

ԵՐԵՎԱՆԻ ՖԻԶԻԿԱՅԻ ԻՆՍՏԻՏՈՒՏ  
ЕРЕВАНСКИЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

---

ЕФИ-339(64)-78

С.М.АХВЕРДЯН, Г.М.ГАРИБЯН

ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ФИЗИКЕ ПЕРЕХОДНОГО  
ИЗЛУЧЕНИЯ

ԵՐԵՎԱՆ 1979 ԵՐԵՎԱՆ

С.М.АКХВЕРДЯН, Г.М.ГАРИБЯН

## INVESTIGATIONS ON TRANSITION RADIATION PHYSICS

The historic review of investigations on transition radiation physics is given. The Introduction gives an account of the transition radiation, the date it was theoretically predicted and the state of affairs at present is briefly discussed. In Section II the reasons of the development of the subject in Armenia, as well as the ways of the theoretical discovery of a X-ray transition radiation, are argued. Section III deals with the formation of this radiation in a stack of plates. In Section IV some experimental investigations on transition radiation are discussed, and in Section V the comments on the theoretical investigations of transition radiation in the seventies are given. The Conclusion deals with the needs of the high-energy physics and the ways to satisfy them using a X-ray transition radiation.

Yerevan Physics Institute

Yerevan 1979

## I. Введение

Когда равномерно и прямолинейно движущаяся заряженная частица пересекает границу раздела двух сред, обладающих различными электродинамическими свойствами, возникает излучение. Это связано с тем, что в таких средах электромагнитные поля частицы различны, поэтому при пролете через границу раздела сред они должны перестроиться. В ходе этой перестройки "излишние" части поля заряда преобразуются в свободное излучение и испускаются на бесконечность в обе стороны относительно границы раздела сред. Оказывается, что интенсивность этого излучения, называемого переходным, зависит от лоренц-фактора заряда  $\gamma$ . Поэтому, измерение этой интенсивности, в принципе, дает нам новый способ определения  $\gamma$ -фактора частиц высоких энергий.

На возможность такого излучения впервые указали В.Л. Гинзбург и И.М. Франк еще в 1945-46 г.г. Одновременно они дали и первую теорию этого явления [1]<sup>ж</sup>. С этого времени и до 1957 г. в литературе были опубликованы еще три работы [2-4] по теории

ж Ссылки на литературу даются по "Библиографическому указателю литературы по переходному излучению" издания ЕРФИ-1979.

переходного излучения, не внесшие, однако, существенного вклада в понимание этого явления.

С 1957 г. и по сей день в Армении ведутся работы по теории переходного излучения в Ереванском физическом институте, (до 1962 г. Физическом институте АН Арм.ССР), а затем с середины 60-ых годов и до начала 70-ых годов также в Ереванском государственном университете, Институте физических исследований и Институте радиофизики и электроники АН Арм.ССР. Эти работы привели к тому, что в 60-ых годах в исследования включились и физики-экспериментаторы.

При этом надо иметь в виду два типа экспериментальных исследований с переходным излучением. Первый тип - исследование самого явления переходного излучения, проверка выводов теории. Второй тип исследований - это использование переходного излучения в физике частиц высоких энергий. Можно сказать, что конечной целью исследований переходного излучения, на сегодняшний день, являются, именно, эксперименты второго типа.

В настоящее время в СССР и, в частности, в Армении, а также в некоторых других странах мира (США, в Международном ядерном центре (ЦЕРН) в Швейцарии и др.) проводятся экспериментальные исследования частиц высоких энергий в космических лучах и на ускорителях, в которых для распознавания этих частиц уже используется рентгеновское переходное излучение (РПИ).

К настоящему времени во всем мире выполнено около 250 работ по теории переходного излучения. Несколько меньше имеется экспериментальных исследований.

Ниже будет сделана попытка дать краткий исторический обзор путей развития наших представлений об РПИ, причем, в основ-

ном, мы ограничимся работами советских физиков, усилиями которых теория этого явления развивалась и были выполнены интересные экспериментальные исследования первого типа с РПИ.

## 2. Простые случаи образования РПИ

Таким образом, исследования по переходному излучению увенчались для физиков Армении несомненным успехом. Что же явилось, на начальных стадиях, определяющим для его достижения?

Во-первых, сама тематика исследований - поиск таких электродинамических процессов, которые не насыщаются с ростом  $\chi$  и могут быть использованы для идентификации частиц высоких энергий - была перспективной и притягательной тем, что сочетала в себе твердо установленную теорию - электродинамику Максвелла - и вполне ясную цель.

Немаловажно здесь также и то, что её разработку можно было вести, на начальных стадиях, небольшими силами. Это обстоятельство ставило молодую теоретическую физику Армении в условия, когда она могла быть конкурентоспособной большим научным коллективам.

