

УДК 539.1.074.4

**МИКРОСКОПИЧЕСКАЯ ПРИРОДА ИЗЛУЧЕНИЯ,  
ЛЕЖАЩЕГО В ОСНОВЕ ЭФФЕКТА  
БАВИЛОВА–ЧЕРЕНКОВА**

*А.А.Тяпкин*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

ВВЕДЕНИЕ	947
МИКРОСКОПИЧЕСКАЯ ПРИРОДА ИЗМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРО- МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛЬНЫХ СРЕД	953
О НЕЯВНОМ УЧЕТЕ ПЕРВИЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ОТ ПОЛЯ- РИЗАЦИИ АТОМОВ СРЕДЫ В ПЕРВОЙ ТЕОРИИ ЧЕРЕН- КОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ	955
ОБ ИСТОРИИ ВЫЯСНЕНИЯ МИКРОСКОПИЧЕСКОЙ ПРИ- РОДЫ ЧЕРЕНКОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЗАПАДНЫМИ УЧЕ- НЫМИ	959
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	962

УДК 539.1.074.4

## МИКРОСКОПИЧЕСКАЯ ПРИРОДА ИЗЛУЧЕНИЯ, ЛЕЖАЩЕГО В ОСНОВЕ ЭФФЕКТА ВАВИЛОВА–ЧЕРЕНКОВА

*А.А.Тяпкин*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Обсуждается проблема установления микроскопической природы индуцированного когерентного излучения атомов среды, возникающего под действием проходящей заряженной частицы. Это когерентное излучение в оптически прозрачной среде становится наблюдаемым при условии, когда фазовая скорость его распространения оказывается меньше скорости движения заряженной частицы. Оно приводит к хорошо известному макроскопическому процессу возникновения направленного излучения Вавилова–Черенкова. Излагается история выяснения физической природы этого первичного излучения атомов, лежащего в основе эффекта Вавилова–Черенкова.

The presented review is dedicated to the discussion of the problem on defining the microscopic nature of induced coherent radiation of the medium atoms which appears under the passing charged particle. This coherent radiation in optically transparent medium becomes observable under the condition when the phase velocity of its spreading turns out to be less than the velocity of the charged particle movement. It leads to a well-known macroscopic process when the directed Vavilov–Cherenkov radiation occurs. The history of clarifying the physical origin of this primary atomic radiation lying in the basis of the Vavilov–Cherenkov effect is discussed.

### ВВЕДЕНИЕ

С самого начала открытия П.А.Черенковым в 1934 г. необычного, едва заметного сине-фиолетового свечения в жидких средах, вызванного гамма-лучами от препарата радия, была установлена кратковременность его возникновения, имевшая прямое отношение к свойствам первичного излучения. По предложению С.И.Вавилова в жидкий радиатор добавлялись различные гасители люминесценции. Из-за отсутствия эффекта тушения наблюдаемого излучения был сделан вывод, что длительность этого свечения не превышает десяти пикосекунд, и, следовательно, обнаруженное излучение имеет иную физическую природу [1, 2]. С.И.Вавилов высказал мнение, что это слабое свечение жидкости вызвано комптоновскими электронами, образованными  $\gamma$ -лучами. Он также подчеркнул универсальность обнаруженного явления, заключающегося в равенстве интенсивности свечения для различных по химическому составу веществ. Следовательно, и лежащее в основе первичное

излучение должно иметь универсальную природу. Наиболее вероятной причиной  $\gamma$ -свечения Вавилов считал излучение при торможении комптоновских электронов. «Электроны, освободившиеся внутри плотной жидкости, — писал он, — могут заметно тормозиться уже на ничтожных расстояниях, что должно сопровождаться излучением непрерывного спектра» [2, с.458]. Правда, теория не подтверждала существования подобного излучения в области частот видимого света, непосредственно испускаемого комптоновскими электронами. Однако и в следующем своем выступлении в Академии наук в 1935 г. Вавилов продолжал настаивать на тормозном механизме обнаруженного свечения. На самом деле, более оправданным было бы предположение, что фотоны видимого спектра испускаются вторичными электронами, возникшими от ионизации атомов среды первичными комптоновскими электронами. Тормозясь в среде, такие электроны ионизации могли бы часть своей энергии выделять в виде света. Но такое более естественное предположение вообще не обсуждалось.

Доклад С.И.Вавилова в Академии наук, стенограмма которого была опубликована в журнале [3], интересен еще и тем, что в нем упоминалось о французском ученом Малле, который в 1926–1929 гг. наблюдал подобное же свечение в прозрачных жидкостях. «Малле, — отметил в своем докладе Вавилов, — располагал очень сильным препаратом радия и очень светосильным спектрографом, позволившим ему сделать спектральные снимки. В результате опытов Малле оказалось, что спектр свечения простирается далеко в ультрафиолетовую область. Во всяком случае для воды Малле проследил его по крайней мере до 2500 Å» [3, с.131]. К этому следует добавить, что Малле в указанные выше годы опубликовал три работы [4] и что при измерении спектра им был установлен рост интенсивности с увеличением частоты свечения. Заметим, что эта важнейшая характеристика обнаруженного свечения имеет прямое отношение к обсуждаемому здесь первичному\* микромеханизму свечения жидкостей под действием гамма-лучей. Этот вывод не был, однако, сделан ни в первые годы исследования, ни в последующие годы, когда считалось, что обнаруженное свечение получило исчерпывающее теоретическое объяснение. И установление этого обстоятельства послужило одной из причин написания данного обзора. Пока же лишь отметим, что наш вывод об отношении спектра свечения непосредственно к самому первичному механизму излучения имеет вполне очевидное экспериментальное обоснование в его независимости ни от величины скорости движения первичной частицы, ни от вещества прозрачных сред, в которых возникает это свечение.

---

\*Мы называем это излучение лишь условно первичным, учитывая его отношение к образующемуся из него черенковскому излучению. По отношению же к первичной частице это излучение имеет, конечно, вторичную природу.

