

ЕРЕВАНСКИЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи

АМБАРЦУМЯН
Армен Сергеевич

ВОПРОСЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ
УЛЬТРАРЕЛЯТИВИСТСКИХ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

(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 – 1982

Работа выполнена в Ереванском физическом институте.

Научные руководители: академик АН Арм. ССР, доктор физ.-мат. наук, профессор Г.М.ГАРИБЯН;
доктор физ.-мат. наук, ст. науч. сотр.
ЯН ШИ.

Официальные оппоненты: член-корреспондент АН Арм. ССР,
доктор физ.-мат. наук, профессор
Д.М.СЕДРАКЯН (Ереванский государственный университет);
кандидат физ.-мат. наук Э.В.СЕХПОСЯН
(Ереванский физический институт).

Ведущая организация - Институт атомной энергии им. И.В.
Курчатова (Москва).

Защита диссертации состоится " 27 " апреля 1982 г.
в 14⁰⁰ час. на заседании Специализированного Совета Д 034.01.03
по присуждению ученой степени доктора физико-математических наук
при Ереванском физическом институте (375036, г.Ереван-36, ул.
Маргаряна, 2).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЕФИ.

Автореферат разослан " 26 " марта 1982 г.

Ученый секретарь Специализированного Совета, кандидат физ.-мат. наук

В.А.Шахбазян

В.А.ШАХБАЗЯН

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Вопросы электромагнитных потерь энергии быстрых заряженных частиц, пролетающих через среду и обусловленных как ионизацией атомов среды, так и образованием излучения (в частности, переходного), представляют в настоящее время значительный научный и практический интерес. Их актуальность определяется широким использованием механизма электромагнитных потерь в экспериментальной физике сверхвысоких энергий (для регистрации и идентификации частиц), а также возможностями дальнейших приложений теории переходного излучения, в особенности, в рентгеновской области частот.

Открытое в 1959 г. Гарибяном явление отсутствия эффекта плотности Ферми в ионизационных потерях энергии заряженных частиц при пролете через достаточно тонкие пластины продолжает привлекать внимание экспериментаторов, чем и определяется детальное исследование этого вопроса, проведенное в настоящей работе.

Большое теоретическое и прикладное значение имеет явление рентгеновского переходного излучения (РПИ), предсказанное в 1959 г. Гарибяном и Барсуковым. Детекторы на основе РПИ применяются в настоящее время в многочисленных экспериментах на ускорителях и в космических лучах. Поэтому вопросы теории РПИ, его характерных особенностей являются вполне актуальными.

Представляет несомненный интерес также использование теории РПИ в астрофизике. Реализуемость условий для образования такого излучения в межзвездной среде делает возможным применение этого явления при изучении конкретных астрофизических объектов.

Цель работы. Целью диссертационной работы является:

1. Детальное рассмотрение вопроса полных потерь энергии быстрых заряженных частиц при нормальном и наклонном пролете через пластину вещества. Сравнение результатов теории с имеющимися в этой области экспериментальными данными.

2. Исследование РПИ, образуемого в пластинах с размытыми границами при произвольной зависимости диэлектрической проницаемости от координат внутри размытых слоев.

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

4. Исследование РПИ, образуемого в космическом пространстве и изучение конкретных астрофизических объектов с помощью РПИ.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Впервые получены расчетные графики зависимости полных потерь энергии быстрой заряженной частицы при пролете через пластину вещества произвольной толщины, от лоренц-фактора заряда. Выявлена область более сильной, чем логарифмическая, зависимости потерь энергии от лоренц-фактора заряда.

2. В рамках теории возмущений найдены особенности в угловом спектре РПИ, образуемого быстрыми заряженными частицами на телах цилиндрической формы.

3. Показано, что вклад РПИ, образуемого на частицах межзвездной пыли, в диффузное рентгеновское космическое излучение незначителен.

4. Впервые оценена интенсивность РПИ в области мягкого рентгена от конкретных космических источников (туманность Ориона, Центавр А); получено согласие с наблюдательными данными.