Наконец, эта тематика перекликалась с работами, ведущимися тогда на Арагацской станции по исследованию космических лучей Физического института АН Арм.ССР. Одной из трудностей, которую испытывали физики-экспериментаторы, работавшие там, было отсутствие методов исследования и распознавания частиц сверхвысоких энергий. Поэтому уже с самого начала эта тематика имела конкретную экспериментальную направленность, а её исполнители-уверенность в том, что их работа нужна.

Два других, нижеследующих, фактора не носят такого общего

характера, а связаны с конкретной методикой и тактикой теоретического исследования переходного излучения на начальной стадии.

А именно, следующим фактором явилось, то что уже в первых работах, выполненных в Армении [7,8], были предприняты попытки найти новую и более простую, чем в работе [1], методику решения этой граничной задачи электродинамики. Одна из них – методика решения, предложенная Гарибяном [8], оказалась очень удачной. Она позволила простым и строгим способом решить задачи как пролета заряда или других источников поля через одну границу раздела сред, так и те задачи, когда этих границ имеется произвольное число. (см. например [12-14, 16, 19, 22, 25, 30-32, 84, 85, 106, 107, 108, 116, 127, 135, 147, 160, 167, 168, 170, 194, 195, 215] ).

В работах, выполненных до 1959 г., было получено, для различных граничных задач, немалое количество правильных формул, описывающих соответствующие интенсивности излучений. Однако их частотные спектры не были достаточно полно проанализированы. Дело в том, что, как было отмечено в самой первой работе Гинзбурга и Франка [1] и сказано еще более определенно в Нобелевской лекции Франка [17], переходное излучение должно иметь место, "только в оптической области частот". Никто из физиков не пытался разобраться до конца в этом вопросе или поставить его под сомнение.

В 1958 г. вышла в свет книга Л.Д.Ландау и Е.М.Лифшица "Электродинамика сплошных сред". В ней был изложен, принадлежащий Л.Д.Ландау, новый метод вычисления электродинамических потерь энергии заряженной частицы в среде.

Дело в том, что как было показано еще в 1915 г. Н.Бором, а затем и другими теоретиками, потери энергии быстрых частиц на ионизацию и по классической, и по квантовой теории, логарифмически растут с ростом  $\gamma$ . Однако в 1940 году Э.Ферми теоретически доказал, что учет поляризации безграничной среды приводит к тому, что после небольшого логарифмического роста эти потери выходят на плато (эффект плотности). Ландау предложил в этой книге очень изящный метод вычисления этих потерь, который использует аналитические свойства поляризуемости среды в комплексной плоскости частоты.

Несколько обобщив этот метод, Гарибян [21] применил его к задачам о переходном излучении и об ионизационных потерях энергии заряда в ограниченном слое вещества, т.е. в пластине. При этом применение нового метода к переходному излучению не диктовалось никакими физическими соображениями, связанными с исследованием спектра переходного излучения, а было вызвано привлекательностью самого математического подхода Ландау. Что же касается ионизационных потерь, то здесь были определенные догадки, относящиеся к поиску таких условий, при которых отсутствовал бы эффект плотности Ферми.

Поэтому, третьим фактором, определившим успех исследований, было использование этого нового метода. Что же дал расчет?

Во-первых, оказалось [21], что полные потери энергии заряда на границе линейно растут с ростом его лоренц-фактора  $\gamma$ . В работе [1] потери энергии, обуславливаемые переходным излучением, обладали менее резкой зависимостью от  $\gamma$ , а именно, логарифмической. В рамках использованного в [21] метода расчета потерь

оставался открытым вопрос о конкретной природе этих потерь. Анализ, проведенный Барсуковым [23] и Гарибяном [21], показал, что эти потери обязаны испусканию ультрарелятивистской частицей в направлении своего движения переходного излучения не только в оптической, но также и в рентгеновской области частот. Спектр этого излучения имеет верхнюю границу, пропорциональную величине  $\chi$ .

То, что для ультрарелятивистских частиц главную роль в излучении, испускаемом вперед, начинают играть рентгеновские, а не оптические частоты, явилось очень важным фактором, так как длины волн, а следовательно, и зоны формирования излучения, для них на три порядка меньше, чем для оптических частот. Не менее важно отсутствие в этой области частот черенковского излучения, которое, не будучи зависящим от  $\chi$ , было бы только "вредным" фоном. Наконец, как было показано впоследствии, в рентгеновской области частот, при  $\chi \geq 10^3$  в легких веществах с толщиной  $\leq 1$  мм, интенсивность тормозного излучения много меньше интенсивности РПИ.

Во-вторых, оказалось [21], что ионизационные потери ультрарелятивистской частицы в тонкой пластине с ростом  $\chi$  не насыщаются, а продолжают логарифмически расти. Это означает, что в тонких пластинках в ионизационных потерях отсутствует эффект плотности Ферми. \*)

---

\*) Впоследствии этот эффект был экспериментально наблюден

М.П.Лорикяном и другими: ЖЭТФ 44, 1122(1963);46,1212(1964).

После установления факта существования РПИ с такими интересными, для частиц высоких энергий, свойствами, началось его интенсивное и всестороннее теоретическое исследование.

