

9

«ПОЮЩИЕ ЭЛЕКТРОНЫ»¹

В своей Нобелевской лекции [1], прочитанной в Стокгольме 11 декабря 1958 г., Игорь Евгеньевич Тамм говорил: «Мы воспринимаем излучение волн Маха летящим снарядом в виде хорошо известного свиста или воя, возникающего при его движении. Именно поэтому, выяснив совершенно аналогичный механизм излучения Вавилова–Черенкова, т. е. излучения света при движении быстрых электронов, мы стали называть это явление «поющим электроном».

Здесь я должен прояснить, что мы в Советском Союзе называем это излучение «излучение Вавилова–Черенкова», а не просто «черенковским излучением», чтобы подчеркнуть определяющую роль покойного С. И. Вавилова в открытии этого излучения».

Приходилось помимо названия «поющие электроны» слышать и термин «светящиеся электроны». Впрочем, оба эти названия сейчас редко употребляются, говорят просто об излучении Вавилова–Черенкова или еще чаще, особенно на Западе, о черенковском излучении. Объясняется это, в первую очередь, тем, что в первой статье, посвященной открытию эффекта, фигурирует лишь фамилия Черенкова [2].

Вавилов же в том же номере журнала [3] поместил лишь свое замечание, касающееся природы обнаруженного свечения (он отметил, что свечение связано с комптоновскими электронами, а не с гамма-лучами). Между тем как сама постановка экспериментов Черенкова, так и непосредственное руководство ими принадлежали Вавилову. Его определяющая роль ясна из изложения истории вопроса Франком [4] и особенно из заметки Добротина, Фейнберга и Фока [5]. Итак, только название эффект (излучение) Вавилова–Черенкова является оправданным².

Теория эффекта Вавилова–Черенкова (В.Ч.), открытого в 1934 г. [2, 3], т. е. 60 лет назад, была построена в 1937 г. И. Е. Таммом и

И. М. Франком [6]*). В этой работе было сделано главное: выяснена физическая природа явления, что было совсем нетривиально, и получены формулы

$$\cos \theta = \frac{c}{nv}, \quad (1)$$

$$W = \frac{q^2 l}{c^2} \int_{vn/c-1}^1 \omega \left(1 - \frac{c^2}{n^2(\omega)v^2} \right) d\omega, \quad (2)$$

определяющие направление излучения (θ — угол между скоростью частицы \mathbf{v} и волновым вектором света) и его интенсивность (W — потеря энергии на излучение В.Ч. на пути l частицей с зарядом q , движущейся со скоростью v в прозрачной среде с показателем преломления $n(\omega)$). Большого от краткой статьи [6] в Докладах и нельзя было ожидать. Разумеется, как И. Е. Тамм, так и И. М. Франк не ограничились сделанным в [6], а продолжали исследовать эффект В.Ч. Но в этом отношении стиль и характер их деятельности был разным. Для Франка исследование излучения В.Ч. и вообще излучения равномерно движущихся источников (сюда помимо эффекта В.Ч. относятся эффект Доплера и переходное излучение) стало, можно сказать, делом жизни (впрочем, Франк большое внимание уделял также нейтронной физике).

Сделанное Франком в области изучения эффекта В.Ч. просуммировано в его монографии [4]. Для И. Е. Тамма, напротив, занятия теорией излучения В.Ч. было, скорее, эпизодом. Да, собственно, эффектом В.Ч. Игорь Евгеньевич занимался сравнительно недолго. После основополагающей работы с Франком [6] Игорь Евгеньевич выяснил ряд моментов, оставшихся открытыми. При этом, как указывает Игорь Евгеньевич в конце соответствующей статьи [7], он широко обсуждал проблему с Л. И. Мандельштамом, отвечал на поставленные вопросы. Сюда относится рассмотрение излучения при равномерном движении заряда не все время, а лишь на ограниченном интервале времени. Конкретно, было предположено, что заряд покоится до момента $-t_0$, а затем мгновенно ускоряется до скорости v и, наконец, мгновенно останавливается в момент t_0 . Поле излучения при этом складывается из поля излучения, возникающего в моменты $\pm t_0$ за счет ускорения и, если $v > c/n(\omega)$, из поля излучения В.Ч. Таким образом удастся выяснить удельный вес излучения обоих типов в зависимости от t_0

*) В русском алфавите буква Т предшествует букве Ф — это и определило порядок следования фамилий авторов в русской публикации [6]. Но в латинском алфавите буква F стоит раньше T, что нашло отражение в статье Тамма [7], опубликованной на английском языке. Замечу, что в аналогичном положении оказались и мы с Франком — в русских публикациях фигурируют Гинзбург и Франк, а в английских — Frank and Ginzburg.

и частоты излучения ω . Далее в [7] излучение В.Ч. было рассчитано не в лабораторной системе как обычно, а в системе отсчета, в которой излучатель (электрон) покоится. Наконец, найдено само поле заряда, в частности в волновой зоне, а также сделан ряд дополнительных замечаний. Помимо этой статьи [7] Игорь Евгеньевич по проблеме эффекта В.Ч. опубликовал лишь (совместную с Франком) заметку [8] полубзорного типа и уже упоминавшуюся Нобелевскую лекцию [1].

