

МЕХАНИЗМ ИЗЛУЧЕНИЯ ВАВИЛОВА–ЧЕРЕНКОВА

А. П. Кобзев

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

ВВЕДЕНИЕ	831
РАЗВИТИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ О МЕХАНИЗМЕ ИЗЛУЧЕНИЯ ВАВИЛОВА–ЧЕРЕНКОВА	840
ТЕОРИЯ ЭФФЕКТА ВАВИЛОВА–ЧЕРЕНКОВА	850
НАГЛЯДНОЕ ОБЪЯСНЕНИЕ МЕХАНИЗМА ГЕНЕРАЦИИ ИЗЛУЧЕНИЯ ВАВИЛОВА–ЧЕРЕНКОВА	855
ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА ИЗЛУЧЕНИЯ ВАВИЛОВА–ЧЕРЕН- КОВА	858
ВЫВОДЫ	863
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	865

МЕХАНИЗМ ИЗЛУЧЕНИЯ ВАВИЛОВА–ЧЕРЕНКОВА

А. П. Кобзев

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Обсуждается механизм генерации излучения Вавилова–Черенкова. Авторы теории эффекта Вавилова–Черенкова И. Е. Тамм и И. М. Франк объяснили его с помощью открытого ими нового механизма излучения при равномерном и прямолинейном движении заряженной частицы в среде. Поскольку такой механизм предполагает нарушение законов сохранения энергии и импульса, они предложили отменить эти законы для объяснения механизма излучения Вавилова–Черенкова. Эта идея получила весьма широкое распространение при создании других теорий, например теории переходного излучения. В данной работе показано, что механизм излучения при равномерном и прямолинейном движении заряда является ошибочным, поскольку он противоречит не только законам сохранения энергии и импульса, но и самому определению равномерного и прямолинейного движения (первый закон Ньютона). Предложено последовательное, не противоречащее фундаментальным законам объяснение микроскопического механизма излучения Вавилова–Черенкова. Показано, что излучение возникает в результате взаимодействия движущегося заряда со связанными зарядами, находящимися на достаточно большом расстоянии от его траектории. Механизм излучения Вавилова–Черенкова носит тормозной характер, но он принципиально отличается от механизма тормозного излучения прежде всего тем, что излучение Вавилова–Черенкова возникает в результате двухступенчатого процесса. Сначала движущаяся частица поляризует среду, а затем уже поляризованные атомы излучают когерентно, если скорость частицы превышает фазовую скорость света в среде. Если скорость частицы меньше фазовой скорости света в среде, то поляризованные атомы возвращают энергию удаляющейся частице. Излучения при этом не наблюдается. Обращается внимание на то, что условием когерентного сложения волн является достаточно постоянная скорость частицы. Однако ее движение не может называться равномерным и прямолинейным, как это движение определено первым законом Ньютона, а также вопреки законам сохранения энергии и импульса.

The mechanism for generating the Vavilov–Cherenkov radiation is discussed in this paper. For explaining the Vavilov–Cherenkov effect the authors of the theory used a mechanism, discovered by them — the radiation of a charged particle moving in a medium uniformly. They canceled the laws of energy and pulse conservation for the mechanism of the Vavilov–Cherenkov radiation, because this mechanism contravenes these laws. This idea has the widest spread now for formation of other theories, such as the theory of transition radiation. In this paper it is shown which mechanism of the radiation of a charged particle moving uniformly in a medium is erroneous, because it contradicts as well the laws of energy and pulse conservation, as the definition of the uniform movement (the first Newton's law). A consistent explanation of the microscopic mechanism of the Vavilov–Cherenkov radiation in agreement with the fundamental laws is proposed. It is shown that the radiation occurs as a result of the interaction of moving charge with the coupled charges situated at a distance from the trajectory of the moving charge. The mechanism of the Vavilov–Cherenkov radiation is bremsstrahlung-like, but it differs from the ordinary bremsstrahlung in principle, first of all by the fact that the Vavilov–Cherenkov radiation occurs as a result of the two-step process. First, a moving particle polarizes the medium, and then the polarized atoms give the radiation coherently, if speed of the particle exceeds the phase velocity of the light in the medium. If the speed of the particle is less than the phase velocity of light, the polarized atoms return the energy to the moving away

particle. The radiation is absent in such a case. It is important to pay attention to the fact that the condition for coherent interference of the waves is rather constant speed of the particle. However, its movement can't be named uniform and straight-line motion as it was defined by the first Newton's law and contrary to the laws of the conservation of energy and momentum.

PACS: 41.60.Bq

Когда же, в конце концов, около 1860 года закон сохранения энергии получил всеобщее признание, он сделался весьма быстро краеугольным камнем всего естествознания. Теперь всякая новая теория, особенно физическая теория, оценивалась прежде всего с точки зрения ее соответствия с законом сохранения энергии.

*Лауэ М. Инерция и энергия**

ВВЕДЕНИЕ

С того времени, когда была создана макроскопическая теория эффекта Вавилова–Черенкова [1], прошло уже более 70 лет. За эти годы выполнено большое количество различных исследований в этой области, опубликованы сотни экспериментальных и теоретических работ, успешно эксплуатируются различного рода черенковские счетчики во многих лабораториях по всему миру, написаны несколько обзоров и монографий [2–5], присуждена Нобелевская премия за открытие этого явления, а правильное объяснение микроскопического механизма генерации излучения Вавилова–Черенкова (ИВЧ) до сих пор не было предложено. Во многих публикациях сделаны категорические утверждения, которые находятся в явном противоречии с фундаментальными законами. Предпринимались слабые попытки привести объяснение механизма ИВЧ в соответствие с фундаментальными законами, но они до сих пор не получили широкого признания. Обычно авторы ограничиваются краткими замечаниями, из которых читателю следует сделать вывод, что и так все ясно. Но большинство авторов различных публикаций приводят ошибочные объяснения механизма ИВЧ.

Так, например, в 1958 г. в нобелевской лекции [6] И.Е.Тамм сказал следующее: «В течение многих десятков лет всех молодых физиков учили, что свет (и электромагнитные волны вообще) может излучаться только при неравномерном движении электрических зарядов. При доказательстве этой теоремы явно или неявно используется тот факт, что теория относительности не допускает движений со сверхсветовой скоростью; согласно этой теории

*УФН. 1959. Т. 67, вып. 4. С. 729.

никакое материальное тело не в состоянии даже достичь скорости света. Тем не менее в течение долгого времени эта теорема считалась справедливой без всяких оговорок.

Более того, когда И. М. Франк и я уже разработали математически правильную теорию излучения Вавилова–Черенкова, мы все еще пытались разными способами, которые для нас самих сегодня уже непостижимы, примирить наши результаты с утверждением, что для излучения необходимо ускорение».

Чему неверно учили «всех молодых физиков» И. Е. Тамм и И. М. Франк более определенно сформулировали еще в 1944 г. [7]. Они утверждали следующее: «Отметим попутно, что в случае $v < c$ законы сохранения в равной мере запрещают как испускание отдельного фотона, так и одновременно группы фотонов. Однако для сверхсветовой скорости такие процессы высшего порядка возможны, причем для них, очевидно, условие (4)* не обязательно». Таким образом, в работе [7] для объяснения механизма ИВЧ закон сохранения энергии был отвергнут совершенно недвусмысленно и в последующих публикациях многих авторов этот факт находил подтверждение до настоящего времени.

Так, например, в книге М. А. Тер-Микаэляна «Влияние среды на электромагнитные процессы при высоких энергиях» [8, с. 210] автор утверждает: «В большинстве разобранных ниже примеров скорость частицы будет предполагаться постоянной. Исходя из законов сохранения энергии и импульса можно показать, что равномерно движущаяся частица в однородной среде электромагнитные волны не излучает (см. пример в конце § 23). Исключением из этого правила является излучение «сверхсветового электрона» — так называемое излучение Вавилова–Черенкова [1–4]**, теория которого была дана в работе И. Е. Тамма и И. М. Франка». Таким образом, М. А. Тер-Микаэлян тоже исключил законы сохранения энергии и импульса из механизма ИВЧ, правда, сославшись при этом на нобелевских лауреатов.

Приведенная здесь цитата из книги М. А. Тер-Микаэляна [8] взята из гл. IV, которая называется «Переходное излучение». Хотя авторы теории переходного излучения В. Л. Гинзбург и И. М. Франк [9] также настаивают на том, что оно возникает при равномерном и прямолинейном движении заряда, и, таким образом, отбрасывают законы сохранения энергии и импульса для любых скоростей движущегося заряда, М. А. Тер-Микаэлян не распространяет исключение из законов сохранения энергии и импульса на это явление.

*Условие (4) следующее: $\cos \theta = c/vn$, где c — скорость света в вакууме; v — скорость частицы; n — показатель преломления; θ — угол излучения.

**Здесь и далее в цитатах нумерация библиографических ссылок, формул и т. д. приведена в соответствии с источником.

Вот как он вышел из столь затруднительного положения. На той же странице [8] читаем: «Таким образом, за исключением случая излучения "сверхсветового" электрона, равномерно движущаяся частица при прохождении через однородную среду электромагнитные волны не излучает. Для возникновения излучения необходимо создать в среде, через которую проходит частица, неоднородность. Наиболее простая неоднородность — это граница раздела между двумя однородными средами». Изменяет ли неоднородность характер движения частицы или и при наличии неоднородности частица продолжает двигаться равномерно и прямолинейно, автор предпочел не прояснять такие детали.

Когда М. А. Тер-Микаэлян пишет, что «скорость частицы будет предполагаться постоянной», здесь никаких вопросов не возникает, такой прием используется часто. Нельзя не согласиться с М. А. Тер-Микаэляном, когда он утверждает, что законы сохранения энергии и импульса не допускают излучения равномерно и прямолинейно движущейся частицей. И действительно, если при движении в среде заряженная частица взаимодействует с зарядами среды, то такое движение является несвободным и его нельзя назвать равномерным и прямолинейным.

Строго говоря, законы сохранения энергии и импульса не допускают излучения равномерно и прямолинейно движущейся частицей вообще никогда. Если же прислушаться к мнению М. Лауэ, которое приведено в качестве эпиграфа к данной статье, скорее надо поправлять новую теорию, чем утверждать, что в ней допускается нарушение законов сохранения энергии и импульса. Но мнение М. Лауэ игнорируется многими авторами, и отрицание закона сохранения энергии уже получает все более широкое распространение.

Вот, например, что можно прочитать в книге В. Л. Гинзбурга и В. Н. Цитовича [10]. В самом начале главы (с. 7), которая так и называется «Излучение равномерно и прямолинейно движущегося заряда», авторы сделали программное заявление, которое фактически подводит итог развития современной науки о движении зарядов: «В электродинамике многие годы господствовала догма, которую можно сформулировать так: равномерно и прямолинейно движущийся заряд не излучает. Фактически такое утверждение нуждается в уточнении даже при движении заряда в вакууме (см. ниже и [1, гл. 1]). Что касается движения с постоянной скоростью источника, не обладающего собственной частотой (заряда, постоянного диполя и т. д.), в среде или вблизи среды, то возникновение излучения можно считать даже не исключением, а правилом».

Таким образом, если И. Е. Тамм и И. М. Франк отменили законы сохранения энергии и импульса только для сверхсветовых скоростей движения зарядов [7], то В. Л. Гинзбург и В. Н. Цитович утверждают, что закон, который, по мнению Лауэ, с 1860 г. стал «краеугольным камнем всего естествознания», в 1984 г. перестал иметь какое-либо значение при построении новых физиче-

ских теорий. Так считают не только В. Л. Гинзбург и В. Н. Цитович, которые прямое следствие из него называют догмой, И. Е. Тамм называет его теоремой, а М. А. Тер-Микаэлян — правилом, из которого тут же делает исключение. С этим согласны почти все авторы публикаций об ИВЧ и переходном излучении, хотя иногда встречаются и противоположные подходы.