Из этих работ отметим следующие. Так как длина волны РПИ порядка размеров атомов и межатомных расстояний, то Амадуни и Корхмазян [39] исследовали вопрос о том, какие должны быть предъявлены требования к чистоте поверхностей, чтобы на них образовывалось РПИ. Если бы оказалось, что резкость изменения плотности вещества у границы поверхности или шероховатость этих поверхностей должна быть меньше длины волны излучения, то это требование было бы очень жестким и губительным для РПИ. К счастью, строгое рассмотрение показало [39], что размытость или шероховатость поверхности должна быть меньше зон формирования излучений, которые при больших  $\chi$  могут достигать макроскопических значений.

В работе [24] Гарибяном и Померанчуком был рассмотрен вопрос о том, как может повлиять многократное рассеяние частицы на образование РПИ. Дело в том, что зоны формирования РПИ в веществе могут достичь немалых размеров. Если на этой длине частица начинает испытывать рассеяние, то обычный механизм образования РПИ будет расстроен. В работе [24] были найдены пределы применимости обычной теории образования РПИ в случае одной границы раздела сред.

Если построить теорию, которая учитывает не только разницу в электродинамических свойствах сред, но и многократное рассеяние заряда в среде, то её формулы должны отражать, помимо образования РПИ у границ раздела сред, также и образование тормозного

излучения при движении заряда на тех участках траектории, где имеет место многократное рассеяние. Такая теория для случая, когда двумя граничащими полубесконечными средами являются вакуум и вещество, была построена Гарибяном [34]. При создании этой теории была использована развитая Гольдманом [33] оригинальная методика расчета для аналогичных задач, в которых учитывается многократное рассеяние. В этой задаче главной трудностью является выделение из бесконечно большой величины тор-мозного излучения в веществе некой конечной части, обязанной границе. В отмеченных работах это было сделано согласно вполне определенной процедуре. Из этих работ и работы Пафомова [37] следовало, что влияние многократного рассеяния на переходное излучение приводит к тому, что область излучаемых частот расширяется в более жесткую сторону \*) , но их дифференциальная интенсивность остается, примерно, той же.

Вопрос учета многократного рассеяния при пролете заряда через пластину и стопку пластин оказался очень сложным и трудоёмким. В частности, для стопки пластин принципиальная разработка теории была завершена только в 1977 году (об этом будет сказано подробнее в п.5).

Квантовая теория РПИ, учитывающая в случае двух сред влияние отдачи заряда, была построена в работе [40]. Как и следовало ожидать, если энергия испущенного кванта много меньше энергии заряда, это влияние несущественно.

\*) На самом деле этот вопрос более тонкий и когда разговор заходит об "излучении", возникающем на границе раздела с учетом многократного рассеяния, правильнее говорить о краевом эффекте в полном излучении (см. [440]). Мы будем брать слово "излучение" в кавычки, так как иногда оно может оказаться отрицательным.

Известно, что частицы могут обладать электрическими и магнитными моментами. Кроме того, в ускорителях заряды разгоняются до больших энергий в виде сгустков. Поэтому было интересно исследовать переходное излучение дипольных моментов и периодически следующих друг за другом сгустков заряженных частиц. Эти случаи и были детально рассмотрены в работах Аматауни [25,67]. Учет теплового движения электронов среды, приводящего к пространственной дисперсии диэлектрической проницаемости, был также исследован Аматауни [106] и другими в газовой-кинетическом приближении.

Были рассмотрены также вопросы, связанные с наклонным пролетом заряда через границу раздела сред, с неравномерностью движения заряда, с переменностью его величины, поляризацией излучения и т.д.

В 1965 г. Франк [120] предложил использовать измерение интенсивности переходного излучения в качестве нового способа определения оптических свойств вещества. В дальнейшем эта идея была развита в работах [156,223].

На одной границе образуется, примерно  $1/137$  переходного кванта. Очевидно, если мы хотим увидеть РПИ отдельной ультрарелятивистской частицы, необходимо, чтобы она излучала в стопке, состоящей из большого числа пластин. Поэтому значительная группа работ по теории РПИ связана с излучением заряда в стопке пластин.

### 3. Образование РПИ в стопке пластин

Формула для излучения заряда в пластине, была получена Пафомовым [9] (см. также [14,16]).

Первая работа по потерям энергии в слоистой диэлектрике была опубликована в 1957 г. Фейнбергом и Хижняком [5]. Слоистая среда полагалась бесконечной и решалась задача о пролете через нее заряда. Соответствующие решения были получены без всяких приближений \*).

В следующем году Гарибяном [12] была решена задача о пролете заряда через стопку с произвольным числом пластин. Здесь поля также были получены без приближений. В заключительном разделе этой работы была сделана попытка проанализировать полученные сложные формулы (с точки зрения увеличения интенсивности переходного излучения) в случае излучения любых частот. Однако такая попытка, как это видно сейчас, была преждевременной и на том этапе оказалась очень трудным делом. Результаты этого анализа не всегда правильны. Дело в том, что работы [5, 12] были выполнены до того, как было установлено существование РПИ и поэтому рентгеновская область частот в них специально не исследовалась.

