

Мы вернемся к эффекту Допплера в § 6, где предполагается, что источник света движется не в вакууме, а в среде с показателем преломления n .

§ 5. Отражение и преломление света в фотонной теории. Фотоны в среде

1. В 19-м веке считалось, что опытом Фуко окончательно опровергнута корпускулярная теория света. Этот опыт доказал, что скорость света в воде меньше, чем в вакууме. Однако по волновой теории такое соотношение между скоростями относится к *фазовой скорости* света. В опыте же Фуко, если бы свет действительно представлял собой волны, измерялась *групповая скорость* (см. т. IV, § 108). Поэтому с чисто логической точки зрения аргументация физиков 19-го века должна быть дополнена указанием на то, что в опыте Фуко скорость света изменилась в практически недиспергирующих средах. В этом случае фазовая скорость совпадает с групповой. Заключение о несостоятельности корпускулярной теории остается верным, с той существенной оговоркой, что оно относится не к корпускулярной теории вообще, а к корпускулярной теории *в форме Ньютона*. Как же обстоит дело в фотонной теории Эйнштейна?

Отражение и преломление света в корпускулярной теории Ньютона рассматривалось на основе классической ньютоновской механики. К фотонам классическая механика неприменима. Природа фотонов — *двойственная*. При распространении они ведут себя как *волны* и только при взаимодействии с веществом проявляют *свойства частиц*. А поскольку отражение и преломление являются специальными случаями распространения света, фотонная теория при рассмотрении этих явлений должна приводить к тем же результатам, что и классическая волновая теория.

2. Этот вопрос заслуживает более подробного рассмотрения, которое и приводится ниже. В среде, как и в вакууме, можно ввести представление о распространении света в виде фотонов. При этом среду мы будем считать *неподвижной*. Иными словами, будем рассматривать явления в системе отсчета, относительно которой среда неподвижна. Такая система является *выделенной*, или *привилегированной*. Вопрос заключается в том, каковы энергия и импульс фотона в среде? Заметим, что *энергия и импульс фотона слагаются из энергии и импульса электромагнитного поля и среды*. Но в нашем рассмотрении идет речь о сумме этих величин, т. е. о *полных* энергии и импульсе, связанных с распространением фотона в среде. Среду мы будем считать изотропной и характеризовать ее свойства показателем преломления $n(\omega)$.

По фотонным представлениям при отражении и преломлении общее число фотонов не меняется. Если граница неподвижна, то не меняются и энергии отраженного и прошедшего фотонов. Докажем это утверждение сначала для отражения, предполагая, что фотон падает на среду из вакуума. Энергия падающего фотона $\mathcal{E}_e = \hbar\omega$, т. е. однозначно определяется частотой ω . Такое же соотношение между энергией и частотой должно существовать и для отраженного фотона, поскольку он распространяется в таком же вакууме, как и падающий фотон. Но при отражении от неподвижной границы частота ω не меняется. В противном случае происходило бы изменение цвета отраженного луча, чего на самом деле не происходит. Таким образом, энергия отраженного фотона \mathcal{E}_r также равна $\hbar\omega$, т. е. $\mathcal{E}_r = \mathcal{E}_e$.

3. Для прошедшего фотона указанное утверждение не столь очевидно. Чтобы его доказать, рассмотрим плоскопараллельный пучок, состоящий из N_e монохроматических фотонов, падающий из вакуума под любым углом на неподвижную границу среды. Пусть число отраженных фотонов будет N_r , прошедших N_d , а соответствующие им энергии \mathcal{E}_r и \mathcal{E}_d . По закону сохранения энергии

$$N_e \mathcal{E}_e = N_r \mathcal{E}_r + N_d \mathcal{E}_d. \quad (5.1)$$

Условие сохранения общего числа фотонов:

$$N_e = N_r + N_d. \quad (5.2)$$

Наконец, по доказанному $\mathcal{E}_r = \mathcal{E}_e$. Отсюда получается $\mathcal{E}_d = \mathcal{E}_e$, что и требовалось доказать. Таким образом, и для фотонов в среде справедливо соотношение $\mathcal{E} = \hbar\omega$.

Рассмотрим теперь импульс фотона в среде. Как и в случае энергии, можно написать

$$N_e p_e = N_r p_r + N_d p_d, \quad N_e = N_r + N_d, \quad (5.3)$$

где индексы e , r , d относятся к падающему, отраженному и прошедшему фотонам. Рассмотрим сначала поведение касательных составляющих импульсов. Направим ось X вдоль границы раздела, а ось Z — перпендикулярно к ней. Любая теория должна приводить к закону отражения, из которого следует, что $p_{ex} = p_{rx}$. Но тогда для p_{ex} , p_{rx} , p_{dx} получается в точности такая же система уравнений, как и для соответствующих энергий. Из нее находим

$$p_{ex} = p_{rx} = p_{dx}, \quad (5.4)$$

т. е. касательные составляющие импульсов всех трех фотонов одинаковы.

