

运用光抽运-磁共振测量铷原子状态的 g_F 因子

何正良, 复旦大学物理系, 上海, 200433.

实验在气态下测量铷原子 ^{85}Rb 与 ^{87}Rb 最大 F 耦合状态的 g_F 因子. 对于 ^{85}Rb , $g_{F=3}=0.338\pm 0.004$; ^{87}Rb , $g_{F=2}=0.504\pm 0.005$. 测量的精确度为 1%. 我们对核磁矩对 g_F 值的影响以及外磁场强度对实验精度的影响进行了计算与讨论. 根据测得的 g_F 因子实验测量了地磁场的水平分量.

关键词: 测量实验; g_F 因子; 光抽运; 磁共振;

光抽运技术在上世纪五十年代被提出, 它的一个重要作用为改善波普学方法. 在常温热平衡下, 磁共振涉及的能级上的布居数差别很小, 因此偶极跃迁的概率小, 造成共振信号强度不强. 若加上样品浓度低(如气态样品), 则共振信号强度很弱. 光抽运技术利用圆偏振光束激发原子跃迁, 原子受激跃迁遵循选择定则. 若跃迁逆过程为无辐射跃迁, 则在逆过程中电子均匀跃迁至各能级. 通过此方法能够得到原子的布居数差, 提高共振强度.

本实验的对象为铷 (Rb) 的气态自由原子. 铷只有一个价电子, 其轨道主量子数为 5, 电子自旋 $J=1/2$. 由最低激发态向基态跃迁时产生的谱线有 794.8nm 与 780.0nm 双线.

自然界的铷有两种同位素, ^{85}Rb 占 72.2%, 核自旋量子数 $I=5/2$; ^{87}Rb 占 27.8%, $I=3/2$. 核自旋与电子自旋都带有磁矩, 存在耦合作用, 相互作用中总角动量守恒. 外加强磁场, 其强度小于核与电子的耦合作用中的内磁场时, 磁矩与磁场作用, 但是以耦合作用为主, 总角动量量子数 F 保持不变. 总磁矩 μ_F 与总角动量 P_F 的关系式为, $\mu_F = g_F e P_F / 2m_e$, g_F 为比例因子, 本实验对其数值进行测定.

一. 理论与方案

1. 光抽运

以 ^{87}Rb 为例, $I=3/2$ 与 $J=1/2$ 可合成 $F=1$ 与 $F=2$ 两种状态. 气态 ^{87}Rb 原子接受由铷灯发射的 794.8nm 谱线照射时, 将发生跃迁; 实验中选择单一谱线, 用滤波片滤掉 780.0nm. 光照为左旋偏振光时, 选择定则为 $\Delta F = 0, \pm 1; \Delta M_F = +1$. 跃迁初、末位置都有 $F=1$ 与 $F=2$ 两组状态, M_F 的最大值都为 +2. 根据选择定则, $F=2, M_F=+2$ 的能级无法受激跃迁, 其余的能级都可跃迁. 弛豫过程中对于电子多情况辐射与无辐射跃迁返回基态, 选择定则为 $\Delta F = 0, \pm 1; \Delta M_F = 0, \pm 1$, 电子可跃迁至基态的各子能级. 因此, 在此过程中, 电子处于 $F=2, M_F=+2$ 能级的 ^{87}Rb 原子数增加. 经过多次往返跃迁, 整体上电子聚集在该子能级, 造成劈裂能级中电子布居数偏极化. 此过程即为光抽运, 当光抽运达到饱和时, 铷原子样品不再吸收光照. 对于 ^{85}Rb , 情况类似.

2. 磁共振

^{87}Rb 原子偏极化达到饱和后，不再吸收左旋偏振光。外加磁场造成能级分裂，相邻子能级间的能量差 $\Delta E = g_F \mu_B B$ 。在垂直于原磁场的方向加上频率为 ν 的射频磁场，当满足 $h\nu = g_F \mu_B B$ 时，发生磁共振。沿磁场方向原子总磁矩在子能级间转变，消除原子分布的偏极化。光抽运将再次发生，使布居数偏极化，并与磁共振的逆作用达到平衡。

