

光泵、光泵磁共振及其进展

李大年 王金山

(北京师范大学无线电电子学系)

一、光泵概述

1. 光谱学可以看作是一种实验的傅氏分析方法，它主要是在频率域上来研究光谱线及其相对强度，并从而探查和研究原子和分子的结构与运动。

光泵 (optical pumping) 又称光抽运，可以看作是一种不用光谱仪的光谱学。它用某种方法 (常常是用光及射频电磁场) 对原子加以扰动，然后观察光的吸收或辐射的强度或偏振的变化，从而探查出原子及其运动的详尽情况。在这个意义上，可以说光泵实验也是一种双共振实验，即光频-射频双共振实验。

光泵磁共振是光泵的主要内容，它是用光来检测和发现磁共振，这一磁共振可以发生在一组塞曼能级之间，也可以发生在超精细结构能级之间，原子或分子可以处于基态，也可以处于激发态。由于这里是用检测到一个光子来发现和探查出一个射频量子的吸收或发射 (在塞曼或超精细结构能级之间)，而前者的能量为后者的 10^6-10^7 倍，可以比较容易观测，因而光泵磁共振的灵敏度是十分高的。通常的磁共振要求样品密度为 10^{17} spin/cm³，而光泵磁共振只要求样品的密度为 10^6 spin/cm³。

2. 众所周知，磁共振方法是把待研究的原子置于一个静磁场 $B_0 = B_z K$ 内，由于这一磁场，原来简并的能级产生劈裂，其劈裂值 $\Delta E = \hbar\omega_L$ ， ω_L 为拉摩尔角频率。此时再外加一个随时间变化的磁场 B_1 (简称时变磁场)，它在垂直于 B_0 的平面内以角频率 ω 旋转。这一时变磁场 B_1 也可以看作是由能量为 $\hbar\omega_1$ 的射频量子

组成。当频率 $\omega_1 = \omega_L$ 时，就会在这一对能级之间诱发磁偶极跃迁，并且可以用检测射频量子的受激发射或吸收来观察磁共振的发生。通常的磁共振是对基态原子进行的，对于激发态原子用通常的方法很难在能级之间达到较大的粒子数差值 ΔN ，因而不易观察到磁共振。然而用共振的偏振光来激发原子，则可以达到较大的粒子数差 ΔN 。这可以用图 1 来说明。图

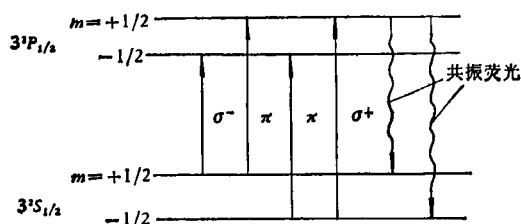


图 1

中 σ^- , π , σ^+ 光分别表示右旋偏振、线偏振及左旋偏振光。如果我们只用左旋偏振光 σ^+ 来照射样品，则由于在跃迁过程中角动量守恒，此时只能实现由 $m = -\frac{1}{2}$ 的下能级至 $m = +\frac{1}{2}$ 的上能级的跃迁。跃迁中粒子磁量子数 m 的变化 $\Delta m = 1$ ，正是由于吸收了 σ^+ 光子的角动量所致 (对于 σ^- 光及 π 光激发时， Δm 分别为 -1 和 0)。粒子在上能级约经 10^{-8} s 后自发辐射共振荧光重新返回至基态，并且又会被泵浦到高能级上去。这样不断泵浦的结果，就可在基态塞曼子能级之间实现一个较大的粒子数分布差 ΔN 。这种激发的方法称为光泵。如果此时再加上射频磁场 B_1 ，当射频场的频率 ω_1 等于拉摩尔频率 ω_L 时，也可以观察到磁共振现象。这种磁共振就称为光泵磁共振。有关光泵

的基本内容可参看文献[2].

