

多电荷态原子参数的研究

杨治虎

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

摘 要 本文叙述了利用加速器开展离化态原子参数实验测量的研究和目前正在研究的课题,包括多电荷态原子光谱学、低温电子束离子源(LTEBIS)的发展与应用、中低速多电荷原子的电子俘获过程研究、原子激发能级寿命和跃迁几率的测量。

关键词 多电荷态, 束箔光谱, 激光等离子体光谱, 碰撞, 参数。

1 引 言

受控热核聚变、激光聚变、X射线激光和天体物理学的研究,都涉及到一系列与原子物理有关的微观过程。对这些有关微观过程的研究,过去人们只是从原子光谱学学科出发,对原子和离子的低能级、低电离态能级谱线和跃迁几率等研究得比较成熟,有大量成熟的能级图、谱线表和跃迁几率数据。但是,对多电荷态原子的研究不多,在受控聚变和天体物理研究中所要原子、分子过程的数据很少;目前,国外广泛开展对多电荷态原子实验数据的研究。在方法上除了通过改进实验条件,提高实验测量精度以外,还积极地建造像高能重离子加速器和低温电子束离子源这样的先进实验装置,测量重元素多电荷态原子的参数。

多电荷态原子的研究能够迅速开展,其原因是有了高强度低能量的新一代多电荷离子源(EBIS、ECRIS和LIS),使低能碰撞过程的研究更加活跃。同时,对产生低速多电荷的反冲离子法^[1]也进行了实验。从而对碰撞过程产生的主要机制的认识有了重大突破,特别是对多电荷态原子的研究。美国在80年代建造了CEBIS离子源,主要用于原子物理研究。

2 多电离态原子光谱学研究

70年代末,人们就对多电荷态重原子的

光谱学研究产生了浓厚的兴趣,这是因为直到U元素的离子都可以从现代粒子加速器上获得,而且可以得到多电荷态离子。

因重离子的Z很高,电荷量大,外围电子有一定的排列结构。当重离子与靶中的原子发生碰撞时,会产生许多在轻离子情况下看不到的新物理现象,如内壳层电子的激发已不仅仅是库仑相互作用的直接激发,而是发生了分子轨道的激发过程和多电荷态离子从靶原子俘获电子的过程。对这些过程的研究,有助于了解离子穿过固体物质时所发生的基本物理过程和解释等离子体中杂质的影响及天体物理现象。

处在激发态的多电荷态原子,退激发产生的光子在X射线区。有人预言,粒子加速器上产生的重离子束,还有可能成为X射线波段激光器的泵浦手段。X射线激光的获得是当今高科技研究的热点。当然,也可以通过其它途径获得,如:光泵X射线激光、电子俘获X射线激光和双电子复合X射线激光等。后两种途径都是利用原子碰撞过程来泵浦粒子数反转而实现X射线激光的。最近, Morley和Sugar^[2]提出了在类铜离子中两个电子跃迁 $3d^{10}4p^2P^0 \rightarrow 3d^94s^2^2D$ 作为可能的X射线跃迁,对于Nb(Z=41)到Ag(Z=47)的类铜离子,理论计算表明可以产生(8~4)nm的激光波长,其能级寿命是(5~1)ns。

多电离态原子光谱研究的主要对象是重元素的多电离态离子光谱、碰撞截面、能级寿命、电离和激发截面及电荷交换截面等。从事多电离态原子光谱学的研究有两种类型：激光等离子体光谱和束箔光谱。

