

75 ЛЕТ ФИЗИЧЕСКОМУ ИНСТИТУТУ им. П.Н. ЛЕБЕДЕВА РАН

Излучение Вавилова – Черенкова: открытие и применение

Б.М. Болотовский

Излагается история открытия эффекта Вавилова – Черенкова. Рассмотрены некоторые важные приложения этого эффекта.

PACS numbers: 01.30.Bb, **01.65.+g**, 29.40.Ka, 41.60.Bq

DOI: 10.3367/UFNr.0179.200911c.1161

В середине 1932 г. Сергей Иванович Вавилов, незадолго перед этим избранный действительным членом Академии наук СССР, был назначен заведующим Физическим отделом Физико-математического института Академии наук СССР. В то время Физико-математический институт Академии наук находился в Ленинграде (так тогда назывался Санкт-Петербург). Вскоре физический отдел, возглавляемый Сергеем Ивановичем Вавиловым, был преобразован в Физический институт Академии наук и переведён из Ленинграда в Москву, а С.И. Вавилов стал директором Физического института. Это произошло позднее, в 1934 г. По инициативе С.И. Вавилова институту было присвоено имя Петра Николаевича Лебедева, знаменитого русского физика и основателя научной школы, к которой принадлежал и сам Вавилов. Это произошло семьдесят пять лет назад. За прошедшее с тех пор время институт приобрёл широкую известность в отечественном и мировом научном сообществе. В России институт кратко называют ФИАН — по первым буквам названия — Физический институт Академии наук. За рубежом принятое краткое название Lebedev Institute, буквально — Институт Лебедева или Институт имени Лебедева.

С приходом С.И. Вавилова научная жизнь в физическом отделе заметно оживилась. Николай Алексеевич Добротин, старейший сотрудник ФИАНа, который тогда был аспирантом в физическом отделе, вспоминает [1], что эти изменения коснулись также и аспирантов. Дело в том, что не у всех аспирантов была достаточная подготовка по физике и математике. В первую очередь это относилось к тем, кто пришёл в аспирантуру из провинциальных институтов или университетов. Для аспирантов был организован ряд лекционных курсов как по математике, так и по физике. Н.А. Добротин в воспоминаниях приводит впечатляющий список лекторов:

Б.М. Болотовский. Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Ленинский просп. 53, 119991 Москва, Российская Федерация
Тел. (499) 135-85-33
E-mail: bolot@td.lpi.ru

Статья поступила 6 июля 2009 г.

С.Л. Соболев, А.А. Рухадзе, В.Д. Купрадзе, И.Н. Векуа (по математике); В.А. Фок, Ю.А. Крутков, Г.А. Гамов (по физике). Кроме того, все аспиранты были прикреплены к определённым руководителям. Троих аспирантов — Николая Алексеевича Добротина, Павла Алексеевича Черенкова и Антона Никифоровича Севченко — Вавилов принял под свою научное руководство. Впоследствии все трое стали известными физиками, а двое из них — П.А. Черенков и Н.А. Добротин — стали сотрудниками ФИАН со дня основания этого института.

Своим аспирантам Сергей Иванович Вавилов предложил темы для исследования. Н.А. Добротину и П.А. Черенкову были предложены на выбор три темы:

а) люминесценция растворов ураниловых солей под действием гамма-излучения радия;

б) исследование свойств нейтронов;

в) изучение изотопических эффектов.

Н.А. Добротин и П.А. Черенков выбрали себе темы исследований в добром согласии друг с другом: Черенков решил заняться свечением ураниловых солей, а Добротин — рассеянием нейтронов на протонах.

Обращает на себя внимание то обстоятельство, что С.И. Вавилов, выдающийся знаток оптики и люминесценции, которому принадлежат важные вклады в эти разделы физики, все три предложенные своим ученикам темы выбрал такие, которые были связаны с физикой атомного ядра, в то время только ещё стоявшей на пороге своего развития. Всего годом ранее был открыт нейtron, строение атомного ядра ещё только обсуждалось. Лишь немногие тогда предвидели будущее ядерной физики, и в числе этих немногих был Сергей Иванович Вавилов. Несколько годами позднее, уже как директор ФИАН, С.И. Вавилов позаботился о том, чтобы исследования по физике атомного ядра заняли достойное место в научных планах института. Поэтому, когда после окончания Второй мировой войны перед Советским Союзом всталась задача создания ядерного оружия, ФИАН сыграл не последнюю роль в её решении.

В 1934 г. Физический институт им. Лебедева переехал из Ленинграда в Москву. Ученик Вавилова Илья Михайлович Франк в воспоминаниях пишет о том, какая была обстановка в ФИАНе тех лет [2]:

"В молодости мне посчастливилось в том отношении, что уже в студенческие годы я попал в среду, в которой научное влияние воспринималось особенно интенсивно и разносторонне. Я имею в виду научную школу Л.И. Мандельштама, к которой принадлежали мои непосредственные учителя и выдающиеся физики С.И. Вавилов, Г.С. Ландсберг и И.Е. Тамм — учёные, столь различные по своей индивидуальности. Была, однако, особенность, характерная для всей этой школы, — это непрерывное научное общение. Вопросы теории и результаты экспериментов неизменно и постоянно обсуждались, и эти разговоры (они происходили и вне научных семинаров), частые и длительные, никто не считал потерей времени. Первое время мне казалось удивительным, что столь выдающиеся люди часы своего драгоценного времени, в которое могли бы сделать нечто замечательное, тратят на разговоры, в которых немалое внимание уделяется тому, что не получилось или оказалось ерундой. В то время я не понимал и того, что в этих беседах часто излагались новые идеи, задолго до их опубликования, и, разумеется, без опасения, что их опубликует кто-то другой. Притом никто не жалел усилий, чтобы помочь формированию нового в понимании, совершенно не думая о соавторстве. В той моральной атмосфере, которая была свойственна школе Л.И. Мандельштама, это было более чем естественно".

В этом отрывке очень верно изображена замечательная творческая атмосфера, которая существовала в ФИАНе тех лет (в определённой степени она сохранилась и в последующие годы) и которая врезалась в память И.М. Франка. Эта атмосфера в значительной степени была заслугой директора ФИАНа Сергея Ивановича Вавилова. Но, пожалуй, в приведённом отрывке всё же есть одна неточность. И.М. Франк пишет, что С.И. Вавилов принадлежал к научной школе Л.И. Мандельштама. Это не так. С.И. Вавилов был учеником Петра Петровича Лазарева, одного из ближайших сотрудников П.Н. Лебедева. Когда студент С.И. Вавилов выбирал тему для научной работы, он хотел работать в лаборатории П.Н. Лебедева. В то время П.Н. Лебедев уже был серьёзно болен и темы для научных работ давал студентам его ближайший помощник, тогда приват-доцент, а впоследствии академик Петр Петрович Лазарев. С.И. Вавилов получил от П.П. Лазарева тему своего первого исследования и, таким образом, вошёл в научную школу П.Н. Лебедева, а позднее и сам стал главой научной школы. Почему же И.М. Франк отнёс С.И. Вавилова к школе Л.И. Мандельштама, правда, к не менее замечательной научной школе, но всё же не к той, из которой С.И. Вавилов вышел? Причина, возможно, заключается в следующем. С.И. Вавилов как директор института считал своим долгом создать все условия для плодотворной работы сотрудников. Наука, институт, сотрудники — это было для него на первом месте, а себе он сознательно отводил второе место. Молодой И.М. Франк, видя уважительное отношение С.И. Вавилова к Л.И. Мандельштаму, мог причислить Сергея Ивановича к школе Л.И. Мандельштама.

Впрочем, разнесение членов учёного сообщества по научным школам — это задача с неоднозначным решением, особенно если две научные школы тесно взаимодействуют между собой. Так или иначе, И.М. Франк имел основания написать то, что он написал.

Получив тему для исследования, П.А. Черенков стал осваивать новую для него область явлений и методы измерений.

Люминесценция — это холодное свечение вещества. При люминесценции возбуждённые молекулы вещества переходят в основное состояние, излучая видимый свет. Способы возбуждения могут быть самые разные: ультразвук, химические реакции, предварительное облучение вещества видимым светом или γ -лучами. Существенным свойством, определяющим явление люминесценции, является то, что возбуждённая молекула высыпчивается не сразу, а некоторое время пребывает в возбуждённом состоянии. Значения времени жизни возбуждённого состояния для разных люминесцирующих веществ сильно различаются — от суток до стомиллионных долей секунды. Важно, что при люминесценции время пребывания молекулы в возбуждённом состоянии намного превышает период световой волны, излучаемой при высыпчивании. Это обстоятельство отличает люминесценцию от других явлений, в которых имеет место излучение света, — от отражения, преломления, дифракции и других видов излучения. В этих явлениях вторичное излучение, в отличие от такового при люминесценции, прекращается за время, сравнимое с периодом световой волны, после того, как выключено возбуждение.

В учение о люминесценции С.И. Вавилов внёс определяющий вклад. Это ему, в частности, принадлежит определение люминесценции через время высыпчивания (см. выше). Он также вместе со своими сотрудниками разработал экспериментальные методы, позволяющие определить основные характеристики люминесцирующих веществ, включая время высыпчивания.