Вавилов считал, что эти наблюдения французского ученого существенно дополняют обсуждаемое в его докладе свечение, обнаруженное Черенковым, которое вызвано гамма-лучами и не поддается тушению. В связи с этим утверждением отметим, что Малле действительно на пять лет раньше получил более точные сведения о свечении прозрачных жидкостей под действием гамма-лучей. Но рядом с ним не было такого специалиста по тушению люминесцентного излучения, как С.И.Вавилов\*, который посоветовал бы ему квалифицированно провести решающий эксперимент по гашению люминесценции и тем самым доказать необычность природы изучаемого явления. Хотя Малле и высказывал предположение о загадочной природе обнаруженного им свечения, он все же не имел экспериментального доказательства для отклонения люминесцентной природы наблюдаемого излучения. А ведь во Франции издавна были специалисты по люминесцентному излучению\*\*.

---

\*С.И.Вавилов был тогда крупнейшим специалистом в мире по данному важнейшему разделу кинетики люминесценции — теории диффузного тушения люминесценции растворов. В 1929 г. им была создана теория этого явления, позволившая правильно определять величину длительности возбужденного состояния молекул. За более подробными сведениями об этой деятельности Вавилова рекомендую обратиться к статье Свешникова [5], опубликованной в честь семидесятилетия со дня рождения С.И.Вавилова и в память десятилетия со дня его кончины. Участие С.И.Вавилова в экспериментальном обосновании нового излучения было определяющим. Поэтому предложение И.М. Франка называть открытое излучение «эффектом Вавилова–Черенкова» вполне оправданно. К сожалению, это предложение было сделано только в 1956 г., когда в научной литературе западных стран уже утвердилось название «излучение Черенкова» или «черенковское излучение».

\*\*Хорошо известно, что в середине XIX века Александр Беккерель выполнил широкий цикл исследований по фосфоресценции, а созданная им в Париже специальная лаборатория на кафедре физики при Музее естественной истории известна была своей богатой коллекцией различных люминофоров. Именно в этой лаборатории его сын Анри Беккерель в 1896 г. занялся проверкой гипотезы А.Пуанкаре о возможном испускании люминофорами только что открытых В.Рентгеном проникающих лучей. Это исследование привело, как известно, к неожиданному, выдающемуся открытию радиоактивности. И вот в 30-е годы двадцатого столетия исследования, связанные с люминесценцией, снова привели к неожиданному открытию совершенно загадочного явления. С.И.Вавилов поручил своему аспиранту П.А.Черенкову исследовать свечение люминофоров при облучении гамма-лучами радия, чтобы затем сравнить его с известным свечением того же люминофора при воздействии на него ультрафиолетового света. Аспирант же начал порученное исследование, естественно, с того, что перед растворением люминесцирующей соли для проверки чистоты самого растворителя облучил его гамма-лучами и после продолжительного и тщательного наблюдения обнаружил очень слабое синее свечение самого растворителя. Конечно, вначале его приняли за свидетельство загрязнения растворителя какой-то неизвестной слабolumинесцирующей солью. Однако сомнения в этом объяснении появились, когда такое же слабое синее свечение было обнаружено и во всех других жидкостях, а было испытано 15 различных растворителей. Почти во всех жидкостях наблюдалась примерно одинаковая интенсивность загадочного излучения и лишь в серной кислоте и в четыреххлористом углероде его интенсивность возрастала в два раза. Вот после этого С.И. Вавиловым и был предложен решающий эксперимент с сильными гасителями люминесценции, позволивший окончательно доказать, что обнаруженное свечение имеет совершенно новую физическую природу, которую предстояло еще установить на основе дальнейших экспериментальных и теоретических исследований.

О дальнейших исследованиях обнаруженного свечения Черенков сообщил в 1936 г. [6]. Ампула с жидкостью помещалась в магнитное поле напряженностью 9,5 кГс, а измерения яркости свечения производились при трех положениях источника гамма-лучей. Наблюдалось изменение яркости свечения в четыре раза, что позволило сделать вывод о том, что направление излучения в основном совпадает с направлением вылета комптоновских электронов. Автор заключает свое исследование следующим утверждением: «Все вышеизложенные факты позволяют с несомненностью заключить, что в основе механизма  $\gamma$ -излучения лежит электромагнитное торможение электронов, движущихся в жидкости» [6, с.416]. Но, несмотря на ошибочность заключительного вывода, сами установленные факты о направленности свечения, безусловно, сыграли важную роль в установлении основного свойства обнаруженного свечения.

В следующем 1937 г. появилась работа И.Е.Тамма и И.М.Франка [7], в которой использовались результаты дополнительных исследований П.А.Черенкова и давалось объяснение эффекта Вавилова–Черенкова. Авторы прежде всего отметили, что гипотеза о тормозном излучении комптоновских электронов не может быть принята, поскольку в видимой области спектра она дает на четыре порядка меньше наблюдаемой интенсивности света. Затем авторы сформулировали следующее основное положение своего объяснения, выделив в нем курсивом главную часть: «Это явление может быть, однако, объяснено как качественно, так и количественно, если принять во внимание, *что электрон, движущийся в среде, излучает свет даже при равномерном движении, если только его скорость превышает скорость света в этой среде*» [7, с.107]. В этом первом теоретическом исследовании нового физического явления были также четко установлены и другие общие особенности излучения, такие как его строгая направленность и определенный порог возникновения. И, надо сказать, выявлению этих важных общих особенностей процесса содействовала, в первую очередь, идеализация проведенного авторами рассмотрения. Так, авторы рассмотрели процесс излучения при постоянной скорости движения первичного электрона в бесконечной однородной оптической среде. Именно это нереальное допущение позволило авторам наиболее просто и убедительно продемонстрировать, что для рассматриваемого излучения в среде вовсе не требуется ускорения первичной заряженной частицы.

