

物理学史和物理学家

肖洛、激光和激光光谱

王兆永

(复旦大学物理系)

10月19日清晨4点不到,一阵急促的电话铃响起在肖洛(A. L. Schawlow)教授位于斯坦福(Stanford)大学校园附近他的寓所里,电话里传来一位记者向他这位今年诺贝尔(Nobel)物理奖获得者的祝贺,并提出记者的一个职业性问题“您对此感想如何?”他事后对别人说,当时对于他终究成为诺贝尔奖金获得者,他难以置信,“或许这是另外一个人吧!”他这么想,因为在1964年,他有过类似的经历。当时,一批文学和摄影记者蜂拥来到他的寓所,传来和上述相同的消息,但很快就明白,是记者们误会了,那年的物理奖授予了和他一起发表提出制造激光器可能性的奠基性文章的汤斯教授(C. Townes,他是肖洛的妻兄)及另外两位苏联学者。正因为如此,今年他对此格外谨慎,后来,瑞典皇家科学院证实了这个消息。于是,肖洛成为斯坦福大学第五位诺贝尔物理奖获得者,和世界上自1901年以来第99位物理奖获得者,也是美国物理学家中得此桂冠的第46名。

当天上午,在肖洛上课的教室里,气氛特别热烈,学生们济济一堂,同时,这个教室也成了一次记者招待会的场所。下午,斯坦福物理系又在图书室中举行了庆祝会。他在会上说,这次获奖对他极大的荣誉,也说明“我们所从事的研究课题是值得称道的”。他说,“世界上还有许多美好的事物留待我们去发现”。肖洛是一位谦逊的喜欢说笑话的人,他又说,“一会儿以前,我发现自己是个傻瓜,幸好世界上还有许多傻瓜蛋,你看,有多少简单的事物为人们所忽视而未被发现,我希望你们大伙能发现点东西,然后你们便可得诺贝尔奖金了。”

正如许多人说的,肖洛确实有资格,而且早就有资格取得这一项荣誉了。这次授奖虽然是表彰他在激光光谱方面杰出的贡献,但同时也是对他早年在激光的奠基性工作方面所作的肯定。

肖洛和汤斯早年从事微波波谱学的研究。微波波谱学是第二次大战期间为研制雷达和微波振荡器而出现的。战后,那些微波振荡器转而用于波谱学的研究,它揭示了分子和原子的许多细微结构。他们两位在1955年合著的“Microwave Spectroscopy”一书至今仍享有盛名。就在这时期,汤斯酝酿并提出了利用受激发射放大的原理,制成比电子振荡器所产生的波长(毫米量级)还要短的一种振荡器,这就是“微波激射器”(Maser)。到了1957年,肖洛和汤斯都在研究如何实现光波段的受激发射放大问题,这里,肖洛对一个关键问题作出了重要贡献,他提出可以用一个没有侧壁的开式法布里-珀洛(Fabry-Perot)腔来作为振荡器。他们两人一起很快地推导出一些关系式,它们正确地描述了用两个相距比较远的小反射镜,来保证这个系统能够抑制大多数模式,而让它只以单模振荡。他们还考察了有希望作为放大介质的各类物质。就这样,1958年他们合作发表的文章已相当完整地讨论了新器件实现的可能性和它的特性,这种新器件当时称为“光波激射器”,现在一般称作“激光器”(Laser)。很快,1960年,梅曼(T. Maiman)在休斯(Hughes)公司做出了第一台光泵浦的粉红色红宝石脉冲激光器,1960年底,贝尔(Bell)实验室的贾范(A. Javan)、贝内特(W. R. Bennett, Jr.)和赫里奥特(D.

Herriott) 做出第一支 He-Ne 放电激励的连续波激光器。二十年来,激光器件日新月异,激光应用遍及各个领域,我们不能不为这些先驱者的探索精神和努力表示极大的崇敬。

