

合成和发现超铀化学元素、探索超重核稳定岛*

周小红[†] 徐珊珊

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

2019-03-28收到

[†] email: zXH@impcas.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20191003

Search for and synthesis of transuranium elements, and exploration of the stability island of superheavy nuclides

ZHOU Xiao-Hong[†] XU Hu-Shan

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

摘要 合成新元素拓展元素周期表、探索原子核存在极限是核物理前沿研究领域。相关研究工作涉及的重大物理问题有：存在多少种化学元素？超重元素具有什么样的化学性质？超重元素化学性质是否符合元素周期律的外推预期？最大的核幻数是什么？是否存在稳定的或长寿命的超重核素？在极强库仑场中原子核具有哪些奇特的结构和性质？等等。经过逾半个世纪的不懈努力，元素合成取得了巨大成就，已将周期表从92号扩展至118号元素，完成了周期表上第七周期元素填充。文章回顾了在自然界寻找超重元素的历程，评述了利用人工核反应合成超铀元素和探索理论预言的超重核稳定岛的进展、成果、现状以及目前面临的困难，展望了未来的研究工作，简介了基于国家重大科技基础设施——强流重离子加速器装置开展超重研究的计划。

关键词 超重元素，超重核稳定岛，重离子物理

Abstract The exploration of the limit to the existence of nuclides in terms of proton and mass numbers, naturally related to the synthesis of new chemical elements, is a foremost subject of nuclear physics. The synthesis of new elements and exploration of the stability island of superheavy nuclides predicted a long time ago have stimulated extensive research both experimentally and theoretically. The overarching important topics include: How many chemical elements can exist? What are the chemical properties of superheavy elements? Up to which element is the ordering scheme of Mendeleev's periodic table still valid? What are the maximum proton and neutron magic numbers? Are there stable or long-lived superheavy nuclides? What exotic structures and properties of superheavy nuclides appear under extremely strong Coulomb fields? And so forth. Over the last half century, momentous achievements in the synthesis of transuranium nuclides and elements have been made. To date, superheavy elements with atomic number up to 118 and hundreds of superheavy nuclides have been discovered in various laboratories, resulting in the completion of the seventh period of the periodic table of elements. This paper reviews the search for superheavy elements in nature and the artificial synthesis of transuranium nuclides and elements using nuclear reactions induced by high neutron flux and energetic heavy ions, and presents a perspective on the field of superheavy nuclide studies, with an emphasis on the High Intensity Heavy-ion Accelerator Facility of the Major National Science and Technology Infrastructure Facilities Program in China.

Keywords superheavy nuclide, new element, heavy-ion physics

* 国家自然科学基金(批准号: 11735017)、中国科学院前沿科学重点研究计划(批准号: QYZDJ-SSW-SLH041)、国家重点基础研究发展计划(批准号: 2018YFA0404402)资助项目

1 研究背景和意义

从古到今,人类一直以极大好奇心探索自然界的奥秘,在微观、宏观、宇观尺度上持续深化对物质世界的认知。在了解色彩斑斓、种类繁多、形态各异、性质迥异的物质世界的过程中,人们建立了化学元素这一科学概念,发现宇宙万物是由几十种元素构成的。1869年,俄国科学家 Dmitri Mendeleev 首创了元素周期表,揭示了化学元素性质周期律。在人类科学史上,创建元素周期表是里程碑事件。在过去的一个半世纪里,发现和合成新元素、拓展元素周期表始终是物质科学的前沿焦点研究领域。

化学元素是具有相同核电荷数的一类原子(同位素)的总称。元素只讲种类,不论个数。原子是原子核束缚若干电子构成的,原子核贡献约99.97%的原子质量。原子核是由质子和中子构成的致密量子多体系统,质量密度为 $1.6 \times 10^{14} \text{ g/cm}^3$ 。质子数决定了原子核的电荷数和相应原子的原子序数。今天,我们知道在地球上天然存在88种元素,其中最轻的是氢,最重的是92号元素铀^[1]。在自然界,镅、钷、碲和钆元素不存在稳定的同位素,它们是利用核衰变发现的^[1]。核反应是产生超铀元素的唯一方法。原子核产生后,必须存活足够长的时间,才能吸收周围环境中的电子,形成稳定的原子结构。表征这个过程的特征时间是 10^{-14} s 。核物理学界在探索原子核存在极限的同时,承担着合成新元素、拓展元素周期表的科学使命。

在原子层次上,最重原子决定元素存在的极限。假设原子核为点电荷,根据量子电动力学^[2-4],原子中最内层轨道电子的运动速度 $v \sim Z\alpha c$ 。其中, Z 为核电荷数, α 为精细结构常数, c 为光速。由于电子的运动速度不能超过光速,因此不存在原子序数大于 $1/\alpha=137$ 的原子。最内层轨道电子的动能为

$$E = m_e c^2 \left[\left(1 - (Z\alpha)^2 \right)^{-\frac{1}{2}} - 1 \right],$$

m_e 是电子质量,电子的动能必须大于零,决定了

原子核电荷数存在极限为 $Z=137$ 。当然,原子核不是点电荷,带正电荷的质子均匀分布在一定的空间里。考虑了原子核非点电荷效应后,量子电动力学理论给出的元素存在极限为 $Z < 173$ ^[2-4]。

