

文章编号: 1007-4627(2006)04-0370-05

# 研究重元素原子谱学性质的可能性\*

靳根明, 冯兆庆, 付 芬, 赵旭林

(中国科学院近代物理研究所, 甘肃 兰州 730000)

**摘 要:** 论述了重元素, 特别是超重元素原子谱学的重要意义。指出了对这些元素原子谱学进行研究的必要性。探讨了通过核反应产生重元素的几率和产额, 以及可能的收集方法, 表明了这可为重元素原子谱学研究提供必要的条件。同时也简单描述了研究重原子谱学的方法——激光共振电离法。

**关键词:** 重元素; 原子谱学; 重离子反应; 重余核

**中图分类号:** O571.6      **文献标识码:** A

## 1 引言

多个世纪以来, 原子物理特别是原子谱学已经成为了物质结构研究一门基本的学科。从量子力学的产生到对元素的化学性质的基本解释, 再到对整个宇宙统一体的理解, 都离不开原子谱学的知识。与此同时, 原子物理学的理论也指导了人们正确理解其它的复杂系统, 如分子、晶体甚至在生物和固体物理中的一些现象。因此, 对原子的深入了解, 对其它科学的发展有十分重要的意义。近年来, 随着其它学科技术的发展, 特别是原子核物理的发展, 超重元素(根据原子核外电子的排列, 从  $Z=104$  开始,  $6d$  壳层开始填充, 因此, 将  $Z \geq 104$  的元素称为超重元素<sup>[1]</sup>)的合成已经有了长足的进步<sup>[2-4]</sup>, 到目前为止, 合成了直到原子序数为 118 的元素<sup>[5]</sup>。对这些已合成的超重元素的核性质都进行了较为深入的研究, 同时对一些已合成的超重元素的化学性质也开展了研究<sup>[6]</sup>。因此, 超重元素的合成也对原子物理提出了新的要求, 也希望对其原子性质进行研究。以上原因使得原子物理学进入了一个崭新的区域——极端条件下的原子物理学。例如, 超低温下的玻色-爱因斯坦凝聚、超强场下的基本相互作用(类氢重离子的精细能谱劈裂)和超重元素的原子性质等。

随着元素原子序数的增加, 原子核的库仑场也

随之增大, 这使得原子内层电子受到的库仑力也随之增大, 导致内层电子的轨道半径减少; 这种效应不仅只对内层电子产生影响, 也会波及到外层电子。使核外电子分布波函数收缩, 使外层电子的分离能发生变化。这种现象被称之为重核外电子的相对论效应。尽管在理论上早就对这种效应进行了研究, 例如, 利用相对论性的  $ab$  initial 多组态 Dirac-Fock 理论进行了计算<sup>[7]</sup>, 但其准确性如何, 必须由实验来进行检验。

在锕系元素及超锕元素的原子中, 价电子的原子占居  $5f$ ,  $6d$ ,  $7p$  和  $7s$  轨道, 适合研究原子中的相对论效应。因此, 需要通过对这些重元素原子谱学的实验研究探索原子中的相对论效应。

但截止目前, 我们还只局限于对原子序数在 92 以下的原子进行较为详细的研究, 对更重的元素, 特别是对原子序数大于 100 的原子谱学实验研究还很少, 甚至是空白。很重要的一个原因就是没有足够数量的原子可用来进行原子谱学的研究, 另一个原因是过去还没有足够灵敏的实验手段, 能通过只对少数几个原子的研究就可得出它们的可靠信息。

2004 年, 德国小组首次对重元素  $^{255}\text{Fm}$  的原子谱线进行了实验测量<sup>[8]</sup>。他们通过将  $^{249}\text{Cm}$  放入高通堆中, 经过中子俘获反应生成了 1.718 ng 要研究的目标原子  $^{255}\text{Fm}$ , 经纯化后得到  $2.7 \times 10^{10}$  个  $^{255}\text{Fm}$  原子, 并将其沉积在 Ta 丝上进行加热挥发。再利

\* 收稿日期: 2006-10-25

\* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10475100); 中国科学院知识创新重点方向性资助项目(KJJCX2-SW-No7)

