

ЕРЕВАНСКИЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи

УДК 538.56:539.12

АГИНЯН МЕРИНЕ АРМЕНАКОВНА

ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЗАРЯЖЕННЫХ
ЧАСТИЦ НА ИОНИЗАЦИЮ И ИЗЛУЧЕНИЕ В
РАЗЛИЧНЫХ СРЕДАХ

(Специальность: 01.04.02 – Теоретическая и математическая
физика)

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

ЕРЕВАН-1990

Работа выполнена в Ереванском физическом институте

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор Ян Ши

Официальные оппоненты: член-корреспондент АН АрмССР,
доктор физико-математических наук
профессор Р.О.Авакян (ЕрФИ)
доктор физико-математических наук,
профессор Ф.Ф.Комаров
(НИИ ПФП при БГУ, г. Минск)

Ведущая организация: Институт атомной энергии
им. И.В.Курчатова

Защита состоится "29" мая 1990 г. в 14.00 часов на заседании специализированного совета Д.034.03.01 при Ереванском физическом институте (375036, г.Ереван, ул. братьев Алиханянов, д. 2).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Ереванского физического института.

Автореферат разослан " " апреля 1990 г.

Ученый секретарь
специализированного совета

В.А.Шахбазян

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Проблема энергетических потерь быстрых заряженных частиц в среде, обусловленных ионизацией атомов среды и образованием электромагнитного излучения, представляет значительный научный и практический интерес. Актуальность этой проблемы определяется использованием указанных явлений в экспериментальной физике высоких энергий для регистрации и идентификации частиц и возможностями создания новых источников излучений с заданными свойствами.

Большой интерес представляет явление рентгеновского квазичеренковского (параметрического) излучения, возникающего под брэгговскими углами и на брэгговских частотах при пролете релятивистской заряженной частицы через кристалл. Это явление теоретически обсуждается с шестидесятих годов и экспериментально обнаружено на Томском и Ереванском синхротронах. Излучение обладает узкой направленностью и высокой монохроматичностью с перестраиваемой длиной волны.

В 1959 году Гарибян указал на отсутствие эффекта плотности Ферми в ионизационных потерях энергии заряженных частиц при пролете через тонкий слой вещества. Однако важный с точки зрения практического использования вопрос о критерии тонкости слоя долгое время не был до конца выяснен.

На основе явления рентгеновского переходного излучения (РПИ), предсказанного Гарибяном и Барсуковым в 1959 году, построены детекторы заряженных частиц высоких энергий, которые успешно используются в настоящее время в многочисленных экспериментах на ускорителях и для исследования космических лучей, поэтому дальнейшее исследование и выявление новых особенностей

РПИ представляет большой интерес. Настоящая диссертация посвящена изучению именно вышеуказанных вопросов.

Цель работы. Целью диссертационной работы является:

1. Исследование квазичеренковского (КЧ) излучения быстрых заряженных частиц в геометриях Лауэ и Брэгга в зависимости от толщины кристалла и энергии частицы и сравнение с имеющимися в этой области экспериментальными результатами.

2. Исследование полных потерь энергии релятивистских заряженных частиц при пролёте вдоль протяженных объектов.

3. Анализ и расчет спектральной интенсивности РПИ, образуемого на телах конечных размеров, исследование особенностей угловой зависимости интенсивности этого излучения.

4. Расчет и исследование полных потерь энергии быстрых заряженных частиц при их пролете через пластину вещества произвольной толщины.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Впервые получены формулы для числа квантов КЧ излучения в идеальном и мозаичном толстых кристаллах.

2. Впервые исследована зависимость числа квантов N_k КЧ излучения от толщины идеального кристалла.

3. Впервые исследована зависимость N_k при поворотах кристалла от угла влета частицы или частоты излучения.

4. Впервые показано, что эффект плотности Ферми всегда имеет место при пролете заряженной частицы вдоль оси полого бесконечного цилиндра. Аналогичный результат имеет место при пролете частицы параллельно оси сплошного бесконечного цилиндра.

5. Впервые численным методом исследована зависимость

энергетических потерь заряженной частицы от ее лоренц-фактора в слое вещества произвольной толщины.

