



关于介质中光子动量的探讨

林辉庆

(杭州市余杭高级中学 浙江 杭州 311100)

(收稿日期:2020-07-31)

摘要:分析对于光从真空进入介质动量如何变化的问题的几个典型观点及存在的错误,由光的波粒二象性和光子与电子相互作用的机制,认识光在介质中传播时光子与光波的关系,得到介质中光子的动量仍等于它在真空中的动量.

关键词:光子 光波 动量 介质

1 问题的提出

高中物理在学习光电效应和康普顿效应时,给出了如下的光子能量和动量公式

$$\epsilon = h\nu \quad p = \frac{h}{\lambda}$$

式中 h 是普朗克常数, ν 和 λ 分别是光子的频率和波长.

高中学习经常需要判断光从真空进入介质速度、频率和波长的变化情况,而光子的动量与光的波长成反比,因此,学生自然会提出光从真空进入介质光子的动量如何变化的问题.当下的教辅资料中也有这样的问题.

那么,光从真空进入介质,光子的动量到底如何变化呢?

2 已有观点及评析

2.1 学生中的观点

对于这个问题,学生中存在两种相反的观点.

观点一:光从真空传入折射率为 n 的介质,频率 ν 不变,速度从 c 变为 $v = \frac{c}{n}$,波长从 λ 变为 $\lambda' = \frac{\lambda}{n}$,光子在介质中的动量应为

$$p' = \frac{h}{\lambda'} = \frac{nh}{\lambda} = np$$

介质的折射率 $n > 1$,所以光子的动量增大.常

见的教辅资料中也持这种观点.

观点二:光子从真空进入介质,速度减小,由相对论中质量与速度的关系知道,光子的质量也减小;而动量等于质量乘以速度,推知光子的动量减小.

2.2 文献中的观点

为了解决这个问题论,笔者查阅了相关文献,发现文献中也存在光子从真空进入介质动量增大和动量减小这两种观点,但是不同的作者对自己观点的论证方法不同.下面列出两种较为典型的观点.

观点三:由质能方程得到频率为 ν 的光子在真空中运动时的质量为^[1]

$$m = \frac{\epsilon}{c^2} = \frac{h\nu}{c^2}$$

在相对论中,动量仍定义为质量乘以速度,因此,真空中光子的动量为

$$p = mc = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

在介质中,关于质量和动量的上两式仍然成立,只是光的速度和波长应该用在介质中的数值 $v = \frac{c}{n}$ 和 $\lambda' = \frac{\lambda}{n}$ 代入.如此得到光子在介质中的“有效质量”和动量分别为

$$m' = \frac{n^2 h\nu}{c^2} = n^2 m$$

$$p' = \frac{h}{\lambda'} = \frac{nh}{\lambda} = np$$

或者从 $p' = m'v$, 同样能得到 $p' = np$ 的结果.

观点四: 光在介质中传播^[2], 光子与电子碰撞而散射, 散射的叠加使得光子的实际光程为光传播距离的 n 倍, 所以光在介质中的传播速度减小为 $v = \frac{c}{n}$. 也由于介质中光子的实际光程变长, 故可定义“有效光子”的波长 $\lambda' = n\lambda$, 所以有效光子的动量为 $p' = \frac{h}{\lambda'} = \frac{h}{n\lambda} = \frac{p}{n}$, 比在真空中的值小.

2.3 对已有观点的评析

通过深入研究, 我们认为上述各种观点及其论证都是不能成立的, 理由如下.

第一, 光在介质中传播之所以不同于在真空中传播, 是因为光与介质存在着相互作用. 正如观点四所正确指出的, 光在介质中传播, 光子将不断地与电子发生碰撞. 因此, 光在介质中传播, 光子不断地与介质交换着动量, 讨论对应于整个传播过程的光子“自身”的动量是没有意义的.

