УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

из истории физики

53(09)

РАЗВИТИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ О ПРИРОДЕ ИЗЛУЧЕНИЯ ВАВИЛОВА— ЧЕРЕНКОВА

И. М. Франк

СОДЕРЖАНИЕ

1. 2.	Зведение Тредыстория открытия	111°
3.	открытие Вавилова и Черенкова	116 120
	ированная литература	

1. ВВЕДЕНИЕ

В 1984 г. исполняется 50 лет со времени опубликования статей П. А. Черенкова 1 и С. И. Вавилова 2. Именно эти работы необходимо считать основой открытия *). Первые экспериментальные данные были обсуждены С. И. Вавиловым 2. С полной убедительностью он показал, что обнаруженное П. А. Черенковым универсальное свечение жидкостей под действием улучей по своей природе отлично от люминесценции. Соображения, высказанные Вавиловым, оказались очень существенными как для дальнейшего развития экспериментов, так и для последующей их интерпретации. Таким образом, поиски объяснения природы свечения, начатые уже в первой работе С. И. Вавилова, продолжались параллельно с экспериментальными исследованиями. Результатом такой работы, опиравшейся как на первоначальные данные, так и на последующие эксперименты П. А. Черенкова **), явилась теория Тамма и Франка 4.

Автору этих строк приходилось участвовать во многих обсуждениях совместно с П. А. Черенковым и С. И. Вавиловым. Иногда они происходили в необычной обстановке. Эксперименты П. А. Черенкова требовали полной адаптации глаз к темноте. Для этого до начала измерений было необходимо пробыть в абсолютно темном помещении примерно час. С. И. Вавилов иногда использовал этот час пребывания в темноте для обсуждения полученных результатов, а также и программы предстоящих экспериментов. Бывало, что в этой темной комнате вместе с П. А. Черенковым находился и я. Иногда П. А. Черенкову в измерениях требовался помощник, и если не было другого, то его обязанности выполнял я. Таким образом, мое участие в работе по выяснению природы излучения Вавилова — Черенкова было облегчено тем, что на всех ее этапах я был хорошо и непосредственно с нею знаком. Впрочем, в таком маленьком и тесно общавшемся научном коллективе, каким был

зультаты были им суммированы в докторской диссертации 3.

^{*)} Статьи П. А. Черенкова и С. И. Вавилова ^{1,2} поступили в редакцию «Докладов-АН СССР» 27 мая 1934 г. и были опубликованы 11 июня 1934 г. **) В тексте приводятся ссылки на оригинальные работы П. А. Черенкова. Ре-

тогда ФИАН, это вообще было не трудно. Несомненно, знал об экспериментах Черенкова и И. Е. Тамм. Мои постоянные беседы с ним, безусловно, помогали этому. Он заинтересовался не сразу, но когда это произошло, началась наша совместная работа. Рассказу о развитии представлений о природе излучения Вавилова — Черенкова от первой публикации С. И. Вавило-

ва и до теории Тамма — Франка 4 и посвящен этот обзор.

Об истории работы с Таммом и некоторых ее следствиях я постарался вспомнить в статье, посвященной его памяти 5. С некоторыми редакционными изменениями первую часть этой статьи я привожу в пунктах 3 и 4. В ней я теперь вижу ряд пробелов. Один из вопросов, который возникает: почему новый вид излучения был открыт только в 1934 г., хотя свечение пол действием лучей радия видели, не придавая тому значения, еще Пьер и Мария Кюри в самом начале XX века *)? Неоднократно его наблюдали и позже. Почему же не были обнаружены многие его необычные свойства? Это, конечно, не случайно. Распространенность явлений люминеспенции была общеизвестна. Было описано множество видов люминесценции, и наличие среди них радиолюминесценции было естественным, и она, как мы теперь знаем, в самом деле существует. Более чем за триста лет наблюдений люминеспенции был накоплен огромный экспериментальный материал. Сволка его в энциклопедии экспериментальной физики занимает толстый том. Однако ъ большинстве случаев это были просто наблюдения того, что и в каких условиях светится. Этой участи не избежало свечение под действием радия, Изучение природы люминеспенции и методы ее исследования в основном -стали развиваться, начиная с 20-х годов нашего века. Большая заслуга принадлежит в этом, как известно, С. И. Вавилову и его школе. Именно Вавилов высказал утверждение, что к числу неотъемлемых признаков люминесценции относится конечное время высвечивания, определяемое длительностью жизни возбужденного состояния светящегося атома или молекулы. Умение измерять это время, которое для люминесценции часто мало —10⁻⁷—10⁻⁹ с, возникло только в конце 20-х годов. Таким образом, открытие Вавилова — Черенкова, в сущности, не сильно запоздало по сравнению с моментом, начиная с которого оно могло быть сделано. Не случайно и участие в этом С. И. Вавилова: он умел исследовать люминесценцию и хорошо знал, чем она отличается от других видов свечения. Возникает другой вопрос: почему это явление предсказали и не искали так, как это случилось, например, с переходным излучением? Ведь предпосылки для этого были. Об этом также следует рассказать.

2. ПРЕДЫСТОРИЯ ОТКРЫТИЯ

О теоретической работе Зоммерфельда ⁶, на которую указал нам А. Ф. Иоффе, сказано уже в примечании к нашей статье ⁴. Аналогия между теорией Зоммерфельда, рассчитавшего силу, тормозящую движение заряда при сверхсветовой скорости в пустоте, и теорией Тамма — Франка рассмотрена в работе И. Е. Тамма 1939 г. ⁷. Как обнаружил С. И. Вавилов, и у Зоммерфельда был предшественник — Лорд Кельвин ⁸. В 1901 г. он указал, что атом, летящий в пустоте со сверхсветовой скоростью, должен создавать электромагнитную волну, аналогичную волнам Маха в акустике. В более поздних моих работах цитируется это высказывание Кельвина ⁹. В них при этом указывалось, что в действительности для летящего атома, т. е. для незаряженной системы при сверхсветовой скорости, должен быть

^{*)} Мария Кюри рассказывает о том, как ей и Пьеру Кюри хотелось, чтобы открытый ими радий был красивого цвета. Однажды, войдя в темноте в свой знаменитый сарай, в котором они выделяли радий, они были очарованы и поражены голубым свечением пробирок с радием. Я думаю, и в наше время каждый, кому приходилось видеть таинственное голубое свечение радия, никогда не забудет этого зрелища. Вряд ли это только свечение Вавилова — Черенкова, но оно в нем несомненно присутствует.

характерен не эффект Вавилова — Черенкова, а излучение, происходящее при спонтанном возбуждении атома, - апомальный эффект Доплера. Обсужпался и вопрос о том, как могло случиться, что высказывание Кельвина оказалось забытым. В 1961 г. ¹⁰ я писал по этому поводу следующее: «Высказывание такого крупного физика, как Кельвин, разумеется, не могло быть забыто случайно. В нем, как вскоре выяснилось, содержалась существенная ошибка. Как ни странно, эта ошибка состояла в том, что Кельвин не довел свою аналогию со звуковыми волнами до конца. В самом деле, упругие волны возможны только в среде, заполняющей некоторый объем пространства. При этом в некоторой области длин волн, зависящей от свойств среды, можно считать среду сплошной. Совершенно то же самое имеет место и в эффекте Вавилова — Черенкова. Для него существенно необходимо, чтобы распространение электромагнитных волн происходило в среде, и теория строится так, что среда считается сплошной. При этом ее характеризуют макроскопическими параметрами (диэлектрической и магнитной проницаемостями), зависящими от частоты света и определяющими скорость распространения волн и их поглощение в этой среде».