Усвоив этот необычный факт, находившийся (для случая движения в среде) лишь в кажущемся противоречии с ранее установленными законами, можно было затем учесть и реальные условия движения в тормозящей среде. Это приведет к постепенному уменьшению интенсивности излучения, а также к постепенному уменьшению угла излучения, а затем к более резкому изменению и самого направления излучения из-за возрастания рассеяния первичной частицы, и, наконец, само свечение должно совсем прекратиться, когда энер-

гия первичного электрона станет ниже порога излучения. Такие отклонения от идеальной картины процесса особенно резко проявляются как раз для свечения, возбуждаемого комптоновскими электронами. И из этого единственного примера, которым располагали тогда ученые, пришлось исходить им в своем построении идеальной теоретической картины совершенно нового физического явления. Такая идеализация оправдана, поскольку она обнажает истинные глубокие аспекты нового явления. Ее не следует путать с упрощениями, которые уведут от проникновения в суть явления. И такой пример уклонения от более глубокого понимания сути явления мы находим в той же статье [7].

Стремясь скорейшим путем получить объяснение макроскопической картины явления, Тамм и Франк сознательно уклонились от выяснения микроскопического механизма первичного излучения, лежащего в основе эффекта Вавилова–Черенкова. Судя по воспоминаниям И.М.Франка [8, 30], именно от него в большей степени исходила инициатива не углубляться в микроскопическую картину явления. И действительно, взятый авторами курс на построение теории лишь макроскопической стороны явления позволил им миновать трудности выявления микроскопического обоснования для первичного излучения, лежащего в самой основе черенковского излучения. Такой путь вполне оправдан для построения первого теоретического описания этого нового явления. Создателям макроскопической теории удалось успешно объяснить все известные тогда экспериментальные факты о загадочном свечении жидкостей под действием гамма-лучей и предсказать новый эффект — излучение света под строго определенным углом к направлению движения первичного электрона, возбуждающего это свечение.

Но, к сожалению, эти успехи первого теоретического описания черенковского излучения и в последующих теоретических исследованиях способствовали уклонению от выяснения причин возникновения первичного излучения. Так, например, в 1939 г. И.Е.Тамм опубликовал новое теоретическое исследование [9], в котором им был создан важный формализм для описания черенковского излучения, вызванного релятивистской частицей на отрезке конечной длины. По интересующему нас вопросу в конце введения Тамм сделал следующее важнейшее утверждение: «С точки зрения микроскопической теории рассматриваемое излучение не испускается непосредственно электроном, а имеет своей причиной когерентные колебания молекул среды, возбуждаемых электроном. Мы, однако, не входим здесь в микроскопическое рассмотрение проблемы» [10, с.79]. Казалось бы, после такого конкретного и глубоко содержательного указания шефа сотрудникам теоретического отдела ФИАН следовало бы непосредственно заняться выяснением механизма возбуждения колебаний в молекуле или хотя бы усвоить категорическое утверждение шефа, что *«рассматриваемое излучение не испускается непосредственно электроном»*. Но никто из последователей Тамма даже не обратил

внимания на столь важное указание, зато они приняли к безусловному исполнению в своих исследованиях его, кстати, не совсем верное высказывание: «...не входим здесь в микроскопическое рассмотрение проблемы».

На самом же деле уже в первой их статье приводится утверждение о том, что поле движущегося в среде электрона «можно рассматривать как результат суперпозиции волн запаздывающего потенциала, непрерывно излучаемых электроном и распространяющихся со скоростью  $c/n$ » [7, с.68]. Мы процитировали эту фразу, поскольку она содержит единственное в данной статье утверждение, явно относящееся к интересующему нас первичному излучению. История возникновения такого подхода явно связана с работой Вильямса (1935 г.). Как вспоминает сам И.М.Франк в своей книге [8, с.29], его внимание на статью Вильямса обратил Д.В.Скобельцын. В этой статье обосновывался метод, который позднее стали называть методом псевдофотонов. Этот метод состоял в разложении поля движущейся в среде частицы в непрерывный спектр частот, и затем учитывалось взаимодействие каждой составляющей поля с атомами среды, колебания в которых и становились, фактически, источником расходящихся волн. «Следуя Вильямсу, — пишет И.М.Франк, — для этого требовалось найти малое взаимодействие поля частицы с атомами и ядрами, расположенными вдоль ее пути, колебания которых и являются источниками волн» [8, с.29]. По поводу же попыток поиска «механизма такой трансформации поля частицы в расходящиеся волны» Франк далее почти правильно замечает: «Говоря современным языком, это была попытка построить микроскопическую теорию эффекта Вавилова–Черенкова, в чем не было надобности» [8, с.30].

Мы, естественно, не согласны лишь с последними словами автора — «в чем не было надобности». Действительно, формальный учет такой трансформации поля движущейся в среде частицы в расходящиеся волны — есть необходимый начальный этап на пути к построению микроскопической теории этого эффекта, в котором лишь постулируется факт испускания атомами расходящихся волн. Теория же микропроцесса должна учесть взаимодействие волны с электронами атома и получить спектральное распределение генерируемых волн, которое, как уже выше было особо отмечено, не зависит ни от скорости частицы, ни от вещества радиатора. И это придает фундаментальное значение как экспериментальному исследованию, так и теоретическому обоснованию спектра излучения, открытого Вавиловым и Черенковым.

Однако вопреки утверждению авторов [7] о том, что они в этой работе сознательно уклонились от выяснения микромеханизма, лежащего в основе черенковского излучения, они на самом деле в той же работе использовали правильный спектр излучения при вычислении полной энергии излучения. Следовательно, Тамм и Франк использовали в своих расчетах величины, непосредственно связанные с микромеханизмом явления, не отдавая себе в этом отчета. Выяснение этого недоразумения и послужило основным поводом для

написания данного обзора. Соответственно, мы далее будем разяснять только эту скрытую связь с микромеханизмом явления, оставляя в стороне уже отмеченные здесь важные достижения в установлении макроскопических свойств черенковского излучения. Другим мотивом написания обзора стало краткое освещение результатов исследований новых свойств черенковского излучения, проведенных на уникальном пучке релятивистских ионов свинца в ЦЕРН.

