光磁共振实验中多量子跃迁奇偶性问题初探

张宁

（复旦大学材料科学系 上海 200433）

摘 要：光泵磁共振实验中铷原子光谱具有超精细结构，在磁场中原子的超精细结构发生塞曼分裂，于垂直产生塞曼分裂的静磁场方向加一射频场，满足一定条件时，原子在塞曼子能级间将产生受激跃迁和受激辐射。实验发现，当射频场强度较大时，会出现共振频率为单量子跃迁共振频率的整数分之一的多量子跃迁。进一步研究表明，奇数量子跃迁信号幅度远大于与其相近的偶数量子跃迁幅度，这种奇偶性可用能量守恒和角动量守恒解释。

关键词 光泵磁共振 多量子跃迁奇偶性 角动量守恒 光子 受激辐射

一、 引言

光泵磁共振实验中，铷原子在 D_1 线左旋圆偏振光作用下，由于选择定则的限制，都被抽运到基态 $M_F = +2$ 的塞曼子能级上。此时，在垂直于塞曼分裂的静磁场方向加一射频场，若射频场较大时，将会出现多量子跃迁信号[1][4]，n 量子跃迁信号的频率为单量子跃迁频率的 1 / n。一般认为，多量子跃迁级数越高，跃迁概率越小，信号越微弱。但是，实验观察发现，当多量子跃迁为偶数个数时，如双量子跃迁，四量子跃迁等，信号很小甚至观测不到；但当多量子跃迁为奇数个数时，如三量子跃迁，五量子跃迁等，信号幅度则远大于偶数时的情况，且仅在奇数（或偶数）量子跃迁前提下出现这种现象（级数越高，信号越小）。本文将对此进行初步探讨。

二、 实验

观测光磁共振实验中多量子跃迁信号的实验参数如下：

水平激磁电流：0.250A，垂直场已抵消地磁分量影响；

扫场：三角波 峰峰值 500mV（误差±20mV）；

射频场：正弦波，峰峰值均在射频场频率 1.9MHz 左右时测量（频率变化会导致峰峰值有些许改变），射频场幅度可通过信号线与双踪示波器直接相连观测。

扫场、水平磁场和地磁场水平分量同向，频率选取对准三角波波谷处的共振频率。

实验观测到的射频场与共振信号频率、峰峰值的关系如表 1 所示。

表 1 射频场与共振信号频率、峰峰值的关系

射频场峰峰值/V	共振峰频率（kHz）和峰峰值（mV）							
	1	2	3	4	5	6	7	8
5	1095.5kHz 146mV	731.3kHz 140mV	545.0kHz 8mV	365.0kHz 84mV	243.0kHz 80mV			
8	1096.0kHz 148mV	731.7kHz 140mV	546.4kHz 17mV	365.1kHz 100mV	243.3kHz 96mV	218.7kHz 46.4mV	145.6kHz 52mV	
15	1098.3kHz 148mV	731.3kHz 138mV	546.1kHz 26.4mV	364.9kHz 120mV	244.4kHz 110mV	218.1kHz 66mV	145.6kHz 73mV	104.4kHz 41.6mV

由表 1 可知，第三栏的信号频率为第一栏的 1/2，是 ^{87}Rb 的双量子跃迁信号。第四栏的信号频率为第一栏的 1/3，是 ^{87}Rb 的三量子跃迁信号，当然也可能是 ^{85}Rb 的双量子跃迁信号，因为 ^{87}Rb 与 ^{85}Rb 的 g_F 因子比值为 3：2。再看第五栏信号的频率为第一栏的 1/5，是 ^{87}Rb 的五量子跃迁信号，这两个信号的峰峰值明显比双量子跃迁的值大很多。对射频场峰峰值为 15V 时的数据进行分析，结果如表 2 所示。

表 2 射频场为 15V 时多量子跃迁信号幅度（括号内为峰峰值）

频率/kHz	1098.3	731．3	546.1	364.9	244.4	218.1	145.6	104.4
^{87}Rb/mV	1(148)		2（26.4）	3（120）		5（66）		
^{85}Rb/mV		1(138)		2	3（110）		5（73）	7（41.6）

