

ЕРЕВАНСКИЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи

ЭДУАРД САВВАТЬЕВИЧ БЕЛЯКОВ

**СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕНТГЕНОВСКОГО
ПЕРЕХОДНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ПЕРИОДИЧЕСКИХ И
ПЕРЕГУЛЯРНЫХ СРЕДАХ**

(на русском языке)

(01.04.01 - экспериментальная физика)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации, представленной на соискание ученой
степени кандидата физико-математических наук

ЕРЕВАН— 1975

Работа выполнена в Ереванском физическом институте.

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук
М.П. ЛОРИКЯН

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук ДАЙОН М.И.
кандидат физико-математических наук ОГАНЕСЯН А.Г.

Ведущее предприятие:

Московский инженерно-физический институт

Автореферат разослан " _____ " _____ 1975 г.

Защита диссертации состоится " _____ " _____ 1975 г.
в _____ часов на заседании Ученого совета Ереванского
физического института (актовый зал Дома ученых).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЕрФИ

Ученый секретарь совета ЕрФИ

Шахбазян В.А.

Переходное излучение возникает при пролете равномерно движущейся заряженной частицы через границу раздела двух сред с различным значением диэлектрической постоянной ϵ . Впервые это явление было теоретически предсказано В.Л. Гинзбургом и И.М. Франком в 1946 г. [1]. Важной особенностью этого излучения в отличие от черенковского является то, что его интенсивность растет с энергией частицы и этот рост не ограничен в ультррелятивистской области.

Долгое время это явление не находило экспериментального применения из-за малости эффекта, т.к. ожидаемое число квантов на одной границе раздела составляет $\sim 1/137$.

В 1959 г. Г.М. Гарибяном теоретически было показано, что основная доля переходного излучения испускается вперед под малыми углами относительно направления движения частицы и более того с ростом энергии последней интенсивность излучения линейно растет [2]. Это объясняется тем, что для ультррелятивистских частиц спектр переходного излучения, испускаемого вперед, смещается в область рентгеновских частот [2,3]. Таким образом появилась реальная возможность усиления переходного излучения за счет увеличения числа переходов, т.к. рентгеновские кванты обладают сильной проникающей способностью и проходят большое количество перегородок без существенных потерь.

В общем виде задача об образовании переходного излучения в стопке пластин была решена в работах [4,5]. М.Л. Тер-Иикаелян и А.Д. Газазян [6,7] получили формулу для переходного излучения в слоистой среде в приближении $\epsilon \sim 1$ и провели анализ

этой формулы. А.Ц.Аматуни и Н.А.Корхмазян [8] рассмотрели среду с периодически изменяющейся плотностью в случае малого изменения плотности. В работе [9] было показано, что результаты работ [6,7] могут быть получены, исходя из формул работы [5] в приближении $\varepsilon \sim 1$.

Идея эксперимента по детектированию рентгеновского переходного излучения (РПИ) была предложена в 1961 г. А.И.Алиханяном, Ф.Р.Арутюняном, К.А.Испиряном, М.Л.Тер-Микаеляном [10], и была реализована Ф.Р.Арутюняном и др. в работе [11].

Исследования некоторых свойств РПИ в периодических стопках пластин были выполнены в работах [12,17] с использованием синцитиляционного спектрометра на кристалле $\text{NaJ}(\text{Te})$, методом стримерной камеры [13,14] и с помощью полупроводникового детектора [15,16].

Интересный результат был получен в работе [13], где впервые в качестве радиатора РПИ был использован пенопласт. Интенсивное переходное излучение из пористых материалов представляет не только теоретический интерес, т.к. обнаружение этого эффекта позволяет создавать радиаторы РПИ практически неограниченных площадей и с большим количеством переходов.

Результаты перечисленных работ показали реальную возможность использования РПИ в детекторах ультрарелятивистских частиц. Поэтому в последнее время большинство экспериментальных групп занялось разработкой и исследованием детекторов частиц на основе РПИ. Вопросы же изучения физических свойств переходного излучения несколько отошли на второй план.

С другой стороны, экспериментальные результаты стимулировали развитие теоретических работ [18,19] по образованию РПИ в

непериодических средах. Это потребовало в свою очередь более детальных экспериментальных исследований спектральных характеристик излучения в пористых материалах. К тому же имеющиеся экспериментальные результаты по излучению в периодических радиаторах также нельзя считать всеобъемлющими. Отсюда вытекает необходимость дальнейших спектрометрических исследований РПИ.

Представленная диссертация посвящена изучению основных физических свойств РПИ в периодических средах и пористых материалах в интервале частот фотонов $5 \cdot 10^{15}$ кэВ.

