

文章编号: 1007-4627(2006)04-0414-05

# 直接鉴别超重元素 $Z$ 和 $A$ 的一种新的可能方法\*

马新文<sup>1</sup>, 詹文龙<sup>1</sup>, 张大成<sup>1, 2</sup>

(1 中国科学院近代物理研究所, 甘肃 兰州 730000;

2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要:** 随着合成的超重元素向超重岛逼近, 合成截面越来越小, 同时, 合成的超重元素的寿命可能相对增长, 这对利用  $\alpha$  衰变链的传统方法鉴别超重元素是非常不利的。讨论了可能突破这个瓶颈的一种可以直接鉴别超重元素原子序数  $Z$  和质量  $A$  的新方法, 即与 RFQ 离子阱技术相结合的激光多步共振电离方法, 对实现这种方法的途径、该方法所面临的困难和挑战、需要进行的前期研究工作以及该方法的可能性和可行性进行了较详细的讨论。

**关键词:** 超重元素; 鉴别新方法; 激光多步共振电离; 重元素原子核结构

**中图分类号:** TL8      **文献标识码:** A

## 1 引言

实验合成超重元素是重离子核物理研究的重要方向之一, 它对于检验核结构理论模型和验证超重岛的存在具有重要科学意义。自 1940 年人工合成超铀元素镎以来, 核物理学家已经在超重元素的合成研究方面迈出了重要的步伐, 物理学家已经人工合成了 20 多种新元素, 使元素周期表元素数目扩展到了 116 号元素。目前人工合成超重元素主要是通过其  $\alpha$  衰变和其衰变链末端的稳定核素来鉴别的。随着合成的超重目标核向超重岛逼近, 理论模型和实验规律都预言合成反应截面越来越小。另一方面, 合成核的稳定性增大——即其寿命变长。这意味着超重合成和鉴别实验的难度增加, 同时, 在相同的束流和时间条件下合成超重核的数目减少, 而  $\alpha$  衰变速率变小, 因此通过测量  $\alpha$  衰变链的方法对合成的超重核素进行实验鉴别变得非常困难<sup>[1]</sup>。如何找到更灵敏和更有效的方法来鉴别超重核素, 是这一领域极富挑战性的研究工作。

在原子物理中, 结合激光技术和原子谱线, 形成了能够探测极微量元素的方法, 甚至是单个原子探测技术, 其特点是准确和灵敏度高, 这对我们把原子物理技术应用到核物理研究中很有启发。但

是, 与稳定原子不同, 核物理实验中合成的超重元素数量少, 而且还要衰变, 并且对超重元素光谱的了解基本上是空白。本文主要讨论针对合成超重核素进行实验鉴别的一种新想法——重余核离子的激光多步共振电离方法, 对采用这种方法的原理、特点、存在的困难和可能的实现途径等进行较详细的分析和讨论。

## 2 离子激光共振电离的原理和实现方法

人们知道, 原子的电子能级结构对原子核电荷数  $Z$  (原子序数) 具有很强的依赖关系, 原子能级间的跃迁——原子光谱对  $Z$  具有相同的依赖关系:

$$E \propto \frac{Z^2}{n^2}, \quad \Delta E = \frac{hc}{\lambda} \propto Z^2, \quad (1)$$

其中  $n$  是能级的主量子数,  $E$  是能级,  $h$  是普朗克常数,  $c$  是光速。因此每个元素都具有其特征辐射, 这也是通常利用 X 射线来做元素分析和元素标识的依据。莫塞莱 (Moseley) 研究元素 X 射线的公式, 第一次提供了精确测量  $Z$  的方法, 历史上就是利用莫塞莱公式纠正了 <sup>27</sup>Co 和 <sup>28</sup>Ni 在周期表中的顺序, 并指出了  $Z=43, 61, 75$  这 3 个元素在周期表中的

\* 收稿日期: 2006-10-02

\* 基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向性资助项目 (CKJCX2-SW-No4)

