



肖洛与现代光谱学的发展

周显光 林木欣

(华南师范大学物理系, 广州 510631)

摘要 肖洛在激光概念提出之初, 清楚地看到了传统光谱学的困难所在, 从而确立了用激光克服传统光谱学的根本性缺陷这一基本思想。本文着重介绍和分析肖洛小组在这一基本思想的指导下, 首创多种激光光谱术, 创立和发展以激光光谱学为代表的现代光谱学的历史进程, 以供后人借鉴。

关键词 现代光谱学; 激光光谱学

分类号 O4-097.12

光谱学是一门古老的学科, 它是利用光和物质的相互作用研究组成物质的粒子(原子、分子或离子)的结构。尽管光谱学萌芽于牛顿时代, 但正如肖洛(Schawlow, A. L.)在他的诺贝尔演说词^[1]中所指出的, 科学的光谱学的真正发源地是瑞典的乌普萨拉(Uppsala)——19世纪中后期, 瑞典科学家埃斯屈郎(Ångström, A. J.)在那里发现了太阳光谱与某些元素的原子之间的对应关系, 从而奠定了科学光谱学的基础。今天我们也可以说, 以激光光谱学为代表的现代光谱学的发展地是美国的斯坦福——本世纪60年代至80年代, 肖洛和他领导的斯坦福小组把握时机, 利用面世不久的激光为当时面临困境的光谱学注入了新血, 使这门古老学科重新焕发了青春。

激光出现前的较长一段时间里, 传统光谱学似乎已来到一堵难以逾越的高墙跟前。我们知道, 判断光谱学是否仍在发展的标准, 是看分辨率和探测灵敏度能否进一步提高。而阻碍各种传统光谱术在分辨率和灵敏度方面取得进展的根本原因是, 它们只能使用激光以外的普通光源, 而且必须利用棱镜或光栅等分光元件。

在传统光谱术中, 对激励光源单色性的要求是以降低单色亮度为代价的。这样的光源发出的弱光辐射与物质相互作用所产生的光谱信号必定十分微弱而难于探测, 这就不可避免地限制了探测灵敏度。更重要的是, 弱光辐射不能激发各种非线性光谱学效应。而现在人们已经了解, 正是在这些用激光强光辐射才能激发的非线性效应中, 包含着丰富得多的有关物质结构的信息。

另一方面, 各种分光元件都有着固有的分辨率极

限及仪器线度极限, 而普通光源的单色性又相当差, 再加上这两个因素与待测谱线的种种增宽机理(尤其是掩盖了谱线许多细节的多普勒增宽)之间的尖锐矛盾, 使传统光谱术的分辨率基本上已无法继续提高。

那么, 在创立多种激光光谱术之前, 肖洛对传统光谱术的这些根本性缺陷的克服办法作过哪些考虑呢?

关于光源, 肖洛和汤斯(Townes, C. H.)早在1958年就在首次提出激光器构思的那篇著名论文^[2]中明确地指出:“微波激射器型放大器和振荡器的工作频率原则上可以远远超越射频范围而拓展至红外区、可见光区及更高频区。这类技术展现了在高频区实现相干放大而产生极单色辐射的诱人前景……这种高单色性和高强度的辐射给出了分辨率远高于当前极限的光谱术的可能性。”

而对分光元件问题, 肖洛在其诺贝尔演说词中说:“1957和1958年, 汤斯和我正在为能否产生激光而努力。我们都有着微波波谱学工作的经验, 故我们熟知, 波谱是可以不用摄谱仪观察的, 其条件是具备一个能在波谱范围内调谐的狭带谱源。……这正是我们预期的激光器的几种应用之一。”

可见, 作为激光器的奠基人之一, 肖洛在提出激光器的思想及最初设计方案之际便清晰地预见到这种单色性、方向性和亮度均极高的新光源将会在光谱学领域中引起一场变革。

这种想法, 在此后的20多年中一直是肖洛及其研究小组的指导思想。可以说, 肖洛以激光光谱学成就获得1981年诺贝尔物理学奖[由于激光光谱学与非线性光学研究而同时获奖的还有布洛姆伯根

(Bloembergen, N.) 的工作经历,正是这种思想逐步实现的历程,也是肖洛小组用激光克服传统光谱学的根本性缺陷的历程。只要回顾一下他们所创造的一些主要的激光光谱术,我们就能对由激光光谱学所代表的现代光谱学创立和发展的历史进程有比较深刻理解。

1 饱和吸收光谱术^[3](1971年)

