

ЕРЕВАНСКИЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи

АЛЕКСАНДР ГЕВОРКОВИЧ ТАМАНЯН

**ПРИМЕНЕНИЕ РЕНТГЕНОВСКОГО ПЕРЕХОДНОГО
ИЗЛУЧЕНИЯ, ДЛЯ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ЧАСТИЦ
ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ**

(на русском языке)

01.04.01—экспериментальная физика

АВТОРЕФЕРАТ

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

ЕРЕВАН—1974

ЕРЕВАНСКИЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи

АЛЕКСАНДР ГЕВОРКОВИЧ ТАМАНЯН

ПРИМЕНЕНИЕ РЕНТГЕНОВСКОГО ПЕРЕХОДНОГО
ИЗЛУЧЕНИЯ, ДЛЯ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ЧАСТИЦ ВЫСОКИХ
ЭНЕРГИЙ

01.04.01 - экспериментальная физика

(на русском языке)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

ЕРЕВАН 1974

Работа выполнена в Ереванском физическом институте ГКИАЭ.

Научный руководитель - кандидат физико-математических наук
А.Г.Оганесян

Официальные оппоненты: Доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник ФИАН СССР

Б.М.Болотовский

Кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник БФИ

М.П.Лорикян

Ведущее учреждение - Харьковский физико-технический институт

Автореферат разослан "5" апреля 1974 г.

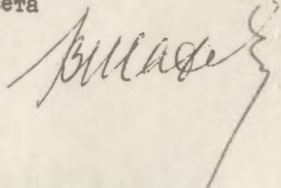
Защита диссертации состоится "8" мая 1974 г.

в 14-00 ч. на заседании Ученого совета Ереванского физического
института (Дом ученых БФИ).

Отзывы на автореферат в 2-х экз. с заверенной подписью
просим направлять по адресу: 375036 Ереван 36 ул.Маргаряна 2
Ученому секретарю БФИ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке БФИ (Дом ученых)

Ученый секретарь Совета
БФИ


В.А.Шахбазян

При переходе физики высоких энергий в область импульсов больше 100 Гэв/с использование известных методов идентификации частиц или затруднительно, или принципиально невозможно. Этим объясняется интерес к проблеме использования переходного излучения для детектирования частиц высоких энергий.

Настоящая диссертация посвящена исследованию возможностей использования рентгеновского переходного излучения для создания детекторов частиц высоких энергий. Рассмотрены различные методы регистрации частиц и влияние фоновых процессов на разрешающую способность детекторов. Описаны эксперименты по исследованию двух видов детекторов частиц высоких энергий и по исследованию различных радиаторов переходного излучения, выполненные на пучке электронов Ереванского синхротрона "АРУС" при энергиях 0,5-4 Гэв.

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения.

В первой главе приводится обзор различных методов идентификации частиц и анализируются возможности их использования в области сверхвысоких энергий. Дан обзор теоретических и экспериментальных работ по переходному излучению частиц высоких энергий.

Вторая глава посвящена выбору генератора излучения, а также анализу возможностей использования рентгеновского переходного из-

лучения для детектирования частиц высоких энергий.

Здесь, в частности, на основе работ [1,2] показано, что при регистрации рентгеновского переходного излучения ультрарелятивистских частиц в узком интервале углов вдоль направления движения частицы можно получить резкую зависимость интенсивности излучения от энергии частицы.