根据表 2 得到如下关系图：

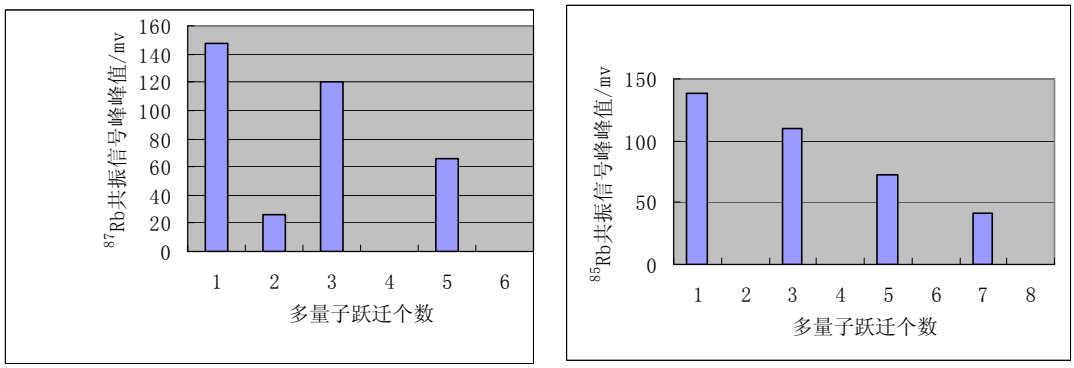

图 1　水平激磁电流 0.250A 时 Rb 共振信号强度与量子跃迁个数关系

由图 1 可知，偶数个数的多量子跃迁（二、四和六）强度很小甚至没有（如四量子跃迁和六量子跃迁），而奇数个数的多量子跃迁（一、三和五）强度较大。在奇数量子跃迁中间，随着级数增加，信号逐渐变弱。由于 ^{87}Rb 的三量子跃迁信号频率等于 ^{85}Rb 的双量子跃迁信号频率，难以区分，暂将其视为 ^{87}Rb 的三量子跃迁。

改变水平场激磁电流，将水平激磁电流增加到 0.350A，其余条件不变，结果如表 3 和图 2：

表 3 射频场为 10V 时多量子跃迁情况（括号内为峰峰值）

频率/kHz	1432．1	952.6	715.4	475.	317.6	286.1	191	136.2
^{87}Rb/mV	1（158）		2（15．2）	3（90）		5（50）		
^{85}Rb/mV		1（168）		2	3（104）		5（66）	7（23.2）

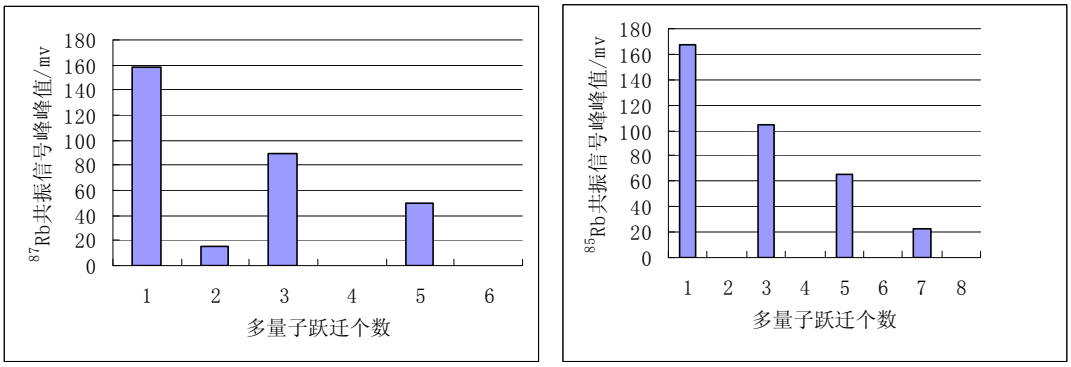

图 2　水平激磁电流 0.350A 时 Rb 共振信号强度与量子跃迁个数关系

表 3 和图 2 可发现与表 2、图 1 类似的现象，这里不再赘述。

三、 分析与讨论

D1 圆偏振光入射到铷样品泡中，使铷原子发生偏极化，大量原子被光抽运到基态 M_F=+2 塞曼子能级上，这时，在垂直于塞曼分裂磁场 B 方向加一频率为 ν 的射频磁场，当满足磁共振条件时原子将发生受激跃迁现象。原子吸收射频激发光子，与这种光子系统发生“共振”相互作用，使原子感应出同频率的电荷振荡，原子这时将处于态 n 和 n'的混合态 k，在两个态之间振荡，直至完成辐射能量的转换，原子吸收辐射能量，从初态跃迁到末态，在这个过程中由于从高能级跃迁到低能级，跃迁将伴随着发射出相应频率的光子。根据爱因斯坦受激辐射理论，受激发射光子将具有和和激发光子同频率、同相位、同传播方向和同极化[2]。原子吸收的射频场激发光子又会在原子跃迁时无差别地伴随发射出来，即能量和角动量均相同。同时，还会发射出由于高能级跃迁至低能级所产生的光子。

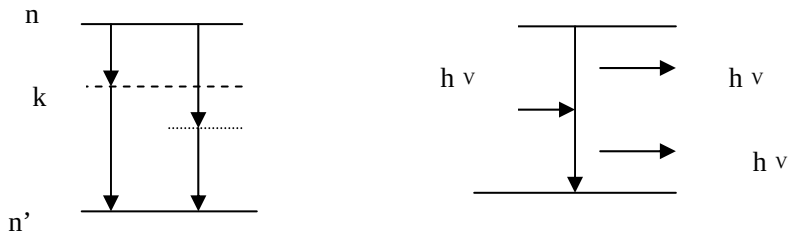

图 3 受激跃迁与多量子跃迁示意图

在吸收激发光子与受激发射光子的过程中，必须遵守能量守恒与角动量守恒。本实验中，原子从基态 $M_F = +2$ 能级受激向下跃迁到基态 $M_F = +1$ 能级，原子角动量减少了 $\hbar$，能量减少了 $h\nu$（塞曼子能级能量差）。这就意味着发射光子系统与激发光子系统之间的角动量差为 $+\hbar$，能量差为 $h\nu$。