如图1所示,可调谐激光束被分为较强的泵浦光束(致饱和光束)和较弱的探测光束,二者以几乎相反的方向通过吸收池中的样品,其中泵浦光束受到了斩

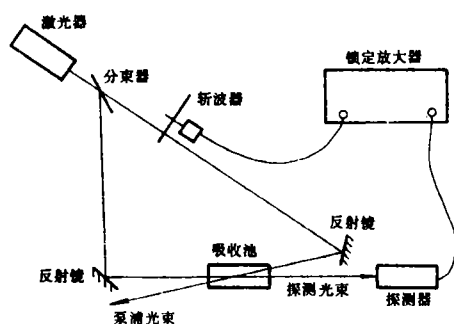


图1 饱和吸收光谱术装置示意图

波调制。泵浦光束能够通过斩波器时,强泵浦光使通过区域中的样品粒子的吸收能力饱和,即把绝大部分能吸收特定频率光子的粒子激发至激发态而令样品不能再吸收相同的光子。这样,探测光束将几乎无衰减地通过样品,故有较强的探测信号抵达探测器。当斩波器挡住泵浦光束时,样品粒子吸收能力回升,探测器得到的信号便变得十分微弱。因此,斩波器同时调制了泵浦光束和探测光束。然而,这种同时调制只能在两光束与同一批粒子作用时才会实现,而这种情况只有在激光频率被调谐到正好能够与静止的或沿光束方向有零速度分量的粒子相互作用的条件下才能发生,因为从这些粒子的角度来看,方向相反的两光束都没有多普勒频移。可见,饱和吸收光谱是被挑选出来的对光束无多普勒频移的粒子的光谱,因而是一种无多普勒增宽光谱。

利用这种方法,可以揭示许多在传统光谱学中被多普勒增宽所掩盖的谱线精细结构和超精细结构。例如,肖洛等人于1971年测得的钠 D_1 线一个分量的最窄线宽为 40 ± 4 MHz,而在以前,这种谱线超精细结构是分辨率最高的摄谱仪也不能分辨的,因为它们总是被宽达数百 MHz的多普勒增宽所完全淹没。另一个例子是肖洛小组在1975年用饱和光谱术对浓度低至每立方厘米100个原子的钠蒸气进行的密度测量。在

这种浓度下,每次测量中平均只有一至二个原子处于光束中,这种测量用传统光谱术是无法进行的。但肖洛小组借助可调谐激光器及一些辅助手段,使钠蒸气密度测量的灵敏度提高了上百万倍,从而有可能观察和研究构成物质的单个原子或分子。

在饱和吸收光谱术构思巧妙的实验设计中,肖洛研究小组首次把激光这种新光源的特长发挥得淋漓尽致:激光的高亮度被用于激光饱和吸收这种非线性光学效应,激光的单色性和方向性则使我们能有选择地激发样品粒子并消除谱线的多普勒增宽。此外,这种方法还抛开了使分辨率和仪器线度受到限制的分光元件。因此,饱和吸收光谱术的分辨率和灵敏度都比传统光谱术前进了一大步。肖洛小组中的重要成员汉施(Hänsch, T.W.)对此项工作作出了重大贡献。

在饱和吸收光谱范畴内,肖洛等人遵循着同一思路,又提出了内调制荧光(intermodulated fluorescence, 1972年)、偏振(1976年)及偏振内调制激励(1981年)等几种新的激光光谱术。

2 双光子光谱术^[4](1974年)

物质的粒子有可能同时吸收两个光子而跃迁到较高能级,这就是双光子吸收跃迁过程。不过,这种非线性过程的发生概率极大地依赖于激励光强度,使用普通光源时发生概率极小而从未能在实验中观察到。

图2是以激光为激励源的双光子光谱术原理图。设

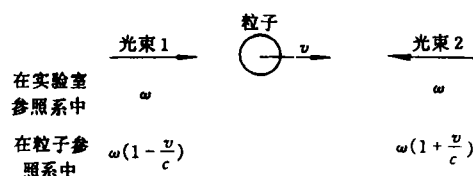


图2 双光子光谱术的原理

频率同为 ω 的两束激光沿相反方向入射到气体样品中,静止气体粒子吸收两个光子的双光子跃迁频率为 ω_0 。对沿某一光束方向有速度分量 v 的粒子,若它吸收该光束中两个光子的双光子跃迁(称为单向双光子跃迁)的表现吸收频率为 $2\omega(1 - v/c)$,则对另一束光的单向双光子跃迁的表现吸收频率为 $2\omega(1 + v/c)$ 。如果粒子从两反向光束中同时各吸收一个光子而发生双光子跃迁,则这种反向双光子跃迁的表现吸收频率将为 $\omega(1 - v/c) + \omega(1 + v/c) = 2\omega$,显然它已不受粒子速度分量 v 的影响。就这样,反向双光子吸收跃迁消除了由粒子速度引起的多普勒频移,因而得到了无多普勒增宽光谱。为获得最大的过程发生概率,还需借助可调

