

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 537.81

DOI: 10.17223/00213411/63/11/179

Б.А. ЗОН¹, В.Е. ЧЕРНОВ¹, М.Я. АМУСЬЯ^{2,3}

ОБ ИЗЛУЧЕНИИ ПРОИЗВОЛЬНО ДВИЖУЩЕГОСЯ ПОСТОЯННОГО МАГНИТНОГО МОМЕНТА *

Ключевые слова: магнитный момент, электромагнитное излучение.

Хорошо известны формулы, определяющие электромагнитное поле, излучаемое равноускоренно движущимся свободным зарядом, в том числе и формула Лармора для интенсивности этого излучения [1]. Достаточно естественно было ожидать существования подобного излучения и для магнитного момента. Такая возможность была бы довольно актуальна для астрофизики, поскольку постоянный магнитный момент, связанный со спином электрона, существует в атоме водорода – наиболее распространенном во Вселенной химическом элементе. Слабые электромагнитные поля, излучаемые атомом водорода, могут использоваться для диагностики гравитационных полей, в том числе связанных с флуктуациями плотности темной материи [2–4]. Дополнительную актуальность этой проблеме придает существенный прогресс в разработке детекторов одиночных фотонов на основе сверхпроводящих нанопроволочек [5–7].

В данной работе показывается, однако, что такое излучение отсутствует, причем не только для равноускоренного движения магнитного момента, что характерно для движения атома водорода в однородном гравитационном поле, но и при его движении по произвольному закону.

Перейдем теперь к вычислениям. Будем описывать излучение электромагнитных волн с помощью вектора Герца \mathbf{Z} . Для переменного магнитного момента \mathbf{M} вектор Герца вдали от области, где находится магнитный момент (в волновой зоне), определяется выражением (см., например, [8], с. 545)

$$\mathbf{Z}(\mathbf{r}, t) = [\mathbf{M}(t - \tau) \times \mathbf{n}] / r. \quad (1)$$

Здесь $\mathbf{n} = \mathbf{r}/r$ – единичный вектор, направленный от излучающей области, которую будем считать находящейся вблизи начала координат, к точке наблюдения \mathbf{r} ; $\tau = r/c$ – время запаздывания; c – скорость света. Пусть теперь постоянный магнитный момент \mathbf{M} движется по некоторой траектории $\mathbf{r}_0(t)$. Тогда для вектора Герца получаем, по аналогии с (1), следующие формулы:

$$\begin{aligned} \mathbf{Z}(\mathbf{r}, t) &= [\mathbf{M} \times \mathbf{N}] / |\mathbf{r} - \mathbf{r}_0(t - T)|, \\ \mathbf{N} &= (\mathbf{r} - \mathbf{r}_0(t - T)) / |\mathbf{r} - \mathbf{r}_0(t - T)|, \\ T &= |\mathbf{r} - \mathbf{r}_0(t - T)| / c. \end{aligned} \quad (2)$$

Как видно, время запаздывания T определяется теперь неявно, как решение некоего уравнения. Для больших расстояний \mathbf{r} от магнитного момента до точки наблюдения, значительно превышающих конечные значения $\mathbf{r}_0(t - T)$, из формулы (2) следует

$$\mathbf{Z}(\mathbf{r}, t) \sim 1/r, \quad (3)$$

как и должно быть для излучения электромагнитных волн. Однако для векторного потенциала, который определяется через вектор Герца выражением

$$\mathbf{A} = (1/c) \partial \mathbf{Z} / \partial t, \quad (4)$$

соотношение, аналогичное (3), уже не выполняется. Действительно, нетрудно видеть, что при дифференцировании выражения (2) по времени возникает зависимость

$$\mathbf{A} \sim 1/r^2, \quad (5)$$

а столь быстрое убывание поля на больших расстояниях от источника уже не соответствует излучению электромагнитных волн. Таким образом, постоянный магнитный момент, движущийся по произвольной траектории, не излучает электромагнитных волн.

Полученный результат допускает довольно ясную физическую интерпретацию. Излучаемая энергия может возникнуть, в принципе, только из кинетической энергии частицы, обладающей магнитным моментом, в нашем случае – из кинетической энергии движущегося атома водорода. Однако в уравнениях Максвелла, описывающие электромагнитное излучение, кинетическая энергия атома водорода никак не входит. Поэтому трансформации кинетической энергии в электромагнитную не возникает.

Важно также отметить, что проведенное выше рассмотрение предполагало сохранение во время движения атома водорода постоянного направления его спинового магнитного момента. Такое предположение

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и ЧНФ в рамках научного проекта № 19-52-26006.

вполне естественно для квантовых частиц, поскольку направление электронного спина является интегралом движения (в пренебрежении сверхтонким взаимодействием). Решение задачи об излучении классической частицы, обладающей магнитным моментом и вращающейся вокруг оси, не совпадающей с направлением магнитного момента, приведено в [8].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теория поля. – М.: Физматлит, 2003.
2. Taylor A. N. and Rowan-Robinson M. // *Nature*. – 1992. – V. 359. – P. 396. DOI: 10.1038/359396a0.
3. Dodelson S. *Modern Cosmology*. – Academic Press, 2003.
4. Maeder A. and Gueorguiev V. G. // *Phys. Dark Universe*. – 2019. – V. 25. – P. 100315. DOI: 10.1016/j.dark.2019.100315.
5. Calandri N., Zhao Q.-Y., Zhu D., et al. // *Appl. Phys. Lett.* – 2016. – V. 109. – P. 152601. DOI: 10.1063/1.4963158.
6. Zhao Q.-Y., Zhu, D., Calandri N., et al. // *Nature Photonics*. – 2017. – V. 11. – P. 247. DOI: 10.1038/nphoton.2017.35.
7. Korzh B., Zhao Q.-Y., Allmaras J., et al. // *Nature Photonics*. – 2020. – V. 14. – P. 250. DOI: 10.1038/s41566-020-0589-x.
8. Батыгин В. В., Топтыгин И. Н. Сборник задач по электродинамике. – М.: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2002.

Поступило в редакцию 13.04.2020.

¹ Воронежский государственный университет, г. Воронеж, Россия

² Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

³ Институт физики им. Дж. Рака Еврейского университета, г. Иерусалим, Израиль

Зон Борис Абрамович, д.ф.-м.н., профессор, профессор каф. математической физики ВГУ, e-mail: zon@niif.vsu.ru;

Чернов Владислав Евгеньевич, д.ф.-м.н., доцент, профессор каф. математической физики ВГУ, e-mail: chernov@niif.vsu.ru;

Амусья Мирон Янкелевич, д.ф.-м.н., профессор ФТИ им. А.Ф. Иоффе, д.ф.-м.н., профессор ИФ им. Дж. Рака Еврейского университета, e-mail: Miron.Amusia@mail.huji.ac.il.