激发光子是由射频场提供，由于射频场发出的激发光子是沿着与其动量方向相同的方向射进样品泡与原子发生“共振”作用，且轨道角动量$\vec{L}=\vec{r}\times\vec{p}$，$\vec{r}$为矢径，$\vec{p}$为动量，所以激发光子的轨道角动量为 0，只有自旋角动量。同时，射频场可看成一个线偏振场，它可以分解成一个左旋圆偏振场（角动量为$\hbar$）和一个右旋圆偏振场（角动量为$-\hbar$），即射频发射光子可以有$\pm\hbar$的自旋角动量。基于上述分析，一个激发光子的角动量只有$+\hbar$（自旋朝上）和$-\hbar$（自旋朝下）两种可能。

前面提到，对于受激发射光子，它的主要特征是不仅频率与激发光子相同，而且与激发光子具有相同的相位、传播方向和极化。所以一个发射光子的角动量也只能为$\pm\hbar$，且频率与激发光子一致[2]。

对于多量子跃迁过程，原子吸收 n 个激发光子，放出 m 个发射光子，且必须满足能量守恒与角动量守恒。故可作以下推测：

双量子跃迁：原子吸收两个频率为$\nu/2$的光子，发射四个频率$\nu/2$的光子

三量子跃迁：原子吸收三个频率为$\nu/3$的光子，发射六个频率$\nu/3$的光子

……

N 量子跃迁：原子吸收 N 个频率为ν/N的光子，发射 2N 个频率ν/N的光子

显然，上述推测满足能量守恒，发射光子与激发光子的能量差为 hν。

再看角动量是否守恒。对于三量子跃迁，其发射出的六个光子中有三个其状态与激发光子状态相同，故二者角动量抵消，剩下的三个光子可以组合成$+\hbar$的角动量，满足角动量守恒。对于奇数个数的多量子跃迁都能组合出$+\hbar$的角动量。如图 4 所示：

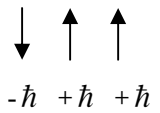

图 4 三光子的角动量组合之一

对于双量子跃迁，情况则不同。同样，其发射出的四个光子中有两个其状态与激发光子状态相同，故这部分光子与激发光子的角动量抵消，剩下的二个发射光子无论如何也不可能组合成$+\hbar$的角动量来满足角动量守恒，如图 5：

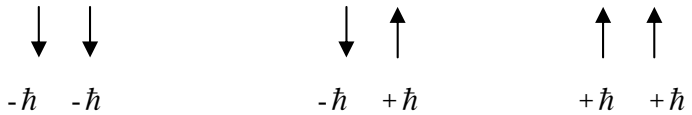

图 5 双光子的角动量组合

同样，对于四光子的动动量组合，只有$+4\hbar$、$+2\hbar$、0、$-2\hbar$和$-4\hbar$几种，也不可能组合成$+\hbar$的角动量。总之，只要是对于偶数的多量子跃迁，都不可能满足角动量守恒，因为偶数个光子的自旋角动量不可能合成为$+\hbar$。说明这种形式的多量子跃迁是禁戒的。

既然是禁戒的，跃迁就不能发生，但是实验中在双量子跃迁时还是能够看到

一个很小的信号，这又如何解释呢？前面所有关于跃迁的原理与推论，其前提条件都是基于电偶极近似，前面所提到的选择定则也是在电偶极近似下才成立的，对于电四极矩近似或更高级的近似就不再成立了。当然，电四极矩辐射的概率小于电偶极矩，但在射频场足够强时，很有可能更高级的辐射与电偶极矩相互作用，破坏了选择定则，使不符合选择定则的跃迁也可以发生，这样上述推测也就不成立，此时就可能发生偶数个数的多量子跃迁，但发生概率肯定不及单数个数的多量子跃迁。

如此则可解释为什么实验中看到偶数个数的多量子跃迁信号的强度很小甚至没有，而奇数个数的多量子跃迁信号却比较大的原因。

四、结论

综上所述，根据能量和角动量守恒定律所做出的推测可以很好的解释多量子跃迁中出现的奇偶性问题，这个推测也恰好符合光的受激辐射放大的原理，即高能级粒子集中地跃迁到低能级上，发射出与激发光子频率相同的光子（受激发射），而且单位时间受激发射光子数远大于激发光子数。

致谢

感谢复旦大学近代物理实验室俞熹、姚红英老师以及物理系徐晓华老师的指导！

参考文献：

[1] 吴思诚，王祖铨　近代物理实验 北京：北京大学出版社，2005:316~329
[2] 陈宏芳　原子物理学　科学出版社，2006:90~92
[3] 林辛未，殷传宗　量子力学中的角动量　西南师范大学出版社，2003:31~49,75~95
[4] 张清，陈一冰，王煜等 光泵磁共振实验中小信号的讨论[J] 物理实验，2000，20（10）:48~49