Так, например, в более ранней работе [11], в которой, как считается, В. Л. Гинзбург разработал квантовую теорию ИВЧ, в 1940 г. для построения теории использовались законы сохранения энергии и импульса. Полагая, что квант ИВЧ испускает непосредственно движущаяся заряженная частица, он получил выражение для угла излучения с поправкой на изменение скорости частицы как по величине, так и по направлению. Хотя изменение скорости было незначительным, все же автор не называл движение частицы равномерным и прямолинейным в тексте статьи. Более того, в 1940 г. В. Л. Гинзбург заявлял, что «классический расчет производится в предположении о постоянстве скорости электрона» вопреки утверждению авторов классической теории И. Е. Тамма и И. М. Франка [1], которые, как мы видели, решительно настаивали на равномерном и прямолинейном движении заряда, генерирующего ИВЧ. Но в заголовке статьи [11] В. Л. Гинзбург назвал все же равномерным движение заряда, испускающего квант и при этом изменяющего скорость по величине и направлению.

Если в расчете [11] только предполагается равномерное и прямолинейное движение, то молодые физики понимают, что законы сохранения энергии и импульса в 1940 г. В. Л. Гинзбург не отменял и не называл прямое следствие из них «догмой», как это сделали В. Л. Гинзбург и В. Н. Цитович в книге [10] уже в 1984 г.

За время, прошедшее с тех пор, когда впервые в работе И. Е. Тамма и И. М. Франка было дано объяснение механизма ИВЧ [1], допускающее излучение при равномерном и прямолинейном движении заряда в среде, молодые физики постарели, другие молодые физики пытаются понять механизм ИВЧ и, к сожалению, известные ученые продолжают навязывать им ошибочное толкование механизма ИВЧ.

Так, например, уже в 1996 г. С. П. Денисов в обзорной лекции об ИВЧ [12] объясняет: «Естественно задать вопрос: как же так может быть? Ведь до публикации работы И. Е. Тамма и И. М. Франка в 1937 г. считалось, что заряд, движущийся с постоянной скоростью, не может излучать. Да, считалось. Но при этом молчаливо предполагалось, что скорость движения заряда не может превышать скорость распространения света. Но последнее справедливо только для вакуума. Действительно, в вакууме, согласно теории относительности, скорость распространения света $c = 3 \cdot 10^8$ м/с является максимальной скоростью, и всегда $v < c$, где v — скорость движения частицы. Другое дело — вещество. Как хорошо известно, в веществе с показателем преломления n скорость света равна c/n и возможно выполнение условия

$v > c/n$ без противоречия с теорией относительности». Вряд ли такое объяснение студенты сочли убедительным. Почему нужно отвергать законы сохранения энергии и импульса при условии $v > c/n$, уважаемый профессор так и не привел каких-либо аргументов.

А в лекции о переходном излучении [13] С. П. Денисов еще раз обращается к этому вопросу: «Может ли заряд, движущийся равномерно и прямолинейно, излучать электромагнитные волны? Подавляющее большинство выпускников средней школы дают на этот вопрос категоричный ответ — не может. И поясняют: излучает только заряд, движущийся с ускорением. Ответ в общем случае неправильный. Он верен только, если заряд находится в вакууме. Если же заряд перемещается в веществе с постоянной скоростью, превышающей фазовую скорость распространения света в этой среде, то возникает черенковское излучение.

А может ли излучать заряд, движущийся без ускорения с досветовой скоростью?»

Далее следует изложение теории переходного излучения и следующее обобщение: «Вообще если равномерно и прямолинейно движущийся заряд излучает в лабораторной системе координат, то излучение будет существовать и в любой другой инерциальной системе отсчета, в том числе и в той, где заряд покоится».

Выпускники средней школы оказываются несколько озадаченными, поскольку М. В. Ломоносов их учил: «Если где, чего, сколько будет, то столько же присовокупится в другом месте». Они понимают, что у покоящегося заряда просто нет энергии на излучение, а уважаемый профессор утверждает обратное. Причем здесь уже не обойтись ссылкой на релятивистскую скорость, если заряд покоится. Видимо, М. В. Ломоносов теперь уже неправ, но тогда надо объяснить, почему он неправ. Таких объяснений не последовало.

Все эти ссылки на «выпускников средней школы» и «молодых ученых», которых в течение 70 лет так и не смогли убедить нобелевские лауреаты, требуются потому, что такого рода объяснения даже у самих авторов вызывают сомнения. Поэтому вопросы адресуются «выпускникам средней школы» или «молодым ученым», которым приходится отстаивать фундаментальные законы. А вот то обстоятельство, что сам термин «равномерное и прямолинейное движение» четко определен первым законом Ньютона, до сих пор, насколько мне известно, никто не отмечал. Все, конечно, знают этот закон, но здесь совершенно необходимо привести его формулировку. Первый закон Ньютона гласит: «Всякое тело продолжает удерживаться в своем состоянии покоя или равномерного прямолинейного движения пока и поскольку оно не понуждается приложенными силами изменить это состояние» [14].

Очевидно, что первый закон Ньютона совершенно ясно определил, что равномерно и прямолинейно движущаяся частица не может никаким образом взаимодействовать с чем-нибудь (частицей, полем, средой, границей), а если

взаимодействие с чем-то происходит, то частица переходит в другое состояние — неравномерного движения. Если излучение наблюдается при движении частицы, значит она с чем-то взаимодействует и, следовательно, движется неравномерно. Причем, как видно из сути этого закона, количественные оценки замедления не имеют значения, т.е. заряд не может двигаться «почти равномерно и прямолинейно», а только равномерно и прямолинейно, либо — неравномерно. Поскольку другого определения для равномерного и прямолинейного движения не существует, нельзя отказаться от первого закона Ньютона даже со ссылкой на теорию относительности. Отсюда ясно, что понятие равномерного и прямолинейного движения, как оно было определено Ньютоном, несовместимо с современными интерпретациями механизмов генерации переходного излучения и ИВЧ.

Размещение ускорителей вдоль траектории частицы для поддержания постоянной скорости, как это предлагают некоторые авторы (см., например, [11]), очевидно, не может привести ее в состояние равномерного и прямолинейного движения, а скорее является подтверждением несвободного движения.

Таким образом, настаивая на механизме излучения при равномерном и прямолинейном движении заряда, приходится отменять как законы сохранения энергии и импульса, так и первый закон Ньютона. Самое удивительное, что авторы новых теорий не привели, как мы видели, каких-либо серьезных аргументов в пользу столь важного решения, а предлагают отменить фундаментальные законы аксиоматически.

А между тем отменять фундаментальные законы нет никакой необходимости. Из вышесказанного совершенно очевидно, что механизм генерации ИВЧ и переходного излучения может быть только тормозным. В механизме генерации ИВЧ есть, конечно, свои принципиальные особенности, которые делают его существенно отличающимся от механизма тормозного излучения, но эти особенности могут быть объяснены в рамках фундаментальных законов. Энергия, которую расходует на излучение движущийся в среде заряд, составляет малую часть от его кинетической энергии. Излучение наблюдается под всеми углами строго симметрично относительно траектории частицы. Эти обстоятельства порождают ошибочные рассуждения об излучении при равномерном и прямолинейном движении в нарушение фундаментальных законов.

Здесь уместно вспомнить, что при обсуждении механизма ИВЧ многие авторы проводят аналогию с другим, но уже акустическим явлением. Любопытно, что никто не берется утверждать, что самолеты, летящие со сверхзвуковой скоростью в воздухе, движутся при этом равномерно и прямолинейно и не подчиняются законам механики.

У читателя, вероятно, уже возник вопрос: «Если автор этой статьи увидел все эти противоречия, то неужели за прошедшие 70 лет никто другой этого не увидел?» Отвечаю: «Да, видели, и писали об этом более или менее

определенно, но их мнение игнорируется полностью во всех публикациях, посвященных ИВЧ и переходному излучению».

Например, мнение лауреата Нобелевской премии Э. Ферми до сих пор остается без должного внимания. В работе [15] он утверждал следующее: «Such an emission of radiation has actually been observed by Cerenkov, and can easily be seen to occur in those ranges of frequency for which the phase velocity of light in the given medium is smaller than the velocity of the particle. Its theory has been developed by Frank and Tamm with methods very similar to those used here and with similar results. It is noteworthy that the Cerenkov radiation, as results from the preceding formulae, *does not represent a loss of energy to be added to that calculated with the Bohr theory; but it forms instead part of loss of the Bohr theory*, as is seen from the fact that (30), (31), which include the Cerenkov radiation, give the same result (32) as the Bohr theory in the limit of very low densities ($\varepsilon = 1$) when the polarization effects become negligible».

Как видим, Э. Ферми утверждает, что механизм ИВЧ боровский, т. е. тормозной. Причем мысль, которую он опровергает (другой, неборовский, нетормозной механизм), явно возникла в связи со смелыми утверждениями авторов теории ИВЧ И. Е. Тамма и И. М. Франка, приведенными в их основополагающей работе [1], с которой Э. Ферми познакомился. С замечанием Э. Ферми нельзя не согласиться хотя бы потому, что в противоположном случае оказывается, что налетающий заряд взаимодействует с атомами среды дважды: один раз в соответствии с тормозным механизмом, а второй раз в соответствии с новым механизмом ИВЧ. Правда, Э. Ферми не стал пояснять, насколько отличается механизм генерации ИВЧ от обычного механизма тормозного излучения и в чем состоит отличие.

И. Е. Тамм и И. М. Франк, познакомившись с работой Э. Ферми [15], вообще не обратили внимания на его замечание, касающееся механизма ИВЧ. Это видно из следующего комментария [7]: «При близких соударениях движущийся электрон передает электронам среды столь большую энергию, что эти электроны можно считать свободными. При далеких же соударениях, сопровождающихся малыми передачами энергии, существенную роль играет энергетический и оптический спектр атомов среды. При рассмотрении далеких соударений до последнего времени не учитывалось, что действующее на далекие (по сравнению с межатомными расстояниями) атомы среды электрическое поле движущегося электрона отнюдь не совпадает с полем этого электрона в вакууме, а видоизменяется благодаря наличию среды. На это обстоятельство недавно указал Ферми [56], развивший новую теорию ионизационных потерь, свободную от этого недостатка, результаты которой имеют существенное значение для теории космических лучей. Учет влияния среды на поле движущегося электрона проведен Ферми методом, вполне аналогичным примененному в теории ИВЧ авторами настоящей статьи, на первую заметку которых [4] Ферми и ссылается в этой связи».

А вот другой автор — О. Бор — настаивает на важности критического замечания Э. Ферми. В приложении к книге Н. Бора «Прохождение атомных частиц через вещество» [16] в разд. 7, названном «Эффект Черенкова и его связь с проблемой торможения», он пишет: «В настоящем разделе мы обсудим некоторые черты эффекта Черенкова и, в частности, его связь с теорией торможения. Представляет интерес рассмотреть эффект как с микроскопической, так и с макроскопической точки зрения. В первом случае мы получим непосредственную связь с рассуждениями в разд. 6, вторая же точка зрения аналогична развитой Франком, Таммом и Ферми.

С микроскопической точки зрения эффект Черенкова возникает из-за того, что часть энергии, передаваемой проникающей частицей, может впоследствии быть испущена как когерентное излучение. В предыдущем разделе не было необходимости учитывать этот эффект, поскольку в проблеме тормозной способности в первом приближении нужно рассматривать поведение электрона только во время соударения с частицей. Действительно, можно сказать, что потеря энергии частицей происходит в течение этого короткого промежутка времени, и на нее не влияет дальнейшее распределение энергии, переданной электрону. Из этих соображений становится очевидным, что эффект Черенкова соответствует части тормозной способности, оцененной в разд. 6, и не должен рассматриваться как дополнительный источник потерь энергии (см. Ферми [6]).».