Свечение, которое должен был наблюдать П.А. Черенков (люминесценция, возникающая в растворах ураниловых солей под действием γ -излучения радия), было очень слабым, несмотря на то, что в измерениях использовалось довольно большое по тем временам количество радия — десятые доли грамма. Интенсивность свечения была близка к порогу зрительного восприятия. В то время ещё не были созданы чувствительные приёмники света, и инструментом для измерения был избран человеческий глаз. Незадолго до прихода П.А. Черенкова в аспирантуру С.И. Вавилов и Е.М. Брумберг разработали метод фотометрии по порогу зрения [3], так называемый метод гашения. Этот метод оказался удобным для исследования слабых излучений, и П.А. Черенков применил его в своих измерениях.

Установка, на которой проводились измерения П.А. Черенкова, изображена на рис. 1. В сосуде 1 находится жидкость, характеристики свечения которой измеряются. Под сосудом помещена ампула с препаратором радия, возбуждающим свечение. В некоторых измерениях ампула помещалась сбоку от сосуда (в тех случаях, когда требовалось определить зависимость поляризации излучения от направления, в котором распространялись γ -лучи). Свет, идущий от жидкости, отражается серебряным зеркалом 2 на круглую диафрагму 3 диаметром 3 мм. Позади диафрагмы помещается оптический клин 4. Оптический клин — это полоска стекла, которая с одного конца прозрачна, т.е. пропускает весь падающий на неё свет. Постепенно прозрачность оптического клина убывала по определённому закону, и другой конец клина уже непрозрачен.

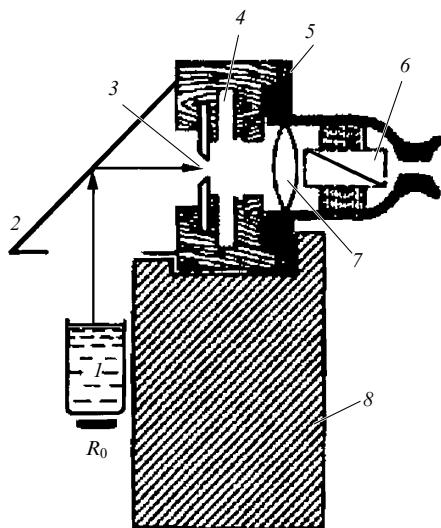


Рис. 1. Установка П.А. Черенкова для измерения яркости свечения жидкостей методом гашения.

Клин перемещается по пазам в направлении плоскости чертежа. Окулярная линза 7 даёт на сетчатке глаза увеличенное изображение диафрагмы.

С помощью этой установки измерялась не только яркость свечения жидкостей под действием гамма-излучения, но и спектральный состав свечения и его поляризация. Для определения спектрального состава использовались цветные светофильтры, которые вдвигались в дополнительный паз 5. Для измерения степени поляризации применялась призма Глана 6. При измерении яркости и спектрального состава свечения призма снималась.

Для защиты наблюдателя от излучения прибор устанавливался на массивном свинцовом блоке 8, который отделял источник от наблюдателя. Эта защита была необходима также и потому, что под действием излучения радия светилась не только исследуемая жидкость, но и прозрачное вещество, заполняющее глазное яблоко наблюдателя.

Измерения проводились следующим образом. Перед каждым сеансом измерения наблюдатель должен был "адаптировать глаз на темноту", для чего необходимо было провести час-полтора в полной темноте. В результате чувствительность глаза возрастала в десятки тысяч раз. Затем начинались измерения. Между источником света и глазом помещался оптический клин, точнее — его прозрачный конец. Клин перемещался до того положения, при котором глаз переставал видеть светящуюся жидкость. При этом оптический клин поглощал избыток яркости источника над порогом зрения. Конечно, яркость источника света должна была превышать порог зрения (десятки фотонов видимого света в секунду). По перемещению оптического клина можно было судить о яркости источника. Чем темнее тот участок клина, который даёт гашение, тем ярче источник. Этот метод фотометрии был основан на том, что порог зрения для одного и того же наблюдателя — величина постоянная.

Все измерения проводились в полной темноте. Наблюдатель не мог даже замерить положение оптического клина, потому что для этого клин надо было освеще-

тить, а посторонний свет сразу же сбивал адаптацию (настройку глаза на темноту). Поэтому запись отсчёта по клину производилась ассистентом. Предварительно наблюдатель накрывал голову плотной светонепроницаемой тканью, затем ассистент включал освещение и записывал отсчёты по оптическому клину. После этого освещение выключалось и измерения продолжались. Между отдельными измерениями делались перерывы в 3–5 мин, чтобы избежать утомления глаза. Общая продолжительность измерений в течение дня не превышала 2–2,5 ч. Иначе глаза утомлялись и появлялись ошибки.

П.А. Черенков быстро освоил процедуру измерений и проводил их очень добросовестно и с максимально возможной в описанных трудных условиях точностью. Ни один из полученных им результатов не оказался впоследствии ошибочным. Ассистентами в его опытах в разное время были Нат Леонидович Григоров — тогда лаборант, а впоследствии профессор Московского университета, известный исследователь в физике высоких энергий; Михаил Николаевич Аленцев, многолетний сотрудник Сергея Ивановича Вавилова, человек, во многих отношениях замечательный — и как физик, и как личность; наконец, случалось и так, что роль ассистента исполнял Илья Михайлович Франк, ученик С.И. Вавилова и к тому времени уже зрелый учёный, несмотря на свою молодость. Участие в качестве ассистента в измерениях П.А. Черенкова привело к тому, что И.М. Франк хорошо знал состояние дел. К этому можно ещё добавить, что в те годы П.А. Черенков и И.М. Франк жили в одной коммунальной квартире, так что интересовавшие их научные проблемы они могли обсуждать и в нерабочее время. Коммунальная квартира, в которой они жили, была уникальной по составу жильцов. В квартире было четыре комнаты. Одну комнату занимала семья будущего Нобелевского лауреата П.А. Черенкова, другую комнату — семья будущего Нобелевского лауреата И.М. Франка. В третьей комнате жил будущий почётный член Датской Академии наук Леонид Васильевич Грошев. В четвёртой комнате оказался человек, не работавший в ФИАНе. В своём роде квартира была не менее замечательна, чем квартира на Садовой, описанная М. Булгаковым в романе "Мастер и Маргарита".

С самого начала работы в измерениях принимал участие и научный руководитель П.А. Черенкова Сергей Иванович Вавилов. В первые дни работы он знакомил своего аспиранта с техникой измерений, проводимых с источниками света малой интенсивности. Затем по мере получения результатов сам проверял и перепроверял их. Раз или два в неделю С.И. Вавилов проводил, если можно так сказать, контрольные измерения. Перед измерениями он, как и требовалось, просиживал полтора часа в полной темноте. Это время его ученики и сотрудники использовали для того, чтобы обсудить насущные дела, выслушать мнение своего руководителя, наметить план дальнейшей работы. Затем "посторонние" изгонялись и Сергей Иванович приступал к измерениям.

П.А. Черенков исследовал свечение, возникающее в растворах урановых солей под действием γ -излучения. Осеню 1933 г. однажды получилось так, что в стаканчике 1 (см. рис. 1) его установки оказался чистый растворитель — серная кислота [1]. И оказалось, что чистая серная кислота светится под действием гамма-

лучей, причём интенсивность свечения была того же порядка величины, что и у раствора ураниловых солей в той же серной кислоте.

П.А. Черенков был обескуражен этим результатом, поскольку наличие фона — свечения чистых растворителей — существенно затрудняло измерения основного явления, которое составляло тему его докторской работы — свечения растворов [4].

Однако С.И. Вавилов, когда узнал о том, что серная кислота светится под действием гамма-лучей, заинтересовался этим и предложил П.А. Черенкову провести исследования с другими растворителями. Оказалось, что и все другие чистые растворители, в частности вода, светятся под действием гамма-лучей, и при этом свечение чистых растворителей не было пренебрежимо малым по сравнению со свечением растворов. Яркость свечения для жидкостей самого разного химического состава оказалась примерно одинаковой. В то время считалось, что чистые растворители не должны светиться под действием гамма-лучей, а если свечение всё же наблюдается, то оно обусловлено примесями, загрязнениями. Но оказалось, что светятся именно чистые растворители. П.А. Черенков трижды последовательно перегонял обычную водопроводную воду и каждый раз после очередной перегонки измерял интенсивность свечения под действием гамма-лучей. Интенсивность свечения оставалась почти неизменной.

Тогда С.И. Вавилов предложил исследовать свечение чистых жидкостей с помощью стандартных измерений, которые были разработаны в его лаборатории для исследования люминесценции. Это были опыты по тушению люминесценции.

Так как для перехода молекулы вещества из возбуждённого состояния в нормальное с излучением света требуется некоторое время, то можно за это время так воздействовать на возбуждённые молекулы, что они перейдут в нормальное состояние без излучения света. Запасённая энергия при этом будет отдана не в виде излучения, а иначе, например, будет передана от возбуждённой молекуле другого сорта, которая уже не излучит свет. Произойдёт тушение люминесценции. Добиться тушения можно несколькими способами. Можно, например, добавить в раствор люминесцирующих веществ особые вещества — тушители. Активными тушителями люминесценции являются азотникислое серебро, йодистый калий, нитробензол. Возбуждённая молекула вещества, сталкиваясь в растворе с молекулой тушителя, передаёт ей свою энергию и переходит в нормальное состояние без излучения света. Ослабить люминесценцию можно и другим путём, например, нагревая светящийся раствор. При нагревании кинетическая энергия молекул среды возрастает, подвижность их увеличивается, они чаще сталкиваются между собой, при столкновении молекула, находящаяся в возбуждённом состоянии, передаёт энергию возбуждения "посторонней" молекуле.

