

ОСОБЕННОСТИ СПЕКТРА ИЗЛУЧЕНИЯ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ, ДВИЖУЩИХСЯ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ В ПРОЗРАЧНОЙ СРЕДЕ

А.В. Константинович, И.А. Константинович

Черновицкий национальный университет, ул. Коцюбинского 2, Черновцы, 58012, Украина
e-mail: theorphys@chnu.cv.ua; aconst@hotbox.ru

Исследования спектра излучения электронов, движущихся вдоль винтовой линии в постоянном магнитном поле в прозрачных средах и в вакууме, важно с точки зрения применения в электронике, астрофизике, в физике плазмы, в физике накопительных колец [1, 2]. В работах [2–6] исследованы особенности спектра излучения двух электронов в магнитном поле в вакууме и спектр синхротронно-черенковского излучения одного электрона в прозрачной среде. В данной работе исследован спектр излучения одного и двух электронов в магнитном поле в прозрачной среде.

Средняя мощность излучения $\bar{P}^{rad}(t)$ в прозрачной изотропной среде и в вакууме определяется при помощи соотношения [2, 3]

$$\bar{P}^{rad} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T dt \left\{ \int_{\tau} \left(\vec{j}(\vec{r}, t) \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{A}^{Dir}(\vec{r}, t)}{\partial t} - \rho(\vec{r}, t) \frac{\partial \varphi^{Dir}(\vec{r}, t)}{\partial t} \right) d\vec{r} \right\}. \quad (1)$$

Здесь $\vec{j}(\vec{r}, t)$ – плотность тока, $\rho(\vec{r}, t)$ – плотность заряда. Интегрирование производится по выделенному объёму τ . Согласно гипотезе Дирака скалярный $\varphi^{Dir}(\vec{r}, t)$ и векторный $\vec{A}^{Dir}(\vec{r}, t)$ потенциалы определяются через полуразность запаздывающих и опережающих потенциалов [2, 3].

Особенности спектра излучения двух электронов, движущихся по винтовой линии друг за другом, исследован путем комбинирования аналитических и численных методов. Закон движения и скорость j -го электрона определяются соотношениями

$$\vec{r}_j(t) = r_0 \cos\{\omega_0(t + \Delta t_j)\} \vec{i} + r_0 \sin\{\omega_0(t + \Delta t_j)\} \vec{j} + V_{\parallel}(t + \Delta t_j) \vec{k}, \quad \vec{v}_j(t) = \frac{d\vec{r}_j(t)}{dt}. \quad (2)$$

Здесь $r_0 = V_{\perp} \omega_0^{-1}$, $\omega_0 = ceB^{ext} \tilde{E}^{-1}$, $\tilde{E} = c\sqrt{p^2 + m_0^2 c^2}$, вектор магнитной индукции $\vec{B}^{ext} \parallel OZ$, V_{\perp} и V_{\parallel} – компоненты скорости, \vec{p} , \tilde{E} – импульс и энергия электрона, e , m_0 – заряд и масса покоя электрона.

Среднюю мощность излучения двух электронов в прозрачной среде получим, подставляя (2) в (1). Тогда находим

$$\bar{P}^{rad} = \int_0^{\infty} W(\omega) d\omega, \quad (3)$$

$$W(\omega) = \frac{2e^2}{\pi c^2} \int_0^{\infty} dx \mu(\omega) \omega S_2(\omega) \frac{\sin\left\{ \frac{n(\omega)\omega}{c} \eta(x) \right\}}{\eta(x)} \cos(\omega x) \left[V_{\perp}^2 \cos(\omega_0 x) + V_{\parallel}^2 - \frac{c^2}{n^2(\omega)} \right], \quad (4)$$

где $\eta(x) = \sqrt{V_{\parallel}^2 x^2 + 4 \frac{V_{\perp}^2}{\omega_0^2} \sin^2\left(\frac{\omega_0}{2} x\right)}$, $\mu(\omega)$ – магнитная проницаемость, $n(\omega)$ – показатель преломления.

Фактор когерентности двух электронов $S_2(\omega)$ определяется выражением

$$S_2(\omega) = 2 + 2 \cos(\omega \Delta t). \quad (5)$$

Здесь $\Delta t = \Delta t_2 - \Delta t_1$ – смещение во времени электронов вдоль винтовой линии.

