

ПЕРЕХОДНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ И ЭФФЕКТ ВАВИЛОВА—ЧЕРЕНКОВА**И. М. Франк****§ 1. ВВЕДЕНИЕ**

Открытие эффекта Вавилова — Черенкова, а затем разработка его теории привели к появлению ряда исследований, посвященных связанным с ним вопросам. Были рассмотрены различные случаи эффекта Вавилова — Черенкова, выходящие за рамки его первоначальной теории. Таковы, например, теория излучения быстрой частицы в плазме, помещенной в магнитном поле, эффект Вавилова — Черенкова в кристаллах и т. д. В значительном числе других работ рассматривался и ряд явлений, смежных с эффектом Вавилова — Черенкова. Характерная особенность всех этих исследований состоит в том, что преобладающее их число представляет собой теоретические работы. В настоящее время рассмотрено большое число ожидаемых явлений и их особенностей, причем наблюдение многих из них лежит в пределах экспериментальных возможностей.

Вместе с тем, если не говорить о черенковских счетчиках, т. е. о применениях эффекта Вавилова—Черенкова, а об исследовании самого явления, то за последние 20 лет лишь немного прибавилось к первоначальным результатам П. А. Черенкова.

Аналогичное положение имеет место и в вопросах, смежных с эффектом Вавилова — Черенкова. Так, лишь в самое последнее время начато экспериментальное изучение так называемого переходного излучения, о котором будет сказано подробнее в этом сообщении.

Это излучение возникает при пересечении быстродвижущейся заряженной частицей границы двух сред, обладающих различными оптическими свойствами. Теория переходного излучения была развита в работе, выполненной еще в 1944 г. В. Л. Гинзбургом и автором доклада. Тогда же это ожидаемое явление получило свое название, теперь ставшее общепринятым. Различным вопросам теории переходного излучения было посвящено в дальнейшем значительное количество работ. Их число особенно увеличилось в последнее время. Однако лишь сейчас стало возможным утверждать, что правильность некоторых из основных предсказаний теории подтверждена опытом.

**§ 2. КРУГ ЯВЛЕНИЙ, СВЯЗАННЫХ С ЭФФЕКТОМ ВАВИЛОВА—ЧЕРЕНКОВА.
АНАЛОГИИ МЕЖДУ РАЗЛИЧНЫМИ ВОЛНОВЫМИ ПРОЦЕССАМИ**

Прежде чем перейти к изложению проблем, связанных с переходным излучением, следует остановиться на особенностях всего круга явлений, центральным пунктом которого является, конечно, эффект Вавилова — Черенкова. В связи с этим интересно обратиться к аналогии между излучением Вавилова — Черенкова и так называемыми волнами Маха в акустике.

Этой аналогией обычно пользуются для того, чтобы в популярной форме пояснить сущность эффекта Вавилова — Черенкова. Эта аналогия действительно заслуживает внимания. Во многих проявлениях волн такой совершенно различной природы, как волны акустические и электромагнитные, имеется ряд существенных общих черт, характерных для любого волнового процесса. Выяснение этой общности и той грани, с которой начинаются различия, характерные для данного вида волн или для данной области частот этих волн, существенно при выяснении механизма ряда явлений. Известно, что таким методом широко пользовался П. Н. Лебедев при изучении светового давления.

Работы Лебедева, несомненно, оказали влияние на С. И. Вавилова, который был его учеником. В связи с этим нельзя не отметить, что идея постановки работ, приведших к открытию эффекта Вавилова — Черенкова, весьма напоминает лебедевскую. В самом деле, С. И. Вавилов считал необходимым сопоставить свойства люминесценции растворов ураниловых солей при возбуждении ее — обычным светом, рентгеновскими лучами и γ -лучами радиоактивных веществ. При этом, однако, открытие эффекта Вавилова — Черенкова не было непосредственно связано с этой постановкой вопроса. Оно было сделано П. А. Черенковым попутно при исследовании люминесценции под действием γ -лучей. Вместе с тем сущность эффекта Вавилова — Черенкова, как стало очевидно впоследствии, может быть понята на основе представлений Лебедева, так как она непосредственно связана со световым давлением.