Совсем иначе ведут себя нормальные составляющие. В этом случае по-прежнему

$$N_e p_{ez} = N_r p_{rz} + N_d p_{dz}.$$

Однако если падающий фотон приближается к среде, то отраженный удаляется от нее, так что $p_{rz} = -p_{ez}$. В результате получится

$$(N_e + N_r) p_{ez} = N_d p_{dz},$$

или

$$(N_e + N_r) p_{ez} = (N_e - N_r) p_{dz},$$

или, наконец,

$$p_d = \frac{N_e + N_r}{N_e - N_r} \frac{\cos \varphi}{\cos \psi} p_e,$$

где φ — угол падения, а ψ — угол преломления.

Конечно, связь между p_d и p_e определяется свойствами среды и не может зависеть от характера поляризации падающего света. Это позволяет упростить вычисления. Предположим, что падающий свет поляризован перпендикулярно к плоскости падения. Тогда электрические векторы всех фотонов будут коллинеарны, так что на основании формулы Френеля

$$\frac{N_r}{N_e} = \frac{n \cos \psi - \cos \varphi}{n \cos \psi + \cos \varphi}$$

(см. т. IV, § 65). Действительно, в монохроматической волне все фотоны когерентны, и поэтому N_r/N_e дает отношение *амплитуд*, а не интенсивностей отраженной и падающей волн. Выбор знака в последней формуле определен из тех соображений, что числа фотонов N_r и N_e существенно положительны. В результате получается

$$p_d = n p_e \quad (5.5)$$

4. Резюмируя изложенное, приходим к заключению, что, как и в вакууме, энергия и импульс фотона в веществе определяются формулами

$$\mathcal{E} = \hbar \omega, \quad p = \hbar k. \quad (5.6)$$

Однако в веществе волновое число

$$k = n \omega / c, \quad (5.7)$$

т. е. в n раз больше, чем в вакууме. Если ввести фазовую скорость $v = c/n$ и длину волны $\lambda = 2\pi v / \omega$ в рассматриваемой среде, то получатся формулы

$$k = \omega / v = 2\pi / \lambda, \quad (5.8)$$

одинаково применимые к вакууму и веществу, так как в вакууме $v = c$. Связь между энергией и импульсом фотона в среде принимает вид

$$\mathcal{E} = p v = p c / n. \quad (5.9)$$

Разумеется, это соотношение справедливо только в привилегированной системе отсчета, в которой среда покоятся.

Из изложенного видно, что фотонная теория преломления света аналогична ньютоновской. Обе теории определяют угол преломления светового луча из закона сохранения импульса,

точнее — его тангенциальной составляющей. Только ньютоновская теория связывает этот закон с направлением силы, действующей на световую корпускулу нормально к границе раздела, что в случае фотона лишено смысла. Количественное же различие между результатами обеих теорий связано с тем, что импульс ньютоновской корпускулы пропорционален ее скорости v , а импульс фотона в среде обратно пропорционален. По этой причине фотонная теория приводит к такому же выражению для показателя преломления, как и классическая волновая теория.

Представление о фотонах в среде применимо не только к преломлению света, но и ко многим другим явлениям, о которых говорится в последующих параграфах.

5. В заключение — одно принципиальное замечание, затрагивающее уже физическое толкование корпускулярно-волнового дуализма. Как уже было отмечено выше, общее число фотонов при отражении и преломлении не меняется. Если на границу раздела падает всего один фотон, то после падения он будет обнаружен либо в виде отраженного, либо в виде прошедшего фотона. Импульс у отраженного фотона — такой же по величине, как и у падающего, но имеет иное направление. Импульс прошедшего фотона меняет не только направление, но и величину. Не является ли это нарушением закона сохранения импульса в элементарном процессе, т. е. для единичного фотона? Не является ли этот закон лишь статистическим законом, как это фактически требовалось в пунктах 2 и 3? Такое заключение отвергается современной квантовой теорией.

Явления интерференции фотонов приводят к заключению, что при падении фотона на границу раздела возникает новое состояние, не поддающееся описанию на языке классической теории. Оно характеризуется тем, что *фотон отчасти находится в состоянии отражения, отчасти в состоянии преломления. Закон сохранения импульса соблюдается и в элементарном процессе*. Если же произвести опыт по обнаружению фотона (в квантовой механике его называют *измерением*), то будет обнаружен либо отраженный, либо прошедший фотон. Но измерение меняет состояние системы, нарушения закона сохранения импульса не происходит. В каком состоянии будет обнаружен фотон, — в состоянии отражения или в состоянии преломления, — это заранее предсказать с достоверностью невозможно. Можно указать лишь *роятности* того и другого состояний.

§ 6. Излучение Вавилова — Черенкова. Эффект Допплера при движении источника света в среде

1. Пусть источник света движется в изотропной среде с показателем преломления $n(\omega)$. Законы сохранения энергии и импульса при испускании света можно записать совершенно так