

P-837



**ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

1,2-93-108

УДК 535.101; 539.107.44

**РУЖИЧКА ЯН**

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ  
И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ  
ЭФФЕКТА ВАВИЛОВА — ЧЕРЕНКОВА**

**Специальность: 01.04.16 — физика атомного ядра  
и элементарных частиц**

**Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук**

**Дубна 1993**

## Общая характеристика работы

Результаты исследований, которые представлены в данной диссертации, получены автором в течение 1969–1993 гг., в рамках программы по изучению излучения Вавилова–Черенкова, осуществляемой в Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований.

### Актуальность темы исследований

В следующем году исполнится 60 лет со дня публикации основополагающих статей П.А.Черенкова<sup>1</sup> и С.И.Вавилова<sup>2</sup> с описанием нового явления, названного теперь их именем — излучения Вавилова–Черенкова (ИВЧ). Созданная Таммом и Франком<sup>3</sup> теория вскоре после открытия этого явления оказалась в полном согласии с экспериментальными данными Черенкова, и дополнительные опыты, им проведенные, подтвердили ее количественную сторону. С тех пор ИВЧ прочно вошло в арсенал средств экспериментальной физики, и, как заметил А.М.Балдин<sup>4</sup> по случаю пятидесятилетия этого открытия, "... на конференциях, в статьях, книгах, имеющих отношение к экспериментам физики высоких энергия, нет другого имени, которое упоминалось более часто, чем имя Черенкова". О той огромной роли, которую сыграло это открытие, можно судить по широко известным в мире монографиям Дж.Джелли<sup>5</sup>, В.П.Зрелова<sup>6</sup> и И.М.Франка<sup>7</sup>, целиком посвященных этому явлению.

В настоящее время принято считать, что ИВЧ хорошо изучено и его теория неоднократно подтверждена в эксперименте. Однако, с течением времени появились и новые вопросы, имеющие отношение к ИВЧ. Например, почему принципиально невозможно разделить два таких различных излучения, как оптическое переходное излучение (ОПИ) и ИВЧ, возникающие одновременно при пролете ча-

<sup>1</sup>Черенков П.А. ДАН СССР, 1934, т.2, с.451.

<sup>2</sup>Вавилов С.И. ДАН СССР, 1934, т.2, с.457.

<sup>3</sup>Тамм И.Е., Франк И.М. ДАН СССР, 1937, т.14, с.107.

<sup>4</sup>Baldin A.M. Proceedings of the Seminar held on the Occasion of the 50<sup>th</sup> Anniversary of the Discovery of Valilov–Cherenkov Radiation, NIM, vol. A248, 1986.

<sup>5</sup>Джелли Дж. Черенковское излучение. М.: Изд-во иностр.лит., 1960.

<sup>6</sup>Зрелов В.П. Излучение Вавилова–Черенкова и его применение в физике высоких энергий М.: Атомиздат, 1968.

<sup>7</sup>Франк И.М. Излучение Вавилова–Черенкова. Вопросы теории. М.: Наука, 1988.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований

### Официальные оппоненты:

доктор физико - математических наук,  
профессор  
доктор физико - математических наук,  
профессор  
доктор физико - математических наук,  
профессор

Б.М.Болотовский

К.А.Гриднев

А.А.Тяпкин

### Ведущее научно-исследовательское учреждение:

Институт физики высоких энергий, г. Серпухов.

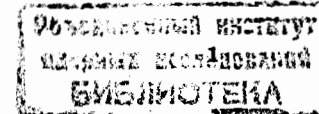
Защита диссертации состоится "\_\_\_\_" \_\_\_\_\_ 1993 года в "\_\_\_\_" часов на заседании Специализированного совета Д-047.01.03 в Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований, г. Дубна, Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан "\_\_\_\_" \_\_\_\_\_ 1992 г.

Ученый секретарь  
Специализированного совета

Ю.А.Батусов



стицы через границу прозрачная среде/вакуум? Или почему вблизи порога ИВЧ экспериментальные данные согласуются с теорией Тамма<sup>8</sup> и не согласуются с классической теорией Тамма-Франка<sup>3</sup>?

Автор свыше двадцати лет занимался изучением ОПИ и ИВЧ как в теоретическом, так и в экспериментальном плане. В работе изложены результаты, полученные им за это время. Они представляют интерес, и весьма актуальны, как для дальнейшего развития теории явления, так и с точки зрения эксперимента.

### Цель работы

1. Проведение детального анализа свойств оптического переходного излучения (ОПИ), оптического тормозного излучения (ОТИ) и излучения Вавилова-Черенкова (ИВЧ).

2. Исследование причин глубокой взаимосвязи ИВЧ с ОПИ и с ОТИ.

3. Проведение фотографическим способом систематического изучения свойств ИВЧ, возникающего в прозрачных средах в различном агрегатном состоянии: в твердых изотропных и анизотропных диэлектриках, в жидкостях, в кремниевых аэрогелях, в газах.

4. Изучение фотоспособом излучения, испускаемого заряженными частицами вблизи порога ИВЧ, в пороге и ниже него.

### Научная новизна

1. Впервые проведен детальный анализ свойств ОПИ и ИВЧ, предсказываемых теорией, в случаях когда оба излучения действуют совместно. Выявлены неизвестные ранее свойства этих излучений, такие как: интерференционные эффекты в ОПИ, возникающие вблизи порога ИВЧ; гибридное излучение; сходство характеристик ОПИ и излучения, возникающего при движении частицы с постоянной скоростью в среде по ограниченной траектории (задача Тамма).

2. Впервые проведен детальный анализ формулы Тамма для случаев движения частицы в вакууме и в прозрачной среде. Впервые показано, что все излучение, описанное формулой Тамма, может быть интерпретировано как результат интерференции двух мгновенных тормозных излучений, введенных при постановке задачи.

3. Впервые показано, что полная формула для интенсивности

ОТИ (формула Газазяна и др.) может быть представлена как результат интерференции двух излучений разных амплитуд, каждое из которых описано своей формулой Тамма, или как результат интерференции четырех мгновенных тормозных излучений.

4. Впервые показано, что формула для интенсивности ОПИ, возникающего на двух границах раздела (формула Пафомова) может быть представлена как результат интерференции двух ОПИ, возникающих на отдельных границах, или как результат интерференции четырех мгновенных тормозных излучений. Установлено, что в случае, когда двумя мгновенными тормозными излучениями можно пренебречь, интерференция ОПИ приводит к формуле Тамма. Этим впервые дано объяснение сходству характеристик излучения описанного формулой Тамма и ОПИ, наблюдаемом ниже порога возникновения ИВЧ.

5. Впервые предложен единый подход, в котором ИВЧ, ОТИ, ОПИ и излучение, возникающее при произвольном движении заряда в среде, рассматриваются как результат интерференции мгновенных тормозных излучений. Показано, что при таком подходе черенковский характер, приобретаемый этими излучениями при  $\beta n > 1$ , не связан с постоянной скоростью частицы: она влияет лишь на фазу интерферирующих излучений.

6. Фотографическим способом впервые проведено систематическое исследование эффекта Вавилова-Черенкова во всех видах применяемых на практике радиаторов, таких как: твердотельные диэлектрики, жидкости, кремниевые аэрогели, газы. Впервые проведена проверка одного из основных выводов теории Тамма-Франка — соотношения направленности ( $\cos\theta = 1/\beta n$ ) во всем диапазоне, достигаемых обычно в эксперименте, углов ИВЧ (от  $\theta_{ch} \approx 50^\circ$ , вплоть до порога). Направленность ИВЧ исследована в зависимости от показателя  $n$ , в диапазоне  $9 \cdot 10^{-7} < (n-1) < 6 \cdot 10^{-1}$  и в зависимости от скорости  $\beta$ , в диапазоне  $5 \cdot 10^{-7} < (1-\beta) < 3 \cdot 10^{-1}$  (6 порядков!).

