

光泵磁共振的多量子共振吸收效应

沈硕

(复旦大学 物理系 200433)

摘要：

光泵磁共振利用光抽运效应，研究子超精细结构塞曼能级间的磁共振。

由能级跃迁理论，一种原子的光泵磁共振现象在特定磁场下，对应某一特定磁共振频率。但实验中发现共振信号出现时，可测得多组共振频率。因此猜想，原子同时吸收多个光子，继而发生能级跃迁。本实验即验证并分析这一猜想。

关键词：

电磁学，多量子共振吸收效应，固定变量法，共振频率

I. 引言：

光泵磁共振实验于 1950 年由法国巴黎大学高等师范学校的卡斯特勒(Alfred Kastler,1902-1984)第一次完成。

该实验主要通过能级跃迁理论的跃迁选择定则，使原子吸收特定的圆偏振光，并增大能级间粒子布居数差。该圆偏振光的吸收可作为能级跃迁情况的测度，即光吸收对应能级跃迁，又对应能级布居数发生了改变。因此，可测得使该原子电子在塞曼能级间跃迁的共振外场频率。光泵磁共振亦常被其他实验利用，以研究微观粒子的结构等。

本文对外磁场共振频率并不唯一这一现象，提出多量子吸收假设，并通过实验验证这一假设。本实验利用光泵磁共振基本仪器，但需将扫场信号调至最大，以便找到较小的共振信号。同时固定除了所研究的频率之外的所有物理量，继而对测出的共振频率进行分析，属于固定变量方法。

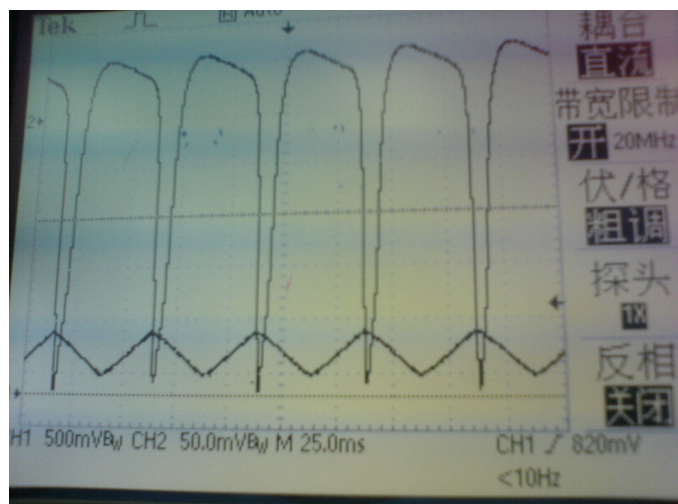
II. 实验原理：

实验研究的对象是气态的铷 (Rb) 原子。Rb 原子处于弱静磁场 B_0 中，则由于 $E = -\vec{\mu}_F \cdot \vec{B}_0 = g_F m_F \mu_B B_0$ (μ_F 为原子总磁矩) 原子的每个超精细能级将分裂为 $2F+1$ (F 表征超精细结构能级) 个塞曼子能级(用 m_F 标定)。相邻子能级间能量差为 $\Delta E = g_F \mu_B B_0$ 。

热平衡条件下粒子服从玻尔兹曼分布： $N_2 / N_1 = \exp(-\Delta E / k_b T)$ 。光泵就是通过原子对左

(右)旋圆偏振光吸收时，须遵守光跃迁选择定则，而增大粒子在各超精细能级间的布居数差。这时在垂直于静磁场 B_0 的方向加一频率为 ν 的射频场，满足共振条件 $h\nu = \Delta E = g_F \mu_B B_0$ 时，在塞曼子能级之间的跃迁称为磁共振，且服从选择定则 $\Delta F = 0$ ， $\Delta m_F = \pm 1$ 。

发生磁共振时因稳定的布居数差被打破，而重新开始光泵过程，信号表现为圆偏振光被吸收。实际信号如右图：



本实验即通过固定磁场 B_0 大小，外磁场手动扫频，有吸收信号出现时，对应频率即为该原子的共振频率。

实验时发现不同频率下共振吸收信号大小不同，有 10 倍至 20 倍的差异。因此，在扫频寻找共振信号时，应将示波器光电流端 (对应吸收信号) 量程调小，利于发现波形变化。在看到共振吸收信号，要做微调确定频率时再适当调节量程。