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

- при разработке методов детектирования заряженных частиц высоких энергий с использованием механизма потерь энергии заряда;

- при экспериментальных исследованиях свойств РПИ, образуемого на телах конечных размеров, с учетом особенностей углового спектра интенсивности излучения;

- при изучении астрофизических объектов с помощью РПИ, образуемого космическими электронами на частицах межзвездной пыли.

Апробация работы. Результаты работ, вошедших в диссертацию, докладывались на сессии Отделения физико-математических наук АН Арм.ССР (Ереван, 1974 г.), на IV и V конференциях молодых ученых ЕФИ (Нор-Амберд, 1979 г.; Севан, 1981 г.), а также на семинарах ФИАН СССР и ЕФИ.

Публикации. По теме диссертации опубликовано восемь статей [1-8].

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы; изложена на 94 страницах машинописного текста, содержит 14 рисунков, 3 таблицы и 103 библиографические ссылки.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведен обзор предшествующих работ, посвященных потерям энергии быстрых заряженных частиц в пластинах вещества, теории РПИ и ее приложениям в астрофизике. Сформулирована постановка задач и цель работы, приведено ее краткое содержание.

В первой главе рассмотрены полные потери энергии заряженной частицы при перпендикулярном и наклонном пролете через пластину вещества.

В §1 рассмотрена зависимость полных потерь энергии заряженной частицы (в области частот порядка атомных) от толщины пластины a и лоренц-фактора частицы γ [1,2]. Особое внимание обращено на условия, при которых будет отсутствовать эффект плотности Ферми. Построены расчетные графики зависимости критической толщины

$$a_{кр} = \frac{4c\bar{\omega}}{\pi\omega_0^2} \left(\ln \frac{\omega_0\gamma}{\bar{\omega}_1} - \frac{1}{2} \right) \quad (1)$$

(ω_0 - плазменная частота вещества, $\bar{\omega}_1$ - некоторая усредненная атомная частота, $\bar{\omega}$ - дважды усредненная атомная частота) от лоренц-фактора частицы для различных веществ. При толщинах пластины, меньших $a_{кр}$, потери энергии происходят без эффекта плотности. Построена кривая зависимости полных потерь энергии, нормированных на потери на плато Ферми, от лоренц-фактора частицы, при пролете через кремниевую пластину заданной толщины. (рис.1). Выявлена область более сильной, чем логарифмическая, зависимости потерь от γ -фактора частицы при значениях $\gamma \sim \gamma_{кр}$ (лоренц-фактора, соответствующего критической толщине пластины). Полученные результаты сравниваются с экспериментальной работой Огле и др. (1978 г.), в которой проводились абсолютные измерения потерь энергии заряда с целью обнаружения эффекта, предсказанного Гарибяном в 1959 г. К сожалению, авторы этого эксперимента, исходя из неверных теоретических предположений, пытались обнаружить логарифмический рост потерь от γ -

фактора частицы в пластинах толщиной 10^{-2} см, в которых этот эффект (при имеющихся на ускорителях энергиях электронов) не должен наблюдаться из-за большой толщины пластины.

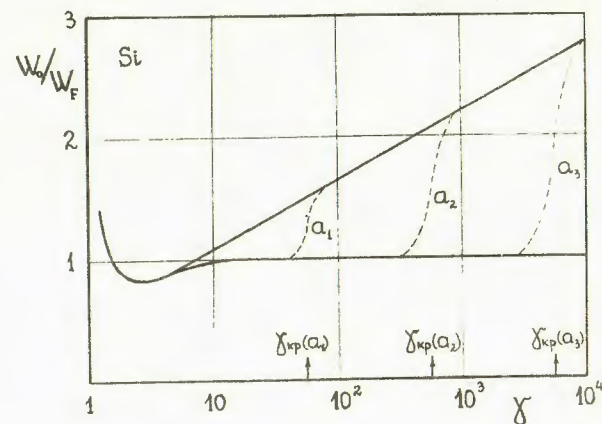


Рис.1. Зависимость полных потерь W_0 , нормированных на значение потерь на плато Ферми, от γ . $a_1 = 10^{-5}$ см, $\gamma_{кр}(a_1) = 55$, $a_2 = 2 \cdot 10^{-5}$ см, $\gamma_{кр}(a_2) = 5,5 \cdot 10^2$; $a_3 = 3 \cdot 10^{-5}$ см, $\gamma_{кр}(a_3) = 5,5 \cdot 10^3$.

