

ЕРЕВАНСКИЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи

МАРГАРЯН КАРАПЕТ ЖОРАЕВИЧ

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕНТГЕНОВСКОГО ПЕРЕХОДНОГО
ИЗЛУЧЕНИЯ В РАДИАТОРАХ ИЗ ТЯЖЕЛЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

(01.04.16 - физика атомного ядра и элементарных частиц)

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

ЕРЕВАН - 1981

Работа выполнена в Ереванском физическом институте

Научный руководитель — доктор физ.-мат.наук, ст.науч.сотр.
М.П.Лорикян

Официальные оппоненты: доктор физ.-мат.наук, профессор
Э.А.Мамджанян (ЕрФИ);
кандидат физ.-мат.наук, ст.науч.сотр.
С.Б.Шаулов (ФИАН СССР)

Ведущая организация — Объединенный институт ядерных исследований. Лаборатория ядерных проблем

Защита состоится " _____ " _____ 1981г. в

14-00 час. на заседании специализированного совета Д 034.03.01
по присуждению ученой степени доктора физико-математических
наук при Ереванском физическом институте (375036, г.Ереван,
ул. Маркяна, 2).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЕрФИ.

Автореферат разослан " _____ " _____ 1981г.

Ученый секретарь специализированного совета ЕрФИ,
кандидат физ.-мат.наук

В.А.Шахбазян

І. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Одной из актуальных проблем современной физики являются вопросы идентификации элементарных частиц высоких энергий. Это обстоятельство стимулировало развитие работ по поиску новых методов детектирования и идентификации заряженных частиц высоких энергий.

Теоретически В.Л.Гинзбургом и И.М.Франком было показано, что равномерно движущаяся заряженная частица при пролете через границу раздела двух сред с различными диэлектрическими проницаемостями испускает электромагнитное излучение (переходное излучение) в оптическом диапазоне частот.

Наиболее привлекательные, с точки зрения регистрации, свойства переходного излучения были обнаружены в 1959г. Г.М.Гарибяном и К.А.Барсуковым. Ими было показано, что основная доля переходного излучения испускается вперед в рентгеновском диапазоне частот. В это же время Г.М.Гарибяном было показано, что полная интенсивность рентгеновского переходного излучения (РПИ) линейно растет с энергией частицы.

Образование РПИ в стопках пластин было рассмотрено М.Л.Тер-Микаеляном и А.Д.Газазяном, А.Ц.Аматуни и Н.А.Коркмазяном, Г.М.Гарибяном и И.И.Гольдманом. Позже эта задача в общем случае была исследована также А.Л.Авакяном, Л.А.Геворгяном, Г.М.Гарибяном и Ян Ши.

Влияние многократного рассеяния заряда на образование РПИ изучалось в работах Г.М.Гарибяна и И.Я.Померанчука, М.Л.Тер-Микаеляна, Ф.Ф.Терновского, В.Е.Пафомова, Г.М.Гарибяна и Ян Ши.

За последние десятилетия исследованиям в области РПИ было посвящено несколько сот теоретических и экспериментальных работ, что, несомненно, свидетельствует о том большом интересе, который проявляется к этому явлению.

В настоящее время детекторы РПИ успешно применяются в экспериментальной физике для разделения частиц высоких энергий как на ускорителях, так и в космических исследованиях.

В связи со все возрастающим интересом к РПИ новые требования предъявляются не только к радиаторам РПИ, но и к методам его регистрации, и возникает необходимость более детальных экспериментальных и теоретических исследований в большом диапазоне энергий проходящих частиц, образованного излучения и атомного номера вещества радиатора излучения.

Цель работы заключалась в следующем: 1. Провести систематические исследования рентгеновского переходного излучения в различных радиаторах в диапазоне атомных номеров $Z - 6 + 50$.

2. Проверить правильность теоретических подходов в случае, когда эффект поглощения фотонов и многократное рассеяние излучающей частицы в самом радиаторе могут сильно влиять на процесс излучения.

3. Исследовать дифференциальный 4π -детектор переходного излучения.

Научная новизна работы. 1. Впервые проведены систематические экспериментальные исследования РПИ в широком диапазоне атомных номеров вещества радиатора $Z - 6 + 50$.