3. 历史上最早的光泵实验可以溯源于1925年, E. Fermi 等人曾观察到对水银蒸汽施加一时变磁场时, 改变磁场的频率, 可以观察到共振荧光偏振的变更. 由这些实验可以决定激发态的 g 因子和寿命. 1940 年以后, 射频和微波波谱学吸引了很多物理学家和化学家的注意. 磁共振技术获得了很大发展. 1950 年, 法国 Kastler 提出了用光泵方法来研究基态和激发态能级的塞曼和超精细结构. 自此以后, 光泵和光泵磁共振方法成了研究原子、分子结构的强有力的工具. 光泵磁共振技术可以用来测量塞曼劈裂、超精细劈裂、核磁矩、核自旋、寿命、核电四极矩、激发态的 g 因子、自旋-晶格弛豫时间、自旋交换截面等等. 其精确度和可靠性都不亚于原子和分子束磁共振技术, 而且设备简单, 价格低, 因而光泵方法已经成为研究原子和分子物理的一个重要实验手段. 为此, Kastler 获得了 1966 年诺贝尔物理学奖.

光泵技术也直接促使了激光器的发明, 1961 年, Maiman 发明的红宝石固体激光器就是利用光泵的方法实现粒子数反转的, 激光器又可以作为光泵方法的高强度高单色性的光源, 因而又导致了激光磁共振光谱学以及激光荧光光谱学的发展. 此外由于激光的高强度, 不但可研究光泵产生的线性效应, 也可以研究光泵产生的非线性效应, 这就大大地丰富了光泵技术的研究领域.

二、各种光泵实验方法

1. 光泵磁共振实验

上面提到过它是一种把光泵概念与磁共振概念结合起来的一种光频-射频双共振实验. 在光泵技术中, 这种射频共振是用光学方法来检测的. 被检测的样品一般是原子蒸气或原子束, 有的也可以处于凝聚态. 被检测的量可以是传输的光的强度变化, 也可以是散射光的偏振变化或频率变化. 也可以用与泵浦光交叉的光束强度的变化来检测. 用光学方法检测射频

共振的种类如下:

(1) 蒸气室(充以被测样品蒸汽)

(a) 传输光检测, 强度变化; (b) 散射光检测, 偏振变化; (c) 散射光检测, 频率变化; (d) 交叉光束检测, 横向光束的吸收呈现调制; (e) 调制的泵浦光, 传输光强度的变化; (f) 自旋交换光泵, 传输光强度的变化.

(2) 利用被测样品的原子束

(a) 散射光强度或偏振的变化; (b) 经光泵后到达收集器的束强度的变化.

(3) 固体

研究固体中的顺磁离子的共振荧光.

2. 弛豫、自旋交换、亚稳态交换研究

由光泵所激发的原子的磁化(又称取向)是一种非热平衡分布, 所以它会弛豫到平衡状态. 通过对共振线宽的测量就可以决定弛豫时间(它是线宽的倒数). 这一弛豫时间也就是自旋寿命, 它与原子之间的相互作用有关. 例如碰撞, 自旋-自旋的相互作用, 电子自旋-核自旋相互作用. 而电子自旋与核自旋的相互作用又包括了被光泵激发了的原子与蒸气室器壁表面上的原子的相互作用. 显然, 这一研究对于弄清表面物理的机制是有益的. 通过不同原子之间的自旋-自旋相互作用, 可以导致不同原子的自旋交换, 这对那种不宜用光泵方法激发其自旋具有确定取向或排列(即具有确定的量子数 m) 的原子, 例如 ^1H , ^2H 和 ^3H 就更有重大意义. 通过原子之间的相互作用还可以实现亚稳态交换, 即用某种方法使一种原子处于亚稳态, 并使其自旋具有确定的取向或排列, 然后通过第二种原子的碰撞激发使第二种原子在基态上具有确定的取向或排列. 实验表明, 原子在后一状态的自旋弛豫时间非常长. 这种碰撞光泵方法导致以后发展了碰撞光谱学. 总之, 上述实验可以详细地研究原子中的各种能级结构以及原子与原子之间的相互作用, 因而对于原子和分子物理学是非常有意义的.