7. Впервые получены изображения ИВЧ, возникающего в кремниевых аэрогелях с показателем преломления от  $n = 1,025$  до  $n = 1,15$ . Исследован спектр, поляризация и направленность ИВЧ в этих новых радиаторах. Впервые сфотографировано излучение Вавилова-Черенкова, испускаемое легкими релятивистскими ядрами  ${}^6_{12}C$  и тяжелыми ионами  ${}^{197}_{79}Au$  в различных радиаторах.

<sup>8</sup>Tamm Ig.E. J.Phys.USSR. 1939, 1, p.439.

8. Впервые получены изображения ИВЧ, испускаемого ультрарелятивистскими электронами в различных газах, таких как: He, Ag, Kr, Xe,  $CO_2$  и воздух, при нормальном давлении. При пониженном давлении воздуха и He проведено исследование изменений кольца ИВЧ вплоть до его превращения в точку вблизи порога. Получены снимки (в том числе и цветные) излучения, предсказанного теорией Тамма в пороге возникновения ИВЧ и ниже него.

### Научная и практическая ценность

Еще в работе<sup>9</sup>, заглавленной "О возможной причине синего  $\gamma$ -свечения жидкостей", С.И.Вавилов отметил: "Наиболее вероятной причиной  $\gamma$ -свечения мы считаем излучение при торможении комптоновских электронов". В диссертации анализируются известные нам теории именно с этой точки зрения. В работе предложен единый подход, в котором ИВЧ, ОПИ, ОТИ рассматриваются как многократная интерференция мгновенных тормозных излучений. Предложенный нами подход (включающий всегда начало и конец траектории частицы) позволяет проводить расчеты угловых распределений интенсивности излучений, возникающих не только в вакууме, но и в прозрачной среде, при движении частицы с любой скоростью (в том числе и выше порога ИВЧ).

В работе почти не содержится методических исследований. Примененный для исследований простой фотографический способ используется для изучения ИВЧ уже давно. Однако, нами впервые проведены систематические исследования ИВЧ во всех видах радиаторов, используемых обычно на практике. Накопленный экспериментальный материал использован в основном для проверки условия направленности ИВЧ ( $\cos \theta_0 = 1/\beta n$ ). Угол испускания ИВЧ впервые исследован в зависимости от показателя преломления  $n$  во всем диапазоне возможных его значений от предельных  $\theta_0 \approx 50^\circ$  (при  $\beta \rightarrow 1$ ) до порога (при  $\beta n = 1$ ).

Информация, содержащаяся на полученных фотографиях ИВЧ ценна еще и потому, что большинство из них получено нами впервые.

Впервые наблюдалось ИВЧ, возникающее в кристалле ТГС, при прохождении частиц вдоль оптической оси (бинормали), с необычным — асимметричным угловым распределением интенсивности.

Впервые получены изображения ИВЧ в инфракрасной области спектра и предложен способ регистрации ИВЧ с помощью ПЗС-линейки, с максимумом чувствительности именно в этой области спектра.

Впервые сфотографировано ИВЧ, испускаемое легкими и тяжелыми ионами ( $^{12}C, ^{197}Au$ ), что открывает новые возможности для изучения этого эффекта на пучках релятивистских ядер.

Впервые были получены изображения ИВЧ, возникающего в кремниевых аэрогелях, и показана возможность создания не только пороговых, но и дифференциальных черенковских счетчиков с такими радиаторами. Освоена технология изготовления кремниевых аэрогелей, в широком диапазоне показателей преломления ( $n = 1,05 \div 1,15$ ). Предложен способ изготовления сцинтиллятора низкой плотности на основе кремниевого аэрогеля с сцинтиллирующей добавкой — ПОПОП.

На основе опытов с металлами предложен способ визуального наблюдения излучения, испускаемого электронами при пересечении границы металл—стекло, с помощью цветного телевизора "Рубин" и специально созданной телевизионной трубки. Возможность наблюдения излучения невооруженным глазом позволяет внедрить демонстрации опытов с электронами в программы обучения студентов физических факультетов ВУЗ-ов.

### Апробация работы и публикации по теме диссертации

Результаты, изложенные в данной диссертации, были представлены на II Международном симпозиуме по переходному излучению частиц высших энергий (г. Ереван, 1983 г.); на 8 Конференции чехословацких физиков (г. Братислава, 1985 г.); на Симпозиуме по физике детекторов для DAFNE (г. Frascati, 1991 г.); на симпозиуме по JINR C-7 фабрике (г. Дубна, 1991 г.).

Помимо этого, результаты исследований докладывались в Университете им. Коменского и Институте физики САН, г. Братислава (Словакия), на Международном совещании по физике тяжелых ионов, ГСИ Дармштадт — ЛЯР Дубна, в ИЯФ РАН, г. Новосибирск.

<sup>9</sup>С.И.Вавилов. ДАН СССР, 1934, т.2, с.457.

По теме диссертации издано 31 работа в виде публикаций в зарубежных журналах, в материалах симпозиумов, в препринтах ОИЯИ. Список работ, включенных в диссертацию, представлен в конце автореферата.

### Структура и объем диссертации

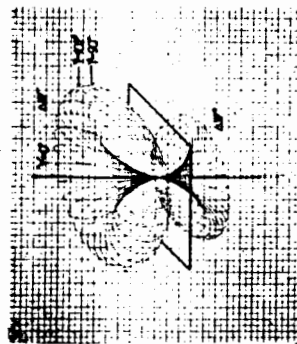
Диссертация изложена в двух частях и состоит из: введения, восьми глав и заключения общим объемом 228 страниц; 84 рисунков и 67 фотографий с изображениями ИВЧ (в том числе 19 цветных); 22 таблиц и 9 списков литературы (включенных после введения и каждой главы), содержащих в целом 144 названия.

### Содержание диссертации

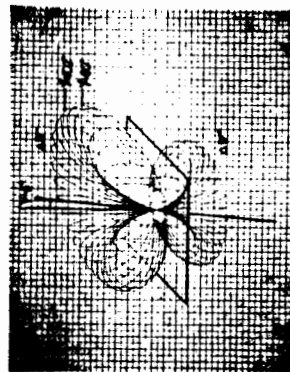
В первой части диссертации представлены результаты цикла расчетно-теоретических работ, посвященных свойствам ОПИ, ИВЧ, ОТИ и оптическому излучению, возникающему при произвольном движении заряда в среде. Многие характеристики этих излучений известны уже давно, однако детальный анализ позволил выявить дополнительные, неизвестные ранее их свойства, а также глубокую взаимосвязь между ними.

В частности, как приведено в первой главе, выявлены характерные угловые распределения ОПИ “вперед” и “назад”, возникающего при перпендикулярном и наклонном падении частиц на границу раздела сред с различными диэлектрическими свойствами. Угловые распределения интенсивности ОПИ представлены нами в трехмерных изображениях, позволяющих наглядно проследить их пространственные изменения в зависимости от угла падения частицы  $\psi$  на поверхность раздела сред, см. рис.1.