П.А. Черенков начал опыты по воздействию на светящиеся чистые жидкости с помощью обоих упомянутых выше способов (добавление тушителей и нагрев).

Оба эти способы гашения люминесценции основаны на том, что возбуждённое состояние молекул светящегося вещества имеет конечное время жизни. Для гашения люминесценции это время должно быть таким, чтобы возбуждённая молекула успела один или несколько раз

столкнуться с молекулами тушителя либо с "посторонними" молекулами. Изменяя температуру раствора светящегося вещества или концентрацию тушителей, можно определить важнейшую характеристику светящегося вещества — время жизни в возбуждённом состоянии. Измерения яркости свечения в зависимости от концентрации тушителя показали, что при изменении концентрации тушителя в несколько сотен раз яркость свечения почти не менялась. Для сравнения можно указать, что при люминесценции достаточно увеличить концентрацию тушителя в 10–30 раз, чтобы яркость свечения уменьшилась в несколько раз. Оказалось, что и нагревание жидкости не оказывает существенного влияния на яркость свечения.

П.А. Черенков определил также поляризацию и спектр свечения. В пределах тех возможностей, какие могла дать экспериментальная установка, было получено, что электрический вектор направлен преимущественно параллельно пучку гамма-лучей. Измерения спектрального состава показали, что наибольшую яркость свечение имеет в синей части спектра. Если бы наблюдатель мог различить цвет свечения, то оноказалось бы ему голубовато-синим. Но вблизи от порога зрения глаз не различает цветов ("ночью все кошки серы"). Синий цвет нового свечения был установлен с помощью цветных светофильтров.

Первые сообщения об открытии были посланы в журнал *Доклады Академии наук СССР* в конце мая 1934 г. и вышли из печати несколько месяцев спустя. Одно из них было написано П.А. Черенковым [5], другое — его научным руководителем С.И. Вавиловым [6]. Это были две короткие статьи — в *ДАН* публикуются статьи, объём которых не превышает четырёх страниц журнального формата. По существу, обе эти публикации представляли собой две части одного исследования, в котором было обнаружено новое, неизвестное ранее явление — особый вид излучения, названный впоследствии по имени открывших его исследователей, — излучение Вавилова — Черенкова. В статье П.А. Черенкова были приведены результаты опытов с добавлением тушителей люминесценции, с нагревом светящихся жидкостей, а также результаты опытов по измерению свойств нового свечения: яркости, поляризации, спектрального состава. Статья С.И. Вавилова "О возможных причинах синего гамма-свечения жидкостей" следовала непосредственно за статьей П.А. Черенкова. На основании проведённых опытов С.И. Вавилов утверждал, что наблюдённое синее свечение "вообще не может быть каким-либо видом люминесценции, для которой конечная длительность возбуждения является характерным признаком".

Далее в статье С.И. Вавилов высказал соображения о природе синего свечения. Он принял во внимание тот факт, что жёсткие гамма-лучи выбивают электроны из атомов жидкости. Эти электроны, двигаясь в жидкости, как раз и дают то излучение, которое наблюдалось в измерениях. В то время был хорошо известен лишь один вид излучения электрона, движущегося в среде, — тормозное излучение. С.И. Вавилов поэтому предположил, что наблюданное синее свечение — тормозное излучение электронов, выбитых из атомов гамма-лучами радия.

Как выяснилось в дальнейшем, синее свечение не было тормозным излучением, оно имело другую природу. Что же касается утверждения С.И. Вавилова о том, что источником излучения являются электроны, то оно

оказалось совершенно правильным и определило весь ход дальнейших исследований. Сам С.И. Вавилов, хотя и высказал предположения о природе свечения, не считал эти соображения окончательными. Он постоянно обсуждал с коллегами состояние дел, причём эти обсуждения происходили как на семинарах, так и в повседневных беседах. В этих обсуждениях и намечались дальнейшие эксперименты, имевшие целью объяснить природу излучения.

Известно высказывание С.И. Вавилова: "Есть наблюдение и есть эксперимент". Наблюдение описывает внешние стороны явления, не раскрывая его природу. Эксперимент же ставится как раз с целью понять природу наблюдаемых закономерностей.

Подтверждение того, что источником излучения являются именно электроны, было получено следующим образом: вместо источника гамма-излучения был взят источник бета-частиц (электронов) — препарат радия в тонкостенной стеклянной ампуле. Этот источник возбуждал свечение, которое по характеристикам было таким же, как и свечение, возбуждаемое гамма-лучами.

В обсуждениях нового явления был предложен эксперимент, который сыграл решающую роль в объяснении нового свечения. Именно, было предложено поместить стаканчик с облучаемой жидкостью в магнитное поле. Сейчас трудно сказать, кто первым предложил провести этот эксперимент. Разные люди приписывают это предложение разным физикам. Называют В.В. Антонова-Романовского [7], М.А. Леонтовича и И.М. Франка. Повидимому, идея поместить установку в магнитное поле была высказана примерно в одно и то же время разными людьми. Первоначальной целью такого опыта было выяснение связи между поляризацией излучения и направлением движения электронов в жидкости. Магнитное поле отклоняет движущиеся электроны. Если наблюданное излучение действительно испускается электронами, то изменение направления движения должно сопровождаться изменением поляризации излучения. Действительно, оказалось, что при наложении магнитного поля поляризация излучения изменялась. Этот результат стал ещё одним подтверждением того, что источником излучения являются движущиеся в жидкости электроны.

Но опыты с магнитным полем дали ещё один важный и новый результат. Оказалось, что при наложении магнитного поля изменялась не только поляризация излучения. Одновременно изменялась и яркость свечения. Отсюда следовало, что излучение обладало анизотропией. При повороте пучка электронов под действием магнитного поля поворачивалось и угловое распределение излучения. При этом яркость свечения, измеряемая наблюдателем, либо убывала, либо возрастала в зависимости от направления магнитного поля. Как правило, изменение интенсивности под действием магнитного поля было значительным, что говорило о ярко выраженной направленности.

Направленность излучения оказалась тем ключевым фактом, который позволил создать теорию явления. И.М. Франк вспоминает [2]: когда он рассказал И.Е. Тамму о том, что излучение обладает направленностью, И.Е. Тамм сразу же заметил: "Это значит, что происходит когерентное излучение на длине пути электрона, сравнимой с длиной световой волны". Дело в том,

что направленность излучения связана с размерами излучателя. Если размер излучающей области мал по сравнению с длиной излучаемой волны, то ни о какой направленности излучения не может быть и речи. Если же размеры излучающей области велики по сравнению с длиной волны, то излучение становится направленным, причём угловой разброс, ширина углового распределения $\Delta\varphi$ по порядку величины определяется соотношением

$$\Delta\varphi = \frac{\lambda}{L}, \quad (1)$$

где λ — длина излучаемой волны, L — линейный размер излучающей области. Приведённое значение $\Delta\varphi$, по существу, определяет дифракционную расходимость излучения. Чем больше размеры излучающей области (по сравнению с длиной волны), тем меньше угловая расходимость.

Из замечания, сделанного И.Е. Таммом, следовала ещё одна существенная особенность наблюдаемого излучения. Излучение не могло быть результатом взаимодействия движущегося электрона с одним отдельным атомом среды. Действительно, направленность излучения означает, что размеры излучающей области превышают длину волны, а длина волны такова, что на соответствующем расстоянии укладывается большое число атомов (от сотни до тысячи).

И.М. Франк воспринял замечание И.Е. Тамма со всем вниманием и на простой модели рассмотрел, как происходит сложение волн, излучённых движущимся источником из каждой точки своего пути. Он воспользовался наглядной формулировкой принципа Гюйгенса в том виде, в котором она приведена во многих курсах физической оптики (т.е. почти в том же самом виде, как она была изложена в книге Х. Гюйгенса *Трактат о свете*, вышедшей за два с половиной века до описываемых событий). Полученная И.М. Франком простая картина позволила сразу же качественно объяснить угловую направленность нового свечения.

На рисунке 2 изображена картина поля движущегося заряда, которая получилась в результате прямого применения принципа Гюйгенса.

Заряженная частица движется слева направо с постоянной скоростью v по прямой линии O_1O_4 . В момент, изображённый на рисунке, частица находится в точке O_4 . Из тех точек, в которых побывала частица, расходятся сферические волны. Скорость распространения этих волн равна фазовой скорости света c/n , где c — скорость света в вакууме, n — показатель преломления среды. Предположим, что расстояние O_1O_4 заряд пре-

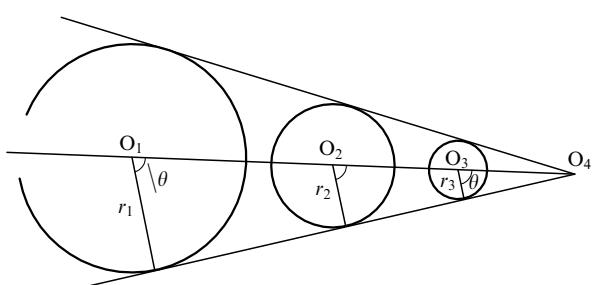


Рис. 2.

