

## 康普顿效应中电子-光子碰撞过程的研究

张月胜 项林川

(华中科技大学物理学院, 湖北 武汉 430074)

**摘 要** 康普顿散射公式中光子波长的连续变化与光量子假说在表面上存在着不一致. 为此文章分析了康普顿效应中电子和光子的碰撞过程, 指出康普顿散射光子波长的连续变化可以通过自由电子连续的“虚光子吸收”和“虚光子发射”过程来加以说明.

**关键词** 康普顿效应; 虚光子吸收; 虚光子发射

## STUDY ON COLLISION PROCESS BETWEEN ELECTRON AND PHOTON IN COMPTON EFFECT

Zhang Yuesheng Xiang Linchuan

(College of Physics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074)

**Abstract** There is a seeming contradiction between the Compton equation about the continuous change of wavelength of photon and the light quantum hypothesis. In order to solve this problem, the collision process between the electron and photon in Compton effect has been analyzed. It is proposed that the contradiction can be avoided by using the concept of “virtual photon absorption and emission”.

**Key words** Compton effect; virtual photon absorption; virtual photon emission

约束.

需要指出, 上述的磁镜约束只是一种简单的磁约束方法, 实际应用中的磁镜约束并非如此简单. 由于在实际的等离子体中, 存在着粒子间的碰撞运动, 造成等离子体中的各种宏观和微观的不稳定性, 再加上  $\theta_0 > \theta_c$  时, 总会有粒子穿过磁镜逃逸出去, 为了克服这些缺点, 人们在原来磁镜的基础上不断改进, 出现了反向场磁镜、环链磁镜和串列磁镜等. 其中串列磁镜是目前磁镜研究中的新方向. 它是在一个长螺线管的两端, 各接一个用特殊形状线圈构成的具有特别强磁场的端部磁镜, 并用特定方式加上电场, 形成一个静电“塞子”将端部封住, 这样可以有效地阻止带电粒子从端部逃逸.

磁约束现象也存在于宇宙空间中, 地磁两极的磁场较强, 而赤道空空的磁场较弱. 所以地磁场是一个天然的磁捕集器, 它能俘获从外层空间射入的电子和质子从而形成一个带电粒子区域. 这一区域称为范艾仑辐射带. 范艾仑辐射带有两层,

内辐射带主要由质子组成, 在地面上空 800km 到 4 000km 之间. 外辐射带主要由电子组成, 它在地面上空约 60 000km 处. 在范艾仑辐射带中的带电粒子围绕地磁场的磁感线作螺旋运动而在靠近两极处被反射回来. 这样, 带电粒子在范艾仑辐射带中来回振荡直到由于粒子间的碰撞而被逐出为止. 这些运动的带电粒子能向外辐射电磁波. 在地磁两极附近由于磁感线与地面垂直, 由外层空间入射的带电粒子可直射入高空大气层内. 它们和空气分子的碰撞所产生的辐射就形成了绚丽多彩的极光.

### 参 考 文 献

- [1] 赵凯华, 陈熙谋. 电磁学[M]. 北京, 人民教育出版社, 1978: 339-341.
- [2] 程守洵, 江永之. 普通物理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1998: 235-237.
- [3] 马怀君. 磁镜原理简介[J]. 大学物理, 1989(7): 31-34.

## 1 简介

1922—1923年,康普顿在实验中将  $0.71\text{\AA}$  的 X 光投射到石墨上,然后从不同的角度  $\theta$  测量被石墨分子散射的 X 光强度.他发现当  $\theta=0^\circ$  时,只有等于入射频率的单一频率散射光,而当  $\theta \neq 0^\circ$  (如  $45^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $135^\circ$ ) 时,存在两种不同频率的散射光:一种频率与入射光相同(波长不变),另一种频率比入射光的低(波长增加),且后者随角度增加偏离增大,实验结果如图 1 所示.这种散射现象称为康普顿散射或康普顿效应<sup>[1]</sup>.