В самом деле, на создание излучения Вавилова — Черенкова затрачивается кинетическая энергия частицы. Это означает, что при наличии излучения возникает сила, тормозящая движение частицы. Эта сила есть не что иное, как отдача, получаемая частицей в результате того, что свет уносит импульс. Иными словами, эта сила, работа которой равна излучаемой энергии, является прямым следствием светового давления. Оказывается, что если принять это во внимание, то отсюда сразу получаются некоторые основные свойства излучения Вавилова — Черенкова, а именно наличие пороговой скорости и направленность этого излучения.

В связи с этим стоит вспомнить о том, что еще П. Н. Лебедев поставил вопрос о давлении света на отдельные частицы — атомы и молекулы, и о том, какими путями он пытался его разрешить. Этот вопрос занимал П. Н. Лебедева в связи с теорией образования хвостов комет под действием светового давления. Вот, что он пишет¹:

«Непосредственно и притом в достаточно простой форме экспериментально исследовать действие света на отдельные молекулы какого-либо тела не представляется возможности, а потому я обратился к опытам с длинными электромагнитными волнами Гертца, заставляя их действовать на схематическую «молекулу», которая обладает интересующими нас свойствами иметь собственный период колебания, — ею является подвешенный на крутильной нити резонатор. Изменяя по желанию период колебания резонатора (что не представляет каких-либо затруднений) и заставляя падать на него электромагнитную волну определенной длины, мы можем наблюдать образующиеся в этом случае пондеромоторные силы и установить законы их зависимости от резонанса».

Казалось бы, если оставаться на позициях классической физики, а это и не могло бы, если иначе в то время (работа выполнялась в 1894—1897 гг.), то такая модель молекулы должна была полностью имитировать ожидаемое явление. В самом деле, размеры молекулы много меньше, чем размеры резонатора, но и длина световых волн соответственно короче, чем у использованных радиоволн. Таким образом, подобие соблюдено, а природа волн в обоих случаях одна и та же. Однако Лебедева это не удовлетворило.

Дело в том, что механизм действия света на молекулы представлялся совершенно неизвестным. Дальновидность Лебедева как физика сказалась в том, что он не считал возможным ставить знак равенства между действием света на молекулу и действием радиоволн на резонатор. В связи с этим он предпринял исследование давления волн различной природы и, кроме электромагнитных волн, исследовал давление волн акустических и гидродинамических. Он так говорит о необходимости этих исследований²: «...перенося исследования на колебания, отличные по своей физической природе, и находя связь между законами их пондеромоторного действия на резонаторы, мы тем самым расширяем приложимость найденных законов и на те случаи, в которых как механизм самого колебания, так и механизм воспринимающего его резонатора может остаться неизвестным».

Из совокупности всех этих исследований Лебедев сделал вывод, что давление волн на резонатор есть общее для всех видов волн явление и можно говорить о давлении света на молекулы, хотя механизм действия света в данном случае неизвестен.

Рассуждения Лебедева не устарели и сейчас, и нельзя не согласиться с С. И. Вавиловым, который писал³:

«Не только историк, но и исследователь-физик еще долго будет прибегать к работам П. Н. Лебедева, как к живому источнику».

Мы можем применить теперь аргументы П. Н. Лебедева к эффекту Вавилова — Черенкова и пользоваться аналогиями с акустикой. Это возможно не только потому, что этот эффект, как мы видели, непосредственно связан с давлением волн, а это общее свойство волновых процессов. Мы знаем большее. При движении в среде, в которой могут распространяться волны, они действительно возникают (даже при равномерном и прямолинейном движении), если скорость движения превышает скорость волн. Таковы, например, носовая волна, возникающая при движении корабля, и, разумеется, волны Маха при движении со сверхзвуковой скоростью.