Диссертация состоит из четырех глав, введения и заключения.

В введении дан краткий обзор экспериментальных работ по исследованию свойств РПИ и возможностей его применения для идентификации частиц, из которого следует, что эта область экспериментальной физики в настоящее время бурно развивается. Результаты работ показывают, что имеются реальные надежды на использование РПИ для детектирования частиц сверхвысоких энергий, когда традиционные методы становятся неприменимыми из-за принципиальных или технических трудностей.

В первой главе диссертации изложены теоретические основы рентгеновского переходного излучения в периодических и нерегулярных средах и даны формулы для спектральных распределений числа фотонов, образованных в этих средах с учетом поглощения излучения в веществе радиатора. Приведен анализ этих формул.

Во второй главе дано описание экспериментальной установки, использованной при исследовании спектральных распределений РПИ.

Образованное электронами переходное излучение регистрировалось детектором, расположенным за радиатором РПИ. Чтобы из-

бежать попадания электронов в детектор, последние отклонялись небольшим магнитом, установленным между радиатором и детектором. Для уменьшения потерь кванты весь путь от радиатора до детектора проходили в гелиевых мешках.

Детектором РПИ служил либо сцинтилляционный спектрометр на кристалле $NaJ(Tl)$, либо многосекционный пропорциональный счетчик [20], наполненный смесью 90% A + 10% CH_4 при атмосферном давлении. Пропорциональный счетчик использовался для исследования спектров РПИ в интервале энергий фотонов (5 + 25) кэв, а счетчик $NaJ(Tl)$ для энергий (15+130)кэв. Калибровка линейности измерительного тракта проводилась во всем интервале исследуемых частот с помощью набора стандартных гамма-источников.

Энергетическое разрешение (полная ширина на полувысоте) для сцинтилляционного счетчика составляла $\pm 16\%$ на линии 60 кэв, а для пропорционального счетчика $\pm 10\%$ на линии 13,8 кэв.

При работе с пропорциональным счетчиком наряду с измерением спектров имела также возможность вести контроль за числом фотонов, образованных одной и той же частицей и зарегистрированных в объеме счетчика, т.е. определять кратность фотонов.

Третья глава посвящена подробному описанию методики измерений спектров РПИ и обработке экспериментальных данных.

Проходя радиатор, заряженная частица наряду с переходным дает также и тормозное излучение. В спектральные распределения дают вклад и вторичные процессы — тормозное излучение δ^- -электронов, образованных в радиаторе, излучение $e^+ - e^-$

пар и т.п. Эти эффекты могут происходить также и по пути транспортировки электронного пучка вплоть до отклоняющего магнита (окна вакуумпровода, гелиевых мешков, воздушные промежутки).

Кроме того, электрон может образовать в окнах установки фоновое переходное излучение, которое может дать заметный вклад при исследовании радиаторов с малым числом переходов.

Поэтому каждый раз наряду с измерением спектра из радиатора РПИ снимался также и фоновый спектр из сплошного блока того же вещества эквивалентной толщины. Разность этих двух распределений отождествлялась с переходным излучением.

Большое внимание в этой главе обращено на обработку экспериментальных спектральных распределений. Дело в том, что при детектировании излучения из-за ряда причин происходит искажение формы реального спектра. Имея экспериментальное распределение, можно перейти к истинному спектру путем введения ряда поправок. Перечислим важнейшие из них.

Во-первых, это поправка на кратные фотоны. Очевидно, что в случае одновременной регистрации нескольких квантов амплитуда импульса в детекторе будет равна сумме амплитуд от каждого из них. Это приводит к "перекатке" мягких квантов в более жесткую часть спектра. Эта поправка растет с увеличением среднего числа квантов, зарегистрированных в каждом запуске, и наиболее существенна на концах спектра. В наших измерениях она достигала в отдельных случаях величины более 100%. Поэтому, при сравнении теории и эксперимента она должна быть обязательно учтена.

Во-вторых, это поправка на конечное разрешение детектора.

Для гладких спектров она сказывается только на концах исследуемых интервалов и составляет около 10%

И, наконец, это поправка на эффективность детектора и поглощение излучения по пути к детектору. Она сильно зависит от частоты регистрируемых квантов и наиболее существенна для мягкой части спектра.

Перейдем теперь к рассмотрению экспериментальных результатов, изложенных в четвертой главе.

Нами были исследованы спектральные характеристики РПИ в пенопластовых радиаторах различной толщины и плотности в широком диапазоне частот 5-125 кэв и при разных энергиях электронов [21-23, 28].

