

文章编号: 1007-4627(2017)03-0409-05

HIAF 上基于多核子转移反应的综合谱仪的机遇与挑战

黄文学¹, 田玉林^{1,2}, 王永生^{1,2,3}, 王均英¹, 甘再国¹, 刘忠¹, 杨杰¹, 马新文¹, 周小红¹

(1. 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000;
2. 中国科学院大学物理科学学院, 北京 100049;
3. 兰州大学核科学与技术学院, 兰州 730000)

摘要: 丰中子核的结构及奇特衰变性质是核物理基础研究的一个重要课题。在即将开工的大科学工程强流重离子加速器装置(HIAF)上,我们将设计并建造一条专门针对多核子转移反应的综合谱仪。在此谱仪上,研究将主要集中于丰中子新核素的合成、鉴别及其核结构和衰变性质。介绍了此谱仪的动机、概念设计和工作原理,简要讨论了建造此谱仪的机遇和面对的困难。不同于熔合蒸发及弹核碎裂反应,多核子转移反应产物的出射在实验室系并不是 0° 附近的前冲方向,而是覆盖了 $25^\circ\sim 80^\circ$ 宽范围的圆锥角,这给收集和分离感兴趣的多核子转移反应产物带来了很大的困难。气体单元必须满足高束流强度、高传输效率、快传输速度的要求,其设计及建造具有挑战性。气体单元是该谱仪成败的最关键因素。

关键词: 丰中子核; 多核子转移; 放射性束; HIAF

中图分类号: O571.53 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.34.03.409

1 引言

虽然原子核物理理论研究预测的可能存在的核素种类达到7000种,但是自然界中存在的稳定核素和长寿命放射性核素只有280多种,实验物理学家已经人工合成的也只不过3000多种^[1]。由于受弹靶组合的限制,大多数的缺中子核素都已经被人工合成和研究了,还未实验发现的核素主要集中于丰中子一边。合成这些丰中子核素,并研究它们的结构及奇特衰变性质是近年及未来核物理基础研究的一个重要课题。

研究丰中子核素非常困难,主要原因在于:通常情况下,这些核素都很难产生,没有合适的弹靶组合——两个较轻的原子核熔合蒸发后产生的是缺中子核素。目前,丰中子核素主要通过重核炮弹的碎裂、质子/中子引起的 ^{238}U 等重核裂变和 ^{252}Cf 自发裂变等方式产生。现阶段,受束流强度的限制,重核炮弹碎裂反应产生的重丰中子核素离 β 稳定线不会很远,而 ^{238}U 等重核裂变和 ^{252}Cf 自发裂变所产生的丰中子核素也主要集中于 $A=90$ 和 140 两个核区。由于裂变机制的原因, $Z>70$ 的丰中子核素一直都没有合适的产生方法,对于研究核天体物理快中子过程非常重要的 $N=126$ 附近的核素,以及更重的 $N=162$ 子壳的核素还是无

法通过上述方法产生。经过多年研究^[2,3]发现,产生这些丰中子核素的最有效方法只可能是多核子转移反应。最近的实验研究^[4]表明,利用 $7.98\text{ MeV/u }^{136}\text{Xe}$ 轰击 ^{198}Pt 产生 $N=126$ 同中子数($Z=74\sim 78$)的截面要比 $1\text{ GeV/u }^{238}\text{U}$ 的碎裂反应高4个量级以上。

$N=126$ 幻数的存在很可能是太阳系和宇宙中质量丰度分布的“第三峰” $A\sim 195$ 的来源所在。在快中子俘获过程(r 过程)中,中子俘获发生在很短的时间跨度内,大约为 $0.01\sim 10\text{ s}$ 。在 $(n,\gamma)\leftrightarrow(\gamma,n)$ 反应之间达到平衡,即“等待点”近似之后,核合成的速率由 β 衰变速率决定。当中子通量消耗殆尽, r 过程路径中的核素将通过一系列 β 衰变转化为稳定线附近的核素。等待点附近的核素通常具有很长的半衰期,这与中子幻数 $N=50, 82$ 和 126 密切相关。幻数附近核素的中子分离能突然降低,有利于 (γ,n) 反应的进行,而 (n,γ) 反应被禁止,这些核素“等待”衰变,其丰度被累积起来,形成了太阳系和宇宙质量丰度分布中的 $A\sim 80, 130$ 和 195 3个峰。对“第二峰” $A\sim 130(N=82)$ 的研究已经有了很多结果^[5,6],但是对“第三峰” $A\sim 195(N=126)$ 核素的研究还非常少。开展 $N=126$ 丰中子核素的合成及其结构和衰变性质的研究将可以使我们确定核天体物理中 r 过程的具体天体