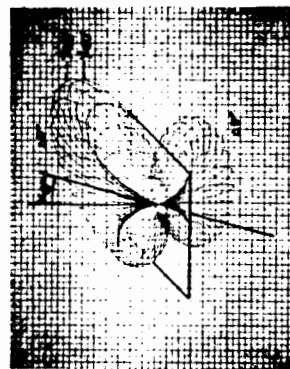
Показано, что угловое распределение ОПИ “вперед”, испускаемого на границе металл/вакуум, при высоких  $\gamma$  вытягивается в узкий конус с раствором  $\theta \cong 2/\gamma$  вдоль направления скорости частицы, а ОПИ “назад” сосредоточивается в узкий конус с осью, являющейся зеркальным отражением  $\vec{\beta}$  в плоскости раздела сред. Это свойство ОПИ позволило нам определить простое правило для отыскания направления ОПИ, испущенного “назад”: при влете частицы в среду под углом  $\psi$  считать, что излучение “идет” по на-



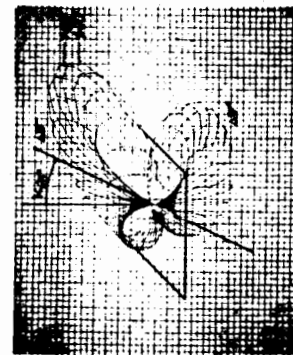
а)



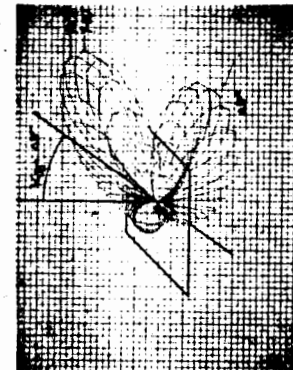
б)



в)



г)



д)

Рис.1. Угловые распределения фотонов ОПИ испущенных “вперед”  $W^-$  и “назад”  $W^+$ , при падении на плоскую пластинку никеля протонов с энергией 660 МэВ под углом: а)  $\psi = 0^\circ$ ; б)  $\psi = 5^\circ$ ; в)  $\psi = 15^\circ$ ; г)  $\psi = 25^\circ$ ; д)  $\psi = 35^\circ$

правлению скорости частицы и отражается от поверхности как от зеркала. Такое правило позволяет избежать ошибок при постановке эксперимента с ОПИ и помогает при анализе полученных данных. Им уже пользуются на практике.

Выявлено, что переходное излучение при высоких  $\gamma$  состоит как бы из двух частей: первая — узконаправленная, с интенсивностью  $\sim \ln \gamma$ , вторая — с широким угловым распределением и интенсивностью, почти не зависящей от  $\gamma$ .

При анализе общих формул ОПИ, возникающего при пролете частиц через плоскую границу раздела сред с отличными от нуля диэлектрическими проницаемостями (никель/кварц), установлено, что это излучение обладает свойствами как переходного, так и излучения Вавилова-Черенкова, т.е. является смешанным — гибридным. Гибридное излучение, как и ИВЧ, носит пороговый характер и возникает при скоростях, превышающих пороговую скорость  $\beta = \frac{\sqrt{|\text{Re } \epsilon|}}{|\epsilon|}$ . В то же время оно, как и переходное излучение, имеет широкое угловое распределение. Указать вклад каждого излучения в отдельности не представляется возможным, см. рис.2.

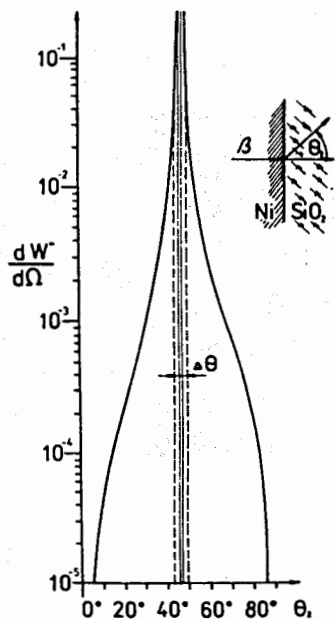


Рис.2. Суммарное угловое распределение квантов гибридного излучения “вперед” (проинтегрированное по длинам волн от  $\lambda_1 = 254$  нм до  $\lambda_2 = 700$  нм), испускаемое частицей с  $\gamma = 27,5$  при пересечении границы никель-кварц под углом  $\psi = 0^\circ$ . (Тонкие сплошные линии при  $\theta_1 = 46^\circ 34'$  и  $\theta_2 = 48^\circ 27'$  соответствуют положению черенковского конуса в указанном диапазоне длин волн)

Особый интерес представляют исследования ОПИ, возникающего на полубесконечной границе вакуум-прозрачный диэлектрик. Впервые выявлен необычный вид углового распределения ОПИ в узкой области энергий вблизи порога возникновения ИВЧ (распределение с минимумом), свидетельствующий об интерференционных эффектах. Интерференционный минимум проявляется также и в ходе полной интенсивности ОПИ от энергии частиц — полная интенсивность не растет как  $\sim \ln \gamma$ , а наоборот, уменьшается с увеличением  $\gamma$ , см. рис.3.

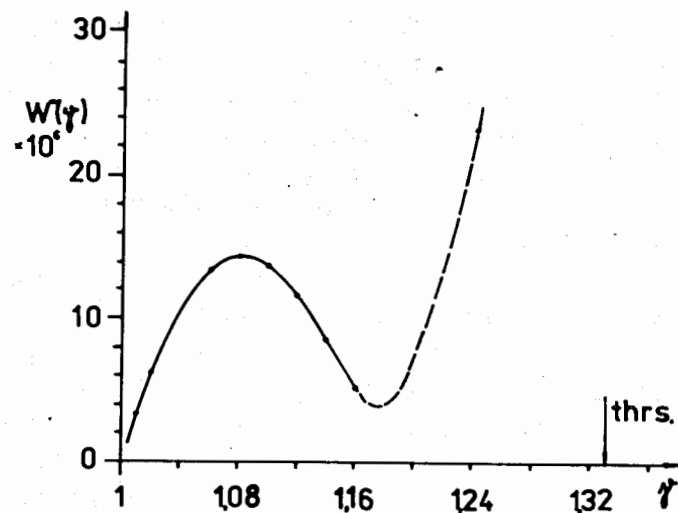


Рис.3. Зависимость от  $\gamma$  полной интенсивности ОПИ испущенного “вперед” (т.е. в вакуум) на границе кварц-вакуум в допороговой области энергий частицы

Подробно рассмотрены свойства ОПИ, возникающего в поглощающей среде, такие как его направленность, пороговое условие, поляризация. Обращено внимание на существенный вклад ИВЧ, возникающего в металлах, в экспериментах по оптическому пере-

ходному излучению. На основании эффекта Вавилова-Черенкова дается объяснение аномалии в спектре ОПИ в случае скользящего падения частиц на поверхность серебра.

При анализе свойств излучения, возникающего при скользящем пролете частицы через серебряную пластинку конечной толщины (формула Пафомова<sup>10</sup>), впервые были выявлены необычные для ОПИ угловые распределения (с интерференционными максимумами и минимумами), сходные с угловыми распределениями интенсивности ИВЧ, возникающего на ограниченной траектории частицы (формула Тамма<sup>11</sup>).

Было показано, что формула Тамма позволяет проследить за плавным переходом от характеристик чисто переходного излучения (ниже порога ИВЧ) к характеристикам чисто черенковского излучения (далеко над порогом). В районе порога возникновения ИВЧ формула плавно переводит полную интенсивность ОПИ в полную интенсивность ИВЧ, спектр фотонов ОПИ ( $\sim 1/\lambda$ ) — в спектр фотонов ИВЧ ( $\sim 1/\lambda^2$ ) полную независимость интенсивности ОПИ от длины радиатора — в линейную зависимость интенсивности ИВЧ от  $l$ . Проведенные расчеты показали, что ОПИ в случае, когда возникает и ИВЧ, принципиально неотделимо от последнего.

Однако, кроме выявления новых сведений о свойствах ОПИ и ИВЧ, приведенных выше, возник и ряд новых вопросов, на которые не было ответа. Например:

1. Почему угловое распределение ОПИ, испускаемого ультрарелятивистскими частицами, состоит как бы из двух частей с совершенно различными характеристиками — из остронаправленного максимума и из “пьедестала”?