В книге Н. Бора и в приложении, написанном О. Бором, рассмотрено взаимодействие движущегося заряда с покоящимся, взаимодействие движущегося заряда с изолированным атомом и с атомами в твердом теле во всех подробностях, в том числе и эффекты, связанные с ИВЧ. Причем авторы не выделяют механизм генерации ИВЧ как особое явление, напротив, они представляют его как разновидность электромагнитного взаимодействия зарядов. Об отмене законов сохранения энергии и импульса не может быть и речи, поскольку конечным результатом их исследований является расчет потерь энергии зарядом при движении в среде.

А вот какое объяснение механизма ИВЧ можно найти в книге Г. М. Гарибяна и Ян Ши [17]. Они объясняют механизм ИВЧ и переходного излучения следующим образом: «То обстоятельство, что излучение Вавилова–Черенкова и переходное излучение описываются одной и той же формулой (1.37) (в более общем случае — (1.35)), не является случайным. Дело в том, что оба эти излучения имеют место при равномерном и прямолинейном движении заряженной частицы (или, другими словами, в пределе бесконечной массы покоя частицы), и поэтому оба они представляют собой излучение коллектива электронов среды, получающих импульсы отдачи при взаимодействии с пролетающим внешним зарядом. В этом смысле эти два типа излучения нельзя считать принципиально различными и их разделение носит несколько условный характер».

Авторы нашли замечательную формулировку, которая, с одной стороны, почти точно совпадает со ставшей уже классической (имеют место при равномерном и прямолинейном движении), но в скобках добавили замечание о частице с бесконечной массой покоя, которое показывает, что реальные частицы движутся совсем неравномерно, когда возбуждают ИВЧ. А если вспомнить, что авторы теории ИВЧ и переходного излучения рассматривали обычно движущийся электрон, а не частицу с бесконечной массой покоя, то намек на «слегка неравномерное движение» становится совершенно прозрачным. Поговорив о том, насколько равномерно движется частица в среде, авторы [17] тем не менее подтверждают, что именно «коллектив электронов среды» излучает переданную ему энергию, что близко к объяснению, предложенному О. Бором [16]. На возражение же О. Бора авторам теории ИВЧ о тормозном характере механизма Г. М. Гарибян и Ян Ши не стали обращать внимание.

Вопрос об устремлении массы частицы к бесконечности обсуждается и в книге Л. Д. Ландау и Е. М. Лифшица [18], но здесь авторы несколько сместили акцент: «Заряженная частица, движущаяся в прозрачной среде, в определенных условиях испускает своеобразное излучение; оно было впервые наблюденно С. И. Вавиловым и П. А. Черенковым и теоретически истолковано И. Е. Таммом и И. М. Франком (1937). Подчеркнем, что это излучение не имеет ничего общего с фактически всегда имеющим место (при движении быстрого электрона) тормозным излучением. Последнее испускается самим движущимся электроном при его столкновении с атомами. В явлении же Черенкова мы имеем по существу дело с излучением, испускаемым средой под влиянием поля движущейся в ней частицы. Различие между обоими типами излучений особенно ясно проявляется при переходе к пределу сколь угодно большой массы частицы: тормозное излучение при этом исчезает вовсе, а излучение Черенкова вообще не меняется».

Отмечая убедительное объяснение различия двух механизмов (тормозного излучения и ИВЧ) и ясное указание на источник излучения — среду, нельзя не обратить внимания на то, что авторы [18] не заметили «ничего общего» между взаимодействием движущегося электрона с атомом и взаимодействием электрона со средой, состоящей тоже из атомов, но находящихся на большем расстоянии от траектории электрона, в то время как Э. Ферми, а затем и О. Бор специально подчеркнули принципиальную общность этих механизмов.

Кажется, уже достаточно примеров, которые показывают, что проблема «перезрела». Решение ее достаточно очевидно. Стоит только задать вопрос: «Есть ли какие-либо основания для отмены законов сохранения энергии и импульса, а также первого закона Ньютона?» Авторы теории переходного излучения вообще не приводят каких-либо аргументов, а авторы теории ИВЧ ссылаются на «сверхсветовой характер» этого явления. Что именно позво-

ляет отменять фундаментальные законы, когда частица движется со скоростью, превышающей фазовую скорость электромагнитных колебаний в среде, но никогда не превышает скорости света в вакууме, авторы этой теории не поясняют. Заметим, что речь идет о скоростях частиц, которые достигаются в ускорителях в рамках законов электродинамики, и когда ускоренные частицы попадают в твердое тело, те же законы продолжают действовать. Таким образом, можно утверждать, что проведенное выше подробное рассмотрение вполне убедительно доказывает, что нет никаких оснований для отмены законов сохранения энергии и импульса, а также первого закона Ньютона. Против механизма ИВЧ, предложенного И. Е. Таммом и И. М. Франком, можно перечислить целый ряд доводов.

1. Противоречие законам сохранения энергии и импульса.
2. Противоречие первому закону Ньютона.
3. Отсутствие какого-либо механизма излучения при переходе в систему координат, связанную с частицей.
4. Возможность двух механизмов взаимодействия движущейся частицы с одними и теми же атомами.

Ошибочное объяснение механизма ИВЧ получило настолько широкое распространение, что сейчас во всех монографиях, обзорах, справочниках, энциклопедиях и учебниках излагается только противоречащее фундаментальным законам объяснение механизма ИВЧ и переходного излучения, что приводит к разрушению «краеугольного камня всего естествознания».

Ниже будет дано достаточно наглядное и подробное описание самого механизма эффекта Вавилова–Черенкова, который хотя и носит тормозной характер, но не является тривиальным. Предлагаемое в данной работе объяснение механизма ИВЧ возникло в результате достаточно строгого анализа (без поправок на чины и звания авторов) существующих объяснений механизма и прямого указания на противоречия фундаментальным законам.

Чтобы проследить, какие повороты совершались в процессе познания механизма ИВЧ, и понять, как и почему возникали различные неверные объяснения, необходимо обратиться к истории развития теории эффекта Вавилова–Черенкова.

1. РАЗВИТИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ О МЕХАНИЗМЕ ИЗЛУЧЕНИЯ ВАВИЛОВА–ЧЕРЕНКОВА

Путь к истине труден и извилист, и объяснение механизма ИВЧ является ярким тому примером. Начинать исторический обзор, видимо, надо с О. Хевисайда, который еще в 1888 г. [19] указал на возможность излучения при движении заряда в среде со скоростью, превышающей скорость распространения электромагнитных колебаний. Он отказывался рассматривать процесс движения заряда со скоростью, превышающей скорость распространения

света в эфире, но рассмотрел движение заряда со скоростью u , превышающей скорость распространения волны v в диэлектрике, и получил следующее выражение для угла, который образует фронт плоской волны излучения относительно траектории заряда φ :

$$\sin \varphi = v/u.$$

В последующем работы О. Хевисайда об излучении движущегося в среде заряда были забыты, и их обнаружили одновременно несколько читателей почти через 90 лет, только в 1974 г. [20–22].

Известно также, что в 1901 г. лорд Кельвин [23] указал на то, что атом, летящий в пустоте со скоростью выше скорости света, должен излучать электромагнитные волны. Позднее в 1904 г. А. Зоммерфельд [24] также рассмотрел вопрос об излучении электрона, движущегося в пустоте со сверхсветовой скоростью.

Нужно отметить, что во всех этих рассмотренных, проведенных великими учеными, не обсуждаются такие вопросы, как механизм генерации излучения, законы сохранения энергии и импульса, принципиальные спектральные ограничения, т. е. рассматривается предельно простая схема процесса. Заряд движется равномерно и прямолинейно, излучает на всех частотах вплоть до бесконечной, поскольку рассматривается среда без дисперсии. Правда, рассуждения об отсутствии дисперсии в гипотетической среде ограничивались длинами волн, приближающимися к размеру движущегося заряда. В вакууме, разумеется, заряду не с чем было взаимодействовать. В качестве причины излучения в такого рода задачах обычно выступал факт превышения скорости частицы над скоростью света: если скорость частицы выше нее, то, по мнению авторов, излучение должно наблюдаться, и оно отсутствует при скорости заряда, меньшей скорости света.

В эксперименте подобный эффект наблюдался П. А. Черенковым [25], который под руководством С. И. Вавилова изучал люминесценцию растворов под действием γ -излучения и обнаружил новое явление. Здесь нет необходимости описывать опыты П. А. Черенкова, следует только отметить, что они убедительно показывали, что наблюдаемое излучение не является люминесценцией. Подводя итоги проведенным исследованиям, С. И. Вавилов [26] дал следующее объяснение механизма нового излучения: «Наиболее вероятной причиной γ -свечения мы считаем излучение при торможении комптоновских электронов». Этой фразой С. И. Вавилов подчеркнул, что излучение вызвано не γ -квантами, как они считали ранее, а электронами, которые испускают видимое излучение в результате торможения в среде. Таким образом, С. И. Вавилов описал механизм ИВЧ как классический тормозной.

Как отмечал И. М. Франк [27], в рамках этой концепции удалось объяснить многие свойства излучения — отсутствие длительности возбужденного состояния, универсальность свечения, а также его поляризацию. Но не уда-

валось объяснить зависимость интенсивности излучения от атомного номера вещества, его направленность, а также абсолютный выход излучения, который намного превосходил предсказания теории тормозного излучения.

В 1937 г. И. Е. Тамм и И. М. Франк [1] рассмотрели излучение заряда, движущегося прямолинейно с постоянной скоростью по бесконечной траектории в среде, где фазовая скорость света меньше скорости заряда. Глядя на такую формулировку задачи, «выпускники средней школы» обнаруживают, что при сколь угодно малых потерях энергии на излучение скорость заряда непременно снизится до пороговой в какой-то точке бесконечной траектории.

«Молодые ученые» тут же возразят, что не следует воспринимать движение с постоянной скоростью по бесконечной, прямолинейной траектории буквально. Это чисто модельное приближение, которое позволяет пренебречь всеми процессами, вызываемыми близкими соударениями движущегося заряда с зарядами среды, и рассматривать только далекие, и даже потерями энергии на излучение в этих процессах можно пренебречь в рамках избранной модели.

Но авторы теории ИВЧ решительно отвергают такого рода объяснение. В основополагающей работе [1] они пишут: «Эти особенности явления были детально рассмотрены С. И. Вавиловым, предположившим, что свечение вызывается торможением быстрых электронов.

В дальнейших опытах Черенков обнаружил резкую асимметрию в распределении интенсивности этого свечения, являющуюся, пожалуй, наиболее характерным его свойством. Оказалось, что в направлении движения электрона света излучается много больше, чем в противоположном направлении.

Отсюда непосредственно вытекает, что бомбардируемое электронами вещество излучает когерентно по крайней мере на протяжении, сравнимом с длиной волны видимого света. Таким образом, это излучение не может быть вызвано ни рассеянием электронов на атомных ядрах, ни взаимодействием с отдельными атомами.

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».

Ясно, что здесь речь идет не о некотором приближении в рамках модели, а об открытии нового, никому до того неизвестного механизма генерации излучения. Макроскопический механизм, предполагающий излучение заряда, движущегося с постоянной скоростью, позволил объяснить все экспериментальные результаты исследования ИВЧ. Однако чисто модельное соображение, обеспечивающее конструктивную интерференцию, было возведено в принцип и породило досадное недоразумение, приведшее к полному противопоставлению тормозного механизма механизму генерации ИВЧ.

Весьма любопытную оценку выделенных двух фраз в приведенной выше цитате можно найти в более поздней работе [28] И. М. Франка: «Утверждение,

сделанное в первой фразе, в действительности требует обоснования, а второе утверждение, если считать его следствием направленности излучения, просто ошибочно. Это стало очевидным почти сразу же, и для меня долго было предметом огорчений. Однако для теории эффекта Вавилова–Черенкова эта фраза совершенно не существенна, и потому не было оснований ее исправлять. Вероятно, по этой же причине за столько лет никто не обратил на нее внимания, хотя наша статья была переиздана вновь в 1967 г.».