作者简介: 靳根明(1943-), 男(汉族), 河南许昌人, 研究员, 博士生导师, 从事核物理实验研究; E-mail: jingm@impcas.ac.cn

用 XeF 激光器发出的 351/353 nm 的激光(重复频率 200 Hz, 脉冲功率 50 mW, 脉宽 15 ns)将  $^{255}\text{Fm}$  原子电离, 并通过可调频率燃料激光器(线宽 5 GHz)调节激光的能量, 使其与  $^{255}\text{Fm}$  原子的第一激发态和第二激发态发生共振。电荷态的测量是用高分辨四级质谱计完成的。实验结束表明,  $^{255}\text{Fm}$  的第一激发谱线位于  $25\,099.88$  和  $25\,111.8\text{ cm}^{-1}$ , 分别与理论计算的  $25\,226$  和  $25\,471\text{ cm}^{-1}$  相对应(见图 1)。也就是说, 尽管它在理论计算值的误差范围之内, 但实验值与理论值相差近 115 和  $360\text{ cm}^{-1}$ 。这一实验结果, 不仅是人们第一次获得的 100 号元素的重要原子谱学数据, 从而使重原子谱学的研究向前进了一大步。同时, 也表明理论计算还必须进一步改进。

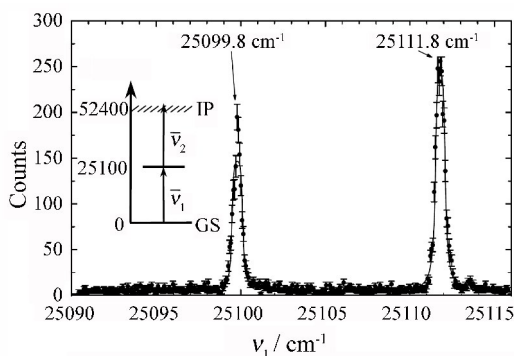


图 1 实验测得的  $^{255}\text{Fm}$  元素的激光激发谱

另外, 在超重核的鉴别中, 原子序数也是一个重要的参数。当然直接测量合成核的原子序数是非常有效的。但是, 通常要测量一个原子核的质量数, 就必须知道其电荷态, 然后测定其荷质比, 从而推导出其质量数。在超重核合成中, 产物核的速度不是很高, 不能形成全剥离的裸核, 其电荷态就不是确定的值, 而是一个分布。为了有效地测得原子核的电荷数, 一般使产物在气体氛围中减速, 并使其中性化, 然后再利用激光电离成一价态。据此, 中国科学院近代物理研究所就提出了一种新的超重核的鉴别原理<sup>[9]</sup>, 即通过收集反冲核并慢化—中性化—强激光电离—荷质比鉴别测量等一系列过程, 同时确定超重核的原子序数和质量。这种鉴别原理特别适用于长寿命核的鉴别, 而且也有很高的鉴别效率。设想的具体鉴别装置如图 2 所示。这一鉴别方法的关键在于要确切知道要合成的目标元素的第一电离电位, 为此, 也要求知道其第一激发态, 或(和)第二激发态。只有这样才能经过两(多)步共振电离<sup>[10]</sup>使其成为一价态的原子。到目前为止, 人们仅只测量了 100 号元素的第一激发能级和第二激发能级的能量, 对更重原子还没有任何实验信息。这就要求人们从 100 号元素开始, 一步一步地测量更重元素, 乃至超重元素的原子谱学信息。然后根据实验结果改进现在的相对论相关的理论, 计算出新的超重元素的原子谱信息。为新超重元素的精确鉴别提供可靠依据。