2. Почему интерференционные эффекты в ОПИ, проявляющиеся вблизи порога возникновения ИВЧ, наблюдаются и при существенно допороговых скоростях?

3. Угловые распределения ИВЧ, рассчитанные по формуле Тамма, имеют интерференционный характер, как и угловые распределения ОПИ при наличии двух границ, рассчитанные по формуле Пафомова. Но если в последнем случае их можно интерпретировать

<sup>10</sup>Пафомов В.Е. Труды ФИАН СССР. Ядерная физика и взаимодействие частиц с веществом, М.: Наука, 1969, с.63.

<sup>11</sup>Tamm I. — J.Phys., 1939, 1, p.439.

как интерференцию двух ОПИ, возникающих на первой и на второй границах, то интерференцию каких излучений мы наблюдаем в угловых распределениях ИВЧ, когда формула Тамма выведена для движения частицы в бесконечной среде (т.е. при отсутствии границ)?<sup>12</sup>

Ответы на эти и другие вопросы найдены в наших работах, изложенных в главах 2, 3, 4 и 5.

Формула Тамма впервые была нами представлена в удобной для расчетов и для ее анализа форме:

$$\frac{d^2 N_{\text{Тамм}}}{d\Omega d\lambda} = -\frac{\alpha n l^2}{\lambda^3} \left( \frac{\text{Sin } X}{X} \right)^2 \text{Sin}^2 \theta,$$

где  $X = \frac{\pi l}{\beta \lambda} (1 - \beta n \text{Cos } \theta)$ . Было показано, что наличие максимумов и минимумов в угловых распределениях является следствием интерференционного множителя  $(\text{Sin } X/X)^2$ . При  $X \rightarrow 0$  имеется главный интерференционный максимум, центр которого находится на черенковском угле  $\text{Cos } \theta_{ch} = 1/\beta n$ . При  $k\pi < X < (k+1)\pi$ , где  $k$  — целое число, имеются интерференционные максимумы высшего ( $k$ -го) порядка. Таким образом, интенсивность излучения, наблюдаемого в направлении угла  $\theta$ , выражается всего лишь через один параметр  $X$ , являющийся функцией  $l, \beta, \lambda, n$  и  $\theta$ . Каждому максимуму в угловом распределении излучения можно, таким образом, присвоить номер, соответствующий его порядку  $k$ , см. рис.4. Такая “оцифровка” угловых распределений излучения существенно помогает при их анализе. ИВЧ, возникающее в совершенно различных условиях, будет иметь одинаковые свойства, если при этом величины  $X$  совпадают. Например, излучение, испускаемое  $\pi$ -мезонами с импульсом в десятки ГэВ/с в газовом черенковском счетчике длиной несколько метров, будет иметь угловое распределение, сходное с распределением, испускаемого электронами с энергией в сотни кэВ в твердотельном радиаторе толщиной несколько  $\lambda$ , — если  $X$  одинаковые.

Детальные расчеты, проведенные по формуле Тамма, показали:

1. излучение для одной длины волны  $\lambda$  возникает на всех углах  $\theta$  (в отличие от ИВЧ по теории Тамма-Франка, по которой оно испускается лишь в направлении угла  $\text{Cos } \theta_{ch} = 1/\beta n$ );

<sup>12</sup>На это обратил наше внимание А.П.Кобзев.

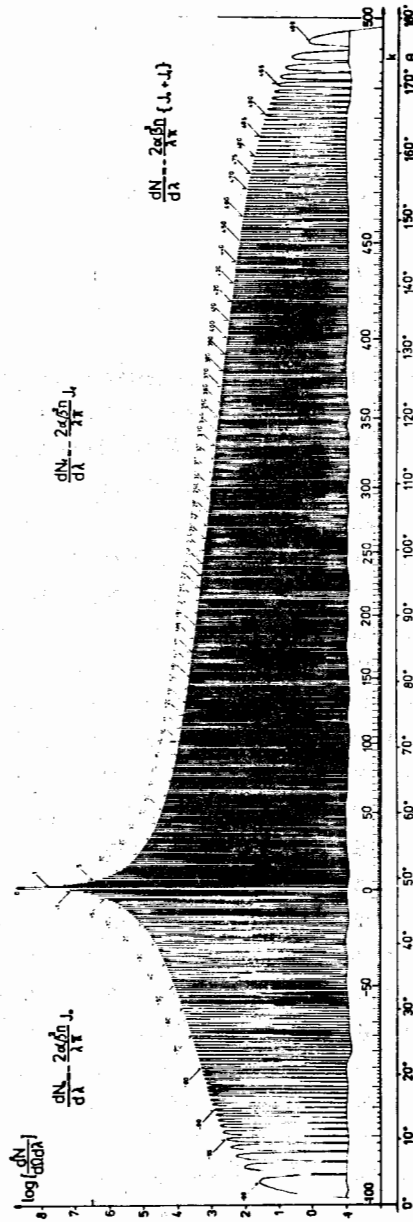


Рис. 4. Результат расчета углового распределения излучения по точной формуле Тамма (2.2) для параметров, удовлетворяющих условиям Тамма (2.31) и (2.32). Длина волны излучения  $\lambda = 400$  нм, скорость заряда  $\beta = 0,9999866\dots$ , коэффициент преломления среды  $n = 1,5$ , длина пути  $l = 200\lambda$ . Вертикальной линией при  $k = 100$  обозначено разделение Таммом функции углового распределения на две части. Интегрированием первой части по всем углам и делением результата на длину пути  $l$  Тамм получил основную формулу ИВЧ Тамма-Франка (2.33)

2. излучение испускается как в направлении движения частицы (“вперед”), так и в обратном направлении (“назад”);
3. излучение существует в пороге ИВЧ и ниже него;
4. излучение возникает и при движении частицы в вакууме (т.е. при  $n = 1$ )!

В главе 2 раскрыт физический смысл величины  $X$  и найдена причина существования интерференционных максимумов и минимумов в угловых распределениях излучения, описанных формулой Тамма.

Впервые показано, что формулу Тамма можно интерпретировать как результат интерференции двух мгновенных тормозных излучений, введенных в постановке задачи, — излучения, испущенного частицей при ее мгновенном старте, и излучения, возникающего при ее мгновенной остановке. Величина  $X$  представляет разность фаз обоих интерферирующих мгновенных тормозных излучений.

Новый подход был привлечен и к описанию эффекта ИВЧ, вытекающего из теории Тамма. Было показано, что постоянная скорость частицы  $v$  влияет лишь на фазу  $X$  и не является причиной возникновения излучения, следующего из теории Тамма.

В главе 3 интерференция мгновенных тормозных излучений привлекается к описанию оптического тормозного излучения, возникающего при мгновенном изменении скорости частицы, двигающейся в прозрачной среде (задача Газазяна и др.<sup>13</sup>). Показано, что формула для ОТИ, полученная Газазяном и др., представляет собой результат интерференции двух излучений различных амплитуд (возникающих до скачка в скорости и после него), причем каждое из них может быть описано соответствующей формулой Тамма, см. рис. 5 и 6. И поскольку саму формулу Тамма можно описать как интерференцию двух мгновенных тормозных излучений, полная формула для ОТИ представляет собой результат интерференции четырех мгновенных тормозных излучений.

Показано, что черенковские свойства, которые ОТИ приобретает при  $\beta n > 1$ , не связаны с постоянной скоростью частицы. Все свойства ОТИ, в том числе и его черенковский характер, объясняются через интерференцию мгновенных тормозных излучений, возникающих при ускорениях частицы, введенных при постановке задачи.

<sup>13</sup>Газазян А.Д. и др. — Изв. АН Арм.ССР, 1963, XVI, 2, с.69.



