

Some Debate on the Photon and the Spin Angular Momentum of It

Guihua Tian

Department of Physics, School of Science, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing
Email: tgh-2000@263.net, tgh20080917@yahoo.com

Received: Sep. 13th, 2014; revised: Oct. 20th, 2014; accepted: Oct. 27th, 2014

Copyright © 2014 by author and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

The object of the paper is to discuss whether the spin angular momentum of photon is suitable for explaining the polarization of π line in the Zeeman Effect. Through the concrete analysis, we think that the π line in the Zeeman Effect cannot be explained by the spin angular momentum of photon, and then the spin angular momentum has some defects, so the angular momentum conservation law cannot be used optionally to explain physical phenomena.

Keywords

Zeeman Effect, Spin Angular Momentum of Photon, Circular Polarization, Linear Polarization Format

对光子及其角动量概念的一些评注与探讨

田贵花

北京邮电大学理学院物理系, 北京
Email: tgh-2000@263.net, tgh20080917@yahoo.com

收稿日期: 2014年9月13日; 修回日期: 2014年10月20日; 录用日期: 2014年10月27日

摘要

本文的主要目的为探讨光子角动量, 是否适合解释塞曼效应中 π 线的偏振状态。通过具体分析, 我们认

为光子角动量本质不能对塞曼效应中 π 线做出正确解释，进而我们认为光子角动量本质有不完善之处，不能随意使用角动量守恒解释物理现象。

关键词

塞曼效应，光子自旋角动量，圆偏振，线偏振格式

1. 引言

光在现代物理的发展中也起着非常重要的作用，经典电磁场理论说明光是电磁波，具有波动性，如光有干涉、衍射现象及光的偏振现象等。经典电磁理论也说明电磁场作为场量具有能量、动量、角动量(对确定空间来说)，可以用相应物理量的密度矢量即能量密度、动量密度矢量、角动量密度 矢量进行局域描述。

黑体辐射与光电效应产生了爱因斯坦的光电理论，它指出光波是由一个个光子组成，每一个光子具有能量 $h\nu$ ，动量 $\hbar\mathbf{k}$ ，其中 ν, \mathbf{k} 分别是相应经典光波的频率和波矢量。普朗克黑体辐射理论与爱因斯坦的光电理论对量子力学的建立和发展起了非常重要的作用，更是直接促成了量子电动力学的发展与完备。量子电动力学可以很好地把经典电磁理论中光波具有能量、动量的概念转变成各个光子的能量、动量的叠加，而每个光子具有能量 $h\nu$ ，动量 $\hbar\mathbf{k}$ ，这和爱因斯坦的光电理论一致。

反之，对于经典电磁理论的光波具有角动量，量子电动力学理论中的对应概念却不是那么明显[1]-[6]。到底光子的角动量是什么，这是一个有争议的问题。主要的问题是经典理论中，角动量守恒概念的导出，不受拉氏量中是否增加一个散度项的影响[6]。但是，在量子电动力学理论中，光波的振幅变成了算符，角动量的定义很受拉氏量中散度项的影响；并且，如何区分光子的自旋角动量与轨道角动量也出现了争议[2]-[4]。光子角动量的本质是什么是非常重要的基本问题，它们涉及到光子角动量在现代科学与技术中的许多重要应用，例如在量子信息传输理论，原子与分子理论等中的应用。这是当今理论物理中比较活跃的一个研究课题。

本文不是直接研究光的角动量这个基本问题。我们在这里主要是通过塞曼效应重新审视光子角动量这个概念。研究表明，应用角动量守恒律解释塞曼效应时应该小心，尤其是在关于 π 线的偏振态的解释上，如果使用光子的角动量的概念及角动量守恒定律时，就会有错。这种情况使得我们不得不重新审视我们常常提到的概念“光子角动量为 $1\hbar$ ，即光子的自旋量子数是 1”是不能看作完全绝对；这句话不能随便使用，否则会出现问题。同时说明光子角动量的本质含义不及它们的极化或偏振概念基本，其使用范围有限。