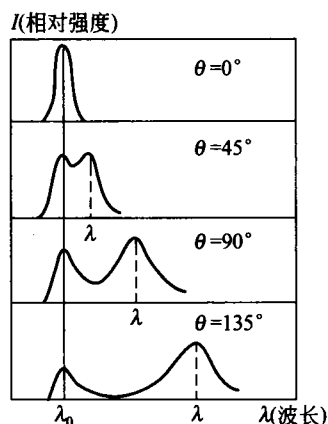


图 1 康普顿散射中散射光强度与波长的关系

根据经典电磁学理论无法解释康普顿效应,康普顿采用了爱因斯坦提出的光量子假说,认为当光子照射到散射物质中时,是与散射物质中的电子发生碰撞.如果光子与原子中束缚很紧的电子发生碰撞,近似与整个原子发生弹性碰撞,此时能量不会显著减小,所以散射光中出现与入射光波长相同的射线,而当入射光子与散射物质中束缚微弱的自由电子发生弹性碰撞时,一部分能量传给电子,散射光子能量减少,散射光频率下降、波长变大.通过利用散射前后系统能量守恒和动量守恒关系,康普顿圆满地解释了实验中发现的物理效应,进一步证实了爱因斯坦提出的光量子假说,表明能量守恒定律和动量守恒定律在微观领域里仍然成立,体现了这些守恒定律的普适性,同时由于康普顿在解释这个效应的时候,对电子能量还采用了狭义相对论的结论,这个实验也是对爱因斯坦狭义相对论的一个有力的验证,因此康普顿效应在现代物理发展中具有重要的意义<sup>[2]</sup>.

## 2 光子-电子碰撞过程分析

在研究康普顿效应中散射波长变大的原因时,研究者一般采用类似经典弹性球的碰撞模型(图 2)来进行讨论<sup>[3]</sup>.通过能量和动量守恒,得到散射波长增加量:

$$\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0 = \frac{2h}{m_0c} \sin^2 \varphi/2 \quad (1)$$

式中,  $m_0$  为电子静止质量,  $\varphi$  为散射角.在这种处理问题的过程中,只考虑系统的初态和终态而未考虑光子与电子作用时的细节.根据经典的弹性

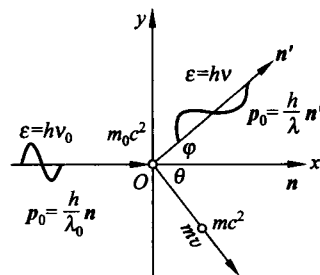


图 2 光子和自由电子碰撞过程示意图

球碰撞模型,一个入射光子的能量在碰撞时分为两部分,一部分能量转移给电子,成为反冲电子的动能,剩下部分则为散射光子的能量  $h\nu$ ,入射光子在散射过程中的能量转移(损失)就对应着散射波长的增加.而从方程(1)我们可以看到,散射波长的增加量与散射角  $\varphi$  相关,而散射角是可以连续变化的,这就意味着散射波长连续变化,即光子在散射过程中的能量是可以连续变化的.这显然与普朗克的能量量子假说以及爱因斯坦的光量子理论矛盾:即光在发射、吸收或传播过程中,只能一份一份地进行.碰撞过程中,光子要么失去全部能量,要么没有能量损失.

如果考虑一个自由电子完全吸收一个光子的能量,也会产生新的问题.假设自由电子的能量为  $E_1$ ,动量为  $p_1$ ;光子的能量为  $E_2$ ,动量为  $p_2$ ;吸收光子后电子的能量变为  $E_3$ ,动量变为  $p_3$ ,如果在两者碰撞过程中动量和能量都守恒,则得到下面的方程组

$$\left. \begin{aligned} p_1 + p_2 &= p_3 \\ E_1 + E_2 &= E_3 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

收稿日期: 2013-03-28

作者简介: 张月胜,男,副教授,研究方向为凝聚态物理, zhangyuephysic@hust.edu.cn

式中, 矢量方程可以用图 3 表示:

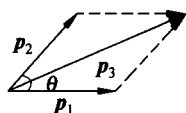


图 3 光子和自由电子碰撞过程示意图

又根据狭义相对论中能量和动量的关系

$$\left. \begin{aligned} E_1 &= \sqrt{E_0^2 + c^2 p_1^2} \\ E_2 &= cp_2 \\ E_3 &= \sqrt{E_0^2 + c^2 p_3^2} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

联立方程组(2)和(3)可以得到:

