113, 115, 117 和 118 号超重元素的推荐命名和超重原子核的研究

罗亦孝^{①②}

① Department of Physics, Vanderbilt University, Nashville, TN 37235, USA;

② Nuclear physics Division, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA 94720, USA

E-mail: yxluo@lbl.gov

超重元素和原子核的理论和实验研究,是数十年来原子核物理和核化学最重要、最引人注目、竞争最为激烈的前沿之一^[1,2]。新超重元素的发现,已将门捷列夫元素周期表第 7 行右端存在的空缺填满,并为 20 世纪 60 年代提出的超重稳定岛的理论预言提供了实验证据。该理论预言,在核素图上跨过不稳定海洋,在中子数 $N=184$ 和质子数 $Z>112$ 的超重核区,存在一个具有反常长寿命和重大理论意义的超重核稳定岛(图 1)。然而,低至微微巴(pb)的生成截面和极低的生成产额,对于极稀少事件的实验探测和鉴别必须的高效率、高分辨、高稳定度、低本底的分离和探测技术,及热熔合核反应所需丰中子铜系靶,和丰中子 ^{48}Ca 束流材料制备中的技术困难和高昂费用,使超重元素的研究极具挑战性和探索性。经过长期艰难的理论和实验探索,人们终于登上了该岛海岸。

国际纯粹和应用化学协会无机化学分会(IUPAC Inorganic Chemistry Division)审阅和推荐了新超重元素发现者有关 113, 115, 117 和 118 号(原子序数)元素命名的建议, IUPAC 于 2016 年 6 月 8 日宣布了对 4 个新元素的推荐命名和元素符号指定(<http://www.iupac.org/recommendations/under-review-by-the-public/>)^[3,4], 并设立了为期 5 个月的公开复审期,复审期之后,将在 IUPAC 刊物《纯粹和应用化学》(IUPAC Journal Pure and Applied Chemistry)上发表推荐意见。最后, IUPAC 理事会(IUPAC Council)将于 2017 年 7 月 6~13 在巴西圣保罗召开的第 48 届全体会议上,审核和最终批准上述新元素命名和符号指定。IUPAC 公布的对四个新元素的推荐命名和元素符号如下:

113 号元素命名为 Nihonium, 元素符号为 Nh; 115 号元素命名为 Moscovium, 元素符号为 Mc; 117 号元素命名为 Tennessine, 元素符号为 Ts; 118 号元素命名为 Oganesson, 元素符号为 Og。

IUPAC 的推荐指出,最近, IUPAC 对元素命名的准则做了修订^[5]。沿袭传统准则,新发现的元素命名可以考虑: (1) 以神的概念或人物(包括天体)命名; (2) 以矿物或相似的物质命名; (3) 以地名或地区名命名; (4) 根据元素

罗亦孝 1967 年毕业于中国科学技术大学近代物理系,中国科学院近代物理研究所研究员,博士生导师,长期致力于远离稳定线原子核和高自旋原子核结构研究。在英国 Daresbury 国家实验室从事原子核超形变核结构研究并获重要进展;“远离稳定线新核素合成和研究”重大科研项目实现突破,在重丰中子区和稀土质子滴线区首次

合成 20 余种新核素。2000 年以来,在美国 Vanderbilt 大学物理系和 LBNL 国家实验室从事丰中子核核结构研究,获得核手征态,核三轴形变和八极形变,三轴摆动和磁转动等核激发模式系统性研究成果。曾任中国科学院近代物理研究所所长,及中国核物理学会理事长。

的性质,或者(5)以科学家的名字命名。所有的新元素的名字的结尾,应该考虑到元素化学性质和周期表上同一列(族)的已有元素的命名两个方面,即与门捷列夫元素周期表上同一列(族)的多数元素一致。也就是说,对于属于第 1~16 列(族)的元素(均指第 7 行),命名以“-ium”结尾;属于第 17 列(族)的元素,命名以“-ine”结尾;属于第 18 列(族)的元素,命名以“-on”结尾(参见元素周期表)。

