УДК 537.531

ОБ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ИЗЛУЧЕНИИ ОТДЕЛЬНЫХ ЗАРЯДОВ**И.П. Попов***Курганский государственный университет*

Цель исследования состоит в установлении условий синхротронного излучения, исходя из существенных отличий между тангенциальным и центростремительным ускорением электрических зарядов. Из того обстоятельства, что электромагнитное излучение уносит энергию, следует, что энергия излучающей системы при излучении изменяется. С этим связано следующее общеизвестное правило: изменение энергии равно совершенной работе. Доказаны три релевантные теоремы. Теорема 1: тангенциально ускоренный электрический заряд излучает электромагнитные волны. Теорема 2: нормально ускоренный электрический заряд не излучает электромагнитные волны. Общеизвестным обстоятельством является то, что центростремительная сила работы не совершает (поскольку скалярное произведение ортогональных векторов необходимо равно нулю). Доказательства теорем 1 и 2 выполнены в терминах сил. Для электрических зарядов переход к терминам ускорений осуществляется в соответствии с теоремой 3: электрический заряд удовлетворяет второму закону Ньютона. Тангенциальное ускорение электрического заряда приводит к излучению электромагнитных волн. Обобщение феномена излучения на ускорение «вообще», в том числе нормальное ускорение заряда, неправомерно. Причину синхротронного излучения следует искать в тангенциальном ускорении, обусловленном кулоновскими взаимодействиями между зарядами пучка.

Ключевые слова: излучение, заряд, тангенциальное ускорение, нормальное ускорение, энергия, работа.

DOI: 10.17212/1727-2769-2021-2-7-13

Введение

Считается, что электрический заряд, движущийся по круговой траектории, т.е. с центростремительным ускорением, необходимо должен излучать электромагнитные волны. Это распространяется, в том числе на циклотронное излучение.

Цель работы состоит в установлении условий излучения электрического заряда, исходя из существенных отличий между его тангенциальным и центростремительным ускорением.

Актуальность работы определяется широким использованием устройств, генерирующих электромагнитное излучение за счет ускорения электрических зарядов, в том числе рентгеновских установок и магнетронов [1, 2].

1. Методика

Исходным пунктом является достоверное утверждение. С ним выполняется ряд математически корректных преобразований. Следовательно, результат является необходимо достоверным.

Печальный опыт показывает, что для многих специалистов эта логика недоступна. В случае, если такой необходимо достоверный результат противоречит существующей парадигме, предпочтение практически всегда отдается парадигме, невзирая на убедительность доказательств. Это обстоятельство является почти непреодолимым препятствием получения нового знания. Ведь если оно не противоречит парадигме, то оно не новое и ценности никакой не представляет.

Остается лишь надеяться, что в данном конкретном случае произойдет исключение из правил и необходимо достоверный результат будет признан таковым.

2. Условие излучения заряда

Электромагнитное излучение уносит энергию [3, 4].

Из этого следует, что энергия излучающей системы при излучении изменяется. С этим связано

Правило (общеизвестное). Изменение энергии равно совершенной работе:

$$dE = dA.$$

Работа равна

$$dA = \mathbf{F} \cdot d\mathbf{s}.$$

Теорема 1. Тангенциально ускоренный заряд *излучает* электромагнитные волны.

Доказательство.

Пусть

$$\mathbf{F} = F \frac{\mathbf{s}}{s}.$$

Тогда

$$dA = \mathbf{F} \cdot d\mathbf{s} = F \frac{\mathbf{s}}{s} \cdot d\mathbf{s} = F ds = dE \neq 0.$$

Теорема доказана.

Теорема 2. Нормально ускоренный заряд *не излучает* электромагнитные волны.

Доказательство.

Пусть

$$\mathbf{F} = F \frac{\mathbf{r}}{r}, \quad \mathbf{r} \perp \mathbf{s}.$$

Тогда

$$dA = \mathbf{F} \cdot d\mathbf{s} = F \frac{\mathbf{r}}{r} \cdot d\mathbf{s} = 0.$$

Теорема доказана.

Теорема 2 формализует общеизвестное в механике обстоятельство, заключающееся в том, что центростремительная сила работы не совершает (поскольку скалярное произведение ортогональных векторов необходимо равно нулю).

3. О динамике заряда

Доказательства теорем 1 и 2 выполнены в терминах сил. Для инертных тел переход к терминам ускорений осуществляется в соответствии со вторым законом Ньютона.

Для электрических зарядов подобный переход возможен с учетом выражения

$$m_e = k \frac{e^2 \mu_0}{b}, \quad (1)$$

где m_e – масса электрона, e – его заряд, μ_0 – магнитная постоянная, b – величина, имеющая размерность длины, k – безразмерный коэффициент [5].