3. 原子相干性以及相干散射研究

用光泵所激发的原子, 可以使其在能级 E_A 和能级 E_B 之间粒子数有很大的差异. 众所周

知,在量子力学中粒子数可以用密度矩阵 $[\rho]$ 的对角元 ρ_{AA} 和 ρ_{BB} 表示。其与时间的依赖关系可以用 $|\exp(-iE_A/\hbar)t|^2$ 和 $|\exp(-iE_B/\hbar)t|^2$ 表示,而其非对角元 ρ_{AB} , ρ_{BA} 与时间的依赖关系则为 $\exp[\pm i(E_A - E_B)/\hbar]t$ 。即其时间相位关系不是无规的,而是存在着一定的关系,这种关系称为相干性。这种相干性可以在光泵实验中测量出来。例如,在交叉束检测中,横向光束的吸收呈现调制性,即是由时间因子 $\exp\left[\pm i\left(\frac{E_A - E_B}{\hbar}\right)t\right]$ 所产生。这种原子之间的相干性还可以通过光子的发射和吸收由一个原子传递到另一个原子,这就是相干散射。这种相干性还可以表现在不同原子所发射的不同频率的光,其相位之间有确定的关系,因而这些光之间可以实现相干差拍现象,称为“量子拍”。这种“量子拍”在光泵实验中已观察到。这种相干性也是激光器锁模和超短脉冲产生的基础。“量子拍”的方法以后在激光光谱学中也得到了发展。已用它测量了一系列原子、离子或分子中的超精细结构。而这种方法是无多普勒加宽的,因而分辨率很高。

4. 能级的光移动与衣冠原子

光泵实验中发现,当原子蒸气被光辐照时,不但产生感应吸收,而且还导致了原子能级的移动。这一现象可以用量子力学加以解释,即原子受光场辐照时,应把原子和光场(电磁场)看作一个复合系统。采用相互作用表象时,系统的密度矩阵 ρ 的运动方程为

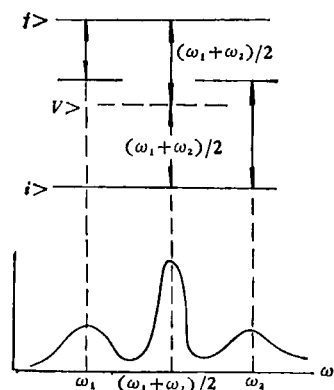
$$\frac{d}{dt} \rho = \frac{1}{i\hbar} [\delta H, \rho],$$

δH 为光场与原子系统的相互作用能, $\delta H = \delta E - i\hbar \frac{\delta\Gamma}{2}$ 其虚部 $\delta\Gamma$ 导致吸收的变化,其实部 δE 导致色散的改变,此即光致“频移”。这一现象与光谱学中的兰姆移位的性质是一致的,只不过后者是由于原子与涨落的零点能电磁场相互作用而致。上述实验还引出了“衣冠原子”的概念,即我们所研究的对象是(原子+场),而不是单独原子本身。用这一观念进行的光泵研究,测出的衣冠原子的朗德 g 因子呈现出一种调制

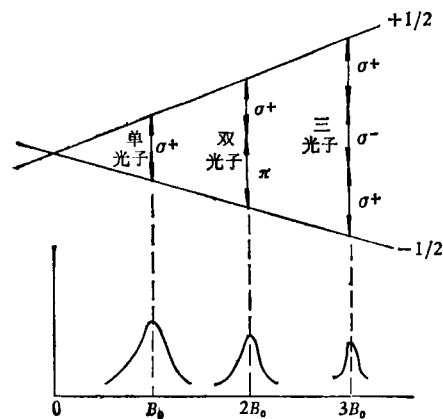
性质,实验结果与理论符合得很好。

5. 多重量子共振

在光频-射频双共振实验中,还曾经观察到两种类型多重量子共振。第一种类型是当射频频场不太强时可以观察到两个共振峰,而当射频频



(a) 第一种类型



(b) 第二种类型

图2 多重量子共振

场增强时两个峰重叠并且在中间频率上出现了第三个窄带的共振峰,如图2(a)所示。这可以用能级 i 与能级 f 中间出现一个虚能级 v 的双重量子跃迁来解释。图2(b)中的第二种类型的跃迁不需要中间能级,它是当两种不同偏振(σ^+ 光和 π 光, π 光又可分解为 σ^+ 光与 σ^- 光)的光同时辐照时产生的多重量子跃迁,跃迁过程中要同时满足能量守恒及动量守恒。第一种类型的多重量子过程后来在激光光谱学中被证实是一种非常重要的物理过程,利用它可以发展一种双光子的光谱学。这对于要探查那种用