Полная мощность излучения одного электрона в среде определяется соотношением (μ, n – постоянные величины)

$$P_{med}^{tot} = \frac{2}{3} \frac{e^2}{c^3} \mu n \omega_0^2 V_{\perp}^2 \left(1 - \frac{n^2 V^2}{c^2} \right)^{-2}, \quad \omega_0 = \frac{eB^{ext}}{m_0 c} \sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}. \quad (6)$$

Численные расчеты спектрального распределения мощности излучения проведены при $B^{ext} = 1$ Гс. Для компонент скорости $V_{\perp med} = 0,4713 \cdot c$ и $V_{\parallel med} = 0,0999 \cdot c$ на рис. 1–3 (кривые 2–4) приведено спектральное распределение мощности излучения двух электронов в зависимости от характера их расположения вдоль винтовой линии. Рассчитанная согласно соотношения (6) мощность излучения одного электрона в среде ($P_{med1}^{tot} = 0,104 \cdot 10^{-14}$ эрг/с) согласовывается с мощностью $P_{med1}^{int} = 0,102 \cdot 10^{-14}$ эрг/с, найденной путём интегрирования соотношений (3), (4), в которых $S_2(\omega)$ заменено на $S_1(\omega) = 1$. Для смещения во времени $\Delta t_1 = 0,0001\pi / \omega_{01}$ (кривая 2 на рис.1) фактор когерентности $S_2(\omega) \approx 4$, а два электрона излучают как одна заряженная частица с зарядом $2e$ и массой $2m_0$.

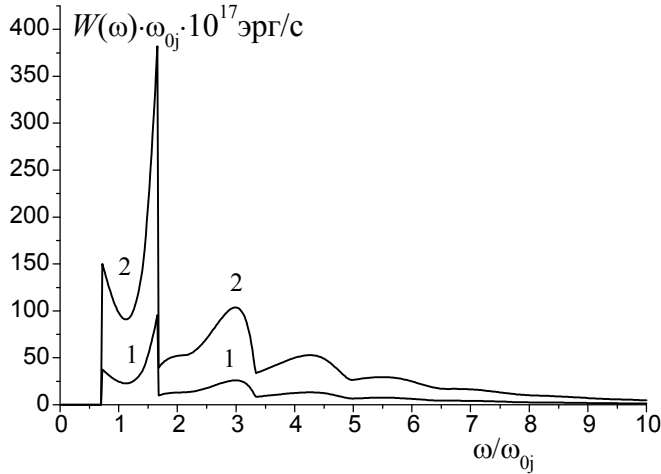


Рис. 1. Спектральное распределение мощности излучения одного электрона (кривая 1) и двух электронов в среде ($n = 1,2, \mu = 1$) при $\Delta t_1 = 0,0001\pi / \omega_{01}$ (кривая 2)

$$V_{\perp med} = 0,4713 \cdot c, \quad V_{\parallel med} = 0,3333 \cdot c, \\ P_{med1}^{tot} = 0,104 \cdot 10^{-14} \text{ эрг/с}, \\ P_{med1}^{int} = 0,102 \cdot 10^{-14} \text{ эрг/с}, \\ P_{med2}^{int} = 0,408 \cdot 10^{-14} \text{ эрг/с}, \quad r_{0j} = 984 \text{ см}, \\ \omega_{0j} = 14,36 \cdot 10^6 \text{ рад/с}, \quad j=0,1,2,3,4 \\ c = 2,997925 \cdot 10^{10} \text{ см/с}$$

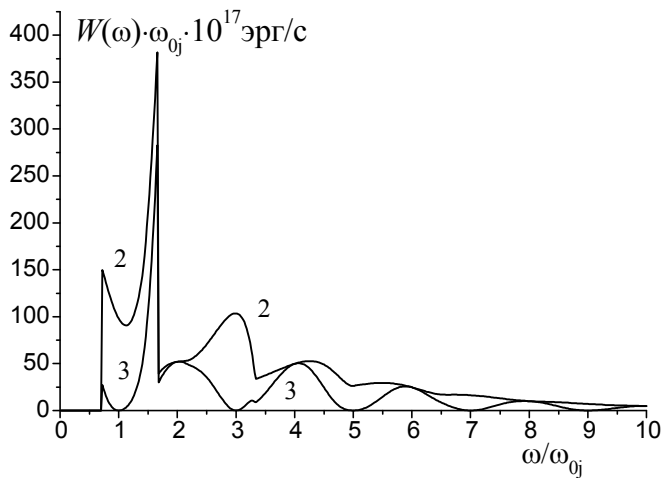


Рис. 2. Спектральное распределение мощности излучения двух электронов, движущихся друг за другом вдоль винтовой линии в прозрачной среде ($n = 1,2, \mu = 1$)

$$V_{\perp med} = 0,4713 \cdot c, \quad V_{\parallel med} = 0,3333 \cdot c, \\ \Delta t_3 = \pi / \omega_{03} \text{ (кривая 3)}, \\ P_{med2}^{int} = 0,408 \cdot 10^{-14} \text{ эрг/с}, \\ P_{med3}^{int} = 0,178 \cdot 10^{-14} \text{ эрг/с}$$

