

ОБ ИНДУЦИРОВАННОМ ИЗЛУЧЕНИИ, ВЫЗВАННОМ ЗАРЯЖЕННОЙ РЕЛЯТИВИСТСКОЙ ЧАСТИЦЕЙ В ГАЗЕ НИЖЕ ЧЕРЕНКОВСКОГО ПОРОГА

А.А.Тяпкин

В работе обосновывается идея о новом механизме индуцированной генерации когерентного излучения атомов газа при давлении ниже порога излучения Вавилова — Черенкова. Это излучение должно возникать строго по направлению движения заряженной релятивистской частицы как индуцированное полем излучения от ранее возбужденных заряженной частицей атомов. Обращается внимание на определенные указания в пользу существования такого излучения, которые получены в одном из последних экспериментальных исследований допорогового излучения релятивистских электронов в черенковском счетчике. Предлагается эксперимент для окончательного доказательства существования механизма своеобразной «лазерной» разрядки возбужденных атомов вдоль трека заряженной релятивистской частицы.

Работа выполнена в Лаборатории сверхвысоких энергий ОИЯИ.

On the Induced Radiation Caused by a Charged Relativistic Particle Below Cherenkov Threshold in a Gas

А.А.Тяпкин

The idea of new mechanism of induced coherent radiation by the atoms of a gas under the Cherenkov threshold is suggested in this paper. This radiation must be emitted strictly in the direction of the movement of the charged particle, because it is provoked by the induced action of the field emitted by excited atoms along the relativistic particle track. It is emphasized that the last experimental investigation contains some indications of such radiation. An experiment for full evidence of the existence of this mechanism of peculiar «laser» discharge of the excited gas atoms along the relativistic particle track is proposed.

The investigation has been performed at the Particle Physics Laboratory, JINR.

В 1961 году И.М.Франк в статье [1], посвященной памяти С.И.Вавилова, отметил, что «открытие эффекта Вавилова — Черенкова, а затем разработка его теории привели к появлению ряда исследований, посвященных связанным с ним вопросам» и что «в значительном

числе других работ рассматривался и ряд явлений, смежных с эффектом Вавилова — Черенкова». В качестве примера такого нового ожидаемого явления автор указал на так называемое переходное излучение, теория которого была разработана в их совместной с В.Л.Гинзбургом работе [2].

В настоящем сообщении речь пойдет еще об одном виде когерентного излучения, также тесно связанном с тем же кругом оптических явлений, возникающих в прозрачной среде при прохождении заряженной частицы с околосветовой скоростью. Несмотря на детальное развитие теории всего комплекса оптических явлений, смежных с излучением Вавилова — Черенкова (ИВЧ), до сих пор из теоретического рассмотрения выпадал весьма естественный механизм индуцированного излучения атомов среды, возбужденных заряженной релятивистской частицей. Это явное упущение всего предшествующего развития теории можно было бы лишь частично оправдать ничтожностью самого эффекта коллективного взаимодействия излучений отдельных атомов вдоль трека релятивистской частицы, если бы он был далеко за пределами надежд на его экспериментальное проявление.

Однако в одном из последних экспериментальных исследований [3] допорогового излучения релятивистских электронов в газе были получены, как мы покажем далее, достаточно веские указания в пользу проявления этого эффекта в оптическом диапазоне частот как узко направленного вперед когерентного излучения от возбужденных атомов газа. Правда, сам автор этого исследования, Я.Ружичка, не сделал столь радикальный вывод и проявил немалую изобретательность в попытке объяснить полученные результаты в рамках существующих теоретических представлений о не связанных с возбуждением атомов газа излучениях релятивистских электронов.

Новым в методике Я.Ружички было применение фотографического способа исследования допорогового излучения. Этот способ позволил получить надежные сведения о высокой направленности вперед зарегистрированного слабого оптического излучения от узкого пучка электронов с энергией 350 МэВ при давлениях, близких к порогу ИВЧ и ниже. Серия приведенных в работе фотоснимков демонстрирует постепенное уменьшение диаметра регистрируемого кольца ИВЧ и превращение его в маленькую точку, соответствующую размерам используемого в этом опыте очень узкого электронного пучка ускорителя в Новосибирске. Интенсивность света в этом точечном пятне не обращается в нуль ни при давлении газа, соответствующем черенковскому порогу, ни при меньших давлениях. Это отступление от теории ИВЧ автор, как и предшествующие ему исследователи допорогового излучения, объяснил присутствием оптического переходного излучения, возникающего на

входной металлической пластине при выходе электронов из металла в газовую среду и на пластине зеркала, расположенного внутри черенковского счетчика на пути пучка электронов.