одолел за единицу времени, т.е. это расстояние численно равно скорости заряда v . Когда заряд пришёл в точку O_4 , волна, расходящаяся от точки O_1 , ушла от этой точки на расстояние c/n . Волны, излучённые из последующих точек пути, разошлись на меньшие расстояния, поскольку время распространения для них оказывается меньшим — оно пропорционально времени движения заряда от соответствующей точки до точки O_4 . Нетрудно убедиться в том, что все эти сферические волны имеют общую огибающую — коническую поверхность с вершиной в точке O_4 и осью, совпадающей с линией движения заряда. В соответствии с принципом Гюйгенса эта коническая поверхность даёт фронт волны, излучаемой при движении заряда. Направление распространения этой волны определяется нормалью к конической поверхности, а угол θ между нормалью и скоростью заряда определяется соотношением

$$\cos \theta = \frac{c}{nv}, \quad (2)$$

которое нетрудно получить из чертежа, приведённого на рис. 2.

Поскольку $\cos \theta$ для реальных углов θ не превышает единицы, из (2) следует, что коническая волна образуется в случае, если

$$v > \frac{c}{n}, \quad (3)$$

т.е. если скорость частицы превосходит фазовую скорость света. Это видно и из рис. 2: частица оставляет позади все созданные ею волны.

Приведённое выше простое рассмотрение не только объясняло направленность излучения, но и давало для угла излучения θ значение, определяемое формулой (2).

И.М. Франк обсудил с несколькими физиками своё простое рассмотрение, основанное на принципе Гюйгенса. В числе его первых слушателей были Н.А. Добротин, М.А. Марков, М.А. Леонович. Возражений И.М. Франк не встретил, но и большого интереса к его объяснению также проявлено не было (правда, много лет спустя М.А. Леонович полушутя, полусерьёзно говорил, когда речь заходила о И.М. Франке: "Илья — серьёзный мужчина. Его надо слушать. Один раз я его не послушал и упустил Нобелевскую премию"). Сергей Иванович Вавилов, напротив, с интересом и одобрением высушал соображения И.М. Франка и ждал их дальнейшего развития. И, наконец, Игорь Евгеньевич Тамм к мыслям И.М. Франка отнёсся с полной серьёзностью и свойственным ему энтузиазмом. Напомним, что именно первоначальное замечание И.Е. Тамма (о том, что излучение собирается с большого по сравнению с атомными расстояниями пути) послужило исходным пунктом для рассмотрения, проведённого И.М. Франком.

О результатах своих обсуждений с И.М. Франком И.Е. Тамм рассказал Л.И. Мандельштаму, и тот сделал замечание, которое ставило под сомнение изложенную выше качественную картину излучения. Л.И. Мандельштам отметил тот общезвестный факт, что заряд, движущийся в пустоте равномерно и прямолинейно, не излучает. Это следует из уравнений Максвелла. В связи с этим он поставил вопрос, изменится ли результат, если в волновом уравнении заменить скорость света в вакууме скоростью света c/n в среде. Другими словами, если заряд, равномерно движущийся в вакууме, не излучает,

то будет ли излучать заряд, равномерно движущийся в среде? Ответ на этот вопрос тогда не был очевидным.

Осенью 1936 г. после ряда обсуждений с И.М. Франком И.Е. Тамм написал систему уравнений Максвелла для поля точечного заряда, движущегося равномерно и прямолинейно в среде с дисперсией, и получил решение этой системы. И.Е. Тамм немедленно позвонил И.М. Франку и попросил того приехать. И.М. Франк впоследствии вспоминал [2]:

"Я застал Тamma за столом, увлечённого 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 ещё неясно. Помню только, что просидели мы долго.

Домой я возвратился под утро пешком, так как городской транспорт уже закончил (или ещё не начал) свою работу".

Совместная статья И.Е. Тамма и И.М. Франка [8] была представлена в редакцию журнала *ДАН СССР* в первые дни 1937 г. В этой статье была кратко изложена полная теория излучения, обнаруженного П.А. Черенковым. Рассматривалось поле точечного заряда, который движется равномерно и прямолинейно в бесконечной однородной среде с дисперсией, т.е. в такой среде, в которой показатель преломления $n(\omega)$ зависит от частоты ω . Было показано, что если скорость заряда v превосходит фазовую скорость света $c/n(\omega)$, то в среде существует направленное излучение на частоте ω . Излучаемые волны распространяются в направлении, составляющем острый угол θ с направлением движения заряда, причём

$$\cos \theta = \frac{c}{n(\omega)v}. \quad (4)$$

Таким образом, угол θ зависит не только от скорости v заряженной частицы, но и от частоты волны (поскольку показатель преломления $n(\omega)$ зависит от частоты волны ω).

Уже значительно позднее, в середине 1950-х годов, Валентин Петрович Зрелов в Дубне получил красивую фотографию, иллюстрирующую формулу (4). Из формулы (4) видно, что чем больше показатель преломления n , тем больше угол θ , под которым излучается волна. Обычно (при нормальной дисперсии) показатель преломления для синих лучей больше, чем для красных. Поэтому угол θ , под которым излучаются синие волны, оказывается больше, чем угол, под которым излучаются красные волны. И вообще, с возрастанием частоты ω увеличивается и угол θ . Излучение разлагается по спектру.

Схема опыта, проделанного В.П. Зреловым, приведена на рис. 3. На пути протонов с энергией 660 МэВ помещается прозрачная пластинка, проходя через которую, протоны дают излучение. Излучаются волны, фазовая скорость c/n которых меньше скорости протонов. Все углы излучения оказываются заключёнными между двумя коническими поверхностями. Угол раствора внутренней конической поверхности равен углу излучения для волны с наименьшей частотой (красная часть спектра). Тогда как угол раствора внешнего конуса равен углу

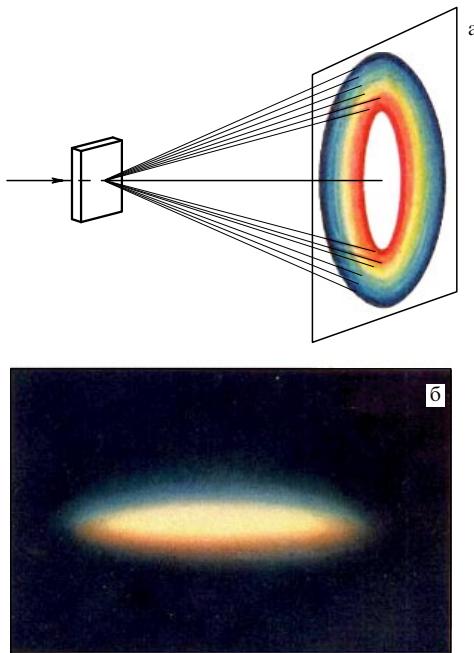


Рис. 3. (а) Схема опыта, проведённого В.П. Зреловым. (б) Излучение Вавилова–Черенкова, сфотографированное на цветную пленку.

излучения для волны с наибольшей частотой (синяя часть спектра). Сделаем здесь оговорку, что в действительности излучение имеет место и в других областях спектра, в частности на радиочастотах. Но речь в данном случае идет о фотографировании, поэтому рассматривается лишь видимая часть спектра. Если поместить фотопластинку перпендикулярно пучку излучающих протонов, то на ней получится окрашенная кольцевая область, причём каждому значению радиуса отвечает свой цвет. На рис. 3б показана часть кольцевой области, сфотографированная на цветную пленку.

Тамм и Франк вычислили интенсивность $I(\omega)$ излучения, т.е. энергию, излучённую электроном за единицу времени на частоте ω на интервал частот $d\omega$:

$$I(\omega) d\omega = v \frac{e^2}{c^2} \left[1 - \frac{c^2}{v^2 n^2(\omega)} \right] \omega d\omega, \quad (5)$$

где e — заряд, $n(\omega)$ — показатель преломления на частоте ω . Выражение (5) имеет физический смысл, если разность в квадратных скобках в правой части (5) положительна. Из этого условия получаем неравенство

$$v > \frac{c}{n(\omega)}, \quad (6)$$

т.е. скорость заряженной частицы должна превышать фазовую скорость волны с частотой ω . Выше это неравенство было получено из других соображений (см. неравенство (3)).

Полные потери энергии на излучение равномерно движущегося заряда в преломляющей среде получаются интегрированием выражения (5) по всем частотам, для которых выполняется неравенство (6):

$$\frac{dW}{dx} = \frac{e^2}{c^2} \int_{(nv/c > 1)} \left[1 - \frac{c^2}{v^2 n^2(\omega)} \right] \omega d\omega, \quad (7)$$

неравенство в скобках у знака интеграла определяет область интегрирования. Формула (7) даёт потери энергии на единицу пути. Что касается спектрального состава излучения, то, как видно из приведённых соотношений, чем больше частота излучения, тем больше энергии излучается на этой частоте. В спектральной области, где имеет место нормальная дисперсия (т.е. показатель преломления возрастает с увеличением частоты), интенсивность излучения также возрастает с увеличением частоты. Если показатель преломления слабо изменяется при изменении частоты, то можно в первом приближении считать, что интенсивность свечения пропорциональна частоте. Поэтому синяя компонента в видимом спектре свечения обладает наибольшей яркостью, что и было установлено в измерениях. И.Е. Тамм и И.М. Франк определили также и поляризацию излучаемых волн. Было показано, что электрический вектор \mathbf{E} излучаемой волны является перпендикулярным волновому вектору \mathbf{k} и лежит в плоскости, содержащей скорость заряда и волновой вектор. Иными словами, если излучается плоская волна вида

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 \exp [i(\mathbf{k}\mathbf{r} - \omega t)],$$

то вектор \mathbf{E}_0 направлен так же, как и вектор

$$\mathbf{v} - \frac{\mathbf{k}(\mathbf{k}\mathbf{v})}{k^2}.$$

Теория И.Е. Тамма и И.М. Франка не только объясняла все наблюдения, опубликованные П.А. Черенковым, но и содержала ряд дополнительных сведений о свойствах нового свечения.