在这之后,汤斯转入其他领域的研究,而肖洛则在 1961 年进入斯坦福大学物理系任教,继续从事激光的研究。自从 60 年代末 70 年代初可调谐激光器发展以后,激光光谱的研究进展迅速,在世界各著名的从事激光光谱研究的实验室中,斯坦福大学物理系肖洛所领导的这个组始终是在这一领域的前列。在这个组中,有肖洛和汉舒 (T. W. Hansch) 两位教授。汉舒自 1968 年在西德海德堡 (Heidelberg) 大学得到博士学位后不久,便来到这里任教。此外,还经常有来自各国的几位访问学者和近十名做博士论文的研究生,这是一个友好的富有创造性的研究集体,在整个 70 年代,为高分辨率激光光谱作出重大的贡献,他们所创造出的激光光谱方法主要有:饱和吸收光谱^[1] (1971)、内调制荧光光谱^[2] (1972)、双光子光谱^[3] (1974)、激光标识光谱^[4] (1976)、偏振光谱^[5] (1976)、两步偏振标识光谱^[6] (1979)、光电流光谱^[7] (1979)、偏振内调制激励光谱^[8] (1981)等等。这些方法受到普遍重视,为原子及分子物理的发展提供了有力的工具,取得许多重大的进展。

我们知道,改善光谱的分辨率和灵敏度始终是一个极重要的问题。由于激光具有极高的单色定向亮度,尤其是现在有了线宽仅 1MHz 甚至更窄而又可调谐的染料激光器和其他调谐激光器,可以利用激光和原子、分子的非线性相互作用来实现光谱学中这一革命性的变革,由于原子热运动所引起的多普勒 (Doppler) 展宽被消除了,所以许多以前被遮蔽的细节一一展示了出来。

饱和吸收光谱是非线性高分辨率激光光谱中最早出现的一种。把可调谐的激光束分成较强的泵浦光束和较弱的探测光束,以几乎相反的方向让它们通过气体样品(图1)。用斩波器调制泵浦光,当泵浦光和原子作用时,由于光束足够强,它可以把原子的吸收能力饱和,即把能够

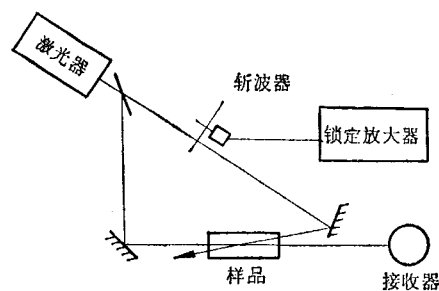


图 1

吸收光量子的原子泵激到激发态,暂时不能再吸收相同的辐射量子,于是气体介质被“漂白”了。这时较弱的探测光便能不被吸收而通过气体样品,达到接收器。以上情况必须在两束光和同一群原子发生相互作用时才能出现,即只有那些轴向速度分量为零的原子才能有贡献,因为这些原子对于相向而行的两束光均没有多普勒频移。由于泵浦光束是受到调制的,于是在调谐激光波长时,通过锁定放大器接收到相应的光谱。所以,饱和吸收光谱把那些对光束无多普勒频移的原子挑选出来,其光谱是无多普勒加宽的。图 2 是他们所得到的 $I_2^{27} P(117) 21-1$ 跃迁的超精细结构,原来的一根谱线分出 21 个分量,其单个分量的线宽小于 10^{-8} ,对于几乎没有吸收的极稀薄的气体,则采用内调制荧光光谱方法更为有效,此时信号来自原子和两束相向而行的光束发生非线性的互饱和吸收所产生的荧光。偏振光谱(图 3)比饱和吸收光谱的信噪比提高了 10^3 倍。这里,通常令泵浦光为圆偏振光,探测光则是线偏振光。因为