对于 113 号元素,生成核反应为 $^{70}\text{Zn}+^{209}\text{Bi}\rightarrow^{278}113+1n$, 并也使用热熔合反应。日本理化学研究所仁科加速器研究中心(RIKEN Nishina Center for Accelerator-Based Science, Japan)的发现者提议命名为 Nihonium, 元素符号为 Nh。Nihon 是日本国名 Japan 的两个日语称呼之一,日语字义为“升起太阳的土地”。113 号元素是在亚洲国家发现的第一个元素,在提出这个命名建议的同时,由 Kosuke Morita 教授领导的 113 号元素团队向 Masataka Ogawa 表示敬意,后者在 1908 年围绕发现 43 号元素作了开拓性工作。该团队还希望,科学的自信 and 信念将有助于恢复在 2011 年福岛

图1 核素图(重质量区). 理论预言的质子数 $Z \geq 112$, 中子数 $N=184$ 附近长寿命超重稳定岛, 和117号新超重元素相对于该岛的位置. 117号超重元素由美国-俄罗斯合作团队发现, 拟以美国田纳西州州名命名(Joseph Hamilton/Vanderbilt University)

Figure 1 The Chart of Nuclides, showing the predicted island of stability and the location of the element 117 relative to the island. The element 117 was discovered by the USA and Russian collaboration, and will be named after the Tennessee state of the USA

(Fukushima)核灾难中人们失去的信心和信任.

对于 115 号元素, 生成核反应为 $^{48}\text{Ca} + ^{243}\text{Am} \rightarrow ^{287,288,289}\text{115} + 4n, 3n, 2n$, 发现者建议以莫斯科(Moscow)市的市名命名, 即 Moscovium, 元素符号为 Mc. 发现者所在研究所、大学和实验室包括: 位于莫斯科这片具有悠久历史的土地上的俄罗斯杜布纳联合原子核研究所 JINR(Joint Institute of Nuclear Research, Dubna, Russia)、美国橡树岭国家实验室 ORNL(Oak Ridge National Laboratory, USA)、美国范德比尔特大学(Vanderbilt University, USA)和美国洛伦兹利物摩国家实验室 LLNL(Lawrence Livermore National Laboratory, USA). 发现 115 号及 117 和 118 号元素的实验就是在 JINR 的杜布纳充气反冲分离器(Dubna Gas-Filled Recoil Separator)及著名的伏雷洛夫核反应实验室(Flerov Laboratory of Nuclear Reaction)的重离子回旋加速器 U400 上进行的.

对于 117 号元素, 生成核反应为 $^{48}\text{Ca} + ^{249}\text{Bk} \rightarrow ^{293,294}\text{117} + 4n, 3n$, 发现者美国-俄罗斯 JINR 合作团队建议以美国田纳西州(Tennessee State, USA)的州名命名, 即 Tennesseine, 元素符号为 Ts. 美国田纳西州地区的美国合作团队有: 美国橡树岭国家实验室 ORNL、美国范德比尔特大学和美国田纳西州立大学诺克斯维尔分校(University of Tennessee at Knoxville, USA). 美国加州的 LLNL 国家实验室也是合作者之一. 在 ORNL 的具有世界最高通量的高通量同位素反应堆 HFIR(High Flux Isotope Reactor)和放

射化学工程发展中心 REDC(Radiochemical Engineering Development Center)的联合装置上, 成功地实现了 117 和 115, 118 号超重元素合成所需的独特的丰中子铜系靶材料的生成和化学分离.