В §2 вычислены полные потери энергии ультрарелятивистской заряженной частицы при наклонном пролете через тонкую пластину [3]. Эта задача была рассмотрена в 1968 г. Гарибяном и Элбакяном. Авторы пришли к выводу, что эффект плотности в этом случае отсутствует лишь при почти перпендикулярном пролете. Такой результат представлялся странным, что и привело нас к повторному рассмотрению вопроса. Дополнительные потери энергии частицы в пластине, обязанные наличию грани, разлагаются в ряд по толщине пластины и интегрируются методом Ландау. Интегрирова-

ние по компонентам волнового вектора \vec{k} проведено в повернутой системе координат (одна из осей совпадает с направлением движения частицы), что значительно упрощает вычисления. Показано, что эффект плотности для достаточно тонких пластин отсутствует в широких пределах изменения угла падения ψ частицы на пластину. При этом ограничение на толщину пластины примерно такое же, как и в случае нормального влета. Неперпендикулярность сказывается в том, что в этом ограничении роль a играет длина пути частицы в пластине:

$$\frac{a}{\cos\psi} \ll a_{кр}(\psi), \quad \psi < \pi/2 - \gamma^{-1} \quad (2)$$

где $a_{кр}(\psi)$ — величина, слабо зависящая от ψ и имеющая тот же порядок, что и (1).

Во второй главе рассмотрено РПИ, образованное на размытой границе двух сред и в пластине с размытыми границами [4]. Впервые такая задача для конкретного вида зависимости диэлектрической проницаемости от координат внутри размытой границы двух сред была решена в первом приближении теории возмущений Аматауни и Корхмазяном в 1960 г. Ими было показано, что для ультрарелятивистских частиц, в случае малого отношения длины размытия к зоне формирования излучения, интенсивность РПИ в направлении движения частицы почти такая же, как и для резкой границы. В обратном случае величина интенсивности экспоненциально мала. Аналогичная задача, но для произвольного вида зависимости диэлектрической проницаемости от координат была решена позднее Галеевым в приближении геометрической оптики. При этом автор пришел к выводу, что переходное излучение экс-

поненциально мало всякий раз, когда длина размытия больше длины волны излучения. Поскольку длина волны и зона формирования излучения не всегда даже одного порядка, то между утверждением этой статьи и выводами Аматауни и Корхмазяна имеется противоречие.

В §3 в приближении геометрической оптики получены формулы для частотно-углового распределения интенсивности РПИ, образованного на размытой границе двух сред при произвольной зависимости диэлектрической проницаемости от координат. Показано, что в соответствии с выводами Аматауни и Корхмазяна, определяющую роль, с точки зрения образования РПИ, играет отношение длины размытия к зоне формирования, а не к длине волны. В этой связи уточнены выводы работы Галеева.

В §4 рассмотрена задача о РПИ, образуемом на пластине с размытыми границами, при произвольной зависимости диэлектрической проницаемости от координат в граничных слоях. Частотно-угловое распределение интенсивности РПИ в направлении движения определяется формулой

$$W_{пл}^{(+) }(\omega, \vartheta) = W_{пр}^{(+) }(\omega, \vartheta) \left| 1 - \delta_2 - (1 - \delta_1) \exp\left(-\frac{i\pi a}{Z_1^{(+)}}\right) \right|^2 \quad (3)$$

где $W_{пр}^{(+) }(\omega, \vartheta)$ — интенсивность РПИ "вперед" в пластине с резкими границами, a — некоторая средняя толщина пластины, δ_1 и δ_2 — малые величины, определяемые длинами размытий Z_1 и Z_2 границ пластин, $Z_1^{(+)}$ — зона формирования излучения "вперед". Показано, что, как и в случае размытой границы, определяющим здесь является отношение зон формирования к длинам раз-

мьтий. Кроме того, в частности, показано, что при разных степенях размытия границ пластины ($\delta_1 \neq \delta_2$) имеет место сглаживание осцилляций в частотно-угловом спектре излучения (см. рис.2).