2. 塞曼效应及光的极化概念对其的正确解释

塞曼效应在量子力学产生前已经发现，正常的塞曼效应指放入外磁场中的原子的谱线 ν_0 由一条变成三条， $\nu_0 - \Delta\nu_0, \nu_0, \nu_0 + \Delta\nu_0$ [1]-[10]。塞曼效应中很重要的一个方面就是谱线的偏振性质：在外磁场方向只能观察到频率为 $\nu_0 \pm \Delta\nu_0$ 两条左旋与右旋的 σ^\pm 圆偏振光，中间的 π 线(它的频率是 ν_0) 消失；在与磁场垂直的方向三条谱线全能观测到，中间的 π 线是沿外磁场偏振的线偏振光，两侧的 σ^\pm 线是与外磁场垂直的线偏振光。反常的效应则出现的光谱不再是间隔相同，谱线可能也不再是三条。正常的效应经典物理就能给出解释。反常的塞曼效应需要电子自旋的概念的帮助才能理解清楚。

塞曼效应在量子力学中占有很重要的地位，也是研究原子、分子、材料的重要方法与手段，故原子物理都对其进行详细的介绍[7]-[10]。通常，用量子力学的原子的能级理论解释谱线的变化。如前所述，

塞曼效应中谱线的偏振很重要，因而对此的解释需要重点介绍的。

根据原子与电磁波相互作用的理论，原子跃迁中谱线的出现与否主要由微扰的哈密顿量 H' 的跃迁矩阵 $\langle f|H'|i\rangle$ 是否为零决定，其中 $|f\rangle, |i\rangle$ 分别是原子的终态与初态[1]。在电偶极近似条件下， $H' = e\mathbf{r} \cdot \mathbf{E} = eE_{k,\alpha} \mathbf{r} \cdot \mathbf{e}_\alpha$ ，跃迁几率为

$$\Gamma \propto |eE_{k,\alpha}|^2 |\langle f|\mathbf{r} \cdot \mathbf{e}_\alpha|i\rangle|^2, \quad (1)$$

方程(1)中， $\mathbf{E} = E_{k,\alpha} \mathbf{e}_\alpha$ 为辐射的光场，它的极化方向与传播方向分别为 \mathbf{e}_α 、 \mathbf{k} 。众所周知，矢量 \mathbf{r} 可以在球坐标系中展开为[1]

$$\mathbf{r} = r \left[\sin\theta \cos\phi \mathbf{e}_x + \sin\theta \sin\phi \mathbf{e}_y + \cos\theta \mathbf{e}_z \right] \propto Y_{1,-1} \frac{\mathbf{e}_x + i\mathbf{e}_y}{\sqrt{2}} + Y_{1,0} \mathbf{e}_z + Y_{1,1} \frac{\mathbf{e}_x - i\mathbf{e}_y}{\sqrt{2}} \cdot \mathbf{e}_\alpha \quad (2)$$

辐射场的极化方向 \mathbf{e}_α 也可以用左旋、右旋光 $\frac{\mathbf{e}_x \pm i\mathbf{e}_y}{\sqrt{2}}$ 与线偏振光 \mathbf{e}_z 表示：

$$\mathbf{e}_\alpha = A_{\sigma^-} \frac{\mathbf{e}_x - i\mathbf{e}_y}{\sqrt{2}} + A_\pi \mathbf{e}_z + A_{\sigma^+} \frac{\mathbf{e}_x + i\mathbf{e}_y}{\sqrt{2}} \quad (3)$$

所以，

$$\mathbf{r} \cdot \mathbf{e}_\alpha \propto A_{\sigma^-} Y_{1,-1} + A_\pi Y_{1,0} + A_{\sigma^+} Y_{1,1} \quad (4)$$

在公式(2)中， $Y_{1,0}, Y_{1,\pm 1}$ 是 $l=1$ 的球谐函数。当 $\langle f|\mathbf{r} \cdot \mathbf{e}_\alpha|i\rangle$ 不为零时，相应的谱线就存在。反之，如果 $\langle f|\mathbf{r} \cdot \mathbf{e}_\alpha|i\rangle$ 为零，谱线就不出现。 σ 谱线是在 $\Delta m = m_f - m_i = \pm 1$ 的条件下出现的， π 则是在条件 $\Delta m = m_f - m_i = 0$ 出现的。