Действительно, как следует из анализа теоретических выражений, интенсивность рентгеновского переходного излучения на одной границе раздела, испущенная в интервале углов $0 \ll \Theta^2 \ll \left(\frac{mc^2}{E}\right)^2$

$$\text{равна } \frac{dW}{d\omega} \approx \frac{e^2}{\pi c} \left[\frac{\sigma/\omega^2}{(mc^2/E)^2 + \sigma/\omega^2} \right]^2 \Theta^4 \left(\frac{E}{mc^2}\right)^4, \quad (1)$$

т.е. при регистрации излучения в узком телесном угле вдоль направления движения частицы число квантов $\sim \gamma^4$. Если одновременно излучение регистрировать в определенном частотном интервале $\frac{\sigma}{\omega^2} \ll \left(\frac{mc^2}{E}\right)^2$, то зависимость интенсивности излучения от энергии будет еще более сильной

$$\frac{dW}{d\omega} \approx \frac{e^2}{2\pi c} \cdot \frac{\sigma^2}{\omega^4} \Theta^4 \left(\frac{E}{mc^2}\right)^8. \quad (2)$$

В обратном случае, т.е. при $\Theta^2 \gg \left(\frac{mc^2}{E}\right)^2$ и $\frac{\sigma}{\omega^2} \gg \left(\frac{mc^2}{E}\right)^2$

$$\frac{dW}{d\omega} \approx \frac{e}{\pi c} \left[2 \ln \frac{\sigma \Theta^2 E^2}{(mc^2)^2 \omega^2 (\Theta^2 + \frac{\sigma}{\omega^2})} - \frac{2\Theta^2 + \frac{\sigma}{\omega^2}}{\Theta^2 + \frac{\sigma}{\omega^2}} \right]. \quad (3)$$

Как следует из анализа формул (1-3), если имеется моноимпульсный пучок частиц с различными значениями γ_1 и γ_2 , и если $\gamma_1^2 \ll \frac{\omega^2}{\sigma}$ и $\gamma_2^2 \ll \frac{1}{\Theta^2}$, а $\gamma_2^2 \gg \frac{\omega^2}{\sigma}$ и $\gamma_2^2 \gg \frac{1}{\Theta^2}$, то вероятность регистрации частицы с γ_1 будет значительно меньше, чем частицы с γ_2 . Интересно отметить, что сильная зависимость интенсивности излучения от γ сохраняется и при регистрации излучения в интер-

вале углов $0 < \Theta_1 - \Theta_2 \ll \frac{mc^2}{E}$, хотя при этом возникает дополнительное потери излучения в интервале углов $0 - \Theta_1$. Это обстоятельство важно с точки зрения раздельной регистрации частицы и излучения.

В предположении, что флуктуации числа детектируемых квантов переходного излучения подчиняются закону Пуассона, проведено сопоставление детекторов частиц высоких энергий, в которых производится либо частотная, либо угловая дискриминация излучения. Сопоставлялись эффективности регистрации и коэффициенты разделения двух частиц с массами m_1 и m_2 $R = \frac{\epsilon(m_1)}{\epsilon(m_2)}$; расчеты проводились для слоистых сред, состоящих из $m = 10^3 + 2 \cdot 10^3$ слоев полиэтилена толщиной $a = 10 \mu$. В результате расчетов было показано, что как при частотной, так и при угловой дискриминации имеется возможность идентифицировать пионы и протоны в области импульсов $10^2 - 10^3$ Гэв/с. Однако, в области импульсов 100-500 Гэв/с при сопоставимой эффективности регистрации пионов угловая дискриминация обеспечивает лучшее разделение по массам. Так, при импульсе частиц $p = 200$ Гэв/с и $m = 1000$ эффективность регистрации пионов $\epsilon = 95\%$, а коэффициент разделения $R_{\pi p} \approx 10^3$ при угловой дискриминации в пределах $0 - \Theta = 4 \cdot 10^{-3}$; при $\Theta = 10^{-3}$ значения ϵ и $R_{\pi p}$ соответственно равны $\sim 60\%$ и $< 10^{-5}$.

В обоих способах детектирования нужных значений ϵ и $R_{\pi p}$ можно добиться подбором значений числа слоев и нижнего предела энергии регистрации квантов. Оба способа с большим успехом могут быть применены для разделения электронов от более тяжелых частиц.

Здесь же приведены несколько вариантов детекторов, в которых проблема раздельной регистрации излучения при соответствующих частотной и угловой дискриминациях и частицы решается различными способами.

