

激光光谱学和束箔光谱学对原子物理学的贡献

杨治虎

(中科院近代物理研究所)

直到U元素的离子束都可以从现代重离子加速器上获得,大量的原子和离子光谱容易用束箔方法产生⁽¹⁾。应用粒子加速器产生的离子束进行实验原子物理学研究,已经成了研究原子结构的重要组成部分之一。

随着高分辨谱仪、超导磁体以及激光光源和束箔激发光源的出现和应用,出现了激发态原子的研究。这一研究已经揭示了很多原来没有发现的新问题。如一九四七年Lamb和Retherford用射频波谱学的方法研究 (H_α) 谱线的精细结构时,发现 H_α 线中的 $2^2S_{1/2}$ 态反而比 $2^2P_{1/2}$ 态高出1058兆赫兹,即 0.033厘米^{-1} 。此值与原来的Dirac理论不一致(Dirac理论认为这两态之能级差为零)。根据量子电动力学的解释,这主要是理论上只考虑了电子受原子核的静电场的作用,认为作用在电子上的还有辐射场的力。电子和它自己发出的辐射(光子)之间存在着相互作用。还有,原子核的库仑场对电子的作用可以是间接的,库仑场产生一对在虚态的正负电子,湮没而成为一对虚光子,然后被电子吸收,这样使场对电子的作用比直接作用稍微减弱。这里电子对的产生起了屏蔽作用。这些作用都影响电子态的能量,S态受的影响较大,所以能级显出微小的移动。这种移动与量子电动力学的结果是一致的(理论与实验值只有 10^{-8} — 10^{-7} 之差)。这也就说明了Lamb位移遵守量子电动力学的结果⁽²⁾。

激光光谱技术的应用和双光子吸收光谱消除了Doppler展宽,不仅使分辨率大为提高,而且可以产生传统光源、单光子吸收所不能实现的禁戒跃迁。与此同时,许多新学科和新技术的发展也向原子物理学提出了一

系列新课题。尤其是人造地球卫星上天后,更感到过去对原子以及分子物理学的理论和实验两方面的研究是不够的,如碰撞等的研究就是如此。自从六十年代后,出现了可调激光和束箔光谱学技术,原子物理学的研究重新活跃起来,开始了一系列原子物理学的研究工作。

先不说大量尚未研究过的元素,原子氢是人们熟知的,结构最简单、质量最轻、在宇宙中大量存在。但是,人们至今对原子氢的个性和集团的合作效应都没有弄清楚。氢元素的光谱研究早在十九世纪就开始了,到了二十世纪初,才建立了Bohr原子模型理论和量子力学。随后,对氢原子又作了大量的研究工作,理应对氢原子的物理特性有较透彻的认识了吧。事实并不是这样,人们只知道在空间宇宙中有氢原子,而在地球上只有氢分子,没有稳定态的氢原子存在。直到近年来,Amsterdam大学Naturrk-unding实验室的科学工作者,才实现了在低温时能保持稳态氢原子(气态)的新技术⁽³⁾。这种技术在其它物理实验室里已重复做过,由此表明了物理世界里还具有奇妙的新物质的存在。面对这种新物质,人们就不禁要问,如果氢原子(气态)是稳定的,那么它会具有什么特性?要回答这个问题,就不仅要研究单个氢原子的性质,还应研究其集团的合作效应,在低温时,此效应尤为重要。例如,超导体和超流体都是在低温时出现的新特性。可见,在原子物理学领域,还有很多急待我们去发现和研究的**新问题。可以预料,随着科学事业的发展,各类粒子加速器的建立,人们对它的认识的不断深化,不仅会对现有的

理论模型与实验数据加以修正和完善；同时还会对今后的新学科、新技术和新材料的产生与发展作出极大的贡献，推动多学科领域的发展。

自从六十年代以来，许多国家相继设立了专门研究原子和分子物理的研究单位以及实验基地。就束箔光谱学这一光谱技术来说，六十年代初，这一研究主要集中在欧美各国，后来出现了日本等国家。现在已成为研究原子物理学的分支学科。另外，与原子和分子物理学直接有关的原子物理国际会议每两年举行一次；电子—原子碰撞国际会议每两年举行一次；束箔光谱学专业会议每五年举行一次。最近几年，我国的科学工作者也应邀派出代表参加这些会议。一九八二年在北京召开了原子和分子物理学术交流会，并成立了专业委员会。这次会议以后，有关的研究单位和高等院校开始和发展了原子与分子物理学的研究工作。今年，美国和日本又合开了有关原子和分子物理学的讨论会。