III. 实验结果及讨论：

总频率相同

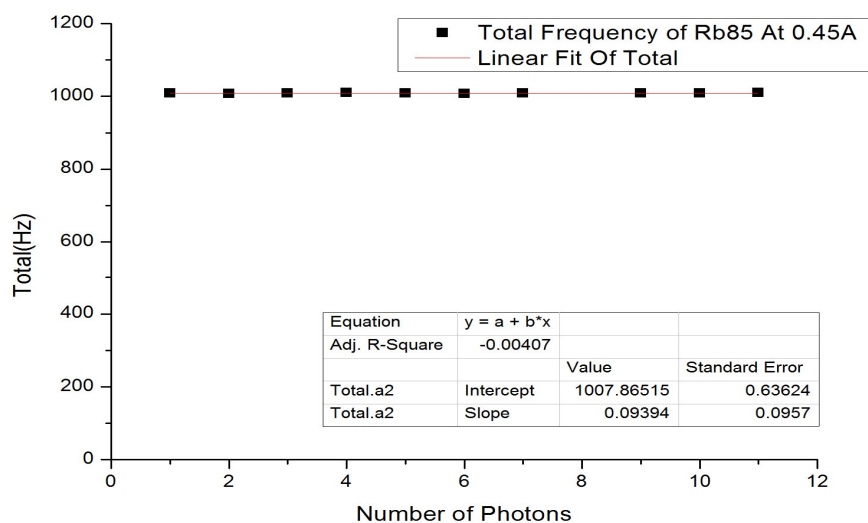
实验时将水平磁场电流分别调至 0.25A 及 0.45A，根据共振条件 $h\nu = \Delta E = g_F \mu_B B_0$ ，计算出理论共振频率分别为 528kHz,950kHz. 实验实测为 583kHz, 1008kHz. 有小于 10% 的偏差，认为是水平磁场电流，扫磁场与地磁场及磁场计算带来的偏差。鉴于本实验目的在于研究多共振频率间的关系，故将实验实测值认为是准确共振频率，在本文中称作极大共振频率。

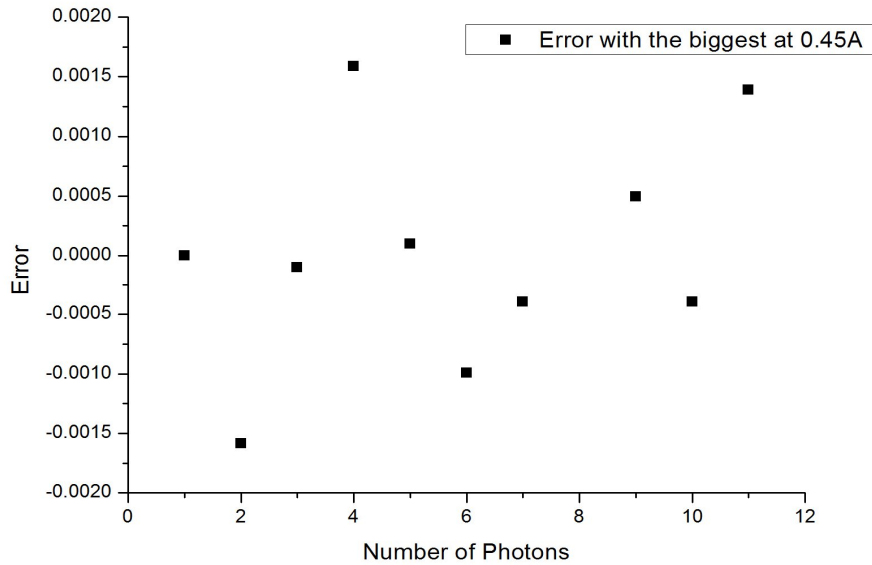
将得到的一组共振频率列表分析可明显发现，Rb87,Rb85 分别对应一组共振频率。下表为 Rb85 在水平磁场电流为 0.45A 时的共振频率，表中序号乘以其对应的共振频率恰约等于其极大共振频率。

Resonance v/Hz	No.	Total/Hz	Error With Biggest
1008.4	1	1008.4	0
503.4	2	1006.8	-0.00159
336.1	3	1008.3	-9.9167E-5
252.5	4	1010	0.00159
201.7	5	1008.5	9.9167E-5
167.9	6	1007.4	-9.9167E-4
144	7	1008	-3.96668E-4
112.1	9	1008.9	4.95835E-4
100.8	10	1008	-3.96668E-4
91.8	11	1009.8	0.00139

⁸⁵Rb 共振信号对应三角波波谷处扫频频率及多量子共振吸收假设验证

而下图分别是光量子数目与总频率关系及其与极大共振频率的误差。可看出如此处理数据得到的总频率——可理解为频率加权——为一常值，误差不超过 0.2%。





由此可以说明，多个低频光子同时与 Rb 原子作用，与一个处于共振频率的高频光子效果相同，而低频光子数目与频率的乘积恰为共振频率。原子同时吸收多个光子，而其频率，即能量之和恰为共振频率时，原子也可发生能级跃迁。

附表一至四分别是两个水平磁场电流下，Rb87,Rb85 两种原子，对应三角扫场的峰谷处（即磁场不同）对应的八组数据。多光子吸收假设均成立。

序数增加，频率和增加

将序数作为 x 轴，频率和作为 y 轴进行拟合。发现斜率为正，即说明总频率随序数增大而增大。分别对八组数据拟合，该规律均存在。斜率如下：

斜率	0.25A 扫场峰值处	0.25A 扫场谷值处	0.45A 扫场峰值处	0.45A 扫场谷值处
Rb87	0.46809	0.21369	0.04966	0.07431
Rb85	0.19107	0.17636	0.21512	0.09394