Практическая ценность. Результаты, полученные в диссертации, могут быть использованы:

- при разработке методов использования свойств квазичеренковского излучения (исследовании структуры кристаллов, медицине, биологии, рентгеновской литографии и др.);

- при разработке методов детектирования частиц высоких энергий с использованием механизма потерь энергии заряженной частицы;

- при экспериментальном исследовании свойств РПИ, образуемого на телах конечных размеров, с учетом углового спектра интенсивности излучения.

Апробация работы. Результаты работ, вошедших в диссертацию, докладывались на VI, XVI, XVII Всесоюзных совещаниях по физике взаимодействия заряженных частиц с монокристаллами (Москва, 1975, 1986, 1987 гг.); Международных симпозиумах по переходному излучению частиц высоких энергий (Ереван, 1977, 1983 гг.); Международной конференции, посвященной 50-летию открытия эффекта Вавилова-Черенкова (Москва, 1984 г.); III Всесоюзном совещании по когерентному взаимодействию излучения с веществом (Ужгород, 1985 г.); II Всесоюзном совещании по проблеме "Рентген" (Черновцы, 1987 г.), на семинарах в ХФТИ и ЕрФИ.

Публикации. По теме диссертации опубликовано десять работ /1-10/.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитируемой литературы; изложена на 120 страницах машинописного

текста, содержит 16 рисунков, 3 таблицы и 95 библиографических ссылок.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведен обзор предшествующих работ, посвященных вопросам квазичеренковского излучения; потерь энергии быстрых заряженных частиц в пластинах вещества, теории РПИ. Сформулирована постановка задач и цель диссертационной работы, приведено ее краткое содержание.

В первой главе, состоящей из §§1-3, рассматривается вопрос образования КЧ излучения в общем случае наклонного падения частицы на кристалл /1/.

В § 1 получено решение уравнения Максвелла для полей заряженной частицы в безграничном идеальном кристалле в двухволновом приближении. Здесь с самого начала непоперечность электромагнитного поля не учитывается. Сравнение с результатами, полученными Гарибяном и Ян Ши, показало, что принятое приближение вполне допустимо для релятивистских частиц в области рентгеновских частот.

В § 2 приводятся формулы для свободных полей, которые могут существовать в идеальном кристалле.

В § 3 с помощью граничных условий находятся поля излучения при наклонном влете частицы в кристалл. Полученные формулы справедливы для широкой области углов падения частицы и излучения, за исключением только скользких углов. Рассмотрена как геометрия Лауэ, так и геометрия Брэгга. В частном случае нормального влета частицы в кристалл формулы переходят в ранее полученные.

Во второй главе (§§ 4-8) проводится исследование числа квантов КЧ излучения в геометриях Лауэ и Брэгга в зависимости от толщины кристалла /1-7/. Из общего теоретического анализа следовало, что в силу когерентности КЧ излучения, образуемого на всем пути движения частицы через совершенный кристалл, в геометрии Лауэ должны иметь место интерференционные явления типа "маятникового эффекта" и эффекта аномального прохождения Бормана, известные при дифракции рентгеновских лучей в монокристаллах. В частности, должна наблюдаться сложная зависимость интенсивности КЧ излучения от толщины α кристалла при "промежуточных" значениях α .

В настоящей главе проведен количественный анализ указанных эффектов и рассчитаны числа квантов КЧ излучения для кристаллов произвольной толщины α как в геометрии Лауэ, так и в геометрии Брэгга. Кроме того, исследована зависимость числа квантов излучения от энергии (лоренц-фактора γ) частицы.

В § 4 на основе результатов первой главы выводятся исходные формулы частотно-углового распределений числа квантов КЧ излучения, необходимые для расчета полного числа квантов N_K и дальнейшего анализа.

В § 5 исследуется КЧ излучение в геометрии Лауэ. В случае тонкого и толстого кристалла после интегрирования по углам излучения и частоте получены достаточно компактные формулы для полного числа квантов N_K КЧ излучения /1/. Вычислено также частотное распределение числа квантов КЧ излучения в случае толстого кристалла /2,3/. При промежуточных толщинах проанализирована и количественно исследована зависимость полного числа квантов N_K от толщины α /4,5/. Показано, что кривые за-

зависимостей N_k от толщины α (рис. I) имеют осцилляционный характер ("маятниковый эффект") при толщинах порядка экстинкционной длины и выходят на насыщение при толщинах, в несколько раз превышающих соответствующие значения длины поглощения для аморфного вещества, что можно считать аналогом эффекта Бормана для КЧ излучения.