2. Впервые показано, что влияние многократного рассеяния электронов с энергиями $E_e - (1,0 + 4,0)$ ГэВ на образование РПИ в интервале атомных номеров $Z - 6 + 50$ практически не проявляется.

3. Впервые показано, что во всем исследуемом диапазоне энергий электронов $E_e - (1,0 + 4,0)$ ГэВ, частот фотонов $\hbar\omega - (20 + 250)$ кэВ и атомных номеров вещества $Z - 6 + 50$ теория РПИ удовлетворительно описывает экспериментальные спектры.

4. Впервые измерена зависимость среднего энерговыделения W и среднего числа фотонов n РПИ от энергии электрона E_e для радиаторов из меди ($Z = 29$) и олова ($Z = 50$) и обнаружено, что W и n растут с ростом E_e так же, как и для легких элементов.

5. Разработан метод Монте-Карло расчета, моделирующий физические процессы в детекторе, в котором не требуется пространственного разделения частиц и излучения, позволяющий определить характеристики 4π -детектора РПИ.

6. Впервые показано, что использование "сложного" радиатора, составленного из чередующихся медных фольг и брусков пенопласта, в детекторе, в котором регистрация фотонов происходит после удаления их от трека частицы посредством рассеяния или же фотоэффекта (выход флуоресценции) в самом веществе радиатора увеличивает крутизну зависимости числа квантов от энергии электронов.

Практическая ценность полученных результатов заключается в следующем: 1. Теоретические формулы РПИ можно использовать для расчета детекторов РПИ и в случае радиаторов с большими атомными номерами $Z \leq 50$.

2. Радиаторы РПИ из тяжелых элементов могут быть применены в детекторах при регистрации РПИ методом энерговыделения.

3. 4π -детектор РПИ может служить для идентификации частиц больших энергий с высокой степенью режекции и эффективности регистрации в узких пучках частиц.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы докла-

дывались на Международном симпозиуме по переходному излучению частиц высоких энергий (Ереван, 1977г.), на IV конференции молодых ученых Ереванского физического института (Нор-Амберд, 1979г.) и на научных семинарах Ереванского физического института.

Публикации. По теме диссертации опубликовано шесть работ. Список работ приведен в конце автореферата.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения. Она изложена на 122 стр. машинописного текста и содержит 4 таблицы и 45 рисунков. Список цитируемой литературы включает 105 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обсуждается актуальность вопросов, затронутых в диссертационной работе, формулируется цель исследования и вкратце приводится основное содержание диссертации.

В первой главе даны аннотации основных экспериментальных работ по исследованию РПИ, а также сделан обзор работ, в которых использовались детекторы РПИ и вопросы теории РПИ. В результате показано, что эта область экспериментальной физики в настоящее время бурно развивается. Теоретические подходы правильно описывают процессы образования РПИ для радиаторов с малыми атомными номерами. Детекторы РПИ успешно применяются для изучения физики частиц высоких энергий на встречных пучках и в космических исследованиях.

В этой главе обсуждаются вопросы теории, связанные с образованием РПИ от одной пластины, а также от стопки пластин. Обсуждаются также и вопросы теории РПИ с учетом многократного рассеяния частиц и поглощения излучения в радиаторе.

Во второй главе описана экспериментальная установка, при-

менявшаяся для исследования РПИ.

РПИ, образованное электронами, регистрировалось детектором (спинтиляционный спектрометр на основе кристалла $\text{NaJ}(\text{Te})$), расположенным за радиатором. Чтобы избежать прямого попадания электронов в детектор электроны отклонялись магнитом, установленным между радиатором и детектором. Энергетическая калибровка и проверка линейности спектрометра производилась во всем интервале исследуемых частот (20-250) кэВ с помощью источников моноэнергетического γ -излучения.

В этой главе описана также методика измерений и обработки экспериментальных данных.

Большое внимание обращено на процессы, которые могут дать вклад в спектральное распределение, как например, тормозное излучение, образованное в радиаторе при прохождении через него электронов, тормозное излучение δ -электронов, испущенное в радиаторе, фоновое переходное излучение, возникающее при прохождении электронов через окна вакуумпровода, гелиевого мешка, воздушные промежутки и т.д.

