# INTERFEROMETRY OF SQUEEZED LIGHT INTENSITY

## G. Yu. KRYUCHKYAN

The quantum effects of the correlation of squeezed light intensity were studied, as a result of which the method of its identification was specified. The correlation function of the intensity of light at the resonator output and the spectrum of intensity fluctuations below the vacuum level during the non-degenerate four-wave mixing in a resonance medium are calculated.

ОБЗОРЫ

Изв. АН Армянской ССР, Физика, т. 24, вып. 6, 300-310 (1989)

УДК 538.66;539.12

## АНАЛИЗ ПЕРВЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РАБОТ ПО РЕНТГЕНОВСКОМУ ПЕРЕХОДНОМУ ИЗЛУЧЕНИЮ

#### III часть

#### М. П. ЛОРИКЯН

#### Кафедра физики Ереванского зооветеринарного института

# Р. А. САРДАРЯН; К. К. ШИХЛЯРОВ

#### Ереванский физический институт

Представлено продолжение обзора экспериментальных работ по РПИ, опубликованного в предыдущих номерах журнала «Изв. АН АрмССР, Физика».

Испирян, Канканян, Оганесян и Таманян [67]\* в качестве пористой среды использовали порошок из LiH с плотностью  $\rho = 0.25$  г/см<sup>3</sup>, пенопласт с плотностью 0.04 г/см<sup>3</sup> и слоистую среду из майлара ( $a=10^{-3}$  см, b=0.28 мм, m=1350). Все радиаторы имели одинаковую длину l=38 см. Спектральные распределения приведены только для LiH. Для всех трех радиаторов наблюдалась чрезвычайно сильная зависимость (от  $E^2$  до  $E^4$ ) полного числа фотонов от энергии электронов. Рассчитанные нами теоретические спектры при значениях энергии  $E_e = 2.4$ ; 2.9; 3.5 ГэВ практически совпадают, а средние числа фотонов n равны 4,64; 4,74; 4,81 соответственно, т. е. n почти не растет, следовательно экспериментальные результаты не согласуются с теорией.

Вопросу оптимизации радиатора из пенопласта была посвящена работа Алиханяна, Белякова,Гарибяна, Лорикяна, Маркаряна и Шихлярова [68], в которой методом стримерной камеры была измерена зависимость

\* Нумерация литературы и рисунков является продолжением нумерации в предыдущих частях обзора. среднего числа фотонов РПИ n от энергии электронов  $E_e$  в области 1,3— 4,6 ГъВ для пенопласта длиной l = 160 см ( $\rho = 0.04$  г/см<sup>3</sup>), а также от длины пенопласта при  $E_e = 3.0$  ГъВ. Стримерная камера имела длину 80 см ч содержала 13% ксенона. Электроны после прохождения радиатора отклонялись магнитом и в той же камере регистрировались отдельно (см. рис. 4).

Экспериментальные зависимости n ( $E_e$ ) и  $\overline{n}$  (l) для пенопласта приведены на рис. 18 и 19.



Рис. 18. Зависимость числа фотонов РПИ от у для радиатора из пенопласта [68]. Сплошная кривая — теория РПИ для нерегулярных оред [70]. Рис. 19. Зависимость числа фотонов РПИ от длины радиатора из пенопласта (точки) и поролона (крестики) при  $E_g = 3$  ГоВ [68]. Сплошные кривые — теория РПИ для верегулярных сред [70].

Позже Шихляров [69] вычислил теоретические зависимости  $\overline{n}$  ( $E_e$ ) и  $\overline{n}$  (l) для данного пенепласта. При этом параметры нерегулярности  $\xi_a$  и  $\xi_b$  были специально измерены и получены значения  $\xi_a \simeq 220 \%$  и  $\xi_b \simeq 50 \%$ .

Теоретические зависимости приведены на тех же рисунках сплошными линиями. Порог регистрации квантов РПИ в этих расчетах принимался равным 1 КъВ согласно работе [40]. Кроме того, учитывалось поглощение квантов на пути к камере. Как видно, имеется достаточно хорошее согласие эксперимента с теорией. Таким образом, впервые была показана правильность теории РПИ для нерегулярных сред [70].