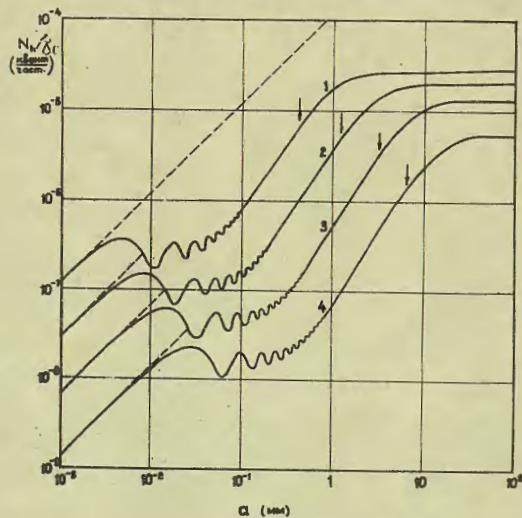


Рис. I. Зависимости числа квантов N_k КЧ излучения от толщины α кристалла алмаза для разных пятен отражения в симметричной геометрии Лауэ ($\gamma_0 = \cos \theta_B$). Цифры 1-4 у кривых соответствуют отражениям (2,2,0), (4,0,0), (4,4,0), (8,0,0), энергиям кванта $\hbar\omega_B$ - 7.05, 9.82, 14.10, 19.65 кэВ и углам Брэгга θ_B - 44.15, 44.99, 44.15, 44.99°. Стрелками указаны значения обычной длины поглощения $\epsilon_{ам}^{пол}$ (для аморфного вещества) при соответствующих частотах. Кривые рассчитаны для электронов с лоренц-фактором $\gamma = 1.8 \cdot 10^3$. Штриховые прямые соответствуют расчету по формуле кинематической теории.

Из кривых зависимостей N_k от толщины α для разных пятен хорошо видно, что при малых α зависимость является линейной и совпадает с результатом расчета по кинематической теории (штрихованные прямые), а число квантов N_k при промежуточных и больших толщинах, вычисленное при корректном применении динамической теории в двухволновом приближении, всегда остается меньше, чем то, что дает кинематическая теория, которая является неправомерной при этих толщинах.

Что касается γ -зависимостей числа квантов N_k , то оно практически не зависит от γ при достаточно больших γ для промежуточных и достаточно больших толщин /4-6/. Величина N_k монотонно растет с ростом γ при малых толщинах, а также малых γ .

Проведен расчет числа квантов N_k при поворотах идеального кристалла толщиной α вокруг вектора обратной решетки \vec{K}_k . Показано, что зависимость N_k от направления влета частицы также носит немонотонный характер из-за изменения длины пути частицы в кристалле. При поворотах кристалла вокруг направления, не совпадающего с направлением \vec{K}_k , значения брэгговского угла и брэгговской частоты не остаются постоянными. Расчет показал, что если частота остается меньше $\omega_c \gamma$ (ω_c - плазменная частота вещества), то не происходит резкого падения интенсивности КЧ излучения при частотном перестраивании /7/.

В конце параграфа приведены графики зависимости числа квантов N_k от лоренц-фактора частицы γ , а также число квантов N_k при поворотах кристалла в зависимости от угла влета или частоты излучения.

В § 6 исследуется КЧ излучение в геометрии Брэгга /5/.

В случае тонкого кристалла формула для полного числа квантов N_k совпадает с аналогичной формулой в геометрии Лауэ. Для толстого кристалла соответствующая формула /I/ отличается от формулы в геометрии Лауэ. При промежуточных толщинах проведен анализ и численный расчет величины N_k . При этом интегрирование по частоте проводилось аналитически, а интегрирование по углам, как правило, проводилось численно. Показано, что в отличие от случая геометрии Лауэ при промежуточных толщинах отсутствует осцилляционная зависимость величины N_k от толщины a и имеет место слабая зависимость ее от a (первое плато). При дальнейшем увеличении толщины величина N_k снова растет, а затем достигает насыщения (второе плато), но заметно раньше, чем в геометрии Лауэ, т.е. отсутствует эффект аномального прохождения. Зависимость числа квантов N_k от γ аналогична случаю геометрии Лауэ. В конце параграфа приведены графики зависимости числа квантов N_k от толщины кристалла.