Для сравнения с результатами теоретических расчетов и получения истинного амплитудного распределения экспериментальные спектры скорректированы с учетом следующих поправок:

- а) наложения импульсов от нескольких фотонов, образованных в радиаторе;
- б) фоновое излучение;
- в) влияния краевого эффекта в кристалле;
- г) влияния эффективности спектрометра.

В этой главе приводятся также результаты экспериментальных исследований и их обсуждения.

На рис. 1 приведены спектры РПИ для медного радиатора, состоящего из $N = 40$ пластин с толщинами $a = 11$ мкм и расстоянием между ними $b = 1$ мм. Пунктирная кривая соответствует теоретическим расчетам с учетом, а сплошная — без учета многократного рассеяния при энергии электронов 1,0 и 4,0 ГэВ.

Из рисунка следует, что учет многократного рассеяния приводит к 5 - 6% снижению спектров в области максимумов, а в других областях частот изменение незначительно.

Из рисунка видно, что экспериментальные спектры (точки) в пределах экспериментальных ошибок находятся в хорошем согласии с теоретически рассчитанными.

Было исследовано РПИ в радиаторе из оловянных фольг при энергии электронов (1,0 + 3,5) ГэВ в области энергии фотонов (20 + 200) кэВ; радиатор состоял из $N = 20$ пластин с толщинами $a = 20$ мкм и расстоянием между ними $b = 1$ мм. В этом случае показано, что экспериментальные результаты находятся в удовлетворительном согласии с теоретическими спектрами.

Определенный интерес представляет исследование РПИ также и в радиаторах, представляющих собой набор пластин веществ с чередующимися атомными номерами Z , прижатых друг к другу без воздушных промежутков.

Было исследовано РПИ электронов с энергиями (1,0 + 3,0) ГэВ в области частот $hw - (20 + 200)$ кэВ в радиаторе из чередующихся медных фольг и полиэтиленовых пленок. Толщина каждой медной фольги была 11 мкм, а полиэтиленовой пленки — 200 мкм. Фольги и пленки были прижаты друг к другу так, что между ними не оставалось воздушных зазоров. Количество таких чередований было сорок.

На рис. 2 приведены экспериментально измеренные спектры РПИ для такого радиатора. Из рисунка видно, что наблюдаются максимумы в области энергии $hw \sim 40$ кэВ. Спектры излучения при $hw > 50$ кэВ имеют спадающий характер с увеличением hw .

Из сравнения рис. 1 и рис. 2 видно, что области расположения максимумов во всех случаях одинаковые, а интенсивность излучения во втором случае меньше чем для стопки из медных фольг с воздушными отсеками во всех областях частот и энергий электронов. Это объясняется тем, что разница между плотностями меди и полиэтилена меньше, чем для меди и воздуха и, в качественном согласии с теорией, это приводит к уменьшению интенсивности излучения РПИ.

В этой главе приведены результаты исследования РПИ электронов с энергией 3,0 ГэВ в интервале энергии $hw - (20 + 100)$ кэВ в радиаторе из алюминиевых фольг ($N = 230$ пластин, $a = 8$ мкм, $b = 1$ мм), а также результаты исследования РПИ электронов с энергией 1,0 ГэВ в области частот $hw - (20 + 70)$ кэВ в радиаторе из майларовых пленок ($N = 70$, $a = 20$ мкм, $b = 1$ мм).

Приводятся результаты теоретических расчетов для этих радиаторов, вычисленные без учета многократного рассеяния и с учетом угловой дискриминации фотонов РПИ, соответствующей апертуре детектора фотонов РПИ. Показано, что экспериментальные результаты хорошо согласуются с теоретическими расчетами.

Анализ всех проведенных исследований показывает, что влияние многократного рассеяния заряда на образование РПИ при энергии электронов $E_e - (1,0 + 4,0)$ ГэВ и в интервале атомных номеров $Z - 6 + 50$ практически не проявляется и экспериментальные результаты находятся в хорошем согласии с теорией РПИ.