作者简介: 马新文 (1966—), 男 (汉族), 甘肃张掖人, 研究员, 从事原子分子物理学研究; E-mail: x.ma@impcas.ac.cn

位置<sup>[2]</sup>。高精度原子光谱学还揭示了同位素移动的存在，即原子的分立共振谱线的位置因同位素而变化，同位素移动的贡献有核质量移动和场移动。因此精细光谱与原子核的质量紧密相关。

在可见光和紫外波段，原子和离子的光谱要复杂得多，但是跃迁谱线依然是天体物理学鉴别元素及其丰度的重要方法。那么，加速器人工合成的超重元素能否利用这些方法来鉴别呢？

对于超重元素，目前的鉴别方法主要是通过  $\alpha$  级联衰变来进行的，然后反推出母核的质量和原子序数。前面提到，超重元素的生成截面非常小，产额非常低，而且  $\alpha$  衰变速率降低，因此通过测量  $\alpha$  衰变链的方法对合成的超重核素进行实验鉴别变得非常困难。如果实验能够直接给出待测核的原子序数，则可以直接鉴别出该原子。使用光谱的方法是否可行？

前面提到，超重元素的生成截面非常小，产额非常低，而且超重元素具有有限的短寿命。如果利用纯粹光谱测量的传统方法(天文物理使用)，基本上没有实现的可能性。因为首先需要将被分析样品激发，而高精度光谱的系统测量效率低(一般在  $10^{-3}$  数量级)，X 射线的探测也存在同样的问题。然而原子的激光多步共振电离技术具有独特性，表现在：原子高精度光谱特性、饱和激发和电离、离子测量而非光子测量以及测量效率可接近 100%。因此将原子序数 Z 的灵敏性和测量的高效性完美地结合起来，是一种非常有希望的方法和通向实现 A, Z 直接鉴别的途径。原子的激光多步共振电离分 3 种情况，如图 1 所示。以三步共振电离情况为例，前两步均为激光共振激发，使得原子处于某一中间激发态( $n'l'm'$ )，显然，这两步过程的波长与原子序数 Z 的依赖性很强，对于第一种情况，第三束激光使得激发态原子发生光电离，只要激光束中单光子的能量满足  $h\nu \geq |IP_1 - E'|$ ，激发态原子就被电离，这一步是无选择性的；第二种情况，第三束激光中光子的能量不够大，只能使得原子被激发到很高的里德堡态，处于高里德堡态的原子在外场中被场致电离，这一步也是无选择性的；第三种情况是，第三束激光被调整到激发态原子的自电离态，处于自电离态的原子通过俄歇过程发射电子而被电离，显然，这是选择性很强的共振过程。从上面的分析可以看出，激光多步共振电离一方面可以

研究原子的精细能级结构(这也是目前使用激光多步共振电离的重要目的)，另一方面，由于共振激发对 Z 的敏感性，可以用来给出未知元素的原子序数 Z，这是利用激光多步共振电离鉴别超重元素的基础。

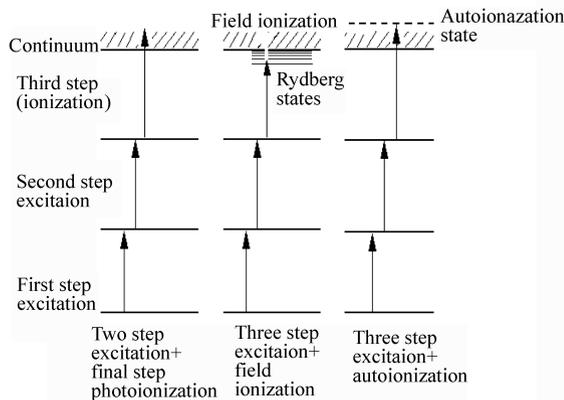


图 1 多步激光共振电离的 3 种模式

总结起来，激光多步共振电离的特点是对原子序数 Z 敏感，对于共振激发和电离过程能够达到接近 100% 的效率，特别适合于少量原子甚至是单个原子的检测。进行实验所必需的条件是：原子的激发态能级结构已知，在激光所覆盖的波谱范围内，具有光学可允许的跃迁，能够提供气相态的原子，具有高探测效率的离子探测器。对较轻的元素，其激发态原子结构的实验数据很丰富，理论计算的精度也相当高，然而对重元素，特别是超重元素，原子基态能级结构的实验数据非常稀少，理论计算的精度也远远不足，激发态原子结构的数据几乎没有。