第二, 观点四的作者认识到光在介质中传播的整个过程不存在独立自由的光子, 于是提出“有效光子”概念. 其实质, 是将光在介质中传播时光子与电子的不断相互作用, 等效为光子只在进入介质时与介质发生一次相互作用, 随后等效光子在介质中以速度 v 自由地传播. 观点三的作者论证中计算出了光子的“有效质量”, 可见他处理的光子也是“有效光子”. 观点一和观点二中的光子, 动量的变化也只发生在界面处, 因此实质上也是有效光子.

只要稍加分析就会发现, 各种设想的有效光子, 不但没有任何物理上可观测的性质, 并且在理论上漏洞百出, 不能自洽. 光子的一个本质特征是, 它的静止质量等于零, 只能以速度 c 运动的方式存在. 而上述各个观点中, 介质中的光子或有效光子的速度都小于 c (为 $\frac{c}{n}$), 并由此对介质中的光子或有效光子的质量或动量进行推断, 这都是与光子的本质特征相悖的. 假设光垂直射入介质, 如果有效光子的动量大于真空中光子的动量, 那么由动量守恒定律, 介质将获得反方向的动量, 同时会具有相应的动能 (尽管很小), 这样, 光子与介质组成的系统能量就增加了. 因此观点一与观点三是违反能量守恒定律的. 观点四认为 $v = \frac{c}{n}$, $\lambda' = n\lambda$, 这将推出介质中光波的频

率是真空中的 n^2 倍.

第三, 在真空中光子的质量 $m = \frac{h\nu}{c^2}$, 动量 $p = \frac{h}{\lambda}$, 在介质中, 光子的质量与光速、动量与波长是否满足同样的关系, 那是未经论证的, 而观点一、三、四中直接将真空中光子动量公式中的 λ 换为 λ' , 求得介质中光子的动量, 观点三直接将真空中光子质量公式中的 c 换为 v , 求得介质中光子的质量, 那都是没有根据的“想当然”, 而不是科学推理.

3 问题的解决

通过上述分析可以看出, 要解决光从真空进入介质光子动量如何变化的问题, 首先必须要搞清在介质中光波速度的意义, 以及光子与光波的关系.

3.1 光子 光波与光速

光具有波粒二象性. 光与实物粒子 (如电子) 的相互作用是以不可分割的一份一份的形式进行的, 这样的一份一份的光叫光子. 光子不同于经典粒子, 它的传播服从波动的规律. 描述光子传播规律的光波也不是经典意义的波, 而是概率波; 光子在某处出现的概率正比于此处光波的强度 (正比于振幅的平方).

描述实际的有限长光列的波包的传播, 能使我们较直观地了解光子与光波的关系. 如图 1 所示, t_0 时刻波包位于 AC 段, B 点振幅最大. 经过时间 Δt , 波包传播了 $c\Delta t$ 距离, 到达 $A'C'$ 段, B' 点振幅最大. 光子不是经典粒子, 我们无法确定 t_0 时刻和 $(t_0 + \Delta t)$ 时刻光子分别位于什么位置 (哪怕只有一个光子), 也不能想象它是经过某条路径从 AC 上的某点到达 $A'C'$ 上的某点的, 但是可以确定的是, t_0 时刻光子处于 B 点附近的概率最大, $(t_0 + \Delta t)$ 时刻光子处于 B' 点附近的概率最大.

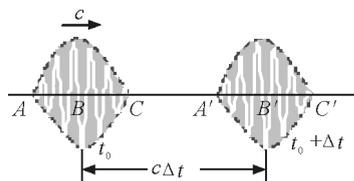


图 1 波包的传播

可见, 光子与光波是紧密联系又互相区别的概念. 光子是能量、动量的载体, 而光波则是描述光子在空间各处出现的可能性大小的概率波. 光速就是与光子相联系的概率波的速度, 在真空中大小为 c .

3.2 光波在介质中的传播

光进入介质,光子将不断地与介质中的电子“碰撞”而散射.观点四的作者认为,由于散射的叠加使得光子的实际光程变长,所以光在介质中的速度 v 小于 c .这实际上是把光子看作经典粒子,由于不断地与电子碰撞使路径变得曲折,从而前进速度变小.但从波粒二象性的角度看,这种观点是错误的.如图2所示,每一次散射都可看作一个子波源,由惠更斯原理知道,由这些子波的叠加得到的光波的传播速度仍然是 c .

