фотографии, иллюстрирующие поляризационные свойства излучения Вавилова-Черенкова при прохождении протонов с $\beta = 0,81$ вдоль оси X_1 кристалла ТГС:
а) ось поляроида направлена вдоль оси X_3 ; б) ось поляроида направлена вдоль оси X_2 .



а)



б)

Рис. 32. Построения Гюйгенса для случая движения протонов с $\beta = 0,81$ вдоль оси X_2 (перпендикулярно плоскости оптических осей) кристалла ТГС, выполненные для двух плоскостей: а) плоскости X_2OX_3 ($\varphi = 0^\circ$); б) плоскости X_1OX_2 ($\varphi = 90^\circ$).

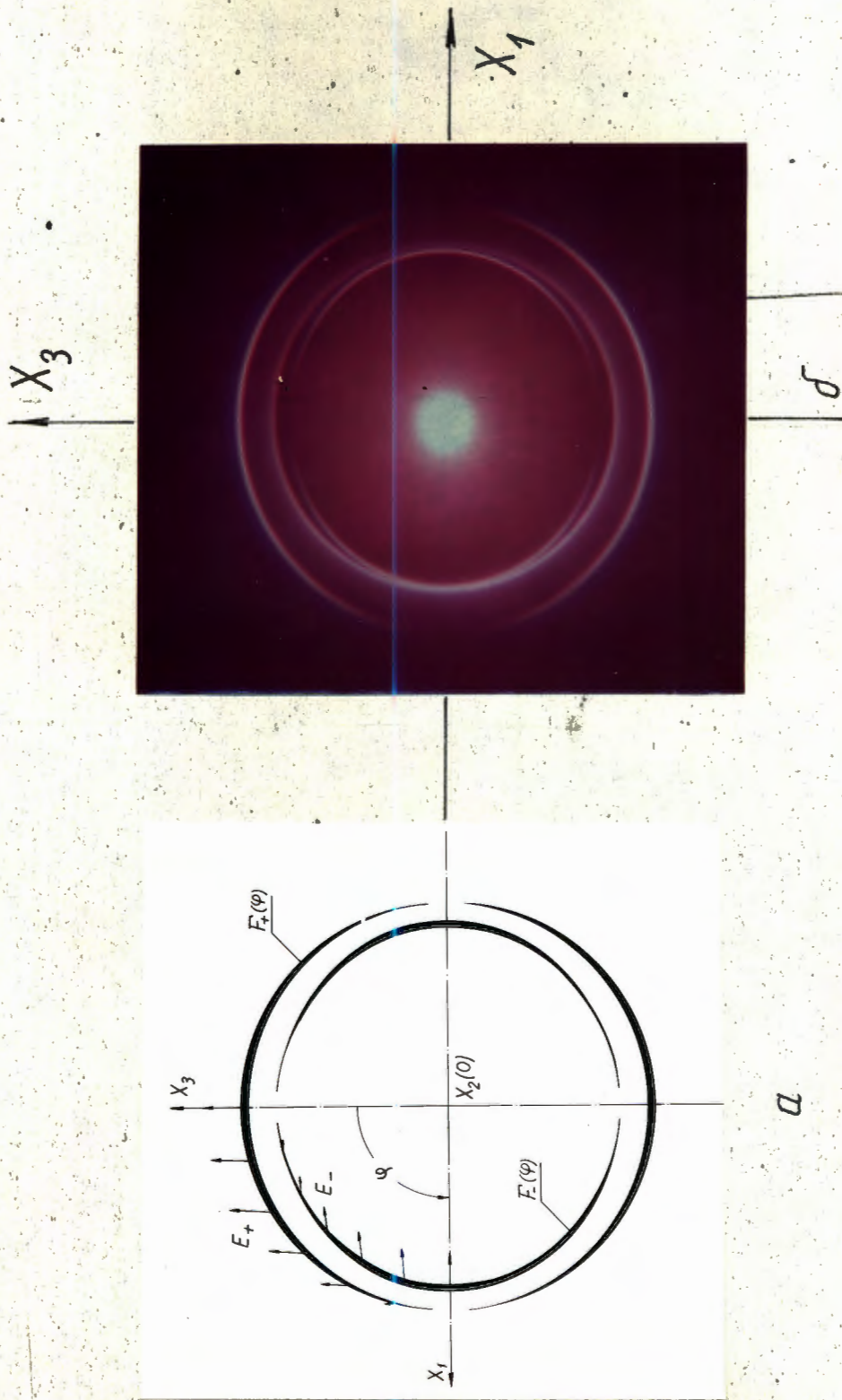
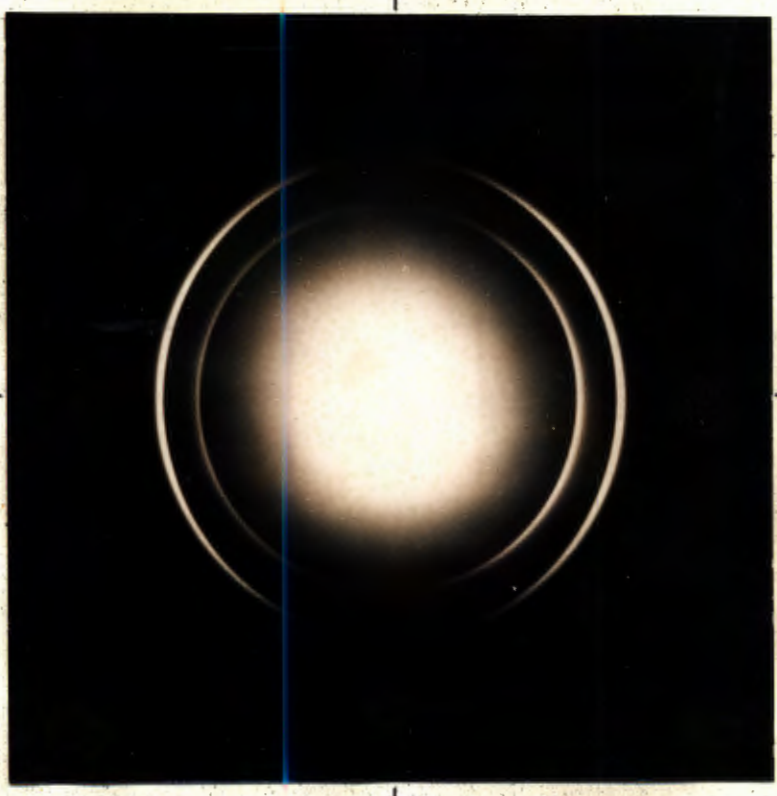
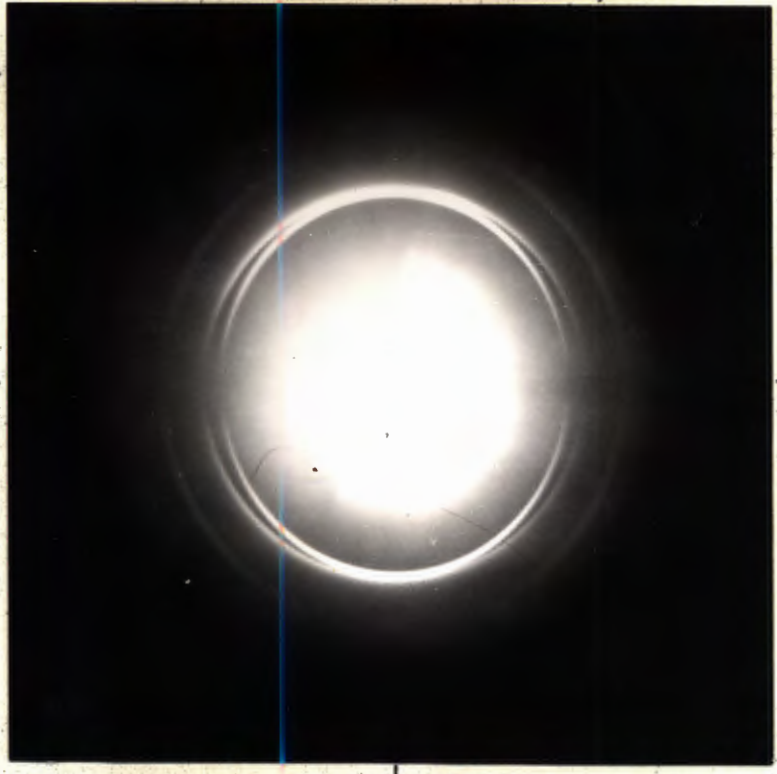


Рис. 33. Расчетные и экспериментальные распределения волн $F_+^-(\varphi)$ и $F_-(\varphi)$ для случая движения протонов с $\beta = 0,81$ вдоль оси X_2 кристалла ТГС: а) расчетное распределение $F_+^-(\varphi)$ и $F_-(\varphi)$ для $\lambda = 6500 \text{ \AA}$ и расчетные распределения направления проекций электрических векторов E_+ и E_- на плоскость $X_1O_1X_3$; б) экспериментальное распределение.