### 1. МИКРОСКОПИЧЕСКАЯ ПРИРОДА ИЗМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛЬНЫХ СРЕД

Для непроводящей среды векторы электрического  $\mathbf{D}$  и магнитного  $\mathbf{B}$  полей целесообразно выразить с помощью следующих «аддитивных соотношений»:

$$\begin{aligned}\mathbf{D} &= \mathbf{E} + 4\pi\mathbf{P}, \\ \mathbf{B} &= \mathbf{H} + 4\pi\mathbf{M},\end{aligned}$$

где  $\mathbf{P}$  — электрическая, а  $\mathbf{M}$  — магнитная поляризация.

Как отмечают в своей книге [11] М.Борн и Э.Вольф, электрическая поляризация и магнитная поляризация (намагничивание) «... имеют фундаментальное значение в теории атомного строения вещества... В этой теории вещество рассматривается как совокупность взаимодействующих частиц (атомов и молекул), находящихся в вакууме. Такие частицы образуют поле, которое испытывает большие локальные колебания внутри вещества. Это внутреннее поле видоизменяется любым полем, которое прикладывается извне, и свойства вещества находятся путем усреднения по полному полю внутри него... В этом приближении для достаточно слабых полей мы можем предположить, что  $\mathbf{P}$  и  $\mathbf{M}$  пропорциональны, соответственно,  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{H}$ , т. е.  $\mathbf{P} = \eta\mathbf{E}$ ,  $\mathbf{M} = \chi\mathbf{H}$ . Множитель  $\eta$  называется диэлектрической восприимчивостью, а  $\chi$  — магнитной восприимчивостью, ...диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$  и магнитная проницаемость  $\mu$  связаны с диэлектрической и магнитной восприимчивостями соотношениями  $\epsilon = 1 + 4\pi\eta$ ,  $\mu = 1 + 4\pi\chi$ . ...Простейшее предположение, служащее первым шагом учета атомной структуры вещества, заключается в рассмотрении вещества как совокупности определенных физических объектов — молекул, которые могут поляризоваться и, следовательно, приобретать под действием внешнего поля электрический и магнитный моменты» [11, с.110, 111].

Далее авторы вводят эффективное поле  $\mathbf{E}'$ ,  $\mathbf{H}'$ , действующее на молекулу и отличающееся от наблюдаемого поля  $\mathbf{E}$ ,  $\mathbf{H}$ , которое получается в результате усреднения по области, содержащей большое число молекул. Для электрических полей авторы получают соотношение  $\mathbf{E}' = \mathbf{E} + 4\pi/3 \mathbf{P}$ . Аналогичное



соотношение должно быть и для магнитных полей  $\mathbf{H}' = \mathbf{H} + 4\pi/3\mathbf{M}$ . Для каждой молекулы возникает электрический дипольный момент  $\mathbf{p}$  под действием эффективного поля:  $\mathbf{p} = \alpha \mathbf{E}'$ . Здесь  $\alpha$  — средняя поляризуемость молекул, которая имеет размерность объема. И если  $N$  — число молекул в единице объема, то полный электрический момент единицы объема будет равен  $\mathbf{P} = N\mathbf{p} = N\alpha\mathbf{E}'$ .

Затем авторы приводят выражения, связывающие диэлектрическую восприимчивость  $\eta$  и диэлектрическую проницаемость  $\epsilon$  со средней поляризуемостью  $\alpha$ . Далее, используя соотношение Максвелла  $\epsilon = n^2$ , получают формулу Лорентца–Лоренца, выражающую среднюю поляризуемость через квадрат показателя преломления среды. Для газа эта формула имеет простой вид:  $4\pi N\alpha \cong n^2 - 1$ . Отмечается, что последняя величина изменяется почти пропорционально плотности газа [11, с.115].

Отдельный параграф авторы книги посвятили описанию поля линейного диполя. Такой диполь характеризуется электрической поляризацией  $\mathbf{p}(\mathbf{r}, t) = p(t)\delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_0)\mathbf{n}$ , где  $\mathbf{n}$  — единичный вектор, задающий направление колебаний электрона атома данного диполя, а  $\mathbf{r}_0$  — координата расположения диполя. Поле диполя рассматривается в волновой зоне, когда можно ограничиться рассмотрением величин первого порядка относительно  $1/R$ , где  $R$  — расстояние от точки  $\mathbf{r}$  до точки  $\mathbf{r}_0$ , а функция  $p(t)$  является периодической с угловой частотой  $\omega$ . Для этого случая авторы получают поле излучения и энергию излучения в единицу времени на данной частоте [11, с.107–110].

Таким образом, проведенное авторами рассмотрение наглядно показывает прямую связь величин, относящихся к макроскопическим уравнениям электромагнитного поля в материальной среде, с аналогичными величинами для микроскопической электродинамики в вакууме. Такие величины, как векторы электрической  $\mathbf{D}$  и магнитной  $\mathbf{B}$  индукции, а также показатель преломления оптической среды  $n$  оказались зависимыми от электрической и магнитной поляризации отдельных атомов и молекул через векторную сумму этих микроскопических величин. Мы покажем далее, что, не отдавая себе в этом отчета, создатели первого теоретического объяснения открытого Черенковым излучения, используя суммарную поляризацию, получили и такую основную характеристику скрытого микропроцесса, как спектральное распределение этого излучения.

Рассмотренный авторами книги [11] случай поляризации атомов под действием электромагнитного поля волны полезен для решения интересующей нас задачи о возникновении излучения света, испускаемого атомами среды под действием электрического поля проходящей заряженной частицы. Ясно, что это воздействие будет отличаться малым временным интервалом, но микроскопическая природа возникновения этого света должна быть основана по-прежнему на электрической поляризации атомов и молекул. Действительно, если диполь, поляризованный электромагнитной волной, излучает

свет, то и диполи, создаваемые заряженной частицей в момент ее прохождения, могут быть источниками когерентных излучений, которые при определенных условиях будут объединяться в направленное черенковское излучение. Для этого макроскопического явления характерен определенный порог излучения, начиная с которого выполняются условия наблюдения этого излучения. Однако к самому первичному излучению, появляющемуся в результате поляризации атомов среды под действием электрического поля пролетающей заряженной частицы, эти условия порога излучения не относятся. **Поэтому требование порога для первичного излучения, лежащего в основе черенковского излучения, является грубейшей ошибкой\***. Следует также обратить внимание на то, что вектор поляризации среды, являющийся векторной суммой поляризации отдельных атомов, используется как для микроскопического обоснования оптических свойств среды, что показано в приведенном отрывке из книги [11], так и в случае получения первичного излучения диполей, возникающих в результате того же процесса поляризации атомов среды. Далее мы проанализируем конкретные работы, в которых недооценка этой двойственной роли использования вектора поляризации приводила к определенному недопониманию полученных теоретических результатов.