在原子核层次上,自发裂变决定原子核电荷数和质量数存在上限^[5]。如果把原子核看成是一个带电液滴,核力与库仑力竞争,形成裂变位垒,阻挡原子核自发裂变。随着核电荷数的增加,库仑能快速增大。当核电荷数在104左右时,裂变位垒趋近零,自发裂变寿命小于 10^{-14} s 。这样,经典液滴模型预言原子核存在的核电荷数上限为104,不存在104号以上的元素^[5]。然而,原子核具有壳层结构^[6],壳结构效应能够显著增加重原子核的裂变位垒,延缓其自发裂变。因此,壳效应、库仑力和核力共同决定裂变位垒,也决定原子核存在的极限。源于此,人们将考虑了壳效应才存在的原子核称为超重核素。锕系元素正好终结于103元素,现在,人们普遍地将超锕系元素(核素)称为超重元素(核素)。超重原子核是一个复杂的量子多体系统,理论上尚不能准确计算裂变位垒,从而也不能预言原子核存在的极限。

超重原子是由原子核和百余个电子构成的量子系统。在超重原子中,原子核对核外电子的电磁作用极强,处于1s轨道的电子感受到的平均电场强度约为 10^{17} V/cm ,比氢原子中原子核对电子的作用强一千万倍,可能存在强场量子电动力学效应。如前所述,超重原子中内层轨道上电子的运动速度接近光速,存在显著的相对论效应。因此,相对论效应、强场量子电动力学效应、电子关联效应可能导致超重原子中电子内层轨道收缩、外层电子轨道膨胀,改变电子的轨道排布,特别是价电子的排布,进而影响超重元素的化学性质^[7-10]。

质子数 $Z=82$ 、中子数 $N=126$ 的 ^{208}Pb 是已知的最重双幻数核。20世纪60年代,一批杰出理论物理学家在探索 ^{208}Pb 之后的下一个双幻数核的过程中,创新了核理论并预言以 $Z=114$ 、 $N=184$ 为中心存在一片寿命较长、相对稳定的原子核,这就是超重核稳定岛^[11-16]。探索超重核稳定岛能够揭

示在极强库仑场下原子核的结构和性质,发现可能存在的最大核幻数。此外,如果能够合成稳定岛上的长寿命核素,有望在原子物理、化学、材料等研究领域开辟新的研究方向,形成新的前沿交叉学科。攀登超重核稳定岛是人类的科学梦想之一。2005年,美国科学杂志发布了125个有待解决的重大科学问题,其中之一是“Are there stable high-atomic-number elements?”^[17]。

现在,人们将超重元素和超重核素研究统称为超重研究。在超重研究领域,合成新元素拓展化学元素周期表和探索超重核稳定岛是两个核心科学目标。超重研究致力于解决和探索以下重大科学问题:存在多少种化学元素?超重元素的化学性质是否符合已知元素周期律的外推?在极强库仑场下原子核的结构和性质?最大的核幻数是什么?是否存在稳定的或极长寿命的超重原子核?超重原子核是否具有奇特的结构和性质?等等^[18-22]。此外,在超重研究的驱动下,发展的强流加速器技术、研发的先进实验技术和方法、建立的核理论能够为未来核能开发、核安全及核技术应用提供理论、方法、技术支撑。

2 在自然界寻找超重元素

在不同温度和密度的天体场所,发生着各种核过程,产生宇宙中的化学元素。天体物理学界普遍认为,快中子俘获过程产生宇宙中约50%的从铁到铋元素,以及原子量大于209(重于²⁰⁹Bi)的全部元素。在极端天体场所,比如并合双中子星和超新星爆发环境,剧烈的快中子俘获过程可能产生极丰中子超重核素^[23]。这些短寿命核素主要通过自发裂变或诱发裂变嬗变,也可能以较小概率级联 β^- 衰变产生长寿命超重元素。如果在爆发性天体场所产生了超重元素,它们与其他核燃烧灰烬一起被抛撒在宇宙空间中,存在于宇宙线、陨石、地壳物质中。自20世纪70年代初期,在美国和俄罗斯科学家的主导下,一直有研究团队试图在自然界中寻找超重元素^[24-29]。

利用气囊、高空气球、卫星和空间站搭载探

测器,开展了在宇宙线中寻找超重元素实验^[24-26]。其中,代表性工作是美国航空航天局的空间站实验。1984年,在LDEF(Long Duration Exposure Facility)空间站,离地高度450 km,搭载固体叠层径迹探测器,进行了为期69个月的UHCRC(The Ultra-heavy Cosmic-ray Experiment)实验,精确测量了宇宙线中重离子分布,观测到35个 $Z>87$ 的重离子径迹,其中包括一个 $Z=96$ 的Cm离子^[24]。空间站实验测量结果表明,在宇宙线中 $Z>87$ 的重离子通量为每平方米每年1—2个,没有发现超重元素。

陨石是天然的径迹探测器。陨石形成后,在数亿年时间里,累积了大量宇宙线中高能重离子与其作用的痕迹,某些性质稳定的微小晶体能够长期留存宇宙线径迹的原始形态。不同核电荷数的离子在材料中电离本领不同,从而形成的径迹大小存在显著差异。这样,提取陨石中特定的晶体,通过蚀刻和径迹分析,就有可能发现宇宙线中的超重元素。俄罗斯科学家从大量铁石陨石中提取了结构非常稳定的橄榄石晶体,从中发现了数千条 $Z>55$ 的重离子径迹。通过细致的径迹比对,指定了大约200个径迹是由 $Z>88$ 的离子产生的,其中包括3个 $105<Z<130$ 的超重核素^[25-27]。这是一个有趣的发现,有待进一步确认。