X_3



X_3



- 40 -

X_1

a

b

Рис. 34. Результаты опыта по проверке поляризационных свойств излучения Вавилова-Черенкова при движении протонов вдоль оси X_2 кристалла ТГС: а) поляризован ориентирован вдоль оси X_3 (пропускаются волны F_1^+ ; F_2^-); б) поляризован ориентирован вдоль оси X_1 (пропускаются волны F_1^-).

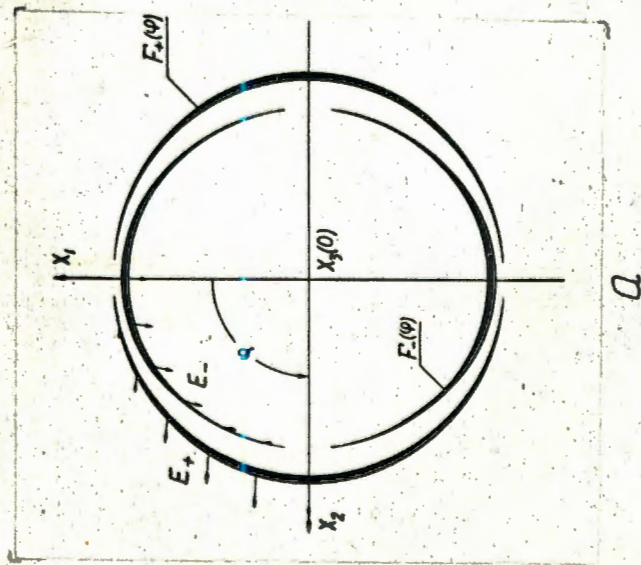
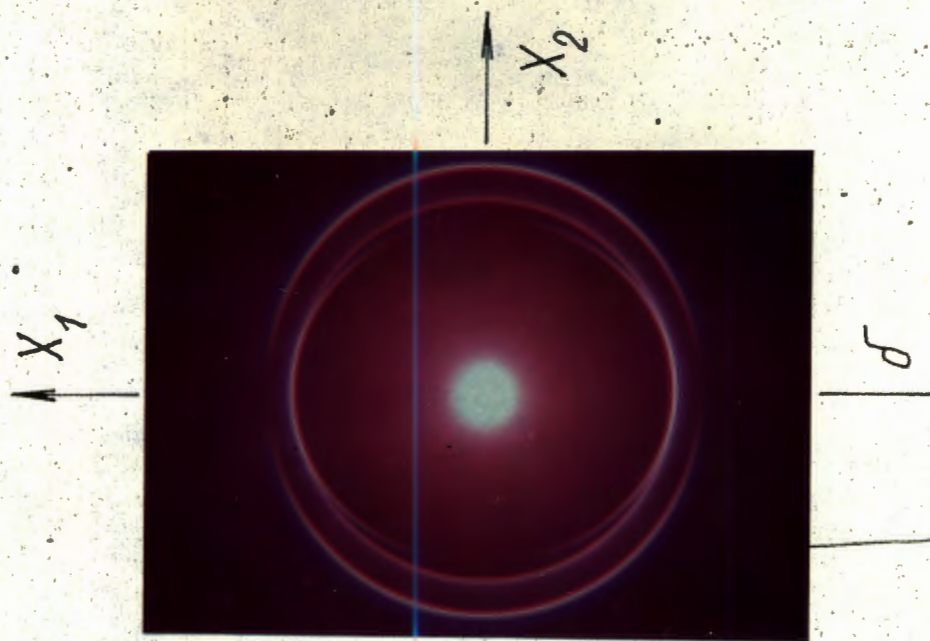
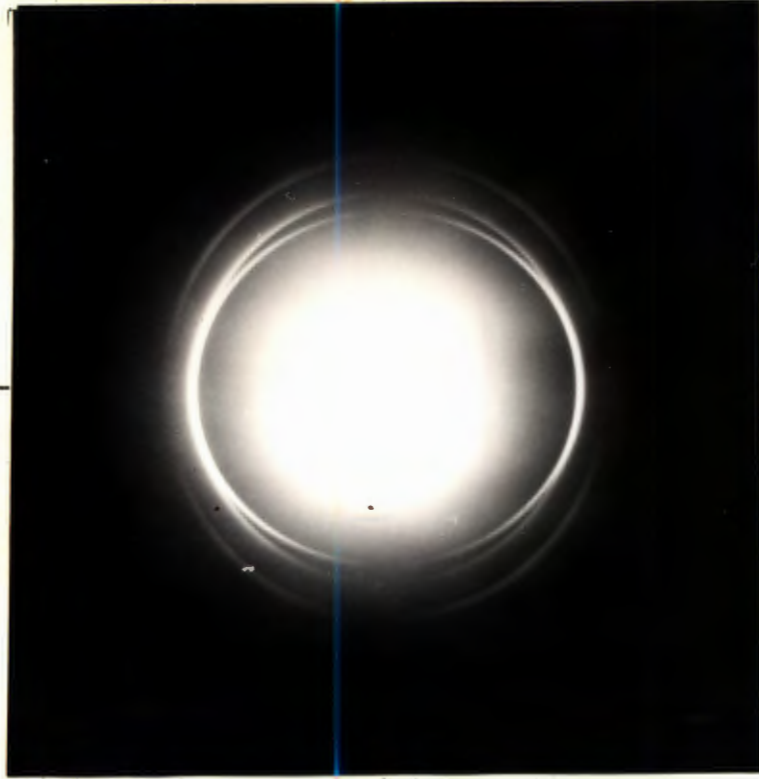