一次激发到达不了的能级就特别有意义。此外,如果被分子或原子所吸收的两个光子的动量方向相反,那么谱线的多普勒展宽效应就可以抵消。因而可以发展精确度极高的无多普勒效应多光子光谱技术。而第二种类型的多重量子过程除在射频频带里以外,还没有在电磁波的其他频带内观察到。

三、光泵技术的新近进展

1. 激光磁共振

光泵和磁共振技术是在激光器发明之前就已存在。在激光器发明之前,光泵用的光源是光谱灯。它的谱线的强度和单色性以及光谱范围,无法与激光器相比拟。1968年, K. M. Evenson 等人首先用一台固定频率的远红外激光器代替固定频率的微波源,用它来作激光顺磁共振光谱学实验获得成功。最近用 CO, CO₂ 以及 H₂O 激光器在中红外区域也获得成功。此外,还可以应用可调谐的半导体和染料激光器作光源。样品可以放在激光器腔内,也可以放在腔外。当满足磁共振条件时,可以观察到作为外磁场函数的激光束强度的变化。由于激光磁共振的灵敏度非常高,特别适宜测量以小浓度出现的基团。例如射电天文学在星际空间中检测到的所有基团,都可以在实验室中用激光磁共振技术加以研究。它还可以精确地测量转动常数、精细结构和磁矩。由于激光磁共振光谱技术的高灵敏度,所以它在星际分子研究、化学反应动力学(着重研究 H₂O) 以及分子-离子光谱技术中有着重要意义。

与激光磁共振光谱技术相似,激光斯塔克光谱技术是利用有极分子的电偶极矩与外电场的相互作用引起的分子能级劈裂。这方面近年来也有了很大的发展,尤其是利用激光和强微波场的双共振技术。

2. 激光荧光光谱学

所有的光泵实验都可以用激光器来作光源。而且由于激光器的谱线非常之多,又有可调谐的激光器以资利用,所以不必象以前的光泵实验那样必须选择那些光谱灯的原子共振线与所研究的样品的原子或分子吸收线相合的样品,因而它的研究范围大为扩展。而且还可选择一条特定的激光谱线在稠密的分子吸收光谱中实现选择性的激发,此时可以对荧光光谱进行快速识别。此外激光的高强度一方面可以提高实验装置的信噪比和灵敏度,另一方面不但可以观察自发荧光,而且可以实现谱线的受激发射。用激光作光泵还可观察激发态的能级结构,此时可配合采用各种双共振方法。例如光频-光频双共振,光频-微波双共振,光频-射频双共振。光频-光频双共振可以看作是一种多光子过程,利用它可以实现分级激发,可以观察到很高能级上的荧光谱线。利用激光还可以作通常的光泵技术中的能级交叉实验,可以对汉利(Hanle)效应、自旋交换和碰撞光谱学进行研究。激光光泵还可配合原子束和分子束技术进行一些特定原子或分子束光泵实验,它们也具有很高的分辨率。

参 考 文 献

- [1] G. W. Series, *Contemp. Phys.*, **22-5** (1981), 487.
- [2] 陈扬毅、龚顺生, *物理*, **10-10**(1981), 584.
- [3] P. B. Davies et al., *Gov. Rept.*, (1982), N82-22338/7.
- [4] G. W. Series, *Quantum Optics, Proceeding of The Scottish Universities Summer School*, Edited by S. M. Kay and A. Maitland, Academic Press, (1970), 395—482.
- [5] Corney Alan, *Atomic and Laser Spectroscopy*, Oxford, Clarendon Press, (1977).
- [6] W. Demtröder, *Grundlagen Und Techniken der Laserspektroskopie*, Springer-Verlag, (1977).
- [7] A. Kastler, *Science*, **158** (1967), 214.
- [8] W. Happer, *Rev. Mod. Phys.*, **44** (1972), 169.