«Теперь известно, что если сопоставить возникновение электромагнитных волн в среде с упругими волнами, то аналогия эффекта Вавилова —
Черенкова с волнами Маха проявилась бы полностью. Однако во времена
Кельвина такая постановка вопроса была бы крайне надуманной. Принималось, что свет распространяется в среде, которую называли мировым эфиром,
и пытались наделить его своеобразными упругими свойствами. Поэтому
в то время естественно было искать аналогию между свойствами волн в эфире
и упругими акустическими волнами. Рассматривать движение заряженной
частицы в плотной среде не было оснований, тем более, что такой случай,
как движение атома в плотной среде, не представлялся реальным».

После появления теории относительности изменились представления об эфире, стало очевидным, что сверхсветовая скорость в вакууме неосуществима, и естественно, что высказывание Кельвина, так же как и работа Зоммерфельда, в какой-то степени справедливо было забыты. Однако этого нельзя сказать об еще более раннем и совершенно поразительном предвидении современной теории. Недавно выяснилось 11,12, что еще раньше, в 1888 г., Хевисайд чисто умозрительно рассматривал движение точечного заряда в диэлектрике со скоростью, большей скорости волн, и получил известное соотношение, связывающее характерный угол излучения со скоростью света в среде и скоростью частицы. Вот что писал об этом А. А. Тяпкин ¹¹ в 1974 г.: «Недавно, просматривая работу О. Хевисайда «Об электромагнитных эффектах при движении электризации через диэлектрик» *), опубликованную в 1889 г. 14, я обнаружил в ней параграф, специально посвященный рассмотрению движения заряда q со скоростью v, превышающей скорость распространения света в диэлектрике и. В нем с самого начала автор делает следующий фундаментальный вывод: «Теперь само собой встает вопрос: какая ситуация возникнет, если v > u? Ясно прежде всего, что здесь совсем не может быть возмущения впереди движущегося заряда (точечного пля простоты). Затем, учитывая, что сферические волны, излучаемые зарядом при его движении вдоль z-оси, распространяются со скоростью u, найдем, что геометрическое место точек их фронтов есть коническая поверхность, вершина которой есть сам заряд, ее ось — z-ось и ее полуугол $\bar{\theta}$ дается соотношением:

$$\sin \theta = \frac{u}{n}$$
 ».

Точечный заряд рассматривается Хевисайдом только для простоты, так как электрон еще не был открыт, т. е. не был известен точечный заряд,

^{*) «}On the Electromagnetic Effects Due to the Motion of Electrification through a Dielectric» $^{14}. \,$

⁸ УФН, т. 143, вып. 1

и тем более ничего не было известно о возможности существования быстрых заряженных частиц (ни о радиоактивности, ни о космических лучах тогда ничего не знали). Таким образом, рассуждение Хевисайда — это целиком мысленный опыт, поражающий, однако, своей дальновидностью. На первый взгляд удивительно, почему Хевисайд пишет о движении заряда именно в диэлектрике, а не в вакууме. Но он дает на это ответ, из которого видна глубина его понимания проблемы: «...Мне следует отметить, что сказанное выше не является описанием того, что имело бы место, если бы заряд заставили двигаться через эфир со скоростью, в несколько раз превышающей скорость света, об этом я ничего не знаю; но это описание того, что случилось бы, если максвеллова теория диэлектриков была справедлива для рассматриваемого случая и если я не ошибаюсь в ее интерпретации *)».

Таким образом, уже в 1892 г. Хевисайд опасается считать теорию применимой к скоростям, большим скорости света в пустоте. Он был, следовательно, в этом вопросе более проницателен, чем Зоммерфельд и Кельвин. Поэтому не случайно в мысленном опыте было рассмотрено движение заряда именно в диэлектрике со сверхсветовой скоростью. Электродинамике он заведомо не противоречил, хотя Хевисайд и делает оговорку, что он правилен, если применима максвеллова теория диэлектриков. Это замечание также

заслуживает внимания, и я к нему еще вернусь.

В 1888 г. рассматриваемый мысленный опыт был так далек от возможностей реального опыта, что не мог обратить на себя внимания экспериментаторов. Прошло несколько десятилетий, пока началось детальное изучение прохождения быстрых частиц через вещество. Однако специалисты по радиоактивности и люминесценции были далеки от теоретических проблем электродинамики. Узкая специализация в физике стала уже обычной. Следствия теории Максвелла все еще оставались достоянием в основном теоретиков, а их, видимо, не очень занимали возможности эксперимента. Даже для такого теоретика, как И. Е. Тамм — автора прекрасного учебника «Основы теории электричества» 15, впервые изданного в 20-е годы, это высказывание Хевисайда прошло незамеченным. Не удивительно, что о работе Хевисайда не вспомнили ни в связи с опытами Малле 16 (о них будет сказано позже), ни в связи с экспериментами Черенкова, и, тем более, оно не послужило стимулом для постановки экспериментов. Однако неясно, почему сам Хевисайд не подумал о возможности экспериментального обнаружения предсказанного им эффекта после того, как Резерфорд открыл в-лучи и началось их исследование. Ведь последняя прижизненная публикация трудов Хевисайда была в 1922 г., когда уже было достаточно много известно о быстрых электронах. Можно было только предполагать, что он был далек от этой новейшей в то время области исследований.

Теперь следует сказать несколько слов об уже упомянутых сомнениях Хевисайда в применимости теории. Быть может, и они в какой-то мере помешали Хевисайду искать экспериментальное подтверждение, во всяком случае, не позволили ему получить окончательную формулу Тамма — Франка, хотя, в сущности, он вплотную подошел к ней. В 1892 г. он говорит, что общие положения, которые он высказал, «достаточно правдоподобны, но я не могу найти решение, которое удовлетворяло бы всем необходимым условиям» **). Что же помешало Хевисайду получить в общем-то элементарную формулу для энергии излучения работы Тамма — Франка? Мне уже приходилось писать, что иногда точки зрения, которые со временем меняются, не оставляя следов, могут создавать трудности, существование которых

^{*)} Эти фразы Хевисайда заимствованы из статьи Т. Р. Кайзера ¹², цитирующего их по: H e a v i s i d e O. Electrical Papers.— Lnd.: MacMillan, 1892.— V. II, р. 49. Автор указывает, что первая публикация Хевисайда по этому вопросу относится к 1888 г. ¹³. Проблема, несомненно, его волновала, и он возвращался к ней неоднократно.
**) См. публикацию Кайзера ¹².

впоследствии становится непонятным *). Мне кажется, именно это и имело место в рассматриваемом случае. В самом деле, Хевисайд не учитывал дисперсии света. Различие поля в среде от поля в вакууме он характеризовал величиной е-диолектрической постоянной, которую считал константой. Теперь трудно понять, почему он поступал так. Между тем это было естественным. Так поступали всегда при рассмотрении поля заряда. (Это, однако, не мешало, рассматривая поле электромагнитной волны, пользоваться показателем преломления для света данной частоты.) Чтобы перейти к современным представлениям, нужно было выделить переменную во времени компоненту поля, т. е. разложить поле в интеграл Фурье. Это, в сущности, не тривиально, если принять во внимание, что величина движущегося заряда постоянна и рассматривается равномерное и прямолинейное его движение. Чтобы получить спектр поля, создаваемого зарядом, нужно было, как это было сделано в нашей работе, представить плотность заряда в виде б-функции: $\rho = e\delta(z - vt) \delta(x) \delta(y)$, и эту величину разложить в интеграл Фурье. И хотя Хевисайд удивительным образом умел пользоваться функцией. по существу совпадающей с б-функцией, но в данном случае он, видимо, не считал это существенным. Между тем необходимо было получить отсюда компоненту E_{ω} и использовать вектор \mathbf{D}_{ω} , определяемый через величину εω, соответствующую данной частоте ω. Если не ввести зависящей от частоты εω, то в самом деле приходим к ряду противоречий. Конусу излучения Вавилова — Черенкова соответствует разрыв в величине поля, которое обращается на его поверхности в бесконечность. Потери на излучение и сила, тормозящая движение частицы, становятся бесконечными. При этом впереди частицы, как пишет сам Хевисайд, отсутствует электромагнитное возмущение. Я полагаю, эти и подобные трудности имел в виду Хевисайд, когда говорил, что не может найти решение, удовлетворяющее необходимым