Отсюда следует, что эффект Вавилова — Черенкова мог бы быть предсказан заранее с большой степенью достоверности. Такие предсказания, как мы теперь знаем, действительно делались. В 1901 г. Кельвин отметил, что при движении атома со скоростью, большей скорости света, должно возникать электромагнитное излучение. Это утверждение прямо основывалось на аналогии с опытами Маха. В дальнейшем предсказание Кельвина оказалось полностью забытым, и почти сорок лет спустя его вновь открыл С. И. Вавилов, который был, как известно, выдающимся знатоком истории физики.

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 с звуковыми волнами до конца. В самом деле, упругие волны возможны только в среде, заполняющей некоторый объем пространства. При этом в определенной 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 сопоставлять 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. Естественно было искать аналогии между свойствами волн в эфире и упругими волнами в среде. Рассматривать движение частицы в плотной среде не было оснований, тем более, что такой случай, как движение атома в плотной среде, не представлялся реальным.

В дальнейшем после появления теории относительности стало очевидно, что скорость распространения световых волн в пустоте не достижима ни для какой частицы с массой покоя, отличной от нуля. Таким образом, случай, рассмотренный Кельвином, оказался неосуществимым. В результате его утверждение было в какой-то мере справедливо забыто. Та же участь и по той же причине постигла и работу Зоммерфельда 1904—1905 гг. об электроне, движущемся в пустоте со сверхсветовой скоростью. В этой, в свое время известной, но в дальнейшем забытой работе были получены результаты, во многом близкие к теории эффекта Вавилова — Черенкова. В 1937 г. при обсуждении результатов теории этого излучения на работу Зоммерфельда указал другой наш выдающийся физик А. Ф. Иоффе.

Мы видим, что аналогия эффекта Вавилова — Черенкова с упругими волнами имеет место только потому, что здесь также рассматривается движение излучающей частицы в среде. Нужно при этом помнить, что в любой среде для света достаточно большой частоты скорость распространения волн приближается к скорости света в пустоте. Поэтому при любой скорости частицы всегда имеются частоты, начиная с которых фазовая скорость света (а также групповая скорость) превышает скорость частицы. Наличие таких границ, характерное для электромагнитных волн, является особенностью эффекта Вавилова — Черенкова и имеет существенное значение.

Тот факт, что в плотной среде скорость света иная, чем в пустоте, и зависит от частоты, определяет не только возможность эффекта Вавилова — Черенкова и его особенности, но и обширный круг явлений, с ним связанный. В процессах излучения света всегда существенно отношение скорости частицы к скорости света. В среде это отношение иное, чем в пустоте, и зависит от частоты. Поэтому особенности распространения света оказывают влияние на самые разнообразные процессы излучения движущихся частиц. Роль среды очевидна для оптической области спектра, где показатель преломления света заметно отличается от единицы. Как выяснилось в последние годы, если частица является релятивистской, то влияние среды может распространяться на область коротких длин волн (рентгеновские и γ -лучи). Эта область расширяется тем больше, чем больше энергия релятивистской частицы. Методы электродинамики сплошных сред оказываются пригодными и здесь, хотя длина волны может быть много короче, чем расстояния между атомами. Это связано с тем, что излучение релятивистской частицы направлено в основном под малым углом к ее траектории и определяется значительным участком ее пути. В результате происходит усреднение свойств среды по довольно значительной длине, и поэтому в первом приближении среда ведет себя, как сплошная.