Отметим, что объяснение И.Е. Тамма и И.М. Франка не сразу получило безусловное признание. Действительно, согласно теории свечение излучалось электронами, которые двигались в преломляющей среде со скоростью, превышающей фазовую скорость света. В связи с этим чаще всего при обсуждении теоретических результатов выдвигались два возражения против теории И.Е. Тамма и И.М. Франка.

Первое возражение заключалось в том, что согласно теории относительности ни одно материальное тело не может двигаться со скоростью, превышающей скорость света. Но теория относительности утверждает, что предельной скоростью для материальных тел является скорость света в вакууме $c = 300$ тыс. км с^{-1} . Скорость частицы не может превышать именно эту величину. Фазовая скорость света в среде с коэффициентом преломления n равна c/n , т.е. в n раз меньше, чем скорость света в вакууме. Скажем, для прозрачной пластмассы с коэффициентом преломления $n = 1,5$ фазовая скорость света равна 200 тыс. км с^{-1} . Электрон, обладающий сравнительно невысокой энергией 700 тыс. эВ, уже движется со скоростью, превышающей 200 тыс. км с^{-1} . При более высокой энергии электрона скорость его становится ещё больше, но никогда не превышает скорости света в вакууме, в полном согласии с теорией относительности. Таким образом, скорость частицы может превышать фазовую скорость света в среде, оставаясь при этом меньше, чем скорость света в вакууме.

Второе возражение против объяснения И.Е. Тамма и И.М. Франка исходило из того общезвестного факта, что равномерно движущийся заряд не излучает электромагнитных волн. Ответ на это возражение, по существу,

содержится в построении, приведённом на рис. 2. Как видно из рисунка, заряд излучает волны в каждой точке своего пути. Результирующее поле получается в результате сложения волн, излучённых со всех участков траектории. Такая картина имеет место при любом законе движения заряда, в том числе при равномерном движении. Можно показать, что если заряд равномерно движется в вакууме, то излучение с различных участков траектории взаимно гасится и в результате оказывается, что равномерно движущийся заряд не излучает. То же самое происходит и в том случае, когда заряд движется с постоянной скоростью в преломляющей среде, если эта скорость меньше, чем фазовая скорость света в среде. Но если скорость заряда превосходит фазовую скорость света, то, как видно из рис. 2, излучение с разных участков траектории уже не гасится, а когерентно складывается.

Интересно отметить, что С.И. Вавилов был одним из первых, кто принял теорию И.Е. Тамма и И.М. Франка. Он даже продемонстрировал сотрудникам красивый опыт — гидродинамическую аналогию синего свечения. Мне об этом рассказывал Михаил Николаевич Аленцев. С.И. Вавилов взял плоскую стеклянную кювету, налил в неё воды, а под кюветой поместил лампочку. Когда лампочка загорелась, на потолке получилось увеличенное изображение кюветы. С.И. Вавилов взял остро отточенный карандаш и провёл остриём по поверхности воды в кювете. На потолке было видно, как по воде расходятся две волны, образуя угол, в вершине которого находилось движущееся остриё карандаша.

После появления теории П.А. Черенкова провёл ряд экспериментов по проверке теоретических предсказаний. Измерения оказались в хорошем согласии с теорией. По совету С.И. Вавилова П.А. Черенков изложил в короткой заметке на английском языке основные сведения о новом эффекте — как опытные данные, так и некоторые теоретические результаты — и послал эту заметку в известный лондонский естественно-научный журнал *Nature*. Заметка была озаглавлена "Видимое излучение, возбуждаемое электронами, которые движутся в среде со скоростями, превышающими скорость света". Однако редакция журнала не приняла заметку к публикации. Причиной, без сомнения, явилось недоверие, которое вызывало содержание заметки, начиная с её заголовка. Справедливости ради следует сказать, что недоверие ко всему комплексу проблем, связанных с синим свечением, выражали тогда некоторые известные и уважаемые физики не только за рубежом, но и в Советском Союзе. Сомнение вызывали и методы измерений, и результаты, полученные на пределе видимости, да и теоретические объяснения.

С.И. Вавилов посоветовал П.А. Черенкову отправить отвергнутую заметку в американский физический журнал *Physical Review*. Там она и была напечатана в 1937 г. [9]. В следующем году в том же журнале была опубликована вызванная статьёй П.А. Черенкова [9] работа [10], посвящённая экспериментальной проверке соотношения (2). Американские физики Дж.Б. Коллинз и В.Дж. Рилинг [10] измеряли угловое распределение свечения, которое возбуждалось в тонких пластинках вещества пучком ускоренных электронов с энергией около 2 МэВ. Сила тока в пучке составляла 10 мА. Свечение в опытах Коллинза и Рилинга оказалось намного более ярким, чем в опытах Черенкова. Для того чтобы сфотографировать это свечение, требовалась экспозиция в 10 с (П.А. Чे-

ренкову, когда он фотографировал угловое распределение свечения, требовалась экспозиция в трое суток). Ускоритель оказался намного более мощным источником быстрых электронов, чем малые количества радия, с которыми проводились измерения в ФИАНе. Результаты Коллинза и Рилинга оказались в полном согласии с теорией Тамма и Франка. Однако авторы не поняли (или не приняли) основ теории Тамма и Франка. Вот что они писали в статье: "Электроны при прохождении через среду постоянно теряют энергию. Возникающее в результате ускорение и ответственно за излучение Черенкова". Коллинз и Рилинг считали причиной излучения именно ускорение (точнее, замедление) частицы в среде. Между тем по теории Тамма и Франка излучение возникает при равномерном движении заряда.

Приведённые слова из статьи Коллинза и Рилинга не вызывают удивления, если учесть, насколько новым и необычным был вывод о том, что и равномерно движущийся заряд становится источником излучения при скорости движения, превышающей скорость света. Отметим, кстати, что в работе Коллинза и Рилинга впервые был применён термин "излучение Черенкова". В настоящее время название "излучение Черенкова" или "эффект Черенкова" общепринято на Западе. Что касается России, то ещё при жизни С.И. Вавилова его ученики, сотрудники и вообще те физики, которые были свидетелями открытия, предлагали назвать синее свечение "излучением Вавилова — Черенкова" или "эффектом Вавилова — Черенкова", чтобы подчеркнуть в названии решающую роль С.И. Вавилова в открытии. С.И. Вавилов при жизни неизменно возражал против таких предложений и сам использовал название "свечение Черенкова". Но спустя несколько лет после кончины С.И. Вавилова все же ряд советских физиков стал использовать название "эффект Вавилова — Черенкова". Я думаю, что такое название не умаляет роли П.А. Черенкова и лучше отражает как историю открытия, так и роль С.И. Вавилова. Однако следует иметь в виду, что название "эффект Черенкова" укоренилось в современной физике. Будущее покажет, как в конце концов будет называться свечение, открытое Вавиловым и Черенковым. В конечном счёте дело не в названии. Важно знать, как происходило открытие. Что касается меня, то я применяю термин "излучение Вавилова — Черенкова".

В 1940 г. П.А. Черенков защитил докторскую диссертацию на тему "Излучение электронов при движении их в веществе со сверхсветовой скоростью". На защите Л.И. Мандельштам поставил вопрос, какие области среды — близкие к траектории сверхсветового электрона или удалённые от траектории — ответственны за излучение Вавилова — Черенкова. Ответ на этот вопрос был дан только через семь лет в работе В.Л. Гинзбурга и И.М. Франка [11]. Они рассмотрели движение электрона по оси цилиндрического канала, проделанного в среде с диэлектрической постоянной ϵ_1 и заполненного средой с диэлектрической постоянной ϵ_2 . В.Л. Гинзбург и И.М. Франк точно решили эту задачу, но здесь мы для краткости приведём лишь качественный результат их рассмотрения для случая, когда канал пустой (т.е. $\epsilon_2 = 1$). Пусть скорость электрона превышает фазовую скорость света в среде вне канала. Тогда вне канала существует излучение Вавилова — Черенкова, причём интенсивность этого излучения зависит от радиуса канала R . Для излучения частоты ω зависимость интен-

сивности от радиуса грубо качественно оказывается следующей. Если радиус канала R удовлетворяет неравенству

$$R < \frac{2\pi v}{\omega\sqrt{1 - \beta^2}} \quad (8)$$

(где $\beta = v/c$), то излучение мало отличается от того, какое было бы в сплошной среде без канала. Если выполняется обратное неравенство, то интенсивность излучения Вавилова–Черенкова быстро убывает с возрастанием радиуса канала. Предполагается, что скорость v электрона, который движется по оси канала, превосходит фазовую скорость света во внешней среде. Поэтому для качественной оценки в числителе правой части неравенства (8) можно заменить скорость электрона v скоростью света в вакууме c . Величина $\lambda = (2\pi c/\omega)$ — длина волны в вакууме, отвечающая излучению с частотой ω . Величина $\gamma = (1 - \beta^2)^{-1/2}$ — так называемый лоренц-фактор. Эта величина пропорциональна энергии частицы. Таким образом, критическим параметром для радиуса канала можно считать величину $\lambda\gamma$. При больших энергиях частицы $\lambda\gamma$ становится во много раз больше длины волны. Это означает, что в формировании излучения Вавилова–Черенкова основную роль играют области среды, удалённые от траектории заряда, причём удаление возрастает пропорционально энергии частицы.