К моменту нашей работы в 1937 г. первый из шагов, не пройденных Хевисайдом, был уже сделан, и поле движущегося заряда в вакууме в точке наблюдения обычно разлагали в интеграл Фурье для расчета торможения заряженных частиц атомами **). Второе положение о том, что надо использовать ε_{ω} , также не было новым со времени работ Лоренца, но даже в 1937 г. оно еще нуждалось в обосновании. В нашей статье оно содержится в формулах (2) и (3) и в предшествующей им. В черновом варианте статьи это было сделано еще подробнее. Рассуждение было таково: поскольку рассматривается компонента электрического поля E_{ω} , то существенна соответствующая ему динамическая компонента поляризации среды P_{ω} . Она, в свою очередь, складывается из суммы поляризаций p_s атомов, имеющих собственные частоты ω_s , число которых N_s . При этом

$$\frac{\partial^2 p_{s\omega}}{\partial t^2} + \omega^2 p_{s\omega} = \frac{e^2}{m} E_{\omega} N_s, \tag{1}$$

т. е.

$$p_{s\omega} = \frac{e^2}{m} E_{\omega} \frac{N_s}{\omega_s^2 - \omega^2} ; \qquad (2)$$

отсюда

$$P_{\omega} = \sum_{s} p_{s\omega} = \frac{e^2}{m} E_{\omega} \sum_{s} \frac{N_s}{\omega_s^2 - \omega^2}. \tag{3}$$

(Это определение существенно отличается от поляризации в стационарном поле $P=\alpha E$, где α — постоянная.) Как известно,

$$D_{\omega} = n_{\omega}^2 E_{\omega} = E_{\omega} + 4\pi P_{\omega}. \tag{4}$$

^{*)} См. мою статью ⁵.

^{**)} О значении такого рассмотрения для нашей работы я писал в своей статье 5.

Таким образом, в уравнении Максвелла вводится n_{ω} . То, что теперь представляется очевидным, не только в прошлом веке, но даже в 30-е годы нашего века еще требовало пояснений. Видно, таким образом, что в сущности Хевисайду было почти невозможно пойти дальше качественной картины эффекта. Это как раз та стадия, с которой началось развитие количественной теории работы Тамма — Франка. При этом до тех пор, пока не было найдено выражение для энергии излучения, нами вообще считалось преждевременным публиковать работу. Сомнения Хевисайда в правильности качественного рассмотрения были и у нас. Видно, таким образом, что хотя Хевисайд существенно опередил свое время, все же он не мог решить задачу до конца.

Если говорить не о теории, а об экспериментальном открытии эффекта Вавилова — Черенкова, то часто называют имя Малле 16. Действительно, Малле наблюдал свечение жидкостей под действием ү-лучей. Теперь мы знаем, что он наблюдал именно излучение Вавилова — Черенкова. Однако было ли это открытием? Малле выяснил две особенности: во-первых, что свечение, возможно, универсально, так как светится не одна, а несколько жидкостей, и, во-вторых, что спектр излучения сплошной и в исследованных случаях одинаков. Это, однако, вполне могло объясняться люминесценцией одной и той же, может быть незначительной, примеси в жидкости. Подобное синее свечение, обусловленное примесью, наблюдается, как известно, в жидкостях под действием ультрафиолетового света, и оно изучалось С. И. Вавидовым *). Естественным было поставить эксперимент, чтобы выяснить, так это или не так. Черенков по совету С. И. Вавилова немедленно это сделал, и Вавилов в работе, опубликованной одновременно с работой Черенкова, высказал утверждение, что этот вид свечения — не люминесценция. Малле был здесь в плену обычных работ по люминесценции, в которых ограничивадись только описанием явления. Отметив его необычность, он не пытался выяснить его природу. Мог ли он это сделать? Безусловно, мог. Работы С. И. Вавилова по люминесценции были широко известны, и уж работы Ф. Пэррена во Франции Малле не мог не знать. Таким образом, у Малле скорее было наблюдение, чем открытие. Правда, сделать это открытие в самом деле было трудно. Для регистрации излучения Малле пользовался фотографическим методом. Проводить количественное измерение интенсивности свечения при этом не просто. Оно требует многих длительных экспозиций и знания особенностей почернения пластинки. Но невозможность потушить люминеспенцию и наличие необычной поляризации свечения Малле, безусловно, мог бы обнаружить.

В отличие от Малле, Черенков пользовался развитым Вавиловым и Брумбергом в начале 30-х годов методом гашения, в котором измеряемая интенсивность сравнивается с величиной порога зрительного восприятия, который для каждого наблюдателя, адаптированного к темноте, обладает поразительным постоянством. Этот метод требует от экспериментатора больших усилий (длительное пребывание в темноте и напряжение глаз), но зато дает количественные результаты, получающиеся сравнительно быстро. Другого подобного ему количественного метода в то время не существовало. Программа Вавилова изучения люминесценции и метод гашения в данном случае обеспечили успех работы.

3. ОТКРЫТИЕ ВАВИЛОВА И ЧЕРЕНКОВА

Попробую резюмировать положение вопроса к началу 1936 г., ставшего решающим в понимании явления, причем многое было выяснено уже в первых публикациях 1934 г. П. А. Черенкова ¹ и С. И. Вавилова ². При изучении люминесценции растворов солей урана, возбуждаемой у-лучами, П. А. Черенков обнаружил слабое видимое свечение самих растворителей, природа

^{*)} Об этом см. в моем обзоре в УФН 9.

которого во многом представлялась неясной. Это послужило началом исследований свечения чистых жидкостей под действием γ -лучей радия (в твердых веществах нельзя было исключить роль обычной люминесценции). Свечение оказалось универсальным — светились все без исключения исследованные жидкости, и притом практически одинаково ярко (в пределах 30%). Измерения со светофильтрами показали, что спектр излучения различных жидкостей в пределах ошибок одинаков. Он охватывает широкую область частот, и если бы можно было увидеть его цвет (при малых интенсивностях цветное зрение отсутствует), то свечение представлялось бы синим. И хотя увидеть цвет тогда еще было невозможно, С. И. Вавилов ⁹ уверенно озаглавил свою работу, опубликованную вместе с первой статьей Черенкова, так: «О возможной причине синего γ -свечения жидкостей» *).

Статьи П. А. Черенкова и С. И. Вавилова — это, по существу, две части одной работы: экспериментальная ¹ и теоретическая ². При этом, как уже отмечалось, в экспериментальной части прежде всего была реализована та программа измерений, которая характерна для лаборатории С. И. Вавилова в исследованиях люминесценции (П. А. Черенков был его аспирантом). Результат, однако, оказался неожиданным, и это заставило продолжить

изучение свечения.

Особенно удивительным казалось то, что свечение имело и заметную поляризацию, причем преимущественное направление электрического вектора совпадало с направлением у-лучей. Такой знак поляризации, а также невозможность повлиять на яркость свечения ни изменением температуры, ни добавлением тушителя люминесценции были надежно установлены уже в первой работе П. А. Черенкова ¹. Это привело С. И. Вавилова ² к важнейшему выводу: свечение не может быть люминесценцией возбужденных молекул жидкости — излучает комптоновский электрон в результате своего взаимодействия со средой. Единственный механизм излучения, который, как казалось, был возможен, — это тормозное излучение. Поэтому такое предположение и было сделано С. И. Вавиловым. Допущение сразу объясняло универсальность свечения и поляризацию, поскольку при комптонэффекте электрон вылетает преимущественно под острым углом к направлению пучка фотонов. Не вызывало сомнений и сходство спектров излучения разных жидкостей: спектр, очевидно, определялся механизмом торможения.