收稿日期: 2016-11-10; 修改日期: 2016-11-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11675224, 11405243, 11605268); 国家重点基础研究发展计划项目(973计划)(2013CB834400)

作者简介: 黄文学(1969-), 男, 重庆忠县人, 研究员, 博士, 从事粒子物理与原子核物理研究, E-mail: huangwx@impcas.ac.cn。

环境和详细演化路径。 $N = 162$ 位于更重的超重核区，迄今为止更难以通过常规手段合成这些核素。合成这些核素，并研究其结构和衰变性质，将可以大大加深我们对该核区核素性质的认识。

2 多核子转移反应产物的分布特点和两种收集方式的比较

在实验室系下，熔合蒸发反应及弹核碎裂反应的产物都是前冲的，因此可以通过诸如充气反冲核分离器或在线同位素分离器等直接收集和分离。与之不同的是，多核子转移反应产物的出射角并不在 0° 附近，而是分布于 $30^\circ \sim 60^\circ$ 度的圆锥内^[7]，甚至更大，随反应系统和反应产物不同而不同^[8]。这就为收集和分离我们感兴趣的反应产物带来了非常大的困难。

由于多核子转移反应产物的特殊分布，收集这些产物多采取两种方式，分别是利用 Ar 气或 He 气阻滞产物后再重新提取。由于 Ar 气的密度相对较高，原子量大，阻滞本领高，气体单元可以做得比较小；但是，因为 Ar 原子的第一电离能较低 (15.8 eV)，反应产物非常容易中性化，所以不得不使用激光重新电离。而原子电离能的实验数据并不完整，最高的也只到了 $Z = 102$ ^[9]，因此我们无法通过激光选择 $Z > 102$ 的超重核素。对于 He，其第一电离能高达 24.6 eV，很大一部分反应产物将以 $1^+/2^+$ 的离子态保存下来，因此可以被电场引导，实现产物的传输。并且，由于不受感兴趣原子的电离能是否已知的限制，因此可以研究超重核。但缺点是，气体单元不得不做得相对较大。

相对而言，采用 Ar 气作为缓冲气体的方案比较容易实现。在 HELIOS/SPIRAL2^[10]，KISS/RIKEN^[11-13]，GALS/JINR^[14] 和 MARA/JYFL^[15]

等设备中都采用了这套方案，其中日本理化学研究所 RIKEN 正在研制的同位素分离系统 KISS 进展最快。该系统先将所有产物阻滞在 Ar 气中，中性化后的粒子在气流的作用下被引出气体单元，利用激光共振离子源将目标核再次电离后，送入到测量系统中进行特征 X 射线鉴别和 β 衰变测量，气体单元和激光共振离子源是 KISS 的关键组成部分。目前，已经用 ^{56}Fe 完成了离线测试^[12]，并用 ^{198}Pt 实现了在线测试^[13]。该方案仅对 $N \sim 126$ 核区适用，而几乎不可能研究 $N \sim 162$ 核区。采用 He 气作为缓冲气体可以同时研究上述核区的核素，但难度更大。目前世界上还没有该类实验装置。

3 谱仪概念设计及工作原理

强流重离子加速器装置 (High Intensity heavy-ion Accelerator Facility, 简称 HIAF)^[16] 很快将进入工程建设阶段。其目的之一是探索原子核存在极限和奇特结构、宇宙中从铁到铀元素的来源等重大前沿科学问题。为此，在 HIAF 强流超导离子直线加速器 iLinac 的中段将建设低能核结构谱仪。基于多核子转移反应的综合谱仪也将包含其中。考虑到物理目标以及具体的实验技术方案，我们设计了这套综合谱仪。图 1 是该谱仪的初步概念设计。

整个谱仪的工作原理如下：来自加速器的束流轰击靶子，未发生反应的束流及前冲的反应产物将被收集到法拉第筒中，而多核子转移反应产物将经过固体降能片降能后进入充满 He 气的气体单元，阻滞于 He 气中。在直流和射频电场的引导以及气体流动的共同作用下，多核子转移反应产物将集中于气体单元的末端，并被提取出气体单元，通过六极离子导向器及射频四极冷却聚束器的传输和整形，反应产物被送到后端进行分析。通过第一个质量分析器，产物根据质量数 A 分离，初步选择