Обратим внимание на поведение зависимости  $\overline{n}(l)$ , имеющей тенденцию выхода на плато. Это связано с тем, что өффективная длина радиатора растет все медленнее его геометрической длины вследствие поглощения квантов в самом радиаторе.

В этой же работе, основываясь на экспериментальных данных, приводится также оценка фактора режекции пионов и протонов в области  $E > 10^3 \ \Gamma_{\Theta}B$ , при этом составив некорректное ожидаемое распределение для пионов с  $E_{\pi} = 2,4 \cdot 10^3 \ \Gamma_{\Theta}B$ . Авторы дают завышенное значение фактора режекции. Эта неточность позже была исправлена в работе [55].

Лорикян в 1973 г. [71] измерил угловое распределение РПИ в пенопласте, точнее его проекцию на вертикальную плоскость, использовав для этого стримерную камеру. Эти результаты согласуются с результатами, полученными поэже [72] тем же методом, которые в свою очередь согласуются с теорией. В работе [71], в частности, также показано, что при помещении стримерной камеры в магнитное поле, пользуясь узким угловым распределением РПИ, можно производить идентификацию частиц, даже если в камере одновременно зарегистрировано несколько треков.

Метод стримерной камеры был использован Николаенко, Славатским, Чирочкиным и Шауловым [39] для исследования РПИ при энергии электронов 0,5 ГэВ и 32 ГэВ на выходе радиатора из майлара (a = 20 мкм, b = 0.8 мм, m = 1100) и пенопласта с плотностью  $\rho = 0.06$  г/см<sup>3</sup> и длиной 150 см. Стримерная камера имела длину 120 см и была наполнена смесью He 75% и Xe 25%. Результаты этой работы приведены на рис. 20 кружоч-



Рис. 20. Зависимость полного числа фотонов РПИ от γ-фактора частицы, рассчитанные как независимая сумма РПИ от всех праниц радиатора — сплошные кривые, и с учетом интерференции излучений от различных границ. 1 и 1'— соответствуют условиям работы [39], 2 и 2'— условиям работы [37]; ○ — экспериментальные точки работы [34], ♥ работы [37].

ками. Сплошная кривая 1 соответствует независимой сумме РПИ от всех границ радиатора, пунктирная кривая 1' рассчитана по формуле РПИ для стопки с учетом интерференции излучений от разных границ. Эти авторы также уточнили порог регистрации РПИ в условиях [37, 38] и вычислили соответствующие теоретические зависимости. Эти зависимости представлены кривыми 2 и 2', полученными в тех же приближениях, что и 1 и 1'.

Рассмотренные до сих пор РПИ-детекторы либо имели малую эффективность регистрации, либо при высокой эффективности (метод стримерной камеры) были достаточно медленными.

В работах [73, 74] Алиханян, Канканян, Оганесян и Таманян предприняли попытку создать РПИ-детектор, который мог бы быть достаточно быстрым и в то же время иметь высокую эффективность регистрации частиц. Ими был использован в качестве детектора газовый сцинтилляционный счетчик, в котором регистрировались РПИ и потери энергии заряженной частицы на ионизацию. Контейнер счетчика был наполнен ксеноном при давлении 1,6 атм и имел длину 4 см. Измерения проводились на пучке электронов с энергией 31 ГэВ и показали, что такой счетчик имеет эффективность, равную 0,865±0,095, тогда как в отсутствие радиатора РПИ она равна 0,110±0,013. В работе приведено распределение суммарных энергетических потерь электронов за счет ионизации и РПИ (см. рис. 21). Распределение же ионизационных потерь не приводится (кроме небольшого «хвоста»). Однако приводится расчет методом Монте-Карло распреде-

THE ARE DAY & FITTLE HERE IS SHOTLE IS SHOT

ления как ионизационных, так и полных потерь. Согласно расчету ширина кривой распределения только ионизационных потерь на полувысоте равна ~ 45%, а полных потерь — ~ 65%, тогда как ширина на полувысоте экспериментального распределения полных потерь ( $dE/dx + P\Pi H$ ) не превышает ~ 35%. Исследования, проведенные впоследствии [75], показали, что ширина на полувысоте распределения только ионизационных потерь



Рис. 21. Энергетический спектр выделенной энергии в слоистой среде (черные кружки) и без нес-(открытые кружки) [73].

