

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



P4 - 11778

Ф-833

И.М.Франк

УЧ12/2-78

ИМПУЛЬС ФОТОНА

В СРЕДЕ

С ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ГРУППОВОЙ СКОРОСТЬЮ

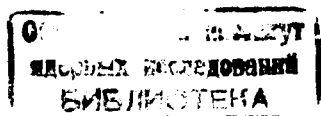
1978

P4 - 11778

И.М.Франк

ИМПУЛЬС ФОТОНА
В СРЕДЕ
С ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ГРУППОВОЙ СКОРОСТЬЮ

Направлено в "Письма в ЖЭТФ"



Импульс фотона в среде с отрицательной групповой скоростью

Обсуждается вопрос о применимости выражения $p = \hbar \omega / c$ для импульса фотона в преломляющей среде. Рассмотрены два случая: излучение Вавилова-Черенкова и преломление световой волны на поверхности среды, в которой групповая скорость отрицательна.

Показано, что импульс фотона в среде (квазифотона) и скорость его движения в рассматриваемом случае направлены противоположно друг другу, что соответствует отрицательной массе квазифотона. Этот эффект Вавилова-Черенкова является обобщением картины преломления света средой с отрицательной групповой скоростью. Показано, что давление света на черную поверхность в среде с отрицательной групповой скоростью меняет свой знак (притяжение).

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1978

Impulse of the Photon in a Medium with Negative Group Velocity

In the paper we discuss a validity of the expression $p = \hbar \omega / c$ for the photon impulse in the refractive medium both for the Vavilov-Cherenkov radiation and for the refraction of light on the surface of the medium with negative group velocity (the photon in the medium is looked upon as a quasiparticle).

The photon impulse and the velocity of the photon motion appear to be in the opposite directions, what correspond to the negative mass of the quasiphoton. Light pressure in the medium with negative group velocity has to be negative.

The investigation has been performed at the Laboratory of Neutron Physics, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1978

В работе^{/1/} обсуждается вопрос об импульсе, который следует приписать фотону в обычной преломляющей среде. Впервые В.Л.Гинзбург^{/2/}, при рассмотрении квантовой теории излучения Вавилова-Черенкова, принял величину этого импульса равной

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

где n - показатель преломления среды.

В^{/1/} рассмотрена рассчитанная с помощью классических методов, 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 Доплера^{/6,7/}.

Вопрос о применимости (1) возник в связи с продолжающейся 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

$$\vec{p}_A = \frac{E}{nc}, \quad (2)$$

где E - плотность энергии. Правильность концепции Абрагама, особенно убедительно обоснованная в последние годы Д.В.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, что и световое давление. Между тем, для светового 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 квазичастицы (например, фонона).

Став на эту точку зрения, мы должны, по аналогии с квазичастицами, приписать фотону в среде скорость

$$\vec{w} = \frac{d\omega}{dk}, \quad (3)$$

равную групповой скорости света. Будем рассматривать случай отрицательной \vec{w} . Как видно из (1) и (3), импульс фотона \vec{p} и скорость его переноса должны быть в этом случае направлены в противоположные стороны (формально это значит, что масса квазичастицы отрицательна *).

Обратимся к рассмотрению эффекта Вавилова-Черенкова в среде с отрицательной групповой скоростью^{/12,7/}, представленного на рисунке 1 (с некоторыми дополнениями он воспроизводит рис. 2 работы^{/7/}). В обычном случае положительной групповой скорости (среду считаем оптически изотропной) групповая скорость \vec{w} , так же как и фазовая скорость \vec{u} , излучаемых волн направлена под характерным острым углом ($\cos\theta = \frac{c}{v\eta}$) к скорости частицы (рис. 1а).

* Вопрос о массе фотона в обычной среде ($\vec{w} > 0$) рассмотрен в работе^{/11/}. В среде без дисперсии ($w = \frac{c}{n}$), тогда, полагая $p = m'w$, получим $m' = \frac{n^2}{c^2} h\omega$.

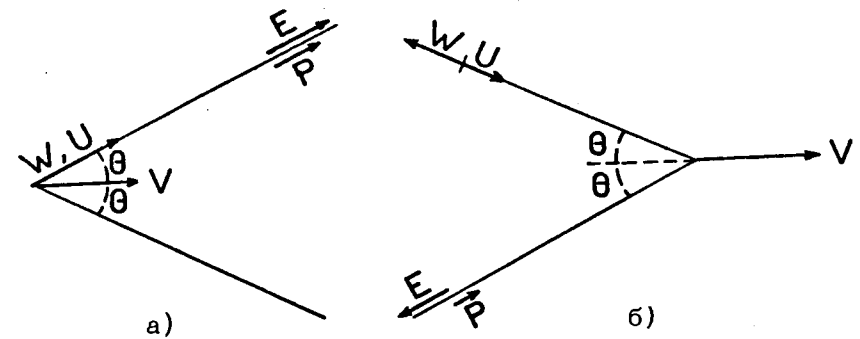


Рис. 1.