Поскольку теория РПИ для периодических сред хорошо разработана, были исследованы спектры из регулярных стопок, для того, чтобы проверить некоторые предсказания теории, а также чтобы иметь возможность сравнить характеристики излучения из слоистых и пористых радиаторов. В качестве регулярных сред были использованы стопки из органических пленок, алюминиевых и бериллиевых фольг [21,24].

Для исследования зависимости среднего числа фотонов РПИ от энергии излучающей частицы, а также характера изменения свойств РПИ при изменении числа пластин m в стопке были выполнены измерения с радиаторами, состоящими из органических пленок. Пленка имела плотность 1,18 г/см³ и следующий химический состав: углерод - 42,0%, сера - 6,5%, водород - 7,7%, хлор - 43,8% (по весу). Толщина пленок составляла 20 мк, расстояние между ними 500 мк.

Зависимость $\bar{n}(E_e)$ на выходе радиатора РПИ была исследо-

вана для стопки с $m = 64$ при энергиях электронов $E_e = 1,0; 2,0; 3,0$ и $3,75$ Гэв. Было обнаружено, что среднее число излученных квантов в интервале частот $\hbar\omega = (25 + 100)$ кэв сначала увеличивается с ростом E_e , а затем рост замедляется и при $E_e \approx 2,0$ Гэв имеется плато. Такое насыщение интенсивности хорошо объясняется интерференцией излучения от двух границ каждой пластины, т.к. при $E_e > 2,0$ Гэв зона формирования излучения в веществе пластин становится сравнимой с толщиной пластин в стопке практически для всех исследуемых частот. Такое же ограничение роста интенсивности было экспериментально получено в работе [25]. Таким образом для увеличения чувствительного диапазона детектора по энергии необходимо, чтобы толщина пластин была больше соответствующей зоны формирования для всего диапазона энергий детектируемых частиц.

Были также исследованы спектры РПИ, образованные электронами с $E_e = 3,0$ Гэв в стопках с различным числом пластин m , которое изменялось от 32 до 595. Для стопки с $m = 32$ измерения были выполнены в интервале частот 5 - 125 кэв, а для остальных стопок в интервале 25 - 125 кэв.

Было найдено, что спектры излучения имеют гладкий вид и быстро спадают с ростом частоты излученных квантов. При увеличении интенсивность излучения также растет, причем этот рост обусловлен в основном жесткими квантами, так как они проходят всю толщу радиатора без существенного поглощения. Оказывается, что излучение из стопки с любым числом m можно представить как сумму излучений из коротких стопок с числом пластин m , с учетом только поглощения излучения из каждой предыдущей во всех последующих. Пересчет спектра из стопки с

$m_0 = 32$ для стоек с $m = 64, 125, 288, 595$ дает очень хорошее согласие с экспериментом, т.е. увеличение числа пластин в стойке не влияет на процесс образования РПИ.

Для стоек с $m = 32$ и 125 был выполнен также теоретический расчет спектров излучения по формуле для РПИ с учетом поглощения излучения в веществе радиатора [26]. Экспериментальные и теоретические распределения находятся в хорошем количественном согласии.

Далее нами были исследованы спектры РПИ для электронов с энергией $E_e = 3,0$ Гэв, образованного в стойке из 230 алюминиевых фольг, толщиной 8 мк каждая, при изменении расстояния между ними b от 50 до 1000 мк.

Целью этих измерений было определение расстояния между фольгами, когда излучение достигает насыщения. Спектры излучения имеют быстро спадающий характер и с уменьшением b до 100 мк мягкая часть спектра подавляется сильнее, чем жесткая.

Зависимость среднего числа излученных квантов от расстояния между фольгами в двух частотных диапазонах (5 + 25) кэв и (25 + 100) кэв имеет насыщающийся вид. При этом выход на плато для жесткой части спектра происходит при меньших зазорах ($b \sim 200$ мк), чем для мягких квантов ($b \sim 700$ мк). Эти расстояния совпадают с расчетными значениями величины зон формирования излучения в вакууме $x_{\text{вак}} = \frac{c}{\omega} \left(\frac{E}{mc^2} \right)^2$ в указанных диапазонах частот фотонов. Таким образом максимальный выход фотонов образуется при расстояниях между пластинами

$b \geq x_{\text{вак}}$. Это также важный результат.

Сравнение с теорией РПИ [26] показывает, что для всех имеется хорошее согласие с экспериментом во всем исследуемом

диапазоне частот.