## **2. О НЕЯВНОМ УЧЕТЕ ПЕРВИЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ОТ ПОЛЯРИЗАЦИИ АТОМОВ СРЕДЫ В ПЕРВОЙ ТЕОРИИ ЧЕРЕНКОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

Работа [7], в которой Таммом и Франком впервые было дано теоретическое объяснение обнаруженного Черенковым излучения, фактически началась с использования известного динамического соотношения «...между поляризацией  $\mathbf{P}$  и электрической силой  $\mathbf{E}$ » [10, с.69], которое затем после применения фурье-преобразования было заменено соотношением  $4\pi\mathbf{P}_\omega = (n^2 - 1)\mathbf{E}_\omega$  для частоты  $\omega$ . Этому уравнению в статье был присвоен номер (3), а интегральным преобразованиям Фурье соответствовал номер (2). Далее соотношения (2) и (3), как отмечали авторы, были использованы ими для получения уравнений Максвелла для величин, относящихся к заданной частоте  $\omega$ .

После ряда сложных преобразований авторы свели задачу об излучении первичного электрона в среде к отысканию цилиндрической функции, удовлетворяющей уравнению Бесселя всюду, кроме полюса  $\rho = 0$ . Решение, удовлетворяющее этому условию, в случае малых скоростей первичной частицы было найдено в виде функции Ханкеля первого рода. Воспользовавшись асимптотическим выражением этой функции, авторы показали, что

---

\*Это утверждение численно доказывается в работах [25–27].

в этом случае «...мы имеем экспоненциальное затухание поля с расстоянием» [10, с.71]. Однако для большой скорости первичного электрона и для частот, удовлетворяющих условию  $\beta n(\omega) > 1$ , авторы получили незатухающую цилиндрическую волну, уходящую в направлении  $\theta$ , для которого  $\cos \theta = 1/\beta n(\omega)$ . После этого авторы приводят интегральные выражения для ненулевых компонент поля излучения  $H_\varphi$ ,  $E_\rho$  и  $E_z$ , полученные из ранее найденных уравнений Максвелла для частотных компонент поля с учетом уравнения связи с поляризацией. Подынтегральные выражения для компонент электрического поля  $E$  содержат произведение  $\omega d\omega$ , характеризующее спектральное распределение первичного излучения, лежащего в основе эффекта Вавилова–Черенкова. Поэтому неудивительно, что Тамм и Франк далее, используя эти компоненты электрического поля для вычисления энергии излучения, получили и в подынтегральном выражении для энергии излучения ту же величину произведения  $\omega d\omega$ , которая совершенно не зависит от величин используемых макроскопических параметров.

В 1939 г. в своей следующей работе [10, с.75], посвященной проблеме черенковского излучения, Тамм в § 2 воспроизводит основное содержание совместной с Франком статьи [7], внося в ее текст некоторые незначительные исправления. А в следующем параграфе, как пишет Тамм, им дается «...более строгое доказательство основной формулы, определяющей интенсивность и спектральное распределение излучения» [10, с.79]. Однако уже в преобразованиях Фурье вместо интеграла для вектора поляризации  $\mathbf{P}$  в статье Тамма приведен интеграл Фурье для вектора индукции  $\mathbf{D}$ . Затем приводятся уравнения Максвелла для компонент полей  $H_\omega$ ,  $E_\omega$ , потенциалов  $\varphi_\omega$ ,  $A_\omega$  и величин  $\rho_\omega$ ,  $j_\omega$ , но, в отличие от прежней статьи 1937 г., уже не отмечается, что для получения этих уравнений было использовано соотношение для компонент вектора поляризации. Этот раздел статьи Тамма заканчивается получением ненулевых компонент поля излучения  $H_\varphi$ ,  $E_\rho$  и  $E_z$ , из которых только последняя в подынтегральном выражении сохранила важное для нашего анализа произведение  $\omega d\omega$ .

При вычислении энергии, излученной электроном на единичном пути, Франк и Тамм в работе [7] использовали асимптотическое выражение функции Ханкеля для больших значений аргумента. Теперь же в § 3 своей новой статьи [10, с.83] Тамм предпочел дать другое доказательство этой важнейшей формулы их теории. Он рассмотрел радиальную компоненту вектора Пойнтинга  $S_\rho = /4\pi E_z H_\varphi$ . В это выражение вместе с компонентой поля  $E_z$  вошло и произведение  $\omega d\omega$ . Все это и обеспечило получение прежней формулы для потерь энергии на излучение на единицу пути  $dW/dl$ , в подынтегральное выражение которого вошло произведение  $\omega d\omega$ , не зависящее ни от каких макроскопических параметров рассматриваемой среды. Уже это обстоятельство давало полное основание усомниться в том, что проведенное рассмотрение целиком относится к установлению макроскопической

картины возникновения черенковского излучения. Но авторы не сделали подобного вывода. Конечно, важнее было получить более полное теоретическое описание явления, включающее и спектральное распределение черенковского излучения, хотя для этого и пришлось нарушить взятый курс лишь на макроскопическое исследование.