如上所述，通过核反应产生的超重元素非常少，而它们的原子结构数据也几乎没有，如何充分和有效地利用激光多步共振电离技术探测可能的几个超重元素呢？从当前的技术来看，最有效的方法就是将它们囚禁起来。当前，利用激光可以把原子囚禁起来，然而，这需要知道原子的精确能级，对于超重元素是不现实的。因此，最好的办法就是利用电磁方法把荷电的超重元素囚禁。核反应产物具有较高的能量(动能)，而且电荷态较高。我们计划利用产物与 buffer 气体相互作用损失能量来减速，最后得到电荷态为一价的离子，它们具有与 buffer 气体相同的平均动能。这些离子将被囚禁在 RF 阱中。将三束激光并束在离子阱中，与离子相互作用，

通过扫描激光波长确定被囚禁离子的核电荷数  $Z$ 。与此相关的离子阱的描述和讨论,可参见文献[3]。

但是,超重元素的寿命有限,不可能进行无穷长时间扫描,如何进行合理的扫描?这当然需要尽可能准确地知道被探测元素的能级结构。然而即使目前最好的原子结构理论程序,也无法给出核外具有 100 多个电子的原子的精确原子能级。人们知道,对于轻元素和较重的元素,多电子组态原子结构理论能够可靠地给出它们的能级结构,超重核研究面临的问题是怎样在现有的理论和实验基础上,进一步将理论预言较准确和可靠地扩展到超重元素。我们的基本想法是开展重元素精细光谱学研究,通过理论与实验精细光谱的比较,探索出半经验的理论公式,比较准确地计算超重元素原子能级结构和激发态结构。一种方法是沿周期表原子序数增加的顺序,依次研究每一个元素及其随后的几个元素的能级结构,来探索半经验公式;另一种方法是根据元素周期表中族的划分,研究每一族元素从轻到重的实验光谱与理论结果,探索每一族元素具有的半经验能级结构公式。通过与资深原子结构理论物理学家探讨,第二种方法可能更可取。因为同一族元素具有相同的最外层电子结构和类似的激发态结构,半经验公式的外推性可能更合理。这些都需要开展大量的精细实验研究和理论计算,参数化拟合分析是一项长期的、积累性的工作。这些数据的精度直接决定了超重元素的多步共振电离实验能否有效实现。

对于一般原子,采用多步共振电离的一个重要原因是单束激光的光子能量不足以使得它电离,因为原子的第一电离能一般都大于目前激光提供的单工作能量,只有采用多步过程,才能够使得原子的最外一个电子处于连续态。对于重元素,其第一电离能一般在 5—7 eV 左右,对应的激光波长是 248 nm 或者更短,基本上也无法进行一步电离。然而,为了把稀有的超重元素囚禁起来,必须采用一价态的离子,通过激光多步共振电离使其电离到二价态。显然,原子的第二电离能要大于第一电离能,因此需要波长较短的激光来进行多步共振电离,这就对所使用的激光提出了新的要求:三束激光的能量要足够大,使得一价态离子能够发生电离。图 2 给出了超重元素( $Z > 100$ )的第一电离能和第二电离能的理论计算值[4]。显然,第二电离能在大多数

情况下都大于第一电离能,而且理论预言在  $Z = 110—120$  的范围,第二电离能要大得多,达到了约 15 eV;当然,在有些  $Z$  值处,第二电离能也很小,与第一电离能的值接近。这些理论值是采用相对论 Dirac-Fock-Slater 方法计算的,但对于  $Z > 100$  的元素,理论计算值在多大程度上能够“准确”预言实际电离能值,还需实验进行检验。2003 年美茵兹大学利用激光共振电离技术成功观测到镆元素( $Z = 100$ )的原子能级,且观测值与理论预言结果很接近。这是开展超重元素光谱学研究的一线曙光,但也很清楚,没有好的理论支持,实验根本无法完成[5]。

