

УДК 530.145

**Численное моделирование переходного излучения от Гауссова волнового пакета,
пересекающего границу металлического зеркала**Н.И. Малыгина

Научный руководитель: доцент, к.ф.-м.н. Г.Ю. Лазаренко
Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: nim8@tpu.ru**Numerical modeling of transitional radiation from the Gaussian wave package crossing
the border of the metal mirror**N.I. Malygina

Scientific Supervisor: Ass. Prof., Ph.D., G.Yu. Lazarenko
Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050
E-mail: nim8@tpu.ru

Abstract. *In this study, the spectral-angular characteristics of transition radiation as a function of the dispersion of a Gaussian wave packet of an electron was numerically investigated. It was found that in the ultrarelativistic case, longitudinal dispersion has little effect on the properties of the radiation. However, the transverse component of the dispersion leads to significant differences in the radiation properties compared to the plane wave approximation.*

Key words: *transitional radiation, wave packages, spectrally angular distribution, ultrarelativistic particle.*

Введение

В ряде недавних работ [1, 2] было показано, что квантовые эффекты в излучении не сводятся к квантовой отдаче и излучению за счет спина. Существенную роль может играть пространственная структура заряженной частицы, что порождает интерес к поиску новых квантовых эффектов в переходном излучении, связанных с этой структурой. В [1] была получена формула для инклюзивной вероятности переходного излучения от частицы Дирака. Инклюзивной вероятностью излучения называется вероятность регистрации фотонов, усредненная по всем возможным конечным состояниям электрона.

Переходным называется такое излучение, когда частица пересекает раздел двух сред с разной диэлектрической проницаемостью. Чтобы избавиться от эффектов от рассеяния на атомах среды, на которую падает частица, необходимо, чтобы размер апертуры в зеркале был много больше характерного размера падающей частицы $1/\sigma$. В этом случае частица уже не будет пересекать границу двух сред, и такое излучение принято называть дифракционным. Механизм его возникновения хорошо изучен и описан [3, 4]: вследствие движения заряженной частицы вдоль поверхности, например, металла, возбуждаются атомные электроны внутри материала, возникают поляризационные токи, и создается вторичное электромагнитное поле, которое наблюдается в виде излучения.

Как правило, при описании свободных частиц предполагают, что значения импульсов или координат известны сколь угодно точно. Однако в действительности из-за погрешностей, имеющихся у оборудования, состояние частицы нельзя подготовить идеально точно. Волновой пакет – это суперпозиция плоских волн с различными импульсами p , которые создают неопределенность в значениях импульса σ [5]. В силу неопределенности Гейзенберга это приводит к тому, что состояние становится локализованным в координатном пространстве. Таким образом плоской волне соответствует случай, когда известно с точностью направление движения, а вероятность нахождения частицы в перпендикулярной

плоскости равномерно распределена по ней. Простейшим распределением, имеющим классический предел, является Гауссов волновой пакет.

Цель: исследовать свойства инклюзивной вероятности переходного излучения от ширины волнового пакета.

Экспериментальная часть

В данной работе было рассмотрено нормальное падение Гауссова волнового пакета электрона на зеркало в пакете *Wolfram Mathematica*. Детектор помещен со стороны падающей частицы и регистрирует только излучение, созданное перед металлической пластинкой. Волновой вектор регистрируемого фотона имеет вид:

$$\mathbf{k} = k_0(\sin \theta \cos \varphi, \sin \theta \sin \varphi, \cos \theta). \quad (1)$$

Линейные поляризации в плоскости реакции, т.е. p-поляризация, и в плоскости, перпендикулярной среднему направлению падения $\bar{p}=(0,0,\bar{p}_3)$, т.е. s-поляризация, имеют вид:

$$\mathbf{f}^{(p)}(\mathbf{k}) = (\cos \varphi \cos \theta, \sin \varphi \cos \theta, -\sin \theta), \quad \mathbf{f}^{(s)}(\mathbf{k}) = (-\sin \varphi, \cos \varphi, 0) \quad (2)$$