с условиях, близких к [73, 74], составляет  $\approx 60\%$ . К сожалению, изрис. 21 невозможно судить об ионизационных потерях, однако очевидно, что ширина полных потерь должна быть не меньше ширины кривой ионизационных потерь.

В работе [76] та же группа авторов проанализировала использованный в [73, 74] газовый сцинтилляционный счетчик, предназначенный для



Рис. 22. Кривая разрешения газового сцинтилляционного счетчика, полученная в [76] при помощи изотопа Со<sup>57</sup> (линия 14 КэВ): Рис. 23. Спектральное распределение РПИ электронов с энергией 3,6 ГэВ полученное в работе [76].

регистрации мягкого рентгеновского излучения. Рабочее давление Xe по сравнению с [73] было повышено до 3,5 атм. Однако энергетическое разрешение сцинтиллятора оказалось плохим (FwHM  $\approx$  160% при  $\hbar\omega$ =14 КэВ). На рис. 22 приведена кривая разрешения счетчика, полученная при помощи изотопа  $Co^{57}$  (линия 14 КэВ), имеющая не совсем обычный вид для такого типа кривых, а на рис. 23 — спектральное распределение РПИ электронов с  $E_e = 3,6$  ГэВ в интервале энергий квантов ~((5-50) КъВ. Обращает на себя внимание тот факт, что ширина измеренного спектра РПИ примерно в 2,3 раза уже, чем энергетическое разрешение спектрометра в том же интервале энергий фотонов. Хотя природа такого эффекта не понятна, тем не менее авторы считают себя вправе приводить эффективность регистрации электронов (~ 43%).

Та же самая методика, что и в [73], была использована Канканяном, Кочаряном, Оганесяном и Таманяном в [77] для исследования РПИ-детектора при энертиях 2,5 и 3,6 ГэВ, т.е. при энертиях примерно на порядок меньших по сравнению с [73]. Кроме того, значение b = 0,27 мм в отличие от b = 0,7 мм в [73]. В этой работе приводятся распределения ионизационных потерь dE/dx и полных потерь при указанных энергиях электронов (см. рис. 24а и b). Заметим, что результаты для dE/dx не сотласуются с



Рис. 24. Распределение энерговыделений со слоистой средой (●) и без нее (○) при энергии электронов а) 2,5 ГэВ, b) 3,6 ГэВ [77].

расчетами [73, 74], из которых следует, что среднее значение ионизационных потерь ~ 55 КэВ. Согласно же [77] среднее значение полных потерь  $(dE/dx + P\Pi M) \sim 50$  КэВ, т. е. как бы отсутствует вклад РПИ. С другой стороны, сопоставление экопериментальных результатов [73, 74] и [77] показывает, что интенсивности РПИ сильно отличаются, что в условиях этих экспериментов противоречит теории.

Таким образом, экспериментальные результаты [73, 74, 76, 77] противоречат физике РПИ и ионизационных потерь энергии частиц, а также расчетам [73, 74], которые в свою очередь противоречат друг другу для случаев е<sup>-</sup> и п.

С развитием работ в области экспериментального изучения РПИ все более ощущалась необходимость более полного знания физических особенностей возникновения РПИ в пористых средах и других радиаторах. Впервые систематические и многосторонние спектрометрические исследования РПИ в пористых средах были начаты в 1973 г. Алиханяном, Беляковым, Лорикяном, Маркаряном и Шихляровым [78—80]. В установке электроны после прохождения радиатора отклонялись магнитным полем и регистрировались сцинтилляционным счетчиком. Фотоны с энергией 5—25 КъВ регистрировались многосекционным пропорциональным счетчиком, а с энергией 25—125 КъВ— с помощью сцинтилляционного спектрометра полного поглощения на основе кристалла NaJ(Tl) толщиной 2 см, диаметром 7 см и бериллиевым окном толщиной 100 мкм. Энергетическое разрешение этого счетчика при энергии 60 КъВ составляло 32%, а пропорционального счетчика ~ 16% при энергии 14 КъВ [81].

