

ИМПУЛЬС ФОТОНА В СРЕДЕ С ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ГРУППОВОЙ СКОРОСТЬЮ

И.М. Франк

Обсуждается вопрос о применимости выражения $p = n \hbar \omega / c$ для импульса фотона в преломляющей среде в случаях излучения Вавилова – Черенкова и преломления света на поверхности среды с отрицательной групповой скоростью (фотон в среде рассматривается как квазичастица). Импульс фотона и скорость его движения оказываются направленными противоположно, что соответствует отрицательной массе квазифотона. Давление света в среде с отрицательной групповой скоростью должно быть отрицательно.

В работе [1] обсуждается вопрос об импульсе, который следует приписать фотону в обычной преломляющей среде. Впервые Гинзбург [2], при рассмотрении квантовой теории излучения Вавилова – Черенкова, принял его величину равной

$$p = \hbar k = \frac{n}{c} \hbar \omega, \quad (1)$$

где n – показатель преломления среды.

В [1] рассмотрена рассчитанная классическими методами, на основании результатов [3 – 5], сила электромагнитного поля, воздействующая на поступательное движение частицы. Она такова, что если в квантовом рассмотрении применять законы сохранения для энергии и импульса, то в самом деле следует принять (1). Это, в частности, и было сделано в квантовой теории эффекта Допплера [6, 7].

Вопрос о применимости (1) возник в связи с продолжающейся и до сих пор дискуссией о тензоре энергии и импульса в среде. Если, согласно Минковскому, в соотношении между плотностью импульса и энергии следует принять (1), то по Абрагаму

$$P_A = E / nc, \quad (2)$$

где E – плотность энергии. Правильность концепции Абрагама, особенно убедительно обоснованная в последние годы Скобельцыным [8 – 10], не затрагивает применимости (1) в рассматриваемых задачах излучения. Действительно в них необходимо знать отдачу, которую получает излучатель при излучении или поглощении фотона. Очевидно эта величина той же природы, как и световое давление. Между тем для счетового давления и по Минковскому и по Абрагаму следует принять соотношение (1).

Фотон в среде очевидно не является свободной частицей. Распространение волны получается в результате когерентного сложения волн отдельных атомов. Таким образом, для возникновения волны существенно коллективное движение, происходящее в атомах среды. Это характерное свойство не частицы, а квази-частицы (например, аналогично фононам).

Став на эту точку зрения мы должны по аналогии с квази-частицами приписать фотону в среде скорость

$$\mathbf{w} = d\omega/d\mathbf{k} \quad (3)$$

равную групповой скорости света. Мы будем рассматривать случай отрицательной \mathbf{w} . Как видно из (1) и (3), импульс фотона \mathbf{p} и скорость его переноса должны быть в этом случае направлены в противоположные стороны (формально это значит, что масса квази-частицы отрицательна¹⁾).

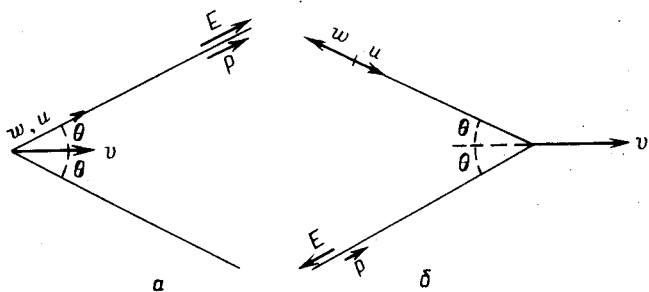


Рис. 1.

Обратимся к рассмотрению эффекта Вавилова — Черенкова в среде с отрицательной групповой скоростью [12, 7], представленном на рис. 1 (с некоторыми дополнениями он воспроизводит рис. 2 работы [7]). В обычном случае положительной групповой скорости (среду считаем оптически изотропной) групповая скорость \mathbf{w} , также как и фазовая скорость \mathbf{u} , излучаемых волн, направлены под характерным острым углом $\cos \theta = c/vn$ к скорости частицы (рис. 1, а). В этом же направлении распространяются, очевидно, излучаемая энергия и импульс квази-фотона \mathbf{p} . Уносимый импульс тормозит частицу [2, 13]. Приняв эту картину за исходную в случае отрицательной групповой скорости, получим неожиданный результат. Направления фазовой и групповой скорости направлены в этом случае в противоположные стороны, причем энергия должна ухо-

¹⁾ Вопрос о массе фотона в обычной среде ($\mathbf{w} > 0$) рассмотрен в работе [11].

В среде без дисперсии $\mathbf{w} = c/n$, тогда полагая $\mathbf{p} = m' \mathbf{w}$ получим $m' = (n^2/c^2) \hbar \omega$.

доть и, следовательно, w направлена от частицы. Это приводит к картинке рис.1,б [12,7], в которой w образует угол $\pi - \theta$ со скоростью, а фазовая скорость u , по-прежнему, угол θ , так что волна идет к частице.