²³⁸U是天然存在的唯一具有自发裂变的核素,其自发裂变发射两个中子和多个中子的概率分别为90%和10%。理论预言,超重核素自发裂变瞬发多个中子,例如 $Z=108$ 的超重核每次自发裂变平均发射6个中子,这种现象为稀有自发裂变^[28]。因此,寻找稀有自发裂变事件被作为发现超重元素的一个方法。俄罗斯Dubna实验室研制了³He中子计数器阵列,收集了22.5 kg球粒状陨石,在深地实验室完成了为期一年的测量,没有观测到超出自然本底水平的稀有自发裂变事件,指出在样品中超重元素含量小于 $\sim 10^{-15}$ gg^[-125, 26, 28]。

周期表上同族元素具有相似的化学性质。周期律外推预期,108和114号元素分别与同族铍和铅的化学性质相近。因此,富集铍的天然材料中应该富集108号元素,富集铅的材料中富集114

号元素。俄罗斯科学家在里海和贝加尔湖打深井，抽取了数千吨浓盐水，提取了富铅重金属样品，在深地实验室寻找稀有自发裂变事件，发现样品中超重元素含量小于 $\sim 10^{-20} \text{ gg}^{-1[26]}$ 。在法国 Modane 深地实验室，利用 500 g 富集钷样品，完成了寻找 $Z=108$ 的超重核素稀有自发裂变事件实验，结论是样品中超重元素含量小于 $\sim 10^{-14} \text{ gg}^{-1[28]}$ 。

科学家利用质谱术，分析了各种天然材料中元素含量，在富集钷的样品中，声称发现了 $Z=122$ 、 $A=292$ 的超重元素^[29]。然而，利用更高灵敏度的加速器质谱术，未能确认这一发现。以 $Z=114$ 、 $N=184$ 周围的 42 个超重核素(质量数介于 288—310 之间)为目标，采用加速器质谱术，精确测量了天然 Pt、Au、Pb、Bi 材料中的同位素含量，在 10^{-12} — 10^{-16} 原子丰度精度水平上，没有发现超重元素^[29]。

历经半个世纪，经过无数科学家的艰辛探索，迄今尚未在自然界发现超重元素。然而，科学家没有放弃，将研发先进的实验装置，提高测量灵敏度，继续在自然界寻找超重元素。一旦在自然界发现超重元素，将为理解超重核稳定岛、快中子俘获过程发生的天体场所和环境提供极其重要的信息。

3 人工合成超铀元素的历史和现状

3.1 利用中子俘获反应合成超铀元素

超铀元素合成始于中子俘获反应。在 20 世纪 40 和 50 年代，利用反应堆和核爆产生的高通量中子，以 ^{238}U 或 ^{239}Pu 为起始材料，利用中子俘获反应，成功合成了 93—100 号元素和它们的若干同位素^[1]。在反应堆中，中子通量较低，中子俘获路径强烈依赖丰中子核素的寿命和衰变模式，中子俘获与 β^- 衰变交织进行，沿着稳定线产生重核素。在这种模式下， ^{258}Fm 极短的自发裂变寿命终结了中子俘获链，能够合成的最重核素是 ^{258}Fm 。核爆环境中，在大约 $1.0 \mu\text{s}$ 的时间内， ^{238}U 连续俘获中子产生极丰中子的铀同位素。核爆结束后，

丰中子铀同位素级联 β^- 衰变产生超铀元素。1952 年 11 月 1 日，美国“常春藤行动”(Operation Ivy) 在太平洋一个珊瑚岛上试爆了第一颗技术成熟的氢弹，爆炸当量为 1000 万吨 TNT。在这次核爆中，利用 $^{238}\text{U}(17n, 8\beta^-)^{255}\text{Fm}$ 和 $^{238}\text{U}(15n, 7\beta^-)^{253}\text{Es}$ 反应，首次合成了 99 号和 100 号元素^[30]。

3.2 利用重离子熔合反应合成重元素

熔合反应是产生重核素最有效的方法，也是迄今产生超重核素的唯一方法。自 1940 年代以来，世界科技强国的核物理实验室陆续建成了重离子加速器，致力于重元素合成研究工作，在激烈的国际竞争中不断取得重大突破^[1, 20—22]。回顾历史，美国 LBL、德国 GSI、俄罗斯 Dubna 实验室交替引领元素合成研究工作。在元素合成领域，每一次重大突破都是以核反应机制、实验测量技术和方法的突破为先导。

1974 年之前，美国 LBL 和苏联 Dubna 实验室利用熔合反应合成了 93 号、96—98 号、101—106 号元素^[1]。研究工作发现，随着熔合反应产生的复合核电荷数增加，其裂变概率越来越大，通过蒸发中子生成超重核的截面越来越小。为了合成更重的元素，寻求新的反应机制，设计建造高效电磁分离器，研发单原子核灵敏的鉴别技术和方法势在必行。1973 年，Oganessian 教授提出了“冷熔合”反应机制^[31]，建议利用双幻数核 ^{208}Pb 或 ^{209}Bi 为靶产生超重核。在“冷熔合”反应中，靶核结合能很大，形成的复合核激发能较低，能够显著抑制复合核裂变，从而增加超重核的生成截面。受此启发，德国 GSI 建造了强流重离子加速器，研发了先进的电磁速度选择器^[32, 33]，发展了基于超重核级联 α 衰变关联测量的单原子核鉴别技术^[34]，历经 20 余年，利用“冷熔合”反应合成了 107—112 号超重元素^[22]。2004 年，日本 RIKEN 基于“冷熔合”反应结合充气反冲核分离器合成了 113 号元素^[35]。从 1999 年至 2009 年，俄罗斯 Dubna 实验室采用丰中子 ^{48}Ca 束流轰击铀系靶的热熔合(也称温熔合)反应，利用充气反冲核分离