В § 7 исследуется КЧ излучение в мозаичном кристалле, состоящем из малых блоков (при условии, что мозаичность кристалла мала). Показано, что число квантов КЧ излучения не зависит от ориентации блока и пропорционально его толщине. В силу этого можно ввести число излученных квантов на единицу длины и описать процессы излучения системой дифференциальных уравнений, описывающих дифракцию в мозаичных кристаллах, с постоянной неоднородной частью. Получено решение этой системы для толстого кристалла и показано, что число квантов N_k для идеального и мозаичного толстых кристаллов не сильно отличаются /I/.

В § 8 проводится сравнение теоретических результатов, по-

лученных в §§ 5,6, с экспериментальными результатами, полученными на Томском и Ереванском синхротронах. Теоретические значения чисел квантов излучения не противоречат экспериментальным данным.

В третьей главе (§§ 9-11) исследованы энергетические потери релятивистской заряженной частицей при пролете вдоль протяженного тела, а также рентгеновское переходное излучение в случае тел конечных размеров /8,9/.

В § 9 рассмотрено равномерное движение заряженной частицы вдоль оси полого цилиндра. Эта задача рассматривалась Гарибяном и Карапетяном в поисках объекта, для которого отсутствует эффект плотности. В диссертации показано, что в отличие от заключения указанных авторов в случае бесконечно длинного полого цилиндра независимо от толщины стенки эффект плотности всегда существует при достаточно больших значениях γ /8/.

В § 10 для сравнения с результатами § 9 рассмотрена также задача пролета заряженной частицы параллельно оси бесконечно длинного сплошного цилиндра. Показано, что и в этом случае эффект плотности Ферми всегда имеет место при достаточно больших γ . Проведен анализ поля частицы с точки зрения степени искажения поля частицы в вакууме присутствием тела /8/.

В § 11 детально исследованы особенности частотно-углового и частотного распределений интенсивности РПИ, образуемого частицей на объектах цилиндрической формы в зависимости от их поперечного a_{\perp} и продольного a_z размеров. Рассмотрены как тела в вакууме, так и вакуумные поры в среде /9/. Показано, что главный максимум в частотно-угловом распределении интенсивности РПИ в случае, когда a_{\perp} много больше "радиуса дей-

ствия" поля частицы $v\gamma/\omega$, определяется интерференцией на границах тела, а именно, меньшим из углов $(2c/\omega a_z)^{1/2}$ и $c/\omega a_1$. Уточнен критерий применимости теории возмущений. Рассмотрено образование РПИ на вакансионных порах в кристаллах и проведено сравнение полученных результатов с оценками работы Рязанова. Приведены графики частотно-углового и частотного распределений интенсивности РПИ.

В четвертой главе (§ 12) исследованы энергетические потери заряженной частицы при прохождении через слой вещества произвольной толщины, находящийся в вакууме /10/. Проблема полных потерь энергии частицей, равномерно и прямолинейно проходящей через плоско-параллельный слой вещества толщины a , неоднократно обсуждалась в литературе. Основной результат, полученный еще Гарибяном в 1959 году, заключается в том, что в случае "тонкого" слоя в энергетических потерях отсутствует эффект плотности Ферми и потери логарифмически растут с увеличением лоренц-фактора γ частицы. Однако по поводу количественной стороны задачи, в частности, вопроса о критерии "тонкости" слоя, или о критическом значении $\gamma_{кр}$, выше которого начинается логарифмический рост потерь, существовали различные утверждения.

Поскольку задачу точно аналитически решить не удастся и указанные утверждения основаны на разного рода приближениях, для окончательного выяснения вопроса был проведен непосредственный численный расчет потерь как полных, так и поглощенных в слое. При этом попутно вычислялось частотное распределение потерь, которое ускользает при решении задачи методом Ландау интегрирования в плоскости комплексных частот ω . В расчете

была использована модель Лоренца-Друде для частотной зависимости диэлектрической проницаемости с несколькими собственными частотами и соответствующими частотами релаксации. По-видимому, качественные черты поведения энергетических потерь остаются общими, независящими от конкретной модели. Результаты расчета (рис. 2) показывают, что в тонких слоях полные потери (как и поглощенная в слое часть) действительно логарифмически растут с увеличением γ .