下面介绍实验原子物理学方面的近况：

现在研究原子物理学的方法还是采用谱（各种频段，现在以激光光谱和束箔光谱为普遍）和碰撞两种手段。

通过原子与外电磁场（包括辐射）相互作用的方法来研究原子的物理性质是一种极为有效的方法，早在十九世纪末，Zeeman和二十世纪初的Stark分别发现在外磁场、外电场作用下原子（分子）能级和光谱线会产生分裂与位移⁽²⁾，这就是所说的Zeeman效应和Stark效应。随着量子力学的产生，Vanvleck和Jenkins以及Segre首创性地研究了逆磁效应，Landau提出朗道共振（固体的自由电子谱）的预言。不过，在五十年代以前，对原子谱的研究仅限于基态或低激发态。例如，光与原子的相互作用只对非相干光效应和低强度的相干辐射效应有所了解，但对于高强度的相干辐射和光频辐射与原子的相互作用还很不了解。对于非线性效应的研究来说，不管理论和实验方面都有着大量

的工作要作。

从激光器和束箔光谱学的出现，到现在才有二十多年。人们采用了激光光谱技术和束箔光谱技术，在光与物质、离子束与物质的相互作用中所发现的新效应和新现象的总和，已远远超过了长期以来传统光谱技术所得的总和。这两种技术之所以有这么大的威力，在于这两种光源与传统的光源有着完全不同的发光机制。传统的光是自发辐射，而激光是受激辐射。受激辐射的特点是辐射波和入射波的相位是一致的，即相干的。因此激光的特点是高相干性，高定向性，高亮度。它的亮度和简并度比传统的光要高 10^8 — 10^9 倍以上，所以激光与物质的相互作用，已属于强光相互作用。它所产生的单色光频电磁场的强度已可与原子内部的场强相比拟。这样就需要假设在强激光作用下，介质的电极化强度不再与入射光波强度呈简单的线性关系，而是呈非线性关系。通过强光的相互作用，就可以观察到很多过去用传统光无法观察到的新现象。例如，光学谱波、光学混频、饱和吸收、双光子吸收、原子中的宇称不守恒等等。反之，原子光谱和非线性光学的某些研究成果又直接对新型激光器的产生提供十分有利的条件，如红外调频、准分子激光器和超短脉冲激光器的出现都离不开对原子和分子物理学的研究。束箔光源是加速器上产生的离子束穿过固体箔或气体靶时，受到箔（气体靶）中密集的电子与核的强烈电磁作用，由于箔中电子的密集程度相当高，因而离子束穿出箔后就退激发光。这种光源具有两个特点，一个是对原子光谱的激发程度高，另一个是激发时间短（ 10^{-14} S）。利用束箔光谱学技术可以研究各种原子的激发光谱，从而有效地进行高激发态能级寿命、能级特性、原子的精细结构和超精细结构，以及原子实极化的研究。还可以研究过去从天文上观测到的许多谱线。束箔激发要比高频激发、电子轰击、电弧激发等等，都要强烈得多。它可以产生出极高量子态的激发、双

电子或多电子的激发以及高电荷电离态。它所产生的谱线从可见光、紫外光，一直延伸到X射线区。传统的光源无法与它相比拟。

目前，应用激光光谱和束箔光谱来研究原子的光谱和激发态寿命。研究得较多的激光光谱有无多普勒 (Doppler-Free) 展宽谱、非线性谱、外层电子高激发原子谱。应用束箔光谱技术研究得较多的光谱除了外层电子高激发态原子谱以外，还有多重激发态光谱的研究，高激发态原子的能级寿命，Lamb位移测量等等。