Наиболее простым является способ регистрации излучения детекто-

ром с центральным отверстием, через которое проходит пучок идентифицируемых частиц. Такие детекторы частиц высоких энергий, по-видимому, целесообразно использовать для сепарирования частиц в интенсивных пучках. Рассмотрены также возможности использования мозаики, составленной из детекторов излучения небольших размеров (сцинтилляторов, пропорциональных счетчиков и пр.), а также фотомножителей со скрещенными полями, что также позволяет отдельную регистрацию частицы и излучения.

В 1961 году А.И.Алиханяном и др. было предложено для регистрации переходного излучения использовать метод характеристического излучения. В этом методе кванты переходного излучения поглощаются в газе, расположенном за генератором излучения, при этом образуется изотропное характеристическое излучение, которое можно регистрировать независимо от идентифицируемой частицы. Такой метод был осуществлен в 1964 г.; во второй главе настоящей диссертации рассчитан детектор, в котором также используется метод характеристического излучения, но который имеет ряд преимуществ по сравнению с упомянутым. Здесь слоистая среда помещается непосредственно в газ-поглотитель, а детекторы, регистрирующие кванты характеристического излучения, располагаются вдоль объема с газом. В этом способе привлекательным является то, что нет принципиального ограничения на число слоев из-за поглощения в самой слоистой среде. При этом можно достичь значительно большей светосилы установки, чем при регистрации излучения детектором тороидальной формы.

Вычислены эффективность регистрации фотонов $\epsilon_{\text{ф}}$ и коэффициент деления в области импульсов выше ~ 200 Гэв/с. В случае аргона нижний предел значений импульсов составляет 50-100 Гэв/с.

Наконец, во второй главе рассмотрено влияние различных процессов (образование δ -электронов, многократное рассеяние частиц и

пр.) на разрешающую способность различных генераторов излучения на вторичном пучке электронов Ереванского синхротрона "АРУС" были смонтированы три различные установки, описанию которых посвящена третья глава настоящей диссертационной работы.

Экспериментальная установка, предназначенная для исследования различных видов генераторов излучения^[5], позволяла регистрировать число излученных квантов в определенном частотном интервале, а также их спектральное распределение. Здесь для отдельной регистрации излучения и частицы был использован отклоняющий магнит. Вдоль пучка электронов, перед отклоняющим магнитом располагалась платформа с различными генераторами излучения (слоистая среда из майларовых пленок, пенопласт и гидрид лития LiH). Установка любого из них под пучок электронов производилась перемещением платформы с пульта управления без выключения ускорителя. За платформой по траектории пучка находился сцинтилляционный апертурный счетчик. За отклоняющим магнитом вдоль траектории электронов располагался сцинтилляционный телескоп, состоящий из трех счетчиков. Излучение, образуемое в генераторе, регистрировалось сцинтилляционным спектрометром из $NaCl(Tl)$, установленным вдоль оси генератора излучения за отклоняющим магнитом на расстоянии 6 м от центра генератора излучения. Входное окно кристалла $NaCl(Tl)$ было изготовлено из майлара толщиной 60μ для уменьшения поглощения квантов. На пути электронов до генератора излучения и в пространстве между генератором и гамма-спектрометром для уменьшения фона и вероятности поглощения излучения в воздухе на пути до детектора располагались гелиевые мешки. Соответствующая электронная аппаратура регистрировала число электронов, число квантов рентгеновского переходного излучения и их амплитудный спектр, для чего использовался 512-канальный амплитудный анализатор. Измерения проводились при различных энергиях электро-

нов как в перечисленных выше генераторах излучения, так и в эквивалентных сплошных средах.