В этом же направлении распространяются, очевидно, излучаемая энергия и импульс квазифотона \vec{p} . Уносимый импульс тормозит частицу^{/2,13/}. Приняв эту картину за исходную, в случае отрицательной групповой скорости получим неожиданный результат. Фазовая и групповая скорости направлены в этом случае в противоположные стороны, причем энергия должна уходить и, следовательно, w направлена от частицы. Это приводит к картине (рис. 1б)^{/12,7/}, в которой \vec{w} образует угол $\pi - \theta$ со скоростью, а фазовая скорость \vec{u} — по-прежнему угол θ , так что волна идет к частице. Для того чтобы было торможение, уносимый импульс должен быть направлен так же, как \vec{u} , а скорость движения квазифотона, уносящего импульс, очевидно, должна совпадать с \vec{w} . Иными словами, квазифотону 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 $\vec{w} < 0$ было рассмотрено Мандельштамом^{/14/}). На рис. 2а,б показаны случаи преломления света в среде соответственно для $\vec{w} > 0$ и $\vec{w} < 0$. Известно, что здесь имеется аналогия с эффектом Вавилова-Черенкова^{/4/}*

*Эта же аналогия обсуждается в работе Б.М.Бологовского и В.Л.Гинзбурга^{/15/}.

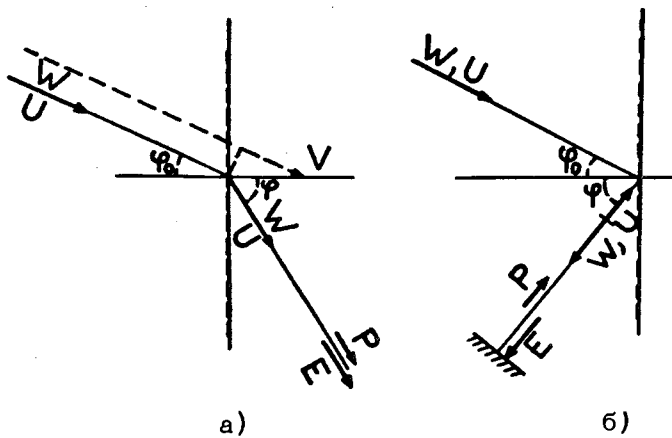


Рис. 2

и можно показать, что рис. 1 и 2 являются следствием друг друга. 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 \vec{k} и границей среды. При этом угол ϕ преломленной волны с поверхностью среды, очевидно, удовлетворяет равенству $\cos \phi = c / v$.

Поскольку при преломлении света меняется только компонента вектора \vec{k}_z , нормальная к границе раздела, то можно думать, что падающий на нее свет будет действовать на поверхность среды силой, нормальной к ней. Отсутствие компоненты силы, направленной вдоль поверхности, приводит к требованию, чтобы импульс фотона в среде отличался от импульса в вакууме так же, как косинусы углов ϕ_0 и ϕ , т.е.

$\frac{\cos \phi_0}{\cos \phi} = n$, что в самом деле соответствует (1)* и закону преломления света.

* 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. 2б. Групповая скорость направлена при этом от границы внутрь среды, а фазовая - наоборот, из среды к поверхности. При этом и падающий, и преломленный лучи лежат по одну сторону от нормали к поверхности раздела ^{14/}. Импульс квазифотона 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 квазифотона и направление его импульса обратны по знаку. Представим себе теперь черную поверхность внутри среды с отрицательной групповой скоростью (рис. 2б). Она должна получать импульс света, направленный от поверхности. Таким образом, световое давление внутри среды с отрицательной групповой скоростью также должно быть отрицательным.

ЛИТЕРАТУРА

1. Франк И.М. Сообщение ОИЯИ, Р4-9589, Дубна, 1976.
2. Гинзбург В.Л. ЖЭТФ, 1940, 10, стр. 584.
3. Франк И.М. УФН, 1946, 30, стр. 149.
4. Франк И.М. Известия АН СССР, сер. физич. 1942, 6, стр. 3.
5. Гинзбург В.Л., Эйдемман В.Я. ЖЭТФ, 1959, 36, стр. 1823.
6. Гинзбург В.Л., Франк И.М. ДАН, 1947, 56, стр. 583.
7. Франк И.М. Нобелевская лекция (см., например, Нобелевские лекции, Физматгиз, 1960).
8. Скобельцын Д.В. Препринт Физического института им. П.Н.Лебедева, №160, 1972; УФН, 1973, 110, стр. 253.
9. Skobelzyne Dm.V., C.R.Ac.Sc.Paris 280 Serie B 251,287,1975.

10. Скобельцын Д.В. УФН, 1977, 122, стр. 295.
11. Tangherlini F.R. Phys.Rev. 1975, A 12, 139.
12. Пафомов В.Е. ЖЭТФ, 1959, 37, стр. 1853.
13. Тамм И.Е., Франк И.М. Труды ФИАН, 1944, т. П, № 4, стр. 63.
14. Мандельштам Л.И. Собрание трудов, т. 5, стр. 465, 1950.
15. Болотовский Б.М., Гинзбург В.Л. УФН, 1972, 106, стр. 577.
16. Györgyi G. Journ. of Phys., 1960, 28, p.85.

Рукопись поступила в издательский отдел
20 июля 1978 года.