Рис. 35. Расчетные и экспериментальные распределения волн $F_+(\varphi)$ и $F_-(\varphi)$ для случая движения протонов с $\beta = 0,81$ вдоль оси X_3 (большой биссектрисы кристалла ТТС): а) расчетное распределение; б) экспериментальное распределение.

X_1



X_2

X_1



Рис. 36. Фотографии, иллюстрирующие свойства излучения Вавилова-Черенкова, возникающего при движении протонов вдоль оси X_3 кристалла ТТС:
а) поляризован ориентирован F_1^+ так, что пропускаются волны с электрическим вектором вдоль оси X_2 , т.е. волны F_1^+ ;
б) поляризован ориентирован вдоль оси X_1 - пропускаются волны F_1^- .

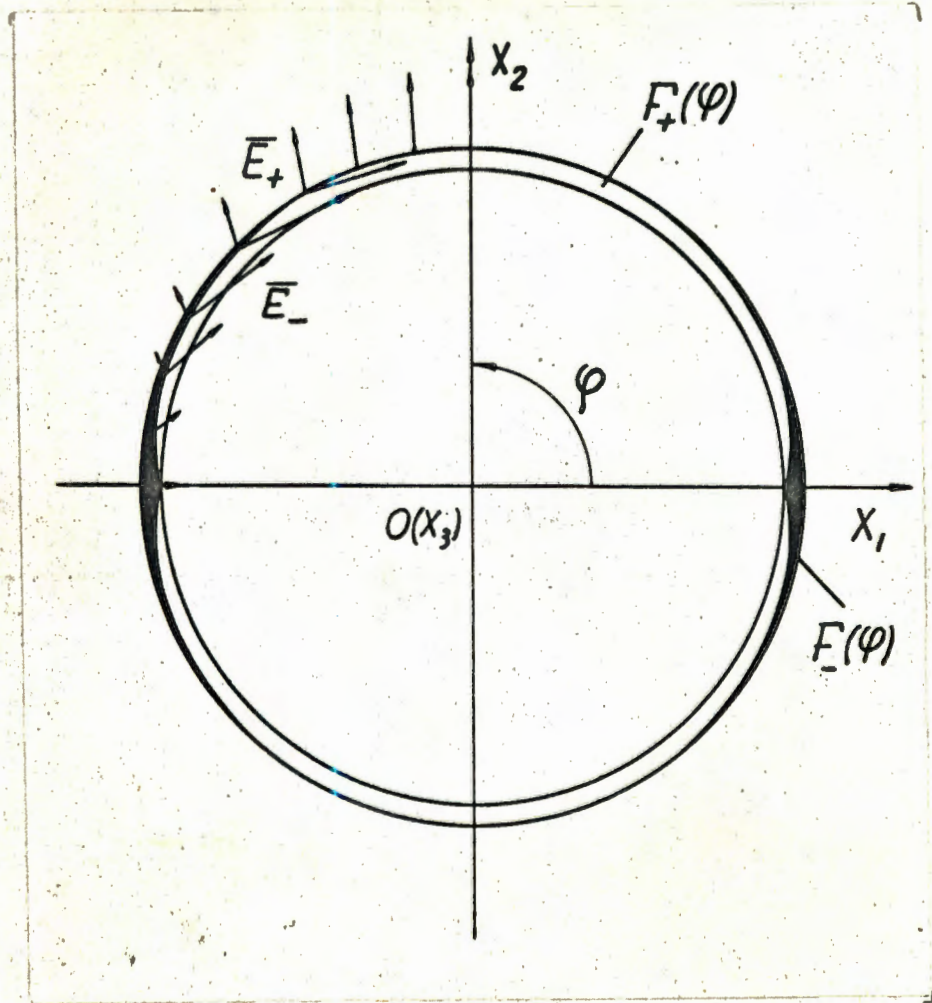


Рис. 37. Теоретическое распределение волн $F_+(\varphi)$ и $F_-(\varphi)$ для случая движения протонов с $\beta = 0,81$ вдоль оси X_3 (малой биссектрисы) кристалла КСС).