§ 3. ПЕРЕХОДНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

В эффекте Вавилова — Черенкова излучение света происходит при постоянной скорости движения. Возникает естественный вопрос о том, является ли этот случай единственным, при котором излучение может происходить при равномерном и прямолинейном движении. Ответ на него элементарен. В самом деле, если в какой-то точке траектории меняется скорость частицы, то возникает тормозное излучение. Оно появляется

в результате изменения электромагнитного поля, которое частица несет с собой. Аналогично этому, если частица движется равномерно, но пересекает границу раздела двух сред с различными оптическими свойствами, то возникает переходное излучение. Причина возникновения излучения та же, что и в случае тормозного излучения. При переходе частицы в другую среду, очевидно, также меняется поле, которое несет частица, либо в результате изменения скорости распространения волн, либо в результате поглощения света одной из этих сред.

На опыте наиболее часто осуществляется случай, когда частица падает из вакуума на поверхность металла. Если энергия частицы достаточно велика, то она проникает в толщу металла на глубину, большую длины волны видимого света, без заметного изменения своей скорости. Ее скорость в поверхностном слое можно в этом случае считать постоянной. Во многих металлах поглощение света для некоторой области частот происходит в слое, много меньшем длины волны. Поэтому, как только частица пересечет границу металла, ее поле для этой области частот окажется экранированным металлом. Частица как бы исчезнет после пересечения границы раздела. В результате для некоторой области частот и углов переходное излучение будет почти таким же, как если бы произошла внезапная остановка частицы на границе металла.

Переходное излучение должно наблюдаться в большом числе случаев. Оно возникает в любом ускорителе и в любой катодной трубке, когда пучок бомбардирующих частиц падает на металлическую мишень. В частности, оно должно всегда сопровождать катодoluminesценцию.

Свечение металлов при бомбардировке заряженными частицами известно очень давно. Почему-то, однако, даже не возникало мысли о том, что кроме люминесценции, здесь может присутствовать и такое излучение, как переходное. Обсуждалась лишь возможность различных видов тормозного излучения. По-видимому, привычность представлений о том, что для возникновения излучения необходимо ускорение или замедление частицы, мешало заметить это явление. После открытия эффекта Вавилова — Черенкова задача заметно облегчилась. Однако прошло много лет после появления теории переходного излучения, прежде чем были получены первые экспериментальные данные о свойствах этого излучения. Следует отметить, что с экспериментальной стороны задача здесь неизмеримо проще, чем та, которая была в свое время решена при открытии эффекта Вавилова — Черенкова. В самом деле, там о природе свечения ничего не было известно. Более того, было естественно думать, что в основе его лежит какой-то из многочисленных видов люминесценции. Доказательство того, что там имеет место новое явление, отличное от люминесценции, было очень трудной задачей. Для уровня экспериментальной техники того времени были очень велики и экспериментальные трудности. Это еще раз подчеркивает значение того вклада, который был внесен Вавиловым и Черенковым, указавшими на принципиально новые для оптики свойства этого явления.

§ 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЕРЕХОДНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Остановлюсь вкратце на экспериментальных свойствах переходного излучения. Прежде всего, необходимо сказать несколько слов о том, что предсказывает для этого излучения теория.

Выход излучения должен быть пропорционален квадрату величины заряда частицы и для нерелятивистских энергий пропорционален квадрату скорости частицы. Таким образом, величина выхода должна быть пропорциональна энергии частицы, а при заданных величинах заряда и энергии обратно пропорциональна величине ее массы. Следовательно, электрон

с энергией 10 кэв должен давать такой же выход переходного излучения, как протон с энергией примерно 18 Мэв .

При увеличении скорости частицы условия наблюдения переходного излучения должны облегчаться не только потому, что растет его выход, но также и потому, что можно ожидать снижение возможного паразитного фона. Действительно, такой фон может создавать люминесценция поверхностного слоя металла, а ее выход связан с ионизационными потерями частицы в этом слое. Можно думать поэтому, что он будет уменьшаться с увеличением скорости частицы. Это существенно, так как выход переходного излучения мал: вероятность того, что при пересечении границы раздела возникает фотон для однозарядной релятивистской частицы, равна примерно одной сотой.