Теорема 3. Электрический заряд удовлетворяет второму закону Ньютона.

Доказательство.

Пусть электрон движется в направлении $\mathbf{s}$ со скоростью $\mathbf{v} = v\mathbf{s}/s$.

Выражение (1), строго говоря, не предполагает какой-то конкретной геометрической формы электрона, при этом оно позволяет временно формально представить его в виде эквивалентной безмассовой заряженной сферы радиуса $k_1 b$. Здесь k_1 – коэффициент пропорциональности, который при дальнейшем рассмотрении определяется однозначно.

Энергия электростатического поля равномерно заряженной сферы радиусом $k_1 b$ и зарядом e определяется выражением

$$W_\varepsilon = \frac{1}{2} \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 k_1 b} \quad (2)$$

Поскольку заряженная сфера поступательно движется, имеет место магнитное поле, напряженность которого равна

$$\mathbf{H} = \frac{1}{\mu_0 c^2} [\mathbf{v}, \mathbf{E}],$$

где $\mathbf{E}$ – напряженность электрического поля. Энергии электрического и магнитного полей соотносятся следующим образом:

$$\begin{aligned} dW_\varepsilon &= \frac{\varepsilon_0 E^2}{2} dV = \frac{E^2}{2c^2 \mu_0} dV, \\ dW_\mu &= \frac{\mu_0 H^2}{2} dV = \frac{\mu_0}{2} \left\{ \frac{1}{\mu_0 c^2} [\mathbf{v}, \mathbf{E}] \right\}^2 dV = \\ &= k_2 \frac{E^2 v^2}{2\mu_0 c^4} dV = k_2 dW_\varepsilon \frac{v^2}{c^2}, \end{aligned}$$

где k_2 – коэффициент пропорциональности, обусловленный пространственной конфигурацией магнитного поля [6].

С учетом (2)

$$W_\mu = k_2 W_\varepsilon \frac{v^2}{c^2} = \frac{1}{2} \frac{k_2 e^2 v^2}{4\pi\varepsilon_0 k_1 b c^2} = k \frac{e^2 \mu_0 v^2}{2b}.$$

Соответствующим образом подбирая k_1 , можно добиться равенства

$$k = \frac{k_2}{4\pi k_1}.$$

Сила является градиентом энергии:

$$\begin{aligned} \mathbf{F} = \frac{dW_\mu}{d\mathbf{r}} &= k \frac{e^2 \mu_0}{2b} \frac{d(v^2)}{d\mathbf{r}} = k \frac{e^2 \mu_0}{b} \mathbf{v} \frac{d\mathbf{v}}{d\mathbf{r}} = k \frac{e^2 \mu_0}{b} \mathbf{v} \frac{d\mathbf{v}/dt}{d\mathbf{r}/dt} = \\ &= k \frac{e^2 \mu_0}{b} \mathbf{v} \frac{1}{\mathbf{v}} \frac{d^2 \mathbf{r}}{dt^2} = k \frac{e^2 \mu_0}{b} \frac{d^2 \mathbf{r}}{dt^2}. \end{aligned}$$

С учетом (1)

$$\mathbf{F} = m_e \frac{d^2 \mathbf{r}}{dt^2}.$$

Теорема доказана.

Теорема 3 позволяет перейти к терминам ускорений в теоремах 1 и 2.

Выводы

Считается, что циклотронное излучение происходит в результате нормального ускорения зарядов.

Это и есть парадигма, о которой шла речь в методике. Эта парадигма противоречит *необходимо достоверному* результату – теореме 2. Следовательно, она (парадигма) недостоверна. В этом нет ничего плохого и даже странного. История науки говорит о том, что *все научные парадигмы являются недостоверными*.

В свете теорем 1 и 2 причину циклотронного излучения следует искать в тангенциальном ускорении, обусловленном кулоновскими взаимодействиями зарядов пучка [7].

Никто не сомневался, что тангенциальное ускорение электрического заряда приводит к излучению электромагнитных волн [8–10]. Вот только укоренившееся обобщение феномена излучения на ускорение «вообще», в том числе нормальное ускорение заряда, неправомерно.

Парадоксальность ситуации состоит в том, что теоремы 1 и 2 не выглядят сенсационными.

Результаты исследования могут использоваться при построении теоретических моделей явлений и процессов, а также учитываться в технических приложениях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Микроструктура кольцевых полимерных сферолитов: исследование с помощью микрофокусной рентгеновской дифракции / Д.А. Иванов, В.А. Батаев, А.Ю. Огнев, М. Rosenthal, Д.В. Анохин, В.А. Лучников, R.J. Davies, C. Riekel, M. Burghammer, G. Bar, В.В. Базаркина // Доклады АН ВШ РФ. – 2010. – № 2. – С. 54–65.
2. Рентгеновское излучение высоковольтных элементов ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией / А.Г. Башкирцев, А.А. Иванов, Д.А. Касатов, А.С. Кузнецов, И.Н. Сорокин, С.Ю. Таскаев, В.Я. Чудаев // Доклады АН ВШ РФ. – 2013. – № 1. – С. 56–62.