Для случая $\Delta t_3 = \pi / \omega_{03}$ функция спектрального распределения мощности излучения двух электронов имеет максимумы на частотах $\omega_{03} \cdot 2i$, $i=1, 2, \dots, 5$, а на частотах $\omega_{03} \cdot (2i-1)$, $i=1, 2, \dots, 5$ излучение отсутствует.

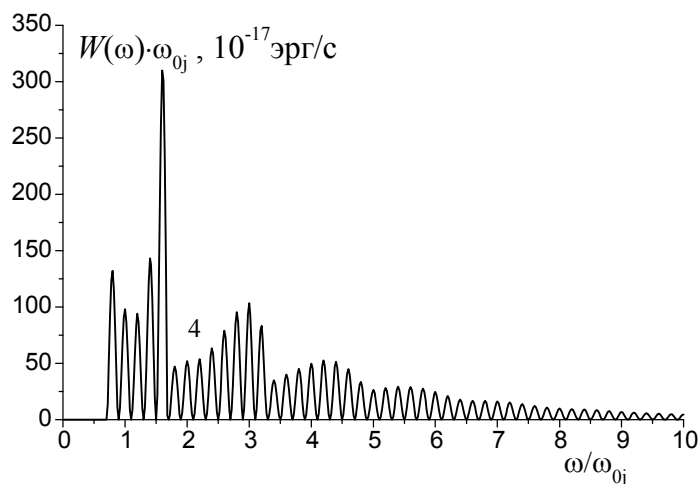


Рис. 3. Спектральное распределение мощности излучения двух электронов, движущихся друг за другом вдоль винтовой линии в прозрачной среде ($n = 1,2$, $\mu = 1$)
 $V_{\perp med} = 0,4713 \cdot c$,
 $V_{\parallel med} = 0,3333 \cdot c$,
 $\Delta t_4 = 10\pi / \omega_{04}$ (кривая 4),
 $P_{med4}^{int} = 0,209 \cdot 10^{-14}$ эрг/с

Для смещения во времени $\Delta t_4 = 10\pi / \omega_{04}$ (кривая 4 на рис. 3) имеем максимумы функции спектрального распределения на частотах $\omega_{04} \cdot \left(\frac{3}{5} + \frac{1}{5}i\right)$, $i=1, 2, \dots, 47$, а на частотах $\omega_{04} \cdot \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{5}i\right)$, $i=1, 2, \dots, 47$ излучение отсутствует.

Рассмотрим синхротронно-черенковское излучение в прозрачных средах в низкочастотной области спектра, когда $\varepsilon = const$ и $\mu = 1$. Мощность черенковского излучения при прямолинейном движении определяется соотношением ($\mu = 1$, n – постоянная величина):

$$P_{ch}^{tot} = \frac{e^2}{2c^2} V \omega_{max}^2 \left(1 - \frac{c^2}{V^2 n^2}\right). \quad (7)$$

Для показателя преломления $n = 1,305$ при скоростях $V_{\perp med1} = 0,1 \cdot 10^8$ см/с = $0,00033 \cdot c$, $V_{\parallel med1} = 0,23 \cdot 10^{11}$ см/с = $0,7672 \cdot c$, $V_{\perp med2} = 0,2 \cdot 10^{10}$ см/с = $0,06671 \cdot c$, $V_{\parallel med2} = 0,7672 \cdot c$, $V_{\perp med3} = 0,4 \cdot 10^{10}$ см/с = $0,1334 \cdot c$, $V_{\parallel med3} = 0,7672 \cdot c$, (кривые 1, 2, 3 на рис. 4), выполняются условия существования синхротронно-черенковского излучения.

Мощность излучения Черенкова при прямолинейном движении $P_{ch1}^{tot} = 0,559 \cdot 10^{-11}$ эрг/с (соотношение (7)) совпадает с мощностью синхротронно-черенковского излучения $P_{med1}^{int} = 0,56 \cdot 10^{-11}$ эрг/с, которая рассчитана согласно соотношений (3) и (4) в которых $S_2(\omega)$ заменено $S_1(\omega) = 1$ при $V_{\perp med1} = 0,1 \cdot 10^8$ см/с.