Характерная особенность переходного излучения состоит в том, что свечение должно быть полностью поляризовано, причем электрический вектор колебаний должен лежать в плоскости, проходящей через направление скорости и направление луча. При этом, разумеется, предполагается, что рассеянием частицы в поверхностном слое мишени и деполяризацией света, зависящей от поверхности мишени, можно пренебречь, а это не всегда возможно. Далее, теория предсказывает, каковы будут угловое распределение свечения и его спектральный состав, которые существенным образом зависят от оптических констант бомбардирующего вещества.

Эти и другие выводы теории могут быть сопоставлены с результатами эксперимента. В последнее время выполнены две экспериментальные работы, посвященные переходному излучению. Им предшествовало несколько предварительных опытов. Так, в лаборатории атомного ядра ФИАНа Балабанов и Кацауров в 1949 г. наблюдали свечение под действием электронов с энергией около 200 кэв . Более детально это явление было обследовано Чудаковым совместно с Беляевым в 1955 г. Однако эти работы не получили развития и не были опубликованы.

В 1959 г. опубликована работа Голдсмита и Джелли, выполненная в Англии⁴. Эти авторы наблюдали свечение поверхностей золота, серебра и алюминия при бомбардировке их протонами с энергией около 2 Мэв . Ими была обнаружена в свечении поляризованная компонента, для которой направление вектора поляризации совпадало с ожидаемым. Наличие поляризации использовалось в качестве критерия для отделения переходного излучения от фона, природа которого осталась невыясненной. В работе не было получено убедительных доказательств того, что поляризованная и неполяризованная части свечения имеют различную природу. Это представляется существенным, поскольку поляризованная компонента составляла всего от $1/3$ до $1/10$ от полной яркости свечения. При этом яркость свечения очень менялась от опыта к опыту, по-видимому, из-за изменения поверхностных свойств металлов.

В пользу того, что авторы действительно наблюдали переходное излучение, говорит тот факт, что выход свечения возрастал примерно пропорционально энергии бомбардирующих протонов. Авторы считают также, что в пользу этого говорит совпадение, в пределах ошибок, абсолютной величины наблюдаемого выхода свечения с ожидаемой величиной. Однако здесь допущена досадная неточность.

Для определения выхода излучения почему-то не была использована формула, полученная еще в работе Гинзбурга и Франка. Авторы ограничились приближенным рассмотрением, в котором металл считается абсолютно проводящим. В этом случае переходное излучение должно быть тождественно с оптической частью тормозного излучения частицы, внезапно останавливающейся у поверхности металла. При этом в силу дипольности излучения максимум интенсивности для нерелятивистской частицы должен

иметь место под прямым углом к ее траектории. Вероятно, по этой причине наблюдения переходного излучения проводились под углом, близким к 90° . Анализ теоретической формулы для углового распределения показывает, однако, что при углах, близких к 90° , сделанное приближение непригодно. Для любого реального металла интенсивность переходного излучения должна падать до нуля при увеличении угла до 90° . На это обстоятельство было обращено внимание В. Е. Пафомовым, и оно было экспериментально доказано в работе Михалыка. Таким образом, рассчитанная величина выхода в работе Голдсмита и Джелли завышена и можно говорить лишь о качественном, но не о количественном согласии с теорией.

Значительно более детальное исследование переходного излучения выполнил аспирант С. Михалык, работавший под руководством А. Е. Чудакова⁵. В этом исследовании в качестве источника переходного излучения были использованы электроны с энергией до нескольких десятков килоэлектронвольт. Как и следовало ожидать на основании сказанного ранее, в этом случае условия наблюдения переходного излучения значительно более благоприятны, чем для протонов. Действительно, поляризованная компонента излучения достигала в этих опытах 90%. Для зависимости выхода свечения от энергии электронов, для абсолютной его величины в нескольких исследованных металлах и для углового распределения свечения получено хорошее согласие с теорией. Нет сомнения, что автор наблюдал именно переходное излучение и что в основном предсказания теории здесь оправдываются. Однако наши сведения о переходном излучении пока еще далеко не полны. В действительности явление переходного излучения может оказаться сложнее, чем мы сейчас думаем. В частности, и в работе Михалыка не удалось установить природу неполяризованной компоненты излучения, и поэтому ее пока нельзя отбрасывать при рассмотрении переходного излучения.