В [1] была приведена общая формула для расчета инклюзивной вероятности для всех видов частиц со спином 1/2. Для рассматриваемого электрона слагаемые с аномальным магнитным моментом дают малый вклад, который не наблюдался в эксперименте. Помимо этого, слагаемые, содержащие спин, не дают вклада в линейную поляризацию переходного излучения [3,4], и потому были отброшены. В результате, для расчета инклюзивной вероятности регистрации фотона была использована сокращенная формула:

$$dP(\lambda, \mathbf{k}; c) = \frac{e^2 k_0 dk_0 d\Omega}{32\pi^3} \int \frac{d\mathbf{p} c(\mathbf{p})}{|p'_3 p_3|} \sum_{r,r'} \frac{f_{ri}^{(\lambda)}(\mathbf{k}) f_{r'j}^{*(\lambda)}(\mathbf{k})}{(p'_3 - p_3 + r k_3)(p'_3 - p_3 + r' k_3)} \left\{ p^{(i} p'^{j)} - \delta^{ij} \frac{q^2}{2} \right\} \quad (3)$$

где q – переданный импульс и $c(\mathbf{p})$ – функция плотности вероятности, имеющая следующий вид:

$$c(p) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_1} e^{-\frac{p_1^2}{2\sigma_1^2}} * \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_2} e^{-\frac{p_2^2}{2\sigma_2^2}} * \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_3} e^{-\frac{(p_3-\bar{p}_3)^2}{2\sigma_3^2}}, \quad (4)$$

$$\mathbf{f}_r^{(\lambda)}(\mathbf{k}) = r \mathbf{f}^{(\lambda)}(\mathbf{k}) + (1-r) \mathbf{e}_3 f^{3(\lambda)}(\mathbf{k}), \quad r = \pm 1. \quad (5)$$

Результаты

Был исследован релятивистский случай, т.е. Лоренц-фактор $\gamma \gg 1$. При рассмотрении зависимости вероятности (3) от σ_3 значимых отличий не наблюдалось в диапазоне (0, 1) МэВ, что соответствует экспериментально достижимым значениям дисперсии волновых пакетов. В ходе исследования зависимости от перпендикулярных составляющих, т.е. σ_1, σ_2 , была выявлена существенная зависимость, которая представлена на графиках (рис. 1.).

На рис. 1, а) наблюдается логарифмическая расходимость при маленьких энергиях, это возникает вследствие проблемы инфракрасной расходимости в физике. На графике б) видно, что при $\sigma = 0$ линейная поляризация в плоскости, перпендикулярной падению тем больше, чем больше переданный импульс (квантовая отдача) и линейна относительно нее (см. формулу (3)). При отличной от нуля поперечной дисперсии, наблюдается расходимость при маленьких энергиях, при высоких энергиях вероятность убывает, как и для первой поляризации. На графике в) видно, как с увеличением ширины волнового пакета вероятность излучения перестает зависеть от полярного угла, и пропадает характерный конус, возникающий в излучении релятивистских частиц. Основной максимум s-поляризации расположен при $\theta \approx 0$ (см. рис. 1, г)).