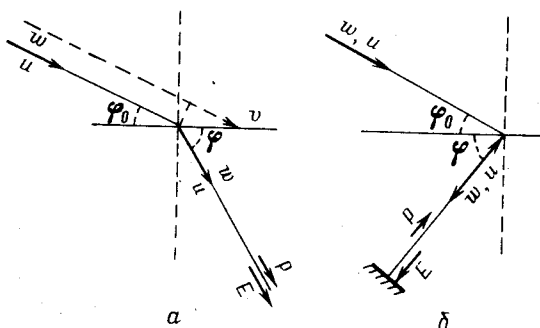


Рис.2.

Для того, чтобы было торможение, уносимый импульс должен быть направлен также как u , а скорость движения квази-фотона, уносящего импульс, очевидно должна совпадать с w . Иными словами, квази-фотону в самом деле следует приписать отрицательную массу.

Такой же неожиданный результат получается и для преломления света средой с отрицательной групповой скоростью. (Преломление света в среде с $w < 0$ было рассмотрено Мандельштамом [14]). На рис.2,а и 2,б показаны случаи преломления света в среде соответственно для $w > 0$ и $w < 0$. Известно, что здесь имеется аналогия с эффектом Вавилова - Черенкова [4]¹⁾, и можно показать, что рис.1 и рис.2 являются следствием один другого. Аналогия состоит в следующем: скорость распространения фронта волны, падающей из вакуума вдоль границы раздела, равна $v = c / \cos \phi_0$, где ϕ_0 - угол между вектором k и границей среды. Тогда угол ϕ преломленной волны с поверхностью среды очевидно равен $\cos \phi = c / nv$.

Поскольку при преломлении света меняется только компонента вектора k_z , нормальная к границе раздела, то можно думать, что падающий на нее свет будет действовать на поверхность среды силой только нормальной к ней. Отсутствие компоненты силы, направленной вдоль поверхности, приводит к требованию, чтобы импульс фотона в среде отличался от импульса в вакууме также как косинусы углов с поверхностью т.е. $\cos \phi_0 / \cos \phi = n$, что в самом деле соответствует (1)²⁾.

¹⁾Та же аналогия обсуждена в работе Болотовского и Гинзбурга [15].

²⁾ Такое рассмотрение не является новым (см. [16] и [11]).

Рассмотрим теперь преломление света на поверхности среды, в которой групповая скорость отрицательна. Этот случай показан на рис.2,б. Групповая скорость направлена при этом от границы внутрь среды, а фазовая наоборот из среды к поверхности. При этом и падающий и преломленный луч лежит по одну сторону от нормали к поверхности раздела [14]. Импульс квази-фотона должен быть направлен по фазовой скорости. Это необходимо для того, чтобы давление света на поверхность и в этом случае имело только компоненту по нормали. С другой стороны свет уносит энергию от поверхности вглубь среды, очевидно, и импульс может переноситься только вместе с ней. Мы вновь получаем, как и в эффекте Вавилова – Черенкова, что скорость квази-фотона и направление его импульса обратны по знаку. Представим себе теперь черную поверхность внутри среды с отрицательной групповой скоростью (рис.2,б). Она должна получать импульс света, направленный от поверхности. Таким образом световое давление внутри среды с отрицательной групповой скоростью также должно быть отрицательным.

Объединенный институт
ядерных исследований

Поступила в редакцию
19 августа 1978 г.

Литература

- [1] И.М.Франк. Сообщение ОИЯИ, Р4-95899, Дубна, 1976.
- [2] В.Л.Гинзбург. ЖЭТФ, **10**, 584, 1940.
- [3] И.М.Франк. УФН, **30**, 149, 1946.
- [4] И.М. Франк. Известия АН СССР, сер. физич., **6**, 3, 1942.
- [5] В.Л.Гинзбург, В.Я.Эйдман. ЖЭТФ, **36**, 1823, 1959.
- [6] В.Л.Гинзбург, И.М.Франк. ДАН СССР, **56**, 583, 1947.
- [7] И.М.Франк. Нобелевская лекция (см., например, Нобелевские лекции Физматгиз, 1960).
- [8] Д.В.Скобельцын. Препринт Физического института им.П.Н.Лебедева №160, 1972; УФН, **110**, 253, 1973.
- [9] Dm.V.Skobelzyne. C.R.Ac.Es. Paris, **280**, serie B 251, 287, 1975.
- [10] Д.В.Скобельцын. УФН, **122**, 295, 1977.
- [11] F.R.Tangherlini. Phys. Rev., A **12**, 139, 1975.
- [12] В.Е.Пафомов. ЖЭТФ, **37**, 1853, 1959.
- [13] И.Е.Тамм, И.М.Франк. Труды ФИАН, **2**, 63, 1944.
- [14] Л.И.Мандельштам. Собрание трудов. **5**, 465, 1950.
- [15] Б.М.Болотовский, В.Л.Гинзбург. УФН, **106**, 577, 1972.
- [16] G.Gyögyi. J. of Phys., **28**, 85, 1960.