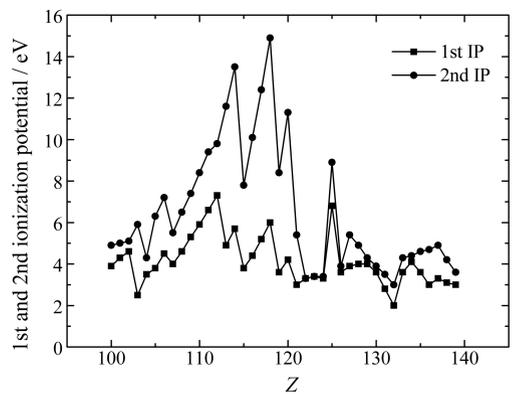


图 2 超重元素的第一电离能和第二电离能相对论 Dirac-Fock-Slater 理论值随原子序数的变化关系

我们根据实验需求订做了一套激光系统,其功率输出能够满足饱和激发和饱和电离的条件。激光系统的原理如图 3 所示,由钛宝石激光种子源(Ti:S Seed)产生的激光经过再生放大系统(Reg. Amp)后,采用两台 YAG 激光作为泵浦源,进行功率放大,经过二次谐波产生单元(SHG)后分成两路进行光参量调节与放大(OPG & OPA),最后系统输出三路激光。这三路激光系统由两束波长可调协的激光(光路 I 和 III)和一路固定短波长激光器(200 nm, 光路 II)构成,各路激光参数如图 3 所示。激光系统的重复频率为 10 Hz,激光可以用外部触发方式工作。实验计划采用两步共振激发和第三步光电离的模式,即图 1 中描述的第一种情况。激光的输出功率需要达到饱和激发和饱和电离的要求,由于束缚态激发截面很大,因此,达到饱和激发的功率要求不高,各路输出激光的理论最大功率见图 3 中的参数。可调协激光的波长范围在 450—230 nm 之间(2.7—5.3 eV),见图 3 中光路 I 和光路 III。

在短波长工作情况下，此激光系统能够达到的最大能量接近 16.8 eV(5.3 + 5.3 + 6.2)，可以满足理论预言的超重元素第二电离能所有可能出现的情况。这三束激光在 RFQ 阱中并束，与离子发生相互作用，扫描前两束激光的波长，达到共振条件后离子将被电离，离子束从 RFQ 中引出以后通过一

个二极分析磁铁，不同电荷态的离子被分开，由后面的位置灵敏探测器记录，则出现在二价离子位置上的离子即为所寻找的元素。激光洁净实验室已经建成，位于超重束流线的下方(地下)。实验时，三束激光将通过管道传输到上层的束流线进行并束，且进行在束实验，传输距离大约 10 m。

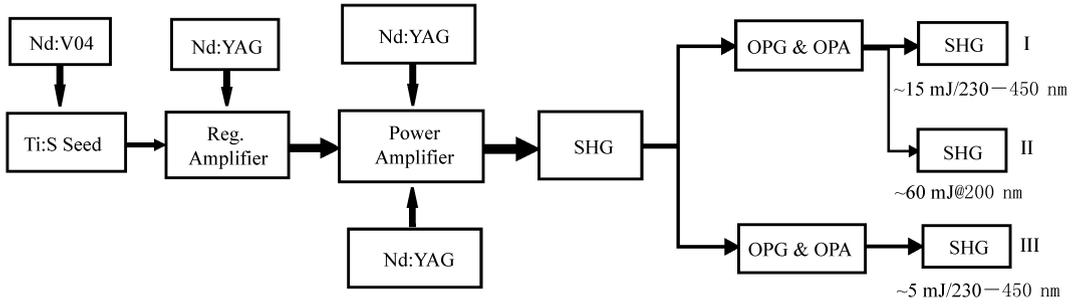


图 3 多步共振电离激光系统示意图

Ti:S Seed; 钛宝石激光种子源; Reg. Amplifier; 再生放大系统; Power Amplifier; 功率放大系统(采用多通放大); SHG; 二次谐波产生单元; OPG & OPA; 光参量产生与放大系统。