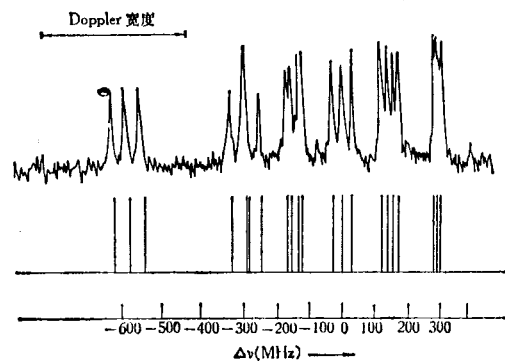


图 2

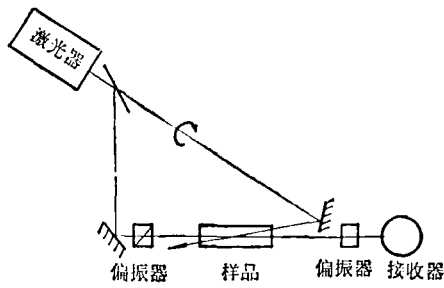


图 3

探测光束经受放置在气体样品前后的正交偏振器的阻拦,在没有泵浦光作用时,接收器将接收不到信号,因此偏振光谱的本底很低.但当泵浦光作用于原子时,气体样品中具有某一角动量分量的原子被激发,使介质呈现各向异性,于是探测光的线偏振态在经过气体样品后发生旋转并变成一定程度的椭圆偏振光,其中的一部分便通过检偏器而被接收到,所以说偏振光谱所检测到的不是光强的变化而是偏振态的变化. 1974年,斯坦福的这个组用饱和吸收光谱方法测量氢原子 H_α 线中最强的精细结构分量 $^2P_{3/2} - ^3D_{5/2}$ 跃迁的波长,得到里德堡(Rydberg)常数 $R_\infty = 109\,737.3143(10)\text{cm}^{-1}$,其精度比以前人们所得到的提高了10倍. 1978年他们又用偏振光谱方法测量了 H_α 中另一分量 $^2S_{1/2} - ^3P_{1/2}$ 的波长,得到 $R_\infty = 109\,737.31476(32)\text{cm}^{-1}$,比前一数值的精度又提高3倍,从而使 R_∞ 置于最精确的物理常数的行列之中,仅光速 c 和电子与质子的磁距比 μ_e/μ_p 有相同的精度. 我们知道,里德堡常数的精确测定有极重要的物理意义,可用以验证量子力学、量子电动力学理论和实验相符到什么程度,以揭示出人们对它的进一步认识. 最近创造出的偏振内调制激励(POLINEX)光谱,又比饱和吸收光谱和偏振光谱前进了一步,在饱和光谱及其衍生的内调制荧光光谱中,由于光强被调制,从而因原子间速度变化的碰撞引起一个附加的多普勒型的本底. 在偏振光谱中,尽管不存在上述本底,但因光束通过气体样品时经受吸收和色散,因而谱线线型具有一定程度的不对称,谱线中心有移动,但在 POLINEX 光谱中则可以避免上述

物理

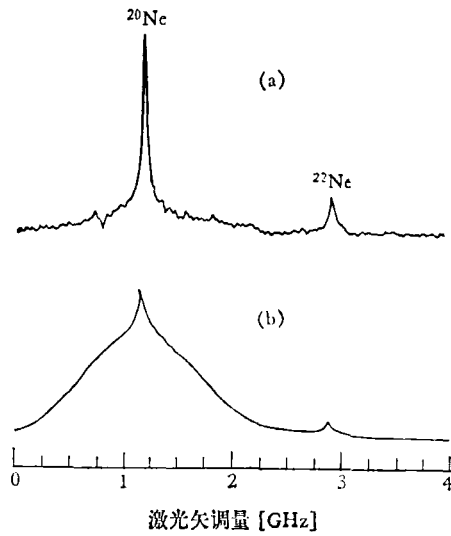


图 4

两个弊病. 图4是氖原子 $2p_2 - 1s_5$ 跃迁的 POLINEX 光谱 (a) 和用内调制荧光光谱所得的同一谱线 (b). 两个峰是同位素位移,很明显,多普勒型的本底被消除了.

双光子光谱也是无多普勒的光谱,原子可以吸收两个光子而跃迁到和基态具有相同宇称态的某个激发态,它是对单光子光谱的一个重要补充,因为它有不同的选择规则,并且可以用它来研究处于很高的激发态.如图5所示,我们用相向而行的来自同一激光器,两束激光照射原子时,这两束光对原子有等值而反号的多普勒频移,因而不管原子速度如何,其和频是个常数. 从接收激发态的荧光可以得到双光子光谱,利用这一光谱方法研究氢原子的 $1S$ 到 $2S$ 跃迁,可以得到极窄的线宽,因为 $2S$ 是亚稳态,寿命约 $1/7$ 秒,故线宽仅约 1Hz ,原则上其分辨

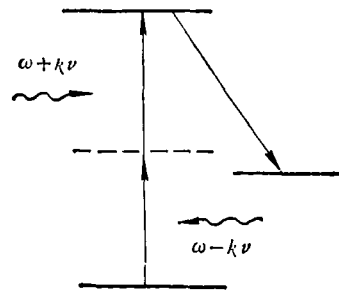


图 5

率可达到 10^{-15} , 而线中心的位置可以准确地 10^{-17} . 斯坦福的小组已用脉冲激光进行了这个实验, 氢的 $F=1-1$ 和 $0-0$ 超精细结构已完全分解开来, 氘的 $F=3/2-3/2$ 和 $1/2-1/2$ 分量也得到部分分解. 这个实验联系到氢的基态 $1S$ 的兰姆 (Lamb) 位移的测量, 而这正是对量子电动力学的理论预言作严格的检验. 用连续激光所作的同一实验尚在进行中.