Если стать на эту точку зрения, то были неизбежны и другие выводы. Наличие поляризации света указывает не только на связь излучения света с движущимися электронами. Отсюда следует, что излучение определяется начальной частью пробега, и притом главным образом электронов высокой энергии (сильное рассеяние электронов в жидкости, особенно медленных, довольно быстро уничтожает направленность движения). Можно было предноложить, что вообще эффект связан с моментом выбрасывания электрона под влиянием у-лучей (двойной комптон-эффект). С классической точки зрения такой эффект определяется внезапным ускорением электрона в момент его вылета. Если энергия второго фотона мала по сравнению с энергией электрона, то интенсивность этого излучения легко рассчитать в рамках классической электродинамики, и она, как мы теперь знаем, много меньше наблюдавшейся.

Однако уже тогда эксперимент однозначно указывал на то, что излучение происходит, главным образом, на какой-то части пробега электрона после вырывания его из атома. В самом деле, число комптоновских электронов, образующихся в жидкости, должно быть пропорционально плотности, а их пробег сокращается обратно пропорционально ее величине. Если бы излучение возникало в момент выбрасывания электрона, то оно определя-

^{*)} С. И. Вавилов тогда еще не знал, что спектр свечения уже был известен. Как уже отмечалось, фотографии его были получены в работах Малле ¹⁶ (1926—1929). Теперь же голубое свечение воды обычно показывают экскурсантам, знакомищимся с атомными реакторами.

лось бы числом электронов, т. е. возрастало бы как плотность. Это заведомо не имеет места; наоборот, из постоянства яркости, не зависящей от плотности, следует, что существенно не только число электронов, но также и их пробег. Итак, излучает сам электрон на пути своего движения, и надо было

понять, как зависит это излучение от энергии электрона.

Для комптоновских электронов с энергией как в миллион электронвольт, так и в десятки килоэлектрон-вольт их энергия еще очень велика по сравнению с энергией фотонов видимого света (эдектрон-вольты). Поэтому не было оснований считать, что вероятность излучения на единицу длины пробега у быстрых электронов больше, чем у медленных. Скорее можно было ожидать обратного, поскольку вероятность рассеяния, а следовательно, и торможения растет с уменьшением скорости. Между тем опыт однозначно говорил в пользу быстрых электронов. Уже в первой работе П. А. Черенкова (1934 г.) приведены результаты экспериментов с рентгеновскими дучами, причем было доказано, что при напряжении на рентгеновской трубке 32—34 кВ универсальное свечение отсутствует ¹. Мне кажется, я не ошибусь, но в 1936 г. имелись убедительные доказательства того, что и в случае у-лучей фотоны небольших энергий, по крайней мере, не вносят заметного вклада в излучение. В самом деле оказалось, что при фильтрации у-лучей свинцом ослабление свечения происходит по тому же закону, что и ослабление жесткой компоненты у-лучей радия, хотя интенсивность (т. е. поглощаемая в среде энергия, примерно пропорциональная суммарному пробегу электронов) у жесткой и мягкой компонент относятся как 1:3*). Конечно, было преждевременно делать отсюда вывод о пороге для излучения (это казалось бы парадоксальным), но преимущество быстрых электронов для возбуждения свечения было несомненным. Для гипотезы о тормозном излучении это представлялось трудностью.

Другой трудностью было отсутствие заметной зависимости от атомного номера Z атомов жидкости. Например, объектом измерения были ${}_{6}\mathrm{C[}_{17}\mathrm{Cl}]_{\lambda}$ и $[{}_{1}\tilde{H}]_{14}[{}_{6}C]_{6}$, а яркости свечения для них оказались практически одинаковыми 1 (в относительных единицах 1,04 и 1,09). Сам С. Й. Вавилов 18 довольно близко подошел к объяснению явления, считая, что электрон при движении испытывает небольшие возмущения от взаимодействия с атомами, и так как расстояния между ними в среднем постоянны, то возмущения квазипериодичны. Этот период при подходящей скорости может дать видимый свет. Теперь мы знаем, что такого рода эффект в самом деле имеет место при тормозном излучении в кристаллах (он был независимо от С. И. Вавилова теоретически рассмотрен М. Л. Тер-Микаеляном ¹⁹). Позже, уже при разра-ботке количественной теории, выяснилось, что слабым местом гипотезы о связи тормозного излучения с наблюдаемым свечением была сравнительно большая величина его интенсивности. В примечании к статье И. Е. Тамма сказано: «Интенсивность видимого света в этом случае должна быть примерно в 10⁴ раз меньшей измеренной Черенковым». Оптическая часть спектра тормозного излучения, в сущности, недостаточно исследована и до сих пор, поэтому такая теоретическая оценка не вполне надежна (готовя теперь нашу статью к новой публикации, я убрал это примечание). Тем не менее можно утверждать, что вклад тормозного излучения в свечение, наблюдавшееся Черенковым, в самом деле пренебрежимо мал. Из сказанного видно, какое значение имели количественные результаты. Выход излучения был впервые измерен П. А. Черенковым ^{26,27}, а теоретических предсказаний его

^{*)} К сожалению, П. А. Черенков, так же как и я, не помнит достоверно, когда был сделан этот опыт. Однако П. А. Черенков в работе, законченной в декабре 1936 г. и опубликованной в том же номере «Докладов АН СССР», что и наша с И. Е. Таммом работа, ссылается на неопубликованные эксперименты, в которых и была установлена роль жесткости у-лучей, о которых здесь сказано 17. Таким образом, по-видимому, эти результаты уже были получены раньше и только приобрели актуальность в связи с нашей работой.

величины вообще не было до нашей работы ⁴ *). Таким образом, гипотеза Вавилова о тормозном излучении с самого начала представлялась во многом неясной и вызывала сомнения, постепенно все возрастающие. Однако его утверждение, что излучает электрон, а не люминесцирует жидкость, мне представлялось несомненным. Это далеко не было общепризнанным, и, видимо, поэтому ни у кого, кроме узкого круга лиц, связанных с С. И. Вавиловым, работы П. А. Черенкова не вызывали интереса. Вполне понятно, что для дальнейшего продвижения вперед надо было прежде всего получить прямое доказательство связи излучения с быстрыми электронами.

Конечно, самый прямой путь состоял в том, чтобы наблюдать свечение от источника β -частиц. Теперь кажется странным, но тогда в институте, не имевшем радиохимической лаборатории, это было не очень просто. Такой опыт был сделан в 1936 г., и в нем был использован препарат радия в тонкостенной стеклянной ампуле 17 . Было показано, что свечение обладает всеми свойствами, уже выясненными для свечения под действием γ -лучей. При этом, как и ожидалось, яркость свечения для β -частиц оказалась обратно пропорциональной плотности жидкости, т. е. пропорциональной пробегу электрона. В этой работе уже делается попытка сопоставить результаты с теорией, из которой следовало, что должна проявляться и зависимость от показателя преломления. К этому вопросу я еще вернусь.

Большой удачей было то, что для этого в начале 1936 г. был сделан косвенный опыт для проверки роли электронов, благодаря которому случайно обнаружилось характерное свойство излучения — его направленность. В опытах с электронами, если бы направленность не была известна, ее легко можно пропустить, так как необходимой коллимации пучка электронов тогда достичь было непросто. Цель косвенного опыта состояла в том, чтобы показать, что при свечении под действием ү-лучей поляризация в самом деле связана с направлением движения электронов. Очевидно, что в этом можно было убедиться, поместив светящуюся жидкость в настолько сильное магнитное поле, чтобы прямолинейную часть пробега электронов превратить в заметно искривленную дугу окружности. Тогда результирующая плоскость поляризации должна была повернуться на какой-то угол в сторону отклонения электронов.