Уже в первой работе, посвященной объяснению черенковского излучения, Франк и Тамм главной формулой своего исследования считали полученное интегральное выражение для энергии, излученной движущимся «электроном через поверхность цилиндра длины  $l$  (с осью, совпадающей с линией движения электрона)» [10, с.72]. В сборнике статей [12] Франк приводит снимок, указывая, что на нем он воспроизводит «фотокопию одной из страничек записей Тамма, содержащую окончательную формулу» (с.254). Так что нельзя считать, что авторы получили эту важную формулу, не придав ей должного значения. Скорее всего здесь все же было недоразумение, связанное с уверенностью, что они не ставили перед собой задачу отхода от рассмотрения макроскопической картины этого явления. Утверждению же этого недоразумения в большой степени способствовало отмеченное уже нами в конце предыдущего раздела обстоятельство, что вектор поляризации атомов среды имеет два совершенно различных аспекта применения: для обоснования макроскопических свойств оптических сред и для получения первичного излучения диполей, возникающих в процессе поляризации атомов среды. Это излучение диполей и составляет микроскопическую основу для возникновения макроскопического явления — излучения Вавилова–Черенкова.

Основная формула Тамма–Франка подробно обсуждается в томе 1 известной монографии В.П.Зрелова [13, с.90]\*. Там даны различные формы представления этой формулы и, в частности, особо подчеркнута, что основная часть энергии этого излучения сосредоточена в ультрафиолетовой области излучения\*\*. Но и в этом подробном исследовании не было обращено внимание на то, что в формуле Тамма–Франка растущая с частотой интенсивность излучения возникла от неявного учета дипольного возбуждения атомов оптической среды полем проходящей заряженной частицы. И вообще, Зрелов в

---

\*Монография В.П.Зрелова сыграла значительную роль в развитии и распространении методики детектирования релятивистских частиц, основанной на регистрации черенковского излучения. В первой части монографии обстоятельно изложена теория излучения Вавилова–Черенкова и дано описание разнообразных свойств этого излучения.

\*\* Действительно, позже, в 1977 (Т. Upsilon) и в 1978 гг. (G. Charpak, F. Sauli) были сделаны предложения регистрировать ультрафиолетовые кванты черенковского излучения от отдельных релятивистских частиц и по нескольким зарегистрированным координатам кольца черенковского излучения получать ценную информацию о скорости каждой частицы. Ныне эта методика, получившая название RICH-детекторов (Ring Imaging Cherenkov), составляет важнейшую часть существующих и проектируемых детекторов для регистрации многочастичных событий на современных ускорителях.

своей монографии воздержался от каких-либо высказываний по поводу первичного излучения, лежащего в основе эффекта Вавилова–Черенкова.

Между тем предположение о том, что постулированное в теории Тамма и Франка первичное излучение атомов среды в момент прохождения заряженной частицы может иметь именно поляризационную природу, было бы самым естественным выводом, особенно после разъяснений в 1940 г. Ферми: «Следует указать, что, как вытекает из приведенных формул, черенковское излучение не представляет энергетические потери, которые надо добавлять к потерям, вычисленным по теории Бора, а образует часть потерь в теории Бора» [14, с.30]. Теория Бора [15], как известно, учитывала энергетические потери на ионизацию, на возбуждение и на поляризацию атомов. И только часть энергии, идущей на поляризацию, при выполнении условия  $\beta n > 1$  реализуется в черенковском излучении. Работа же Ферми [14] специально была посвящена учету уменьшения ионизационных потерь, обусловленного экранирующим действием поляризации атомов среды.

Мы заканчиваем настоящий раздел разбором еще одной совместной статьи Тамма и Франка, опубликованной в 1944 г. в «Трудах ФИАН» [16]. В этой статье авторы, фактически неявно, вернулись к реализации подхода Вильямса [17], основанного на методе псевдофотонов. Мы уже упоминали об этом методе в конце введения в связи с обсуждением одной фразы из работы [7]. Работа [16] интересна еще и тем, что в ней появилась реакция авторов на работу Ферми [14], в которой, благодаря учету поляризации атомов среды полем проходящей заряженной частицы при скорости, превышающей  $c/n$ , автоматически появилось излучение Черенкова.

В обсуждаемой работе [16] авторы вводят непрерывную совокупность неподвижных гармонических осцилляторов, расположенных вдоль траектории первичного электрона. Эти осцилляторы должны дать поле излучения такое же, как поле движущегося в среде быстрого электрона. «Для этого, — утверждают авторы, — достаточно лишь приписать осцилляторам, находящимся на любом отрезке от  $z$  до  $z + dz$ , электрический момент  $p = e/\pi\omega \sin \omega(t - z/v)dz$ , ориентированный по направлению движения электрона. Но авторы считали этот ряд излучающих осцилляторов не сущностью самой микроприроды возникновения первичного излучения, лежащего в основе излучения Вавилова–Черенкова, а лишь удачной имитацией такого поля излучения. Так что в этой работе (1944 г.) авторы максимально приблизились к установлению микроскопического механизма возникновения первичного излучения, лежащего в основе макроскопического явления — излучения Вавилова–Черенкова, но так и не сделали естественного вывода о микроприроде этого излучения.

### 3. ОБ ИСТОРИИ ВЫЯСНЕНИЯ МИКРОСКОПИЧЕСКОЙ ПРИРОДЫ ЧЕРЕНКОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЗАПАДНЫМИ УЧЕНЫМИ

Среди западных физиков первым стал обсуждать непосредственно микро-механизм черенковского излучения О.Бор в работе [18], опубликованной на русском языке в качестве приложения к книге Н.Бора [18, а]. О.Бор начал свою статью с упоминания работы Сванна, в которой была высказана мысль об экранизирующем действии поляризации атомов среды, создаваемой полем проходящей заряженной частицы, и отметил, что Ферми в 1940 г. детально исследовал эту идею и пришел к выводу, что «это явление может иметь большое значение для очень быстрых частиц» [18, а, с.105]. Далее О.Бор отмечает свое намерение «исследовать связь между атомами вещества с микроскопической точки зрения» и обещает, что «такой подход позволит получить простые обобщения формул Ферми» (с.106). В конце той же страницы автор по поводу черенковского излучения пишет: «С микроскопической точки зрения явление состоит в том, что часть энергии, передаваемой частицей атомным электронам, затем излучается в виде когерентных электромагнитных волн». Намеченное в этой работе не было выполнено полностью, но вопрос о микроскопической природе черенковского излучения на основе поляризации атомов среды получил последующее развитие в целом ряде работ западных ученых.