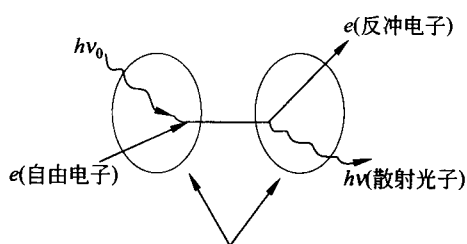
$$p_1 \cos \theta = \sqrt{m_0^2 c^2 + p_1^2} \quad (4)$$

无论  $p_1$  取任何值, 等式(4)都不能成立。这个结果说明把动量守恒与能量守恒同时应用到自由电子和光子的碰撞过程时, 将会得到错误的结论。这就意味着光子和自由电子的弹性碰撞过程需要放弃同时使用能量守恒和动量守恒定律。而如上所述, 如果我们只考虑初态和终态, 则能量和动量守恒定律能够同时成立, 但这将导致散射过程中光子损失的能量是可以连续变化, 和光量子假说有矛盾。

### 3 虚光子吸收

为了解决这个问题, 笔者认为, 光量子和自由电子在碰撞过程中, 光量子的能量是被自由电子整体吸收, 但由于时间比较短, 所处空间范围也比较小, 根据海森堡测不准原理, 动量和能量都可能有很大的不确定性, 因此在这个过程中能量和动量守恒都不再严格成立(或者不同时成立)。这就类似固体物理中的电子-电子之间通过吸收和发射声子产生有效相互作用, 其中电子吸收和发射声子的时间都很短, 不满足能量守恒定律, 所以其中的声子被称为“虚声子”<sup>[4]</sup>。与此类似, 在康普顿效应中自由电子和光子的碰撞而导致的光子被整体吸收也可以看作一种“虚光子吸收”过程。而由于这个过程能够持续的时间比较短, 所以自由电子所吸收的光子必须很快又被释放出来, 成为散射光和反冲电子, 这是一种“虚光子发射”过程(图 4)。由于在短暂的吸收过程中光子和自由电子的作用, 被重新释放的光子的能量和吸收前光子的能量已不再相同, 波长发生变化, 这就导致了康普顿效应。

康普顿效应中自由电子对入射光子的“虚吸收和发射”过程, 与光电效应中电子和入射光子的作用过程有本质的区别。在光电效应中, 光子是与



这两个过程必须是连续的以保证能量和动量守恒

图 4 光子和自由电子碰撞过程中“虚光子吸收”示意图

金属中的被束缚的电子相互作用。束缚电子将入射的紫外线光子整体吸收, 获得的能量一部分用来克服束缚功, 另外一部分就体现为电子逸出金属表面的动能。由于光子是与束缚电子作用, 所以实际上是光子与束缚电子所在的整个体系相互作用。对光子和束缚电子而言, 光子被完全吸收不能同时满足能量和动量守恒, 但对整个系统而言却可以同时满足动量和能量守恒, 因此这是一个实际发生的过程, 能够持续较长的时间, 从而保证电子吸收光子后不是很快再次释放出光子, 而是克服束缚功逸出金属表面。当然如果电子的束缚作用比较强, 则光子与束缚电子作用时光子不能被吸收, 能量没有变化, 散射后的波长和原波长相同, 这就是康普顿效应中波长变化为零的那一部分光。

### 4 结论

总之, 由于光子能量量子化的特点和光子与自由电子碰撞过程的短暂性, 康普顿效应中光子与自由电子的碰撞实际上可以理解成两个虚过程, 一个是“虚光子吸收”过程, 另一个是“虚光子发射”过程, 这两个过程中能量和动量不满足守恒定律, 但这两个过程的连续进行保证了自由电子与光子碰撞过程中总的能量和动量守恒。通过这些讨论, 不仅可以帮助我们正确理解康普顿散射效应的发生过程, 而且加深了对能量量子化、光子基本量子概念以及微观层面上能量和动量守恒定律等的理解。

### 参考文献

- [1] Compton A H. A Quantum Theory of the Scattering of X-rays by Light Elements[J]. Phys Rev, 1923(21): 483.
- [2] 郭奕玲, 沈慧君. 康普顿效应的发现及其意义[J]. 大学物理, 1998, 17(6): 37.
- [3] 黄伯坚. 大学物理(下册)[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2004.
- [4] 李正中. 固体理论[M]. (2版). 北京: 高等教育出版社, 2002.