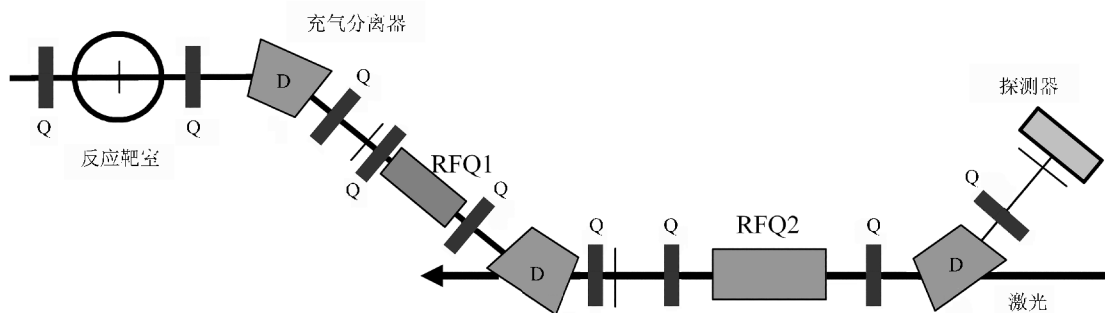


图 2 新型超重元素鉴别装置原理图

## 2 重元素原子谱学研究的难点

对于重元素而言, 特别是原子序数大于 100 的重元素, 其原子谱学的研究难点之一是目标元素的产生。第二个难点是目标元素产生后的分离与传输。这两个问题, 是与核反应密切相关的。如果使用激光电离方法研究原子谱学, 另外的难点问题是激光器的性能: 即要求激光器不单有足够的功率,

而且能量可调, 线宽要小。再者是对目标元素质量(荷质比)的测量。由于荷质比小, 离子数目少, 就要求质谱计的分辨高, 且本底要小。从目前的技术讲, 后两个难点是比较容易解决的, 最难的是前两个问题。

要产生足够的目标元素, 必须选择合适的核反应。就目前所研究过的核反应来看, 利用重离子反

应(这是产生 100 号以上元素的唯一途径)合成目标元素的最大反应截面在  $\mu\text{b}$  量级(见图 3)。例如,利用  $^{12}\text{C}+^{243}\text{Am}\rightarrow^{252}\text{Md}+3\text{n}$  反应,其反应截面可达几个  $\mu\text{b}$ ,这是比较高的,或许利用  $^{11}\text{B}$  轰击  $\text{Cm}$  的某个同位素,会有更高的反应截面,但究竟如何还不得而知。因此,产生截面是制约重元素原子谱学实验研究的一个最关键的问题。但是,由于激光电

离具有很高的灵敏度,或许可能以此进行原子谱学的研究。就  $\text{No}$ (102 元素)而言,通过  $^{12}\text{C}+^{248}\text{Cm}\rightarrow^{256}\text{No}+4\text{n}$  或  $^{255}\text{No}+5\text{n}$  的反应,其截面为约  $1\mu\text{b}$ 。利用合适的束流强度和靶厚可能获得每秒 10 个目标核。下一步的关键就是如何将这些余核有效地收集、传输和分离。

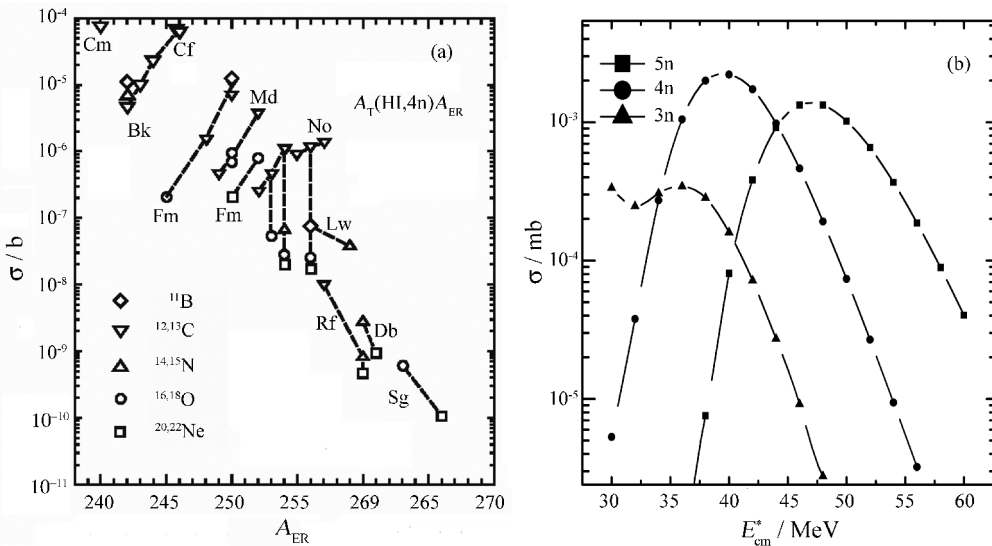


图 3 (a)重离子反应实验截面<sup>[11]</sup>; (b)  $^{12}\text{C}+^{243}\text{Am}\rightarrow^{252}\text{Md}+3\text{n}$  截面计算结果