Рассеянием на атомных ядрах, конечно, ИВЧ не может быть вызвано, но, признавая взаимодействие с атомами (если вспомнить при этом первый закон Ньютона), приходится признать механизм ИВЧ тормозным, что является ключевым моментом в теории ИВЧ. Следует обратить внимание и на то, что в приведенной выше цитате из работы [1] авторы в одном случае утверждают, что «излучает бомбардируемое электронами вещество», а в другом случае «электрон, движущийся в среде, излучает свет». Если для электрона, излучающего свет, они привели свое объяснение механизма, то вопросы, почему излучает среда и как соотносятся эти процессы, остались без ответов.

В своих воспоминаниях [29] И. М. Франк весьма детально описал попытки построения теории ИВЧ: «И. Е. Тамм рассказал о качественной картине, позволяющей интерпретировать излучение, Л. И. Мандельштаму. Замечание Мандельштама состояло в следующем: известно, что при равномерном и прямолинейном движении электрон не излучает».

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

Как видно, все, участвующие в обсуждениях в то время, и в частности Л. И. Мандельштам, утверждали, что при равномерном и прямолинейном движении электрон не излучает, но никто не указывал, что само определение равномерного и прямолинейного движения, данное первым законом Ньютона, также не допускает возможности излучения.

В последней цитате совершенно верно упоминается о «малом взаимодействии поля частицы с атомами», но даже в 1984 г. И. М. Франк посчитал этот механизм ненужным. Ход его рассуждений, вероятно, был аналогичен тому, который сформулировали Л. Д. Ландау и Е. М. Лифшиц [18] (см. цитату на с. 839). Интенсивность тормозного излучения увеличивается, если ускорение частицы возрастает по абсолютной величине, а расчет показывает, что интенсивность ИВЧ, наоборот, снижается, если скорость электрона изменяется. Значит, излучение возникает при равномерном и прямолинейном движении.

Действительно, требование достаточного постоянства скорости на длине пути, значительно превышающем длину волны излучения, является условием макроскопического механизма, обеспечивающим когерентность излучения. Что же касается микроскопического механизма излучения, то И. М. Франк четко сформулировал задачу его построения, как можно видеть в приведенной выше цитате, но, к сожалению, она оказалась нерешенной, потому что он посчитал ее ненужной.

Следующий этап в развитии представлений о свойствах ИВЧ — это эксперименты на сформированных пучках электронов с энергией от 250 кэВ до 2 МэВ, выполненные Г. Б. Коллинзом и В. Г. Рейлингом в 1938 г. [30]. Эксперименты с учетом рассеяния электронов в основном подтвердили характерную направленность ИВЧ, следующую из теории Тамма–Франка, но не привели к более глубокому пониманию механизма излучения. Это показывает, как непросто было понять механизм генерации ИВЧ даже после теоретического рассмотрения данной задачи в работе [1]. Объясняя механизм ИВЧ, Г. Б. Коллинз и В. Г. Рейлинг написали: «It is to be understood that the electron in its passage through the medium gradually loses nearly all its energy through ionization and excitation processes, and that the resulting acceleration is responsible for the Čerenkov radiation».

Г. Б. Коллинз и В. Г. Рейлинг были знакомы с работой [1], но объясняли механизм ИВЧ, как видно из приведенной цитаты, не вникая в суть теории Тамма–Франка. Замедление частицы, обусловленное процессами ионизации и возбуждения, как уже отмечалось, не только не является источником ИВЧ, но, наоборот, подавляет его. И. Е. Тамм и И. М. Франк впоследствии высоко оценивали их экспериментальные результаты, но И. Е. Тамм подчеркнул, что «Г. Б. Коллинз и В. Г. Рейлинг совершенно неправильно интерпретировали физические основы этой теории» [31]. Возможно поэтому всякое упоминание о тормозном механизме (в том числе и Э. Ферми, и О. Бором) у авторов теории ИВЧ всегда ассоциировалось с интерпретацией, подобной той, которую предлагали Г. Б. Коллинз и В. Г. Рейлинг, а еще ранее С. И. Вавилов.

В развитии представлений о механизме ИВЧ работа Э. Ферми [15] явилась весьма важным этапом, хотя она была посвящена анализу потерь энергии частицами, движущимися в среде. Из приведенной во введении к данной статье цитаты мы видим, что замечание Э. Ферми, совершенно справедли-

вое по существу, носит слишком общий характер. Возражая И. Е. Тамму и И. М. Франку, Э. Ферми подчеркивал, что механизм ИВЧ боровский, т. е. излучение возникает в результате взаимодействия движущегося заряда с зарядами среды, а не в результате равномерного и прямолинейного движения заряда.

Однако Э. Ферми для вычисления полной потери энергии движущейся в среде частицы разделил всю область взаимодействия заряда со средой на две части (близкие и далекие взаимодействия). Как теперь ясно, Э. Ферми сделал это по причине глубокого понимания как общности, так и различия механизмов взаимодействия движущейся частицы с зарядами, находящимися вблизи траектории и вдали от нее. Его замечание о принципиальной общности этих микроскопических механизмов до сих пор оставалось без внимания. Правда, ни Э. Ферми, ни О. Бора, ни кто-то еще не дали достаточно наглядного описания микроскопического механизма ИВЧ, которое могло бы полностью разрешить возникшее недоразумение.

Это условное разделение на близкие и далекие взаимодействия для Э. Ферми и О. Бора явилось подтверждением единства механизма электромагнитного взаимодействия движущегося заряда как с близко находящимися заряженными частицами, так и с удаленными связанными электронами. Другие же читатели интерпретировали такое разделение как доказательство принципиального различия механизмов близкого и дальнего взаимодействия движущегося заряда с атомами среды. Отличие этих механизмов, конечно, существенно, но для его объяснения не требуется нарушения фундаментальных законов.

Однако на эти тонкости никто, кроме О. Бора, не обратил внимания. В результате, как видим, тормозной механизм был отвергнут подавляющим большинством голосов, и в публикациях, вышедших за последние несколько десятилетий, получил распространение нереальный механизм излучения при равномерном и прямолинейном движении заряда, который, как теперь совершенно ясно, противоречит фундаментальным законам.

В оправдание Г. Б. Коллинза и В. Г. Рейлинга можно сказать, что в теоретических работах они не находили непротиворечивого и достаточно подробного описания механизма ИВЧ. Намеки на реальный микроскопический механизм появились уже через год после опубликования работы Г. Б. Коллинза и В. Г. Рейлинга. Вот что написал И. Е. Тамм о микроскопическом механизме в работе [31]: «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». Позднее и другие авторы приходили к пониманию того, что излучают атомы среды, но это не побуждало их усомниться в реальности механизма излучения при равномерном и прямолинейном движении заряда в среде.

Например, Дж. В. Джелли в начале своей статьи [32] пишет: «Если быстрая заряженная частица движется в диэлектрической среде с постоянной скоростью, то связанный с ней электромагнитный импульс временно поляризует среду вблизи траектории частицы. В этом процессе индивидуальные атомы следуют за электромагнитной пульсацией частицы и тем самым сами становятся излучателями электромагнитной волны. В общем случае испускаемые ими волны, идущие от всех частей траектории, интерферируют так, что в точке, находящейся на некотором расстоянии от траектории, интенсивность результирующего поля равняется нулю. Однако если, как это часто случается, скорость частицы превышает фазовую скорость света в этой среде, элементарные волны, идущие от всех частей траектории, могут совпасть по фазе в некоторой точке и дать в ней результирующее поле».

Здесь автор, видимо, пытался изложить объяснение механизма эффекта Вавилова–Черенкова, предложенное О. Бором, но внес свою трактовку допорогового механизма, которая является принципиально ошибочной. Как будет показано ниже, в допороговой области излучение не наблюдается, потому что микроскопический механизм ИВЧ обнаруживает такую особенность, а не в результате деструктивной интерференции.

Дж. В. Джелли ясно указывает, что частица, движущаяся в среде с постоянной скоростью, временно передает часть энергии среде. При этом нет какого-либо выделенного направления, куда бы преимущественно уходила энергия. Из его описания ясно, что процесс передачи энергии от движущейся частицы к однородной среде происходит непрерывно и строго симметрично относительно вектора скорости частицы. Излучателем же электромагнитных волн, по мнению Дж. В. Джелли, высказанному в этой части статьи [32], являются атомы среды, а не движущаяся частица, от которой атомы получают энергию в процессе ее поляризации.

В одном из последующих параграфов той же главы Дж. В. Джелли рассматривает квантовую трактовку ИВЧ, предложенную В. Л. Гинзбургом [11]. Причем, высказанные ранее Дж. В. Джелли соображения о том, что фотон ИВЧ испускает не движущаяся частица, а среда, никак не отражаются на изложении квантовой теории ИВЧ. Он объясняет механизм ИВЧ так просто и ясно, что не может быть никаких сомнений в том, что излучает движущаяся частица. Вот это объяснение: «Пусть u — скорость частицы (массы покоя m) в среде до эмиссии фотона. Будем считать, что в некоторой части ее пути испускается фотон $h\nu$ под углом θ по отношению к первоначальному направлению частицы и что это ведет к мгновенной потере части энергии, так что после этого частица движется со скоростью v под углом φ по отношению к первоначальному направлению».

Если выше Дж. В. Джелли писал о том, что частица «временно поляризует среду вблизи траектории», то теперь оказывается, что частица мгновенно испускает фотон. Самого автора это противоречие несколько не смутило.

Однако А. А. Тяпкин [33] сделал вполне определенный выбор между этими подходами к объяснению механизма ИВЧ.

А. А. Тяпкин решительно поддерживает мнение, что в эффекте Вавилова–Черенкова излучает не движущаяся частица, а атомы среды. Он довольно резко критикует В. Л. Гинзбурга за его квантовую теорию ИВЧ: «Такою вольностью 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 внимания. 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».

Замечание А. А. Тяпкина по существу является справедливым, но он не стал обсуждать совершенно противоположное объяснение механизма ИВЧ (излучение при равномерном и прямолинейном движении электрона), на котором также настаивал В. Л. Гинзбург. Справедливости ради следует отметить, что И. Е. Тамм также давал другое объяснение механизма ИВЧ, как, например, в нобелевской лекции [6], цитата из которой приведена в самом начале данной статьи. Там ясно сказано, что ИВЧ испускает равномерно и прямолинейно движущаяся частица, а не атомы среды.

В. Л. Гинзбург ответил на замечание А. А. Тяпкина тоже довольно темпераментно [34]: «Показать, почему же полученные в [11] поправки “заведомо ложные”, А. Тяпкин не счел нужным. Впрочем, он ничего не продемонстрировал, кроме непонимания того, что в [11], как и в цитируемой им работе [20], квантуется макроскопическая, а не микроскопическая электродинамика в среде».

Однако в той же статье [34], в ответ на аналогичное замечание других авторов, по существу вопроса В. Л. Гинзбург высказал вполне аргументированное соображение: «В публикуемой в этом номере УФН статье [19] и в некоторых других публикациях обсуждался вопрос, является ВЧ “собственным излучением” быстрой частицы или излучением среды, возбуждаемым этой частицей. При этом авторы [19] считают излучение ВЧ собственным излучением частицы. Разумеется, для появления ВЧ-излучения нужны и частица (источник энергии), и среда. Поэтому вопрос, что важнее, является несколько схоластическим. Однако, я считаю, более физически обоснованным, хотя и необязательным, считать излучение ВЧ все же излучением среды. Это особенно разумно, учитывая, что эффект ВЧ имеет место и без всякого ис-

точника — частицы, а, например, в случае источника — светового импульса (см. выше). Такая же точка зрения принята в [15, §115]».

На мой взгляд, вопрос не является схоластическим, поскольку, если все-таки излучают неравномерно движущиеся заряды в атомах, то «догма» оказывается действующей и в механизме ИВЧ. А роль движущейся частицы в процессе излучения оказывается совершенно аналогичной той, которую она исполняет, например, в случае, когда ионизует, а не поляризует атом. В таком случае никто не настаивает на том, что характеристическое излучение испускает ионизирующая частица, хотя энергия этого излучения исходит от нее. Конечно, остается только сомнение, как может частица, являясь источником энергии для излучающей среды, все же двигаться в этой среде равномерно, что В. Л. Гинзбург подчеркнул даже в названии публикации [34].