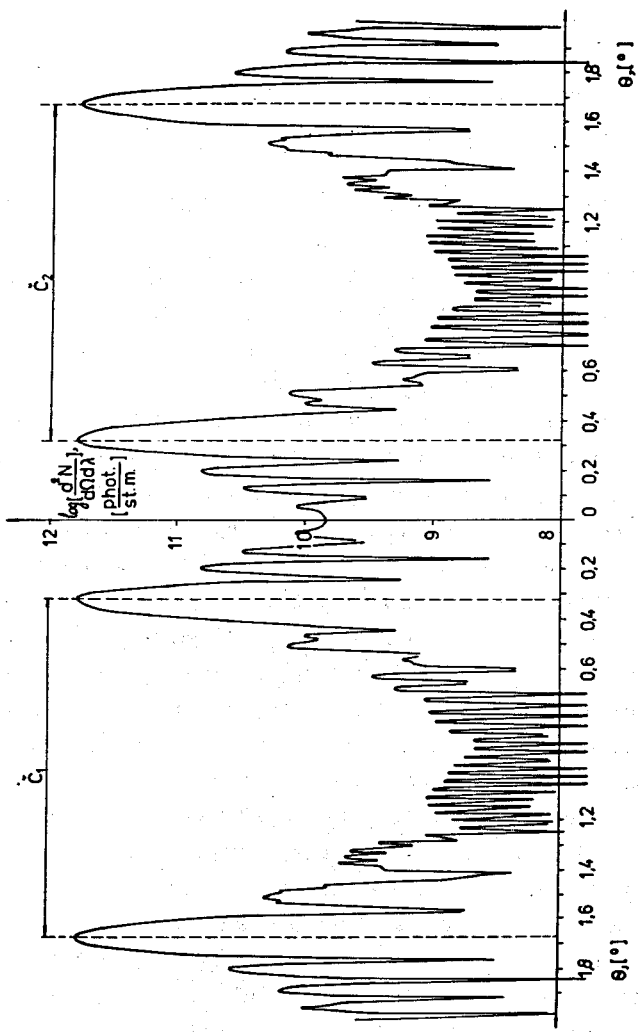


Рис.5. Угловое распределение интенсивности излучения, возникающего при мгновенном изменении направления движения частицы:  $\beta = 0,999994475$ ,  $n = 1,0000062$ ,  $l/\lambda = 5 \cdot 10^6$ ,  $\lambda = 400$  нм,  $\Delta\theta = 1^\circ$ ,  $\Delta\theta > \theta_{\zeta}$ , где  $\theta_{\zeta} = \arccos(1/\beta n)$  (конусы ИВЧ не пересекаются)

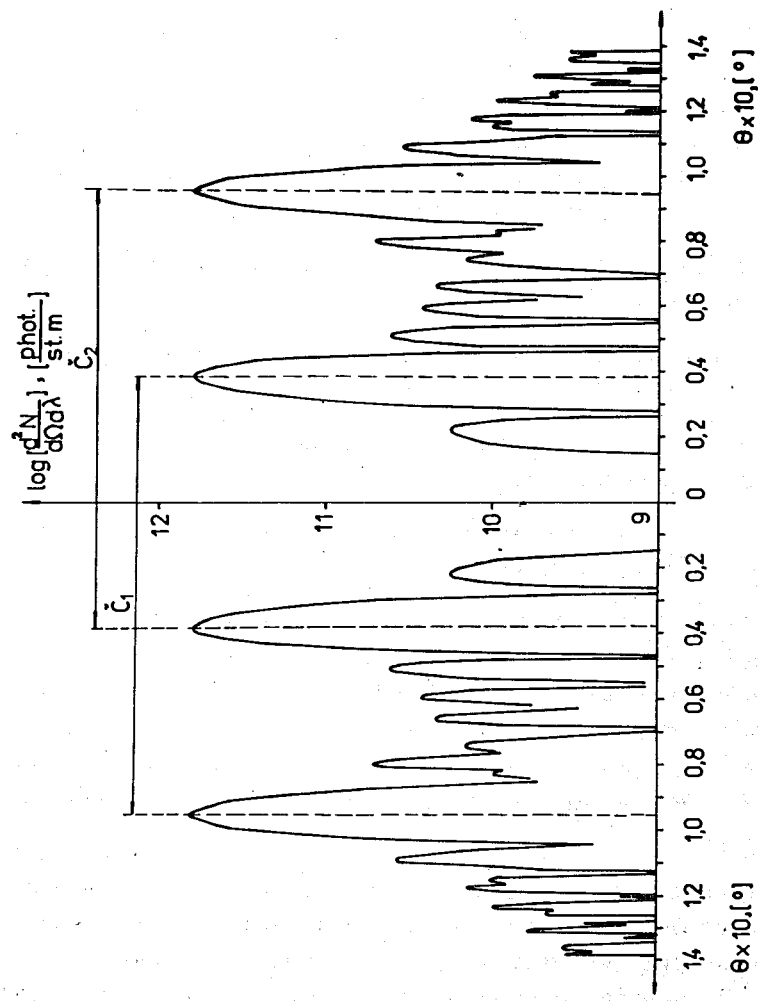


Рис.6. То же, что и на рис.5, но для  $\Delta\theta = 2,87 \cdot 10^{-2}$  (конусы ИВЧ пересекаются)

В главе 4 с помощью интерференции мгновенных тормозных излучений интерпретируются формулы для ОПИ, испускаемых на одной и на двух границах раздела сред. Раскрыта причина сходства угловых распределений ОПИ и ИВЧ ниже порога последнего. Показано, что излучение, возникающее в случае наличия двух границ раздела, можно интерпретировать как интерференцию двух ОПИ или четырех следующих мгновенных тормозных излучений:

1. излучения от мгновенной остановки частицы на первой границе в первой среде;
2. излучения от мгновенного старта частицы на первой границе, но во второй среде;
3. излучения от мгновенной остановки частицы на второй границе в той же второй среде;
4. излучения от мгновенного старта частицы на второй границе, в последней — третьей среде.

Когда излучениями, возникающими при мгновенной остановке частицы в первой среде и при ее мгновенном старте в третьей среде, можно пренебречь (например, в случае границ металл/прозрачная среда и прозрачная среда/металл), оба оставшихся тормозных излучения, возникающие при старте и остановке частицы в той же прозрачной среде, вследствие интерференции приводят к формуле Тамма, см. рис.7.

В главе 5 приведено обобщение излагаемого выше подхода на случай произвольного движения частицы в прозрачной среде. Показано, что формулу для углового распределения интенсивности излучения в этом случае можно представить как результат интерференции многих излучений, каждое из которых может быть описано своей формулой Тамма, или же как многократную интерференцию в два раза большего числа мгновенных тормозных излучений (см. рис.8 — частный случай двукратного рассеяния частицы).