В третьей главе дана конструкция, принцип работы ^{40}K -детектора РПИ и экспериментальная установка для исследования ^{40}K -детектора, а также приведены результаты Монте-Карло расчетов ^{40}K -детектора РПИ. Вдоль оси медного корпуса детектора с диаметром 40 см и длиной 200 см расположен радиатор переходного излучения диаметром 6 см. Радиатор окружен десятью пропорциональными счетчиками и вакуумно изолирован от газового объема детектора полиэтиленовым кожухом толщиной 100 мкм.

При измерениях использовались два типа радиатора. Первый представлял собой брусок из пенопласта со средней плотностью $\rho = 0,04 \text{ г/см}^3$. Второй радиатор состоял из 85 брусков пенопласта со средней плотностью $\rho = 0,04 \text{ г/см}^3$ и длиной по 2 см, между которыми были расположены медные фольги толщиной 6 мкм. В радиаторе первого типа образованные фотоны РПИ претерпевали рассеяние в самом веществе радиатора и регистрировались боковыми пропорциональными счетчиками, окружающими радиатор излучения. В радиаторе второго типа образованные фотоны РПИ претерпевали рассеяние в пенопласте, в медных фольгах или же, поглощаясь в медных фольгах, образовывали рентгеновское характеристическое излучение с энергией $\hbar\omega \sim 8,1 \text{ кэВ}$, и регистрировались боковыми пропорциональными счетчиками.

Сигналы с 10-ти пропорциональных счетчиков подавались на предусилители, а затем поступали на дифференциальные формирователи, далее они поступали на отдельные пересчетные приборы.

На рис. 3, 4 приведены зависимости полного числа фотонов от E_e , вычисленные (сплошная линия) для первого и второго

типа радиаторов соответственно. Кружками обозначены результаты экспериментальных исследований. Из рисунка видно, что экспериментальные результаты в пределах 20 - 30% согласуются с расчетами. Существенный вклад в расхождение, по-видимому, дают ошибки в экспериментально измеренных спектрах РПИ из пенопластового радиатора толщиной 2 см, которые использовались при расчетах.

На рис. 5 приведены зависимости эффективности регистрации электронов η от E_e для обоих радиаторов. Кружками обозначены случаи первого типа радиатора, а темными треугольниками - второго типа.

Из рисунков видно, что в случае второго типа радиатора наблюдается резкое увеличение зависимости η от E_e , причем как показывают расчеты, зарегистрированные кванты в основном имеют энергию $\hbar\omega \sim 8 \text{ кэВ}$.

В этой главе рассмотрены возможности разделения ультрарелятивистских частиц ^{40}K -детектором переходного излучения. Показано, что можно обеспечить высокую эффективность регистрации частиц и высокую степень режекции π -, K -мезонов и протонов.

В заключении приведены результаты, вынесенные на защиту:

I. Проведены систематические исследования спектров РПИ в широком диапазоне атомных номеров $Z - 6 \div 50$ веществ радиаторов РПИ в интервале энергии электронов $E_e - (1,0 \div 4,0) \text{ ГэВ}$ и в области энергий фотонов $\hbar\omega - (20 \div 250) \text{ кэВ}$. Показано, что теория РПИ удовлетворительно описывает экспериментальные спектры.

2. В спектральном распределении РПИ, испускаемого из тяжелых элементов, наблюдается больше высокоэнергетических фотонов, чем для легких элементов.

3. Радиаторы из тяжелых элементов выгодны при регистрации частиц методом энерговыделения при обеспечении эффективной регистрации высокоэнергетических фотонов.

4. Для регулярных стопок из тяжелых элементов при обеспечении условия, чтобы толщина пластин и расстояния между ними были больше, чем соответствующие значения зон формирования, наблюдается линейный рост числа фотонов и полного энерговыделения РПИ с энергией электронов.

5. При больших энергиях электронов, когда зоны формирования излучения в веществе и в воздухе становятся меньше или порядка соответствующих значений толщин пластин и расстояний между ними, наблюдается ограничение роста зависимости числа фотонов и полного энерговыделения от энергии электронов.