Так что обсуждение различных точек зрения на механизм генерации ИВЧ требует особой выдержки и полной объективности в оценке предложений выдающихся ученых, в том числе и нобелевских лауреатов.

А. А. Тяпкину также не удалось избежать принципиально важного неверного заключения, непосредственно относящегося к трактовке микроскопического механизма ИВЧ. В работе [33] он пишет: «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. *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*».

К сожалению, приходится признать, что выделенное мною заключение, сформулированное А. А. Тяпкиным в категорической форме, является тем не менее принципиально ошибочным. Аналогичное объяснение допорогового механизма предлагал и Дж. В. Джелли, как можно видеть из цитаты, приведенной на с. 846. Такого рода объяснения встречаются и в публикациях других авторов. Этот вопрос, имеющий тоже принципиальное значение для эффекта Вавилова–Черенкова, будет полностью прояснен при рассмотрении действительного микроскопического механизма ИВЧ.

Следующий пример показывает, насколько близко некоторые авторы подходили к пониманию ошибочности современного объяснения механизма ИВЧ. Этот пример взят из работы еще одного выдающегося ученого Д. В. Скобельцына [35]. Он пишет: «Имея в виду эти вопросы, можно прежде всего напомнить следующее общеизвестное положение: *свободный* электрон, движущийся прямолинейно и равномерно в пустом пространстве, не может излучать свет за счет своей кинетической энергии. Опираясь на основы теории

относительности, к такому заключению можно прийти сразу же, если ввести инерциальную систему отсчета, в которой рассматриваемый электрон покоится и в которой, следовательно, энергия, необходимая для излучения фотона при заданных условиях, равна нулю. Однако, как хорошо известно, электрон в состоянии равномерного движения *в среде дает* такое излучение — излучение Вавилова–Черенкова».

Как видим, Д. В. Скобельцын неопровержимо доказал, что прямолинейно и равномерно движущийся электрон излучать не может никогда, поскольку система координат, связанная с движущимся электроном, является инерциальной. Это он представил как «общеизвестное положение», а то, что излучающий в среде электрон движется равномерно, по его мнению, также не требует доказательств, потому что это «хорошо известно».

Все противоречия и «несуразности», которые со свойственной ему прямоотой отмечал А. А. Тяпкин, создают вокруг эффекта Вавилова–Черенкова атмосферу таинственности, дополняемую намеками на «сверхсветовой характер» этого явления. «Выпускники средней школы» и «молодые ученые» пытаются уследить за мыслями великих ученых, но сплошь и рядом натываются на противоречащие друг другу и даже самим себе, а также фундаментальным законам утверждения.

В проведенном в этой главе кратком обзоре истории развития представлений о механизме ИВЧ можно видеть, что ошибки крупных ученых в его объяснении связаны прежде всего со сложным характером этого явления, которое они обычно пытались объяснить самым простым способом. Весьма деликатный вопрос о соотношении ИВЧ и тормозного излучения от тормозного излучения. Они настолько решительно отвергали этот механизм, что не видели никакого сходства с ним вплоть до нарушения фундаментальных законов. Противоположная сторона считала, что требования законов сохранения энергии и импульса настолько всем очевидны, что нет необходимости что-либо пояснять, а на отличия от тормозного излучения тоже не обращала должного внимания.

Подробное и детальное обсуждение ошибок, допущенных разными авторами при создании теории эффекта Вавилова–Черенкова, совершенно необходимо, чтобы найти правильное объяснение этого явления. Накопленная более чем за 70 лет информация дает возможность сейчас предложить исчерпывающее объяснение механизма ИВЧ, не требующее никаких отступлений от фундаментальных законов механики. Напротив, именно строгое следование этим законам позволяет надеяться, что предлагаемое ниже объяснение механизма ИВЧ является верным и описывает все особенности этого интересного явления.

2. ТЕОРИЯ ЭФФЕКТА ВАВИЛОВА–ЧЕРЕНКОВА

Прежде чем переходить к рассмотрению механизма эффекта Вавилова–Черенкова, необходимо сформулировать общие условия. В рамках классической электродинамики будет решена задача о движении заряженной частицы по прямолинейной траектории в однородной, прозрачной среде. Это значит, что мы исключаем из рассмотрения близкие соударения налетающей частицы с атомами среды, которые приводят к ионизации атомов или к рассеянию ее в поле ядер, т. е. такие, при которых среда перестает быть однородной, а взаимодействие налетающей частицы происходит с отдельным атомом или ядром.

Вопрос об исключении из рассмотрения близких взаимодействий в данном случае не является таким простым, как это бывает, когда мы пренебрегаем каким-либо малым эффектом по сравнению с основным, крупным. Здесь как раз наоборот мы не рассматриваем более сильные поля вблизи траектории частицы, которые приводят к ионизации среды, выбиванию ядер отдачи и отклонению самой налетающей частицы, т. е. к изменению нашей модели. Для описания таких взаимодействий, когда налетающая частица отклоняется от прямолинейной траектории в поле атомного ядра, указанная выше модель совершенно неприменима.

С другой стороны, мы здесь не утверждаем, что частица движется в некотором канале, где отсутствует среда, и, таким образом, исключаем близкие взаимодействия. Если сделать такое предположение, то в этом случае поле движущейся частицы будет распространяться в неоднородной среде. Поэтому мы говорим об исключении из рассмотрения близких взаимодействий как о некотором модельном приеме, ограничивающем спектр рассматриваемых частот.

Нас будет интересовать взаимодействие заряженной частицы с атомами и молекулами среды, находящимися на столь далеком расстоянии от ее траектории, когда максимальная напряженность поля, создаваемого ею, оказывается недостаточной для ионизации атома, а приводит только лишь к его поляризации. Именно взаимодействие заряженной частицы с системой связанных зарядов отличает эффект Вавилова–Черенкова от тормозного излучения, с которым его часто путают (Г. Б. Коллинз и В. Г. Рейлинг, С. И. Вавилов).

Эта система связанных зарядов (квазиупругих диполей) непосредственно присутствует в теоретических рассмотрениях механизма ИВЧ, поскольку описываются электромагнитные колебания достаточно низкой частоты в однородной прозрачной среде, диэлектрическая проницаемость которой ε явным образом зависит от числа электронов в единице объема N в виде

$$\varepsilon = 1 + \frac{4\pi N e^2}{m\nu_o^2}, \quad (1)$$

где ν_o — частота атомных осцилляторов; e — заряд электрона; m — масса электрона.

Уравнение (1) фигурирует во многих публикациях, посвященных эффекту Вавилова–Черенкова, но большинство авторов дают неверное объяснение характера взаимодействия движущегося заряда с системой связанных зарядов, в частности, в допороговой области.

Теоретическое рассмотрение эффекта Вавилова–Черенкова в данной статье в основном будет следовать основополагающей работе [1]. В ней, как и во многих последующих публикациях, задача о движении заряда в однородной, прозрачной, немагнитной среде решается в рамках законов классической электродинамики. Процесс поляризации среды в поле движущегося заряда происходит в соответствии с уравнением, определяющим связь между поляризацией \mathbf{P} и напряженностью электрического поля \mathbf{E} :

$$\frac{\partial^2 \mathbf{P}}{\partial t^2} + \sum_s \omega_s^2 \mathbf{P}_s = \alpha \mathbf{E}, \quad (2)$$

где ω_s — частота атомных осцилляторов в отсутствие внешнего поля; α — объемная поляризуемость среды.

Величины, характеризующие поле, можно представить в виде интегралов Фурье

$$\mathbf{E} = \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{E}_\omega e^{i\omega t} d\omega, \quad \mathbf{P} = \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{P}_\omega e^{i\omega t} d\omega.$$

Причем фурье-компоненты этих величин связаны соотношением

$$\mathbf{P}_\omega = (n^2 - 1)\mathbf{E}_\omega,$$

где n — показатель преломления среды для частоты ω .

Задача о взаимодействии движущегося заряда со средой решается с помощью уравнений Максвелла

$$\text{rot } \mathbf{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t}, \quad (3)$$

$$\text{rot } \mathbf{H} = \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \frac{4\pi}{c} \mathbf{j}, \quad (4)$$

$$\text{div } \mathbf{H} = 0, \quad (5)$$

$$\text{div } \mathbf{D} = 4\pi Q, \quad (6)$$

$$\mathbf{D} = n^2 \mathbf{E},$$

где \mathbf{j} и Q — плотность тока и плотность заряда, создаваемые пролетающей частицей.

Используя известные соотношения

$$\mathbf{E} = -\text{grad } \varphi - \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t}, \quad (7)$$

$$\mathbf{H} = \text{rot } \mathbf{A}, \quad (8)$$

а также дополнительное условие калибровки Лоренца*

$$\frac{n^2}{c} \frac{\partial \varphi}{\partial t} + \text{div } \mathbf{A} = 0, \quad (9)$$

перейдем к уравнениям для векторного \mathbf{A} и скалярного φ потенциалов

$$\nabla^2 \mathbf{A} - \frac{n^2}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{A}}{\partial t^2} = -\frac{4\pi}{c} \mathbf{j}, \quad (10)$$

$$n^2 \left(\nabla^2 \varphi - \frac{\varepsilon}{c^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} \right) = -4\pi Q. \quad (11)$$

Далее решение задачи сводится к решению только одного уравнения (10).

Если плотность тока и плотность заряда не зависят от времени, то соответствующие производные в уравнении (10) оказываются равными нулю и никакого излучения, естественно, ожидать не приходится. Если же в среде движется только одна заряженная частица с величиной заряда q , то создаваемую ею плотность тока обычно представляют в виде дельта-функции Дирака

$$\mathbf{j} = q\mathbf{v}\delta(x)\delta(y)\delta(z - \mathbf{v}t). \quad (12)$$

В уравнении (12) скорость частиц \mathbf{v} предполагается постоянной, т. е. мы не учитываем потери энергии движущейся частицей на излучение, что соответствует нарушению закона сохранения энергии.

Чтобы подчеркнуть нелогичность предположения о существовании какого-то «сверхсветового» механизма, мы будем рассматривать движение заряда с постоянной скоростью \mathbf{v} в среде, обладающей дисперсией, для двух фурье-компонент ω_1 и ω_2 . Скорость заряда мы выберем такой, чтобы на указанных частотах выполнялись следующие условия:

$$\beta n_1 > 1 \quad \text{на частоте } \omega_1, \quad (13)$$

$$\beta n_2 < 1 \quad \text{на частоте } \omega_2, \quad (14)$$

где $\beta = v/c$.

*Калибровка Лоренца (переход, в частности, в систему координат, связанную с движущимся зарядом) исключает возможность излучения при равномерном и прямолинейном движении заряда.

Для этого разлагаем плотность тока \mathbf{j} в ряд Фурье. Тогда фурье-компоненту плотности тока запишем в виде

$$j(\omega) = \frac{q}{2\pi} \exp\left(-\frac{i\omega z}{v}\right) \delta(x)\delta(y). \quad (15)$$

Перепишем уравнение (10) для фурье-компонент

$$\nabla^2 \mathbf{A}(\omega) - \frac{\varepsilon(\omega)}{c^2} \omega^2 \mathbf{A}(\omega) = -\frac{4\pi}{c} \mathbf{j}(\omega). \quad (16)$$

Поскольку задача обладает осевой симметрией, то при переходе к цилиндрической системе координат (ρ, φ, z) получается

$$A_\rho = A_\varphi = 0.$$

Решение уравнения (16) следует искать в виде

$$A_z(\omega) = a(\rho, \omega) \exp\left(-\frac{i\omega z}{v}\right). \quad (17)$$

В таком случае функция $a(\rho, \omega)$ будет удовлетворять уравнению Бесселя нулевого порядка при всех значениях ρ , кроме $\rho = 0$:

$$\frac{\partial^2 a(\rho, \omega)}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial a(\rho, \omega)}{\partial \rho} + s^2 a(\rho, \omega) = -\frac{q}{\pi c \rho} \delta(\rho), \quad (18)$$

где $s^2 = \frac{\omega^2}{v^2}(\beta^2 n^2 - 1) = -\sigma^2$.