激光等离子体早在 60 年代就成为研究光谱学的一种光源。近几年在受控核聚变研究中，由于试图通过惯性约束实现可控聚变反应而极大地鼓舞了 GW 和 TW 功率激光器的发展。利用这种聚焦激光束产生的等离子体进行了多次实验，发表了大量的谱线研究文章，特别是关于重元素的多电荷态原子研究文章。60 年代末，Hughes 实验室和加利福尼亚大学的一个联合课题组报告了激光等离子体的第一个 FeXVI 和 NiXVIII 谱线。不久，Culham 实验室发表了展示激光等离子体的远紫外谱，并鉴别出了第一条谱线。70 年代，已发表了大量的文章，有些是关于 C、Ni、O 和 F 等电子的 Ca 与 Fe 之间的离子发射谱线，其中一篇文章第一次提出了多电离态原子的 $\Delta n=2$ 的跃迁^[3]。期中，有人在卢瑟福大学的 2-TWZeTa 激光器上开展了一些实验研究，测量了多电荷态原子的 $\Delta n=2\sim 3$ 跃迁。测量的谱线有 FeXXIII、FeXXIV 和 NiXXV、NiXXVI (类铍和类锂) 的跃迁谱^[4]。

80 年代后，激光等离子体研究的重点是重元素的原子光谱，大部分的研究已到铈或钨的等电子系列。这些研究主要是由于聚变研究部门需要这些数据，其中有从 SrXXVII 到 RnXXXIV 间的几种离化态原子的 $\Delta n=3\sim 4$ 的跃迁谱线： $3s^2\ ^1S_0-3s3p\ ^1P_1$ 、 $3s3p\ ^1P_1-3s3d\ ^1D_2$ 和 $3s3p\ ^3P_2-3s3d\ ^3D_3$ ^[5]。

由于激光输出功率大，持续时间短，聚焦斑点小，因此等离子体温度高达千万度。它的亮度和简并度比传统的光要高 $10^8\sim 10^6$ 倍以上，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，所以激光光源是一个很好的研究光谱学的光源。用单一元素制成靶片，测量的谱几乎不含杂质谱，但是，由于等离子体内电离和复合情况相当复杂，谱线也相当

多，谱线的混合问题相当严重。对原子序数 74 的钨，当 4f 壳层填有一半电子时，谱线就有可能存在 8 万多条，依靠光谱图是无法分辨这些谱线的，这就对谱线的研究带来了一定的限制。为解决这一问题，人们把激光光谱学研究方法与束箔光谱学研究方法结合起来研究光谱学，即选用可调激光代替束箔，使加速器产生的离子激发到选定的能级来研究不同的过程，从而定量地提供多电荷态原子的信息。

虽然束箔光谱学技术早在 70 年代就已建立(主要集中在欧美国家)，但是，束箔光源成为鉴别新谱线和波长测量的手段只是到了 80 年代才完全实现的，现在已成为研究原子物理学的分支学科。迟迟地对这一分支学科的真实地位的肯定，是由于束箔谱仪波长测量精度在 80 年代才取得了进展，如 MCOF 类似的程序成功地用于光谱理论计算。

在束箔光谱学研究中，经加速器产生的离子束与靶箔作用时，入射离子在很多电子被剥离(或俘获)的同时也被激发，产生了高次电离离子的激发态，退激时会辐射出光谱线。起初，这一束箔技术用于研究受激能级寿命，但在观测中发现，束箔光谱分布图上出现的谱线在其它光源的光谱上不容易找到，这就为原子结构的研究提供了更多的信息。与此同时，这种技术与电子和质子碰撞激发相比，用重离子束与靶箔碰撞激发可获得其它光源技术难以得到的多电离态、多重激发态和比较丰富的伴线。

1973 年，瑞典在 UPPSALA 首次研究束箔电离和激发的多电离态氟和氧原子。实验是在 (6~42)MeV 的串列加速器上进行的，测量了束能在 42MeV 下、波长在 (2000~5700) Å 范围的 CLVI 到 CLXIV 和 OVI 到 QV Ⅲ 的类氢跃迁谱^[6]。这些跃迁谱用普通的光源是难以观测到的，因为其等离子体密度较大，对谱线会产生明显的斯塔克和碰撞加宽作用。利用谱线强度随束能的变化规律确定产生这种谱线的气体离化度。

