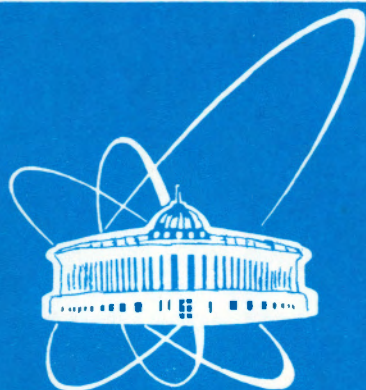


94-177



сообщения  
объединенного  
института  
ядерных  
исследований  
дубна

Д2-94-177

В.Н.Стрельцов

ИЗЛУЧЕНИЕ РАВНОМЕРНО ДВИЖУЩЕГОСЯ  
ЗАРЯДА

1994

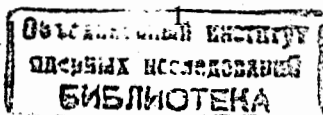
Как известно, полученные на основании потенциалов Лиенара — Вихерта выражения для напряженностей поля состоят из двух частей. Первая («скоростная») часть зависит лишь от скорости и не зависит от ускорения; вторая («ускорительная») часть линейно зависит от ускорения. При этом первая часть убывает с расстоянием, как  $R^{-2}$ , тогда как поле, зависящее от ускорения, изменяется, как  $R^{-1}$ . Поэтому вектор Пойнтинга (поток энергии) будет убывать, как  $R^{-4}$  и  $R^{-2}$  соответственно. Только во втором случае интеграл по сфере радиуса  $R$  будет конечным и не зависящим от  $R$ . Это приведет к возникновению конечного потока энергии через сферу любого радиуса, а это, как утверждается (см., например, [1]), означает излучение света.

Следует заметить, что, конечно, физически мы не можем различить эти части поля, т.е. виртуальные фотоны, образующие поле движущегося заряда «не знают», какой части они соответствуют. Иначе говоря, кванты поля «не помнят» механизма своего испускания. Поэтому речь может идти только о количественном различии вкладов этих слагаемых.

Излучение Черенкова служит иллюстрацией сказанному. В этом случае поле заряда (в точке наблюдения) можно рассматривать как результат суперпозиции волн запаздывающего потенциала, непрерывно излучаемых зарядом (из разных точек его пути) и распространяющихся со скоростью  $c/n$  [2]. Иными словами, черенковское излучение является физически следствием значительного увеличения плотности энергии «скоростной части» электромагнитного поля, которое компенсирует его быстрый спад с ростом расстояния. Однако, кроме когерентного увеличения плотности имеет место и аналогичный релятивистский эффект.

Сравнительно недавно на основе потенциалов Лиенара — Вихерта было установлено (см., например, [3]), что эквипотенциальные поверхности поля движущегося заряда имеют форму эллипсоидов вращения, вытянутых в направлении движения. С ростом скорости поле все более вытягивается вперед и действует на все большие расстояния. Так сказать, имеет место своего рода эффект «релятивистского дальнего действия».

С другой стороны, на заданном расстоянии перед зарядом будет происходить релятивистское увеличение плотности энергии, пропорциональное квадрату лоренц-фактора. Выражение для потока энергии (вектора Пойнтинга) электромагнитного поля равномерно движущегося со скоростью  $\beta c$  заряда имеет вид



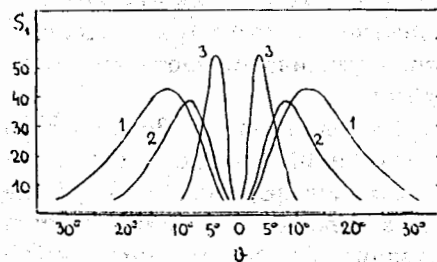
$$S \cong \frac{e^2 \beta c \gamma^{-4}}{4\pi R^4} \frac{\sin^2 \vartheta}{(1 - \beta \cos \vartheta)^6} \quad (1)$$