После опубликования работы [21, 23] было вполне естественно исследовать вопрос об образовании РПИ в стопке пластин. В Армении этим вопросом занялись три группы теоретиков.

Аматуни и Корхмазян [43] рассмотрели среду с периодически меняющейся в пространстве плотностью в приближении малого изменения плотности среды. В случае рентгеновских частот были получены два первых члена разложения в ряд поля излучения.

\*) Заметим, что в этой работе было впервые строго получено условие, которому должно удовлетворять излучение, чтобы оно образовалось и распространялось в слоистой среде. Это условие было в [5] названо дисперсионным уравнением для слоистой диэлектрика. Если в нем ограничиться рентгеновской областью частот, то оно совпадает с условием "резонанса" полученным через 3 года в работе [42].

Весь ряд поля РПИ был получен в работах [42] и [44] Тер-Микаелян и Газазян [42] решили задачу излучения сразу в приближении близкой к единице диэлектрической проницаемости пластин. Гарибян и Гольдман [44] сделали аналогичное приближение в точных решениях работы [12].

В дальнейшем в работе [224] были найдены пределы применимости формулы для РПИ, полученной в указанных работах.

В работе [42], а также в книге [182], РПИ, образованное в стопке пластин, было названо резонансным излучением. Впоследствии за ним осталось прежнее название РПИ.

Эти исследования строго показали, что для получения в слоистой среде заметного излучения, толщины пластин и расстояния между ними должны быть взяты большими зон формирования РПИ в веществе и в вакууме, соответственно. Из сделанного в п.2 замечания об этих величинах проясняется преимущество переходного излучения в рентгеновской области по сравнению с переходным излучением в оптической области частот, а именно, уменьшение на 3 порядка размеров стопки пластин, генерирующей излучение.

Слоистой среде, кроме названных статей, посвящены и другие работы (см. например [15, 35, 41, 51, 60, 194, 195, 226, 346, 386, 401, 407, 418]).

Примерно к 1965 г. первый этап теоретических исследований РПИ завершился. Для дальнейших работ теоретикам нужно было знать результаты экспериментов, возникающие при этом трудности и новые идеи. Усилия теоретиков, затраченные на этом этапе, не пропали даром, так как к его концу относится, примерно, и начало экспериментальных исследований РПИ.

#### 4. Экспериментальные работы

В вопросе экспериментальных исследований переходного излучения, даже в идейном отношении, не все было просто и ясно.

Во-первых, еще в 1919 г. немецкий физик Лилиенфельд наблюдал некое излучение при бомбардировке металлической поверхности электронами с энергиями в несколько кэв. До 1930 г. было выполнено около десяти работ в Германии и США, в которых исследовалось это излучение. Однако природа его так и осталась невыясненной. В этом, по-видимому, повинна невысокая техника физического эксперимента того времени. Только в 1960 г. группой немецких физиков было показано [62], что Лилиенфельд наблюдал именно оптическое переходное излучение.

Во-вторых, в конце 50-ых годов американский физик-теоретик Феррелл [11] предсказал, что электроны должны образовывать в металлических фольгах продольные волны (или плазмоны), которые затем, в вакууме, трансформируются в поперечные электромагнитные волны. Через 2 года это излучение было экспериментально обнаружено в США [46, 47]. Однако спустя немного времени Силиным и Фетисовым [63, 92] в СССР и Ричи и Элдриджем [74] в США было установлено, что теория Феррелла является некоторым частным случаем обычной теории переходного излучения. Работы в этом направлении продолжались еще несколько лет (вплоть до 1965 г.) и в них было детально исследовано, образованное в металлических пленках, оптическое переходное излучение от электронов с энергиями, примерно, до 100 кэв.

Осознанно оптическое переходное излучение было обнаружено в Англии Гольдсмитом и Джелли [20] в 1959 г., которые наблюдали

переходное излучение, образованное медленными протонами в металлических фольгах.

Все эти работы относятся к переходному излучению, образованному медленными частицами. Впервые переходное излучение от ультрарелятивистских частиц в оптической области частот было исследовано Л.Ц.Юанем с сотрудниками в 1967-1968г.г. [163, 175].

Возможность экспериментального обнаружения РПИ была обсуждена Алиханяном, Арутюняном, Испиряном и Тер-Микаееляном в 1961г. и опубликована в работе [64].

Впервые РПИ, генерированное космическими мюонами, было обнаружено в 1964 г. Арутюняном, Испиряном и Оганесяном, а полученные результаты опубликованы в работе [105], в которой была реализована идея эксперимента, предложенного в [64].