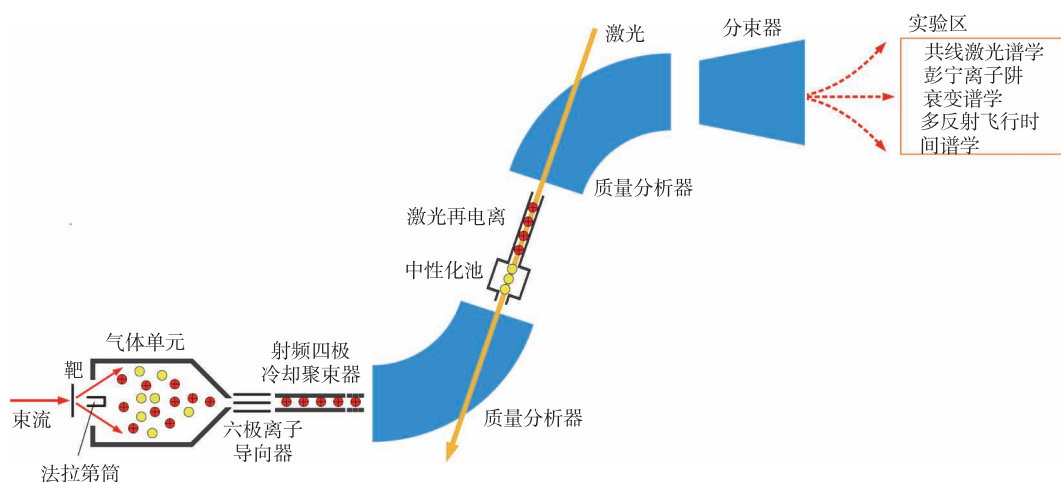


图 1 (在线彩图) 综合谱仪的初步概念设计图

出目标核及其同质异位素。然后,产物被中性化,重新进行激光再电离。由于激光的能量非常精确,我们可以只选择感兴趣元素,得到具有确定电荷数 Z 和质量数 A 的原子核。当然,对于 $Z > 100$ 的重核及超重核,我们可以直接把产物送至后端开展实验研究,而不进行激光选择,电荷数 Z 的确定可以通过感兴趣核素的 α 衰变的级联关系来确定。这些经过鉴别后的反应产物将送至后续的实验设备开展对原子核的结构和衰变性质进行精确的测量。后续的实验设备主要包括共线激光光谱学终端、彭宁离子阱和衰变谱学终端等,其中,共线激光光谱学终端将集中研究核素的同位素位移、原子光谱等,彭宁离子阱^[17]对原子核进行精度高达 10^{-8} 以上的精确的质量测量,而衰变谱学终端将研究这些丰中子核素的衰变半衰期和奇特衰变性质等。当然,最近发展起来的、我们正研制的多反射飞行时间谱仪^[18]也将用于相关的设备中,实现奇异核的质量测量和同位素分离。

4 难点初探

基于多核子转移反应的综合谱仪的困难无疑将很多。整套谱仪的传输速度和效率将是其成功与否的关键。质量分析器的效率可以达到100%,离子的中性化和激光再电离的效率也可以做到50%,六极离子导向器及射频四极冷却聚束器也几乎可以做到90%以上,因此,纵观全局,我们可以发现,整套谱仪的效率将取决于气体单元对产物的收集、传输及提取的效率。事实上,气体单元将必须满足高束流强度、高传输效率、快传输速度的要求。为了使次级束流具有非常高的纯度,气体单元中的He气还必须工作于低温下。

图2显示了7 MeV/u $^{238}\text{U}+^{238}\text{U}$ 产生的 ^{243}U 经过5 μm Havar窗后停阻在He气中的最终的位置分布的初步结果,其中He气密度为 $4.29 \times 10^{-5} \text{ g/cm}^3$,对应的气压和温度分别为 $80 \times 10^2 \text{ Pa}$ 和90 K。由图可见,产

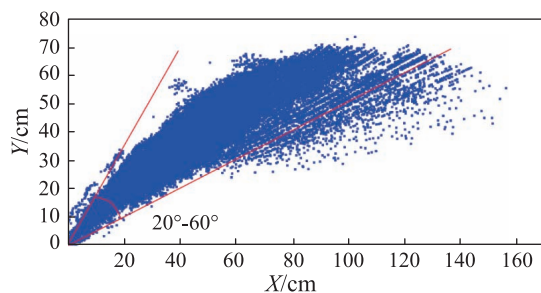


图2 (在线彩图) 7 MeV/u $^{238}\text{U}+^{238}\text{U}$ 产生的 ^{243}U 经过5 μm Havar窗后停阻在He气中的最终的位置分布 He气密度为 $4.29 \times 10^{-5} \text{ g/cm}^3$,对应的气压和温度分别为 $80 \times 10^2 \text{ Pa}$ 和90 K。