Но в работе приведены также снимки при двух сильно отличающихся давлениях газа (в 7 и 100 раз ниже порогового значения), которые явно свидетельствуют о неполноте принятого автором объяснения наблюдаемого свечения только переходным эффектом. На этих снимках видно резкое уменьшение интенсивности света в точках засвеченного пятна. Это означает, что значительная часть регистрируемого в опыте допорогового света обусловлена атомами самой газообразной среды. К сожалению, автор вообще не обсуждает этот полученный им результат, явно не укладывающийся в принятую схему объяснения допорогового излучения.

В обсуждаемом исследовании получен еще один важный результат, который может быть истолкован в пользу прямой связи значительной части наблюдаемого допорогового узкого луча света с излучением атомов газообразной среды, возбуждаемых релятивистскими электронами. Я.Ружичка впервые при исследовании допорогового излучения провел оригинальный опыт с отклонением пучка электронов магнитным полем. Магнит в его опыте занимал одну треть 90-сантиметровой длины газового радиатора в конце черенковского счетчика. На приведенном в работе [3] фотоснимке видна яркая начальная точка, в которой следует ожидать суммирования излучений от переходного эффекта на входном окне газового радиатора и от индуцированной генерации атомами самого газа в первой части радиатора, расположенной до магнитного поля.

Однако на фотоснимке видна также яркая полоска от испускания веера лучей света из области отклоняемого магнитным полем пучка релятивистских электронов. Появление на снимке этой полоски света, по яркости близкой к исходному пятну, автор объяснил возникновением синхротронного (магнитотормозного) излучения, не обсуждая альтернативное предположение о возможном вкладе когерентного излучения атомов в этой части радиатора. Простой контрольный опыт с удаленным из объема счетчика газом и включенным магнитом позволил бы исследователю однозначно определить вклад синхротронного излучения в зарегистрированную световую полоску, а затем путем сравнения с результатом опыта с газом при давлении немного ниже порога ИВЧ убедиться в существовании дополнительного света от атомов газа в области магнитного поля. Таким образом, опыты Я.Ружички для однозначной их интерпретации следует дополнить проведением указанного контрольного опыта.

Особенно четкие цветные фотоснимки ИВЧ в работе [3] были получены на пучках релятивистских многозарядных ядер. При обсуждении с

Я.Ружичкой вопросов экспериментального выяснения природы допорогового излучения мы пришли к выводу, что наилучшие условия для выяснения свойств этого излучения будут также при использовании пучков релятивистских ядер с большим зарядом в опытах, аналогичных проведенным на электронах. Но и до окончательного экспериментального выяснения природы допорогового излучения есть достаточные основания считать наблюдаемое в работе [3] направленное допороговое излучение в значительной своей части связанным с возбуждением атомов присутствующего в объеме газа. Во всяком случае, обсуждение физической природы такого излучения и получение необходимых теоретических оценок следует считать непосредственно подсказанными полученными в работе Я.Ружички экспериментальными результатами, несмотря на отсутствие соответствующих выводов в самой работе*. Можно только сожалеть, что обширные теоретические исследования смежных с ИВЧ явлений в прошлые десятилетия не привели к предсказанию допорогового узко направленного вперед излучения релятивистских частиц в газе, которое, безусловно, стимулировало бы экспериментальные поиски такого излучения.

Теперь же, возвращаясь к высказанной в начале статьи идее о механизме индуцированной генерации излучения, направленного строго по направлению движения заряженной релятивистской частицы, покажем, что даже самое элементарное рассмотрение принципиальной схемы этого механизма приводит к настолько очевидному выводу о неизбежности возникновения направленного вперед когерентного излучения, что и в самой постановке этой проблемы трудно будет увидеть особую заслугу или склонность к серьезному переосмыслению известных фактов. Установление простых истин часто приводит к ситуациям, разъясняемым на известном историческом примере задачи с

*Имеет все же смысл обсудить причины, по которым в предшествующих исследованиях допорогового излучения не были замечены отступления от переходного излучения. Одно из первых детальных исследований допорогового излучения было проведено лондонской группой физиков в 1963 году на электронном пучке микротрона с энергией около 29 МэВ [4]. Измерения выхода света проводились с помощью чувствительного к ультрафиолету ФЭУ при различных давлениях газа в счетчике, длина которого составляла всего 7/8 дюйма. Видимо, малая длина черенковского счетчика и значительное влияние многократного рассеяния электронов при энергии 29 МэВ помешали заметно проявиться в этом опыте излучению самого газа при давлении ниже порога ИВЧ. Следующее детальное изучение допорогового излучения проводилось во ФНАЛ на пучках электронов, пионов, каонов и протонов с энергией 140 ГэВ [5]. В этой работе использовались два черенковских счетчика длиной 1,5 и 1,9 м. Но авторы, интересуясь переходным излучением, провели измерения только в «чистых» условиях при нулевом давлении газа

яйцом, предложенной оппонентам великим открывателем Америки Х. Колумбом*.