Действительно, ведь полученные Ферми формулы привели автора к выводу, что при  $v > c/n$  в них дополнительно появляется часть, соответствующая излучению, обнаруженному ранее Черенковым. Далее автор отмечает, что «теория такого излучения была развита Таммом и Франком; они пользовались методами, близкими к использованным нами, и получили близкие результаты» [14, с.30]. Но, несмотря на близость использованных теоретических методов и соответствие конечных результатов, работа Ферми, на самом деле, приоткрыла первичную природу черенковского излучения. И уяснению этого обстоятельства мы обязаны анализу, проведенному в работе О.Бора [18]. В последующих теоретических работах, развивающих микромеханизм черенковского излучения, авторы непосредственно исходили из первичного излучения, испускаемого атомными электронами в момент поляризации их под действием поля движущейся в среде заряженной частицы. Так, теоретик из университета Сиднея Тидман краткое сообщение о своей работе начинает с эффекта поляризации, рассчитанного впервые Ферми, и полученного им излучения, идентичного излучению Черенкова [19]. В его подробной статье [20] имеется ссылка и на обсуждаемую статью О.Бора. Его идея состоит в том, что в момент поляризации атома среды возникает первичное излучение, которое затем, в силу его когерентности, складывается в макроскопически наблюдаемое явление, если только оно излучается под углом, косинус которого равен  $c/vn$ . Это излучение и было открыто в 1934 г. Черенковым.

Тидман вовсе не был первым, кто воспринял эту идею об излучении, возникающем при поляризации атомов среды. Целый ряд ученых откликнулись на идею О.Бора в самом начале 50-х годов. Приведу в качестве примера несколько статей того времени. Так, более ранними были, например, статьи Хьюбрехтса и Шёнберга [21] и Нимтана [22], в которых ссылки на работу О.Бора 1948 г. указывают, что ими использована его расшифровка работы Ферми о поляризации атомов среды. Работа Тидмана «Квантовая теория коэффициента преломления, черенковского излучения и энергетических потерь быстрой заряженной частицы» отличалась фундаментальностью поставленного вопроса. Подлинную квантовую теорию черенковского излучения можно было построить только на основе установления конкретного микромеханизма этого излучения. Построение же квантовой теории такого процесса до выяснения излучающего элемента было явно необоснованным. Такую вольность позволил себе Гинзбург, выдвинувший в 1940 г. первую квантовую теорию черенковского излучения [23]. В своей работе он пренебрег указанием Тамма о том, что черенковское «излучение не испускается непосредственно электроном, а имеет своей причиной когерентные колебания молекул среды, возбуждаемые электроном» [10, с.79], он просто принял, что черенковский фотон излучается непосредственно первичным электроном, и получил, естественно, заведомо ложные квантовые поправки, на несуразность которых до сих пор никто не обратил внимание. Самое удивительное, что и Тамм в своих последующих работах продолжал ссылаться на эту статью [23], не заметив, что она была построена в полном противоречии с его справедливым утверждением о вторичной природе возникновения фотонов черенковского излучения. Любопытно в связи с этим рассмотреть приведенное в книге Зрелова сопоставление формул по квантовой теории черенковского излучения, полученных в работах Гинзбурга и Тидмана. В своей книге автор последовательно изложил квантовую теорию излучения Черенкова, развитую Тидманом, но в конце отметил расхождение с ранее созданной формулой Гинзбурга и в связи с этим вынес следующую ошибочную резолюцию: «В.Л.Гинзбург точно учел закон сохранения энергии... Добавочные члены порядка  $h\nu/mc$  в формуле даже для электронов пренебрежимо малы» [13, т.1, с.32]. Таким образом, у Зрелова получилось, что формула Гинзбурга, конечно, более точная, поскольку им учтен закон сохранения энергии, но расхождения с формулой Тидмана ничтожны. На самом же деле все это расхождение обусловлено произвольным допущением, что черенковский фотон испущен непосредственно первичной частицей, а не возбужденным атомом среды в результате его поляризации в момент прохождения первичной частицы.

Микроструктура первичного излучения была правильно отражена в первой же монографии по черенковскому излучению, вышедшей в 1958 г. [28]. Ее автор, известный специалист по применению черенковского излучения

Джелли, наглядно пояснил появление индуцированного излучения в момент прохождения заряженной релятивистской частицы из-за поляризации атомов среды. Он показал также, что спектр возникающего первичного излучения  $\omega d\omega$  совершенно не зависит от расстояния атома среды от трека заряженной частицы. От этого расстояния, надо полагать, сильно зависит лишь интенсивность поляризационного излучения. Получив спектр излучения, автор отметил его согласие со спектральным распределением, найденным Франком и Таммом в работе 1937 года. Таким образом, среди западных ученых широко утвердилось мнение, что в основе черенковского излучения лежит микроскопический процесс испускания когерентного света, сопровождающий явление поляризации атомов среды электрическим полем проходящей частицы. Интересна реакция на это мнение советских специалистов по черенковскому излучению. В журнале «Успехи физических наук» была опубликована рецензия на книгу Джелли перед ее переводом на русский язык. Она была написана известным специалистом по теории черенковского излучения Болотовским и экспериментатором, будущим переводчиком этой книги Лейкиным. Авторы этой рецензии высказались явно неодобительно по поводу попытки Джелли «привести также микрокартину явления» [24, с.694].