В 1967 г. в работе [159] исследовалось РПИ, образованное релятивистскими электронами с энергиями до 600 Мэв, ускоренными на синхротроне ФИАН СССР. Интенсивность РПИ в этих последних экспериментах была получена на 1-1,5 порядка выше, чем это следовало из теории. Это единственный эксперимент, включая и эксперименты, выполненные позже (см. например [289, 374, 486, 531]), не согласовавшийся с обычной теорией РПИ и не находивший правильного объяснения в течение нескольких лет после его выполнения.

Повторение его в 1973 г., т.е. через 6 лет, на электронном ускорителе Ереванского физического института показало [328], что, к сожалению, в постановке эксперимента [159] имелась некорректность. Дело в том, что в этом эксперименте на завершающем участке траектории заряда не был поставлен контрольный счетчик электронов, который гарантировал бы, что в слоистой среде генерировалось только РПИ, а не имели место еще и другие процессы

(например электронно-фотонные ливни [358] ).

Единственным физическим фактором, который, в принципе, мог повлиять на образование РПИ, оставалось еще многократное рассеяние заряда. Для проверки этой возможности Арутюнян произвел численные расчеты [183], воспользовавшись формулами работы [173], опубликованной в 1968 г., в которой Тер-Микаелян создал теорию, учитывающую влияние многократного рассеяния на образование РПИ в стопке пластин (см. по этому поводу п.5). Результаты численных расчетов [183] совпали со всеми экспериментальными точками статьи [159]. Однако, в эти численные расчеты, по-видимому, вкралась ошибка, так как повторение их (см. [471]) в 1975-1977 г.г. не привело к кривым работы [183]. Тогда же было показано [482], что вообще влияние многократного рассеяния в стопке пластин не может увеличить интенсивность РПИ, а приводит лишь к расширению, в сторону больших частот, области "излучения", обязанного своим возникновением границам, но с интенсивностью примерно равной интенсивности обычного переходного излучения у его верхнего края (см. п.5). Это весьма похоже, с соответствующими оговорками, на то, что имеет место в случае одной границы раздела сред.

В 1969-72 г.г. в США выходят несколько экспериментальных работ по исследованию РПИ, выполненных под руководством Д.Ц.Л.Юаня (см. [193, 197, 209, 210, 220, 248, 252, 253, 281, 282]). В этих работах РПИ детектировалось с помощью германиевого счетчика, кристалла CsI, а в работах 71-72 годов - с помощью многократной пропорциональной камеры.

Запуск электронного ускорителя Ереванского физического института внес новую струю в экспериментальное исследование РПИ.

На нем было выполнено около 20 работ по переходному излучению. Среди этих исследований важную роль сыграла работа [218] (см. также [207, 231]), выполненная в 1969 г. Алиханяном, Лорикяном и другими. В этой работе, для детектирования РПИ совместно с зарядом, была использована, по предложению М.П.Лорикяна, стримерная камера, установленная после слоистой среды. На снимках в этой камере физики могли воочию убедиться в существовании квантов РПИ, так как эти последние в объеме камеры, в который была специально добавлена примесь тяжелых газов, конвертировались в фотоэлектроны, видимые в виде запятых или блямб вокруг трека заряда ("лохматые треки").

В этой работе был сделан еще один важный, с точки зрения физики переходного излучения и его практического применения, шаг - в качестве радиатора М.П.Лорикяном было предложено взять пенопласт и было обнаружено, что РПИ генерируется также и в нерегулярных слоистых средах, типа пенопласта, примерно с той же интенсивностью, что и в регулярных средах с тем же числом границ. Этот экспериментальный факт очень убедительно свидетельствовал о переходной природе излучения в слоистой среде, а не какой-нибудь иной.

Отмеченная выше работа растопила ледок недоверия к РПИ и стимулировала выполнение новых экспериментальных работ в СССР и США.

В первом номере журнала *Adventures in Exp. Phys.* [291, 292], вышедшего в 1972 г., среди 8 наиболее интересных направлений по физике, возникших в эти годы, имелся и раздел, посвященный РПИ.

В работе Славатинского, Шаулова и др. [289] РПИ было также исследовано стримерной камерой, но помещенной вплотную к слоистой среде.

В последующие годы в Ереванском физическом институте А.И.Алиханяном, К.А.Испиряном, М.П.Лорикяном, А.Г.Оганесяном и их сотрудниками были выполнены систематические исследования переходного излучения в различных условиях (см. например [274, 276, 286, 304, 306, 322, 325, 328, 330, 340, 357, 409]).

В 1973-74 г.г. в США начинают заниматься исследованием РПИ несколько групп физиков. В Чикагском университете этим занимается группа д-ра Д.Мюллера [349, 374, 391, 422], которая в 1976 г. уже перешла к использованию РПИ в экспериментах на шарх-зондах. Группа д-ра Иодта также ставила своей целью использовать РПИ в экспериментах с космическими лучами [314].

Д-р Фишер с сотрудниками стали использовать слоистые среды из лития [368, 412]. Осборн и Мак изготовили систему, в которой РПИ отделяется от заряда за счет комптон-эффекта [377, 423].