Представляет интерес радиатор из бериллия. Этот материал имеет малое Z и соответственно малый коэффициент поглощения фотонов в рентгеновском диапазоне частот. Был получен спектр излучения электронов с $E_e = 3,0$ Гэв в стойке, состоящей из 100 пластин бериллия толщиной 100 мк с расстоянием между ними 500 мк. Полное число квантов, приходящихся на один электрон, в интервале частот (25 + 100) кэв составляет $\bar{N} = 0,62$, т.е. в 1,34 раза больше, чем число квантов, образованное в стойке из 230 алюминиевых фольг. Увеличение числа квантов в бериллиевой стойке обусловлено в основном жесткой частью спектра.

Очевидно, что для создания детекторов РПИ с использованием в качестве радиаторов пористых сред необходимо иметь возможность теоретических расчетов параметров этих радиаторов, так как не всегда имеется возможность производить калибровку детекторов при известных энергиях. Поэтому детальное экспериментальное исследование характеристик излучения с целью их сравнения с теорией, разработанной для нерегулярных сред [19], имеет большое значение.

С этой целью были исследованы спектры РПИ в зависимости от толщины пенопластового радиатора l с плотностью $0,04$ г/см³, образованного электронами с $E_e = 3,0$ Гэв [21]. Измерения показали, что спектры излучения быстро спадают с ростом частоты фотонов, а интенсивность РПИ растет почти линейно с увеличением l до 10 см в интервале частот фотонов (5 + 25) кэв, а для более жесткой области (25 + 100) кэв вплоть до толщины 25 см. Такое поведение интенсивности хорошо согласуется с нашими данными, выполненными ранее на стримерной камере [27].

Ужестчение спектров с ростом ℓ объясняется поглощением излучения в самом радиаторе, в результате чего спектральные распределения на выходе радиатора обогащаются жесткими квантами, так как они обладают большей проникающей способностью.

Аналогичным образом, как это было сделано для стоек из оргпленки, были посчитаны спектральные распределения для толщин пенопластового радиатора 1,5, 10 и 25 см, используя в качестве начального спектра излучение из пенопласта толщиной 2 см. И в этом случае расчетные значения хорошо совпадают с экспериментальными точками.

Зависимость спектральных распределений РПИ от энергии электрона была исследована на пенопластовом радиаторе толщиной 2 см с плотностью 0,04 г/см³. Измерения показали, что интенсивность излучения растет с увеличением энергии электрона, выходя затем на плато.

Для более жестких квантов ограничение роста интенсивности наступает позже, чем для мягких. Это можно объяснить, привлекая к рассмотрению понятие зоны формирования излучения в вакууме. Очевидно, что с ростом энергии излучающей частицы E условие, когда средний размер пор в пенопласте \bar{b} становится $\sim \lambda_{\text{ак}}$, выполняется позднее для более высоких частот.

Далее нами было показано, что выход РПИ из пенопластового радиатора определенной толщины для электронов с $E_e = 3,0$ Гэв заметно растет с увеличением плотности пенопласта от 0,025 до 0,09 г/см³. Хотя при больших плотностях условие $\bar{b} > \lambda_{\text{ак}}$ заведомо не выполняется почти для всех исследуемых частот, ограничение роста интенсивности РПИ из-за наличия интерференции, вероятно частично компенсируется увеличением числа пере-

городок на единицу длины.

Была сделана попытка сравнения теории для неперiodических сред [19] с экспериментальными данными. При этом возникают определенные трудности, связанные с экспериментальным определением средней толщины перегородок между порами \bar{a} , а также с распределением этих толщин. Как показывают расчеты, эти параметры сильно влияют на форму теоретических спектральных распределений особенно в мягкой части. Учитывая сказанное, можно отметить, что проведенное сравнение теории и эксперимента показало в целом удовлетворительное согласие, хотя во всех случаях для мягкой области спектров имеется некоторое расхождение.

Полученные экспериментальные данные были рассмотрены с точки зрения детектирования частиц. Для сцинтилляционного счетчика, использованного в наших измерениях, с пенопластовым радиатором толщиной 25 см и плотностью 0,04 г/см³ была получена эффективность регистрации по переходному излучению электронов с $E_e = 3,0$ Гэв равная 47%. Пропорциональный счетчик с тем же радиатором при наполнении смесью 90% А + 10% СН₄ при атмосферном давлении дал величину эффективности равную 56%. Простой расчет показывает, что эффективность пропорционального счетчика можно поднять до 85%, если применить смесь 90% Хе + 10% СН₄ [28].

Проведенные исследования показывают, что РПИ является перспективным методом идентификации частиц в области сверхвысоких энергий. Экспериментальные распределения РПИ, полученные на периодических и нерегулярных радиаторах, находятся в согласии с теорией переходного излучения с учетом поглощения не-

посредственно в полях излучения. При этом основные выводы теории РПИ, экспериментально подтвержденные ранее для регулярных сред (влияние зон формирования излучения, характер зависимости интенсивности излучения от лоренц-фактора частицы и т.п.), справедливы и для пористых материалов.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах [20-24,28] .