На первый взгляд может показаться, что работами Тамма и Франка проблема излучения В.Ч. была в теоретическом плане в основном исчерпана. Но фактически дело обстояло совершенно иначе: как и обычно в случае богатых содержанием явлений, выявляются все новые и новые вопросы, появляются приложения в различных областях физики и т. д. Настоящая заметка не имеет своей целью осветить историю исследований и применений эффекта В.Ч. за 60 лет, на эту тему мы сделаем лишь несколько замечаний.

Регистрация свечения В.Ч. может служить, во-первых, способом констатации прохождения заряженной частицы через детектор (такой детектор часто называют черенковским счетчиком). При этом определяется и направление движения частицы, поскольку угол θ в формуле (1) — это угол между направлением скорости и волновым вектором излучаемой волны. Во-вторых, измерение угла θ при известном показателе преломления среды в счетчике $n(\omega)$ позволяет определить скорость частицы v . Если одновременно измеряется (например, по отклонению в магнитном поле) и импульс частицы $p = \frac{mv}{\sqrt{1-v^2/c^2}}$, то определяется также масса

частицы m и ее энергия $E = \frac{mc^2}{\sqrt{1-v^2/c^2}}$. В-третьих, q в формуле

(2) для интенсивности излучения — это заряд частицы и, таким образом, измерение W позволяет найти q . Если речь идет о частице с зарядом $q = eZ$, где e — заряд электрона, то измерение q дает величину Z . Сказанное и определяет, в принципе, возможности черенковских счетчиков, широко используемых в физике высоких энергий [9–11]. В частности, излучение В.Ч. используется при изучении широких атмосферных ливней, создаваемых гамма-фотонами с достаточно высокими энергиями (практически, речь идет об энергиях $E_\gamma > 10^{11} - 10^{12}$ эВ; см. [10]). Применение эффекта В.Ч. в физике высоких энергий (сюда относится, в частности, изучение гамма-лучей и нейтрино) — это целая большая глава в науке, ей посвящена масса работ, действуют и проектируются многочисленные установки [10, 11].

Если не касаться применений эффекта В.Ч., то в области теории после работ Тамма и Франка был выяснен ряд важных вопросов. Отметим здесь рассмотрение эффекта В.Ч. в анизотропной среде (в кристаллах) [12, 17, 18], квантовую теорию эффекта В.Ч. [13, 17], излучение В.Ч. в каналах и щелях [14, 17], учет поглощения [15, 16], излучение магнитного монополя и различных электрических и магнитных мультиполей [4, 13, 17], учет одновременного появления излучения В.Ч. и переходного излучения [19]. Ссылки [4, 17–19] — это обзорная литература.

Разумеется, после 60 лет исследований «поющих электронов» как в области теории, так и на эксперименте достигнуто известное насыщение. Но это насыщение не является, конечно, абсолютным и никогда таким не будет. Жизнь продолжается². Заряженные частицы продолжают «петь» в многочисленных установках и в земной атмосфере. Это «пение» лишний раз напоминает нам о классических работах Игоря Евгеньевича Тамма, столетие со дня рождения которого мы отмечаем.

Список литературы

1. Тамм И. Е. УФН **68** 387 (1959); Собрание научных трудов. Т. I. — М.: Наука, 1975. С. 121.
2. Черенков П. А. ДАН СССР **2** 451 (1934).
3. Вавилов С. И. ДАН СССР **2** 457 (1934).
4. Франк И. М. Излучение Вавилова–Черенкова. Вопросы теории. — М.: Наука, 1988.
5. Добротин Н. А., Фейнберг Е. Л., Фок М. В. Природа № 11 58 (1991).
6. Тамм И. Е., Франк И. М. ДАН СССР **14** 107 (1937).
7. Тамм И. Е. Journ. Phys. USSR **1** 439 (1939). Русский перевод: Тамм И. Е. Собрание научных трудов. Т. I. — М.: Наука, 1975. С. 77.
8. Тамм И. Е., Франк И. М. Труды ФИАН СССР **2** 63 (1944); Собрание научных трудов И. Е. Тамма. Т. I. — М.: Наука, 1975. С. 113.
9. Зрелов В. П. Излучение Вавилова–Черенкова и его применение в физике высоких энергий. — М.: Атомиздат, 1968.
10. Черенковские детекторы и их применение в науке и технике. — М.: Наука, 1990.
11. CERN Courier. **34**(1) 22 (1994).
12. Гинзбург В. Л. ЖЭТФ **10** 608 (1940).
13. Гинзбург В. Л. ЖЭТФ **10** 589 (1940).
14. Гинзбург В. Л., Франк И. М. ДАН СССР **56** 689 (1947).
15. Fermi E. Phys. Rev. **57** 485 (1940).

17. Киржниц Д. А. Некоторые проблемы современной ядерной физики. — М.: Наука, 1989. 144 с.
17. Гинзбург В. Л. Теоретическая физика и астрофизика. — М.: Наука, 1987.
18. Болотовский Б. М. УФН **62** 201 (1957); **75** 295 (1961).
19. Гинзбург В. Л., Цытович В. Н. Переходное излучение и переходное рассеяние. — М.: Наука, 1984.

Примечание

1. Заметка опубликована в номере журнала «Природа», посвященном 100-летию со дня рождения И. Е. Тамма (Природа № 7 105 (1995)).
2. См. также статью 2 в настоящем сборнике.