3. **Гайслер А.В., Щеглов Д.В.** Полупроводниковый брэгговский микрорезонатор для излучателей одиночных фотонов // Доклады АН ВШ РФ. – 2014. – № 4. – С. 21–32.
4. Поляризационно-угловая анизотропия нелинейных параметрических резонансов двухфотонного рассеяния на плазменных колебаниях / В.В. Анциферов, В.В. Макаров, Д.И. Свириденко, Г.И. Смирнов // Доклады АН ВШ РФ. – 2005. – № 1. – С. 6–11.
5. **Попов И.П.** Сведение постоянной Планка к классическим фундаментальным константам // Вестник Удмуртского университета. Физика и химия. – 2014. – № 3. – С. 51–54.
6. **Павлов В.Д.** Магнитный поток и его квантование // Известия Уфимского научного центра РАН. – 2020. – № 4. – С. 25–28. – DOI: 10.31040/2222-8349-2020-0-4-25-28.
7. **Карпов Г.В., Стюф А.С.** Новая система измерения положения пучка для форинжектора инжекционного комплекса // Доклады АН ВШ РФ. – 2013. – № 2. – С. 110–117.
8. Электрон-позитронный коллайдер ВЭПП-4М: состояние и перспективы / А.Н. Алешаев, В.В. Анашин, О.В. Анчугов, В.Е. Блинов, А.В. Богомяков, Д.Б. Буренков, С.П. Васичев, С.А. Глухов, Ю.М. Глуховченко, О.П. Гордеев, Г.А. Гусев, В.Н. Ерохов, К.В. Золотарёв, В.Н. Жилич, А.И. Жмака, А.Н. Журавлёв, В.В. Каминский, С.Е. Карнаев, Г.В. Карпов, В.А. Киселёв и др. // Доклады АН ВШ РФ. – 2013. – № 1. – С. 35–46.
9. **Кибис О.В.** Электрон-фотонные состояния в графене // Доклады АН ВШ РФ. – 2011. – № 1. – С. 6–11.
10. Статус электрон-позитронного коллайдера ВЭПП-2000 / Д.Е. Беркаев, А.А. Борисов, Г.А. Гусев, Ю.М. Жаринов, И.М. Землянский, А.Н. Кирпотин, И.А. Кооп, В.С. Кузьминых, А.П. Лысенко, И.Н. Нестеренко, А.В. Отбоев, О.А. Павлов, Е.А. Переведенцев, Ю.А. Роговский, А.Л. Романов, А.Н. Скринский, П.Ю. Шатунов, Ю.М. Шатунов, Д.Б. Шварц // Доклады АН ВШ РФ. – 2013. – № 2. – С. 16–25.

ON ELECTROMAGNETIC RADIATION OF INDIVIDUAL CHARGES

Popov I.P.

Kurgan State University, Kurgan, Russia

The aim of the study is to establish the conditions for synchrotron radiation based on significant differences between tangential and centripetal accelerations of electric charges. From the fact that electromagnetic radiation carries away energy, it follows that the energy of the radiating system changes during radiation. Related to this is the following well-known rule: a change in energy is equal to work done. Three relevant theorems are proved. Theorem 1 states that a tangentially accelerated electric charge emits electromagnetic waves. Theorem 2 states that a normally accelerated electric charge does not emit electromagnetic waves. It is a well-known circumstance that the centripetal force does not perform work (since the scalar product of orthogonal vectors must be equal to zero). The proofs of Theorems 1 and 2 are performed in terms of forces. For electric charges, the transition to the terms of accelerations is carried out in accordance with Theorem 3 which states that an electric charge satisfies Newton's second law. The tangential acceleration of an electric charge leads to the emission of electromagnetic waves. Generalization of the phenomenon of radiation to acceleration in general, including normal charge acceleration, is false. The cause of synchrotron radiation should be sought in the tangential acceleration due to Coulomb interactions between the beam charges.

Keywords: radiation, charge, tangential acceleration, normal acceleration, energy, work.