谐激光器来取得频率满足 $\omega = \omega_0/2$ 的单色强激光束。实际上，我们探测的并不是两束入射光微小的衰减，而是粒子在双光子吸收后所发射的荧光。这个实验的装置如图 3 所示。

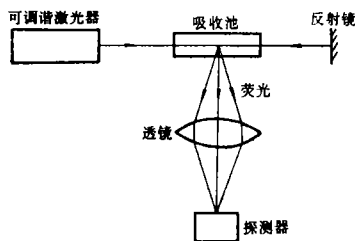


图 3 双光子光谱装置示意图

肖洛小组的实验结果表明，双光子光谱术可以得到极窄的谱线。例如对氢原子的 $1s$ 至 $2s$ 跃迁，测得的谱线宽度仅为 1Hz ，因此分辨率可达 10^{-15} 。通常可以把一条谱线的中心位置确定到谱线宽度的 $1/100$ ，故原则上已能把该谱线位置的测量精确度提高到 10^{-17} 。要知道，从来还没人任何有用任何方法在测定任何物理量时达到过 10^{-17} 的精确度！此外，他们还用双光子方法细致地比较了氢原子 $1s$ 和 $2s$ 间的能级间距，与 $2s$ 和 $4s$ 间能级间距的 4 倍之间的差异。按照玻尔理论，上述两个能级间距之比应为 4:1，而所观察到的能级间距比值与玻尔理论值的差异，正是基态 $1s$ 的兰姆移位的一个量度，因而也是对量子电动力学理论预言的一个严格检验。这一差异，是传统光谱术所不能测量的。

在反向双光子吸收方法中，消除多普勒增宽的目标主要是由激光的良好方向性来实现的，而非线性双光子跃迁则必须用可调谐的单色强激光束来激励。细心的读者当然已发现，这种方法同样不必利用会使分辨率受种种限制的分光元件。这个实验的思路，又一次鲜明地体现了肖洛用激光攻克传统光谱学未能占领的顽固堡垒的一贯想法。

3 光电流光谱术^[5](1979 年)

这种方法的物理基础是强光在气体放电中引起的非线性效应——共振选择性光电效应。图 4 是实验装置的示意图。可调谐的单色强激光束入射到装有待测气体的放电管中。当光的频率正好等于气体粒子某一共振吸收频率时，导致部分粒子的相应共振吸收跃迁，从而改变了各能级上的粒子数分布状态。这种变化会使放电电流或电压发生相应变化，因而我们可以从放电参数的记录中间接获得粒子的共振吸收光谱。

1979 年，肖洛和他的同事们用光电流光谱术分析

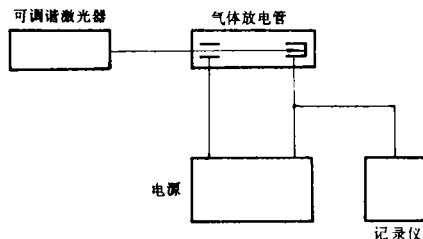


图 4 光电流光谱装置示意图

了 ^3He 的 3^3D 能级超精细结构分裂，所测量的实验数据如表 1 所列。从表中可以看出，这种方法的实验结果与传统光谱术未能验证的理论预期值是相当符合的。

表 1 ^3He 的 3^3D 能级超精细分裂数据

跃 迁	实验值 (MHz)	理论值 (MHz)
$3^3\text{D}_2 (F=3/2) \rightarrow 3^3\text{D}_1 (F=1/1)$	725 ± 4	750
$3^3\text{D}_1 (F=1/2) \rightarrow 3^3\text{D}_1 (F=3/2)$	5830 ± 6	5760

光电流光谱术的装置简单，但分辨率和灵敏度都很高，因为它不仅没有分光元件，而且还可以利用反向双光束产生的饱和吸收效应来消除谱线的多普勒增宽。

除了上面提及的几种方法外，肖洛和他领导的研究小组还在同一基本思想指导下首创了别的一些重要的激光光谱术，包括能把极复杂的分子光谱作惊人简化的激光标识光谱术(1976 年)以及两步偏振标识光谱术(1979 年)等。

概括地说，激光光谱技术具有远远超过传统光谱技术的高分辨率和高灵敏度。由于减少了分光元件并克服了诸如多普勒增宽等谱线增宽机理的影响，激光光谱术把分辨率提高了 10^9 — 10^{11} 以上的数量级。同时，此类技术基于强光与物质粒子的相互作用，故使我们能观察到许多新的非线性光谱学效应；而且，强光激励大幅度提高了待测信号强度，因而也大幅度提高了探测灵敏度。此外，用高方向性的聚焦激光束作为激励源，可以进行微区或定点光谱分析。