Численные расчеты спектрального распределения мощности излучения электрона, движущегося по винтовой линии в прозрачной среде ($\mu = 1$, $n = 1,305$), показали, что синхротронно-черенковское излучение представляет единый процесс [2–7].

При $V_{\perp med 3} = 0,4 \cdot 10^{10}$ см/с, $V_{\parallel med 3} = 0,23 \cdot 10^{11}$ см/с мощность излучения увеличивается до $P_{med 3}^{int} = 0,7203 \cdot 10^{-10}$ эрг/с (табл. 1), а структура спектра усложняется (рис. 4, кривая 3).

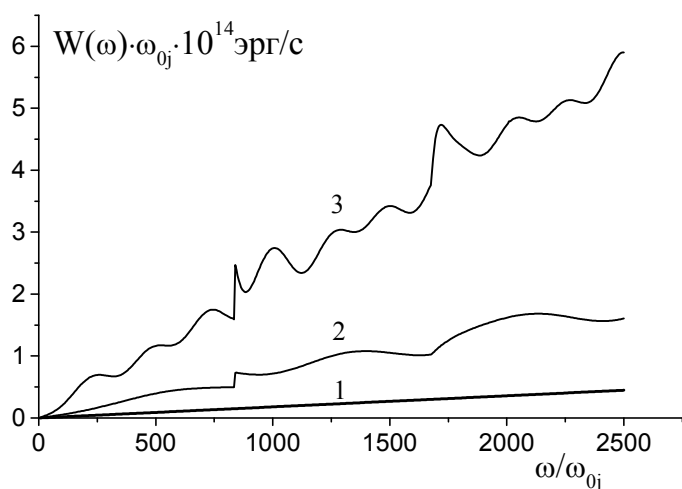


Рис. 4. Спектральное распределение мощности синхротронно-черенковского излучения электрона в прозрачной среде при $n = 1,305$

Таблица 1. Мощность синхротронно-черенковского излучения электрона при $B^{ext} = 1$ Гс

Кривая j	n	$V_{\perp med}$	$V_{\parallel med}$	V_{med}	$\omega_{0j} \cdot 10^{-6}$ рад/с	r_{0j} , см	$P_{ch j}^{tot} \cdot 10^{10}$ эрг/с	$P_{med j}^{int} \cdot 10^{10}$ эрг/с
1	1,305	$0,00033 \cdot c$	$0,7672 \cdot c$	$0,7672 \cdot c$	11,28	0,9	0,0559	0,0560
2	1,305	$0,06671 \cdot c$	$0,7672 \cdot c$	$0,7701 \cdot c$	11,22	178,3	0,2300	0,2285
3	1,305	$0,1334 \cdot c$	$0,7672 \cdot c$	$0,7679 \cdot c$	11,03	362,5	0,7220	0,7203

Численные и аналитические расчеты указывают на значительное влияние эффекта Доплера на особенности спектрального распределения мощности излучения электронов вблизи черенковского барьера. Проведенные исследования спектра излучения электронов в прозрачной среде дополняют результаты работ [2–6].

Список литературы

- [1] И.М. Тернов. УФН 165, 4, 429 (1995).
- [2] A.V Konstantinovich, S.V. Melnychuk, I.A. Konstantinovich. Journal of Optoelectronics and Advanced Materials **5**, 5, 1423 (2003).
- [3] A.V Konstantinovich, S.V. Melnychuk, I.A. Konstantinovich. Proceedings of the Romanian Academy. 4A, 3, 175 (2003).
- [4] A.V Konstantinovich, S.V. Melnychuk, I.A. Konstantinovich. Proceedings of CAOL'2003, - 1st International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers. – V.1.– Alushta, Crimea, Ukraine, 16–20 September 2003. – P. 161–164.
- [5] A.V Konstantinovich, S.V. Melnychuk, I.A. Konstantinovich. Proceedings of LFNМ 2004, – 6th International Conference on Laser and Fiber-Optical Networks Modeling. – Kharkov, Ukraine, 6–9 September 2004. – P. 266–268.
- [6] A.V. Konstantinovich, I.A. Konstantinovich. Romanian Journal of Optoelectronics 12, 2, 13 (2004).
- [7] J. Schwinger, Tsai Wu-yang, T. Erber. Ann. of Phys 96; 2, 303 (1976).