В годы, когда было сделано открытие излучения Вавилова–Черенкова и дано его объяснение, ещё не рассматривались его возможные применения. Действительно, излучение было настолько слабым, что само наблюдение этого излучения было сопряжено с большими трудностями. Положение изменилось, когда были созданы фотоумножители — приборы, позволяющие уверенно регистрировать даже столь слабое излучение, как излучение Вавилова–Черенкова от единичной заряженной частицы. В 1947 г., через 10 лет после того, как Тамм и Франк дали полную теорию эффекта, в *Physical Review* было опубликовано предложение Геттинга [12] использовать фотоумножители для регистрации излучения Вавилова–Черенкова. С этого предложения и отсчитывается применение черенковских счётчиков. Простейшие из предложенных Геттингом устройств изображены на рис. 4.

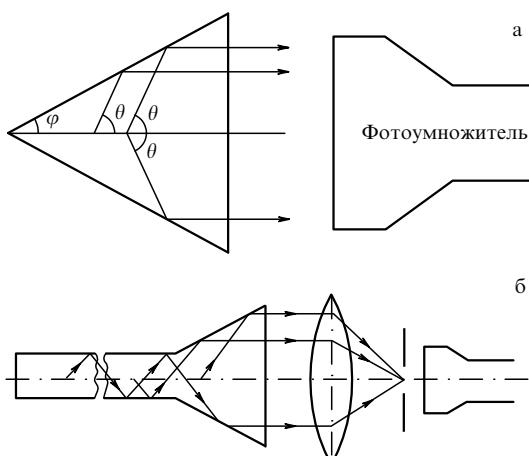


Рис. 4.

Быстрая заряженная частица, двигаясь вдоль оси конуса, выточенного из прозрачной пластмассы, даёт излучение Вавилова–Черенкова (рис. 4а). Угол при вершине конуса выбран таким образом, что излучение, испытав полное внутреннее отражение от конической поверхности, падает по нормали на плоское основание конуса и выходит в виде параллельного пучка лучей. Этот пучок фокусируется линзой на фотокатод фотоумножителя. Та часть черенковского счётчика, в которой генерируется излучение, называется радиатором. На рисунке 4а изображён конический радиатор.

На рисунке 4б изображён радиатор, состоящий из цилиндрической части и примыкающей конической части. Такой радиатор также даёт параллельный пучок лучей, причём потери энергии заряда на излучение Вавилова–Черенкова в таком радиаторе могут быть значительно больше, чем в коническом, потому что путь заряда в цилиндрической части радиатора достаточно велик. Следовательно, и энергия, попадающая на фотоумножитель, тоже превышает энергию вспышки от конического радиатора, что облегчает регистрацию.

Подчеркнём, что, поскольку мы рассматриваем историю открытия, здесь обсуждаются первые простейшие конструкции черенковских счётчиков. Но уже эти простейшие варианты обладают рядом преимуществ по сравнению, скажем, со счётчиком Гейгера. Например, если сработал счётчик Гейгера, то наблюдатель знает, что рабочий объём этого счётчика пересекла заряженная частица. Но наблюдатель не может установить, в каком направлении она пролетела — справа налево или слева направо, или сверху вниз, или ещё в каком-либо направлении. Тогда как черенковский счётчик, благодаря направленности излучения Вавилова–Черенкова, не только регистрирует прохождение частицы, но и определяет направление её движения. Скажем, если из основания радиатора, изображённого на рис. 4а, выходит параллельный пучок лучей, то это означает, что заряженная частица пролетела через радиатор в направлении от вершины к основанию конуса.

Второе преимущество черенковского счётчика состоит в его высоком быстродействии, на много порядков превышающем быстродействие счётчика Гейгера. Заряженная частица, проходя через рабочий объём счётчика Гейгера, возбуждает газовый разряд. Этот разряд и позволяет регистрировать прошедшую частицу. Длительность разряда порядка 10^{-4} с. Если за время разряда через счётчик пролетит другая частица, то счётчик зарегистрирует две частицы как одну. В черенковском счётчике заряженная частица создает вспышку излучения, длительность которой на много порядков меньше, чем длительность разряда в счётчике Гейгера.

Может быть, сравнивая черенковский счётчик со счётчиком Гейгера, следовало говорить не о преимуществах одного из них по сравнению с другим, а о их различии. Каждый счётчик имеет свою область применимости, и в пределах этой области широко используется. Например, черенковский счётчик не может регистрировать частицы, скорость которых меньше фазовой скорости света в веществе радиатора, а счётчик Гейгера такие частицы регистрирует.

После предложения Геттинга техника черенковских счётчиков стала быстро развиваться. Появились счётчики, предназначенные для определения скорости частицы, её заряда, полной энергии и других характеристик.

Черенковские счётчики быстро вошли в арсенал физики высоких энергий.

В 1958 г. И.Е. Тамму, И.М. Франку и П.А. Черенкову была присуждена Нобелевская премия по физике — "за открытие и объяснение эффекта Черенкова". В Советском Союзе ценность открытия была признана значительно раньше: в 1946 г. С.И. Вавилов, И.Е. Тамм, И.М. Франк и П.А. Черенков получили Сталинскую премию I степени — в то время высший государственный знак научного признания.

* * *

Интересно здесь отметить, что свойства излучения Вавилова — Черенкова дают в руки исследователей одну уникальную возможность: можно построить такой черенковский счётчик, который одновременно будет служить и местом, в котором протекает ядерная реакция, и средством для её регистрации.

В начале 60-х годов XX в. в Физическом институте им. П.Н. Лебедева АН СССР был создан большой черенковский счётчик. На нём исследовалось рождение мю-мезонов под действием протонов высокой энергии, входящих в состав космического излучения. Счётчик был создан коллективом сотрудников лаборатории космических лучей под руководством А.Е. Чудакова. Радиатором в этом счётчике служила вода. Она заполняла огромный резервуар, сваренный из листовой стали. По форме резервуар представлял собой усечённый конус (рис. 5). Диаметр основания усечённого конуса 6,5 м, диаметр верхнего основания 2,5 м, высота 5 м. Для регистрации света применялись 16 фотоумножителей, размещённых симметрично относительно оси конуса по

его поверхности. Внутренняя поверхность резервуара была выкрашена белой краской, для того чтобы излучение, не попавшее сразу на фотоумножители, не поглощалось на стенах. Вода, наполнявшая установку, подвергалась специально очистке с той же целью — свести к минимуму поглощение излучения Вавилова — Черенкова.

Частица высокой энергии, попав в объём такого счётчика, создавала в нём электронно-фотонную или электронно-ядерную лавину. По интегральному свечению Вавилова — Черенкова от продуктов реакции можно было судить об энергии первичной частицы.

Этот счётчик проработал несколько лет. С его помощью, в частности, исследовалось множественное рождение мезонов в ядерных взаимодействиях при высоких энергиях [13]. В середине 1960-х годов счётчик был демонтирован. В то время это был самый большой в мире черенковский счётчик.

* * *

В 1996 г. в Японии вошёл в строй гигантский черенковский детектор. Он размещён в горных выработках на километровой глубине под землёй в районе Камиока, на расстоянии около 300 км к северу от Токио. Детектор представляет собой цилиндрический бак, сваренный из нержавеющей стали (рис. 6). Высота бака 41,4 м, диаметр 39,3 м. Бак вмещает 50 000 т воды, причём вода подвергается тщательной очистке, для того чтобы свести к минимуму поглощение и рассеяние в ней света. На стенах, а также на нижнем и верхнем основаниях бака расположены 11 146 фотоумножителей.

Этот детектор получил название "Супер-Камиоканде" ("Super-Kamiokande"). Последние три буквы — NDE — означают Nuclear Decay Experiment. Дело в том, что с помощью этого детектора предполагалось провести поиски распада протона. Такие поиски ведутся, но пока они не дали определённого результата. Однако детектор "Супер-Камиоканде" позволил получить важные результаты (сделать важные открытия) в физике нейтрино. Нейтрино — это во многом ещё загадочная частица, которая исключительно слабо взаимодействует

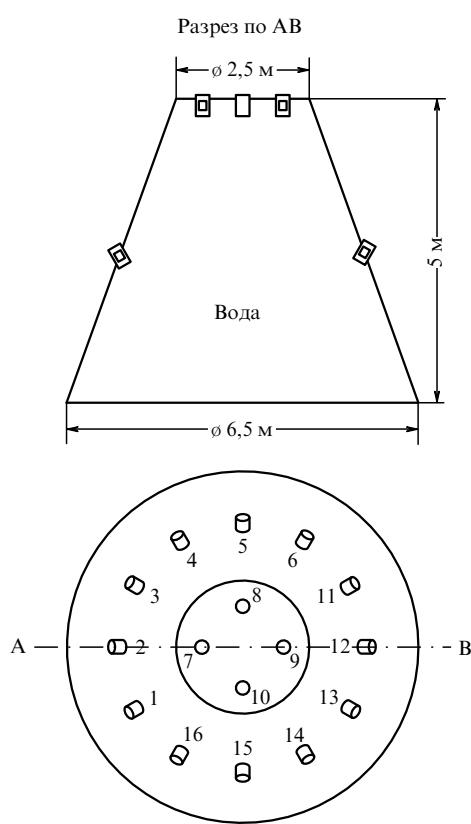


Рис. 5. Большой черенковский счётчик полного поглощения.