Как показали опыты Михалыка, свойства переходного излучения, как это и должно быть, определяются оптическими константами мишени. Поэтому исследование переходного излучения может оказаться весьма полезным для изучения оптических свойств различных веществ и, прежде всего, металлов. По существу, изучение серебра этим методом уже началось. Так, недавно опубликованы заметки Штейнмана, а также Брауна, Весселя и Траунсона⁶ об ультрафиолетовом излучении, возникающем в тонких фольгах серебра (толщины порядка 500 Å) при прохождении через них пучка электронов с энергией 25 кэв.

Как известно, в ультрафиолетовой части спектра около 3300 Å у серебра имеется узкая область, в которой серебро прозрачно. Авторы обнаружили, что под действием электронов поверхность фольги светится, излучая сплошной спектр, в котором как раз в области, где серебро прозрачно, наблюдаются интересные особенности. В этой области наблюдался селективный пик излучения, высота которого оказалась периодической функцией толщины фольги. Кроме того, этот пик наблюдается в спектре излучения только при небольших углах по отношению к пучку электронов. Авторы связывают это явление с теорией, развитой Феррелом, рассматривавшим колебания плазмы в тонком слое металла и предсказавшим здесь излучение такого характера. Совпадение наблюдавшихся особенностей излучения в области 3300 Å с ожидаемым по Феррелу авторы считают доказательством правильности его точки зрения.

Авторы этих работ, по-видимому, не знают о существовании переходного излучения. Между тем они использовали электроны с энергиями того же порядка, как и Михалык, который показал, что в видимой области спектра основное излучение серебра в этом случае является переходным. Нет сомнения, что спектр переходного излучения должен простираться

и в ультрафиолетовую область. Таким образом, ультрафиолетовое излучение, лежащее вне пика 3300 Å, которое авторы рассматриваемых работ называют фоном, на самом деле является переходным излучением. Нужно поэтому доказать, что излучение в области пика имеет природу, отличную от переходного излучения. Особенности переходного излучения применительно к той области спектра, где оно прозрачно, не были ранее проанализированы. Можно было думать, что снижение поглощения приведет к уменьшению переходного излучения, т. е. что в этой области будет не максимум, а минимум излучения. Недавно В. П. Силин и Е. П. Фетисов*) показали, что на самом деле поведение переходного излучения серебра должно быть весьма своеобразным как раз в области частот, где серебро прозрачно. Насколько можно судить по сообщениям Штейнмана и Брауна, Весселя и Траунсона, оно полностью соответствует тому, что они наблюдали.

В самом деле, наблюдавшаяся зависимость от толщины пластинки означает лишь то, что излучение возникает в толще серебра или у обеих его поверхностей когерентно с движением электрона. В этом случае будет происходить интерференция света, которая вызовет в зависимости от толщины либо усиление, либо ослабление излучения. Разумеется, это возможно только в той области спектра, где серебро достаточно прозрачно. Наличие такой когерентности исключает возможность объяснения наблюдаемого эффекта люминесценцией. Что касается переходного излучения, то для него, разумеется, интерференция будет иметь место. При этом теория предсказывает здесь наличие достаточно интенсивного переходного излучения. Дело в том, что величина диэлектрической постоянной в этой области спектра становится малой по сравнению с единицей. Таким образом, условия распространения электромагнитных волн при переходе из вакуума в серебро резко меняются, а это приводит, как уже отмечалось, к возникновению переходного излучения. Угловое распределение должно быть иное, чем для области, в которой серебро непрозрачно. Случай переходного излучения для пластинки рассмотрен в работе В. Е. Пафомова⁷. Если подставить в полученную им формулу конкретные значения диэлектрической постоянной для серебра, то получается хорошее качественное согласие с наблюдавшимся угловым распределением излучения. Таким образом, весь спектр излучения серебра, как показали В. П. Силин и Е. П. Фетисов, объясняется с единой, общей точки зрения.