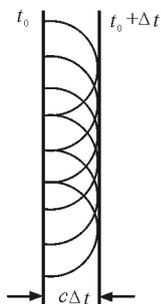


图2 散射波的叠加

光子与电子的碰撞不同于宏观中两个小球的碰撞,按照费恩曼的观点,是电子先吸收一个光子,然后再放出一个新光子^[3].电子吸收光子后,可以向各个方向放出新光子,所以,这种吸收—放出光子的过程仍然是散射.介质中光子与电子作用产生的散射波的叠加,仍如图2那样形成在介质中传播的宏观层面上的光波.但由于电子在吸收光子后要过一会儿再放出一个新光子;用波的语言表达就是,波动传到某电子后,它要过一会儿再发出子波,这导致光波在介质中传播的速度 v 小于 c .在介质宏观层面上光波的速度,就是光列(波包)通过介质的速度.事实上,人们测出光通过介质的速度 v 确实小于 c ,减小的程度($n = \frac{c}{v}$)与光的频率和介质的性质有关系(严格地说,光波在介质中传播的速度按其意义的不同可区分为群速度和相速度,具体可参见各种大学物理教程,如赵凯华编写的《新概念物理教程·光学》^[4]).

作为光与介质相互作用的微观过程,光子与电子的每一次碰撞都遵守能量守恒定律和动量守恒定律(为了表述方便,我们仍把光子被电子吸收—放出的过程叫作碰撞).透明介质中几乎没有自由电子,电子都被原子束缚着,而各个原子之间也是紧密

联系的,所以,光子与电子的碰撞实际上是与整个原子甚至是整个介质的碰撞.由于原子或整个介质的质量远远大于光子的质量,所以光子与电子碰撞前、后,能量和动量大小都可以看作不变.即光子与电子碰撞前、后的能量均为 $\epsilon = h\nu$,动量大小均为 $p = \frac{h}{\lambda}$ (λ 是光在真空中的波长);光子在与电子两次碰撞之间的时间内在真空中传播,速度为 c ,能量为 $\epsilon = h\nu$,动量为 $p = \frac{h}{\lambda}$.

3.3 结论

通过上面的分析知道,光在介质中传播,光子的速度与光波的速度是不同的.

从微观层面看,光子不断地与电子碰撞,在与电子两次碰撞之间的时间内,光子的传播速度为 c ,动量为 $p = \frac{h}{\lambda}$.

而宏观上观测到的介质中的光波,是微观上光子与电子碰撞而散射的叠加,其波长 λ' 和波速 v 反映的是光子在与电子不断相互作用的条件下,在空间各处出现的概率分布和其传播快慢;它们既与光子有关,也与介质有关,因此不能由它们推算光子的动量.

康普顿效应是X射线的光子与介质中的电子碰撞的结果.利用能量守恒定律和动量守恒定律推导散射光波长的变化时,碰撞前光子的动量取 $p = \frac{h}{\lambda}$ 而不是取 $p' = \frac{h}{\lambda'}$ (λ' 是X光在介质中的波长),理论计算的结果与实验事实符合得很好^[5],这证明了介质中光子的动量确实为 $p = \frac{h}{\lambda}$.

参考文献

- 1 张卓权,孙荣山,唐伟国.光学[M].北京:北京师范大学出版社,1985.412~413,416~418
- 2 赵坚.光子在真空和透明介质中的能量和动量问题[J].物理通报,2014(12):106~108
- 3 理·费曼. QED:光合物质的奇异性[M].北京:商务印书馆,1996.106
- 4 赵凯华.新概念物理教程·光学[M].北京:高等教育出版社,2008.345~346
- 5 赵凯华,罗蔚茵.新概念物理教程·量子物理[M].北京:高等教育出版社,2008.18~19