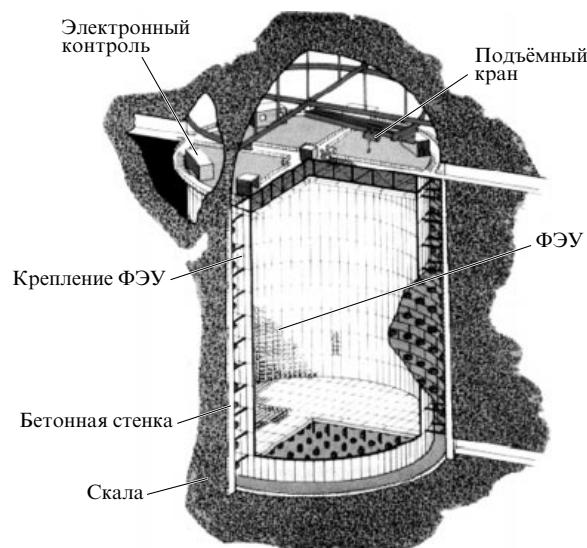


Рис. 6. Водный черенковский детектор, 50 тыс. тонн воды, 11200 фотоумножителей (ФЭУ).

с другими элементарными частицами. Гигантский размер счётчика позволяет регистрировать отдельные и не очень частые акты взаимодействия нейтрино с протонами и нейтронами в атомных ядрах элементов, составляющих воду (кислород и водород). При соударении энергичного нейтрино с нуклоном рождаются быстрые заряженные частицы. Проходя через толщу воды, наполняющей счётчик, быстрые частицы дают излучение Вавилова – Черенкова. Оно улавливается фотоумножителями, расположеннымими на внутренней поверхности бака, и детально анализируется. Этот анализ позволяет с хорошей точностью определить тип нейтрино, вызвавшего реакцию, а также энергию и направление импульса. Как известно, существуют три типа нейтрино — электронное, мю-мезонное (мюонное) и тау-мезонное (таонное), соответственно трём разным видам ядерных реакций, в которых эти частицы рождаются или поглощаются.

Измерения, проведённые на детекторе "Супер-Камиоканде" [14], дали убедительные доказательства в пользу нейтринных осцилляций — явления, которое заключается в том, что нейтрино изменяется "на лету" — нейтрино одного типа переходит в нейтрино другого типа. Нейтринные осцилляции были предсказаны Б. Понтекорво в 1957 г.

Детектор "Супер-Камиоканде" является одновременно и местом, в котором происходят ядерные реакции, и средством для их обнаружения.

Добавим ещё, что с помощью больших черенковских детекторов, таких как "Супер-Камиоканде" и ранее созданный детектор "Камиоканде", были зарегистрированы нейтрино, приходящие от далёких космических объектов. В 1987 г. были зарегистрированы нейтрино, порождённые при вспышке сверхновой в Большом Магеллановом Облаке [15]. Теперь с полным основанием можно говорить о рождении нейтринной астрономии.

* * *

Свечение различных жидкостей под действием гамма-лучей наблюдалось и ранее, до опытов П.А. Чerenкова. В частности, такое свечение наблюдал французский физик М. Малле в 1926–1929 гг. и даже сфотографировал его спектр [16]. Но Малле считал, что наблюдаемое им свечение представляет собой люминесценцию и никаких дальнейших исследований не провёл. Понадобились опыт и знания С.И. Вавилова для того, чтобы установить, что обнаруженное П.А. Чerenковым свечение — не люминесценция, а свечение иной природы.

Что касается теории И.Е. Тамма и И.М. Франка, объясняющей излучение Вавилова – Черенкова, то и здесь можно указать на предшествующие работы, содержащие, конечно, не столь полное объяснение, но некоторые, порой весьма близкие, физические идеи. Так, ещё в 1904 г. известный немецкий теоретик Арнольд Зоммерфельд вычислил поле заряженной частицы, которая движется в вакууме с постоянной скоростью, превосходящей скорость света [17]. Зоммерфельд показал, что в этом случае происходит излучение направленных электромагнитных волн. Однако вскоре была создана специальная теория относительности, движение материальных тел со сверхсветовой скоростью оказалось невозможным, и работа А. Зоммерфельда была забыта. Когда И.Е. Тамм и И.М. Франк обсуждали свою работу с А.Ф. Иоффе, тот вспомнил о работе А. Зоммерфельда и

сообщил о ней Тамму и Франку. А. Зоммерфельду был послан оттиск статьи Тамма и Франка. Авторы получили от него благодарственное письмо. Этот обмен письмами произошёл ещё до начала Второй мировой войны. Позднее Зоммерфельд включил в свой учебник *Оптика* параграф под названием "Излучение Черенкова".

У Тамма и Франка был ещё один предшественник, который подошёл к их теории достаточно близко, даже ближе, чем А. Зоммерфельд. Однако его работы находились в забвении ещё большее время, чем работа А. Зоммерфельда. О них вспомнили только в середине 70-х годов прошлого века. Автором этих работ был знаменитый английский физик, математик и инженер Оливер Хевисайд. В 1889 г. Хевисайд исходя из уравнений Максвелла вычислил поле заряженной частицы, проходящей с постоянной скоростью через среду с заданной диэлектрической постоянной (или, что то же самое, через среду с заданным коэффициентом преломления) [18]. Из его расчётов следовало, что если скорость частицы превосходит скорость света в среде, то частица излучает электромагнитные волны. Хевисайд определил угол излучения, и оказалось, что угол определяется соотношением (2). Он также определил спектр излучения. Теория Хевисайда не была такой полной, как теория Франка и Тамма. В частности, Хевисайд не учитывал дисперсию, поэтому выражение для полных потерь на излучение у него расходилось. Кроме того, Хевисайд не считал скорость света в вакууме пределом для скоростей всех материальных тел. В его теории, например, заряженная частица могла двигаться в преломляющей среде со скоростью, превышающей скорость света в вакууме. Но во многих отношениях его теория близка к теории Франка и Тамма.

Работа О. Хевисайда была забыта ещё более прочно, чем работа А. Зоммерфельда. Объяснялось это тем, что Хевисайд намного опередил своё время. В частности, он, как было сказано, рассматривал поле точечной заряженной частицы, которая двигалась в преломляющей среде с постоянной скоростью. Но в то время ещё не была открыта ни одна заряженная частица. Не был открыт даже электрон, не говоря уже о других частицах, несущих электрический заряд. Далее, Хевисайд рассматривал среди прочих случаев, когда скорость заряженной частицы превосходила скорость света в среде. Такие скорости для материальных тел в то время казались недостижимыми. Первые быстрые частицы были получены при распаде радиоактивных элементов, но сама радиоактивность была открыта только через десять лет. Поэтому работы Хевисайда казались далёкими от реальности и были быстро забыты. О них вспомнили много лет спустя, в середине 70-х годов XX в.

Напротив, перед Таммом и Франком, когда они заились целью объяснить свечение Вавилова – Черенкова, стояла задача объяснить реально наблюдавшийся физический эффект.

Помню, когда стало известно об этих давних работах Хевисайда, Илья Михайлович Франк отдыхал под Москвой в академическом санатории "Узкое". По его просьбе я взял в библиотеке ФИАН третий том книги О. Хевисайда *Electromagnetic Theory* — часть тома была посвящена излучению сверхсветовых источников — и отвёз ему. Прочитав книгу, он вернул её мне со словами: "Это большая часть — иметь такого предшественника".

* * *

За истекшие годы излучение Вавилова–Черенкова нашло множество приложений. Большое развитие получила техника черенковских счётчиков. Теперь это — сложные приборы, соединяющие в себе достижения оптики, электроники и радиофизики. Они с большой эффективностью регистрируют быстрые заряженные частицы, проходящие через радиатор, по излучению Вавилова–Черенкова. Но сейчас появилась возможность создать и такие детекторы, которые не надо помещать на пути быстрых частиц, — эти детекторы способны регистрировать потоки частиц на расстоянии. Идея создания таких детекторов принадлежит Г.А. Аскарьяну [19, 20]. Предположим, что электрон с большой энергией попадает в земную атмосферу из космического пространства. На своём пути он взаимодействует с ядрами атомов, составляющих атмосферу. В поле ядра электрон даёт тормозное излучение, причём энергия излучённого фотона имеет тот же порядок величины, что и энергия электрона. Затем этот фотон, взаимодействуя с ядром или с электроном другого атома, рождает пару электрон–позитрон. Каждая из частиц, составляющих пару, также излучает тормозные кванты — фотоны, так сказать, второго поколения. Эти фотоны второго поколения в свою очередь дают пары электрон–позитрон, и т.д. Развивается так называемый электронно-фотонный ливень.