Вводя новую переменную $s\rho$, запишем уравнение Бесселя в следующем виде:

$$\frac{\partial^2 a(s\rho, \omega)}{\partial (s\rho)^2} + \frac{1}{s\rho} \frac{\partial a(s\rho, \omega)}{\partial (s\rho)} + a(s\rho, \omega) = 0. \quad (19)$$

Не вдаваясь в детали решения уравнения (19), выпишем окончательное выражение для векторного потенциала на частоте ω_1 , полученное в работе [1] при условии (13):

$$A_z(\omega_1) = -\frac{q}{c\sqrt{2\pi s\rho}} \exp\left[i\omega_1 \left(t - \frac{z \cos \theta + \rho \sin \theta}{w}\right) + \frac{3}{4}\pi i\right], \quad (20)$$

где $\theta = \arccos(1/\beta n)$, $w = c/n$.

Остронаправленное излучение под углом θ появляется как результат конструктивной интерференции волн на частоте ω_1 , возникающих вдоль прямойлинейной траектории частицы (макроскопический механизм).

Далее авторы работы [1] находят компоненты электромагнитного поля в волновой зоне и вычисляют величину излучаемой энергии через поверхность цилиндра длиной l . Предполагая скорость частицы постоянной, они получили следующее выражение для энергии излучения на всех частотах, удовлетворяющих условию (13):

$$W = \frac{q^2 l}{c^2} \int_{(\beta n > 1)} \omega d\omega \left(1 - \frac{1}{\beta^2 n^2}\right). \quad (21)$$

Представляет интерес также решение уравнения Бесселя (19) на частоте ω_2 для заряда, движущегося с той же скоростью. В работе [1] при условии $\beta n_2 < 1$ получено следующее выражение для векторного потенциала:

$$A_z(\omega_2) = \frac{q}{c e^{s\rho} \sqrt{2\pi s\rho}} \exp \left[i\omega_2 \left(t - \frac{z}{v} \right) \right]. \quad (22)$$

Волна (22) содержит быстро затухающую с увеличением ρ амплитуду, что свидетельствует об отсутствии излучения на частоте ω_2 .

Таким образом, в расчете было показано, что заряд, движущийся в среде по бесконечной траектории с постоянной скоростью, излучает коническую волну на одной частоте ω_1 и не излучает на другой частоте ω_2 .

Почему заряд, движущийся в среде, на одних частотах излучает, а на других не излучает? Ответ на этот вопрос, скорее всего, следует искать в структуре этой среды, а не в «сверхсветовой» скорости заряда, которая для других частот оказывается «досветовой».

Приведенный выше расчет в рамках классической электродинамики не может дать представление о микроскопическом механизме эффекта Вавилова–Черенкова, поскольку в этом расчете среда представляется совершенно однородной и ее атомная структура никак не проявляется. Макроскопический же механизм взаимодействия частицы, движущейся по бесконечной траектории, приводит к таким особенностям, как порог и излучение под фиксированным углом.

Многочисленные публикации на тему эффекта Вавилова–Черенкова обычно содержали подобные расчеты, которые демонстрировали непонятный механизм излучения частицы, движущейся в среде равномерно и прямолинейно. И хотя некоторые авторы [17, 18, 31–34] стали утверждать, что излучает не движущаяся частица, а поляризованные атомы, это обстоятельство не повлияло существенно на объяснение механизма эффекта Вавилова–Черенкова как особого механизма излучения при равномерном и прямолинейном движении заряда в среде.

Ниже будет предложено наглядное объяснение механизма взаимодействия движущейся заряженной частицы со средой, которое дает четкий ответ на

вопрос, почему поляризованные атомы среды излучают на частоте ω_1 и не излучают на частоте ω_2 .

3. НАГЛЯДНОЕ ОБЪЯСНЕНИЕ МЕХАНИЗМА ГЕНЕРАЦИИ ИЗЛУЧЕНИЯ ВАВИЛОВА–ЧЕРЕНКОВА

Для более ясного понимания механизма генерации ИВЧ следует рассмотреть распространение световой волны в прозрачном диэлектрике. Когда световая волна распространяется в диэлектрике, ее переменное электрическое поле поляризует атомы диэлектрика, а движение осциллирующих зарядов (квазиупругие диполи) создает вторичную волну, которая интерферирует с первичной, вызывая сдвиг фазы. Таким образом, действие среды на световую волну сводится к изменению ее фазовой скорости. Для правильного понимания происходящих процессов не следует упускать из виду, что изменение фазовой скорости света в среде есть результат интерференции волн, возбужденных многими движущимися зарядами, каждая из которых в отдельности распространяется со скоростью света в вакууме. Таким образом, когда мы рассматриваем световую волну, распространяющуюся в среде с соответствующим показателем преломления, то тем самым учитываем взаимодействие волны с зарядами среды, т. е. происходят обычные явления, описываемые законами классической электродинамики. Из вышесказанного становится ясным, что представление эффекта Вавилова–Черенкова как «сверхсветового» явления оказывается несколько преувеличенным.

Начнем объяснение механизма ИВЧ для случая, когда поляризованные движущимся зарядом атомы и молекулы не излучают, т. е. когда заряд движется с достаточно низкой скоростью по сравнению с фазовой скоростью света в среде.

При движении заряда в среде с нерелятивистской скоростью электрическое поле в точке M , находящейся на некотором расстоянии r_0 от траектории заряда, по существу является кулоновским и имеет вид

$$\mathbf{E} = \frac{e\mathbf{r}}{4\pi\epsilon r^3}, \quad (23)$$

где \mathbf{r} — вектор, направленный в точку M из текущего положения движущегося заряда; ϵ — диэлектрическая проницаемость среды.

На рис. 1 показано, как изменяется модуль напряженности электрического поля в точке M , создаваемого зарядом, движущимся вдоль оси z в среде с постоянной и достаточно малой скоростью по сравнению с фазовой скоростью волны. Для правильного понимания микроскопического механизма ИВЧ необходимо подчеркнуть, что точка M находится на таком расстоянии от траектории частицы, чтобы максимальная величина поля, создаваемого ею, не приводила к ионизации атома, а только поляризовала его.

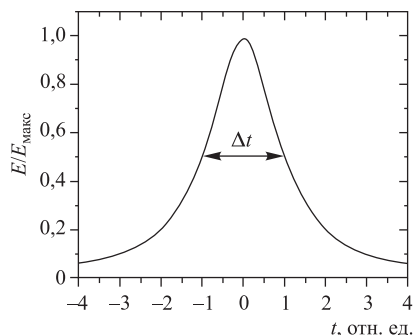


Рис. 1. Характер изменения модуля напряженности электрического поля в точке M при пролете заряженной частицы со скоростью, меньшей фазовой скорости света в среде

При приближении заряда к точке M поле возрастает до максимальной величины. Соответственно, поляризация следует за изменением электрического поля в соответствии с уравнением (2). Разумеется, приближаясь к точке M , заряженная частица расходует часть своей энергии на поляризацию среды. Поскольку среда однородная, передача энергии происходит строго симметрично относительно траектории частицы и не приводит к отклонению траектории частицы от прямолинейной. За время движения заряда вдоль бесконечной прямолинейной траектории направление вектора напряженности электрического поля в точке M плавно изменяется на 180° в плоскости, содержащей траекторию частицы и проходящей через точку M .

Так как в рассматриваемой здесь точке M атомы получили в процессе поляризации энергию, не приводящую к их ионизации, то связи электронов с ядрами не были нарушены, и среда возвращает удаляющейся частице энергию, затраченную на поляризацию при ее приближении. Это происходит в соответствии со вторым законом Ньютона: действие равно противодействию. Поскольку электрическое поле в точке M изменяется медленно, то удаляющийся заряд снимает поляризацию полностью и возвращает атомы (молекулы) в исходное состояние.

Такие процессы имеют место во всех точках, расположенных симметрично относительно траектории частицы. При этом излучение не возникает, частица движется почти с постоянной скоростью, но даже в этом случае движение не может называться равномерным и прямолинейным в соответствии с первым законом Ньютона. Тем более что движущаяся в среде частица одновременно ионизует близкорасположенные атомы, выбивает ядра отдачи, т. е. теряет значительное количество энергии. Но эти потери мы не учитываем в рамках модели дальних взаимодействий.

Приведенное здесь наглядное объяснение эффекта Вавилова–Черенкова для допороговой скорости заряженной частицы ясно показывает, что в этом случае излучение не гасится в результате интерференции волн, возникающих в среде вдоль траектории частицы. Процесс взаимодействия частицы со средой в этом случае носит принципиально безызлучательный характер.

Сопоставляя этот вывод с объяснениями микроскопического механизма, предложенными Дж. В. Джелли [32] и А. А. Тяпкиным [33], как, впрочем, и многими другими авторами, которые утверждали, что поляризованные движущиеся

шейся частицей атомы излучают при любой скорости частицы, а излучение ниже порога исчезает в результате деструктивной интерференции (макроскопического механизма), приходится признать ошибочность их утверждений.

Разумеется, вывод о том, что движущаяся с допороговой скоростью частица, взаимодействуя со средой, не возбуждает в ней излучения, относится только лишь к эффекту Вавилова–Черенкова, но не распространяется на другие процессы взаимодействия движущейся заряженной частицы со средой. В том числе этот вывод не распространяется и на переходное излучение, механизм которого несколько отличается от механизма ИВЧ.

Далее рассмотрим случай, когда заряд движется со скоростью, превышающей фазовую скорость света в среде. Тогда зависимость напряженности поля в точке M от r будет иметь вид

$$E = \frac{er(1 - \beta^2)}{4\pi\epsilon r^3(1 - \beta^2 \sin^2 \varphi)^{3/2}}, \quad (24)$$

где φ — угол между вектором r и вектором скорости частицы.

Временная зависимость модуля напряженности электрического поля в точке M (ширина на полувысоте) существенно сокращается при β , стремящемся к единице. Поэтому скорость спадающего электрического поля, создаваемого удаляющейся частицей, оказывается больше, чем скорость изменения поля квазиупругого диполя (рис. 2). Взаимодействие поляризованных атомов между собой не позволяет волне следовать за быстрым изменением электрического поля движущегося заряда. В результате квазиупругие диполи, совершая свободные колебания, излучают полученную от частицы энергию в полном соответствии с законом сохранения энергии.

Неравномерное движение зарядов в поляризованном атоме (молекуле) это как раз и есть тот микроскопический тормозной механизм, ответственный за излучение Вавилова–Черенкова. Таким образом, предложенное объяснение механизма ИВЧ позволяет нам говорить, что и в этом явлении, так же как и во всех известных ранее процессах излучения заряда в электрическом или магнитном полях, излучают заряды, движущиеся с ускорением. Следовательно, «теорема», «правило», «положение» или «догма», как его стали называть известные ученые, являясь прямым

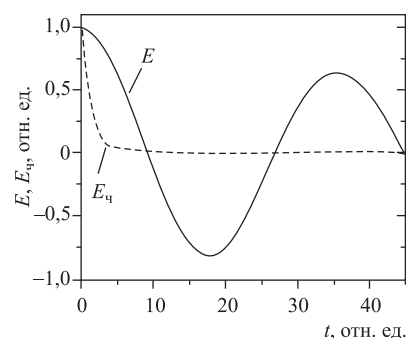


Рис. 2. Временная зависимость модуля напряженности электрического поля (штриховая линия), создаваемого частицей, пролетающей вблизи точки M со скоростью, превышающей скорость распространения волн в среде. Сплошная линия — напряженность электрического поля квазиупругого диполя

следствием закона сохранения энергии, вполне естественно вписывается в микроскопический механизм ИВЧ.