Мы можем теперь сказать так: наличие интерференции указывает на то, что излучение определяется электромагнитным полем, связанным с движущейся частицей. Это поле должно учитываться уравнениями Максвелла для среды, если применительно к данному случаю они пишутся правильно. Так как теория переходного излучения не что иное, как простое следствие уравнений Максвелла, то, если правильно учтены условия опыта, она должна давать полную картину наблюдаемого излучения. Она должна включать в себя и всякого рода эффекты, основанные на частных допущениях (разумеется, кроме люминесценции). Если же в результате более детального сравнения теории с опытом обнаружатся между ними расхождения, то, по-видимому, это будет означать, что уравнения распространения света в серебре требуют поправок. Иными словами, такого рода исследования есть не что иное, как выяснение оптических свойств тонких слоев серебра.

Я остановился на изложении особенностей переходного излучения на этом заседании, посвященном памяти С. И. Вавилова, не только потому, что оно непосредственно связано с эффектом Вавилова — Черенкова.

*) О работе В. П. Силина и Е. П. Фетисова (ЖЭТФ, 1961) автору стало известно уже после прочтения доклада. Обсуждение вопроса о селективном излучении серебра включено в доклад дополнительно при подготовке его к печати.

Оно затрагивает вопросы оптики и особенности механизма излучения света, которые всегда стояли в центре внимания С. И. Вавилова. Быть может, интересно отметить и то, что подобно эффекту Вавилова — Черенкова вопрос о переходном излучении, зародившийся как чисто оптический эффект, теперь проделал эволюцию в область ядерной физики и, точнее говоря, в область физики частиц высокой энергии. Именно с этим обстоятельством и связан повышенный интерес к переходному излучению, возникший в последние годы.

§ 5. ПЕРЕХОДНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЧАСТИЦ

Как известно, если скорость частицы очень близка к скорости света, то особенности эффекта Вавилова — Черенкова в плотном веществе перестают зависеть от энергии частицы. Поэтому возник законный вопрос о том, нельзя ли использовать переходное излучение для регистрации частиц релятивистских энергий и определения их энергии. Пока трудно дать окончательный ответ на этот вопрос, однако с несомненностью выяснилось, что переходное излучение при достижении частицами релятивистских скоростей приобретает ряд новых свойств, безусловно, заслуживающих специального рассмотрения.

Как было отмечено автором этого доклада, для получения переходного излучения в случае релятивистских частиц можно, не теряя в интенсивности, заменить металл, например, прозрачным диэлектриком. Это обстоятельство даст возможность суммировать переходное излучение от многих поверхностей, что существенно, так как выход переходного излучения очень мал. В дальнейшем выяснилось, что чем больше энергия частицы, тем меньше может отличаться показатель преломления от единицы для того, чтобы переходное излучение полностью проявилось. В результате спектр переходного излучения ультрарелятивистской частицы простирается и в область коротких длин волн (рентгеновские и гамма-лучи). Эти особенности были выяснены в результате работы Гарибьяна⁸, показавшего, что полная энергия переходного излучения возрастает пропорционально полной энергии частицы. Это возрастание энергии излучения является прямым следствием того, что с увеличением энергии частицы граница спектра переходного излучения сдвигается к большим частотам, т. е. спектр излучаемых частот расширяется.