Как и в случае ИВЧ, простейшее рассмотрение допорогового излучения должно исходить из полуклассического описания равномерного движения точечного заряда в газовой среде на полубесконечном отрезке пути от минус бесконечности до заданной на прямой линии, например, точки $z = 0$. Здесь уместно напомнить одно ценное замечание по поводу идеализированного расчета (проведенного еще в конце прошлого века знаменитым английским ученым-самоучкой О. Хевисайдом) вектора электрического поля излучения, создаваемого в оптической среде точечным зарядом при движении со скоростью выше скорости света в данной среде. Такой расчет без учета дисперсии, как отмечает в своей книге [6] И. М. Франк, приводит к «величине поля, которое обращается на его поверхности в бесконечность». Поясним, что здесь автор ведет речь о поверхности конуса излучения Вавилова — Черенкова. Бесконечность эта легко устраняется и учетом дисперсии среды, и учетом отступления от прямолинейности движения заряда, даже без отказа от основного приближения, связанного с расчетом для полубесконечной длины пути частицы.

Нам важно здесь отметить, что появление бесконечности в таком упрощенном классическом расчете было своеобразным теоретическим указанием (кстати, из прошлого века, что было мною обнаружено [7]) на весьма необычное направленное излучение, о котором после его экспериментального обнаружения долгие годы писали как о чрезвычайно слабом излучении. Такое же идеализированное классическое рассмотрение той же задачи о движении точечного электрического заряда в оптической среде, но при скорости точно равной пороговой, дает бесконечное поле только на самой линии движения частицы, в которую стягивается в пределе поверхность конуса ИВЧ. Такой переход от бесконечного поля излучения на конической поверхности к бесконечности поля на линии означает исчезновение прежнего процесса когерентного излучения Вавилова — Черенкова и возникновение условий для вынужденного излучения возбужденных заряженной частицей атомов вдоль линии ее движения. Конечно, бесконечная величина поля излучения вдоль линии возникла в результате идеализации задачи движения частицы строго по прямой из минус бесконечности и идеализации распространения

*Еще раньше, в 1420 году, ту же задачу с яйцом поставил и знаменитый итальянский архитектор Филиппо Брунеллески после демонстрации им способа перекрытия купола собора без вспомогательной системы опорных лесов (этим методом им был воздвигнут величественный купол кафедрального собора Флоренции, выдержавший за прошедшие столетия несколько серьезных землетрясений).

ния света в среде без учета дисперсии (зависимости скорости распространения от частоты света). Такое упрощенное рассмотрение приводит к бесконечной когерентной длине при пороговой скорости для нулевого угла, поскольку в этом приближении данная величина равна:

$$l = \frac{\beta n \lambda}{2|1 - \beta n \cos \theta|}.$$

Бесконечные значения поля излучения появляются на прямой линии, строго говоря, в момент прохождения данной точки самой заряженной частицей, если не принимать во внимание длительность цуга излучения каждым ранее возбужденным атомом. Бесконечное же значение поля излучения в точке нахождения заряженной частицы возникает в результате суммирования амплитуд волн, спонтанно излученных возбужденными ранее атомами. Но даже эта идеализированная бесконечность на прямой линии не означает пока еще потока излучения на единицу площади или на единичный телесный угол. Смысл этой бесконечности состоит в указании на возникновение в соответствующих точках в момент возбуждения новых атомов поля, достаточного для индуцированной генерации излучения, характерного для атомов данного газа. Иначе говоря, дальнейшее рассмотрение требует квантового подхода.

Окончательным доказательством механизма лазерного излучения вдоль направления движения частицы должно быть получение соответствующего данному газу спектра излучения, что совершенно не характерно для ИВЧ. Так, при добавлении в гелий небольшой порции неона спектрометрические измерения допорогового излучения должны обнаружить характерную для этой смеси линию 3,39 мкм.

Литература

1. Франк И.М. — УФН, 1961, 75, с.231.
2. Гинзбург В.Л., Франк И.М. — ЖЭТФ, 1946, 16, с.1; ДАН СССР, 1947, 56, с.699.
3. Ружичка Я. — Теоретические и экспериментальные исследования эффекта Вавилова — Черенкова. Диссертация на соиск. уч. степ. д-ра физ.-матем. наук. ОИЯИ, Дубна, 1993.
4. Aitken D.K. et al. — Proc. Phys. Soc., 1963, 82, p.710.
5. Bodek A. et al. — Z. Phys., 1983, C18, p.741.
6. Франк И.М. — Излучение Вавилова — Черенкова. М.: Наука, 1988.
7. Тяпкин А.А. — УФН, 1974, 112, с.735.

Рукопись поступила 16 июня 1993 года.