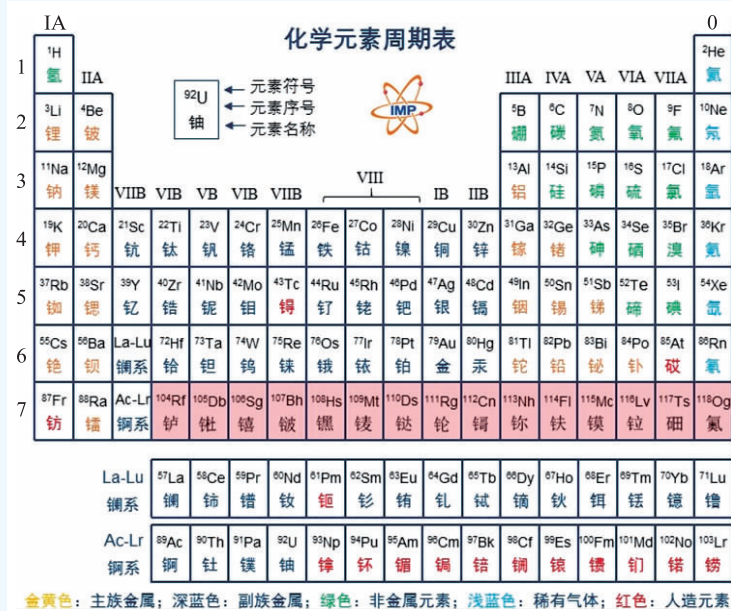


图1 最新中文版元素周期表。图中红色阴影区表示超重元素

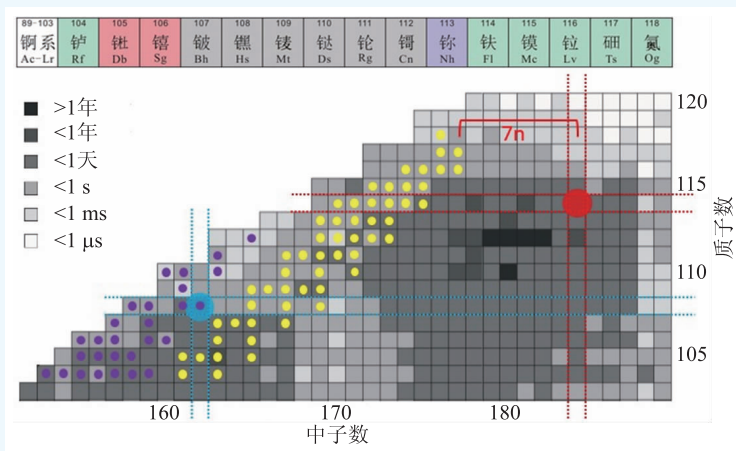


图2 超重核区核素图，渐变灰色表示理论计算的超重核不同寿命，颜色越深表示寿命越长。图中黄色和紫色小圆点分别标记利用⁴⁸Ca束流和“冷融合”合成的超重核素；红色和蓝色虚线标记核幻数；红色圆点是超重核稳定岛中心位置；蓝色圆点是形变双幻数核

器，合成了113—118号元素^[20, 21]。在最近10年，国外实验室持续开展了合成119和120号元素实验^[36-41]。然而，这些实验均未成功。在合成超重元素的过程中，科学家研制了气相热色谱和液相色谱装置，发展了“单原子”化学性质测量技术和方法，确定了108号以下元素在周期表中的位置，发现112号和114号元素可能分别具有类汞和类铅的化学性质^[9, 10]。

至2016年，IUPAC(International Union of

Pure and Applied Chemistry)和IUPAP(International Union of Pure and Applied Physics)联合确认了所有已合成的元素并给予了元素命名^[42-48]。根据IUPAC和IUPAP确定的元素符号和我国科学技术名词审定委员会发布的元素中文名称^[42-48]，我们制作了最新中文版元素周期表(图1)。经过半个多世纪的不懈努力，国际核物理界在元素合成领域取得了巨大成就，将元素周期表从92号扩展至118号元素，发现了周期表上第七周期的所有元素。鉴于此，2017年12月，联合国第72届第74次全体会议宣布，2019年是元素周期表国际年。

4 探索超重核稳定岛的历史和现状

1969年，理论预言以 $Z=114$ 、 $N=184$ 为中心存在超重核稳定岛。迄今，尚未在实验上找到能够产生稳定岛上核素的方法。但是，在理论上深入研究了超重核稳定岛。发展了多种理论模型，研究了可能存在的最大核幻数。采用不同相互作用势的理论模型给出的核子能级相对能量是不同的，甚至能级次序也是不同的。这样，不同理论预言的稳定岛中心位置有差异。综合各种理论模型计算

结果^[43-45, 49]，82之后的质子幻数为114、120、126等；126之后的中子幻数为184、198、228等。因此，可能存在 $Z=114$ 、 $N=184$ ， $Z=120$ 、 $N=184$ ， $Z=126$ 、 $N=184$ ， $Z=114$ 、 $N=198$ 等若干双幻数超重核。在已知的3400余种核素中，鉴别了多个双幻数核，但是，所有稳定的双幻数核均位于 β 稳定线附近。在超重核区，只有 $Z=114$ 、 $N=184$ 靠近 β 稳定线。因此，超重核稳定岛中心可能在 $Z=114$ 、 $N=184$ 。