Я помню, что постановку опыта, а затем и его результаты мы внимательно обсуждали с П. А. Черенковым. Сомнения вызывало то, что значительное рассеяние электронов могло сделать их неуправляемыми магнитным полем. Однако опыт вовсе не был бессмыслен, и он удался, но результат оказался неожиданным. Теперь ни я, ни П. А. Черенков не помним самой первоначальной схемы опыта, но зато хорошо памятен результат. Главным при включении магнитного поля оказался не поворот плоскости поляризации (по-видимому, он происходил), а изменение яркости свечения, которое было значительным.

Можно было пытаться объяснить это различными гипотезами (о предложениях, которые были рассмотрены, П. А. Черенков пишет в работе 1936 г. ²⁰). Однако уже в первых наблюдениях обращало на себя внимание следующее: изменение яркости как по величине, так и по знаку зависело от того, под каким углом по отношению к пучку у-лучей и направлению магнитного поля проводилось наблюдение. Поэтому было естественным предположить, что имеется угловая анизотропия излучения и что при повороте направления движения электронов под действием магнитного поля поворачивается и картина углового распределения. Качественно этого можно было заранее ожидать, так как всякое поляризованное излучение (дипольное или мультипольное) не является сферически-изотропным. Но количественно величину эффекта можно было ожидать настолько малой, что вряд ли она

^{*)} Вопрос о тормозном излучении и его связи с излучением Вавилова — Черенкова не столь элементарен, как нам представлялось первоначально. Частично он был рассмотрен И. Е. Таммом в 1937 г. ⁷. Ряд связанных с этим вопросов обсужден во второй части статьи ⁵.

могла выходить за пределы точности эксперимента. При этом для любого точечного мультиполя поток излучения должен был быть симметричен относительно центра мультиполя (т. е. не должен меняться при повороте волнового вектора на 180°). Однако внимательное рассмотрение результатов экспериментов приводило к иному, и притом парадоксальному выводу: два противоположных направления для излучения не равноправны, причем в переднюю полусферу по отношению к скорости электрона излучается света больше, чем в заднюю. И такая направленность должна быть очень значительной, так как при отклонении электрона магнитным полем в сторону наблюдения яркость заметно возрастала, а при отклонении в противоположную сторону — убывала. Помню, что П. А. Черенков также был согласен с этим выводом. По-видимому, мы так легко его приняли в силу нашей недостаточной осведомленности в оптике. Наоборот, в силу глубоких знаний ее С. И. Вавилов сначала считал, что этот вывод не может быть правилен. Однако вскоре прямой опыт однозначно доказал, что асимметрия излучения действительно имеет место. Трубка с жидкостью была закрыта с торцов плоскими окошками, позволявшими наблюдать свечение в двух взаимно противоположных направлениях. Свечение, наблюдаемое при помещении препарата радия сбоку против центра трубки, было в обоих окнах одинаково ярким. При включении магнитного поля в том окне, в сторону которого отклонялись электроны, яркость становилась больше, а в противоположном, наоборот, меньше 20 .

4. ТЕОРИЯ ЯВЛЕНИЯ

Разумеется, уже тогда направленность вперед тормозного излучения релятивистских электронов была хорошо известна, и, пожалуй, естественно было считать, что это свойство проявляется и здесь (об аналогии с тормозным излучением сказано в работе П. А. Черенкова). Однако С. И. Вавилов утверждал (ссылаясь, если не ошибаюсь, на Зоммерфельда), что тормозное излучение для малых энергий фотонов не должно иметь направленности вперед. Действительно, тогда не было известно ни одного направленного излучателя видимого света, и полагали, что это не случайно. Сейчас уже трудно выяснить основы этого ошибочного мнения, которое, по-видимому, было более или менее общепринятым. Если сейчас обнаружение направленности излучения, вероятно, послужило бы доводом в пользу гипотезы о тормозном излучении, то тогда оно дало толчок к поискам иного объяснения, которое и привело к правильному пониманию явления. В самом деле, единственно, что могло обеспечить направленность излучения, - это протяженность излучателя, сравнимая с длиной волны. Такой излучатель можно рассматривать как совокупность точечных мультиполей, когерентных между собой и распределенных по некоторой длине. Именно так, как известно, получается направленное излучение радиоволи. Поэтому, когда я рассказал И. Е. Тамму о выводах, получающихся из опытов П. А. Черенкова, он сразу же сказал: «Это значит, что происходит когерентное излучение на длине пути электрона, сравнимой с длиной световой волны». Это утверждение правильно, но теперь, когда хорошо развиты представления о так называемой когерентной длине, из него, если опираться только на преимущественную направленность излучения вперед, были бы сделаны более осторожные выводы. В то время, однако, оно очень облегчило построение общеизвестной картины сложения излучаемых волн под острым углом к траектории (экспериментально об этом угле еще ничего не было известно).

Хотя это наглядное объяснение природы явления вошло теперь во все популярные книги, но, быть может, о нем следует сказать. Основным, как мы знаем, было использование принципа Гюйгенса: каждая точка на пути заряда, движущегося равномерно и прямолинейно со скоростью v, служит источником сферической волны, испускаемой в момент прохождения через

нее частицы. В том случае, когда

$$v > \frac{e}{n}$$
, r. e. $\beta n > 1$, (5)

эти сферы имеют общую огибающую — конус с вершиной, совпадающей с мгновенным положением заряда. При этом нормали к образующим конуса, т.е. направления волновых векторов, образуют со скоростью угол

$$\cos \theta_0 = \frac{1}{\beta n} \cdot$$
 (6)

При пояснении эффекта Вавилова — Черенкова часто ограничиваются таким упрощенным представлением, однако, и это было сделано с самого начала, картину необходимо строить для монохроматических волн. Поэтому рассматривается разложение в спектр по частоте световых импульсов, излучаемых в моменты t' прохождения частицей каждой точки ее пути. Таким образом, спектр частот сплошной, и волны излучаются все время, но их фаза не произвольна, а равна ω (t — t'). Если отметить волновые поверхности, соответствующие каждому данному t, то опять получим огибающие их конусы — поверхности одинаковой фазы — и вновь приходим к условию (2), но для n=n (ω). Очевидно, таких конусов бесконечно много, и задан только угол θ_0 , зависящий от n (ω).

Из этой качественной картины сложения волн получилось очень многое. В самом деле, излучать должны только быстрые электроны, для которых v > c/n. Излучение электрона должно быть пропорционально его пробегу, т. е. обратно пропорционально плотности жидкости. Поэтому, в согласии с опытом, суммарная интенсивность свечения для электронов от γ -лучей не должна зависеть от плотности. (Напомню, что число комптоновских электронов, возникающих в единице объема, примерно пропорционально плотности.) Наконец, эта картина давала направленность излучения. В то время из опытов П. А. Черенкова, как уже отмечалось, следовало только, что вперед излучается света больше, чем назад. Теперь мало кому известно, что величина угла θ_0 вовсе не была следствием эксперимента; наоборот, это было предсказанием теории, которое затем полностью подтвердилось на опыте.

Из количественного рассмотрения очевидно, что спектр излучения должен быть сплошным, так как единственное ограничение для частоты определялось величиной n (ω) в условии (5), причем в прозрачной жидкости для видимого света n (ω) слабо зависит от ω . Казалось вероятным также, что электрический вектор волн определяется направлением скорости электрона и дает поэтому правильный знак поляризации. И если только возникновение волн, сложение которых рассматривалось, было реальным, то не возникало сомнений в универсальности явления.