С начала 70-ых годов в Ереванском физическом институте Лазиев с сотрудниками начали интенсивное экспериментальное и теоретическое исследование вопросов генерации микрорадиоволн с помощью переходного излучения [117, 241, 245, 257, 260, 470].

#### 5. Второй этап теоретических исследований

В начале 70-ых годов в Армении была поставлена, а затем и решена задача создания микроскопической теории РПИ. Дело в том, что длины волн РПИ достигают величин порядка и меньше атомных размеров. Поэтому было неясно, можно ли описывать среду при этих условиях независимой от координат диэлектрической

проницаемостью или нет. С другой стороны, основной длиной, на которой образуется РПИ, является зона формирования, которая обычно, много больше этих величин, поэтому от учета структуры вещества радикальных изменений в теории не надо было ожидать. Имея все это в виду, создание микроскопической теории, которая дала бы исчерпывающие ответы на эти вопросы, стало в свое время актуальной задачей.

Вначале, в работе [236], была построена очень грубая теория, из которой было видно, что в принципе, эта теория на некоторых частотах, в кристалле, может дать усиление излучения.

Затем в работе Гарибяна и Ян Ши [239] были заложены основы строгой микроскопической теории РПИ. Основное уравнение этой теории было решено теми же авторами, в работе [278], в двухволновом приближении, хорошо известном в теории рассеяния рентгеновских лучей в кристалле, и показано, что усиление РПИ в кристаллах на отдельных частотах, за счет явления брэгговского отражения, действительно имеется. Однако ширина этих пиков, или динамических максимумов, оказывается столь малой, что общая интенсивность РПИ при этом остается практически неизменной [364, 388, 389, 398, 402].

Вопрос создания микроскопической теории РПИ рассматривался и в работах Барышевского и Феранчука, выполненных в Минске [240, 348]. Вначале авторы этих работ сильно переоценили влияние структуры на образование РПИ, но потом все было рассчитано точно и результаты обеих групп совпали.

Сразу же после выполнения первой, недостаточно строгой теоретической работы [236], в Ереванском физическом институте начались экспериментальные поиски такого усиленного РПИ, или

как тогда называли, "динамического излучения". Не очень обстоятельное исследование [238], как будто, показало наличие такого излучения. Однако в дальнейшем оно не подтвердилось.

Как уже отмечено выше, в работе [218] было экспериментально обнаружено РПИ, генерируемое в пенопласте. Что касается теории вопроса, то образование оптического излучения в среде со случайными неоднородностями впервые было исследовано С.Капицей [45]. Вопрос об образовании РПИ в слабонерегулярной стопке непоглощающих пластин рассматривался Тер-Микаеляном [182]. Однако для описания образования РПИ в пенопласте необходимо было построить теорию для общего случая нерегулярной поглощающей стопки с произвольным распределением толщин пластин и расстояний между ними. Такая теория была построена в работах [309, 352, 369, 401]. В работах [486, 493] эта теория получила экспериментальное подтверждение.

Кроме того, в ходе создания этой теории было показано (см. также [224]), что например, при фиксированной частоте, угловой спектр излучения в строго регулярной среде имеет резкие пики на вполне определенных значениях углов. Если же ввести небольшую нерегулярность, или усреднить по небольшому интервалу частот, то эти резкие максимумы смазываются (см. [352]). Общая же интенсивность на этой частоте почти не меняется. Ясно, что физической причиной такого поведения является обычная интерференция между переходными излучениями, образованными на разных границах в стопке пластин. Поэтому можно говорить, в случае строго регулярной стопки, например, о "резонансных" значениях углов, в направлении которых имеются максимумы интенсивности в угловом распределении излучения при фиксированной частоте. Но физичес-

кая природа процесса во всех случаях обусловлена образованием переходного излучения и его интерференцией.

Примерно в это же время Гинзбургом и Цытовичем [321] была развита теория возникновения излучения при изменении диэлектрической проницаемости во времени.

В середине 70-ых годов нашел свое полное решение вопрос, остававшийся открытым с середины 60-ых годов, о влиянии многократного рассеяния на образование переходного излучения. Как было отмечено в п.2, это влияние, в случае одной границы раздела сред, было найдено в работе [34], в которой была использована методика [33]. Однако в 1964 г. Пафомов в работе [98] подверг критике эти статьи, предложил новый метод выделения краевого эффекта в тормозном излучении и дал, для рассмотренного случая, свои формулы. Однозначный ответ на вопрос о том, какая из этих двух методик выделения краевого эффекта в тормозном излучении, изложенных в работах [33] и [98], правильна могло дать только рассмотрение толстой непоглощающей пластины. Действительно, излучение в ней можно рассматривать как сумму "излучений" на 2-х границах раздела сред и тормозного излучения на всей толщине пластины. Этот случай был рассмотрен в свое время Терновским [36] и Пафомовым [196]. Однако никакого заключения из формул этих работ не было сделано.