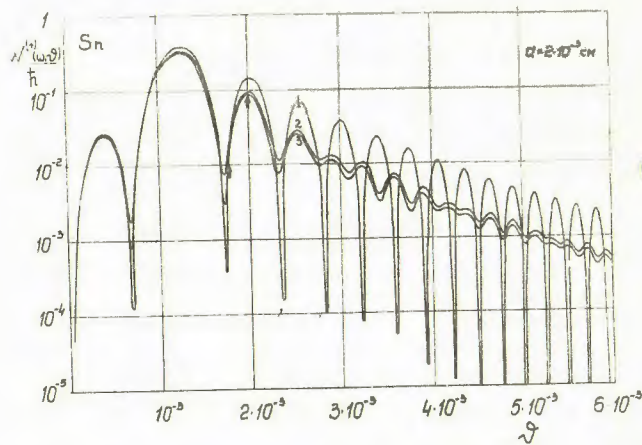


Рис.2. Частотно-угловое распределение интенсивности РПИ для оловянной пластины с размытыми границами в вакууме; кривая 1 - пластина с резкими границами; 2 - $Z_1 = 5 \cdot 10^{-4}$ см, $Z_2 = 0$; 3 - $Z_1 = 0$, $Z_2 = 5 \cdot 10^{-4}$ см.

В конце параграфов 3 и 4 приведены графики частотно-углового, частотного и спектрального (в зависимости от γ -фактора частицы) распределений интенсивности РПИ для размытой границы олово-вакуум и оловянной пластины с размытыми границами при произвольных отношениях длин размытий к зонам формирования излучения; графики хорошо иллюстрируют теоретические выводы.

В третьей главе рассмотрено РПИ, образуемое при взаимодействии ультрарелятивистской заряженной частицы с малыми объектами.

Под "малыми" объектами подразумеваются небольшие гранулы, частицы межзвездной пыли, молекулы, отдельные атомы.

В §5 в приближении теории возмущений получены выражения для полей излучения, образуемого на малых объектах произвольной формы. [5].

В §6 исследованы особенности частотно-углового и частотно-го распределений интенсивности РПИ, образуемого на объектах цилиндрической формы, в зависимости от их поперечного A_1 и продольного A_2 размеров [6]. В рамках теории возмущений показано, что главный максимум в частотно-угловом распределении интенсивности РПИ, образуемого на телах конечных размеров приходится на угол порядка γ^{-1} , только если поперечные размеры тела много больше "радиуса действия" поля частицы $\sqrt{\gamma}/\omega$ (γ - скорость частицы, ω - частота излучения). В противном случае максимальный угол определяется интерференцией на границах тела, а именно, меньшим из углов $(2c/\omega a_2)^{1/2}$ и $c/\omega a_1$.

В §7 рассмотрено РПИ, образуемое на телах сферической формы, на атоме и двухатомной молекуле. [5,7]. Приведены (без подробных выводов) формулы для интенсивности и сечения образования РПИ на телах со сферической симметрией. Получены выражения для сечения образования РПИ на двухатомной молекуле в случае, когда размеры молекулы много меньше длины излученной волны. Показано, что сечение излучения при этом почти в четыре раза больше аналогичного сечения на одном атоме. Из-за интерференции, поправка к сечению может достигать нескольких процентов.

В четвертой главе рассмотрено РПИ, образуемое космическими электронами на частичках космической пыли [8].