目前对反冲核的收集分离方法有许多种,一是利用电场和磁场使反冲余核分离以提高收集效率;二是直接将反冲余核通过注入的方法收集在特制的薄膜或磁带上,以备测量;三是通过气体( $\text{He}$  气为多)将反冲余核停阻下来,然后再通过气流载带到被测位置。最近一段时期,在超重核合成和鉴别中利用较多的是速度选择器,即通过正交的电场和磁场选择一定速度的反冲余核,而将速度很快的束流离子极大地压低,以减少探测器的束流本底。另一种在超重核合成和鉴别中常用的设备是充气分离器,即通过在磁谱仪的真空室充以低压  $\text{He}$ (或  $\text{H}$ ) 气,一方面使穿行的反冲余核速度降低,另一方面也使反冲余核的电离态降到  $1^+$  至  $2^+$ , 然后进行测量。以上这些设备的收集效率大都在  $60\%—70\%$ , 有的低一些,有的高一些,例如用收集法,直接收集反冲余核的效率就可高达  $90\%$  左右,而单纯的反冲磁谱仪的传输效率则低于  $50\%$ 。

鉴于重反应余核的寿命比较短,一般不采用收集法直接收集的办法。但如果反应余核的寿命较

长,例如在几十分钟,则不妨利用收集箔直接收集,然后将收集箔传输到设定位置进行挥发和电离。此时,收集效率高,但是会有较多的本底产物,特别是对重余核,其裂变产物的元素分布范围较广,这可能会对下一步的分离带来较大的影响。因此,应该对反应裂变产物的能级进行较为细致的估计。一般来讲,对反应余核应该进行分离收集。但要在线地将所要的目标核分离出来,是极困难的。幸运的是,在重核产生反应中,我们可以仔细地选择入射能量使其主要产物是我们希望的目标核的不同同位素,而其它元素的产物很少(在重核生成反应中,复合核的主要衰变道是裂变,次之是中子蒸发,而  $\text{p}$  和  $\alpha$  的蒸发几率相对于中子蒸发的几率要小很多)。因此,在重核的生成反应中我们可以选择合适的方法,只收集中子蒸发的余核,不收集裂变碎片,即对元素进行粗分离,关键问题是收集和分离的效率,要尽可能的高。如果我们选择  $\text{He}$  喷传输方法,通过调节阻止气体的密度,或者靶室的长度,可将反应产生的裂变碎片去除,只传输蒸发中子的余

核，其传输效率可达 70% 左右。

反冲离子的中性化：He 气载带过程中，为提高传输效率，在 He 气中添加了盐粒，反冲离子都附着在微小盐粒上，而不是自由离子。将附着在盐粒上的重余核收集在高温金属箔上，从而使附着在盐粒上的离子释放出来，并进行中性化。这一过程也需要进一步探讨，以提高传输效率，同时提高电离效率。

将收集到的目标核挥发，并利用合适的激光进行电离，其电离效率将会达到 90% 以上。对激光器而言，要有合适的功率，更重要的是频率可调（即光子能量可变），同时线宽也可调，即为了在实验中较快地找到共振能级，可先用较宽线宽的激光进行电离扫描，找出共振位置，然后对共振态进行精细扫描。例如，利用 24 GHz 线宽的激光（相当于  $1.5 \text{ cm}^{-1}$ ）扫描  $150 \text{ cm}^{-1}$  的波数范围要测量 100 个点。但对只有  $1-2 \text{ cm}^{-1}$  的共振峰又显得太宽。因此，在扫描过程中可调线宽是有意义的。

但是，电离后的测量，即选择荷质比合适的离子进行测量的效率可能较低，需要实验确定。通常在质谱计中所用目标元素的量都是以质量单位（ $\mu\text{g}$  或  $\text{ng}$ ）计算，比我们要研究的目标元素的量要多几个数量级。这时即使其探测效率或探测器灵敏度低一点也无关大局。我们所研究的原子数只有每秒几个，甚至几秒钟才一个，因此探测灵敏度至关重要，这也是开展这项工作的一个难点。