利用熔合反应合成了逾百个超重核素,如图2所示。已知的最丰中子核素 ^{293}Lv 和 ^{294}Ts 距离稳定岛中心尚差7个中子^[20, 21]。现有实验数据显示,对于 $Z=110\text{—}118$ 同位素链,随着中子数增加,原子核寿命逐渐变长,衰变能逐渐减小,预示着超重核稳定岛是存在的^[20, 21]。研究工作深化了对超重核稳定岛的认知。早期,普遍认为稳定岛周围核素裂变位垒极低,它们的自发裂变寿命小于表征核素存在的特征时间 10^{-14} s 。这样,在核素图上,以 $Z=114$ 、 $N=184$ 为中心的核素构成一个“岛屿”,孤悬于核素版图大陆之外。然而,实验发现 $Z=108$ 、 $N=162$ 是形变亚壳,周围存在一批相对稳定的形变超重核。形变亚壳使其周围核素获得了额外稳定性,这是利用“冷熔合”能够成功合成 $107\text{—}113$ 号超重元素的根本原因。以 ^{270}Hs 为中心,在核素图上形成了一个超重核“浅滩”,连接理论预言的稳定岛与已知核素^[50]。基于此,原先的超重核稳定岛说法已不准确,严格地讲,应该称为“半岛”。

重核间多核子转移反应是介于少数核子转移和深部非弹性散射之间的一种核反应过程,兼有准弹性散射和强阻尼耗散反应特征^[50-56]。在多核子转移反应中,反应 Q 值和壳结构效应决定其产物的分布。以 $^{238}\text{U}+^{248}\text{Cm}$ 反应系统为例,在适当的入射能量下,弹核 ^{238}U 向靶核转移核子,逐步向双幻核 ^{208}Pb 演化,产生的类靶产物为丰中子重核素。理论计算结果表明^[53],利用 $^{238}\text{U}+^{248}\text{Cm}$ 反应能够产生未知的丰中子超重核素,对于 $Z=104\text{—}108$ 的超重核素,产生截面在纳巴—皮巴之间。利用多核子转移反应可以产生靠近稳定岛的核素,有望开辟一条通往稳定岛的途径。目前,实验上极度缺乏铜系核素间多核子转移反应的相关实验数据。为了利用多核子转移反应合成丰中子超重核素,需要先期开展反应机制研究,测量反应产物的元素和同位素分布以及能量、角度和电荷态分布,为设计实验分离装置和制定研究计划提供依据。

如果超重核稳定岛中心位于 $Z=114$ 、 $N=184$,利用稳定核素之间的熔合反应产生的超重核太缺

中子,难以企及稳定岛;利用多核子反应可以产生较轻的丰中子超重核,但难以产生 $Z\sim 114$ 的超重核。因此,攀登超重核稳定岛挑战极大。未来,在技术成熟的前提下设计建造强流丰中子放射性束流装置,利用丰中子束流诱发的熔合反应(如 $^{45-50}\text{Ar}+^{248}\text{Cm}$ 和 ^{251}Cf 等)可能是产生稳定岛上核素的一个有效途径。

5 超重研究面临的挑战

目前,合成 118 号以上新元素极具挑战,最大困难是产生截面太小。利用“冷熔合”反应合成 113 号元素的反应截面仅为 19 飞巴^[41]。随着目标元素电荷数的增加,“冷熔合”反应截面快速减小^[22]。利用 ^{48}Ca 束流合成 $114\text{—}118$ 号元素的反应截面介于 $1\text{—}10$ 皮巴之间^[20, 21]。但是,沿此路线继续合成新元素遇到的困难是没有可用的重铜系元素靶材料。基于高功率反应堆,生产了极少量的 Cm 、 Bk 、 Cf 、 Es 材料^[57],如获得了微克量级的 Es 材料。 Cf 是可用的最重靶材料, 118 号元素就是利用 $^{48}\text{Ca}+\text{Cf}$ 反应合成的。这样,合成 118 号以上元素,必须使用比 ^{48}Ca 更重的束流。然而,利用 ^{50}Ti 、 ^{51}V 、 ^{54}Cr 等束流合成新元素的反应截面可能为几十个飞巴或更小^[36-41]。假如超重元素的产生截面为 10 飞巴,在目前最先进的重离子加速器设施上,数月甚至数年才能产生一个目标核素。现有加速器装置能力已无法继续支持超重新元素合成工作。为了在新元素合成研究领域取得突破,一方面需要设计建造新一代强流重离子加速器,提升束流强度,增加超重核的产额;另一方面需要研究核反应机制,寻求新的能够有效产生超重核素的方法。

人类要登上超重核稳定岛依然任重而道远。为了攀登稳定岛,必须解决以下两个重大问题:(1)发现新的产生丰中子超重核素的反应机制。利用丰中子放射性束流诱发的熔合反应是一个自然的选择。但是,运行中的放射性束流装置无法产生足够强的放射性束流。在可预期的将来,在国际上只能利用丰中子束流开展熔合反应机制研

究。随着强流重离子加速器技术发展,人们认识到利用重锕系核弹靶组合,通过多核子转移反应可能是产生丰中子超重核素的突破口^[50-56]。(2)建立新的鉴别方法。目前,超重核素的鉴别方法是基于单原子核 α 衰变链的时间、空间位置、能量关联测量技术。不稳定超重原子核的主要衰变模式有 β 衰变、 α 衰变或裂变。对于超重核稳定岛上的核素,其寿命可能很长且未必一定具有 α 放射性。因此,迫切需要研发超重核素质量数和电荷数的直接测量技术与方法。