物最终分布于 $25^\circ \sim 60^\circ$ 度的圆锥中,最远的位置达到了纵向140 cm,横向70 cm。为了将停阻后的离子引导出气体单元,气体单元中还需要安装直流电场和射频电场等部件,因此初步计算的结果表明,针对这个反应系统,整个气体单元的长度将达到2 m,直径也可能在2 m左右。

对不同的反应系统,结果也相差很大。作为示例,图3显示了7.98 MeV/u $^{136}\text{Xe}+^{198}\text{Pt}$ 产生的 ^{200}Os 经过2 μm Ti窗后停阻在He气中的最终的位置分布的初步结果。He气的工作参数同图2。由图可见,产物最终分布于 $46^\circ \sim 81^\circ$ 的圆锥中,最远的位置只达到纵向30 cm,横向40 cm。如果仅仅针对这个反应系统,整个气体单元的长度只需要0.6 m,直径可能在1 m左右。由于 ^{200}Os 是类靶产物,其动能相对较低,而出射角更大,以至于有些产物不能穿过Ti窗进入气体单元而损失。Havar和Ti窗的目的是密封气体,需要有一定的强度才能承受气体单元内气体的压力,因此必须对窗的厚度进行优化,以兼顾窗的强度和传输效率。出射角的极值超过了 80° ,也给直流电场和射频电场等部件的布置与安装提出了更高的挑战。

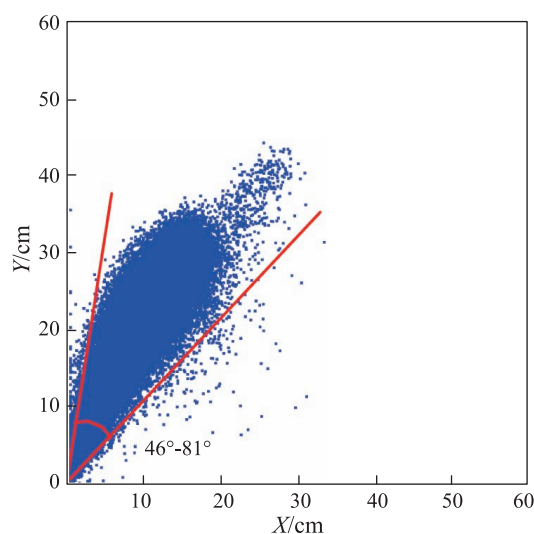


图3 (在线彩图) 7.98 MeV/u $^{136}\text{Xe}+^{198}\text{Pt}$ 产生的 ^{200}Os 经过2 μm Ti窗后停阻在He气中的最终的位置分布 He气密度为 $4.29 \times 10^{-5} \text{ g/cm}^3$,对应的气压和温度分别为 $80 \times 10^2 \text{ Pa}$ 和90 K。

当然,我们可以通过增加气体单元的气压、降低温度来减小整个气体单元的几何尺寸,但这些都受到对离子起引导作用的电场电极的制约。另外,由于离子能量高,流强大,气体单元中将形成很强的等离子体,减小它对电场分布的扭曲和屏蔽也是另一个重要的难点。必须综合考虑各种因素。对多核子转移反应产物在He

气中的分布以及相应气体单元的设计将成为今后一段时间工作的重点。

5 小结

合成丰中子核素，并研究它们的结构及奇特衰变性质是近年及以后很多年核物理基础研究的一个重要课题。目前，丰中子核素主要通过重核炮弹的碎裂、质子/中子引起的 ^{238}U 等重核裂变和 ^{252}Cf 自发裂变等方式产生。但是，对于研究核天体物理快中子过程非常重要的 $N = 126$ 附近的核素，以及更重的 $N = 162$ 子壳的核素最有效方法只可能是多核子转移反应。

不同于熔合蒸发及弹核碎裂反应，多核子转移反应产物的出射在实验室系并不是 0° 附近的前冲方向，而是覆盖了 $25^\circ \sim 80^\circ$ 宽范围的圆锥角，这给收集和分离我们感兴趣的多核子转移反应产物带来了很大的困难。由于多核子转移反应产物分布的特殊性，专用装置的研制进展缓慢。一旦实现了多核子转移反应产物的高效收集和提取，我们将可以进入宽广的丰中子核素的蓝海，极大地推动我国乃至世界的核物理研究。