3. 方案

实验观测的量为磁共振条件，即为使磁共振发生的射频磁场频率 ν 。实验装置见图 1。直接探测的量为左旋偏振光对气态铷样品的透射率。光照由铷灯泡发出，经过偏振片、凸透镜与 1/4 波片组合后成为平行的左旋圆偏振光。亥姆赫兹线圈组合有四个线圈，竖直线圈用于抵消地磁场的竖直分量；水平线圈产生水平磁场；水平扫场线圈提供随时间轻微变化的磁场，本实验采用三角波扫场；射频线圈提供触发磁共振的射频磁场。铷样品泡中气、液态平衡，被恒温控制在 40~60°C。调节射频磁场的频率，发生磁共振时，探测到的光照强度减弱，在三角波上对应的磁场大小位置处有光强吸收谷（见如图 2）。

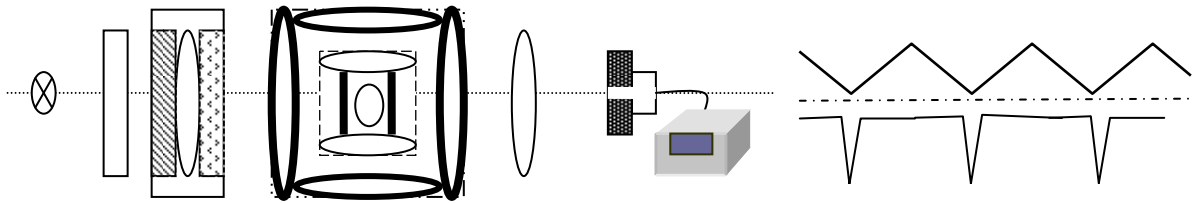


图 1 实验装置（侧视）；自从左至右依次为：铷灯、滤波片、偏振片&凸透镜与 1/4 波片组合、亥姆赫兹线圈&恒温槽与铷样品泡、凸透镜、光电接收器以及示波器。

图 2 三角波扫场与磁共振信号

加一定水平磁场 B_0 ，并且强度大于水平地磁场 $B_{//}$ ；调节射频频率，使共振信号出现单峰，此时频率为 ν_1 ；改变水平场线圈磁场 B_0 方向，调节频率为 ν_2 时，再次得到单峰共振信号。将扫场三角波的下顶角处磁场大小记为 B_s ，根据 $h\nu_1 = g_F \mu_B [B_0 + (B_s + B_{//})]$ 、

$$h\nu_2 = g_F \mu_B [B_0 - (B_s + B_{//})]，可得到，g_F = \frac{h}{\mu_B B_0} \frac{\nu_1 + \nu_2}{2}。$$

通过相对地改变水平地磁场 $B_{//}$ 方向进行前后两次测量，还可以测得 $B_{//}$ 的大小。初始共振频率为 ν'_1 ；同时改变扫场与水平场线圈电流方向后，共振频率为 ν'_2 。可以得到

$$B_{//} = \frac{h}{\mu_B g_F} \frac{\nu'_1 - \nu'_2}{2}。$$

二. 结果与分析

对于每次测定，实验在三种不同外加水平磁场的情况下测量了三组数据。得到的结果为：⁸⁷Rb 的 $g_{F=2}$ 值为 0.504 ± 0.005 ；⁸⁵Rb 的 $g_{F=3}$ 为 0.338 ± 0.004 。地磁场的水平分量为 $(2.81 \pm 0.03) \times 10^{-5} \text{T}$ ；磁共振信号的共振线宽为 30kHz。实验时水平磁场越均匀、竖直方向磁场越接近零值，共振线宽越小。关于 g_F 的值对三组数据线性拟合得到结果不确定度小，都为 0.002；考虑到三组数据次数较少，结合 30kHz 的共振线宽，取测量频率的不确定度为 8kHz。外加该项不确定度后得到以上最终结果。

理论上对于 g_F 值可以进行粗略计算。由于核子质量大，核磁矩比电子磁矩小了 3 个数量级，首先做近似只考虑电子磁矩。 μ_F 取为绕总角动量 \vec{P}_F 旋进的电子磁矩在 \vec{P}_F 方向上的投影。由此理论计算 g_F ， $g_F = g_J \frac{F(F+1) + J(J+1) - I(I+1)}{2F(F+1)}$ 。对于 ⁸⁷Rb， $I=3/2$ ， $F=1$ 与 $F=2$ 两种状态的 g_F 计算值的绝对值都为 0.5，此为只计算电子磁矩的缘故；⁸⁵Rb 两种耦合状态的 g_F 的绝对值都为 1/3。