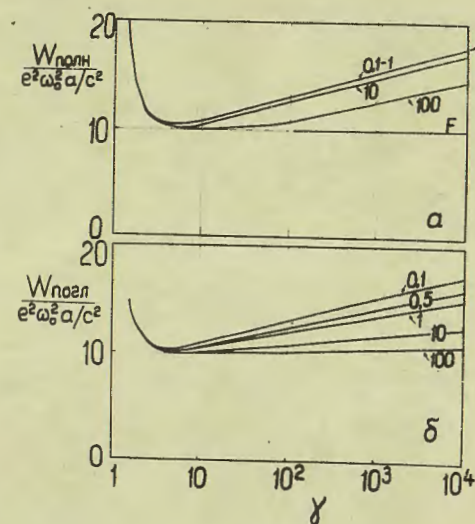


Рис. 2. Зависимости полных (а) и поглощенных в слое (б) энергетических потерь с единицы длины пути в веществе от лоренц-фактора γ . Цифры у кривых обозначают $a\omega_0/c$. Прямая (на рис. 2а) с буквой F соответствует плато Ферми.

Этот логарифмический рост имеет место, в согласии с выводом

Течина, когда толщина пластины $a \ll c/\omega_0$, а в толстых слоях логарифмический рост потерь также имеет место при больших значениях $\gamma \gg \alpha\omega_0/c$ за счет образования переходного излучения.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в диссертации и выносимые на защиту:

1. Получены формулы для полей излучения при пролете заряженной частицы через идеальный кристалл в двухволновом приближении при наклонном падении частицы на поверхность кристалла. С самого начала непоперечность электромагнитного поля частицы не учитывалась, что вполне приемлемо для релятивистских частиц и рентгеновской области частот.

2. Проведено исследование числа квантов КЧ излучения N_k в геометрии Лауэ в зависимости от толщины кристалла a и лоренц-фактора частицы γ . При промежуточных толщинах кривые зависимостей N_k от a имеют осцилляционный характер (аналог "маятникового эффекта" в теории дифракции рентгеновских лучей). При дальнейшем увеличении толщины кривые выходят на насыщение при толщинах, в несколько раз превышающих соответствующую длину поглощения для аморфного вещества, что является аналогом эффекта Бормана аномального прохождения рентгеновских лучей. При больших толщинах для N_k получены простые формулы.

Исследована зависимость числа квантов N_k КЧ излучения при повороте кристалла данной толщины a вокруг вектора обратной решетки K_k . Показано, что зависимость N_k от угла влета частицы носит немонотонный характер из-за изменения длины пути частицы в кристалле. При повороте кристалла вокруг направления, не совпадающего с K_k , немонотонный характер зависи-

мости N_k от частоты обусловлен как изменением длины пути частицы внутри кристалла, так и изменением экстинкционной длины. При достаточно больших γ величина N_k практически не зависит от γ при промежуточных и достаточно больших толщинах. Проводится сравнение с экспериментальными данными.

3. Проведено исследование числа квантов КЧ излучения N_k в геометрии Брэгга в зависимости от толщины кристалла и лоренц-фактора. Показано, что характер поведения кривых N_k в геометрии Брэгга отличается от аналогичных кривых в геометрии Лауэ. При промежуточных толщинах отсутствует осцилляционная зависимость N_k от a и имеет место слабая зависимость ее от a (первое плато), затем N_k снова растет и достигает насыщения (второе плато) заметно раньше, чем в геометрии Лауэ, т.е. отсутствует эффект Бормана. Получены формулы для N_k в случае толстого кристалла. Зависимость N_k от γ аналогична случаю Лауэ.

4. Получено решение для толстого мозаичного кристалла, состоящего из блоков с толщинами, меньшими, чем экстинкционная длина, и повернутых друг относительно друга на малые углы (от долей минут до долей градуса). Показано, что полное число квантов N_k для идеального и мозаичного толстых кристаллов не сильно отличается.

5. Вычислены потери энергии релятивистской частицы, движущейся вдоль оси полого цилиндра или параллельно оси сплошного цилиндра (в обоих случаях длина цилиндра считается бесконечной). Показано, что эффект плотности Ферми всегда имеет место при достаточно больших значениях лоренц-фактора частицы.