HIAF 提供了一个非常好的机遇，我们将设计并建造一条专门针对多核子转移反应的综合谱仪。其中气体单元是该谱仪成败的最关键因素，其必须满足高束流强度、高传输效率、快传输速度的要求，具有挑战性。我们不得不使用现今离子操纵领域的最新技术来整合整套谱仪，从而提高谱仪的总效率、传输速度等关键指标。

参考文献：

- [1] <https://people.nsl.mscl.msu.edu/~thoennes/isotopes/>
- [2] DASSO C H, POLLAROLO G, WINTHER A. *Phys Rev Lett*, 1994, **73**: 1907.
- [3] ZAGREBAEV V, GREINER W. *Phys Rev Lett*, 2008, **101**: 122701.
- [4] WATANABE Y X, KIM Y H, JEONG S C, *et al.* *Phys Rev Lett*, 2015, **115**: 172503.
- [5] KRATZ K L. *Rev Mod Astron*, 1988, **1**: 184.
- [6] LORUSSO G, NISHIMURA S, XU Z Y, *et al.* *Phys Rev Lett*, 2015, **114**: 192501.
- [7] ZHAO K, LI Z, ZHANG Y, *et al.* *Phys Rev C*, 2016, **94**: 024601.
- [8] LI C, ZHANG F S, private communication.
- [9] LAATIAOUI M, LAUTH W, BACKE H, *et al.* *Nature*, 2016, **538**: 495.
- [10] KUDRYAVTSEV Y, CREEMERS P, FERRER R, *et al.* *Nucl Instr Meth B*, 2016, **376**: 345.
- [11] JEONG S C, IMAI N, ISHIYAMA H, *et al.* KISS: KEK Isotope Separation System for β -decay Spectroscopy, KEK Report 2010-2 (KEK, 2010).
- [12] HIRAYAMA Y, WATANABE Y, IMAI N, *et al.* *Nucl Instr Meth B*, 2013, **317**(Part B): 480.
- [13] HIRAYAMA Y, WATANABE Y X, IMAI N, *et al.* *Nucl Instr Meth B*, 2016, **376**: 52.
- [14] ZEMLYANOY S, ZAGREBAEV V, KOZULIN E, *et al.* EPJ Web of Conferences, 2015, **86**: 00067.
- [15] PARTANEN J, JOHANSEN U, SAR N J, *et al.* *Nucl Instr Meth B*, 2016, **376**: 353.
- [16] YANG J C, XIA J W, XIAO G Q, *et al.* *Nucl Instr Meth B*, 2013, **317**(Part B): 263.
- [17] HUANG W X, TIAN Y L, WANG J Y, *et al.* *Nucl Instr Meth B*, 2013, **317**(Part B): 528.
- [18] TIAN Y L, WANG Y S, WANG J Y, *et al.* *Int J Mass Spectrom*, 2016, **408**: 28.

Opportunities and Challenges of the General Purpose Spectrometer Specific to Multinucleon Transfer Reactions at HIAF

HUANG Wenxue^{1,1)}, TIAN Yulin^{1,2}, WANG Yongsheng^{1,2,3}, WANG Junying¹, GAN Zaiguo¹,
LIU Zhong¹, YANG Jie¹, MA Xinwen¹, ZHOU Xiaohong¹

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

2. *School of Physical Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*

3. *School of Nuclear Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China*)

Abstract: The study on the nuclear structure and exotic decay property of neutron-rich nuclides is an important subject in nuclear physics research. In the ongoing big project HIAF (High Intensity heavy-ion Accelerator Facility), a general purpose spectrometer specific to the multinucleon transfer reactions is being designed and will be constructed. In this spectrometer, the researches will be concentrated on synthesis and identification of new neutron-rich nuclides, and on the study of their nuclear structure and decay properties. In this paper, the motivation, conceptual design and working principle of this spectrometer have been introduced, and the opportunities and challenges in the construction have been discussed briefly. Unlike the fusion evaporation and projectile fragmentation reaction products which are emitted in forward directions near 0° in laboratory frame, the outgoing angles of the products from multinucleon transfer reactions cover a wide range of $25^\circ \sim 80^\circ$, thus it is very difficult to collect and separate those products of interest. The requirements of high beam rate, high transmission efficiency and high transport speed make the gas cell be very challenging in design and construction. The gas cell is the key component for the success of this spectrometer.

Key words: neutron-rich nuclide; multinucleon transfer reaction; radioactive ion beam; HIAF

Received date: 10 Nov. 2016; **Revised date:** 19 Nov. 2016

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (11675224, 11405243, 11605268); National Basic Research Program of China (973 Program) (2013CB834400)

1) E-mail: huangwx@impcas.ac.cn.