Такая качественная картина объясняла, следовательно, все, что было известно об эффекте Вавилова — Черенкова, кроме интенсивности излучения. Именно это и делало ее крайне уязвимой. Мне приходилось делиться этими соображениями с несколькими теоретиками, начавшими проявлять интерес к опытам П. А. Черенкова (особенно после того, как была выяснена направленность излучения), но какого-либо понимания я не встретил. Главная причина этого была, вероятно, в недостаточной осведомленности о свойствах явления. Как И. Е. Тамм, так и я знали здесь больше *). При этом И. Е. Тамм даже предлагал публиковать статью, не дожидаясь более детального рассмотрения. Это было бы, однако, преждевременным. Не только вопрос об интенсивности не был рассмотрен, но сама возможность возникновения излучения сразу же стала предметом сомнений. И. Е. Тамм рассказал о каче-

^{*)} Разумеется, это относится и к С. И. Вавилову. Со свойственной ему физической интуицией С. И. Вавилов отнесся с живым интересом к этой идее, ожидая ее дальнейшего развития.

ственной картине, позволяющей интерпретировать излучение, Л. И. Мандельштаму. Замечание Мандельштама состояло в следующем: известно, что при равномерном и прямолинейном движении электрон не излучает. Результат не изменится, если в волновом уравнении заменить скорость света c на c/n, так как одно уравнение сразу же приводится к другому, если соответственно изменить скорость частицы. Я не присутствовал при этой беседе, но, по-видимому, она была мимолетной, и во всяком случае не было обращено внимания на то, что этот вывод не применим к скорости, превышающей фазовую скорость света, т. е. к случаю, вообще неосуществимому в вакууме.

Разумеется, опыты Маха с пулей, летящей со сверхзвуковой скоростью, были известны не только И. Е. Тамму, но и мне. Не могу вспомнить, то ли не возникала мысль об аналогии с волнами Маха, то ли ошибочно считалось, что к электродинамике эта аналогия неприменима. Оба эти предположения теперь кажутся более чем странными. Так или иначе, но замечание Л. И. Мандельштама, сделанное «на ходу», сильно расхолодило увлеченность наглядной точкой зрения. И. Е. Тамм считал после этого, что, прежде чем развивать ее дальше, следует выяснить, нет ли иных путей для объяснения явления. Что касается меня, то я пытался подправить эту картину, чтобы устранить не существующее на самом деле противоречие. В промежутке между весной и осенью 1936 г. вопрос оставался открытым.

В те годы преобладающим был квантовый подход к решению проблем излучения быстрых частиц. Наряду с этим внимание привлекла и обсуждалась среди теоретиков работа Вильямса ²¹, в которой обосновывался метод, часто называемый теперь методом исевдофотонов. Метод Вильямса явился развитием прекрасных работ Ферми (1924 г.) и Бора (1915 г.), и мое внимание на него обратил Д. В. Скобельцын.

В методе Вильямса рассматривалась временная зависимость электрического поля налетающей частицы в какой-либо точке, характеризуемой величиной прицельного параметра. Зависимость поля от времени представлялась в виде разложения в сплошной спектр частот, и затем определялось действие поля каждой из частот о этого спектра на атом или ядро, находящееся в этой точке. Применительно к рассматриваемому явлению вопрос состоял в том, каким образом поле, которое переносится частицей, становится источником расходящихся из каждой точки траектории волн. Следуя Вильямсу, для этого требовалось найти малое взаимодействие поля частицы с атомами и ядрами, расположенными вдоль ее пути, колебания которых и являются источником волн. Мои попытки обосновать качественную картину с самого начала состояли в поисках механизма такой трансформации поля частицы в расходящиеся волны. Говоря современным языком, это была попытка построить микроскопическую теорию эффекта Вавилова — Черенкова, в чем не было надобности.

Это было характерно для того времени. При рассмотрении взаимодействия быстрых частиц с веществом считалось несомненным, что невозможен никакой иной подход, кроме микроскопического. Энергия частицы (фотона у-лучей или в-частицы) заведомо велика по сравнению с энергией связи электронов в атомах, атомов — в молекулах или в жидкости и твердом теле. Отсюда, казалось, с несомненностью следовало, что атомной структурой вещества при взаимодействии с ним быстрых частиц можно пренебречь. Допущение о существовании какого-либо эффекта, зависящего от показателя преломления, с этой точки зрения, представлялось парадоксальным. Вероятно, отчасти поэтому наглядная интерпретация опытов П. А. Черенкова, существенным образом содержащая показатель преломления, сразу же вызывала недоверие. Что касается меня, то я твердо в нее верил, но все же и я в какой-то мере отдал дань общим заблуждениям, пытаясь найти микроскопический механизм возникновения волн. Если в оптически однородной среде при равномерном движении излучение не возникает, то микроскопический механизм, казалось, был необходим.

Трудностью для теории, как мне представлялось тогда, было то, что Π . А. Черенков не обнаружил заметной зависимости яркости свечения ни от Z, ни от показателя преломления, хотя согласно (6) конус угла излучения определялся $1/\beta n$. В то время как моя деятельность в течение нескольких месяцев оказалась бесплодной, Π . Е. Тамм, видимо, просто не занимался этим вопросом. Между тем экспериментальные исследования Π . А. Черенкова, которые подтолкнуло предположение о направленности излучения, быстро продвигались. Направленность стала уже экспериментальным фактом. Теперь даже трудно себе представить, насколько удивительной она тогда казалась.

Я вспоминаю, что, когда осенью 1936 г. приехал в Москву Жолио-Кюри, ему был продемонстрирован опыт Черенкова, теперь вошедший в популярные книги. Вертикально поставленный стеклянный цилиндрический сосудик с жидкостью с боков был окружен коническим зеркалом. Если смотреть на зеркало сверху, то можно было видеть угловое распределение излучения, выходившего в горизонтальной плоскости через стеклянные стенки цилиндра. Когда препарат радия помещался сбоку от цилиндра, то отчетливо были видны два максимума излучения под острым углом к направлению у-лучей ²⁶. Спеланные Черенковым фотографии таких колечек с неравномерным почернением в различных азимутах теперь общеизвестны, а сам опыт нагляден и безупречно убедителен, если, конечно, не заподозрить элементарной оппибки, граничащей с жульничеством. Именно такая мысль, видимо, возникла у Жолио-Кюри, который немедленно стал поворачивать сосудик и зеркало вокруг оси, чтобы убедиться, что прозрачность стекла сосуда или качество серебрения зеркала здесь не играет роли. В обсуждении же опыта им был сделан намек на аналогию с N-лучами Бландло *). Этому не следует удивляться. Демонстрацию опыта приходилось проводить в полной темноте. причем даже при некоторой адаптации глаза свечение было на пределе видимости. Вся обстановка в самом деле была необычна для физического эксперимента и напоминала нечто вроде спиритического сеанса или фокуса с применением «ловкости рук».

Этому опыту предшествовал период, когда теория еще не была закончена, в то время как актуальность задачи уже стала очевидной. Это привело к новому обсуждению вопроса совместно с И. Е. Таммом. Были рассмотрены различные гипотезы, о которых теперь уже невозможно вспомнить, и все они оказались бесплодными. Выяснилось, что наглядная картина, использующая принцип Гюйгенса, — это единственная, дающая качественно правильный результат. И величина $\beta = v/c$, и пробег наиболее энергичных комптоновских электронов действительно могли дать требуемую направленность воли под острым углом к скорости электрона. После этого или, вероятно, этих обсуждений (теперь уже не помню, сколько их было), как-то поздно вечером И. Е. Тамм позвонил мне по телефону и попросил немедленно приехать к нему домой.

Я застал И. Е. Тамма за столом, увлеченного работой и уже исписавшего много листов бумаги формулами. Он сразу же принялся рассказывать мне о сделанном им до моего прихода. Сейчас я уже не могу вспомнить в точности, что было предметом совместного обсуждения в ту ночь. Думаю, что обсуждались и ход решения задачи, предложенный И. Е. Таммом, и правильность выкладок, и физические основы теории, в которых многое было еще не ясно. Помню только, что просидели мы долго. Домой я возвратился под утро пешком, так как городской транспорт уже закончил (или еще не начал) свою работу.