В начале 70-ых годов космическому переходному излучению

был посвящен целый ряд статей; отметим работы Джохансона, Лерке, Рамати, Йодта, Гурзадяна, Бахшяна, Гарибяна, Ян Ши. В основном, в этих работах обсуждался возможный вклад РПИ в диффузное рентгеновское космическое излучение, причем авторы приходили к различным оценкам вклада РПИ в наблюдаемый рентгеновский фон.

В §8 исследуется функция генерации космического РПИ (количество фотонов, испускаемых в единичном интервале частот в 1 см^3 за 1 сек.) в зависимости от вида спектра космических электронов и размеров частиц межзвездной пыли; проводится ее сравнение с функцией генерации тормозного излучения. Показано, что в области энергий $\omega \leq 5 \text{ кэВ}$ интенсивность РПИ превышает интенсивность тормозного излучения.

В §9 оценен возможный вклад РПИ в диффузное космическое излучение. Показано, что при корректном рассмотрении, вклад РПИ в диффузное излучение как галактического, так и межгалактического происхождения, незначителен ($\sim 10^{-5}$).

В §10 исследуется РПИ от конкретных протяженных космических источников, таких как гигантские молекулярные облака с большим содержанием пыли. Возможность сравнения расчетной светимости от этих объектов, обусловленной РПИ, с наблюдательными данными, до последнего времени отсутствовала. Однако, после запуска специализированного рентгеновского спутника "Эйнштейн", с высоким угловым разрешением и чувствительностью, подобный анализ стал реальным. Рассчитана светимость, обусловленная РПИ в области мягкого рентгена, от молекулярных облаков туманности Ориона. Полученные оценки показывают хорошее согласие с наблюдаемой светимостью ($L_x \sim 10^{33} \text{ эрг/сек}$). С точки зрения возможного вклада РПИ в наблюдаемую светимость, проанализированы па-

раметры, характеризующие радиогалактику Центавр А. Получено ограничение на суммарную энергию релятивистских электронов в этой галактике: $W_e \leq 2 \cdot 10^{57} \text{ эрг}$.

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

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Исследована зависимость полных потерь энергии заряженной частицы (в области частот порядка атомных) от толщины пластины и γ -фактора заряда. Построены расчетные графики зависимости критической толщины пластины A (при толщинах, меньших $A_{кр}$, потери энергии происходят без эффекта плотности) от γ -фактора частицы для различных веществ. Построена кривая зависимости полных потерь энергии от γ -фактора частицы при пролете через пластину заданной толщины. Выявлена область более сильной, чем логарифмическая, зависимости потерь от γ -фактора частицы при значениях $\gamma \sim \gamma_{кр}$ (лоренц-фактора, соответствующего критической толщине $A_{кр}$). Проведено сравнение с недавно выполненной экспериментальной работой.

2. Исследованы потери энергии быстрой заряженной частицы при наклонном пролете через тонкую пластину. Показано, что эффект плотности в потерях энергии для достаточно тонких пластин отсутствует в широких пределах изменения угла падения ψ частицы на пластину. При этом, ограничение на толщину пластины примерно такое же, как и в случае перпендикулярного влета. Неперпендикулярность сказывается в том, что в этом ограничении роль A играет длина пути частицы в пластине, т.е. $A/\cos\psi$ (при $\psi < \pi/2 - \gamma^{-1}$).

3. В приближении геометрической оптики получены формулы для интенсивности РПИ, образуемого на размытой границе двух сред и в пластине с размытыми границами, при произвольной зависимости диэлектрической проницаемости от координат в размытых слоях. Показано, что определяющую роль, с точки зрения образования РПИ, играет отношение длин размытий к соответствующим зонам формирования. Вычислены графики частотно-углового, частотного и спектрального (в зависимости от χ -фактора частицы) распределений интенсивности РПИ для размытой границы и пластины с размытыми границами, при произвольных отношениях длин размытий к зонам формирования.