6. Вычислены потери энергии частицы при прохождении че-

рез слой вещества, находящийся в вакууме. Результаты показывают, что в тонких слоях, когда толщина слоя $a \ll c/\omega_0$, полные потери (как и поглощенная в слое часть) логарифмически растут с увеличением γ . В толстых слоях этот рост также имеет место при больших значениях $\gamma \gg a\omega_0/c$, но за счет образования переходного излучения.

7. Исследованы особенности частотно-углового и частотного распределений интенсивности РПИ, образуемого частицей на объектах цилиндрической формы, в зависимости от поперечного и продольного размеров. Рассмотрены тела в вакууме и вакуумные поры в среде, образование РПИ на вакансионных порах в кристаллах. Показано, что кристалл с вакансионными порами может служить источником излучения, по-видимому, только в области мягких рентгеновских лучей ($\hbar\omega \sim 500-800$ эВ), для которой зоны формирования имеют примерно тот же порядок, что и размеры и расстояние между порами. С точки зрения детектирования релятивистских частиц использование кристалла с вакансионными порами, если это и возможно, то в случае частиц не очень высоких энергий ($\gamma < 25$).

П У Б Л И К А Ц И И

1. Афанасьев А.М., Агинян М.А. Излучение ультрарелятивистских частиц при прохождении через идеальные и мозаичные кристаллы. - Труды Международного симпозиума по переходному излучению частиц высоких энергий. - Ереван, Изд. ЕФИ, 1977, с. 169-192; ЖЭТФ, 1978, т. 74, вып. 2, с. 570-579.
2. Авакян А.Л., Агинян М.А., Гарибян Г.М., Ян Ши. Исследование динамических максимумов рентгеновского переходного излуче-

ния, возникающих при пролете частицы через монокристалл. - ЖЭТФ, 1975, т. 68, вып. 6, с. 2038-2046.

3. Авакян А.Л., Агинян М.А., Гарибян Г.М., Ян Ши. Численный расчет динамических максимумов рентгеновского переходного излучения. - Ереван, 1975. - 33 с. Научное сообщение ЕФИ-115(75).
4. Агинян М.А., Ян Ши. Эффекты когерентности квазичеренковского излучения в кристаллах. - Изв. АН АрмССР, Физика, 1986, т. 21, вып. 5, с. 280-283.
5. Агинян М.А., Ян Ши. Эффекты когерентности квазичеренковского излучения в кристаллах в геометрии Лауэ и Брэгга. - Ереван, 1987. - 19 с. Препринт ЕФИ-953(3)-87.
6. Агинян М.А., Гарибян Г.М., Ян Ши. Зависимость переходного излучения, образуемого в монокристалле, от лоренц-фактора заряда. - Труды VI Всесоюзного совещания по физике взаимодействия заряженных частиц с монокристаллами. - М.: Изд. МГУ, 1975, с. 211-215.
7. Агинян М.А., Ян Ши. Ориентационная и частотная зависимости интенсивности квазичеренковского излучения в монокристаллах. - Тезисы докладов XIII Всесоюзного совещания по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами. - М.: Изд. МГУ, 1987, с. 89.
8. Агинян М.А., Бабаханян Э.А., Ян Ши. Ионизационные потери релятивистской частицы, движущейся параллельно поверхности тела. - Изв. АН АрмССР, Физика, 1980, т. 15, вып. 4, с. 247-256.
9. Агинян М.А., Амбарцумян А.С., Ян Ши. Рентгеновское переходное излучение в случае тел конечных размеров. Материалы

II Симпозиума по переходному излучению частиц высоких энергий. - Ереван, 1984, с. 209-216; Изв. АН АрмССР, Физика, 1984, т. 19, вып. 6, с. 297-305.

- Ю. Агинян М.А., Гарибянь Г.М., Ян Ши. Энергетические потери заряженной частицы при прохождении через слой вещества различной толщины и эффект плотности Ферми. - Ереван, 1984. - 15 с. Научное сообщение, ЕФИ-748(63)-84; Изв. АН АрмССР, Физика, 1985, т. 20, вып. 6, с. 308-314.

Технический редактор А.С.Абрамян

Подписано в печать 12.04.90г. ВФ-01356 Формат 60x84/16
Офсетная печать. Тираж 170 экз.
Зак.тип.№ 125

Отпечатано в Ереванском физическом институте
Ереван 36, ул.Братьев Аликянн, 2