Гарибян и Ян Ши в [440] показали, что в формулах [196] имеются ошибки. Если исправить их и взять толщину пластины большой, то полученная формула для частотного спектра действительно дает то, о чем было сказано выше. А именно, из ее конкретного вида следует формула для "излучения" на одной границе раздела сред с учетом влияния многократного рассеяния заряда.

Из этой формулы, в свою очередь, вытекает, что методика выделения краевого эффекта в тормозном излучении, предложенная Гольдманом [33], правильна.

Была получена также формула, дающая частотный спектр полного излучения, образуемого в непоглощающей пластине произвольной толщины и состоящего из тормозного излучения и краевого эффекта. При этом оказалось очень важным, чтобы траектории заряда в пластине учитывала бы многократное рассеяние, а вне её, т.е. в вакууме, траектория считалась бы прямолинейной. Такое рассмотрение приводит в определенной области частот к обогащению спектра "излучения", связанного границам, новыми частотами. Это происходит из-за того, что тормозное излучение по-разному образуется у границы пластины и в её глубине.

В работе [460] был исследован также случай поглощающей пластины произвольной толщины. Решение этой задачи было интересно также и с точки зрения теории тормозного излучения. Дело в том, что вопрос учета влияния поглощающей способности вещества на образование тормозного излучения был впервые поставлен Ландау и Померанчуком еще в 1953 г. Однако в последующем этот вопрос не нашел в научной литературе своего однозначного решения. Рязановым в обзоре [375], опубликованном в 1974 г., было отмечено, что решение этой задачи может быть проведено строго, если рассмотреть образование излучения зарядом в пластине вещества, с учетом её поглощающей способности.

Аналогичный вопрос был рассмотрен также Барышевским и др. [453]. Результаты работ [460], [453] совпали.

Наконец, Гарибяном и Ян Ши [477] было исследовано влияние многократного рассеяния на образование излучения в стопке

пластин. До этого этот вопрос был рассмотрен в работе [173] (см. п.4), в такой модели стопки, в которой, для простоты, считалось, что рассеивающие ядра равномерно распределены по всей длине стопки, а электроны обладают соответствующей периодической плотностью.

В работе [477] было показано, что такая модель стопки правильно описывает общее тормозное излучение, образуемое в стопке. Однако из рассмотренного выше случая пластины, следует что модель не может описать краевого эффекта в тормозном излучении, приводящего к обогащению спектра "излучения", связанного с границей, новыми частотами. Для этого необходимо учитывать, что частица по-разному движется внутри пластин и в вакуумных отсеках между ними.

Вместе с тем, было показано, что когда начинает сильно сказываться влияние многократного рассеяния, для отделения "излучения", связанного границе, от общего тормозного излучения, необходимо сделать, по крайней мере, два измерения.

В ходе выполнения этих работ Гарибяном и Ян Ши было обнаружено, что поглощающая способность вещества в области квантов с энергиями в МэВ и выше может оказать существенное влияние на образование этих жестких квантов [461, 519, 522]

## 6. Заключение

И переходное и черенковское излучение являются эффектами классической макроскопической электродинамики. Однако их теории существенно отличаются друг от друга своей сложностью, как из-за различной геометрии участвующих в процессах сред, так и

того, что, в отличие от черенковского излучения, на образование РПИ оказывают влияние многократное рассеяние заряда и структура вещества.

Дело в том, что обычно изучают черенковское излучение, образуемое в пластине вещества. Но если брать пластину не очень тонкой, то граничные эффекты в черенковском излучении становятся пренебрежимо малыми по сравнению с излучением, испускаемым на всей толщине пластины. Поэтому, обычно, для нужд эксперимента в этом случае достаточно знать из теории простую формулу для интенсивности излучения и его углового распределения с единицы длины пути заряда в безграничной среде.

С другой стороны, переходное излучение на одной границе в полубесконечной среде также выражается достаточно простой формулой. Однако простейшим практически реализуемым случаем является одна пластина, формула для которой уже сложнее, чем для одной границы. Для усиления же переходного излучения необходимо рассмотреть стопку пластин. Формула в этом случае оказывается уже весьма сложной. Мы не можем сейчас получить ни одной кривой для РПИ в пластине или в стопке пластин без использования ЭВМ.

Кроме того, в отличие от черенковского излучения, на образование РПИ влияет многократное рассеяние заряда, приводящее к появлению тормозного излучения. Для строгого рассмотрения этого влияния требуются весьма сложные расчеты, в которых учитывались бы, с соответствующим весом, все возможные траектории заряда. В результате оказывается, что при очень больших  $\chi$  интенсивности РПИ, на больших частотах, и тормозного излучения смешиваются. Это можно понять исходя из того, что в рассматриваемых

случаях углы испускания этих излучений становятся очень близкими.

Оказалась также нужной и весьма сложная микроскопическая теория образования РПИ. В кристалле эта теория дает эффект брэгговского отражения поля заряда на определенных частотах от кристаллической решетки. Это отражение происходит тогда, когда длина волны излучения становится порядка периода решетки.