Необходимым условием такого механизма является присутствие большого количества атомов, которые замедляют распространение электромагнитной волны, длина которой должна быть значительно больше расстояния между атомами. Для отдельного атома или нескольких атомов, находящихся в вакууме, такой процесс невозможен, поскольку их поляризация будет изменяться со скоростью света в вакууме.

Рассматриваемая задача характеризуется строгой осевой симметрией относительно траектории частицы, поскольку среда представляется однородной. Следовательно, нет никаких оснований ожидать малейшего отклонения частицы от прямолинейной траектории. Подчеркнем, что здесь речь не идет о пренебрежении малыми отклонениями, как это отмечалось в квантовой теории [11], а решение задачи принципиально является строго симметричным относительно траектории заряженной частицы. Однако движущаяся частица расходует кинетическую энергию на поляризацию среды и замедляется в полном соответствии с законом сохранения энергии, т. е. движется неравномерно. Но эта неравномерность является следствием потерь энергии на поляризацию среды, а не причиной излучения. Разумеется, в рамках некоторой модели, чтобы упростить решение задачи, можно предположить, что частица движется с постоянной скоростью, как это и было исполнено в работе [1].

Предлагаемое объяснение механизма ИВЧ подтверждает его тормозной характер, но отличие его от механизма тормозного излучения, которое испускает частица, движущаяся в поле изолированного атомного ядра, настолько существенно, что их никак невозможно отождествлять. С другой стороны и утверждение, что между механизмом тормозного излучения и механизмом ИВЧ «нет ничего общего», является очевидным преувеличением. Именно на это преувеличение обратили внимание Э. Ферми [15] и О. Бор [16].

Приведенное выше наглядное объяснение механизма ИВЧ дает представление о том, как, когда и почему излучают поляризованные атомы среды. Таков микроскопический механизм эффекта Вавилова–Черенкова. Следует отметить, что в данном объяснении нет каких-либо положений, которые требовали бы нарушения фундаментальных законов и приходилось бы их оправдывать только «сверхсветовым» характером эффекта Вавилова–Черенкова.

4. ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА ИЗЛУЧЕНИЯ ВАВИЛОВА–ЧЕРЕНКОВА

В результате теоретического рассмотрения эффекта Вавилова–Черенкова в работе [1] в рамках идеализированной модели (постоянная скорость частицы на бесконечной прямолинейной траектории) основные свойства ИВЧ выглядят весьма необычно:

1. Излучение наблюдается только под углом $\cos \theta = 1/\beta n$.
2. Излучение исчезает при скорости частицы ниже пороговой $\beta = 1/n$.
3. Интенсивность излучения линейно зависит от толщины радиатора.
4. Излучение полностью линейно-поляризовано так, что электрический вектор волны находится в плоскости, содержащей траекторию частицы и направление наблюдения.
5. Спектр ИВЧ определяется условием $\beta n > 1$.

Многие авторы публикаций об ИВЧ рассматривают излучение заряженной частицы в среде, не обладающей дисперсией. Такое рассмотрение возможно, но только как очередное модельное приближение. Ясно, что среда может считаться однородной только для излучения с длиной волны, намного превышающей межатомные расстояния. Именно при таком условии выполнен расчет излучения в работе [1]. В противном случае, когда движущаяся частица взаимодействует с отдельными атомами, находящимися на близком расстоянии от ее траектории, данная модель оказывается неприменимой.

Видимо, имея в виду именно это обстоятельство, авторы работы [1] также заменили в выражении для излучаемой энергии (21) бесконечные пределы интегрирования по частоте на условие $\beta n > 1$, а кроме того, подчеркнули, что прямолинейный путь электрона в среде l должен быть много больше длины волны излучения:

$$l/\lambda \gg 1. \quad (25)$$

Это требование (25) довольно трудно реализовать в реальных экспериментальных условиях, потому что под величиной l следует понимать не длину реального радиатора, а величину, для которой может быть выполнено условие когерентности [4]:

$$Td(\beta n)/dt \ll 1. \quad (26)$$

Условие (26) устанавливает ограничение, чтобы изменение величины βn за период колебаний T было много меньше единицы. В результате в реальных экспериментах, когда условия (25) и (26) выполняются недостаточно строго, свойства ИВЧ существенно изменяются. Полные потери энергии на пути частицы в среде могут приводить к тому, что условия (25) и (26) будут выполнены не очень строго. Многократное рассеяние заряда на пути в среде также приводит к отклонению его реальной траектории от прямолинейной. Поэтому наблюдаемое в эксперименте излучение может не иметь острой направленности.

Обычно в экспериментах радиатор конечной толщины находится в вакууме, а детектор, регистрирующий ИВЧ, «видит» две границы. Если реальный радиатор представляет собой плоскопараллельную пластинку, а заряженная частица проходит через нее по нормали к поверхности, то при выполнении

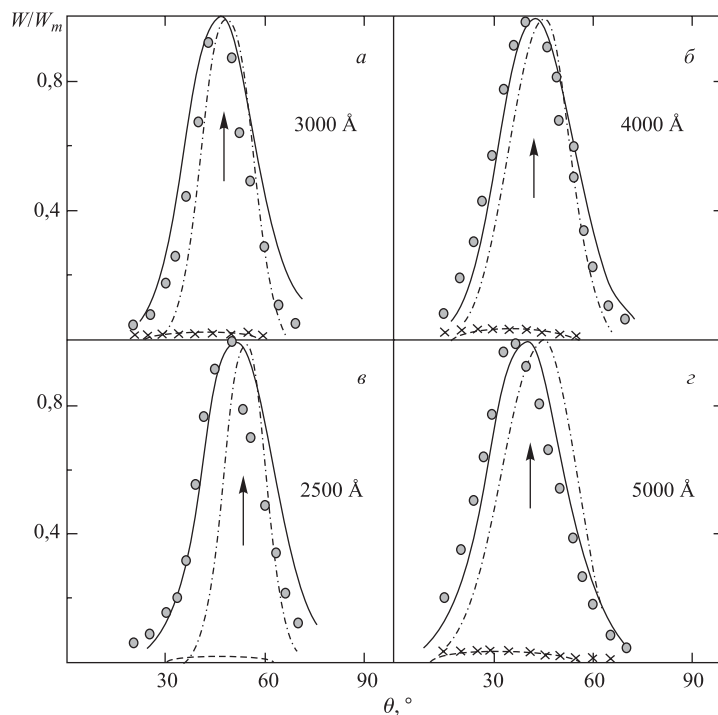


Рис. 3. Угловые распределения излучения Вавилова–Черенкова, возбуждаемого в слюдяной пластинке толщиной 2,5 мкм электронами с энергией 210 кэВ. Сплошные (штриховые) линии — расчет параллельно (перпендикулярно) поляризованной компоненты излучения с учетом многократного рассеяния электронов в слюде; штрихпунктирные линии — расчет по приближенной формуле (7) из работы [39]; кружки (крестики) — экспериментально измеренные выходы излучения для параллельно (перпендикулярно) поляризованных компонент излучения. Стрелками указаны углы, вычисленные по формуле (27)

условия (25) ИВЧ в вакууме будет наблюдаться под углом

$$\theta_0 = \arcsin \sqrt{n^2 - \frac{1}{\beta^2}}. \quad (27)$$

В том случае, когда толщина радиатора a не удовлетворяет условию (25), угловое распределение излучения характеризуется некоторой дифракционной шириной [36]:

$$\Delta\theta = \frac{2,78\lambda}{\pi a \beta \sin \theta_0 \cos \theta_0}. \quad (28)$$

Реальные угловые распределения ИВЧ, возбуждаемого электронами в слюдяных радиаторах, были исследованы в работе [37]. На рис.3 показаны экспериментальные и расчетные угловые распределения ИВЧ, возбуждаемого электронами с энергией 210 кэВ в радиаторе толщиной 2,5 мкм для нескольких длин волн от 2500 Å ($l/\lambda = 10$) и до 5000 Å ($l/\lambda = 5$). Как видно, экспериментальные угловые распределения неплохо совпадают с расчетными (сплошная линия), которые описывают излучение электрона, пролетающего через пластинку, находящуюся в вакууме [37]. В этом расчете также учитывается влияние многократного рассеяния электронов в слюде. Как видно, при такой толщине радиатора влияние многократного рассеяния оказывается не столь существенным, поскольку выход излучения, поляризованного в перпендикулярной плоскости, как в расчете, так и в эксперименте оказался незначительным. Если же в расчете по формуле (7) из работы [38] учитываются только дифракционные эффекты (штрихпунктирная линия), то ширина углового распределения заметно уменьшается, но все еще остается значительной даже при $l/\lambda = 10$ и энергии электронов, существенно превышающей пороговое значение.

Таким образом, экспериментальные исследования и соответствующие расчеты показывают, что в большинстве практических случаев ИВЧ характеризуется более или менее широким угловым распределением, а свойство острой направленности связано только лишь с предельными модельными условиями.

Положение максимума в угловом распределении ИВЧ для реального радиатора, помещенного в вакуум, также не совсем точно следует зависимости (27). На рис.4 показано, что для слюдяного радиатора толщиной 12,4 мкм на длине волны $\lambda = 4000$ Å наблюдаются заметные отклонения от зависимости (27), которая также получена для предельного случая при условии (25) и является характеристикой ИВЧ, обусловленной модельными соображениями.

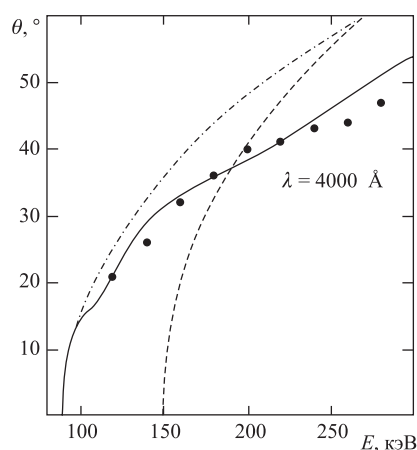


Рис. 4. Энергетическая зависимость положения максимума углового распределения ИВЧ, возбуждаемого электронами в слюдяном радиаторе толщиной 12,4 мкм. Штриховая кривая — расчет по формуле (27), штрихпунктирная — расчет по приближенной формуле (7) из работы [38], сплошная — расчет по формулам (17)–(21) из работы [39], точки — экспериментальные результаты

На рис. 4, взятом из работы [39], также можно видеть, что энергетическая зависимость положения максимума в угловом распределении не имеет каких-либо особенностей при условии $\beta = 1/n$, т. е. порог ИВЧ, строго говоря, отсутствует. Как следует из расчета в рамках идеализированной модели (штриховая кривая на рис. 4), порог излучения должен наблюдаться при энергии электронов 149 кэВ. Однако для реального радиатора главный дифракционный пик исчезает полностью только при энергии 89 кэВ. Это подтверждают как расчетные, так и экспериментальные результаты, показанные на рис. 4. При еще более низких энергиях электронов излучение, возбуждаемое в слюдяном радиаторе, полностью не исчезает, поскольку при этом наблюдается переходное излучение, близкое по своей природе к ИВЧ. Причем характер поляризации излучения остается неизменным.

Из этих экспериментальных и расчетных исследований можно сделать вывод, что порог ИВЧ тоже является результатом предельных модельных условий. Отсутствие порога излучения в практических случаях является дополнительным аргументом, который опровергает мнение, что порог — точная граница появления «сверхсветового» механизма.

Спектральные свойства ИВЧ стоит обсудить подробнее с учетом особенностей как микроскопического, так и макроскопического механизма генерации ИВЧ. Микроскопический механизм ИВЧ накладывает следующие принципиальные ограничения на его спектр:

1. Только наличие связанных электрических зарядов в среде может обеспечивать необходимый характер взаимодействия.
2. Энергия связи электронов в атомах среды ограничивает спектр излучения с коротковолновой стороны.
3. Длина волны на коротковолновой границе спектра ИВЧ должна быть значительно больше расстояния между атомами.