生成 118 号元素的核反应为 $^{48}\text{Ca} + ^{249}\text{Cf} \rightarrow ^{294}\text{118} + 3n$, 俄罗斯杜布纳 JINR 和美国洛伦兹利物摩国家实验室 LLNL 的发现者合作团队建议将 118 号元素命名为 Oganesson, 元素符号为 Og. 该命名建议是根据表彰科学家的传统命名方式, 以世界著名核物理学家, 对超重元素研究作出杰出贡献的 Yuri Oganessian 院士的名字命名 118 号元素. Yuri Oganessian 院士的独特贡献包括对于超铀元素研究的开拓性工作, 超重元素的发现, 以及对超重核原子核物理的重要发展. 他组织领导了 115, 117 和 118 号超重元素的国际合作和实验.

讨论新超重元素的命名, 有必要略述新超重元素合成和鉴别实验的突破^[1]. 这些超重元素的合成使用丰中子的强流 ^{48}Ca 束流轰击丰中子铜系靶 Np, Am 或 Bk. 和合成 107~113 号元素使用冷熔合反应不同, 合成 114~118 号元素使用精心设计的热熔合反应, 而核反应生成截面仍低至约 1 微微巴, 对 118 号元素甚至低至约 0.3 微微巴. 10^{19} 个 ^{48}Ca 离子轰击 10^{19} 个 ^{249}Bk 个原子核, 仅获得 6 个 117 号元素的原子核(图 2). 超重原子核的鉴别和指定达到的最佳灵敏度, 是基于对低至数个甚至一个级联衰变事件的探测. 图 2 以 117 号元素为例, 显示生成核反应, 超重原子核

典型的衰变性质, 及基于探测其级联衰变和对最终衰变子核的鉴别, 而作出的对超重原子核的指定。

美国范德比尔特大学网站(<http://news.vanderbilt.edu/2016/06/244616/>)和有关机构, 赞誉和评议 117 号及其他新超重元素的发现和命名. 拟以美国田纳西州州名命名 117 号元素, 使田纳西州即将成为继加利福尼亚州(California State, USA)之后, 在元素周期表上出现的第二个美国的州. 20 世纪 50 年代发现的 98 号元素是以加利福尼亚州立大学(University of California, USA)和加利福尼亚州的名字命名的, 即 Californium, 元素符号 Cf. 30 多年来, ^{252}Cf 自发裂变源和 γ 多探测器阵列结合, 已成为研究丰中子原子核结构硕果累累的“金矿”, 加州的 LBNL 国家实验室发现了 93~106 共 14 种超铀元素, 成果辉煌. 元素周期表上以州名命名的另一个元素, 是 1984 年发现的 108 号元素, 以德国 Hesse 州州名命名, 即 Hassium, 元素符号 Hs.

在 117 号超重元素研究中, 美国和俄罗斯的合作获得重要进展. 世界著名核物理学家, 俄罗斯杜布纳联合原子核研究所 JINR 的 Yuri Oganessian 院士(图 3), 是 115, 117, 118 号超重元素的国际合作领导者. 美国范德比尔特大学物理系著名教授、世界著名核物理学家汉密尔顿(Joseph Hamilton, 曾荣获 2002 年中华人民共和国国际科技合作奖)在 117 号元素的研究中发挥了关键作用, 他并参加了 115 号和 118 号元素的研究工作. 在超重元素研究中作出开创

图 3 美国范德比尔特大学物理系著名教授、世界著名核物理学家汉密尔顿(Joseph Hamilton)(左), 在 117 号元素合成中发挥关键作用; 俄罗斯杜布纳联合原子核研究所 JINR 著名教授、院士, 世界著名核物理学家 Yuri Oganessian(右), 他对新超重元素的发现做出了开拓性贡献(ORNL)

Figure 3 Professor Joseph Hamilton (left), a famous professor of the Vanderbilt University and world-known physicist, who played a key role in the discovery of element 117; Yuri Oganessian (right), a famous Academician of Dubna, Russia, and world-known physicist, who has made pioneering contributions to the discoveries of the new elements