Собираясь к И. Е. Тамму, я захватил с собой школьную тетрадку, и в нее рукой И. Е. Тамма был записан вывод формулы для энергии излучения

^{*)} Ошибочные опыты Бландло, полагавшего, что он открыл новый вид излучения, теперь совершенно забыты. Однако в то время N-лучи служили понятием нарицательным. Когда в силу каких-либо ошибок наблюдалась «мистика» вместо реальных явлений говорили, что это N-лучи.

электрона. Не знаю, в силу какой случайности, но эта тетрадка сохранилась. Запись в ней занимает пять с половиной страниц, сделана торопливой рукой со многими поправками. Все же, судя по тому, что некоторые промежуточные выкладки опущены, это уже не самый первоначальный вывод, а попытка систематизировать полученные результаты. Фотокопию одной из страничек записей И. Е. Тамма, содержащую окончательную формулу, я опубликовал 5. На следующих страницах тетрадки, вероятно поэже, более аккуратно и со всеми подробностями тот же вывод записан моей рукой. Окончательная формула в этой тетрадке правильна (за исключением пределов интегрирования), но вывод ее существенно отличается от содержащегося в опубликованной нами поэже статье. В соответствии с опытом считалось, что пробег частицы ограничен, при этом скорость частицы вдоль пробега принималась неизменной, а пробег прямолинейным. Поле рассчитывалось в волновой зоне.

Расчет для ограниченной траектории позволял обойти кажущуюся трудность — «электрон при равномерном движении не излучает». Однако полученный результат не содержал никаких указаний на то, что начало и конец траектории существенны. Более того, результат показывал: в направлении, соответствующем углу θ_0 (уравнение (6)), не только происходит когерентное сложение волн, но эти волны в самом деле несут энергию. Прошло еще некоторое время, пока не было выяснено, почему электрон в однородной среде при равномерном движении в самом деле должен излучать свет всех частот, для

которых выполнено (5), т. е. при $\beta n > 1$ *).

В статье, опубликованной нами (она датирована 2 января 1937 г.), уже было рассмотрено излучение электрона с пробегом неограниченной длины и устранена нестрогость вывода для малых θ_0 (указанная Л. И. Мандельштамом). Поэтому в статье содержится расчет потока энергии через единицу длины боковой поверхности цилиндра с осью, совпадающей с траекторией частицы. Главной причиной того, что мы отказались от рассмотрения случая ограниченного пробега частицы, была необходимость доказать — излучение

при равномерном и прямолинейном движении возможно.

У меня осталось сравнительно мало воспоминаний об этом завершающем этапе развития теории, а также о написании и редактировании статьи, вероятно потому, что это была обычная будничная работа. Исключением является воспоминание о семинаре института, на котором сразу же после получения первых результатов работу докладывал И. Е. Тамм. При обсуждении нам обоим стало уже совершенно очевидно, что требование ограниченной траектории электрона бессмысленно и что либо надо признать наличие излучения электрона на всем его пути независимо от начала и конца, либо вообще все ошибочно, что казалось невероятным. Это и дало толчок к правильному пониманию проблемы. (И. Е. Тамм вспоминает об этом семинаре в своей нобелевской лекции.)

Рассмотрение поля в волновой зоне, содержавшееся в первоначальном варианте теории для ограниченного пробега, оказалось полезным. В числе многих интересных результатов такое рассмотрение — с устранением первоначальных погрешностей и анализом применимости результатов — приведено И. Е. Таммом в статье, посвященной Л. И. Мандельштаму, 1939 г. 7. Автор этой статьи также пользовался таким рассмотрением неоднократно.

Теория ⁴ оказалась в полном согласии с экспериментальными данными, полученными П. А. Черенковым к середине 1936 г. Дополнительные экспери-

^{*)} Это утверждение правильно только для оптически изотронной среды. В анизотронной среде направление фазовой скорости не совпадает с направлением луча. Условие (6) для θ_0 выполняется, но минимальный угол θ_0 , вообще говоря, больше нуля. Условие порога (5), как было показано в 1958 г., требует поправки. Для возникновения излучения необходимо, чтобы скорость частицы превышала скорость распространения фазы вдоль луча, направленного по v. Хотя эффект Вавилова — Черенкова в кристаллах был впервые рассмотрен В. Л. Гинзбургом еще в 1940 г. 22 , особенности порога были замечены только спустя много лет. Применение принципа Гюйгенса к кристаллам позволило выяснить их весьма просто 23 , 24 .

менты, проведенные им в 1936—1937 гг., подтвердили и количественную сторону теории. С использованием конического зеркала, о котором уже упоминалось, был приближенно измерен угол θ_0 , а также его зависимость от показателя преломления, подтвердившая соотношение (6) 25 , 28 . Позже был определен энергетический выход излучения в пределах точности измерений, совпавший с ожидаемым по теории 26 , 27 .

Результаты Черенкова и их теоретическая интерпретация первоначально были замечены лишь советскими физиками. Видимо, иностранные ученые мало читали в то время наши журналы (хотя «Доклады Академии наук» печатались на двух языках: на русском и иностранном). Уже после того, как в исследование явления была внесена полная ясность, С. И. Вавилов в 1937 г. направил небольшую статью П. А. Черенкова, суммировавшую полученные результаты и их сравнение с теорией, в «Nature». Не помню уже, под каким благовидным предлогом, но статья была отклонена. Истинная же причина не вызывала сомнений — столь солидный журнал, как «Nature», не считал возможным публиковать результаты, представлявшиеся, по крайней мере, сомнительными. В этом смысле менее разборчивым оказался «Physical Review» 28, куда и была направлена та же статья после неудачи с «Nature».

Вскоре появилось новое экспериментальное подтвержение теории. Коллинз и Рейлинг 29 в США, используя пучок релятивистских электронов из ускорителя, проверили на тонком радиаторе соотношение $\cos\theta_0=1/\beta n$. Возможно, что авторы этой статьи отнеслись к работе П. А. Черенкова без характерного в то время недоверия, поскольку они полагали, что причиной излучения является постепенное торможение электрона за счет ионизационных потерь, которое и дает в сумме направленное излучение. Эта ошибка вполне естестенна, если принять во внимание сказанное о наших собственных заблуждениях и то, что с теорией явления Коллинз и Рейлинг, по-видимому, были знакомы лишь по статье Черенкова 28 (в ней содержалась только ссылка на теорию, результаты которой были приведены лишь в той мере, как это было необходимо для сравнения с опытом). Эти же авторы, по-видимому, впервые называли излучение «радиацией Черенкова» — термином, ставшим затем общепринятым.

Что касается теории, то первое развитие теория получила в работах В. Л. Гинзбурга ²², давшего квантовое рассмотрение явления (1940 г.) и распространившего теорию на случай оптически анизотропной среды (1940 г.)³⁰. Существенное обобщение было сделано Ферми (1940 г.), рассмотревшим случай среды с поглощением света и показавшим существенность поляризации среды для величины ионизационных потерь ³¹. С этого времени поток теоретических исследований, связанных с излучением Вавилова — Черенкова, продолжается, не затухая, и до сих пор.

Оглядываясь назад, пожалуй, нелишне вспомнить, что излучение быстрого электрона в среде было первым случаем когерентного самосветящегося
источника света, имеющего длину, значительно большую длины волны света.
Теперь в качестве открытия такой когерентности обычно указывают на другой пример — на лазеры, в которых, действительно, она очень наглядна. Между тем эта когерентность была подчеркнута даже самим заглавием статьи
И. Е. Тамма и И. М. Франка *). Позже она была использована при рассмотрении интерференции света от двух тонких радиаторов, через которые пролетает быстрая заряженная частица (1944 г.) 32.