Для экспериментального исследования детектора частиц высоких энергий, в котором производилась угловая дискриминация рентгеновского переходного излучения, применялась установка, которая состояла из генератора излучения, детектора рентгеновского излучения и сцинтилляционного телескопа заряженных частиц, установленных вдоль траектории электронов. В качестве генераторов излучения применялись периодические слоистые среды из майлара с различным числом слоев, толщиной пластин и расстояниями между ними. В этой установке детектор излучения представлял собой кристалл $CsY(Te)$ тороидальной формы с внешним диаметром 76 мм, внутренним диаметром 8 мм и толщиной 20 мм. Через отверстие в кристалле пропускаются электроны, для обеспечения раздельной регистрации излучения и заряженной частицы. Регистрация сцинтилляций производилась тремя фотоэлектронными умножителями ФЭУ-29.

Третья экспериментальная установка, а именно, детектор частиц высоких энергий на основе рентгеновского переходного излучения с применением метода характеристического излучения, состояла из слоистой среды, помещенной в газ-поглотитель, и детекторов излучения. Непосредственно за ним располагались счетчики сцинтилляционного телескопа. Слоистая среда состояла из 1300 пластин майлара толщиной 10μ с расстоянием между пластинами 280μ . Длина слоистой среды 38 см, поперечные размеры $3 \times 3 \text{ см}^2$. Мишень, эквивалентная по тормозной способности слоистой среде, была сделана из девяти слоев оргстекла. Слоистая среда и эквивалентная мишень помещались в камеру, наполненную криптоном при давлении, близком к атмосферному. Установка нужной мишени производилась дистанционно. Стенки камеры изготовлялись из тонкого полиэтилена. Кванты характеристического

излучения, возникающие в криптоме и имеющие в отличие от рентгеновского переходного излучения изотропное распределение, падали на детекторы излучения. Последние представляли собой сцинтилляционные счетчики из $CsY(Te)$ размерами $40 \times 40 \times 4 \text{ мм}^3$ и располагались вдоль слоистой среды с верхней и нижней стороны. Общее число сцинтилляторов составляло 16. Регистрация сцинтилляций производилась фотоэлектронными умножителями типа ФЭУ-29. В процессе измерений при различных энергиях регистрировалось число электронов, прошедших через установку, число событий, сопровождающихся регистрацией по крайней мере N квантов характеристического излучения ($N = 3, 4$ или 5) и число случайных совпадений. Во всех трех экспериментах установка энергии электронов производилась с точностью $\frac{\Delta E}{E} \lesssim 1\%$. Юстировка установок производилась посредством лазера. Для калибровки счетчиков типа $NaY(Te)$ или $CsY(Te)$ использовался радиоактивный источник Sn^{119m} .

Результаты, полученные на вышеописанных установках, и их обсуждение приведены в четвертой главе.

Здесь приводятся спектральные распределения переходного излучения электронов с энергиями 2,4; 2,9 и 3,5 Гэв в майларовой слоистой среде, пенопласте и порошке гидрида лития. Эти спектры, полученные в области энергий квантов 5-60 кэв, имеют характерный максимум, хотя, как известно из теории переходного излучения, число квантов, образующихся в генераторе излучения, с уменьшением их энергий резко увеличивается. Наличие максимума в экспериментально измеренных спектрах объясняется поглощением мягкой части излучения как в генераторе излучения, так и на всем пути до детектора излучения. К тому же при энергиях $\hbar\omega \lesssim 10$ кэв резко уменьшается эффективность регистрации сцинтилляций, возникающих в кристалле $NaY(Te)$.

Спад излучения за максимумом объясняется самим характером переходного излучения, однако спектр более пологий из-за того, что примерно в 10% случаев кристалл NaY(Te) регистрировал одновременно 2 кванта излучения в виде одного кванта с суммарной энергией. В майларовой слоистой среде максимум излучения имеет место при $\hbar\omega \sim 16$ кэв, а в пенопласте и порошке гидрида лития максимум смещается в более мягкую область спектра (14 и 12 кэв, соответственно). Это естественно, поскольку майлар имеет большую плотность ($\sim 1,3$ г/см³) и $Z_p \sim 6$, чем LiH (0,25 г/см³ и 2,7, соответственно), т.е. больший коэффициент поглощения излучения. Однако, несмотря на то, что в случае пенопласта и порошка гидрида лития излучение сосредоточено в более мягкой области спектра, суммарное число квантов в интервале 5 + 60 кэв получается наибольшим в случае майларовой слоистой среды.