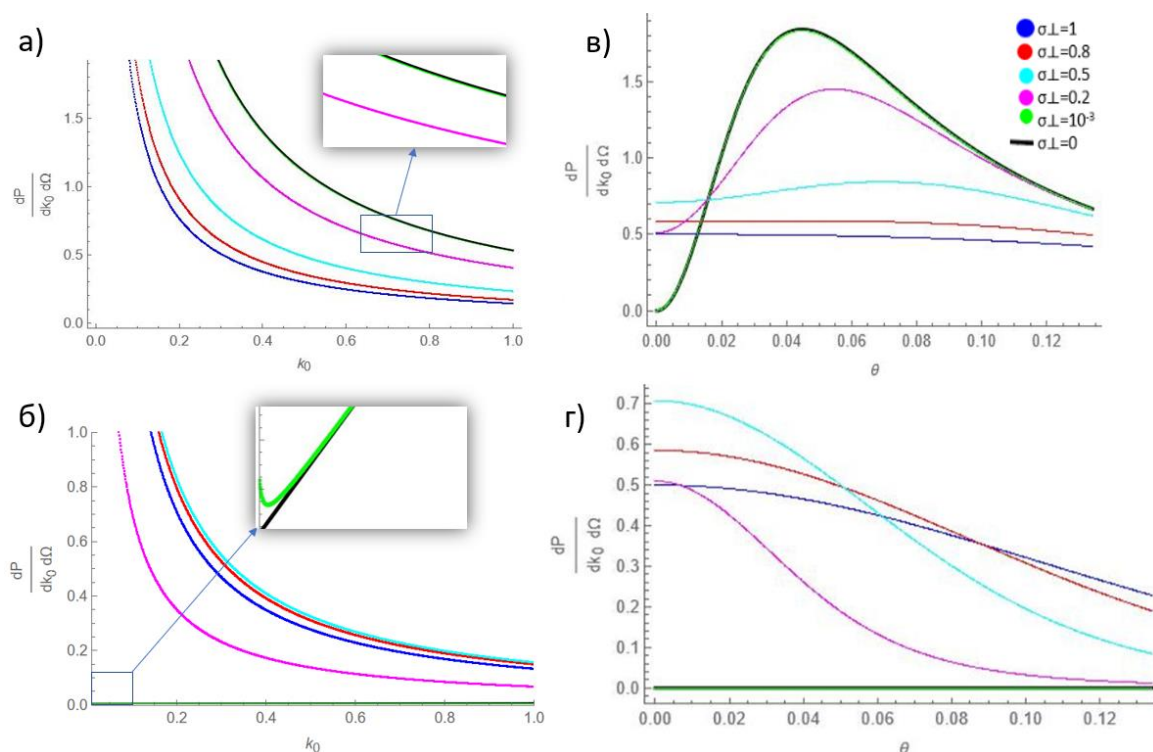


Рис. 1. Зависимость инклюзивной вероятности от угла и энергии фотона в МэВ:

- а) первая поляризация, зависимость от энергии при $\theta = 1/\gamma$,
 б) вторая поляризация, зависимость от энергии при $\theta = 1/\gamma$,
 в) первая поляризация, зависимость от угла при $k_0 = 0,05$,
 г) вторая поляризация, зависимость от угла при $k_0 = 0,05$

Заключение

В работе [2] было рассмотрено переходное излучение от закрученного электрона. Вклад за счет наличия у электрона орбитального углового момента $l = 1000$ мог доходить до 1 %. Проведенные исследования показали, что наличие отличной от нуля дисперсии волнового пакета приводит к новым эффектам в излучении того же порядка, что и классический вклад. В частности, переходное излучение перестаёт быть преимущественно линейно поляризованным. В дальнейшем исследование будет направлено на учет свойств вещества и других форм волновых пакетов.

Список литературы

1. Kazinski P.O., Lazarenko G.Yu. Transition radiation from a Dirac-particle wave packet traversing a mirror. – Текст: электронный // Physical review. – 2021. – № A 103. – DOI: 10.1103/PhysRevA.103.012216.
2. Ivanov I.P., Karlovets D.V. Detecting transition radiation from a magnetic moment. – Текст: электронный // Physical review letters. – 2013. – DOI: 10.1103/PhysRevLett.110.264801.
3. Гинзбург В.Л., Цытович В.Н., Переходное излучение и переходное рассеяние (некоторые вопросы теории): монография. – М. : Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1984. – 360 с.
4. Потылицын А.П., Рязанов М.И., Стриханов М.И. Дифракционное излучение релятивистских частиц: учебное пособие. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – 347 с.
5. Bliokh K.Y., Ivanov I.P., Guzzinati G. Theory and applications of free-electron vortex states. – Текст: электронный // Physics Reports. – 2017. – № 690. – <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2017.05.006>.