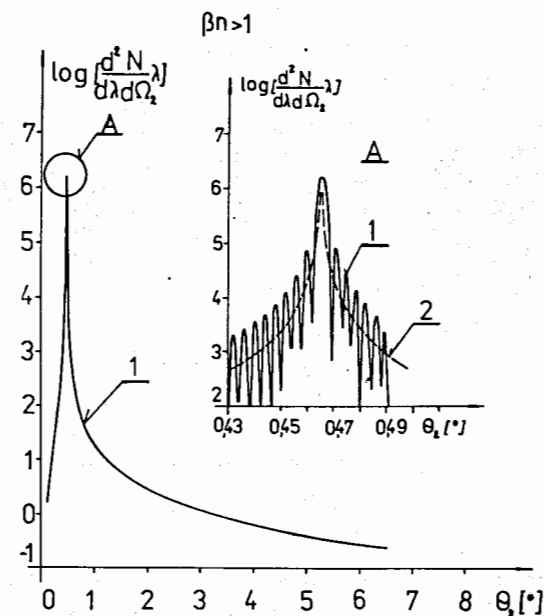


Рис.7. Расчет углового распределения ИВЧ, возникающего при пролете через газовый радиатор (He) длиной 1,1м электрона с энергией 350 МэВ ( $\beta = 0.9999989373$ ;  $n_{He} = 1.000034019$ ;  $\lambda = 589.3$  нм): 1 — сглаженная кривая (по вершинам максимумов в угловом распределении, рассчитанном по формуле Тамма, см. вид A); 2 — угловое распределение ОПИ<sup>-</sup> для границы Al/He ( $\epsilon_{Al} = 1 + ib$ ;  $a = -26,2288$ ;  $b = -15,3216$ )

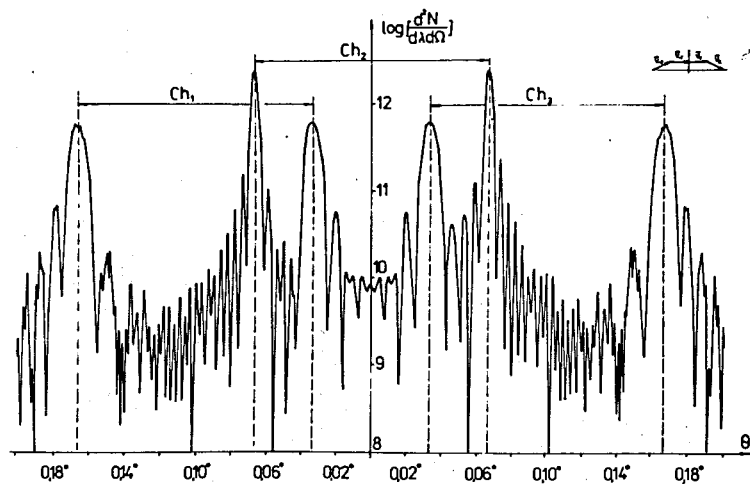


Рис.8. Угловое распределение результирующего излучения в случае, когда между мгновенным стартом и остановкой частица испытывает двукратное рассеяние

Изложенный новый подход (включающий всегда начало и конец траектории частицы) позволяет проводить расчеты угловых распределений интенсивности излучения при любых скоростях частицы, в том числе и выше порога возникновения ИВЧ. Аналогично, как в формуле Тамма, формула для углового распределения интенсивности излучения является функцией лишь фаз  $X_i$ , содержащих все остальные параметры задачи ( $\beta, n, \lambda, \theta$ ). Такой подход существенно упрощает анализ и решения конкретных задач. Примеры нескольких из них приведены в главе 5.

Все экспериментальные исследования, результаты которых приведены во второй части работы в главах 6,7 и 8, проводились нами простым фотографическим способом. Такой способ, впервые примененный для этих целей еще П.А.Черенковым, имеет и ряд недостатков. Прежде всего это низкая чувствительность пленок по сравнению с электронными методами (ФЭУ), не позволяющая пока проводить опыты с отдельными частицами. Необходимость смены пленки после каждой экспозиции (вызванная ее чувствительностью

к радиоактивному фону) сильно усложняет режим работы ускорителя (необходимы его частые остановки). Сложная и длительная обработка пленок исключает возможность работы в "on-line" режиме. Однако, наряду с этим, имеется и целый ряд преимуществ фотографического метода по сравнению с электронным. Только по одному кадру с изображением ИВЧ уже можно получить достаточно полное представление о его угловом распределении, что особенно важно, например, в случае анизотропных сред, см. рис.9. При съемке на цветную пленку можно получить одновременно и информацию о спектре ИВЧ. При малом угловом и импульсном разбросе пучка можно разрешить даже отдельные максимумы спектральной чувствительности пленки в красном, зеленом и синем цветах. Используя поляризационный фильтр, можно исследовать поляризацию излучения. широкий ассортимент фотоматериалов позволяет вести исследования от мягкого рентгеновского диапазона до близкой инфракрасной области спектра и др.

В главе 6 приведено краткое описание аппаратуры, применяемой для съемки ИВЧ, и способов обмера полученных снимков. Диаметр колец ИВЧ, изображенных на снимках, прямо связан с углом испускания излучения  $\theta_{ch}$ . Это позволяет, через калибровку черенковской камеры, проводить проверку соотношения направленности ИВЧ,  $\text{Cos } \theta_{ch} = 1/\beta n$ . Такие измерения были нами проведены для твердых и жидких радиаторов, в зависимости от их показателя преломления  $n$  и от скорости  $\beta$ , в широком интервале углов испускания ИВЧ — от предельного  $\theta_{ch} \approx 50^\circ$  (для твердых радиаторов) до  $\theta_{ch} \approx 20^\circ$  (для  $\text{H}_2\text{O}$ ). В этой главе также приведены полученные впервые снимки необычного асимметричного ИВЧ, испускаемого в анизотропном кристалле триглицинсульфата (ТГС) при прохождении частиц вдоль бинормали см. рис.9., а также снимки ИВЧ, испускаемого в близкой инфракрасной части спектра. Приведены оценки возможности фоторегистрации ИВЧ от отдельных частиц.

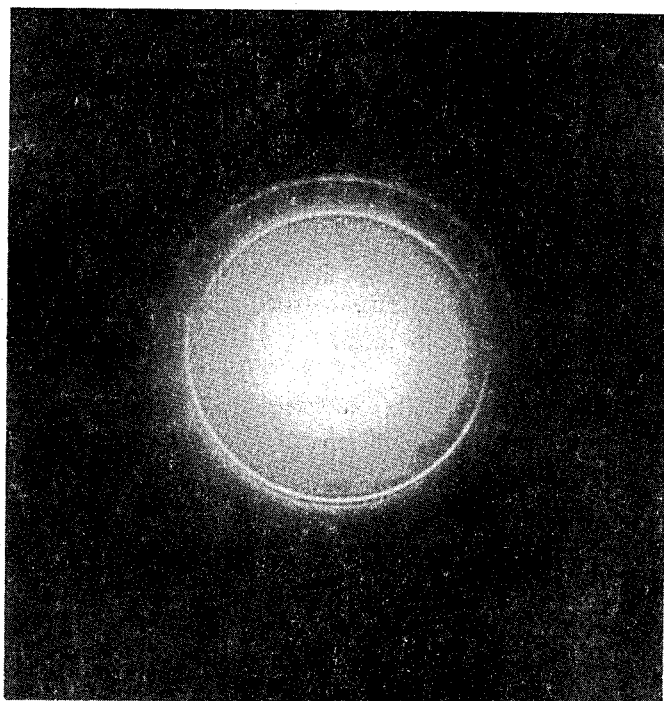


Рис.9. Асимметричное ИВЧ, испускаемое пучком протонов с энергией 660 МэВ, проходящим вдоль бинормали через кристалл ТГС. Фотография получена на фазотроне ЛЯП ОИЯИ в 1986 г.

В главе 7 обсуждаются особенности ИВЧ, испускаемого в новых, искусственно созданных материалах — в кремниевых аэрогелях. Исследованы такие свойства ИВЧ, как его направленность, поляризация, спектр и др. Проверка соотношения направленности ИВЧ в аэрогелях проведена в диапазоне углов от  $\theta_{ch} \approx 20^\circ$  до  $\theta_{ch} \approx 5^\circ$ . Приведены результаты опытов по изготовлению своих образцов аэрогеля, проведенных в сотрудничестве с Университетом им. Коменского в Братиславе, см. рис.10.