一、无多普勒展宽激光光谱

利用激光器作光源时，通过以下三种方法减少或消除谱线中的多普勒线宽：(1) 从原子流中选择这样一部分，它们沿着光波传播方向的速度分量 $V_z = 0$ (例如，准直原子束和饱和激光光谱⁽⁴⁻⁵⁾)。 (2) 一个原子同时吸收几个光子，角动量 K_i 满足 $\sum_i K_i = 0$ (例如，无多普勒的双光子谱⁽⁶⁾)。 (3) 光—光双共振技术。准直原子束激发谱，可用于测量四极矩和同位素位移，甚至短寿命放射性同位素 (Yb) 的位移也可测；饱和谱运用于奇宇称，常用于超精细结构，以及 H、D 同位素的位移，Rydberg 常数的测量或确定；而双光子谱则适用于偶宇称，常应用于碱金属原子的精细结构 (D态)、超精细结构 (S态)，以及 Zeeman 效应和 Stark 效应。

二、非线性激光光谱

许多国家的科学工作者对非线性激光光谱进行了大量的研究，尤其是美国的马萨诸塞州技术学院、斯坦福大学、哈佛大学，苏联的新西伯利亚半导体物理研究所、谱学研究所，法国的巴黎大学，德国的海德堡大学，日本的东京大学。这些国家的研究单位，为非线性激光光谱的研究作出了很大的贡献。他们对原子谱采用的方法是在双能级

和三能级系统中发生窄的非线性共振法。研究的内容主要是谱线的自然宽度和能级寿命、非线性共振谱的碰撞展宽，以及能级结构和精细结构和同位素结构、外电场和外磁场中谱线的裂矩和位移 (Stark 效应和 Zeeman 效应)、禁戒跃迁谱等等。

三、高激发态原子谱

七十年代后，国际上出现了不少人研究高激发原子态，有的采用激光光谱技术，有的采用束箔光谱技术。尤其是在调频激光器的出现之后，人们对高激发态原子的研究产生了极大的兴趣。因为它的出现排除了跃迁中的级联效应，使理论处理较为简单化。近几年，高激发态原子的研究对象主要是碱金属原子。用吸收谱容易观察到碱金属原子的高激发态；但是，如果要在选定的能态上，产生出有效布居，那么就必须要采用可调激光器。最常用的方法，有分步激发法和无多普勒展宽双光子谱。最近几年，在束箔光谱学方面已经有人应用可调激光代替箔，使基态原子或离子激发到选定的能级来研究不同的过程。从而定量地提供高激发态原子的有关过程的资料。束箔光谱学的研究，填补了很多原子能级结构和电离势能的空白，尤其是稀土元素的数据。利用束箔方法容易产生高激发原子态、高电离态原子，把重离子中的两个或三个以上的电子激发到不同的激发态，通过研究这种多重激发态的能级结构和能级寿命，会极大地促进原子结构理论的发展。由于有了束箔激发光源，利用它就可以模拟天体上的激发条件，获得许多天体光谱的谱线。现在利用火箭和卫星收集到很多天体的光谱资料，有些过去在实验室里未发现过。现在，用束箔方法就可以获得这些光谱的资料。

最近几年开展的以碱土金属原子为主的高激发态原子的研究，由于高激发原子中的电子与剩在离子实中的不成对的 S 电子的耦

合，或二个价电子同时激发时的组态相互作用，均使其高激发原子的光谱比卤金属原子复杂得多。与此相应，发展了多通道量子亏损理论⁽⁷⁾。这种理论认为不同的耦合通道应对不同能级系列而取不同的量子亏损修正值。多通道量子亏损理论的计算是在1977年后才进行的。几年的研究结果，已对H、Li到Cs等各种具有单个外层电子元素的大量能级系列取得精密测试数据。数据表明：即使在具有准氢能级特性的极高里德堡态，精细结构分裂仍呈现反常分裂特性。这种反常分裂与精细结构成份之间的惊人强度必须考虑重原子核极化模型及自旋—轨道相互作用倒向。数据表明计算能级位置的量子亏损理论取决于主量子数 n^{-2} 、 n^{-3} 的依赖关系是远远不够的，大角动量能级位置须考虑与 L^{-6} 的关系，并须包括贯穿效应和四极极化强度。