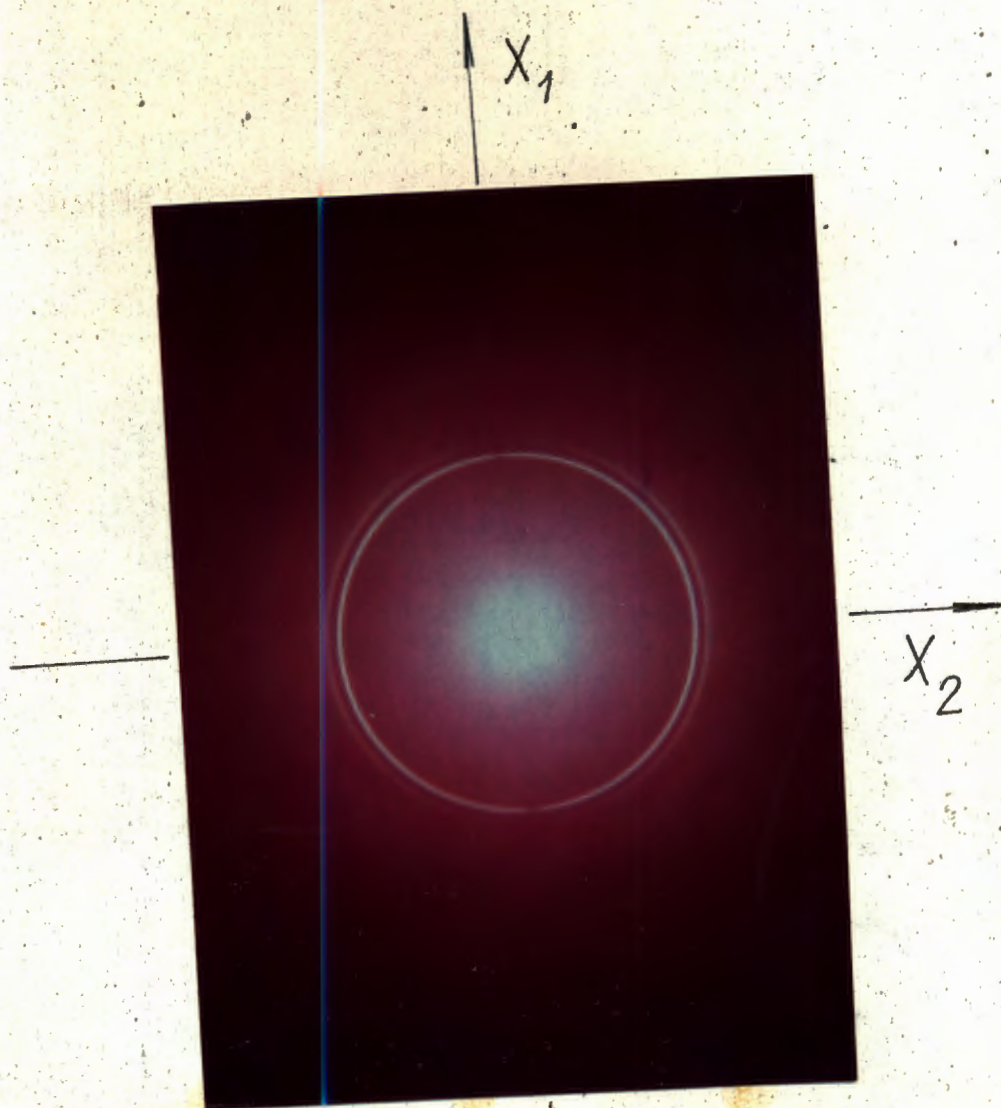


Рис. 38. Фотография излучения Вавилова-Черенкова, возникающего при прохождении протонов 660 МэВ ($\beta = 0,81$) вдоль оси X_3 (малой биссектрисы) кристалла сегнетовой соли и пропущенного через поляризатор, ориентированный вдоль оси X_2 (пропускаются волны π , см. рис. 37). Внутреннее кольцо с "разрезами" - излучение от КСС, а наружные "дуги" - излучение от реперной линзы.

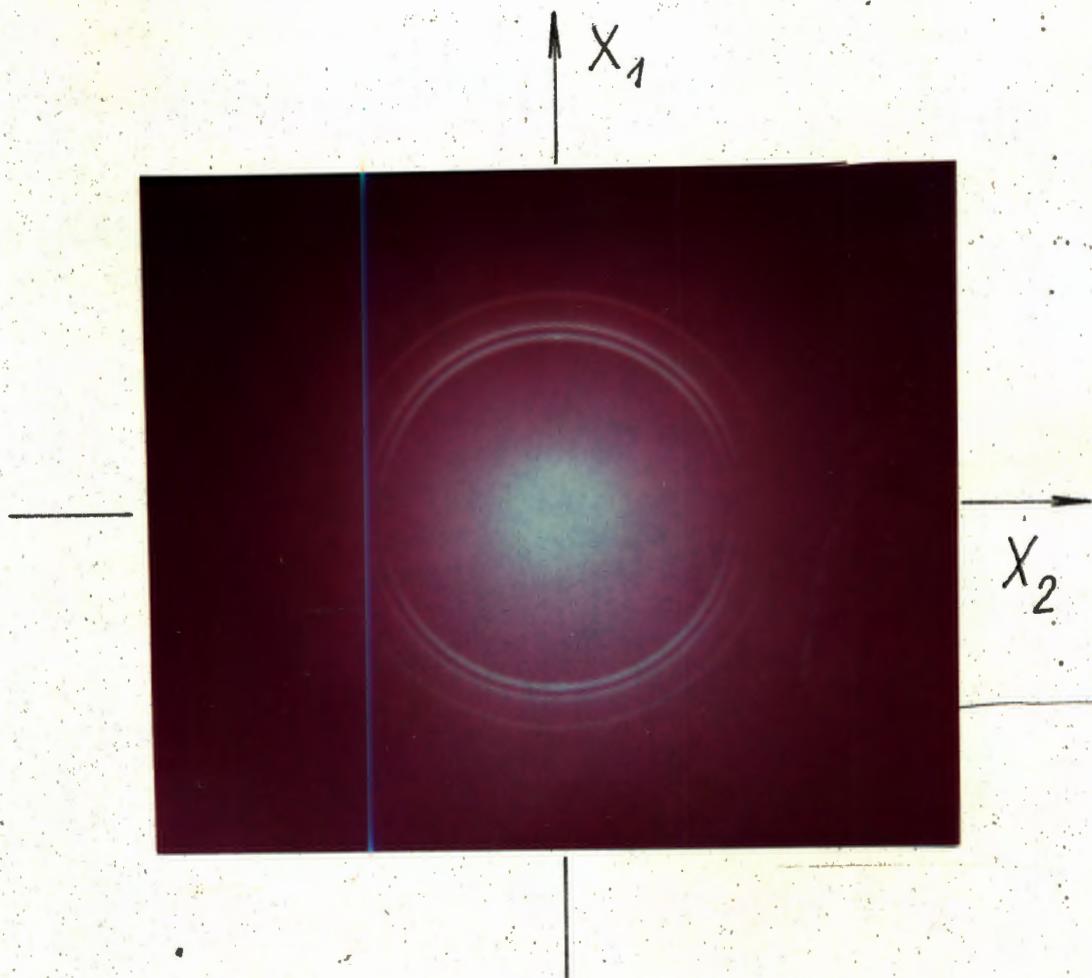


Рис. 39. Фотография "игольчатого" излучения, полученная в тех же условиях, что рис. 38, но поляризатор направлен вдоль оси X_1 (пропускаются волны E_1 с электрическим вектором вдоль плоскости оптических осей КСС).