На примере эффекта Вавилова — Черенкова впервые выяснилось, что для процесса излучения оптические свойства среды могут иметь такое же принципиальное значение, как и величины, характеризующие быструю частицу (заряд, скорость). В дальнейшем оказалось, что имеется широкий класс явлений, связанных с радиацией быстрой частицы, которые определяются оптическими свойствами среды или для которых они существенны.

^{*)} Она озаглавлена «Когерентное излучение быстрого электрона в среде».

При разработке теории, как уже упоминалось, вопрос об энергетическом выходе представлялся некоторой трудностью. В самом деле, для данной частоты ω излучение на единицу длины пропорционально $\sin^2\theta_0 = 1-(1/\beta^2n^2)$. При изменении n меняется эффективная величина $\sin^2\theta_0$, и различие выхода должно быть вполне обнаружимо для тех жидкостей; которые исследовал П. А. Черенков. Однако он не наблюдал в пределах ошибок изменения яркости свечения различых жидкостей. Объяснение этого оказалось простым. В действительности в его опытах измерялся не выход излучения, а яркость, наблюдаемая для какого-либо фиксированного направления. Между тем яркость при преломлении из жидкости в воздух меняется (элемент телесного угла при преломлении возрастает в n^2 раз) *).

Коэффициент $1/n^2$, введенный П. А. Черенковым по моему совету в ожидаемую зависимость выхода излучения от n, сделал ее в самом деле малочувствительной к величине показателя преломления для исследованных случаев. В действительности этот эффект несколько сложнее и зависит от условий измерения. В дальнейшем вопрос был полностью выяснен экспериментально.

Измерения с помощью фотометрического шара в самом деле показали на-

личие ожидаемой зависимости от показателя преломления ²⁷.

Я упомянул здесь о роли преломления света потому, что при визуальном наблюдении свечения (например, и сейчас, когда смотрят на свечение воды в реакторе) оно всегда наблюдается вне той среды, в которой возникает. Поскольку не было иных методов, кроме визуального то в свое время это представлялось существенным. В связи с этим в моем обзоре 1946 г. в имеется примечание, сделанное на основе собственного опыта, который, как я надеюсь, никто уже не будет повторять (по крайней мере умышленно): «Исключением является, пожалуй, только свечение, возникающее в жидкости, наполняющей человеческий глаз. Это свечение отчетливо видно если поднести к глазу в темноте препарат испускающий гамма лучи»

Возможно, однако, что такой опыт, хотя и в более безопасном варианте, невольно воспроизводится и теперь. Космонавты наблюдают с закрытыми глазами мгновенные вспышки. света. Не являются ли эти вспышки свечением Вавилова — Черенкова внутри глаза от частиц плотных космических лив-

ней или от космических многозарядных частиц?

Возвращаясь к прошлому, я хотел бы заметить, что одним из предметов моих огорчений, который обсуждался с И. Е. Таммом, было то, что я не видел возможности применения излучения, открытого С. И. Вавиловым и П. А. Черенковым. Был, в частности, рассмотрен вопрос о возможности возникновения этого излучения в атмосфере под действием космических лучей. Оказалось, что вклад этого вида излучения в наблюдаемое свечение ночного неба (исследованием этого свечения я в 1934 г. занимался совместно с П. А. Черенковым и Н. А. Добротиным) очень незначителен. Наблюдать вспышки от космических ливней при малой площади зрачка глаза также было безнадежно (в принципе, возможно, такие вспышки видны в телескоп, но наблюдать их мещает свет звезд, определяющий постоянную компоненту света). Наблюдать космические вспышки стало возможным только много лет спустя, после появления фотоумножителей о чем тогда еще нельзя было мечтать.

Современное положение с применением излучения Вавилова — Черенкова в различных областях физики, а также и значительный вклад, внесенный позже в различные обобщения теории, я не буду рассмотривать. Обзор, как уже отмечалось, посвящен первому основному этапу развития теорети-

ческих представлений об излучении Вавилова — Черенкова.

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна (Московская обл.)

^{*}) В условиях эксперимента П. А. Черенкова угловое распределение излучения должно было быть не изотропным и притом зависящим от n. Кроме того, некоторая доля излучения, также зависящая от n, не выходила из жидкости из-за отражения. Все это усложняло результат.

ПИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Черенков П. А. — ДАН СССР, 1934, т. 2, с. 451.

2. Вавилов С. И.— Ibid., с. 457.

3. Черенков П. А. Докторская диссертация. — Труды ФИАН СССР, 1944, т. 2, № 4.

4. Тамм И. Е., Франк И. М.— ДАН СССР, 1937, т. 14, с. 107.

5. Франк И. М. О когерентном излучении быстрого электрова в среде. — В кн. Проблемы теоретической физики. — М.: Наука, 1972; см. также: Вестн. АН СССР, статью «Восноминания разных лет», и книгу: И. Е. Тамм. Восноминания. — М.: Наука, 1981.

6. So m m e r f e l d A.— Götting. Nachricht., 1904, S. 99, 363; 1905, S. 201.
7. T a m m I. E.— J. Phys. USSR, 1939, v. 1, p. 439; см. также: Т а м м И. Е. Собрание научных трудов.— М.: Наука, 1975.— Т. 1, с. 77.
8. Lord K e l v i n. Nineteenth Century Clouds over Dynamical Theory of Heat and

- Light. Philos. Mag., July 1961.

 9. Франк И. М. УФН, 1946, т. 30, с. 149.

 10. Франк И. М. УФН, 1961, т. 75, с. 231.

 11. Тянкин А. А. УФН, 1974, т. 112, с. 735.

 12. Каізет Т. R. Nature, 1974, v. 247, р. 400.

- 13. Heaviside O.— Electrician, November 23, 1888, p. 83.
 14. Heaviside О.— Phil. Mag., 1889, v. 27, p. 324.
 15. Тамм И. Е. Основы теории электричества.— 8-е изд.— М.: Наука, 1966.
- 16. Mallet M. L. C. R. Ac. Sci., 1928, t. 183, p. 274; 1928, t. 187, p. 222; 1929, t. 188,

р. 445. 17. Черенков П. А.— ДАН СССР, 1937, т. 14, с. 99. 18. Вавилов С. И.— Фронт науки и техники, 1935, № 3, с. 130. 19. Тер-Микаелян М. Л.: — ЖЭТФ, 1955, т. 25, с. 289, 296.

20. Черенков П. А.— ДАН СССР, 1936, т. 3, с. 413.
21. Williams E.— Kgl. Danske Vid. Selskab. Mat.-Fys. Medd., 1935, Nr. 13, р. 4.
22. Гинзбург В. Л.— ЖЭТФ, 1940, т. 10, с. 608.
23. Франк И.М. Нобелевская лекция; см., например: УФН, 1959, т. 68, с. 397; ЖЭТФ, 23. Франк И. М. Нобелевская лекция; см., например: УФН, 1959, т. 08, с. 391; мэтф, 1959, т. 36, с. 1485.
24. Франк И. М.— ЖЭТФ, 1960, т. 38, с. 4751.
25. Черенков П. А.— ДАН СССР, 1938, т. 21, с. 323.
26. Черенков П. А.— Івіd., 1937, т. 14, с. 103.
27. Черенков П. А.— Івіd., 1938, т. 21, с. 117.
28. Čегепкоч Р. А.— Phys. Rev., 1937, v. 52, р. 378.
29. Collins G. B., Reiling V. G.— Phys. Rev., 1938, v. 54, р. 499.
30. Гинзбург В. Л.— ДАН СССР, 1939, т. 24, с. 130; ЖЭТФ, 1940, т. 10, с. 589.
31. Гегші Е.— Phys. Rev., 1940, v. 57, р. 485.
32. Франк И. М.— ДАН СССР, 1944, т. 42, с. 354.

Section 1997 And Section 1997					
,					