ЛИТЕРАТУРА

1. В.Д.Гинзбург,И.М.Франк, ЖЭТФ, 16, 14 (1946)
2. Г.М.Гарибян, ЖЭТФ, 37, 527 (1959)
3. К.А.Барсуков, ЖЭТФ, 37, 1828 (1959)
4. Я.Б.Фейнберг,Н.А.Хижняк. ЖЭТФ, 32,883 (1957)
5. Г.М.Гарибян. ЖЭТФ, 35, 1435 (1958)
6. М.Л.Тер-Микаелян,А.Д.Газаян. ЖЭТФ, 39,1693 (1960)
7. М.Л.Тер-Микаелян. Изв. АН Арм.ССР,серия физ-мат.наук ,
14, 103 (1961)
8. А.Ц.Аматуни,Н.А.Корхмазян. Изв.АН Арм.ССР,серия физ-мат.
наук, 13,55 (1960)
9. Г.М.Гарибян,И.И.Гольдман. ДАН Арм.ССР,31,219(1960)
10. А.И.Алиханян,Ф.Р.Арутюнян,К.А.Испирян,М.Л.Тер-Микаелян,
ЖЭТФ,41,2002 (1961)
11. Ф.Р.Арутюнян,К.А.Испирян,А.Г.Оганесян,ЯФ, 1,842 (1965)
12. Ф.Р.Арутюнян,К.А.Испирян,А.Г.Оганесян,А.А.Франгян,ЖЭТФ,
52,1121 (1967)
13. К.А.Авакян,А.И.Алиханян,Г.М.Гарибян,М.П.Лорикян,К.А.Ших-
ляров, Изв.АН Арм.ССР,Физика, 5,267 (1970)
14. А.И.Алиханян,Г.М.Гарибян,М.П.Лорикян,К.К.Шихляров.
Труды Международной конференции по аппаратуре в физике
высоких энергий, 2, 542, Дубна,1970.
15. L.C.L.Yuan, C.L.Wang and S.Prunster,
Phys. Rev. Lett. 23, 496 (1970)
16. L.C.L.Yuan, C.L.Wang, H.Uto and S.Prunster,
Phys. Lett. 31B, 603 (1970)

17. Ф.Р.Арутюнян, А.А.Назарян, А.А.Франгян, ЖЭФ, 62, 2044 (1972).
18. Г.М.Гарибян, М.А.Геворгян, Ян Ши. Изв.АН Арм.ССР, Физика, 8, № 4 (1973)
19. Г.М.Гарибян, Л.А.Геворгян, Ян Ши, ЖЭФ, 66, 552 (1974)
20. Э.С.Беляков, М.П.Лорикян, К.Ж.Маркарян, Л.К.Парлакян, Р.В.Петросян. Научное сообщение ЕФИ-57(74)
21. Э.С.Беляков, М.П.Лорикян, К.Ж.Маркарян, М.М.Мурадян, К.К.Шихляров. Научное сообщение ЕФИ-44(73)
22. А.И.Алиханян, Э.С.Беляков, М.П.Лорикян, К.Ж.Маркарян, К.К.Шихляров. Письма в ЖЭФ, 17, 453 (1973), 18, 698 (1973)
23. А.И.Алиханян, Э.С.Беляков, М.П.Лорикян, К.Ж.Маркарян, К.К.Шихляров, ЖЭФ, 65, 1330 (1973)
24. Э.С.Беляков, М.П.Лорикян, К.Ж.Маркарян, М.М.Мурадян, К.К.Шихляров, Письма в ЖЭФ, 18, 356 (1973)
25. В.И.Николаенко, С.А.Славатинский, В.С.Чирочкин, С.Б.Шаулов, Письма в ЖЭФ, 16, 610 (1972)
26. М.М.Мурадян. Научное сообщение ЕФИ-30(73)
27. А.И.Алиханян, Э.С.Беляков, Г.М.Гарибян, М.П.Лорикян, К.Ж.Маркарян, К.К.Шихляров. Письма в ЖЭФ, 16, 315 (1972)
28. Э.С.Беляков, М.П.Лорикян, К.Ж.Маркарян, Л.А.Геворгян, Научное сообщение ЕФИ-140(75).

Тех.редактор А.С.Абрамян

Заказ 347

ВФ- 03395

Тираж 200

Отпечатано на ротапринте
Ереванского физического института, Ереван 36, пер.Маркаряна 2