В первой публикации [78] ошибочно вместо спектров РПИ в области  $\hbar \omega = (20-100)$  КэВ были представлены спектры в области  $\hbar \omega = (5-25)$ КэВ. Соответствующие данной работе спектры были опубликованы в виде поправки [79]. Полные и обработанные результаты с учетом эффективности поглощения в счетчике, потери квантов по пути, разрешение спектрометра и наложение квантов представлены в [80, 14].

В 1975 г. в [82] Беляков, Лорикян, Маркарян и Геворкян провели сравнение экспериментальных данных с теорией [70] (пунктирные линии на рис. 25 и 26). Сопоставление показало удовлетворительное согласие теории с опытом.



Рис. 25. Спектры РПИ, образованные в пенопласте толщиной 2 см и  $\rho = 0.04$  при различных энергиях электронов [80]; штриховые кривые—теоретический расчет [82, 70].

Рис. 26. Спектры РПИ, образованные электронами с энергией 3 ГэВ в пенопласте различной плотности [80]; штриховые кривые теоретический расчет [70]; 1 — а = 14 мкм, b = 600 мкм; 2 — а = 14 мкм, b = 180 мкм.

Возможности поролона как радиатора РПИ изучались в работе Лорикяна и Шихлярова [83] с помощью стримерной камеры. Было показано, что поролон также является эффективным радиатором РПИ. Экспериментальные результаты и теоретический расчет приведены на рис. 19.

Беляков, Лорикян, Маркарян, Мурадян и Шихляров в [84, 85] исследовали РПИ в слоистых радиаторах. Теоретический и эксперимен-

тальный спектры РПИ для радиатора из Al [85], (m = 230, a = 8 мкм, b = 1 мм) при  $E_e = 3,0$  ГэВ показаны на рис. 27. Авторы этих работ завал в спектре интерпретируют как результат интерференции, опираясь еще и на то, что в теоретическом спектре при той же энергии также имеется некоторый завал. Однако из рисунка следует, что полуширина экспериментальното завала составляет ~ 1,6 КэВ, а разрешение счетчика в этой области энергий ~ 2,8 КэВ. Поэтому экспериментальные точки в области завала авторы при обработке результатов должны были объединить, т.е. завал в экспериментальном спектре вызван некорректной обработкой ре-



Рис. 27. Дифференциальный слектр РПИ на выходе стопки из 230 пластин [85] с a = 8 мкм, b = 1 мм,  $E_a = 3$  ГэВ.

зультатов. Для выяснения этой ситуации мы заново вычислили теоретический спектр, который показан сплошной линией. Как видно, завал не ожидается, и экспериментальные данные в целом лучше согласуются с нашими расчетами. На рис. 28 приведены экспериментальные и рассчитанные авторами спектры РПИ для радиатора из Al при  $\alpha = 8$  мкм и разных значениях b [84]. На рис. 29 приведены спектры РПИ, измеренные для радиаторов из органических пленок при  $\alpha = 20$  мкм, b = 0,5 мм и разных mи теоретические спектры для m = 32, 65 и 125 (см. также [14]).

В работе [86] Бамбергер, Делл, Уто и др. исследовали возможности режекции пионов и электронов с помощью десятимодульного детектора РПИ, состоящего из МПК и радиаторов из слоистой среды (майлар, a = 12,5 мкм, b = 1,5 мм, m = 100) или пенопласта (l = 10 см,  $\rho = 0,025$  г/см<sup>3</sup>). В табл. 2 приведены результаты этих исследований при двух способах усреднения амплитуд сигналов.

Таблица 2

Радиатор	Тип усреднения	Доля пионов	
		При регистрации 50% электронов	При регистрации 90% электронов
Пенопласт, 10см	геометрический	1.6%	13%
	арифметический	5,1%	19%
Майларовая стопка	арифметический	3.4%	14%

Из таблицы видно, что геометрическое среднее обеспечивает лучшую режекцию пионов, а из рис. 30, на котором приведены зависимости энерговыделения, обусловленного РПИ, для тех же радиаторов от энергии элек-



ћω, кэВ

Рис. 28. Спектры РПИ в области энергии фотонов 20—100 КэВ для радиаторов из алюминиевых фольг с a = 8 мкм, m = 230, a) b = 0.05 мм; b) b = 0.1 мм; c) b = 0.25 мм; b = 0.5 мм; e) b = 1 мм [84].