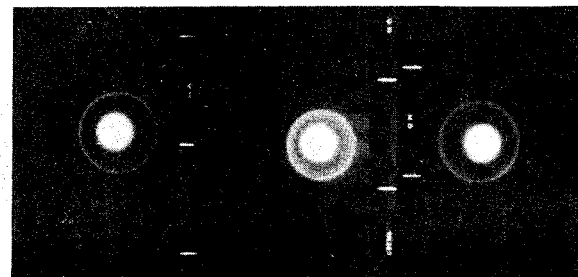


Рис.10. Фотография колец ИВЧ, испускаемого пучком электронов с энергией 350 МэВ в образцах из кремниевых аэрогелей, приготовленных в Братиславе ( $n = 1,05$ ), — изображения справа и слева, и в ИЯФ, Новосибирск ( $n = 1,037$ ) — изображение в центре

В главе 8 изложены результаты опытов по изучению свойств ИВЧ, испускаемого ультрарелятивистскими электронами в различных газах, таких как воздух,  $\text{CO}_2$ , благородные газы Хе, Кр, Аг, Не. Условие направленности ИВЧ исследовано в области углов от  $\theta_{ch} \approx 2^\circ$  вплоть до порога его возникновения, см. рис.11. Приведены снимки излучения, зарегистрированного в пороге ИВЧ и ниже него. Впервые получены снимки ИВЧ, возникающего при движении частиц в магнитном поле, а также ИВЧ, испускаемого античастицами — позитронами.

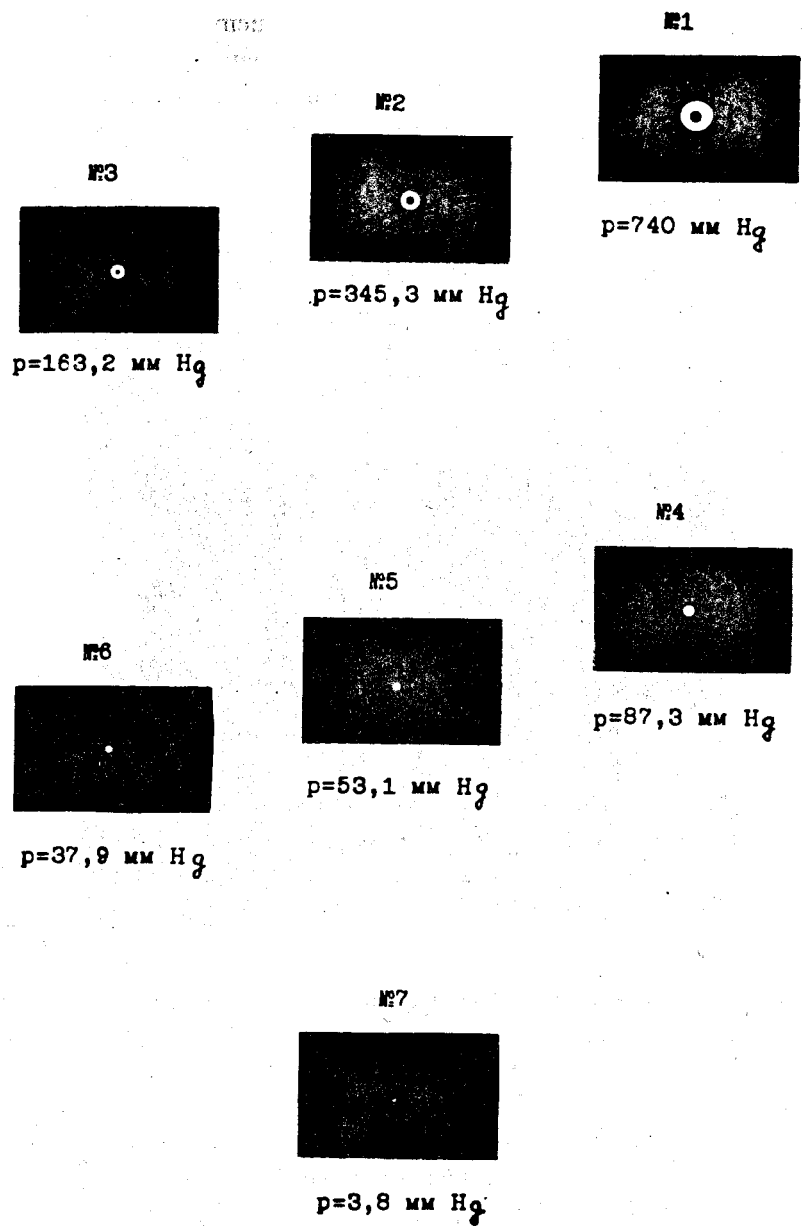


Рис.11. Серия фотографий колец ИВЧ, испускаемого электронами с энергией 350 МэВ в воздухе ( $t = 28^\circ \text{ C}$ ) при различных давлениях вблизи порога возникновения излучения. Пороговое давление воздуха  $p = 3,4 \text{ мм Hg}$  ( $n_D^{\text{порог.}} = 1,000001063$ )

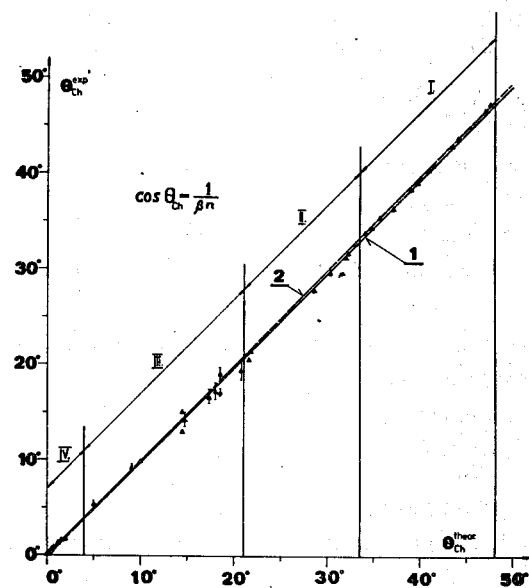


Рис.12. Теоретические значения углов  $\theta_{ch}^{\text{theor}}$ , вычисленные по формуле  $\cos \theta = 1/\beta n$ , в сравнении с углами  $\theta_{ch}^{\text{exp}}$ , полученными в эксперименте. Сплошная кривая (1) — прямая, полученная методом наименьших квадратов на основе экспериментальных данных. Пунктирная кривая (2) — прямая, проведенная через начало координат под углом  $45^\circ$  (предсказание теории Тамма-Франка). I, II — твердые прозрачные диэлектрики и жидкости, соответственно; III — кремниевые аэрогели; IV — газы при нормальном и пониженном давлениях

В заключении перечислены результаты проведенных теоретических и экспериментальных исследований.

Нами были проведены съемки ИВЧ с использованием шести следующих ускорителей: ускорителей протонов с энергией 1 ГэВ в Гатчине и 660 МэВ в Дубне; ускорителей электронов с энергией 350 МэВ и позитронов с энергией 512 МэВ в Новосибирске; ускорителей легких ядер с энергией 44 ГэВ в Дубне и тяжелых ядер с энергией 1 ГэВ/а.е.м. в Дармштадте (Германия). Обработка снимков позволила проверить один из главных выводов теории — соотношение направленности ИВЧ,  $\cos \theta = 1/\beta n$ , в широком диапазоне углов  $\theta$ , от  $\theta \approx 50^\circ$  вплоть до порога возникновения ИВЧ, в области показателей преломления от  $(n-1) \cong 10^{-1}$  до  $(n-1) \cong 10^{-7}$  и скоростей частиц от  $\beta = 0,75790$  до  $\beta = 0,99999950$ , см. рис.12. Как видно из этого рисунка, прямая, полученная методом наименьших квадратов на основе экспериментальных данных (сплошная кривая — 1), практически совпадает с теоретической кривой (пунктир — 2). Небольшое ее отклонение на угол  $\approx 0,23^\circ$ , по нашему мнению, связано с методикой обработки снимков.