Многие авторы при обсуждении эффекта Вавилова–Черенкова подчеркивают, что близкими взаимодействиями налетающей частицы с атомами среды они пренебрегают. Правда, когда обсуждается коротковолновая спектральная граница, часто формальное использование показателя преломления заводит авторов в области столь высоких частот, где перечисленные выше условия для возбуждения ИВЧ полностью отсутствуют.

Рассматривая возможность генерации ИВЧ в различных спектральных диапазонах или какие-либо экзотические случаи возбуждения ИВЧ, мы теперь должны учитывать как требования макроскопического механизма (постоянство скорости на достаточно длинном участке траектории по сравнению с длиной волны излучения), так и перечисленные выше требования микроскопического механизма. Как теперь совершенно очевидно, выполнение формального требования для коэффициента преломления ($n > 1$) на некоторой частоте электромагнитных колебаний в среде еще недостаточно для реализации эффекта Вавилова–Черенкова на этой частоте.

Из понимания микроскопического механизма непосредственно следует, что эффект Вавилова–Черенкова не может наблюдаться в рентгеновской или еще более высокочастотной области спектра [40–42], потому что частица не сможет передать атому достаточную для этого энергию, не ионизовав его. Ионизованные атомы, конечно, будут испускать излучение, но оно не имеет отношения к эффекту Вавилова–Черенкова. Распространение эффекта Вавилова–Черенкова в область гамма-лучей вступает в противоречие со всеми ограничениями, вытекающими как из микроскопического, так и макроскопического механизма ИВЧ. Можно привести еще несколько доводов, которые исключают возможность эффекта Вавилова–Черенкова в рентгеновской и тем более в гамма-областях спектра.

1. При близких взаимодействиях, необходимых для передачи достаточной энергии, частица взаимодействует не с однородной средой, а с отдельным атомным ядром, что противоречит используемой в теории ИВЧ модели.

2. Ссылки на длину формирования излучения безосновательны, так как в эффекте Вавилова–Черенкова рассматриваются компоненты электрического поля, перпендикулярные траектории частицы.

3. Налетающая релятивистская частица при близких соударениях разрушает атомную структуру твердого тела в результате выбивания электронов и ядер отдачи. Таким образом, структура среды, которая обеспечивала некоторое превышение над единицей показателя преломления для рентгеновской электромагнитной волны, оказывается разрушенной налетающей частицей. Поэтому можно говорить о величине диэлектрической проницаемости однородной среды для электромагнитных волн в рентгеновском и гамма-диапазонах только в отсутствие внешнего поля, приводящего к структурным изменениям среды.

Что касается длинноволновой границы спектра ИВЧ, то ее в основном определяет условие $\beta n(\omega) > 1$, но полные потери энергии движущейся в среде частицы накладывают свои спектральные ограничения в каждом конкретном случае.

Таковы основные свойства ИВЧ в реальных экспериментальных условиях, существенное отличие которых от свойств, полученных в рамках идеальной модели, обусловлено особенностями действительного микроскопического механизма.

ВЫВОДЫ

Главные выводы, которые необходимо сделать в результате проведенного в данной статье обсуждения, относятся не только к механизму ИВЧ, а носят весьма общий характер.

1. Нет никаких оснований для отмены законов сохранения энергии и импульса при объяснении механизмов излучения движущихся зарядов.

2. Равномерно и прямолинейно движущаяся частица не может излучать энергию ни при каких условиях в соответствии с законами сохранения энергии и импульса, а также с первым законом Ньютона.

3. Предложение отменить законы сохранения энергии и импульса, высказанное от имени авторитетнейших ученых, представляет серьезную опасность для развития современной науки, поскольку приводит к разрушению того, что Макс Лауэ назвал «краеугольным камнем всего естествознания» (см. эпиграф к данной статье).

Последующие выводы относятся непосредственно к механизму генерации ИВЧ.

1. Механизм генерации ИВЧ — тормозной, т. е. излучение возникает в результате поляризационного взаимодействия налетающей частицы со связанными зарядами однородной среды с последующим испусканием электромагнитного излучения этими зарядами.

2. Поляризованные полем налетающей частицы атомы среды испускают излучение, когда скорость частицы превышает фазовую скорость распространения волны в среде.

3. Поляризованные атомы не испускают излучение, если скорость частицы меньше фазовой скорости распространения волны в среде. В этом случае атомы успевают вернуть частице энергию, затраченную на их поляризацию.

4. При теоретическом рассмотрении эффекта Вавилова–Черенкова обычно вводятся модельные соображения (постоянная скорость заряда, бесконечная длина траектории, среда без дисперсии), которые влияют на расчетные характеристики излучения. Учет реальных экспериментальных условий приводит к существенному изменению характеристик ИВЧ.

5. Условие когерентности требует достаточно постоянной скорости движения заряженной частицы, но это условие на практике реализуется в той или иной степени только лишь на ограниченном участке траектории частицы. Это приводит к изменению основных свойств ИВЧ, сформулированных в рамках теоретической модели.

6. Порог ИВЧ при условии $\beta n = 1$ отсутствует.

7. Спектр ИВЧ ограничен принципиально со стороны коротких волн следующими условиями, обусловленными структурой среды:

а) наличие связанных зарядов в среде;

б) энергия связи электронов в атоме определяет коротковолновую границу спектра;

в) расстояние между атомами должно быть много меньше длины волны для коротковолновой границы спектра.

Таким образом, предложенный в данной работе механизм не противоречит фундаментальным законам, дает более полное представление об эффекте

Вавилова–Черенкова и открывает возможности для понимания его особенностей и ограничений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тамм И. Е., Франк И. М. Когерентное излучение быстрого электрона в среде // Докл. АН СССР. 1937. Т. 14(3). С. 107–112.
2. Болотовский Б. М. Теория эффекта Вавилова–Черенкова // УФН. 1957. Т. 62(3). С. 201–240; УФН. 1961. Т. 75(2). С. 295–337.
3. Джелли Дж. Черенковское излучение и его применения. М.: Изд-во иностр. лит., 1960.
4. Зрелов В. П. Излучение Вавилова–Черенкова и его применение в физике высоких энергий. М.: Атомиздат, 1968. Т. 1, 2.
5. Франк И. М. Излучение Вавилова–Черенкова. Вопросы теории. М.: Наука, 1988.
6. Тамм И. Е. Общие свойства излучения, испускаемого системами, движущимися со сверхсветовыми скоростями, и некоторые приложения к физике плазмы. Нобелевская лекция // УФН. 1959. Т. 18, вып. 3. С. 387–396.
7. Тамм И. Е., Франк И. М. Излучение электрона при равномерном движении в преломляющей среде // Тр. ФИАН АН СССР. 1944. Т. 2, вып. 4. С. 63–68.
8. Тер-Микаэлян М. А. Влияние среды на электромагнитные процессы при высоких энергиях. Ереван: Изд-во АН АрССР, 1969.
9. Гинзбург В. Л., Франк И. М. Излучение равномерно движущегося электрона, возникающее при его переходе из одной среды в другую // ЖЭТФ. 1946. Т. 16, вып. 1. С. 15–28.
10. Гинзбург В. Л., Цитович В. Н. Переходное излучение и переходное рассеяние. М.: Наука, 1984.
11. Гинзбург В. Л. Квантовая теория светового излучения электрона, равномерно движущегося в среде // ЖЭТФ. 1940. Т. 10, вып. 6. С. 589–600.
12. Денисов С. П. Излучение «сверхсветовых» частиц (эффект Черенкова) // Соросовский образоват. журн. 1996. № 2. С. 89–97.
13. Денисов С. П. Переходное излучение // Соросовский образоват. журн. 1997. № 3. С. 124–129.
14. Физическая энциклопедия. М., 1992. Т. 3. С. 370.
15. Fermi E. The Ionization Loss of Energy in Gases and in Condensed Materials // Phys. Rev. 1940. V. 57. P. 485–493.
16. Бор Н. Прохождение атомных частиц через вещество. М.: Изд-во иностр. лит., 1950. Приложение О. Бора.
17. Гарибян Г. М., Ян Ши. Рентгеновское переходное излучение. Ереван: Изд-во АН АрССР, 1983.

18. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика. Т. 8. М.: Наука, 1982.
19. Heaviside O. The Electromagnetic Effect of a Moving Charge // *The Electrician*. 1888. P. 83–84.
20. Тяпкин А. А. О первом теоретическом предсказании излучения, открытого Вавиловым и Черенковым // *УФН*. 1974. Т. 112, вып. 4. Письмо в ред. С. 735.
21. Kaiser T. R. Heaviside Radiation // *Nature*. 1974. V. 247. P. 400.
22. Jelley J. V. Heaviside-Mallet Radiation? // *Nature*. 1974. V. 247. P. 401.
23. Lord Kelvin. Nineteenth Century Clouds over Dynamical Theory of Heat and Light // *Phil. Mag.* 1901. V. 2. P. 1.
24. Sommerfeld A. *Göttingen Nachricht*. 1904. S. 99; 363.
25. Черенков П. А. Видимое свечение чистых жидкостей под действием γ -радиации // *Докл. АН СССР*. 1934. Т. 2(8). С. 451–456.
26. Вавилов С. И. О возможных причинах синего γ -свечения жидкостей // *Докл. АН СССР*. 1934. Т. 2(8). С. 457–459.
27. Франк И. М. Излучение электронов, движущихся в веществе со сверхсветовой скоростью // *УФН*. 1946. Т. 30, вып. 3–4. С. 149–183.
28. Франк И. М. О когерентном излучении быстрого электрона в среде. Проблемы теоретической физики. М.: Наука, 1972.
29. Франк И. М. Развитие представлений о природе излучения Вавилова–Черенкова // *УФН*. 1984. Т. 143, вып. 1. С. 111–127.
30. Collins G. B., Reiling V. G. Čerenkov Radiation // *Phys. Rev.* 1938. V. 54. P. 499–503.
31. Тамм И. Е. Излучение, вызываемое равномерно движущимися электронами // *Собр. науч. тр. М.: Наука*, 1975.
32. Джелли Дж. В. Излучение Черенкова // *УФН*. 1956. Т. 58, вып. 2. С. 231–283.
33. Тяпкин А. А. Микроскопическая природа излучения, лежащего в основе эффекта Вавилова–Черенкова // *ЭЧАЯ*. 2001. Т. 32, вып. 4. С. 947–963.
34. Гинзбург В. Л. Несколько замечаний об излучении зарядов и мультиполей, равномерно движущихся в среде // *УФН*. 2002. Т. 172, № 3. С. 341–344.
35. Скобельцын Д. В. Парадоксы квантовой теории эффектов Вавилова–Черенкова и Доплера // *УФН*. 1977. Т. 122, вып. 2. С. 295–324.
36. Кобзев А. П., Франк И. М. Спектральная зависимость полуширины угловых распределений излучения Вавилова–Черенкова // *ЯФ*. 1980. Т. 31, вып. 5. С. 1253–1258.
37. Кобзев А. П., Пафомов В. Е., Франк И. М. Угловые распределения излучения Вавилова–Черенкова, возбуждаемого в слюде электронами с энергией 170–250 кэВ // *ЯФ*. 1979. Т. 29, вып. 1. С. 122–132.
38. Кобзев А. П. К вопросу о направленности излучения Вавилова–Черенкова // *ЯФ*. 1978. Т. 27, вып. 5. С. 1256–1261.

39. *Кобзев А. П., Франк И. М.* Некоторые особенности излучения Вавилова–Черенкова, связанные с конечной толщиной радиатора // *ЯФ*. 1981. Т. 34, вып. 1(7). С. 125–133.
40. *Базылев В. А. и др.* Черенковское излучение как интенсивный рентгеновский источник // *Письма в ЖЭТФ*. 1976. Т. 24, № 7. С. 406–409.
41. *Базылев В. А., Жеваго Н. К.* Излучение быстрых частиц в веществе и во внешних полях. М.: Наука, 1987.
42. *Федоров В. В., Смирнов А. И.* О возможности черенковского излучения гамма-квантов электронами // *Письма в ЖЭТФ*. 1976. Т. 23, № 1. С. 34–36.