### 3 讨论和总结

从上面的叙述可以看出，利用激光共振多步电离技术来鉴别新元素的方法是一种能够直接鉴别原子序数 Z 的方法，理论上效率可以达到很高。然而这是一个非常复杂的实验系统，涉及到加速器、核反应、产物分离、激光系统、多步共振电离和离子探测等方面。首先，由于核理论不能够准确预言所选择弹靶组合所产生的新元素的质量，即在选定的弹靶组合反应产物中新元素的质量不确定，因此，在对核反应产物进行分离时，需要对质量有一定的

宽容度。例如，能够向后传输预言质量 A 以及 A ± 1 的产物，并且能够被囚禁在 RFQ 离子阱中。由于原子光谱对原子核的质量也是敏感的(即质量同位素移动)，在初期研究时，关心的重点是原子序数 Z，所以应该适当对于激光谱线的线宽要求弱些。再有，合成的新元素具有有限的寿命，快速进行激光共振激发并电离和引出显得非常重要，如何合理地安排这些过程的时间关系也是实验最终成功的关键因素。表 1 给出了进行激光多步共振电离实验的特点和实验需求，可以看出，超重元素的原子结构和能级特性，对于激光多步共振过程是至关重要

表 1 实现原子和离子的激光多步共振电离的特性和需求

	轻原子	超重离子	备注
特性			
Z 的敏感性	很敏感	很敏感	
激发效率	可以饱和激发	可以饱和激发	对激光功率要求一般
电离效率	可以饱和电离	可以饱和电离	
粒子数目	逼近单原子灵敏	单离子灵敏	
要求			
能级结构	比较清楚，理论相对可靠	数据很少，理论需要验证	对于超重元素，需要发展半经验理论公式
运动状态	无限制，要求气相原子	需要囚禁	
波长范围	一般可见光范围	紫外，极紫外	离子实验对激光器的要求更高，因电离能较大
能级特性	光学容许跃迁	光学容许跃迁	对能级有选择性
单粒子	不易囚禁	相对容易囚禁	
测量时间	没有特殊要求	尽可能快	超重离子寿命有限

的, 因此对重元素和超重元素原子结构的实验和理论研究, 必须尽可能早地开始进行。

综上所述, 利用激光共振多步电离技术来直接

鉴别新元素的原子序数  $Z$  和质量  $A$ , 实验的可能性和可行性是存在的, 但是, 困难也是显然的, 理论研究和实验技术都面临新的挑战 and 机遇。

## 参 考 文 献:

- [1] 徐珊瑚, 黄天衡, 孙志宇等. 原子核物理评论, 2006, **23**(4): 359.
- [2] 杨福家. 原子物理学. 北京: 高等教育出版社, 2000, 第 3 版.
- [3] 黄文学, 王 玥, 朱志超等. 原子核物理评论, 2006, **23**(4): 383.
- [4] Fricke B, Soff G. Atomic Data and Nuclear Data Tables, 1997, **19**: 83.
- [5] Sewtz M, Bache H, Dretzke A, *et al.* Phys Rev Lett, 2003, **90**: 163 002.

# A Novel Approach to Direct Identification of $Z$ & $A$ for Super-heavy Elements<sup>\*</sup>

MA Xin-wen<sup>1</sup>, ZHAN Wen-long<sup>1</sup>, ZHANG Da-cheng<sup>1, 2</sup>

(1 *Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;*

*2 Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)*

**Abstract:** With the synthesis of heavy elements approaching the super heavy island, the production cross section becomes smaller and the lifetime of the super heavy element becomes longer, which results in the difficulties for identification of the elements by using conventional alpha decay chain technique. In order to overcome the difficulties, a novel approach to direct identification of atomic number  $Z$  and nuclear mass  $A$  for super heavy elements is proposed, namely, the multi-step resonant laser ionization of singly charged ions in combination with RFQ trap. The routine for the experiment is presented, and the possibilities, feasibilities, as well as the problems to be faced, are discussed in detail.

**Key words:** super heavy element; novel identification method; multistep resonant laser ionization; atomic structure of heavy ion