Внутренние "дуги" со светлыми точками вдоль оси X_1 - излучение от КСС, наружные "дуги" - излучение от реперной линзы. Светлая область в центре - рассеянный пучок протонов.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. П.А.Черенков. "Докл.АН СССР", 2, 451, 1934.
2. С.И.Вавилов. "Докл. АН СССР", 2,457,1934.
3. П.А.Черенков. "Докл.АН СССР", 3, 413, 1936.
4. П.А.Черенков. "Докл.АН СССР", 14, 103, 1937.
5. И.Е.Тамм, И.М.Франк. "Докл. АН СССР, 14, 107, 1937.
6. П.А.Черенков. "Докл.АН СССР", 14, 99, 1937.
П.А.Черенков. "Докл.АН СССР", 20, 653, 1938.
П.А.Черенков. "Докл. АН СССР", 21, 117, 1938.
П.А.Черенков. "Докл. АН СССР", 21, 323, 1938.
П.А.Черенков. "Труды ФУАН СССР", 2, 4, 1944.
7. В.Л. Гинзбург, ЖЭТФ, 1С, 608, 1940.
8. R.L.Mather. Phys.Rev., 84, 181, 1951.
9. В.П.Зрелов. ПТЭ № 3, 10С, 1965.
10. В.П.Зрелов, М.А.Мусин, П.Павлович, П.Шулук, Р.Яник.
Препринт ОИЯИ, Р13-5636, Дубна, 1971.
V.P.Zrelov, M.A.Musin, P.Pavlovic, P.Sulek, R.Janik.
Nucl.Instr. and Meth., 103, 261, 1972.
11. В.П.Зрелов, П.Павлович, П.Шулук. Препринт ОИЯИ, Р13-3488,
Дубна, 1967.
12. В.П.Зрелов, П.Павлович, П.Шулук. Препринт ОИЯИ, Р13-5637,
1971.
V.P.Zrelov, P.Pavlovic, P.Sulek.
Nucl.Instr. and Meth., 105, 109-116, 1972.
13. В.П.Зрелов, П.Павлович, П.Шулук. Препринт ОИЯИ, Р13-5866,
Дубна, 1971.

14. В.П.Зрелов, В.П.Лупильцев, П.Луптак, М.Ф.Шабашов, Р.Яник. Препринт ОИЯИ, Р13-9380, Дубна, 1975 (в печати).
15. V.P.Zrelov. Nucl.Instr. and Meth., 123, 255, 1975.
16. В.П.Зрелов, В.П.Лупильцев, М.Ф.Шабашов. Препринт ОИЯИ, Р13-9202, Дубна, 1975.
17. В.П.Зрелов, Г.Д.Столетов, ЖЭТФ, 36, 658, 1959.
18. В.П.Зрелов, С.П.Круглов, К.Ф.Мус, В.Д.Савельев, П.Шулек. ЯФ, 19, 1276, 1974.
19. В.П.Зрелов, ЖЭТФ, 46, 447, 1964.
20. Ч.Музикарж. ЖЭТФ, 39, 163, 1960.
21. А.Г.Ситенко, А.А.Коломенский. ЖЭТФ, 30, 511, 1956.
22. В.П.Зрелов. "Излучение Вавилова-Черенкова и его применение в физике высоких энергий", ч.1, стр.222-228, Атомиздат, 1968.
23. J.Obdrzalek. Czech.J.Phys., B19, 1556, 1969.
24. В.П.Зрелов, П.Павлович, П.Шулек. Препринт ОИЯИ, Р1-4364, Дубна, 1969.
25. В.П.Зрелов, П.Павлович, П.Шулек. ЖЭТФ, 64, вып.1, 245, 1973.