Здесь  $\gamma = (1 - \beta^2)^{-1/2}$ ,  $\vartheta$  — угол между направлениями движения заряда и радиус-вектором запаздывающего расстояния  $R$ . Как уже отмечалось (см., например, [4]), указанное увеличение плотности поля приводит к возможности превращения виртуальных фотонов в реальные путем «выбивания» их встречающимися атомами. На рисунке представлено угловое распределение величины  $S_1 = 4\pi SR^4/e^2\beta c$  для трех значений скорости:  $\beta c = 0,9c(1)$ ;  $0,95c(2)$ ;  $0,99c(3)$ . Приведенные на графике значения  $S_1$  следует также домножить на  $10$ ,  $10^2$  и  $10^4$  соответственно. Подобное явление, в частности, наблюдалось более 30 лет назад на электронном пучке [5] и позднее на пучках протонов, пионов, каонов и позитронов [6]\*.

На основании (1) угол, под которым интенсивность излучения максимальна, равен

$$\vartheta_{\max} = \arccos \left( \frac{\sqrt{1 + 24\beta^2} - 1}{4\beta} \right) \rightarrow \frac{1}{\sqrt{5}\gamma} \quad (2)$$

Для электронного пучка с энергией 26,6 МэВ [5] находим  $\vartheta_{\max} = 8,6$  мрад. К сожалению, в работе приведена зависимость интенсивности от радиуса и указана, по-видимому, примерная длина световода (50 см), что с учетом размера счетчика в 7/8 дюйма дает  $\vartheta_{\max} = 4,3$  мрад. Это соответствует случаю,



Поток энергии поля равномерно движущегося заряда,  $\beta = 0,9$  (1),  $0,95$  (2),  $0,99$  (3)

чаю, когда при отсутствии газа в счетчике излучение происходит на атомах входного окна и зеркала. По мере наполнения газом начинают давать вклад фотоны, «выбитые» атомами газа. Им будут соответствовать меньшие величины радиусов. Но самое главное — рост давления ведет к увеличению показателя преломления  $n$ , что аналогично эффективному увеличению  $\beta$  [4]\*\*, а следовательно, уменьшению  $\vartheta_{\max}$ . Так,

при  $n = 1,00014$  происходит уменьшение  $\vartheta_{\max}$  в два раза. Здесь, конечно, необходим еще тщательный анализ.

Более однозначные данные мы имеем во втором опыте [6], где приведена зависимость интенсивности излучения именно от угла  $\vartheta$ . Экспериментальные значения  $\vartheta_{\max}$  для пучков с энергиями 140 и 200 ГэВ согласно графикам составляют около 1 мрад. На основании (2) для основных составляющих пучков (протонов и пионов) имеем  $\vartheta_{\max}^p = 3,0$  мрад,  $\vartheta_{\max}^\pi = 0,4$  мрад в первом случае и  $\vartheta_{\max}^p = 2,1$  мрад,  $\vartheta_{\max}^\pi = 0,3$  мрад во втором. Хотя, казалось бы, согласно (1), основной вклад, несмотря на малую долю, должно давать излучение света позитронами, для которого уже в первом случае имеем  $\vartheta_{\max} = 6,5$  мкрад.

Автор благодарит М.С.Хвастунова за полезные обсуждения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Гайтлер В. — Квантовая теория излучения. М.: ИИЛ, 1956, с.38.
2. Тамм И.Е., Франк И.М. — ДАН СССР, 1937, 14, с.107.
3. Стрельцов В.Н. — ЭЧАЯ, 1991, 22, с.1129.
4. Idem — Сообщение ОИЯИ Д2-94-85, Дубна, 1994.
5. Aitkeep D.K. et al. — Proc. Phys. Soc., 1963, 82, p.710.
6. Bodek A. et al. — Z. Phys. C., 1983, 18, p.741.
7. Тяпкин А.А. — Краткие сообщения ОИЯИ, № 3-93, Дубна, 1993, с.26.

\*В этой связи см. также [7].

\*\*В частности, в знаменателе формулы (1).