6. В спектральных распределениях наблюдаются осцилляции, обусловленные интерференцией излучения, а также минимумы, связанные с наличием K -края поглощения вещества радиатора.

7. Влияние многократного рассеяния на образование переходного излучения не наблюдается в интервале атомных номеров $Z - 6 \div 29$ в исследуемой области частот и энергий электронов

8. При больших атомных номерах ($Z = 50$) малое отличие между теоретическими спектрами, учитывающими и не учитывающими влияние многократного рассеяния, и относительно большие статистические ошибки не позволяют сделать количественные оценки влияния многократного рассеяния на образование РПИ.

9. Разработанный метод Монте-Карло расчета для вычисления числа зарегистрированных фотонов хорошо описывает физические процессы, происходящие в 4π -детекторе. Результаты расчетов находятся в хорошем согласии с данными экспериментальных исследований.

10. Радиатор 4π -детектора, состоящий из чередующихся медных фольг и брусков пенопласта, обеспечивает более резкое увеличение зависимости числа зарегистрированных фотонов от энергии электрона.

11. При помощи 4π -детектора РПИ можно обеспечить высокую эффективность регистрации частиц и высокую степень режекции π , K -мезонов и протонов в узких пучках частиц с энергиями $E \sim 100$ ГэВ.

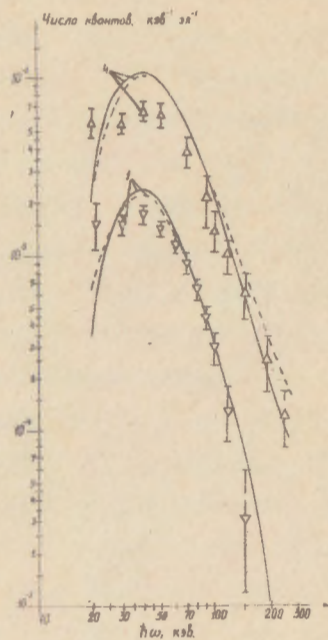


Рис. 1. Спектры РПИ в стопке из медных фольг, состоящей из $N = 40$ пластин, толщина каждой пластины $a = 11$ мкм, а расстояние между ними $b = 1$ мм (цифры у кривых соответствуют значениям энергии электрона).

$$\Delta - E_e = 4,0 \text{ ГэВ}$$

$$\nabla - E_e = 1,0 \text{ ГэВ}$$

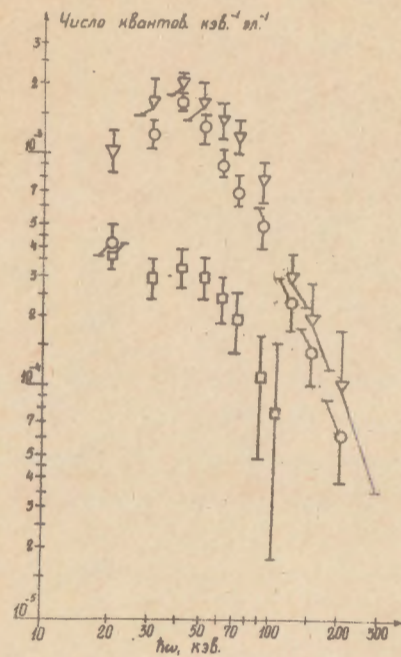


Рис. 2. Спектр РПИ в радиаторе из чередующихся медных и полиэтиленовых пленок. Толщина медных фольг — 11 мкм, а полиэтиленовых пленок — 200 мкм. Количество чередований — 40.

$$\nabla - E_e = 3,0 \text{ ГэВ}$$

$$\circ - E_e = 2,0 \text{ ГэВ}$$

$$\square - E_e = 1,0 \text{ ГэВ}$$

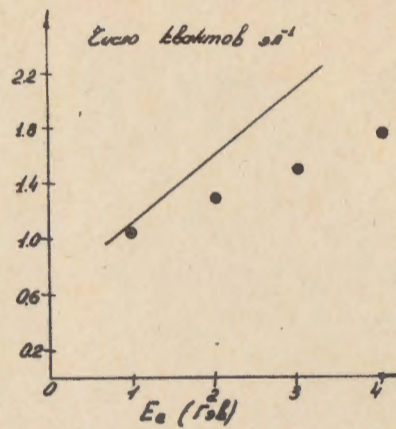


Рис. 3. Зависимость полного числа фотонов от E_e для I-го типа радиатора.