DOI: 10.17212/1727-2769-2021-2-7-13

REFERENCES

1. Ivanov D.A., Bataev V.A., Ognev A.Yu., Rosenthal M., Anokhin D.V., Luchnikov V.A., Davies R.J., Riekel C., Burghammer M., Bar G., Bazarkina V.V. Mikrostruktura kol'tsevykh polimernykh sferolitov: issledovanie s pomoshch'yu mikrofokusnoi rentgenovskoi difraktsii [Microstructure of ring polymeric spherulites: study using microfocus X-ray diffraction]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2010, no. 2, pp. 54–65.
2. Bashkirtsev A.G., Ivanov A.A., Kasatov D.A., Kuznetsov A.S., Sorokin I.N., Taskaev S.Yu., Chudaev V.Ya. Rentgenovskoe izluchenie vysokovol'tnykh elementov uskoritelya-tandema s vakuumnoi izolyatsiei [X-ray radiation of high-voltage elements of the tandem accelerator with vacuum insulation]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2013, no. 1, pp. 56–62.
3. Gaisler A.V., Shcheglov D.V. Poluprovodnikovyi breggovskii mikrorezonator dlya izluchatelei odinochnykh fotonov [Semiconductor Bragg microcavity for single photon sources]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2014, no. 4, pp. 21–32.
4. Antsiferov V.V., Makarov V.V., Sviridenko D.I., Smirnov G.I. Polyarizatsionno-uglovaya anizotropiya nelineynykh parametricheskikh rezonansov dvukhfotonnogo rasseyaniya na plazmennyykh kolebaniyakh [Polarization-angular anisotropy of nonlinear parametric resonances of two-photon scattering by plasma oscillations]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2005, no. 1, pp. 6–11.
5. Popov I.P. Svedenie postoyannoi Planka k klassicheskim fundamental'nym konstantam [Reduction of Planck's constant to classical fundamental constants]. *Vestnik Udmurtskogo universiteta. Fizika i khimiya = Bulletin of the Udmurt University. Physics and chemistry*, 2014, no. 3, pp. 51–54.
6. Pavlov V.D. Magnitnyi potok i ego kvantovanie [Magnetic flux and its quantization]. *Izvestiya Ufimskogo Nauchnogo tsentra RAN = Proceedings of the RAS Ufa Scientific centre*, 2020, no. 4, pp. 25–28. DOI: 10.31040/2222-8349-2020-0-4-25-28.
7. Karpov G.V., Styuf A.S. Novaya sistema izmereniya polozheniya puchka dlya forinzhektora inzhektionsnogo kompleksa [New system for measuring the position of the beam for the forinjector of the injection complex]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2013, no. 2, pp. 110–117.
8. Aleshaev A.N., Anashin V.V., Anchugov O.V., Blinov V.E., Bogomyagkov A.V., Burenkov D.B., Vasichev S.P., Glukhov S.A., Glukhovchenko Yu.M., Gordeev O.P., Gusev G.A., Erokhov V.N., Zolotarev K.V., Zhilich V.N., Zhmaka A.I., Zhuravlev A.N., Kaminsky V.V., Karnaev S.E., Karpov G.V., Kiselev V.A. et. al. Elektron-pozitronnyi kollaidier VEPP-4M: sostoyanie i perspektivy [Electron-positron collider VEPP-4M: state and prospects]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2013, no. 1, pp. 35–46.
9. Kibis O.V. Elektron-fotonnye sostoyaniya v grafene [Electron-photon states in graphene]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2011, no. 1, pp. 6–11.
10. Berkaev D.E., Borisov A.A., Gusev G.A., Zharinov Yu.M., Zemlyansky I.M., Kyrpotin A.N., Koop I.A., Kuzminykh V.S., Lysenko A.P., Nesterenko I.N., Otboev A.V., Pavlov O.A., Perevedentsev E.A., Rogovsky Yu.A., Romanov A.L., Skriskiy A.N., Shatunov P.Yu., Shatunov Yu.M., Shwartz D.B. Status elektron-pozitronnogo kollaidiera VEPP-2000 [VEPP-2000 electron-positron collider status]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2013, no. 2, pp. 16–25.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Попов Игорь Павлович – старший преподаватель кафедры «Общая физика», Курганский государственный университет. Опубликовано более 100 работ, в том числе в области электродинамики. (Адрес: 640015, Курган, ул. Парижской Коммуны, 33. E-mail: ip.popow@yandex.ru).

Popov Igor Pavlovich – senior lecturer at the Department of General Physics, Kurgan State University. More than 100 papers have been published including papers in the field of electrodynamics. (Address: 33, Commune Street, Kurgan, 640015 E-mail: ip.popow@yandex.ru).

Статья поступила 20 мая 2021

Received May 20 2021

To references:

Popov I.P. Ob elektromagnitnom izluchenii ot del'nykh zaryadov [On electromagnetic radiation of individual charges]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2021, no. 2 (51), pp. 7–13. DOI: 10.17212/1727-2769-2021-2-7-13.