6 超重研究总结与展望

在超重研究领域,合成新元素扩展化学元素周期表和攀登超重核稳定岛是两个核心科学目标。世界科技强国持续投入极大的人力和物力,以巨大的热情合成新元素,探索原子核存在极限,在激烈的国际竞争中不断取得重大突破,合成了 $Z=93-118$ 的25种元素和它们的数百种同位素,极大地拓展了元素周期表和重核素存在版图,研究成果产生了巨大的科学和社会影响^[18-22]。然而,尽管取得了如此重大进展,在超重核研究领域仍然存在以下重大科学问题:化学元素周期表是否存在终结点?超重元素的化学性质是否符合已建立的元素周期律?是否存在稳定或者寿命与宇宙年龄相近的超重原子核?存在一个还是若干个超重核稳定岛?最大的核幻数是什么?超重原子核是否具有奇特的结构和性质?等等。

在重大科学目标的牵引下,科技强国制定了

超重研究规划,正在建造新一代强流加速器装置,研制高效率电磁分离器,研发高效率、高灵敏度、高精度超重核鉴别技术和方法。随着俄罗斯Dubna实验室的SHE Factory(Super Heavy Elements Factory)^[58]、美国MSU国家实验室的FRIB(Facility for Rare-isotope Beams)^[59]、德国GSI的FAIR(Facility for Antiproton and Ion Research)^[60]、法国GANIL的SPIRAL2(Système de Production d'Ions Radioactifs en Ligne-2)^[61]等加速器装置陆续建成并投入运行,将会引发新一轮超重研究的国际竞争,有望在超重新元素和新核素合成、超重核产生机制、超重元素化学性质、超重核结构和性质等研究领域取得重大突破。

在21世纪初期,依托兰州重离子加速器装置,中国科学院近代物理研究所部署了超重实验研究。在国家的支持下,我们研制了充气反冲核分离器和单原子核鉴别测量装置,取得了以合成两种超重新核素以及验证合成110号元素为代表的研究成果^[62-64]。然而,受制于目前加速器装置束流条件限制,我国尚不具备合成超重新元素的实验条件,未能进入超重研究的国际主流竞争行列。我国“十二五”重大科技基础设施——“强流重离子加速器装置(HIAF)”已于2018年12月23日开工建造,计划于2025年建成并投入运行。HIAF的超导直线加速器能够提供极强重离子束流,将是国际上开展超重研究的最佳装置之一。在HIAF低能实验厅,我们计划设计建造先进的充气反冲核谱仪(图3)、丰中子核素分离器以及相关的实验测量装置,从超导直线加速器引出能量精确可调的强流重离子束流,利用熔合反应和多核子转移反应产生超重新元素和丰中子超重新核素。

在超重元素合成领域,我们将依托充气反冲核谱仪和单原子核灵敏测量装置,利用强流低能重离子束流诱发的熔合反应,合成、鉴别119—126号超重新元素。此外,利用强流重离子束流产生 $Z=110-118$ 元素的较长寿命同位素,采用气相和液相色谱方

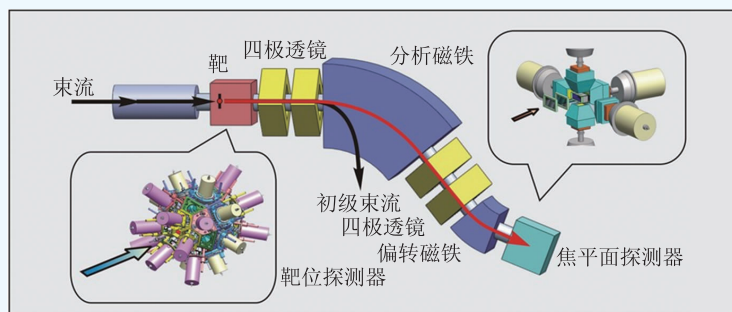


图3 拟建的充气反冲核谱仪,主要用于合成超重新元素

法, 研究超重元素的化学性质, 比较超重元素与相应同族元素化学性质的差别, 确定已知超重元素在周期表中的位置。

在探索超重核稳定岛这一重大科学问题上, 我们将通过多核子转移反应产生丰中子超重核素; 依托丰中子核素分离器, 分离、鉴别丰中子超重核素, 并将其制备成低能、高品质离子束流; 利用多种实验测量装置, 开展丰中子超重新核素合成、超重核衰变性质和结构、超重元素化学性质、超重原子结构研究工作, 力争成为探索超重核稳定岛的先行者。

国家“十二五”重大科技基础设施——“加速器驱动嬗变研究装置(CiADS)”将于2019年开工建设。HIAF和CiADS共享基础设施, 建于同一场址。在设计中, 我们充分考虑了将来HIAF的升级工程。计划以CiADS的高功率超导质子直线加速器为驱动器, 利用高能质子束轰击重锕系靶, 通过靶核散列反应产生丰中子核素, 与HIAF相结合, 建造国际上最先进的在线同位素分离器装置, 产生高流强、高品质丰中子束流, 利用熔合反应合成丰中子超重新核素, 攀登超重核稳定岛。

