

сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
дубна

Д2-94-85

В.Н.Стрельцов

ЭКВИПОТЕНЦИАЛИ ПОЛЯ БЫСТРО
ДВИЖУЩЕГОСЯ В СРЕДЕ ЗАРЯДА

1994

Эквипотенциали поля быстро движущегося в среде заряда

Представлены лиенар-вихертовские эквипотенциали поля равномерно движущегося в среде заряда. Подчеркивается, что полученные кривые описывают фактически угловую зависимость путей формирования излучения. В частности, черенковское излучение соответствует бесконечному пути формирования.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 1994

Перевод автора

Strel'tsov V.N.

D2-94-85

Field Equipotentials of a Fast-Moving Charge in Media

The Lienard-Wiechert field equipotentials of an uniformly moving charge in media are presented. It is stressed that the obtained curves describe in fact the angular dependence of formation ways of the radiation. In particular, the Cherenkov radiation corresponds the infinite formation way.

The investigation has been performed at the Laboratory of High Energies, JINR.

В свое время на основе потенциалов Лиенара — Вихерта было установлено [1,2], что эквипотенциальные поверхности поля равномерно движущегося заряда имеют форму эллипсоидов вращения, вытянутых в направлении движения. С ростом скорости поле все более вытягивается вперед и действует на все большие расстояния. Можно сказать, что имеет место своего рода эффект «релятивистского дальнего действия».

Ниже с аналогичных позиций мы рассмотрим поведение эквипотенциалей поля при движении заряда в преломляющей среде.

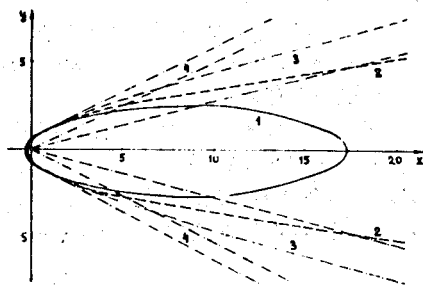
Поле движущегося заряда. Для потенциалов Лиенара — Вихерта заряда, движущегося в среде со скоростью v , имеем [3,4]

$$\Phi = \frac{e}{n^2 R(1 - \beta n \cos \vartheta)}, \quad A = \frac{ev}{cR(1 - \beta n \cos \vartheta)}, \quad (1a,6)$$

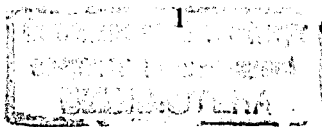
где n — показатель преломления среды, R — запаздывающее расстояние, ϑ — угол между направлением v и радиусом-вектором R , $\beta = v/c$. На основании (1a) уравнение эквипотенциалей электрического поля в среде, очевидно, имеет вид

$$R_{\Phi} = \frac{e}{\Phi n^2(1 - \beta n \cos \vartheta)}. \quad (2)$$

Соответствующие кривые, отвечающие различным значениям n , для $\beta = 0,8$ представлены на рисунке. При $n_1 = 1,2$ мы имеем такой же лиснар-вихертовский эллипс, как и при движении заряда в пустоте (но со скоростью $v = 0,96 c$). С увеличением n эллипс все более вытягивается вперед и при $n_2 = 1,25$ (пунктирная кривая) имеем $R_{\Phi}(0^\circ) = R_c = \infty$, что означает возникновение эффекта Черенкова при $\vartheta_c = 0^\circ$. Хотя, как видно из рисунка, «раствор поля» при этом достаточно широкий и составляет в поперечном направлении около 5 (в единицах e/Φ). При $n_3 = 1,3$ (штрихпунктирные кривые) поле заметно сжимается, хотя за углом Черенкова его влияние



Эквипотенциали движущегося заряда в среде; $n=1,2(1); 1,25(2); 1,3(3); 1,4(4); \beta=0,8$.



еще значительно. Только при $n_4 = 1,4$ картина приближается к классической черенковской, когда поле сосредоточено практически под одним углом ϑ_c ; но все равно его действие при $\vartheta > \vartheta_c$ остается заметным.

Таким образом, представленная картина поля движущегося заряда адекватно отражает особенности поведения излучения. Хотя при этом «пороговый» угол Черенкова, характеризующий максимальную величину поля, является безусловно выделенным, однако согласно рисунку имеет место достаточно плавный переход как в послепороговую, так и в допороговую области.

Путь формирования. Рассмотрим теперь аналогичную (2) величину

$$R_A = \frac{e\beta}{A(1 - \beta n \cos \vartheta)} \quad (3)$$

и обратим внимание на следующее. Излучение движущегося заряда по сути дела представляет собою превращение виртуальных квантов в реальные. При этом на основании электромагнитной константы связи α следует, что отношение энергии взаимодействия двух зарядов ($e\Phi$) на некотором расстоянии λ , которое переносится виртуальным фотоном, к энергии рожденного (реального) кванта с длиной волны λ и частотой ν составляет $\alpha h\nu$. Подставляя в (3) соответствующее соотношение для импульсов, получим

$$R_A = \frac{e^2\beta}{c(\alpha h/\lambda n)(1 - \beta n \cos \vartheta)} = \frac{\beta\lambda n}{1 - \beta n \cos \vartheta} \quad (4)$$

Последнее выражение полностью совпадает с известной формулой для пути формирования*

Понятие пути (зоны) формирования (когерентности) было введено И.Франком [7] при рассмотрении излучения равномерно движущегося осциллятора в преломляющей среде. Он определил его как отрезок пути, с которого волны излучаются осциллятором (источником) в фазе. Напомним это определение.

Рассмотрим движение быстрой частицы вдоль прямой линии. В каждой точке своего пути частица излучает плоскую волну частоты ω волновым вектором k . При этом разность фаз $\Delta\varphi$ волн, изучаемых частицей под углом ϑ к ее импульсу в моменты времени t и $t + l/v$, будет равна

$$\Delta\varphi = \omega \frac{l}{v} - kl \cos \vartheta, \quad (5)$$

*В этой связи см. также [5,6].

где l — пройденный путь, а v — ее скорость. Путь формирования определяется как расстояние, на котором $\Delta\varphi = 2\pi$. Тогда с учетом $k = (\omega/c)n$ легко видеть, что

$$l_f = \frac{2\pi v}{\omega(1 - \beta n \cos \vartheta)} = \frac{\lambda\beta n}{1 - \beta n \cos \vartheta} \quad (6)$$

Таким образом, полученные совершенно различными путями выражения (6) и (4) действительно совпадают. Поэтому излучение равномерно движущегося в среде заряда можно трактовать как «выбивание» атомами среды световых квантов из электромагнитного поля, сопровождающего этот заряд. И чем больше путь формирования, тем больше вероятность излучения света именно в данном направлении.

Автор благодарит М.С.Хвастунова за обсуждения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Стрельцов В.Н. — Сообщение ОИЯИ, Р2-89-689 и Р2-89-695, Дубна, 1989.
2. Стрельцов В.Н. — ЭЧАЯ, 1991, 22, с.1129.
3. Тамм И.Е. — Собр. научн. трудов, М.: Наука, т.1, с.77.
4. Гинзбург В.Л. — Теоретическая физика и астрофизика, М.: Наука, 1987, гл.6.
5. Стрельцов В.Н. — Сообщение ОИЯИ, Д2-92-435, Дубна, 1992.
6. Стрельцов В.Н. — Сообщение ОИЯИ, Д2-93-381, Дубна, 1993.
7. Франк И.М. — Изв. АН СССР, сер.физ., 1942, 6, с.3.

Рукопись поступила в издательский отдел
14 марта 1994 года.