随着束箔光谱学技术应用于原子物理学研究的兴起，加拿大和比利时在 2MV 静电加

速器上分别测量了碘和氮的束箔光谱^[7]. 在氮的远紫外束箔光谱中出现了很多未被鉴别的谱线, 归类于 N III、NIV 和 NV. 观测到的 NV 四重态中的 8 系新谱线与当时的理论预言一致, 同时还测定了 N III 的两个新能级和 NIV 的 5 个新能级的能量. 此后, 束箔光谱学技术揭示了很多原来没有发现的新问题, 于是多电荷态原子的研究就成了十分活跃的研究前沿课题, 成为为受控热核聚变和天体物理研究提供实验数据的重要手段. 美国布鲁克海文国家实验室利用 (20~238) MeV 的离子束, 在 (5~60) nm 波长范围测量了 Ti、Cu、Ni、Br、I、W 和 Au 的束箔光谱. 对 Ni、Cu 和 Br 三种离子, 测量了类钠的 Ni¹⁷⁺、Cu¹⁸⁺ 和 Br²⁴⁺ 的 3s—3p 跃迁. 对碘测量了三种束能的类铜和类锌的 I²⁴⁺ 和 I²³⁺ 的束箔光谱.

多电荷态钨的辐射研究有实际应用价值, 它广泛用作托克马克聚变装置的结构材料. 人们已研究了 200 MeV 以下的不同能量和不同平均电荷态的钨束箔光谱. 钨和金也常用作结构材料, 测量了 W²⁰⁺、W²⁴⁺、W²⁸⁺ 和 W³³⁺ 的光谱, 而对金也测量了和金离子等电子的四种金离子 Au²⁵⁺、Au²⁹⁺、Au³³⁺ 和 Au³⁸⁺ 的束箔光谱, 波长都是 (30~80) Å. 最近, J. Reader 等人^[8] 为受控聚变和 X 射线激光器的研究需要, 测量了 Y²⁸⁺ 到 Sn³⁹⁺ 类钠离子的光谱和类氟、类氧 2s—2p 的跃迁, 实验中发现了许多谱线. 有些谱线正好是受控聚变所需要的.

束箔光源技术与其它光源技术相比较, 其优点是不受干扰和等离子体膨胀的影响, 因而也不会产生异常的能级. 因此, 可用这种束箔光源的单一谱线鉴别其它新的跃迁谱线.

3 碰撞截面的测量

离子—原子碰撞的研究近几年发展相当快, 已成为离子与原子物理的一个重要发展方向, 研究内容极为丰富, 涉及的面也非常广泛, 已为许多基础和应用学科开辟了新的研究途径. 例如, 内壳层一个电子的能级研究、慢速多电荷离子的电子俘获截面和中速多电荷离子

的电子俘获研究及碱原子激发态非弹性碰撞研究等, 正受到人们越来越大的重视. 加速器是研究原子碰撞的有力武器, 目前有不少国家使小加速器越来越集中于从事原子碰撞物理方面的研究, 同时也使用了中能加速器和高能加速器. 据核聚变研究资料介绍, 磁约束可控核聚变等离子体和惯性约束等离子体的发展, 均需要大量的原子碰撞数据.

3.1 内壳一个电子的能级

按原子序数的范围和测量精度来说, 一个电子和一个空穴实验测量的完善程度是很不相同的. 对于一个空穴的原子, 在 $13 \leq Z \leq 88$ 的范围内, 或多或少地有 $n=2$ 到 1 和 $n=3$ 到 1 跃迁的精确测量; 但对于单个电子的原子, 测量集中于 $Z \leq 2$, 很少有 $Z > 10$ 的情况. 而对高 Z 的原子, 精确测量 1s 能级的跃迁是最重要的, 但往往要受 Doppler 效应和旁观电子发射谱线的影响, 两者受轰击粒子速度的影响是相反的, 现在一般采用两种方法并举来减小其影响, 一是视多电荷态重离子为轰击粒子, 以减小对靶原子的能量传输, 二是采用所谓“加速—剥离—减速—俘获”的办法控制 Doppler 效应和旁观电子的影响. 第二种办法优于第一种, 因前一种方法仍然有一些电子处在外层轨道上, 测量精度仍会受到旁观电子发射谱线的影响. 文献[9]曾对中到高 Z 的一个电子和一个空穴的离子 X 射线实验测量进行了讨论, 并和理论计算作了比较, 指出了今后实验测量的方向.