Считалось, что электронно-фотонный ливень не даёт электромагнитного излучения, так как ливень электрически нейтрален, в нём электронов столько же, сколько и позитронов. Аскарян в работе [19] и последующей работе [20] показал, что в действительности ливень содержит избыток электронов. Происходит это потому, что электроны и фотоны, составляющие ливень, на своём пути ионизируют атомы воздуха (атомы газов, входящих в состав воздуха), выбивая из них электроны, и эти электроны движутся в стволе ливня. Поэтому ливень оказывается отрицательно заряженным, причём избыток электронов составляет несколько десятков процентов от полного числа частиц в ливне. Таким образом, ливень может стать источником излучения Вавилова–Черенкова в атмосфере. Излучение происходит на тех частотах, на которых фазовая скорость электромагнитных волн меньше, чем скорость частиц ливня. Аскарян оценил интенсивность излучения Вавилова–Черенкова, созданного ливнем на радиочастотах (скажем, на длине волны 10 см). Оказалось, что эта интенсивность значительно превосходит собственные шумы радиоприёмных устройств. Таким образом появилась возможность регистрировать космические ливни по их излучению (в том числе, по излучению Вавилова–Черенкова) на радиочастотах. А это означает, что отпадает необходимость помещать регистрирующее устройство в ствол ливня — оно может находиться на значительном расстоянии от ливня. В последние годы регистрацию ливней по излучению Вавилова–Черенкова на радиочастотах стали вести многие радиоастрономические станции.

До сих пор, говоря о приложениях, использующих излучение Вавилова–Черенкова, мы рассматривали только физику высоких энергий. В действительности идеи, положенные в основу объяснения этого эффекта, нашли широкое применение во многих разделах физики. Основная из этих идей — идея синхронизма волны и

частицы — лежит в основе ряда радиофизических приложений, на основе этой идеи объясняется затухание волн в плазме без столкновений, а также ряд акустических и гидродинамических эффектов. Ввиду ограниченности объёма статьи мы не можем говорить здесь об этом подробнее.

Сравнительно недавно излучение Вавилова–Черенкова оказалось причастным к объяснению одного любопытного явления. У всех глубоководных рыб есть глаза, но до последнего времени было непонятно, почему у них сохранился орган зрения. Дело в том, что морская вода имеет большую электрическую проводимость, а отсюда следует, что дневной свет в морской воде быстро поглощается с увеличением глубины и на глубине в несколько сотен метров должна царить полная темнота. В такой темноте глаза не нужны, по законам эволюции орган зрения должен был бы отмереть. Однако оказывается, что на больших глубинах нет полной темноты. В морской воде растворён радиоактивный изотоп кальция, испускающий быстрые электроны. Эти электроны вызывают свечение Вавилова–Черенкова в морской воде, и поэтому на большой глубине царят сумерки — "сумерки Вавилова–Черенкова". Освещение на больших глубинах оказывается таким, что зрение рыбам вполне может пригодиться [21].

В конце 1960-х – начале 1970-х годов было опубликовано несколько работ, в которых обсуждались вопросы воздействия быстрых частиц, входящих в состав космического излучения, на зрительный аппарат. Вопросы эти возникли в связи с развитием космонавтики, точнее в связи с космическими экспедициями "Аполлон-11", "Аполлон-12" и "Аполлон-13", ставящими целью высадку человека на Луну. Экспедиция "Аполлон-11" состоялась в июле 1969 г. На Луну высадились астронавты Н. Армстронг и М. Коллинз, а Эдвин Олдрин остался в командном модуле, который вращался вокруг Луны. Пребывание астронавтов на Луне длилось около суток, и всё это время Э. Олдрин находился в кабине. Значительную часть этого времени кабина была изолирована от внешнего света. По возвращении на Землю Э. Олдрин сообщил, что он наблюдал в темноте точечные кратковременные вспышки белого цвета. Такие же вспышки видел и Н. Армстронг. Астронавты — участники последующих экспедиций также наблюдали кратковременные вспышки, находясь в темноте или закрывая глаза [22]. Возможные причины таких вспышек были обсуждены в работе [23]. Авторы рассматривают две возможных причины: ионизацию, производимую первичными или вторичными частицами космического излучения в ретине глаза или вблизи от неё, и (или) излучение Вавилова–Черенкова от быстрых частиц, проходящих через прозрачное вещество, заполняющее глазное яблоко. Отметим в связи с этим, что свечение под действием радиоактивного излучения прозрачного вещества, заполняющего глазное яблоко, было известно задолго до космических полетов.

Список литературы

1. Добротин П А "В "доисторическом" ФИАНе", в кн. *Павел Алексеевич Черенков. Человек и открытие* (Отв. ред. и сост. А Н Горбунов, Е П Черенкова) (М.: Наука, 1999) с. 171
2. Франк И М "О когерентном излучении быстрого электрона в среде", в сб. *Проблемы теоретической физики. Памяти Игоря Евгеньевича Тамма* (Отв. ред. В И Ритус) (М.: Наука, 1972) с. 350

3. Брумберг Е М, Вавилов С И "Фотометрия слабых источников излучения". *Изв. АН СССР, ОМЕН, Сер. 7* 919 (1933)
4. Добротин Н А, Фейнберг Е Л, Фок М В *Природа* (11) 58 (1991)
5. Черенков П А "Видимое свечение чистых жидкостей под действием γ -радиации" *ДАН СССР* **2** (8) 451 (1934)
6. Вавилов С И "О возможных причинах синего γ -свечения жидкостей" *ДАН СССР* **2** (8) 457 (1934)
7. Григоров Н Л "Как я помогал П. А. Черенкову в лаборатории", в кн. *Павел Алексеевич Черенков. Человек и открытие* (Отв. ред. и сост. А Н Горбунов, Е П Черенкова) (М.: Наука, 1999) с. 174
8. Тамм И Е, Франк И М "Когерентное излучение быстрого электрона в среде" *ДАН СССР* **14** 107 (1937); см. также перепечатку этой работы: *УФН* **93** 388 (1967)
9. Čerenkov P A "Visible radiation produced by electrons moving in a medium with velocities exceeding that of light" *Phys. Rev.* **52** 378 (1937)
10. Collins G B, Reiling V G "Čerenkov radiation" *Phys. Rev.* **54** 499 (1938)
11. Гизбург В Л, Франк И М "Излучение электрона и атома, движущихся по оси канала в плотной среде" *ДАН СССР* **56** 699 (1947)
12. Getting I A "Aproposed detector for high energy electrons and mesons" *Phys. Rev.* **71** 123 (1947)
13. Вавилов Ю Н, Пугачева Г И, Федоров В М "О мю-мезонных группах вблизи от оси широких атмосферных ливней" *ЖЭТФ* **44** 487 (1963) [Vavilov Yu N, Pugacheva G I, Fedorov V M " μ -meson groups near the axis of board atmospheric showers" *Sov. Phys. JETP* **17** 333 (1963)]
14. Полный список публикаций по исследованию нейтрино на установке "Kamiokande" имеется в интернете по адресу: <http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/pub/index.html>
15. Кошиба М "Рождение нейтринной астрофизики" (Нобелевская лекция) *УФН* **174** 418 (2004); Koshiba M "Nobel Lecture: Birth of neutrino astrophysics" *Rev. Mod. Phys.* **75** 1011 (2003)
16. Mallet L *C.R. Acad. Sci. Paris* **183** 274 (1926); **187** 222 (1928); **188** 445 (1929)
17. Sommerfeld A "Simplified deduction of the field and the forces of an electron, moving in a given way" *Proc. Amsterdam Acad.* **7** 346 (1904)
18. Heaviside O "The electro-magnetic effects of a moving charge" *Electrician* 83 (1888); эта работа воспроизведена в книге: Heaviside O *Electrical Papers Vol. 2* (London: Macmillan, 1892) p. 492
19. Аскарьян Г А "Избыточный электронный заряд электронно-фотонного ливня и когерентное радиоизлучение от него" *ЖЭТФ* **41** 616 (1961) [Askar'yan G A "Excess negative charge of an electron-photon shower and its coherent radio emission" *Sov. Phys. JETP* **14** 441 (1962)]
20. Аскарьян Г А "Когерентное излучение от космических ливней в воздухе и плотных средах" *ЖЭТФ* **48** 988 (1965) [Askar'yan G A "Coherent radio emission from cosmic showers in air and dense media" *Sov. Phys. JETP* **21** 658 (1965)]
21. Бабошин Ю Б, Лопатников С Л, Попов Н И "Информационная значимость собственного черенковского свечения морской воды для глубоководных животных" *ДАН СССР* **290** 991 (1986)
22. Fazio G G, Jelley J V, Charman W N "Generation of Cherenkov light flashes by cosmic radiation within the eyes of the Apollo astronauts" *Nature* **228** 260 (1970)
23. Tobias C A, Budinger T F, Lyman J T "Radiation-induced light flashes observed by human subjects in fast neutron, X-ray and positive pion beams" *Nature* **230** 596 (1971)

Vavilov – Cherenkov radiation: discovery and applications

B.M. Bolotovsky

*P.N. Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences
Leninskii prosp. 53, 119991 Moscow, Russian Federation
Tel. (7-499) 135-85 33
E-mail: bolot@td.lpi.ru*

An account is given of how the Vavilov – Cherenkov effect was discovered. Some important applications of the effect are described.

PACS numbers: 01.30.Bb, **01.65.+g**, 29.40.Ka, 41.60.Bq

DOI: 10.3367/UFNr.0179.200911c.1161

Bibliography — 23 references

Received 6 July 2009

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **179** (11) 1161 – 1173 (2009)

Physics – Uspekhi **52** (11) (2009)