В заключение считаю необходимым отметить еще одну важную сторону созданной Тидманом квантовой теории черенковского излучения. В его основной работе [20] отдельный раздел был посвящен последовательному применению квантовой механики, согласно которой, если имеется определенный механизм излучения отдельных фотонов, то с вероятностью  $1/137$  должно происходить и одновременное излучение двух фотонов. Квантовая теория Тидмана подробно излагалась в книге Зрелова [13, т.1, с.28–32]. В этой книге приведена и формула Тидмана для двухфотонного излучения. Еще раньше, в 1968 г., двухфотонное излучение рассматривалось Франком [29]. Проблема двухфотонного излучения обсуждалась Франком и в его последней монографии [8, с.99]. Но во всех этих работах рассматривалась вероятность излучения пар фотонов без учета возможности их наблюдения. А ведь в общем случае эти пары фотонов столь же ненаблюдаемы, как и одиночные фотоны, которые мы условно назвали первичными по отношению к таким же фотонам, но вошедшим в макроскопический процесс образования черенковского излучения. Так, отмечая как недоразумение тот факт, что во всех предшествующих рассмотрениях двухфотонное излучение проводилось без учета наблюдения таких пар, мы подчеркиваем, что с несомненностью следует рассматривать только такие пары фотонов, в которых один из фотонов оказался излученным под углом, строго отвечающим образованию черенковского излучения. Тогда и второй фотон окажется наблюдаемым как сопровождающий макроскопически организованный процесс образования черенковского излучения. Следует отметить, что при этом первый фотон, обеспечивший принадлежность данной пары фотонов к регистрируемому макроскопическому



процессу, сам может и не дойти до регистратора из-за поглощения в газе радиатора или в стекле оптической системы.

В исследованиях черенковского излучения, проведенных на уникальном пучке релятивистских ионов свинца ускорителя SPS (CERN) при атмосферном давлении воздуха в газовом черенковском счетчике, была получена фотография, на которой видно узкое кольцо яркого черенковского света, расположенное в середине более широкого и менее интенсивного светового кольца с четко обозначенными краями. Вполне возможно, что это широкое кольцо образовалось за счет регистрации второго фотона при излучении пар фотонов. Суммарная интенсивность света в этом широком кольце, конечно, весьма значительна, но следует учитывать, что квадрат заряда для свинца в 6724 раза превышает квадрат величины заряда протона. Этот фактор значительно компенсирует второй порядок процесса в квантовой электродинамике. К сожалению, по этим исследованиям черенковского излучения на уникальном пучке релятивистских ионов свинца пока опубликованы лишь два кратких сообщения о получении экспериментальных указаний на возможное существование весьма экзотических явлений [30,31].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Черенков П.А. // Доклады АН СССР. 1934. Т.2. С.451.
2. Вавилов С.И. // Доклады АН СССР. 1934. Т.11. С.457.
3. Вавилов С.И. // Фронт науки и техники. 1935. Т.3. С.130.
4. Malle L. // Compt. Rend. 1926. V.183. P.274; 1928. V.187. P.222; 1929. V.188. P.445.
5. Свешников Б.Я. // УФН. 1961. Т.75. Вып.2. С.287–294.
6. Черенков П.А. // Доклады АН СССР. 1936. Т.3 (12). С.413–416.
7. Тамм И.Е., Франк И.М. // Доклады АН СССР. 1937. Т.14. С.107.
8. Франк И.М. Излучение Вавилова–Черенкова. М.: Наука, 1988.
9. Тамм И.Е. // J. Phys. USSR. 1939. V.1. P.439; на русском яз. см. [10, с.72].
10. Тамм И.Е. // Собрание научных трудов. М.: Наука, 1975. Т.1.
11. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1970; на англ. яз. *Born M., Wolf E. Principles of Optics.* Oxford: Pergamon Press, 1964.
12. Воспоминания о И.Е.Тамме / Под ред. Е.Л.Фейнберга М.: Наука, 1981.
13. Зрелов В.П. Излучение Вавилова–Черенкова и его применение в физике высоких энергий. М.: Атомиздат, 1968. Т.1–2; на англ. яз. *Zrelov V.P. Cherenkov Radiation in High-Energy Physics.* Part 1–2. Jerusalem: Isr. Progr. f. Scien. Translation, 1970.
14. Ферми Э. Научные труды. М.: Наука, 1972. Т.2. Ст.85. С.22; на англ. яз. *Fermi E.* // Phys. Rev. 1940. V.140, N.57. P.485.
15. Bohr N. // Phil. Mag., 1913. V.25. P.10; 1915. V.30. P.581.
16. Тамм И.Е., Франк И.М. // Труды ФИАН СССР. 1944. Т.2. Вып.4. С.63; см. также [10, с.113].

17. *Williams E.* // Det Kgl. Danske Vid. Selskab. Mat.-fys. Medd. Kobenhavn. 1935. 13. N.4.
18. *Bohr A.* Atomic Interaction in Penetration Phenomena // Det Kgl. Danske Vid. Selskab. Mat.-fys. Medd. Kobenhavn. 1948. 24. N.19; а) *Бор О.* Приложение к книге: *Бор Н.* Прохождение атомных частиц через вещество. М.: Иностранная литература, 1950.
19. *Tidman D.A.* // Nuovo Cim. 1956. V.3. N.2. P.503.
20. *Tidman D.A.* // Nucl. Phys. 1956/57. V.2. P.289; 1957. V.4. P.257.
21. *Huybrechts M., Schönberg M.* // Nuovo Cim. 1952. V.9. No.9. P.764.
22. *Neamtan S.M.* // Phys. Rev. 1953. V.92. P.1362.
23. *Гинзбург В.Л.* // ЖЭТФ. 1940. Т.10. С.589.
24. *Болотовский Б.М., Лейкин Е.М.* // УФН. 1959. Т.69. С.693.
25. *Afanasiev G.N., Kartavenko V.G., Magar E.N.* // Physica B. 1999. V.269. P.95.
26. *Afanasiev G.N., Eliseev S.M., Stepanovsky Yu.P.* // Physica Scripta. 1999. V.60. P.535.
27. *Афанасьев Г.Н., Картавенко В.Г.* // Изв. РАН. Сер. физ. 1999. Т.63. С.5.
28. *Jelley J.V.* Cerenkov Radiation. London: Pergamon Press, 1958; пер. на рус. яз. *Джелли Дж.* Черенковское излучение. М.: Иностранная литература, 1960.
29. *Франк И.М.* // ЯФ. 1968. Т.7. С.1100.
30. *Тяпкин А.А.* Препринт ОИЯИ Д1-99-292. Дубна, 1999.
31. *Vodopianov A.S., Zrelov V.P., Tyarkin A.A.* // Particles and Nuclei, Letters. 2000. No.2[99]. P.35.