3.2 慢速多电荷态离子的电子俘获截面

低速多电荷态离子和中性原子碰撞, 引起的电子俘获已成为与聚变研究和天体物理相关的、感兴趣的课题. 在多电荷态离子与原子碰撞中, 一个(或多个)电子可以转移到轰击的离子上. 实验观测结果表明, 在低速范围内 ($v < v_c$), 一个电子电荷交换截面几乎与能量无关, 这点至少在 $(2Q \sim 10Q)$ keV ($Q \geq 4$) 的能量范围内是正确的. S. Bliman 和 M. Bonnefoy 等人^[10] 在 1982 年就用双磁体分析系统, 完成了多电荷态离子和 He、D₂ 等碰撞的单电子俘获

截面的测量.

慢速多电荷态离子的电子俘获截面研究,只要分别测量入射离子束和碰撞形成的产物的电流,就可得到单电子俘获截面:

$$\sigma_{q,q-1} \approx \frac{q}{q-1} \cdot \frac{I_{q-1}}{I_{q_0}L}$$

q 是入射离子的电荷, n_0L 是靶厚. 多电荷离子俘获电子后有可能处于激发态, 所以用流动气体正比计数管测量能量高于 100eV 的 X 射线, 就可以得到 X 射线发射截面:

$$\sigma_X = \frac{4\pi}{\Omega} \cdot \frac{I}{N_i T_s c_L}$$

I 是测量的光子数, N_i 是穿过相互作用长度为 L 的离子数, T 是计数管窗的透射系数, Ω 是探测立体角.

从 C^{9+} 、 N^{7+} 、 O^{8+} 、 Ar^{q+} 和 Xe^{q+} (有些可以到裸核 C、N、O; Ar, $q=16$) 的一系列单电子俘获截面测量结果中, 推出的经验单电子俘获截面的定标定律为:

$$\sigma_{q,q-1} \approx (4.00 \pm 0.7) \times 10^{-12} \frac{q}{[I_0(eV)]^3} cm^2$$

I_0 (eV) 表示靶的电离势. 此经验公式, 在中等能量 (3keV/原子单位) 和 $q \geq 4$ 时是正确的. 最近, L. Liljeby 和 G. Astner 等人^[11] 完成了慢速 $Ar^{q+} + Ne, Ar, Kr$ 碰撞中多电子过程的绝对截面测量. 碰撞过程是: $Ar^{q+} + B \rightarrow Ar^l + B^s + (s+1-q)e^-$, 离子能量为 $1.8qkeV$ ($q=1 \sim 9$). 利用 225cm 回旋加速器提供 110MeV C^{14} 脉冲产生 Ar^{q+} , 反冲离子作为轰击粒子, 电荷从 1 到 9, s 最大值分别为 6(Kr)、5(Ar) 和 4(Ne). 用飞行时间符合技术测定轰击粒子和靶在碰撞后的电荷态, 得到单电子和多电子过程的截面.

3.3 中速多电荷态离子的电子俘获

中速 ($v = v_c$) 情况下, 碰撞既可以用量子计算, 也可以用经典理论来描述. 1982 年, 丹麦科学工作者曾经对中速多电荷态离子和轻原子碰撞俘获电子后形成的激发态进行了研究, 为受控聚变研究提供了可贵的实验数据. 此外, 激光、能源、材料和空间科学等高新技术部门, 都需要多电离态原子的知识和数据; 这些

知识和数据, 也为迅速发展的各种激光光谱技术、束技术、检测技术和计算机技术, 提供了开发研究的前景.