Приводятся зависимости полного числа зарегистрированных квантов в интервале энергий 5 + 60 кэв от энергии электронов для различных радиаторов, при длине последних 38 см. Сопоставление их показало, что наилучшим радиатором излучения является слоистая среда, а наименьший выход излучения наблюдается в пенопласте. При этом во всех средах наблюдается сильная зависимость числа излученных квантов от энергии электронов.

Можно заключить, что периодическая слоистая среда является наиболее удобным радиатором переходного излучения. Использование периодических слоистых сред позволяет создать радиаторы с заранее известными свойствами для получения нужной области чувствительности детектора на основе переходного излучения. В тех же случаях, когда требования, предъявляемые к детектору, не очень жесткие (например, при идентификации электронов и пионов $\chi_e \gg \chi_\pi$) удобнее

пользоваться радиатором из гидрида лития. При этом, если регистрировать кванты с энергией $\sim 2 + 10$ кэв с эффективностью $\sim 100\%$, то число зарегистрированных квантов будет значительно выше, чем в случае майларового или пенопластового радиаторов.

При исследовании детектора частиц высоких энергий с угловой дискриминацией переходного излучения получены следующие результаты [3,4]. Измерения проводились при энергиях электронов 500+3700 Мэв при следующих параметрах слоистых сред и значениях угловой дискриминации: 1) $a = 40 \mu$, $b = 0,5$ см, $m = 380$ (a и b - толщина пластин и расстояние между ними соответственно, m - число пластин) при $2,6 \cdot 10^{-4} \leq \theta \leq 2,5 \cdot 10^{-3}$, $3,5 \cdot 10^{-4} \leq \theta \leq 3,3 \cdot 10^{-3}$ и $7,3 \cdot 10^{-4} \leq \theta \leq 6,7 \cdot 10^{-3}$; 2) $a = 10 \mu$, $b = 0,5$ см, $m = 380$ при $3,5 \cdot 10^{-4} \leq \theta \leq 3,3 \cdot 10^{-3}$; 3) $a = 10 \mu$, $b = 0,5$ см, $m = 930$ при $2,6 \cdot 10^{-4} \leq \theta \leq 2,5 \cdot 10^{-3}$. Для уменьшения вклада фоновых событий регистрировалось излучение с энергией выше 15 кэв. Такой высокий энергетический порог привел к уменьшению эффективности регистрации электронов по их переходному излучению.

Как показал анализ экспериментальных результатов, с уменьшением предела угловой дискриминации энергетическая зависимость интенсивности переходного излучения усиливается в согласии с ожидаемым. Так, в интервале энергий 1,5 + 3,5 Гэв при $2,6 \cdot 10^{-4} \leq \theta \leq 2,5 \cdot 10^{-3}$ интенсивность пропорциональна $E^{2,5}$, при $3,5 \cdot 10^{-4} \leq \theta \leq 3,3 \cdot 10^{-3}$ - $E^{1,7}$ и при $7,3 \cdot 10^{-4} \leq \theta \leq 6,7 \cdot 10^{-3}$ - $E^{1,4}$. Из сопоставления результатов измерений, полученных в одном и том же интервале углов и при одном и том же числе пластин, но при их различных толщинах, увеличение толщины не приводит к заметному увеличению эффективности регистрации электронов. Это объясняется увеличением поглощения в самой слоистой среде. Вследствие увеличения поглощения увеличе-

ние числа пластин также не приводит к пропорциональному увеличению эффективности регистрации электронов. Полученные результаты позволяют надеяться, что если регистрировать рентгеновское излучение в области $h\nu \geq 5$ кэв с эффективностью, близкой к 100%, то детекторы с угловой дискриминацией позволяют осуществить идентификацию частиц высоких энергий по их переходному излучению с достаточной эффективностью и надежностью.