Из приведенного выше обзора основных работ по теории РПИ видно, что её разработка не всегда проходила гладко. Почти все её участники где-нибудь, да ошибались. Анализ этих ошибок показывает, что, обычно, они возникали тогда, когда кто-нибудь пытался неоправданно ускорить естественный ход развития теории, не двигаясь от простого к сложному.

Трудно ругивались и экспериментальные работы по РПИ, как из-за малости эффекта, так и сопутствующих и фоновых процессов. В настоящее время, например, сделана попытка реализовать очень хорошую идею: наблюдать РПИ в том же месте, где оно образуется. Для это в работах [420,501,502] используется эмульсия из сверхпроводящих гранул олова. Однако результаты её пока трудно понять. Видно, что в этом опыте, если он правильный, помимо образования РПИ имеется еще и ряд других не менее важных конкурирующих процессов. Следует отметить, что в работе [463] делается теоретическая попытка объяснения этого эксперимента за счет многократного рассеяния, но она не корректна [447,503].

Исследования РПИ имели в виду нужды физики частиц высоких энергий. Работы по этому излучению стали постепенно обсуждаться на конференциях. Так на Международных конференциях по аппарату-

ре в физике частиц высоких энергий в 1970 г. и 1973 г. (соответственно, в Дубне (СССР) и во Фраскати (Италия)), были заслушаны уже обзорные доклады по РПИ.

В 1977 г. в Ереванском физическом институте состоялся Международный симпозиум по переходному излучению частиц высоких энергий. В приветственном слове к участникам симпозиума вице-президент АН Арм ССР Э.Г.Мирзабекян, в частности, сказал:

"В этом году исполняется 20 лет с тех пор, как вышли первые печатные работы по теории переходного излучения, выполненные в Армении. Я думаю, что многие, в том числе и авторы этих работ, не ожидали, что спустя 20 лет здесь же - в Армении по этим вопросам будет проведен Международный симпозиум. Конечно, решающую роль в этом сыграли работы, выполненные в 1959 г., в которых было доказано, что переходное излучение содержит в себе также и рентгеновскую часть спектра и к тому же сильно зависит от лоренц-фактора частицы. Людям, занимавшимся теорией переходного излучения, в некотором смысле повезло, что оно оказалось обладающим такими интересными свойствами. Однако последующее развитие физики переходного излучения показало, что это везение было не совсем случайным и далеко недостаточным для успеха, так как дальнейшее развитие этой области науки потребовало непростой и довольно напряженной работы, которая и была проделана в стенах института, где мы сегодня собрались. Сам факт организации Международного симпозиума в Ереване является признанием весомого вклада армянских физиков в решении рассматриваемой проблемы".

На симпозиуме было заслушано около 40 докладов, посвященных как исследованию, так и применению РПИ.

Первыми использовали РПИ для своих целей исследователи космических лучей. В 1973 г. были опубликованы две статьи о работах, выполненных в СССР (Арагацкая станция по исследованию космических лучей) и США. В обеих работах космические пионы отделялись от протонов с помощью РПИ. В Советскую группу входили Алиханян, Оганесян, Мамиджанян и др. [342, 363]. Американской группой руководил Йодт [314, 421]. Затем была выполнена работа, под руководством Мюллера по исследованию спектра первичных космических электронов [513].

Наконец, в 1975 г. Виллисом РПИ было использовано для идентификации электронов на встречных протонных пучках в ЦЕРН-е [492].

Во Франции под руководством Вартского с 1973 г. с успехом ведутся работы по диагностике ускоренного пучка частиц с помощью оптического переходного излучения [334, 406, 415, 517].

Небезынтересно, что с 1971 г. по 1974 г. в астрономической литературе оживленно дискутировались вопросы переходного излучения космического происхождения. Гурзядном [385] исследовался вопрос образования оптического переходного излучения в некоторых туманностях. Обсуждался также вопрос о том, можно ли с помощью механизма образования РПИ на межзвездной пыли объяснить наличие диффузионного свечения неба.

Использование РПИ в физике частиц высоких энергий позволяет в настоящее время отделять электроны от тяжелых частиц или пионы от протонов. Пока еще не ставились опыты с целью нахождения лоренц-фактора заряда с помощью РПИ. Возможно это или нет, покажет будущее, так как к использованию РПИ физики приступили всего лишь в последние 3-4 года. Нам представляется, что период применения РПИ только начинается.

Рукопись поступила 2-го октября 1978 г.

Редактор Л.П.Мукаян  
Тех.редактор А.С.Абрамян

Заказ 191                      ВФ- 05910                      Тираж 299

---

Препринт ЕФИ                      Формат издания 60 x 84/16

Подписано к печати 20/VI-79                      1,5 уч.изд.л. Ц. 10к.

---

Издано Отделом научно-технической информации  
Ереванского физического института, Ереван-36, пер.Маркаряна 2