参考文献

- [1] Thoennessen M. *The Discovery of Isotopes: A Complete Compilation*. Springer, 2016
- [2] Eliav E, Fritzsche S, Kaldor U. *Nucl. Phys. A*, 2015, 944: 518
- [3] Schwerdtfeger P, Lukas F, Pasteka F *et al.* *Nucl. Phys. A*, 2015, 944: 551
- [4] Indelicato P, Karpov A. *Nature*, 2013, 498: 40
- [5] Bohr N, Wheeler J A. *Phys. Rev.*, 1939, 56: 426
- [6] Mayer M G, Jensen J H D. *Elementary Theory of Nuclear Shell Structure*. New York: John Wiley & Sons, 1955
- [7] Backe H, Lauth W, Block M *et al.* *Nucl. Phys. A*, 2015, 944: 492
- [8] Pershina V. *Nucl. Phys. A*, 2015, 944: 578
- [9] Nagame Y, Kratz J V, Schadel M. *Nucl. Phys. A*, 2015, 944: 614
- [10] Turler A, Eichler R, Yakushev A. *Nucl. Phys. A*, 2015, 944: 640
- [11] Myers W D, Swiatecki W J. *Nucl. Phys.*, 1966, 81(2): 1
- [12] Wong C Y. *Phys. Lett.*, 1966, 21(6): 688
- [13] Sobiczewski A, Gareev F A, Kalinkin B N. *Phys. Lett.*, 1966, 22(4): 500
- [14] Meldner H. *Arkiv Fysik*, 1967, 36(2): 593
- [15] Strutinsky V M. *Nucl. Phys. A*, 1967, 95(2): 420
- [16] Nilsson S G, Tsang C F, Sobiczewski A *et al.* *Nucl. Phys. A*, 1969, 131(1): 1
- [17] Seife C A. *Science*, 2005, 309: 78
- [18] NuPECC Long Range Plan 2017: Perspectives for Nuclear Physics. The Nuclear Physics European Collaboration Committee. European Science Foundation (ESF). <http://www.nupecc.org>
- [19] Reaching for the Horizon: The 2015 Long Rang Plan for Nuclear Science. The DOE/NSF Science Advisory Committee. <https://science.energy.gov/np/nsac>
- [20] Oganessian Yu T, Sobiczewski A, Ter-Akopian G M. *Phys. Scr.*, 2017, 92: 023003
- [21] Oganessian Yu T, Utyonkov V K. *Rep. Prog. Phys.*, 2015, 78: 036301
- [22] Hofmann S, Munzenberg G. *Rev. Mod. Phys.*, 2000, 72(3): 733
- [23] Goriely S, Martinez P G. *Nucl. Phys. A*, 2015, 944: 158
- [24] Donnelly J, Thompson A, O' Sullivan D *et al.* *The Astrophysical Journal*, 2012, 747: 40
- [25] Ter-Akopian G M, Dmitriev S N. *Nucl. Phys. A*, 2015, 944: 177
- [26] Flerov G N, Ter-Akopian G M. *Rep. Prog. Phys.*, 1983, 46(7): 817
- [27] Bagulya A V, Kashkarov L L, Kononova N S *et al.* *JETP Letters*, 2013, 97(12): 708
- [28] Testov D A, Briancon C, Dmitriev S N *et al.* *Physics of Atomic Nuclei*, 2009, 72(1): 1
- [29] Korschinek G, Kutschera W. *Nucl. Phys. A*, 2015, 944: 190
- [30] Diamqnd H, Fields P R, Stkvens C S *et al.* *Phys. Rev.*, 1960, 119(6): 2000
- [31] Oganessian Yu T. *Lecture Notes in Physics*, 1975, 33: 221
- [32] Munzenberg G, Faust W, Hofmann S *et al.* *Nucl. Instr. and Meth.*, 1979, 161(1): 65
- [33] Armbruster P, Munzenberg G. *Eur. Phys. J. H*, 2012, 37(2): 237
- [34] Hofmann S, Munzenberg G, Heßberger F *et al.* *Nucl. Instr. and Meth.*, 1984, 223: 312
- [35] Morita K, Morimoto K, Kaji D *et al.* *Journal of the Physical Society of Japan*, 2004, 73(10): 2593
- [36] Hofmann S, Heinz S, Mann R *et al.* *Eur. Phys. J. A*, 2016, 52: 116
- [37] Düllmann C E, Yakushev A, Khuyagbaatar J *et al.* *GSI Scientific Report (2011) PHN-NUSTAR-SHE-02*, 2012
- [38] Hofmann S, Heinz S, Ackermann D *et al.* *GSI Scientific Report (2011) PHN-NUSTAR-SHE-01*, 2012