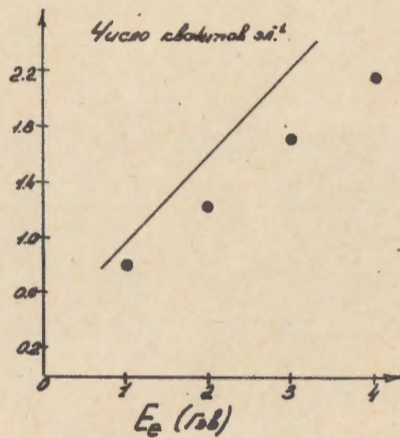


Рис. 4. Зависимость полного числа фотонов от E_e для 2-го типа радиатора.

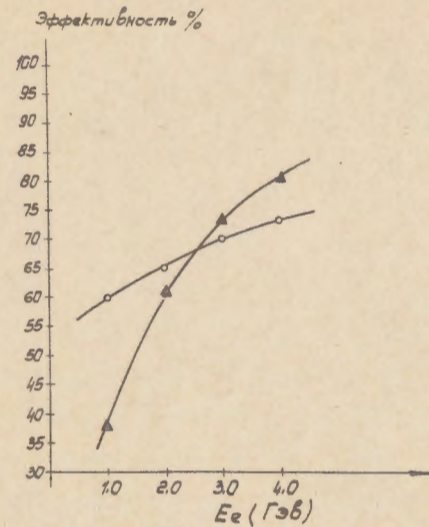


Рис. 5. Зависимость эффективности регистрации η от E_e для первого (светлые кружки) и второго (черные треугольники) типов радиаторов.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ

В РАБОТАХ

1. Исследование рентгеновского переходного излучения в тяжелых радиаторах. /А.Л.Авакян, Р.А.Астабатьян, Л.А.Варданян, К.Р.Григорян, М.П.Лорикян, К.Ж.Маргарян. - IV конференция молодых ученых Ереванского физического института. (Нор-Амберд, 25-27 сентября, 1979г.): Труды/Ереванск.физ.ин-т, Ереван: ЕрФИ, 1980, с.131-134.
2. Исследование переходного излучения в радиаторах из медных фольг./А.Л.Авакян, М.П.Лорикян, К.Ж.Маргарян, Ю.Л.Маргарян. Международный симпозиум по переходному излучению частиц высоких энергий. (Ереван, 12-17 мая, 1977г.): Труды/Ереван. физ.ин-т, Ереван: ЕрФИ, 1977, с.287-297.
3. Исследование рентгеновского переходного излучения в оловянных фольгах. /А.Л.Авакян, Р.А.Астабатьян, Л.А.Варданян, К.Р.Григорян, М.П.Лорикян, К.Ж.Маргарян. - ЖЭТФ, 1980, т.78, в.3, с. 936-940.
4. Исследование рентгеновского переходного излучения в различных радиаторах. /Э.С.Беляков, М.П.Лорикян, К.Ж.Маргарян и др. - Ереван, 1973. - 15 с. (Научное сообщение /Ереванск. физ. ин-т. ЕФИ-44(73).
5. Детектор переходного излучения. /Р.А.Астабатьян, К.Р.Григорян, М.П.Лорикян, К.Ж.Маргарян.-ПТЭ, № 2, с.75-77
6. Детектор переходного излучения. /А.Л.Авакян, Р.А.Астабатьян, К.Р.Григорян, М.П.Лорикян, К.Ж.Маргарян и др. /IV конференция молодых ученых Ереванского физического института (Нор-

Амберд, 25-27 сентября 1979г.): Тез.докл./Ереванск.физ. ин-т, Ереван, 1979, с.80: Монте-Карло расчет детектора переходного излучения. /А.Л.Авакян, Р.А.Астабатьян, А.Л.Вишневская, К.Ж.Маргарян и др. - Изв. АН Арм.ССР, Физика, 1981г., т.16, в.2, с. 5-10.