Отметим, что недавно для сепарации пучка частиц также предложен детектор с угловой дискриминацией [7]. При этом значения эффективности регистрации пионов и коэффициента режекции находятся в согласии с данными настоящей работы.

Наконец, в четвертой главе приводятся результаты исследования детектора частиц высоких энергий на основе рентгеновского переходного излучения с применением метода характеристического излучения [4,6].

Исследования проводились при энергии электронов 1,7+3,6 Гэв. Предварительно на ЭВМ "РАЗДАН"-3 методом Монте-Карло была вычислена эффективность регистрации электронов таким детектором. Всего было рассмотрено 2217 случаев прохождения электронов через установку. Расчеты показали, что при прохождении электронов через детектор все счетчики, кроме первых и последних двух, регистрируют в среднем одинаковое число квантов. Это означает, что в случае помещения слоистой среды непосредственно в газ-поглотитель нет принципиального ограничения на число пластин. Были вычислены также распределения числа событий в зависимости от числа одновременно регистрируемых квантов для различных энергий. Экспериментальные исследования этого типа детектора производились при энергии электронов 1,7; 2,4; 2,8; 3,4; 3,6 Гэв и при значениях числа одновременно ре-

гистрируемых квантов $N \geq 3$; $N \geq 4$; $N \geq 5$. Эффективность регистрации электронов, как показали результаты эксперимента, во всем диапазоне исследований имеет сильную зависимость от энергии, причем чем выше N , тем сильнее эта зависимость и, естественно, ниже эффективность регистрации электронов. Максимальная эффективность регистрации электронов (~30%) была достигнута при энергии 3,6 Гэв и $N \geq 3$ при этом среднее число квантов характеристического излучения, регистрируемых счетчиками $CsY(Te)$, составило $N \approx 2,7$.

Было проведено сопоставление результатов измерений с расчетами Монте-Карло. Оказалось, что экспериментальные значения эффективности регистрации электронов несколько ниже расчетных, причем эта разница увеличивается с уменьшением энергии электронов или с увеличением N . Это различие обусловлено тем, что в расчетах эффективность регистрации квантов характеристического излучения кристаллами $CsY(Te)$ принята равной 100%, на самом же деле из-за плохих условий светосбора и низкого коэффициента световыхода в кристаллах при энергиях 10 - 20 кэв эффективность была менее 100%. Материалы, вошедшие в настоящую диссертацию, докладывались на сессии АН СССР (Таллин, 1970) и на Международной конференции по аппаратуре в физике высоких энергий (Дубна, 1970) и опубликованы в работах [1,6].

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. А.И.Алиханян, К.А.Испирян, А.Г.Оганесян, А.Г.Таманян. Препринт ЕФИ-МЭ-3 (70).
2. A. I. Alikhanian, K. A. Ispirian, A. G. Oganessian, A. G. Tamanian. *Nucl. Instr. and Meth.* 84, 147, 1970.
3. А.И.Алиханян, К.А.Испирян, А.Г.Оганесян, А.Г.Таманян, ЖЭТФ, *Письма*, II, 347, 1970.
4. А.И.Алиханян, К.А.Испирян, А.Г.Оганесян, А.Г.Таманян. Труды Международной конференции по аппаратуре в физике высоких энергий, 2, 538, Дубна (1970).
5. К.А.Испирян, С.А.Канкян, А.Г.Оганесян, А.Г.Таманян. Изв. АН Арм.ССР, Физика, 7, 377 (1972).
6. А.И.Алиханян, К.А.Испирян, С.А.Канкян, А.Г.Оганесян, А.Г.Таманян. ПТЭ, 5, 51 (1972).
7. P.W. Alley, A. Bamberger, G.F. Dell, H. Uto, L.C.L. Yuan, *NAL report* 229, (1973).