Рассмотрению коротковолновой части переходного излучения посвящено несколько работ. Многие ранее известные особенности излучения релятивистских частиц оказались существенными и для переходного излучения. Тер-Микаеляном⁹ было показано, что наличие среды снижает интенсивность в определенной части спектра тормозного излучения. Это так называемый эффект плотности был одним из первых обнаруженных эффектов влияния среды на излучение жестких фотонов. На простейшем примере переходного излучения в металле уже указывалось на аналогию между тормозным и переходным излучениями. Действительно, теории этих эффектов тесно связаны и знание спектра излучения при остановке или выбрасывании частицы позволяет рассчитывать и переходное излучение. В результате особенности коротковолнового переходного излучения легко могут быть получены из эффекта плотности. При этом оказывается, что именно та область спектра, которую эффект плотности подавляет в тормозном излучении, должна возникать в переходном излучении.

Выяснились также и другие особенности, характерные для переходного излучения ультрарелятивистских частиц. Для того чтобы интенсивность переходного излучения не была снижена, необходимо, чтобы частица до границы раздела и после ее пересечения пролетела достаточно большой

путь. В некоторых случаях этот путь должен быть огромным. Так, если рассматривать оптическую часть спектра переходного излучения электрона с энергией 10^{11} эв*), то необходимо, чтобы частица пролетела в вакууме до или после пересечения границы раздела путь порядка 2 км. Таким образом, далеко не всегда просто осуществить условия для получения видимой части спектра переходного излучения. Однако этот необходимый путь пропорционален длине волны света, и для коротковолнового излучения он соответственно короче. Поэтому такое излучение должно возникать легче.

Аналогичные особенности хорошо известны в радиационных эффектах, играющих роль в физике высоких энергий. Анализ многих из них был проведен Е. Л. Фейнбергом¹⁰. Теперь к числу таких эффектов следует отнести и переходное излучение.

Поскольку не безразлично, какой путь пройдет частица до границы раздела и после нее, то необходимо учитывать роль многократного рассеяния, которое может испортить прямолинейность траектории частицы. Л. Д. Ландау и И. Я. Померанчук¹¹ впервые показали, что многократное рассеяние оказывает весьма существенное влияние на энергию тормозного излучения. Необходимо принимать во внимание многократное рассеяние также и при рассмотрении переходного излучения ультрарелятивистских электронов. При этом, если ультрарелятивистский электрон попадает из вакуума в среду, то возникает и переходное и тормозное излучение. В некоторых случаях их нельзя отделить одно от другого и следует рассматривать как одно явление.

Таким образом, по мере развития теории переходного излучения релятивистских частиц все в большей степени выясняется, что оно играет существенную роль в общем круге явлений, связанных с излучением коротковолновой радиации частицами высоких энергий.

Можно надеяться, что применения переходного излучения как в оптических исследованиях, так и в физике высоких энергий получат в ближайшие годы дальнейшее развитие.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. П. Н. Лебедев, Экспериментальные исследования пондермоторного действия волн на резонаторы. См. Избр. соч., М., Гостехиздат, 1949, стр. 87.
2. П. Н. Лебедев, там же, стр. 88.
3. С. И. Вавилов, Памяти П. Н. Лебедева. См. Собр. соч., М., АН СССР, т. III, стр. 167.
4. P. Goldsmith and J. V. Jelly, Philos. Mag. 4, 837 (1959).
5. С. Михалык, Диссертация (Московский государственный университет, 1961).
6. W. Steinmann, Phys. Rev. Lett. 5, 469 (1961); R. W. Brown, P. Wessel and E. P. Trousion, Phys. Rev. Lett. 5, 472 (1961).
7. В. Е. Пафомов, ЖЭТФ, 33, 1074 (1957).
8. Г. М. Гарибян, ЖЭТФ 37, 527 (1959).
9. М. Л. Тер-Микаелян, ДАН СССР 94, 1033 (1954).
10. Е. Л. Фейнберг, УФН 58, 193 (1956).
11. Л. Д. Ландау и И. Я. Померанчук, ДАН СССР 92, 535 (1953).

*) Частицы таких энергий наблюдаются в космических лучах. По энергии они близки к тому, что уже достижимо для современных ускорителей.