Рис. 29. Теоретические и экспериментальные спектры для радиатора из стопки органических пленок с  $\rho = 1,17$  г/см<sup>3</sup> (Cl - 43,8%, C - 42%, H - 7,7%, S - 6,5%, a = 20 мкм, b = 0,5 мм) с разным числом пластин (m = 32; 63; 125; 285; 595 [84], сплошные кривые — теория. пунктирные — полученные в результате пересчета из экспериментальных данных при m = 32.

тронов, видно, что предпочтение следует отдать майларовому периодическому радиатору, сигнал от которого превышает сигнал от пенопласта на 30%.

Аналогичные исследования, основанные на многомодульных детекторах, были проведены Харрисом, Катсурой, Паркером и др. [87]. В экспе-

· 307

рименте было использовано 11 МПК с радиаторами из 100 майларовых пленок (a = 4 мкм, b = 1,5 мм и a = 12,5 мкм, b = 0,75 мм). В качестве радиаторов использовался также пенопласт длиной 5 см. МПК имели размеры  $20 \times 20 \times 1,5$  см<sup>3</sup> с рабочими газами  $Ar 93\% + CH_4 7\%$  и Kr 93% + $+ CH_4 7\%$ . Окно камеры представляло собой алюминизированную майларовую пленку толщиной 6,25 мкм. Измерения проводились при импульсах частиц 1,3 ГъВ/с и 3 ГъВ/с. Для определения фона измерения проводились также и при замене радиаторов на эквивалентные слои ве—ества. На рис. 31



Рис. 30. Распределение полной энергин, выделенной в 11 камерах, пионами и электронами [86].

приведены распределения ионизационных потерь плюс РПИ для пионов и электронов. Легко видеть, что добавление радиаторов РПИ оказывается существенным для разделения распределений пионов и электронов. Отметим также, что применение более тяжелого газа криптона (с К-краем поглощения 14,3 КъВ) по сравнению с аргоном улучшает эффективность поглощения у-квантов.



Рис. 31. Зависимость выделенной энергии, обусловленной РПИ, в 10 камерах от энергии электронов [87].

Эллсворс, Мак-Фолл, Иодх и др. [88] наряду с многомодульной системой, детектирующей полное энерговыделение, использовали магнитное отделение заряженных частиц от РПИ и измеряли отдельно как РПИ, так и ионизационные потери в области импульсов 3—15 ГэВ/с.

В работе Петерсона [89] приводятся также и результаты в области 1,3—3 ГъВ/с. В качестве радиаторов использовались майларовые и полиэтиленовые стопки с различными эначениями физических параметров. Экспериментальные результаты анализировались с точки эрения теории РПИ с учетом интерференционных явлений и был сделан важный вывод о том, что поведение различных РПИ-детекторов в разных экспериментальных ситуациях может быть с достоверностью предсказано.

Таким образом, к концу 1973 г. экспериментально были изучены и поняты основные свойства РПИ, доказано, что нерегулярные среды являются хорошими радиаторами РПИ, установлена справедливость теории как для периодических слоистых, так и нерегулярных сред. Окончательно была доказана возможность применения РПИ для идентификации частиц и разработаны основы будущих детекторов для физических экспериментов. Было опробовано множество возможностей регистрации РПИ, которое получило всеобщее признание. Можно сказать, что завершился первый и важный этап экопериментальных исследований.

В заключение авторы выражают благодарность Г. М. Гарибяну, благодаря настояниям которого появилась данная работа, а также Ян Ши и А. Л. Авакяну за любезно предоставленные результаты своих расчетов.