实验结果与 g_F 理论粗略计算值比较，实验值有小量偏大。⁸⁷Rb 的 g_F 值相对偏差为 0.8%，⁸⁵Rb 的相对偏差为 1.5%。现在考虑核磁矩，对理论值进行修正。⁸⁷Rb 的核磁矩 μ_I 为 +2.75n.m，⁸⁵Rb 的核磁矩为 +1.35n.m^[1]。修正项为 $\delta g_F = \frac{\mu_I m_e / (n.m)}{m_p} \cdot \frac{F(F+1) + I(I+1) - J(J+1)}{2F(F+1)}$ 。对于 ⁸⁷Rb， $F=1$ 时核自旋与自旋相反， $\delta g_F = 1.9 \times 10^{-3}$ ，考虑核与电子的相反电性，此项为正的修正； $F=2$ ，有负的修正 1.1×10^{-4} 。对于 ⁸⁵Rb， $F=2$ ，有正的修正 9×10^{-4} ； $F=3$ ，有负的修正 6×10^{-4} 。实验中的磁共振只涉及状态 F 的子量子数 M 最大的能级向相邻能级跃迁，因此在原则上，对两种同位素测量的 g_F 值只对应于各自最大 F 值的耦合状态。但是，考虑到测量的精度，测量结果对于其他 F 值的状态也适用。

考虑实验方案上的一个近似处理：核与电子相互耦合作用强于各自受到外加磁场的作用。核磁矩产生的磁场小，需要估计核磁矩对电子产生的磁场大小。电子自旋磁矩与核磁矩都为磁偶极子，相互作用的一级强度的量级为

$$E \sim \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{e\vec{P}_I \cdot \vec{\mu}_J}{m_p r^3}$$

取 $P_I = \hbar$ ， $r = 0.25 \text{nm}$ (r 为原子半径)，可以得到核磁矩产生的有效均匀磁场为 $6 \times 10^{-2} \text{T}$ 。实际上情况为，在球对称性下，相互作用一级强度为零，需要计算二级修正。上式计算的一级强度对应的磁场比地磁场的 (10^{-5}T) 大三个数量级。实验所加的水平场的最强时约为 $2 \times 10^{-4} \text{T}$ ，比原子内场小两个数量级。因此，实验存在的一个问题是，弱外场近似精确度较差，精确度至多为

1%. 当外加强磁场, 以粒子磁矩与外加磁场作用为主时, g_F 趋向于 g_J : 两种情况的 g_F 值差距与测量值本身为同等数量级。因此测量值分别比 0.5 与 1/3 偏大, 而且 g_F 的测量值的精确度只能为 1%, 这与实验测量的共振线宽的大小相符。结论为 1) 减少实验时的外加磁场强度, 水平地磁场进行一定的抵消, 可以使测量值更加精确。2) 若外加磁场加强几十倍 (可行性高), 预期可以得到显著不同的 g_F 值。以及 3) 实验精度若略有上升, 实验结果有望反映核磁矩。

估计在温度为 50°C 下分裂子能级布居数的情况。在热平衡下, 能级间距为 ΔE 的两个能级的布居数关系为: $N_2 = N_1 \exp(-\Delta E/k_0T)$ 。对于两个能级为同一量子数 F 的状态中的相邻分裂能级, 在本实验中, 能量差 ΔE 的量级对应于 1MHZ 的电磁波的能量; 由此计算, 在在样品的温度下 N_1 与 N_2 的相对差距小于 10^{-6} ; 无外加磁场时, 对于 ^{87}Rb 中 $F=1$ 与 $F=2$ 两种状态, ΔE 对应于电子磁矩与核磁矩平行与反平行状态的能量差, 其数值小于 0.01mev, 能级上的布居数相对差小于 10^{-3} ; 因此, 可认为涉及的基态各能级上的布居数均匀。

三. 结论

本实验在气态下测量了铷原子 ^{85}Rb 与 ^{87}Rb 的最大 F 耦合状态的 g_F 因子, 测量的精确度为 1%。重点对实验近似忽略的项进行了明确的理论计算, 结果为近似精度低, 近似忽略的大小接近 1%。提出了有望反映核磁矩的实验。对于此实验以及与磁共振相关的实验都提供了有力的分析, 为实验的改进提供助益。

参考文献

1. P.Raghavan, Table of nuclear moments, At. Data and Nucl. Data Tables 42,189(1989).
2. 光泵磁共振的研究与应用, 何正良, 2010, 未发表.