4. В рамках теории возмущений исследованы особенности частотно-углового и частотного распределений интенсивности РПИ, образованного при взаимодействии ультрарелятивистской заряженной частицы с телами цилиндрической формы, в зависимости от их поперечного α_1 и продольного α_2 размеров. Показано, что главный максимум в частотно-угловом распределении интенсивности РПИ приходится на угол порядка χ^{-1} только если α_1 намного больше "радиуса действия" поля частицы. В противном случае максимальный угол определяется интерференцией на границах тела, а именно, меньшим из углов $(2c/\omega\alpha_2)^{1/2}$ и $c/\omega\alpha_1$. Получены выражения для сечения образования РПИ на двухатомной молекуле в случае, когда размеры молекулы намного меньше длины излученной волны.

5. Рассмотрено переходное излучение, образуемое потоком заряженных космических частиц на частичках межзвездной пыли. Оценен возможный вклад РПИ в диффузное космическое излучение. Показано, что при корректном рассмотрении, вклад РПИ в диффузное излучение как галактического, так и межгалактического проис-

хождения незначителен ($\sim 10^{-5}$).

6. Исследовано РПИ от конкретных космических источников, таких как гигантские молекулярные облака. Впервые показано, что расчетная светимость, обусловленная РПИ, образованным быстрыми электронами в молекулярных облаках в туманности Ориона, согласуется с наблюдательными данными. С точки зрения возможного вклада РПИ в наблюдаемую светимость галактики Центавр А проанализированы параметры, характеризующие эту радиогалактику.

ПУБЛИКАЦИИ

1. Амбарцумян А.С., Гарибян Г.М., Ян Ши. Ионизационные потери энергии быстрой заряженной частицы в пластинах различных толщин. — Изв. АН Арм. ССР, Физика, 1981, т. 16, вып. 5, с. 343–348.
2. Ambartsunian A.S., Garibian G.M., Yang C. The Ionization Loss of Fast Charged Particle in Detectors of different Thickness. Proc. of 1981 IAS Int. Symp. on Nuclear Rad. Detectors, Tokyo, 1981, p. 622–630; Phys. Lett., 1981, v. 85A, No. 3, p. 188–190.
3. Авакян А.Л., Амбарцумян А.С., Ян Ши. Логарифмический рост ионизационных потерь энергии заряда при наклонном пролете через тонкую пластину. — Изв. АН Арм. ССР, Физика, 1980, т. 15, вып. 6, с. 421–426.
4. Авакян А.Л., Амбарцумян А.С., Ян Ши. Рентгеновское переходное излучение, образуемое в пластине с размытыми границами. — Изв. АН Арм. ССР, Физика, 1980, т. 15, вып. 1, с. 9–16; Труды IV конф. молодых ученых ЕФМ, Ереван, 1980, с. 109–119.
5. Амбарцумян А.С., Гарибян Г.М., Ян Ши. Излучение, испускаемое

электронами вещества, при взаимодействии с релятивистской заряженной частицы.-Изв.АН Арм.ССР,Физика,1974,т.9,вып.6,с.541 (Научная сессия Отделения физ.-мат. наук АН Арм.ССР); 1975, т.10,вып.4,с.258-269.

6. Амбарцумян А.С., Ян Ши. Эффективные углы испускания рентгеновского переходного излучения в случае тел конечных размеров.- Ереван,1981.-12 с. (Препринт/Ереванский физич. институт: ВФИ-511(54)).

7. Амбарцумян А.С., Ян Ши. Рентгеновское переходное излучение, образуемое атомом и двухатомной молекулой при взаимодействии с ультрарелятивистской заряженной частицей.-Изв.АН Арм.ССР, Физика,1977,т.12,вып.5,с.320-328.

8. Агаронян Ф.А., Амбарцумян А.С. К вопросу о космическом переходном излучении на частицах пыли.-Астрофизика,1981,т.17,вып. 4,с.807-818; Тезисы докладов У конференции молодых ученых ВФИ,Ереван,1981,с.81.

Тех.редактор А.С.Абрамян

Заказ 121

ВФ - 03695

Тираж 160

• Формат издания 60x84/16

Подписано к печати 19.03.82 г.

Издано Отделом научно-технической информации
Ереванского физического института, Ереван-36, пер.Маркаряна 2