## ЛИТЕРАТУРА

- 67. Испирян К. А., Канканян С. А., Оганесян А. Г., Таманян А. Г. Изв. АН АрмССР, Физика, 7, 377 (1972).
- 68. Алиханян А. И., Беляков Э. С., Гарибян Г. М., Лорикян М. П., Маркарян К. Ж., Шихляров К. К. Письма в ЖЭТФ, 16, 315 (1972).
- 69. Шихляров К. К. Автореферат кандидатской диссертации. ЕрФИ, Ереван, 1980.
- 70. Гарибян Г. М., Геворіян Л. А., Ян Ши, ЖЭТФ, 66, 552 (1974).
- 71. Лорикян М. П. ЖЭТФ, 65, 1327 (1973).
- 72. Геворіян Л. А., Лорикян М. П., Шихляров К. К. ЖЭТФ, 68, 400 (1975).
- Alikhanian A. I., Kankanian S. A., Oganessian A. G., Tamanian A. G. Phys. Rev. Lett., 30, N. 3, 109 (1973).
- 74. Alikhanian A. I., Kankanian S. A., Oganessian A. G., Tamanian A. G. Preprint EPI-ME-18 (72), Yerevan 1972.
- 75. Ермилова В. К., Котенко Л. П., Мерзон Г. И. Труды Международного симпознума по переходному излучению. Ереван, 1977, с. 489.
- 76. Алиханян А. И., Канканян С. А., Оганесян А. Г., Таманян А. Г. Изв. АН АрмССР, Физика, 8, 228 (1973).
- 77. Канканян С. А., Кочир чи М. С., Оганесян А. Г., Таманян А. Г. Изв. АН АрмССР, Физика, 8, 305 (1973).
- 78. Алиханян А. И., Беляков Э. С., Лорикян М. П., Маркарян К. Ж., Шихляров К.К. Письма в ЖЭТФ, 17, 453 (1973).
- 79. Поправки к статье А. И. Алиханяна и др. Письма в ЖЭТФ, 18, 698 (1973).
- 80. Алиханян А. И., Беляков Э. С., Лорикян М. П., Маркарян К. Ж., Шихляров К. К. ЖЭТФ, 65, 1330 (1973).
- Веляков Э. С., Лорикян М. П., Парлакян Л. К., Петросян Р. В., Маркарян К. Ж. Научное сообщение ЕФИ—57 (74), Ереван, 1974.
- 82. Беляков Э. С., Лорикян М. П., Маркарян К. Ж. Геворкян Л. А. Научное ссобщение ЕФИ-140 (75), Ереван, 1975.
- 83. Лорикян М. П., Шихляров К. К. Научное сообщение ЕФИ-37 (73), Ереван, 1973.
- 84. Беляков Э. С., Лорикян М. П., Маркарян К. Ж., Мурадян М. М., Шихляров К.К. Научное сообщение ЕФИ—44 (73), Ереван, 1973.
- 85. Беляков Э. С., Лорикян М. П., Маркарян К. Ж., Мурадян М. М., Шихляров К. К. Письма в ЖЭТФ, 18, 356 (1973).
- 86. Bamberger A., Dell G. F., Jr., Uto H. et al. Physics Letters, 43B, 153 (1973).
- 87. Harris F., Katsura T., Parker S. et al. Nucl. Instr. and Meth., 107, 413 (1973).
- Ellsworth R., MacFall J., Yodh G. et al. Proceed. 13th Int. Conf. on Casm. Ray, Denver, 230 (1973).

.89. Peterson V. Z. Proceed. Int Conf. Instr. on High Energy Phys. Frascati, 1973, p. 442.

## ՌԵՆՏԳԵՆՅԱՆ ՏԻՐՈՒՅԹՈՒՄ ԱՆՑՈՒՄԱՑԻՆ ՃԱՌԱԳԱՑԹՄԱՆ ԱՌԱՋԻՆ ՓՈՐՁԱՐԱՐԱԿԱՆ ԱՇԽԱՏԱՆՔՆԵՐԻ ՎԵՐԼՈՒԾՈՒՄԸ

#### Մ. Պ. ԼՈՐԻԿՅԱՆ, Ռ. Ա. ՍԱՐԴԱՐՑԱՆ, Կ. Կ. ՇԻԽԼՑԱՐՈՎ

Ներկայացվում է ռենտղենյան տիրույթում անցումային ճառադայթման տեսության ղարդացման առաջին տարիներին կատարված փորձարարական աշխատանջների մեկնարանումը։ Աշխատանջը կաղմված է երեջ մասից, առաջին և երկրորդ մասերը հրատարակված են նույն պարբերականի նախորդ համարներում։

## AN ANALYSIS OF PIONEERING EXPERIMENAL WORKS ON X-RAY TRANSITION RADIATION

### Part III

## M. P. LORIKYAN, R. A. SARUAKYAN, K. K. SHIKHLYAROV

A review of pioneering experimental works on XTR, published in the previous ssu, , this journal, is continued.