Экспериментальные и теоретические данные, которые положены в основу диссертации, опубликованы в следующих работах:

- [1] Зрелов В.П., Павлович П., Ружичка Я. Препринт ОИЯИ, P1-7956, Дубна, 1974.  
“Характеристики оптического переходного излучения при наклонном падении протонов 660 МэВ ( $\gamma = 1.7$ ) на толстую пластинку никеля (2)”.
- [2] Zrelov V.P., Pavlovič P., Ružička J., Nucl.Instr.Meth., 130, 513-525 (1975).  
“Properties of light transition radiation of 660 MeV proton inclined incidence ( $\gamma = 1.7$ ) on a thick nickel plate (2)”.
- [3] Зрелов В.П., Ружичка Я. Препринт ОИЯИ, P1-10-915, Дубна, 1977.

“Некоторые особенности оптического переходного излучения от частиц высоких энергий при их наклонном падении (3)”.

- [4] Зрелов В.П., Ружичка Я., Препринт ОИЯИ, P1-11-764, Дубна, 1978.  
“Гибридное излучение и его свойства (4)”.
- [5] Zrelov V.P., Ružička J., Nucl.Instr.Meth., 151, 395 (1978).  
“Some Peculiarities of the Optical Transition Radiation From High-Energy Particles at Inclined Incidence (3)”.
- [6] Зрелов В.П., Ружичка Я. Препринт ОИЯИ, P2-11-963, Дубна, 1978.  
“Интерференционные эффекты в переходном излучении вблизи порога излучения Вавилова-Черенкова (5)”.
- [7] Зрелов В.П., Ружичка Я. Препринт ОИЯИ, P1-12-253, Дубна, 1979.  
“О роли излучения Вавилова-Черенкова в экспериментах по оптическому переходному излучению”.
- [8] Зрелов В.П., Ружичка Я. Препринт ОИЯИ, P1-12-254, Дубна, 1979.  
“Излучение Вавилова-Черенкова как причина аномальной интенсивности переходного излучения в случае скользящего падения электронов на поверхность серебра”.
- [9] Zrelov V.P., Ružička J., Nucl.Instr.Meth., 160, 324-326 (1979).  
“Hybrid Radiation and Its Properties”.
- [10] Zrelov V.P., Ružička J., Nucl.Instr.Meth., 165, 91-101 (1979).  
“Interference Effects in Transition Radiation Near the Threshold of Vavilov-Cherenkov Radiation (5)”.
- [11] Zrelov V.P., Ružička J., Nucl.Instr.Meth., 165, 307-316 (1979).  
“On the Role of Vavilov-Cherenkov Radiation in Experiments on Optical Transition Radiation”.
- [12] Ружичка Я. Диссертация на соискание степени кандидата физико-математических наук, Дубна, 1979.  
“Система дисплейного контроля процесса автоматической обработки пленочной информации с магнитного искрового спектрометра ОИЯИ и расчеты некоторых характеристик оптического переходного излучения”.

- [13] Ружичка Я. Автореферат диссертации, 1-12-984, Дубна, 1979.  
"Система дисплейного контроля процесса автоматической обработки फिल्मовой информации с магнитного искрового спектрометра ОИЯИ и расчеты некоторых характеристик оптического переходного излучения".
- [14] Зрелов В.П., Климанова М., Лупильцев В.П., Ружичка Я., Препринт ОИЯИ, P1-82-784, Дубна, 1982.  
"Расчеты пороговых характеристик излучения Вавилова-Черенкова, испускаемого ультрарелятивистскими частицами при радиаторе конечной длины".
- [15] Zrelov V.P., Klimanova M., Lupiltsev V.P., Ružička J., Nucl.Instr.Meth., 215, 141-146 (1983).  
"Calculations of threshold characteristics of Vavilov-Cherenkov radiation emitted by ultrarelativistic particles in a gaseous Cherenkov counter".
- [16] Зрелов В.П., Ружичка Я., II Международный симпозиум по переходному излучению частиц высоких энергий, Ереван, 13-15 сент. 1983 г. (см. Материалы II Симпозиума по ПИ частиц высоких энергий, Ереван, стр.603-620, 1984).  
"Расчеты свойств оптического переходного излучения".
- [17] Ružička J., Mehes J. Zb. 8-KČSF, Bratislava, 26-30.8, 1985, časť /1/2, ref.11-17, str. 562-563.  
"O Vavilovovom-Čerenkovovom žiarení v tenkých vrstvách kovov".
- [18] Ružička J., Mehes J. Nucl.Instr.Meth. A250, 491-502, 1986.  
"Properties of optical transition radiation for charged particle inclined flight through a finite thick plate".
- [19] Зрелов В.П., Лупильцев В.П., Ружичка Я., Препринт ОИЯИ, 13-87-619, Дубна, 1987.  
"К вопросу о беспороговости излучения Вавилова-Черенкова".
- [20] Зрелов В.П., Ружичка Я., Препринт ОИЯИ, P2-88-21, Дубна, 1988.  
"Анализ задачи Тамма об излучении заряда при его равномерном движении на конечной траектории".

- [21] Zrelov V.P., Lupiltsev V.P., and Ružička J., NIM, A278, 62, 1988.  
"To the problem of unthresholdness of the Vavilov-Cherenkov radiation".
- [22] Zrelov V.P., Ružička J., Czech.J.Phys. B39, 368-383, 1989.  
"Analysis of Tamm's problem on charge radiation at its uniform motion over a finite trajectory".
- [23] Зрелов В.П., Ружичка Я., Препринт ОИЯИ P1-91-108, Дубна, 1991; Препринт ОИЯИ P1-92-237, Дубна, 1992.  
"Оптическое тормозное излучение релятивистских частиц в прозрачной среде и его связь с излучением Вавилова-Черенкова".
- [24] Zrelov V.P., Ružička J., Sheshunov V.M. NIM, A302 (1991) 301-303.  
"Test of a raster Cherenkov photodetector in a beam of 3.6 GeV/n relativistic nuclei".
- [25] Vorobiev A.I., Zrelov V.P., Ružička J.  
"On specific features of the Vavilov-Cherenkov radiation in aerogels", Proceedings of the Workshop on JINR c-tau Factory (29-31 May 1991, JINR). Joint Inst. Nucl.Research, Dubna 1992, p.176-189.
- [26] Vorobiev A.I., Zrelov V.P., Ružička J., Workshop on Physics and Detectors for DAFNE, Frascati, 1991.  
"On some peculiarities of Vavilov-Cherenkov Radiation in aerogels".
- [27] Ружичка Я., Зрелов В.П. Препринт ОИЯИ, P1-92-233, Дубна, 1992.  
"Оптическое переходное излучение в прозрачной среде и его связь с излучением Вавилова-Черенкова".
- [28] Zrelov V.P., Ružička J. Czech. J.Phys. 42 (1992), N1, 45-57.  
"Optical bremsstrahlung of relativistic particles in transparent medium and its relation to the Vavilov-Cherenkov radiation".

## Патенты и изобретения

- [29] Fajnor V., Jesenák K., Kuchta Ľ., Pavlovič P., Ružička J.  
"Spôsob prípravy  $\text{SiO}_2$ -aeragelového scintilátora dopovaného difenyloxazolylbenzénom", prihláška o vynález v ČSFR, júl 1992  
č.PV 2283-92.
- [30] Зрелов В.П., Ружичка Я., Файнор В., Павлович П., Кухта Л.,  
Есенак К. "Твердотельный сцинтиллятор". Заявка на изобре-  
тение в России от 15.VI.1992, N5060843.
- [31] Зрелов В.П., Ружичка Я., Шешунов В.М., Журов В.Е. Дубна,  
1992. Заявка на изобретение Т 2953 от 16 июня 1992 г.  
"Экран электронно-лучевой трубки".

Рукопись поступила в издательский отдел  
2 апреля 1993 года.