尽管斜率有大小区别，但八组数据均为正值，可说明测得的共振频率越小，其乘以光子数量后总频率越大。每个光子与原子进行能量交换时，都可能会有能量损失。因此同时吸收多个光子时损失变大，即对应总频率增大。

这一现象从另一个角度验证了多光子共振吸收这一假设。

IV. 结论：

综上所述，光泵磁共振实验中出现的多共振频率现象能够以多光子吸收理论加以解释。在非线性光学中有类似的现象，即双光子吸收：两个低频光子同时被吸收，激发高频（为两个低频光子频率之和）跃迁。并藉此原理制作了双光子吸收显微镜，可用更易得到的长波长光激发产生更有用的短波长光，用于实验。因此，多光子吸收理论可理解为双光子吸收现象的延拓，但在此之前，并未发现有数量更多的光子同时被吸收的现象。

多光子共振吸收现象很可能不单单发生在光泵磁共振实验中，因而可进一步对其他共振跃迁现象设计并进行实验。若有其他跃迁时亦成立，可利用低频光子激发粒子跃迁，并有可能对此有进一步的利用，如之前提到的双光子显微镜。

附表：

va1	No.	Total.a1	Error With Biggest	vb1	No.	Total.b1	Error With Biggest
873.5	1	873.5	0	995.4	1	995.4	0
436.1	2	872.2	-0.00149	497.7	2	995.4	0
290.5	3	871.5	-0.00229	332.7	3	998.1	0.00271
174	5	870	-0.00401	199.5	5	997.5	0.00211
145.8	6	874.8	0.00149	142.7	7	998.9	0.00352
125	7	875	0.00172	111.1	9	999.9	0.00452
97	9	873	-5.7241E-4	90.9	11	999.9	0.00452
79.5	11	874.5	0.00114				

表一：⁸⁷Rb 共振信号对应三角波波谷和波峰处扫频频率及多光子共振假设验证 (0.25A)

va2	No.	Total.a2	Error With Biggest	vb2	No.	Total.b2	Error With Biggest
583.2	1	583.2	0	665.2	1	665.2	0
290.5	2	581	-0.00377	332.7	2	665.4	3.00661E-4
194.4	3	583.2	0	221.6	3	664.8	-6.01323E-4
145.8	4	583.2	0	133.2	4	666	0.0012
116.4	5	582	-0.00206	111.1	5	666.6	0.0021
97	6	582	-0.00206	95.2	7	666.4	0.0018
83.3	7	583.1	-1.71468E-4	74.1	9	666.9	0.00256
64.9	9	584.1	0.00154	60.6	11	666.6	0.0021
53.1	11	584.1	0.00154				

表二：⁸⁵Rb 共振信号对应三角波波谷和波峰处扫频频率及多光子共振假设验证 (0.25A)

va1	No.	Total.a1	Error With Biggest	vb1	No.	Total.b1	Error With Biggest
1511.2	1	1511.2	0	1638.7	1	1638.7	0
755	2	1510	-7.94071E-4	817.3	2	1634.6	-0.0025
503.4	3	1510.2	-6.61726E-4	544.5	3	1633.5	-0.00317
378.1	4	1512.4	7.94071E-4	408.4	4	1633.6	-0.00311
302.1	5	1510.5	-4.63208E-4	327	5	1635	-0.00226
252.5	6	1515	0.00251	271.9	6	1631.4	-0.00445
216.1	7	1512.7	9.92589E-4	233.6	7	1635.2	-0.00214
167.9	9	1511.1	-6.61726E-5	181.7	9	1635.3	-0.00207
137.4	11	1511.4	1.32345E-4	148.6	11	1634.6	-0.0025
116.3	13	1511.9	4.63208E-4	125.7	13	1634.1	-0.00281
100.8	15	1512	5.29381E-4	109	15	1635	-0.00226

表三：⁸⁷Rb 共振信号对应三角波波谷和波峰处扫频频率及多光子共振假设验证 (0.45A)

va2	No.	Total.a2	Error Biggest	With	vb2	No.	Total.b2	Error Biggest	With
1008.4	1	1008.4	0		1089.9	1	1089.9	0	
503.4	2	1006.8	-0.00159		544.5	2	1089	-8.25764E-4	
336.1	3	1008.3	-9.9167E-5		363.5	3	1090.5	5.50509E-4	
252.5	4	1010	0.00159		271.9	4	1087.6	-0.00211	
201.7	5	1008.5	9.9167E-5		218.3	5	1091.5	0.00147	
167.9	6	1007.4	-9.9167E-4		181.7	6	1090.2	2.75255E-4	
144	7	1008	-3.96668E-4		156	7	1092	0.00193	
112.1	9	1008.9	4.95835E-4		121.2	9	1090.8	8.25764E-4	
100.8	10	1008	-3.96668E-4		99.2	11	1091.2	0.00119	
91.8	11	1009.8	0.00139						

表四：⁸⁵Rb 共振信号对应三角波波谷和波峰处扫频频率及多光子共振假设验证 (0.45A)