- [39] Hofmann S, Ackermann D, Antalic S *et al.* GSI Scientific Report (2008) NUSTAR-SHE-01, 2009
- [40] Oganessian Yu T, Utyonkov V K, Lobanov Yu V *et al.* Phys. Rev. C, 2009, 79:024603
- [41] Morita K. Nucl. Phys. A, 2015, 944:30
- [42] 罗亦孝. 科学通报, 2016, 61(21):2326
- [43] 李璐璐, 吕炳楠, 王楠 等. 原子核物理评论, 2014, 31(3):253
- [44] 周善贵. 原子核物理评论, 2017, 34(3):318
- [45] 周善贵. 物理, 2014, 43(12):817
- [46] 全国科学技术名词审定委员会. 中国科技术语, 2017, 19(2):25
- [47] 才磊. 中国科技术语, 2017, 19(2):38
- [48] 周善贵. 中国科技术语, 2017, 19(2):35
- [49] Sobiczewski A, Pomorski K. Prog. Part. Nucl. Phys., 2017, 58: 292
- [50] Patyk Z, Skalski J, Sobiczewski A *et al.* Nucl. Phys. A, 1989, 502:591
- [51] Kratz J V, Loveland W, Moody K J. Nucl. Phys. A, 2105, 944: 117
- [52] Zagrebaev V I, Greiner W. Nucl. Phys. A, 2015, 944:257
- [53] Zagrebaev V I, Greiner W. Phys. Rev. C, 2013, 87:034608
- [54] Li C, Wen P, Zhang G *et al.* Phys. Lett. B, 2018, 776:278
- [55] Zhu L, Su J, Xie W J *et al.* Phys. Rev. C, 2016, 94:054606
- [56] Wang N, Guo L. Phys. Lett. B, 2016, 760:236
- [57] Roberto J B, Alexander C W, Boll R A *et al.* Nucl. Phys. A, 2015, 944:99
- [58] Super Heavy Elements Factory. <http://www.dubna.ru/>
- [59] Facility for Rare Isotope Beams at Michigan State University. <https://frib.msu.edu/>
- [60] Facility for Antiproton and Ion Research. <https://fair-center.eu/>
- [61] Système de Production d'Ions Radioactifs en Ligne-2. <https://www.ganil-spiral2.eu/en/>
- [62] Gan Z G, Qin Z, Fan H M *et al.* Eur. Phys. J. A, 2001, 10(1):21
- [63] Gan Z G, Guo J S, Wu X L *et al.* Eur. Phys. J. A, 2004, 20(3): 385
- [64] Zhang Z Y, Gan Z G, Ma L *et al.* Chin. Phys. Lett., 2012, 29(1): 012502



北京欧普特科技有限公司

Golden WAY SCIENTIFIC 专心/专注/专业

二十年的默默耕耘，风雨兼程，铸就了欧普特人“专心”、“专注”、“专业”的风格和品质，孜孜不倦地对创新和品质的追求，让欧普特具备了全线覆盖低、中、高，超高功率激光光学元件的加工生产和检测能力。伴随中国激光行业的蓬勃发展，欧普特愿与您共同进步，砥砺前行，为中国光电事业的发展 and 进步共同尽一份心力和责任。

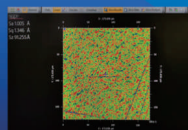
精密光学元件

1. 球面透镜
2. 柱面&非球面透镜
3. 光学棱镜
4. 反射镜(玻璃&金属)
5. 光学窗口
6. 偏振&消偏元件
7. 滤光片
8. 光栅

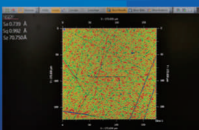


激光器件

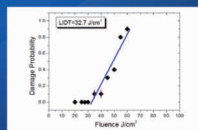
1. 扫描场镜(紫外-红外)
2. 线扫镜头
3. 紫外远心镜头
4. 中继镜
5. 扩束镜



(熔石英基材, 直径50.8mm光学窗口)



(单晶硅基材, 1070nm高反膜)



关注二维码



北京市朝阳区酒仙桥东路
1号M7栋东五层



www.goldway.com.cn
Email: optics@goldway.com.cn

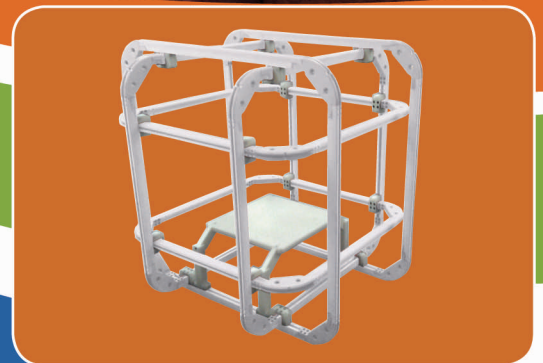


Tel: +86-(0)10-8456 0667
Fax: +86-(0)10-8456 9901

磁场仪器

赫姆霍兹线圈系统

- 500mm和1m直径线圈
- 直流补偿设备
- 500mm线圈直流时产生磁场500 μ T,在5kHz时可达100 μ T
- 可选不同轴数的功率放大器和控制器



Mag-03三轴磁场探头

- 低噪声版： $<6\text{pTrms}/\sqrt{\text{Hz}}$ at 1Hz
- 标准噪声： 6 到 $\leq 10\text{pTrms}/\sqrt{\text{Hz}}$ at 1Hz
- 基础噪声： >10 到 $20\text{pTrms}/\sqrt{\text{Hz}}$ at 1Hz ,
- 带宽典型为3kHz，量程从 $\pm 70\mu\text{T}$ 到 $\pm 1000\mu\text{T}$



Mag628/Mag629和Mag669宇航认证的三轴磁力仪

- 量程： $\pm 75\mu\text{T}$
- 感应轴共点
- 工作电源： 28V (Mag629)
- 连续工作温度范围： -55°C 到 55°C
- 依据MIL-STD-810 (振动和冲击)和MIL-STD-202 (热冲击)设计，适于集成到机载平台
- 低噪声：在1Hz时， $<8\text{pTrms}/\sqrt{\text{Hz}}$ (Mag628/Mag629)或在1Hz时， $<4\text{pTrms}/\sqrt{\text{Hz}}$ (Mag669)



北京优赛科技有限公司
地址：北京市石景山区八角东街65号融科创意中心A座1403室
电话：010-68487691 传真：010-68700626
E-mail:sales@eusci.com 网址：www.eusci.com



www.bartington.com
Bartington[®]
Instruments