肖洛所研究的标识光谱方法, 把十分复杂的分子光谱惊人地加以简化, 从而便于得到各激发态能级的标识. 此外, 1976年, 肖洛还提出过一种十分简便而有效的“波长计”^[9] 它可以实时地以 10^{-8} 的精度读出待测的激光波长. 至于1975年他和汉舒一起提出的“激光冷却”的思想^[10], 更为实现超窄线宽的激光光谱指出一个重要的途径. 它指出, 当原子吸收并再辐射光子的过程中, 原子将因吸收光子的动量而降低它的速度, 从而就整体而言, 气体被冷却了, 直到所有原子可以处于接近绝对零度的状态, 一切热运动趋于消失, 因此根本不存在多普勒效应, 多普勒加宽也就没有了. 这样, 可以消除二级多普勒效应和渡越时间加宽的问题. 这一思想受到普遍的重视, 它将迎来下一个阶梯的光谱学革命.

肖洛在物理学上的这些成就, 是他多年从事研究工作的硕果. 他生于1921年, 毕业于多伦多 (Toronto) 大学, 1949年在那里取得博士学位, 在哥伦比亚 (Columbia) 大学工作两年后, 他在贝尔实验室工作了十年, 然后在1961年进入斯坦福大学任教至今. 他是美国科学院院士, 荣获过多种奖赏, 在他的办公室里, 引人注目地有一把木头小槌子, 这是他在1975年出任美国光学学会会长时所拥有的, 现在他又拥有第二把小槌子了, 他是现任1981—1982年美国物理学会会长. 在美国物理学家中, 兼而担任过这两个职务的是极为罕见的, 他为此而感到十分得意. 尽管他有繁重的社会公务和研究教学工作, 他仍然醉心于他的爱癖——计算机和爵士音乐, 他不断学习和积累各种计算机程序, 其内容包括计算、画图、描字以及游戏; 而他收藏

的爵士音乐唱片和磁带则是极为丰富的.

肖洛曾在1979年11月来华讲学, 1980年, 我、以及华东师大的夏慧荣和严光耀同志去他的实验室工作, 于今年先后回国, 我们在斯坦福工作期间, 得到他亲切的关怀. 他没有架子, 平易近人, 我们到美国时, 他和夫人亲自驾车来机场迎接, 还多次陪我们去观剧、游玩. 肖洛对许多访问他实验室的中国客人都热情招待, 他希望中国在科学事业上有蓬勃的发展, 并愿为此作出他的贡献. 他已被聘为华东师大的名誉教授.

肖洛夫人是位业余音乐家, 在当地教堂中领导唱诗班, 十分忠厚慈祥. 据悉, 肖洛表示要将他这次所得免税的诺贝尔奖金45000美元中的一部分, 用作他25岁的儿子小阿瑟 (Arthur) 的医药和生活费, 他因患先天性智力发育不全不能自理生活而长年住在医院内. 肖洛打算把其余部分捐献给旧金山地区的“半岛儿童中心”为白痴儿童及成人设立一个为他们服务的中心. 肖洛夫妇还有两个女儿海伦 (HeLen) 和艾迪丝 (Edith), 分别在斯坦福担任秘书和念书.

肖洛对今后激光的发展是乐观的. 一百年来, 人们对可调谐相干辐射的研究, 从长波、短波、微波、到了光波波段, 既然有了微波激射器 (Maser) 和光波激射器 (Laser), 必然会出现“X线激射器” (X-raser), 甚至有“ γ 线激射器” (graser), 它们对科学事业的发展, 一定会打开一个完全崭新的局面. 我们衷心祝愿他今后取得更大的成就.

参 考 文 献

- [1] T. W. Hansch, M. D. Levenson, and A. L. Schawlow, *Phys. Rev. Lett.*, **27**(1971), 707.
- [2] M. S. Sorem, A. L. Schawlow, *Opt. Commun.*, **5**(1972), 148.
- [3] T. W. Hansch, K. C. Harvey, G. Meisel, and A. L. Schawlow, *Opt. Commun.*, **11**(1974), 50.
- [4] R. Teets, R. Feinberg, T. W. Hansch, and A. L. Schawlow, *Phys. Rev. Lett.*, **37**(1976), 683.
- [5] C. Weiman, T. W. Hansch, *Phys. Rev. Lett.*, **36**(1976), 1170.

(下转第100页)