四、激发态原子的能级寿命和Lamb位移测量

随着激光技术和束箔技术的发展，原子物理学研究的激发态原子的对象不断扩大深入。近两年所涉及的研究对象已从单个外层电子到二个外层电子、从轻原子到重原子逐渐广泛。过去用Coulomb近似法，能可靠地计算出轻金属的振子强度和寿命。然而，对于自旋—轨道效应足够大的（例如，Rb和Cs）情况，就需要更精确的计算方法。实验上受到传统光谱的限制，原子的高角动量观测，在技术上也有困难。因此，有关这方面的参数，很多还是未知的。现在有关高角动量高激发态原子的寿命测量工作已有了新的发展⁽⁸⁾。激发态原子的寿命和Lamb位移测量是一种基础研究工作。激发态寿命的数据、Lamb位移的数据，在量子电动力学、天体物理、等离子物理等方面都有着重要的意义。

高激发态原子的寿命测量，目前采用离

子加速器上产生的离子束穿过靶（或气体靶）时，被激发到高激发态，通过测量激发原子的辐射衰变引起的辐射强度随时间的变化，就能够确定出各谱线的寿命值。从能级寿命的测量，可导出有关原子结构方面的信息。尤其过渡元素和稀土元素光谱的寿命测定更为重要。这是因为从这些谱线中，往往可以很精确地测定相对振子的强度和寿命值。它还可以确定太阳或星际空间所含的元素丰度。例如，测量了铁的能级寿命后，发现过去天文学家估计太阳中铁的含量时少算了十倍，铬的含量少算了四倍。从太阳光球层已发现六十多种元素的原子光谱，如果能可靠的光子跃迁寿命实验数据后，就可以更加准确可靠地提供它们的相对丰度。当然，这是目前束箔光谱学的重要研究课题之一。因为确定星体（包括太阳）的化学元素组成及其相对丰度是天体进化论、化学元素起源论、天体能量来源等理论的基础。其意义是重大的。

利用激光技术测量原子激发态寿命的方法有三种：（1）相移法；（2）观察脉冲激发后之衰变发射；（3）零场时能级交叉效应。应用可调染色激光器测量激发态原子的寿命更为有效，这样可得到窄谱线，使原子的单一精细结构或分子的单独的振动能级受到激发。

利用束箔技术测量Lamb位移时，为了增加S态与P态的混合，离子束被箔激发后，穿过静电场，以使S态的跃迁到基态过程中解除禁戒。类氢离子的Lamb位移值与核电荷Z的四次方成正比，所以采用高剥离态的束箔离子束研究类氢离子的Lamb位移是十分有利的，尤其是对类氢、类氦离子的Lamb位移的研究是极为有效的方法。

总之，从科学发展的趋势来看，在原子物理学领域里，急待我们解决的问题很多。尤其是各类新型粒子加速器的建立、激光技术和束箔技术的产生和应用，给实验原子物理学开辟了新的研究途径。原子物理学的振

兴, 展示出新的研究动向(例如, 稀土元素、高激发原子等)。高 Z 类碱元素, 高 Z 类氢、类氦元素的激发态寿命和Lamb位移测量⁽⁹⁾是当前研究原子能级特性的课题。目前, 类氢离子的Lamb位移实验测量已做到类氢氦离子。原子的高激发态填充几率的研究是束箔相互作用研究的重要内容, 通过它和对稀土元素的研究, 不仅可以从实验中发现很多至今尚未发现的新问题, 又可以反过来验证目前常用的理论模型。也为稀土元素的应用提供机理方面的依据。上面谈到的研究原子物理学的另外一种方法是碰撞法, 这里不作讨论, 原子碰撞过程的研究也是当今原子物理学领域人们感兴趣的研究课题。

参考文献

1, Comments Atom Mol, Phys. Vol. 10,

- No.1, (1980)1—8
2. 褚圣麟. 原子物理学 (1979)
 3. New Scientist 22 January (1981)
 4. Phys. Rev. Lett. 32 (1974) 641
 5. Appl. Opt. 11 (1972) 895
 6. Phys. Rev. Lett. 32 (1974) 845
 7. K. T. Lu, Elements of Quantum Defect Theory (1983), USA
 8. Daniel Kieppner, The Spectroscopy of Highly Excited Atoms, P.714
 9. J. Phys, B(GB), Vol. 18, No. 8 (1985)1483—93
 10. Z. Phys, D (Germany), Vol. 1, No.3, (1986)283—6
 11. Nucl. Instrum. and Methods, Phys. Res. Sect. B (Netherlands), Vol. B13, No.1—3, (1986) 581—6