3.4 碱原子激发态非弹性碰撞

分析原子共振荧光和敏化荧光光谱, 是研究原子碰撞的一种途径. 在研究原子能级集居数反转时, 非弹性碰撞问题变得日益突出和重要, 因为解释低温等离子体物理等一些疑难现象, 需要双原子碰撞的知识和数据. 研究碱原子激发态非弹性碰撞的目的之一, 就在于了解原子碰撞引起激发能量转移的物理机制和一些物理现象.

4 原子能级和跃迁几率测量

在物理学的许多领域内, 精确测定原子和离子辐射寿命和跃迁几率是极为重要的. 目前, 实验测量对象主要是重元素的离化态和高激发态的能级寿命及跃迁几率. 实验测量方法主要分为四类: 延迟符合法、束箔方法、能级交叉法和相位移动法. 总的来讲, 这些方法在技术上都要求很高. 如延迟符合法, 从原理上讲, 它是很基本的方法, 其关键是测出粒子发光随时间的变化曲线; 但从技术上讲, 这种方法要求在很短的时间间隔内, 得完成激发粒子与光强的测量, 这至少比待测寿命短一个数量级; 精度要求高, 信号又很弱, 因此测量比较困难. 在这方面, 束箔方法有它的独到特点: 它将时间分辨变成了空间分辨, 技术上易于实现, 研究的元素范围也很广, 通过测定元素离化态的激发态在退激时放出的可见光、紫外光、X 射线和某些情况下自电离发出的电子, 就可以测定任何电离态的激发态的平均寿命.

在测量原子辐射寿命的各种实验方法中, 唯独只有束箔方法通常用于多电荷态原子测量. 但是, 这种技术也存在几个缺点: 一是束箔相互作用中的非选择辐射, 会导致产生级联衰变, 从而使寿命测量变得复杂了; 二是谱线混合问题; 三是受箔激发的离子速度很难测准. 为克服这些缺点, 人们想了不少办法, 进行了许多工作, 尤其对级联衰变的影响采用某些方

法进行了修正,但效果不大. 1985年以后,N. Reistad 等人在用束箔技术测量 C II 和 C III 的能级寿命时,消除了上述缺点,他们把 ANDC 方法和 CANDY 程序结合起来,使得极为复杂的级联发射的影响问题,得到了解决. 测量仪器分辨率的提高,减小了谱线的混合问题;离子的速度,可用静电分析器精确测定.

参 考 文 献

- 1 Sellin I A. Extension of Beam Foil Spectroscopy in Structure and Collision of Ions and Atoms (edited by Sellin I A) Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, New York, 1978
- 2 Morley P D, Sugar J. Phys. Rev. ,1988 A38 : 3139
- 3 Fawcett B C. J. Phys. 1971, B4 : 981~985
- 4 Fawcett B C. et al. Mon. Not. Roy. Astr. Soc. , 1979, 188 : 363
- 5 Reader J. J. Opt. Soc. Am. , 1983, 73 : 796~799
- 6 Hallin R, et al. Phys. Scri. , 1973, 8 : 209~217
- 7 Baudinet-Robinet Y, et al. Phys. Scri. , 1986, 33 : 73~77
- 8 Reader J, et al. J. Opt. Soc. Am. , B, Opt. Phys. , 1990, 7(7) : 1176~81
- 9 Ernest Kessler G, et al. Phys. Scri. , 1986, 34 : 408~412
- 10 Blimam S, et al. Phys. Scri. , 1983, 73 : 63~67
- 11 Lillieby L, et al. Phys. Scri. , 1986, 33 : 310~320

Study of Atomic Parameter of Multiple—charged State

Yang Zhihu

(Institute of Modern Physics, Academia Sinica, Lanzhou 730000)

Abstract The experimental measurement about the ionization state for atomic parameters at accelerator and the subject being done are introduced, which includes the highly charged atomic spectroscopy, the development and application of the low temperature electron beam — ion source (LTEBIS), the study for electron — capture process of highly charged atom at intermediate and low speed, and the measurement of lifetime and transition probabilities of excited atomic levels.

Key Words multiple-charged state, beam-foil spectrum, laser plasma spectrum, collision, parameter.