纵观斯坦福肖洛小组开创和发展以激光光谱学为代表的现代光谱学，乃至肖洛以激光光谱学贡献而获得 1981 年诺贝尔物理学奖的整个历史过程，我们会看到这样一幅图象：一组精干的科学家在一个明确的基本思想指导下为一个确定的目标而孜孜不倦地努力着，不断地取得新的研究成果。这个思想，就是肖洛关于激光是征服光谱学中顽固堡垒的锐利武器的一贯想法。

(下转 39 页)

事实和理论分析面前,一些几十年来备受推崇的名著当中的某些讲法,亦屡屡遭到批评或否定。量子力学的正统解释一统天下的局面,早就被打破了。

还值得注意的是,最近几年来,国外出版了几种量子力学的新教材,都辟出了专门的篇章,讨论“量子力学的各种解释”或者“量子力学的概念性和哲学性问题”等内容^[7]。看来,这些教本的作者都认为有必要在量子力学的教学中介绍一些不同的基本看法,让学生们自行判断各种讲法的优点和不足之处。这种做法对于开阔眼界,活跃思想,无疑会发挥积极的作用,并且也是同我们努力的方向趋于一致的。

4 参考文献

- 1 关洪. 量子力学的基本概念. 北京: 高等教育出版社, 1990.
- 2 关洪. 对量子力学基本概念认识的发展. 大学物理, 1993, 12 (1): 2—7.
- 3 E. Nagel, The Structure of Science—Problems in the Logic

of Scientific Explanation, Hackett Pub. Co., 1979, pp.303—305.

- 4 M. Born, 我的一生和我的观点. 李宝恒译. 商务印书馆, 1979. 20.
- 5 爱因斯坦文集. 第一卷. 许良英, 范岱年编译. 商务印书馆, 1976. 235, 314—315.
- 6 参看: D. Home, M. A. B. Whitaker, Ensemble interpretations of quantum mechanics. A modern perspective, Physics Reports, 210 (1992) 4: 223—317.
- 7 A. I. M. Rae, Quantum Mechanics, Adam Hilger, 1986; A. Sudbery, Quantum Mechanics and the Particles of Nature, Nature, Cambridge Univ. Press, 1986; W. Greiner, Quantum Mechanics—An Introduction, Springer—Verlag, 1989; B. H. Bransden, C. J. Joachain, Introduction to Quantum Mechanics, Longman, 1989; H. C. Ohanian, Principles of Quantum Mechanics, Prentice—Hall, 1990; L. E. Ballentine, Quantum Mechanics, Prentice—Hall, 1990 (对此书的评介见: 关洪. 从玻尔廷的新著《量子力学》谈起. 大学物理, 1993, 12 (11): 12—14).

(上接 36 页)

这个目标,就是不断地提高光谱术的分辨率和灵敏度。他们走过的道路,正是现代科学研究工作的一种成功的模式,值得后人借鉴。

3 参考文献

- 1 Schawlow, A. L., Spectroscopy in a New Light, Rev. of Modern Phys. 1982, Vol. 54 (3): 697.
- 2 Schawlow, A. L., Townes, C. H., Infrared and Optical Masers, Phys. Rev., 1958, Vol. 112 (6): 1940.
- 3 Hänsch, T. W., Shahin, I. S., Schawlow, A. L., High—Resolution Saturation Spectroscopy of the Sodium

D Lines with a Pulsed Dye Laser, Phys. Rev. Lett., 1971, Vol. 27 (11): 707.

- 4 Hawkins, R. T., Hill, W. T., Kowalski, F. V. et al, Stark—Effect Study of Excited States in Sodium Using Two—Photon Spectroscopy, Phys. Rev. A, 1977, Vol. 15 (3): 967.
- 5 Lawler, J. E., Ferguson, A. I., Goldsmith, J. E. et al, Doppler—Free Intermodulated Optical Galvanic Spectroscopy, Phys. Rev. Lett., 1979, Vol. 42 (16): 1046.
- 6 王兆永, 肖洛. 激光和激光光谱, 物理, 1982, 11 (2): 115.

SCHAWLOW AND DEVELOPMENT IN MODERN SPECTROSCOPY

Zhou Xianguang Lin Muxin

(Department of Physics, South China Normal University, Guangzhou, 510631, China)

Abstract At the beginning of advancing the concept of laser, Schawlow saw clearly where the difficulty of traditional spectroscopy lay, and therefore formed the basic idea of overcoming the fundamental defects in traditional spectroscopy with laser. Under the direction on this idea, Schawlow's group has initiated various methods of laser spectrometry, founded and developed modern spectroscopy which is represented by laser spectroscopy.

Key words modern spectroscopy; laser spectroscopy