光子具有确定的偏振，而左、右旋偏振光 $\frac{\mathbf{e}_x - i\mathbf{e}_y}{\sqrt{2}}, \frac{\mathbf{e}_x + i\mathbf{e}_y}{\sqrt{2}}$ 是由基本的线偏振态 $\mathbf{e}_x, \mathbf{e}_y$ 的线性叠加产生的。由于电磁波是横波，它的极化方向与传播方向 \mathbf{k} 垂直。

当沿着外磁场 \mathbf{B} 观测时，故只能看到两条圆偏振的 σ^\pm (左旋与右旋)； π 的偏振沿着外磁场方向，因而不会出现在外场 \mathbf{B} 的方向。反之，在相对于外场 \mathbf{B} 垂直的方向观测时，三条谱线全是线偏振的。例如，假设观测方向是沿着 x 轴，则 σ 线只有沿着 y 轴方向偏振的线偏振光出现；而 π 则还是沿着 z 方向的线偏振光。这是用光的偏振进行解释塞曼效应，这里面没有出现任何角动量守恒的概念，是正确的解释。

3. 用光子角动量解释塞曼效应遇到的困难

由于球谐函数 $Y_{l,m}$ 不仅是原子角动量算符 \hat{L}^2 的本征函数，也是它的 z 轴方向角动量 \hat{L}_z 的本征函数，相应的量子数分别是 $l(l+1), m$ 。同时，按照众所周知的理论，光子具有能量 $\hbar\omega$ ，动量 $\hbar\mathbf{k}$ 以及自旋角动量 \mathbf{J} ，光子角动量为 $\hbar\mathbf{k}$ ，光子的自旋角动量的量子数为 $l_s = 1$ ，它的角动量沿着它的传播方向的分量为 $\mathbf{J} \cdot \mathbf{k} / |\mathbf{k}| = m_s \hbar$ ，其中 $m_s = \pm 1, 0$ 。 $m_s = \pm 1$ 光子对应的是左、右旋的圆偏振光； $m_s = 0$ 的光子对应的是线偏振光。注意，这个概念在这里有模糊性，在量子电动力学中， $m_s = 0$ 对应着的光子态是不可观测的¹。

这时，国内教材主要用原子跃迁过程中角动量守恒和电磁波是横波两个理论相结合来说明。这在解释 σ^\pm 线的偏振状态时很好，但是对 π 的解释却会出现牵强附会的情况。这主要是由于光子角动量的概念与电子的不同，它确实会导致问题的复杂化甚或错误，我们下面以塞曼效应的 π 的偏振状态为例具体进行说明。

下面用角动量守恒的观点重现解释塞曼效应。原子与光子组成的系统的角动量守恒。原子在跃迁过

¹这句话指在光的传播方向观测；如果不在光传播方向，则可以观测到它的效应[9]。

程中角动量量子数变化为 $|\delta l|=1$ ，而原子辐射出的光子的角动量量子数为1。对于外场 z 轴方向而言，原子在此方向的角动量分量变化为

$$\Delta m = \pm \hbar, 0, \quad (5)$$

所以，角动量守恒则要求相应的原子辐射出的光子在 z 轴方向的角动量分量为

$$m_s = \mp \hbar, 0. \quad (6)$$

其中， z 轴分量为 $m_s = \mp \hbar$ 的光子的角动量沿着外场方向，对应的谱线为 σ^\pm 线，它们在外场方向观测是圆偏振光。在与外场垂直的方向上观测，电磁波的横波性质使得它们只能被观测到与外场方向垂直的线偏振。这和前面用光的极化矢量解释偏振基本一致。

但是，涉及到 π 线的解释时，不自洽性就会出现。原子在磁场方向角动量不变，即 $\Delta m = m_f - m_i = 0$ ，这说明光子 z 轴方向的角动量分量为零 $m_s = 0$ ，光子处于的状态 χ_0 满足

$$\hat{J}_z \chi_0 = 0 \quad (7)$$

量子理论告诉我们 χ_0 态可以看成是 χ_\perp^\pm 两个态的叠加，其中 χ_\perp^\pm 两个态的传播方向与 z 轴垂直。例如，不是一般性，我们可以选 χ_\perp^\pm 为 χ_x^\pm ，即