从上述几项关键步骤，我们可知，经过从产生到探测这一整个过程，最后可获得的探测量在每秒 1 个或更少。因此，对所用的质谱计提出了高要求，

一是质量分辨要高，二是本底要低，即探测灵敏度要高。原则上讲，目前的技术是可以达到的。

根据以前的经验和 100 号元素原子谱学的研究实践，我们建议利用如图 4 所示的原理装置图对超铀元素的原子谱学进行逐步研究，以获得有用的可靠信息。

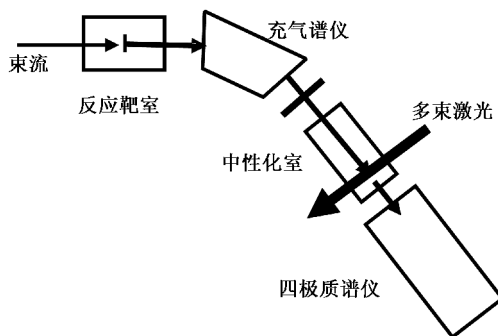


图 4 可能的在线原子谱学研究装置示意图

### 3 结论

重元素谱学的研究是原子物理的一个新领域，对人们了解重元素原子谱及其相对论效应的影响有着重要的意义，同时对超重元素的合成和有效鉴别也是一种关键技术的依据。对超 Fm 元素乃至超重元素原子谱学的研究与核物理有密不可分的关系。根据分析可以看出，在现有的知识和技术的基础上，经过认真的努力，原则上是可以实现的，尽管还存在许多技术上的难点需要进一步深入探讨并加以解决。无论如何我们应该从现在开始着手进行这项工作。

### 参 考 文 献：

- [1] Schidel M (ed). The Chemistry of Superheavy Elements. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2003.
- [2] 徐瑚珊, 周小红, 肖国青等. 原子核物理评论, 2003, **20**(2): 76.
- [3] 靳根明. 原子核物理评论, 2003, **20**(2): 71.
- [4] 陈宝秋, 马中玉, 荣健等. 原子核物理评论, 2003, **20**(2): 102.
- [5] Yuri Oganessian, Utyonkov V K, Lobanov Yu, *et al.* Phys Rev, 2006, **C74**: 044 602.
- [6] Nagame Y, Haba H, Tsukada K, *et al.* Nuclear Physics, 2004, **A734**: 124.
- [7] Fricke B, Jonhson E, Rivera G M. Radiochim Acta, 1993, **62**: 73.
- [8] Sewtz M, Backe H, Dretzke A, *et al.* Phys Rev Lett, 2003, **90**: 163 002.
- [9] 詹文龙. 近代物理研究所科技发展计划. 兰州: 中国科学院近代物理研究所, 2004; 徐瑚珊, 黄天衡, 孙志宇等. 原子核物理评论, 2006, **23**(4): 359.
- [10] 马新文, 詹文龙, 张大成. 原子核物理评论, 2006, **23**(4): 414.
- [11] Yuri Oganessian. Long Way to the Islands of Stability of Superheavy Elements. <http://159.93.28.88/flnr/index.html>.

# Probability for Studying Atomic Spectroscopy of Very Heavy Elements<sup>\*</sup>

JIN Gen-ming, FENG Zhao-qing, FU Fen, ZHAO Xu-lin

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

**Abstract:** The importance of the atomic spectroscopy of heavy elements, especially the superheavy elements has been briefly reviewed. It is pointed that studies of the atomic spectroscopy of very heavy elements is necessary from the atomic physics and the identification of new superheavy elements. The production probability and yields of heavy elements in the heavy ion induced reactions were discussed. And the possible collection methods for heavy residue of reactions were also retrospected. Those techniques which have been used in the heavy ion reactions and superheavy element identifications will provide some possible support to the studies of heavy element spectroscopy.

**Key words:** heavy element; atomic spectroscopy; heavy ion reaction; heavy residue

---

\* **Foundation item:** National Natural Science Foundation of China(10475100); Knowledge Innovation Project of Chinese Academy of Sciences (KJCX2-SW-No7)