$$\chi_0 = \frac{\chi_x^+}{\sqrt{2}} + \frac{\chi_x^-}{\sqrt{2}} \quad (8)$$

其中 χ_x^\pm 是角动量算符 J_x 的本征态，即

$$J_x \chi_x^\pm = \pm \chi_x^\pm, \quad (9)$$

$$\chi_x^\pm = \frac{e_z \pm i e_y}{\sqrt{2}} \quad (10)$$

显然， χ_x^\pm 是沿着 x 轴方向看时对应着左、右旋光。如果光子被看做是有明确角动量的物理实在，则 χ_x^\pm 是有真实含义的物理实在。公式(8)告诉我们光子状态 χ_0 是 χ_x^\pm 的两个态的线性相干叠加产生的。并不像经典物理似的， $m_s = 0$ 意味着光子角动量一定在与 z 轴垂直的方向。它只意味着光子处于类似于 χ_x^\pm 的两个态的叠加：即各有百分之五十的概率处于 χ_x^+ 或 χ_x^- ；并且这种叠加是一种相干叠加。如果忽略相干叠加这个概念，且不是涉及到塞曼效应，公式(8)~(10)是能够勉强解释原子中电子的跃迁过程的。即原子发生 $\Delta m = 0$ 的跃迁时，辐射出 χ_x^+ 或 χ_x^- 的一个光子；辐射这两种光子的概率一样，它们合成的光的振动沿着 z 轴方向，而传播方向与 z 轴垂直。

但是，上面忽略相干这个概念是没有道理的。如果承认光子是有明确角动量的物理实在，公式(8)中的相干叠加必须考虑，它只能说明原子中电子跃迁产生相干光子，分别是沿着与 z 轴方向垂直的方向为左右旋光，例如我们上面的分析中所举例的 x 轴方向的处于 χ_x^\pm 光。如果涉及到塞曼效应，则问题出来了。原子中电子跃迁不可能产生类似 χ_x^+ 或 χ_x^- 的光子。由于外磁场的影响，与电子的极化矢量是 e_z 和 e_y 对应的跃迁产生的辐射频率是不同的。因而根本不可能出现 χ_x^+ 或 χ_x^- 的光子。从公式(1)可以清楚地看出，原子的偶极子中 e_y 方向的跃迁对应的光子的角频率 $\nu_0 \pm \Delta\nu_0$ ，与偶极子为 e_z 方向的跃迁对应的频率 ν_0 不同，因而不可能出现类似 χ_x^+ 或 χ_x^- 的光子。故角动量守恒的观点解释塞曼效应会出现相互矛盾的情况。

4. 结论

虽然光子有确定的能量与动量[11]，且光子的角动量的实验早在1936年就存在，但是，光子的角动量的概念的合法性却值得商榷。在塞曼效应中，用角动量守恒的观点解释 π 线的偏振状态会出现错误。这也给我们提出了一个问题，光子角动量的概念到底在什么时候才具有明确的物理含义，到底什么范围

内才能合法地使用它而不会出现困难。这些问题的深入研究，会对人们对光的认识起到非常有意义的帮助，也是我们进一步的一个研究方向。

基金项目

本文在国家自然科学基金项目 10875018、973 项目 2010CB923202 和北京邮电大学精品课程的资助下完成。

参考文献 (References)

- [1] Foot, C. (2005) Atomic physics. Oxford University Press, Oxford.
- [2] Heitler, W. (1954) Quantum theory of radiation. Clarendon, Oxford.
- [3] Jackson, J. (1962) Classical electrodynamics. Wiley, New York.
- [4] Berestetskii, V., Lifshits, E. and Pitaevskii, L. (1984) Quantum electrodynamics. 2nd Edition, Pergamon, Oxford.
- [5] Haken, H. and Wolf, H. (2000) Physics of atoms and quanta. 6th Edition, Springer-Verlag, Berlin.
- [6] 杨福家 (2000) 原子物理学. 第三版, 高教出版社, 北京.
- [7] 张延惠 (2004) 原子物理学. 第二版, 山东师大出版社, 济南.
- [8] 刘国光 (1994) 塞曼效应中谱线的偏振. *大学物理*, **11**, 1-4.
- [9] 杨福家 (2000) 原子物理学. 第三版, 高教出版社, 北京.
- [10] 崔宏滨 (2009) 原子物理学. 中国科技大学出版社, 合肥.
- [11] Beth, R. (1936) Mechanical detection and measurement of the angular momentum of light. *Physical Review*, **50**, 115-125.