性工作的 Yuri Oganessian 院士高度评价汉密尔顿教授的贡献, 称他为“117 号元素之父”. 将 117 号元素命名为 Tennessine 的建议, 是 Hamilton 教授首先提出的. 范德比尔特大学物理系的若玛亚教授(A.V. Ramayya)参加了 117 号元素的工作. Hamilton 和 Ramayya 教授同 Oganessian 教授在核结构领域的合作始于 1990 年, 已共同发表 250 多篇学术论文. 美国范德比尔特大学, 橡树岭国家实验室 ORNL, 田纳西州立大学诺克斯维尔分校和美国 LLNL 国家实验室同俄罗斯 JINR 合作, 将 117 号元素和田纳西州州名推上了元素周期表.

综上所述, 113, 115, 117 和 118 号新超重元素的命名分别体现了有关的国家、州、城市或科学家的贡献, 完全符合 IUPAC 的命名规则, 是公正、准确、合理的. 新元素的命名和列入门捷列夫元素周期表, 是对这些新元素的重大学术意义和长期艰难的实验探索的回顾和总结. IUPAC 在宣布新元素推荐命名时指出, 容许将新元素英语命名翻译为其他主要语言. 据此, 明年七月新元素命名正式公布后, 我国有关机构应考虑这些元素中文名的确定.

113, 115, 117 和 118 号超重元素的探索和成功, 实现了原子核物理基于理论预言的实验探索最艰难的突破, 提供了存在超重稳定岛的确凿证据. 而发现和研究这些超重元素本身, 代表了在原子核内多质子超大库伦斥力的极端条件下, 对原子核核物质性质研究的最重要进展. 117 和 118 号元素, 是人类迄今发现和列入门捷列夫元素周期表的最重的两个元素. 这是在原子核其他极端条件, 包括远离稳定线奇异同位旋自由度、高激发高核温度自由度、

图 2 117 号新超重元素两个同位素的级联 α 衰变和其后的自发裂变, 描述超重同位素典型的衰变性质. 对超重同位素的指定, 就是根据其极低产额下极稀少级联衰变的探测和认定作出的

Figure 2 The sequential α decays and the following fissions of element 117, the typical decays of the superheavy nuclei. The A, Z assignments of the superheavy nuclei were based on the detections of the sequential decays with very low rates

超形变形状自由度等极端状态下原子核物质性质的研究获得一系列进展之后,在新的超大库伦场极端条件下,原子核物质性质和核内相互作用研究的最重要成果。事实上,

上,登上超重稳定岛海岸的首批实验证据,和这些超重元素的研究本身,被认为是过去 30 年中原子核物理学基础研究前沿最重要的进展。

推荐阅读文献

- 1 Hamilton J H, Hofmann S H, Oganessian Y T. Search for superheavy nuclei. *Ann Rev Nucl Part Sci*, 2013, 63: 383–405
- 2 Oganessian Y T, Abdullin F S, Alexander C, et al. Production and decay of the heaviest nuclei $^{293,294}117$ and $^{294}118$. *Phys Rev Lett*, 2012, 109: 162501
- 3 Karol P J, Barber R C, Sherrill B M, et al. Discovery of the element with atomic number $Z=113$, 115 and 117 (IUPAC Technical Report). *Pure Appl Chem*, 2016, 88: 139–153
- 4 Karol P J, Barber R C, Sherrill B M, et al. Discovery of the element with atomic number $Z=118$ completing the 7th row of the periodic table (IUPAC Technical Report). *Pure Appl Chem*, 2016, 88: 155–160
- 5 Koppenol W H, Corish J, Garcia-Martinez J, et al. How to name new chemical elements (IUPAC recommendations 2016). *Pure Appl Chem*, 2016, 88: 401–405

The recommended naming for the 113, 115, 117 and 118 elements and the studies of superheavy nuclei

LUO YiXiao^{1,2}

¹ Department of Physics, Vanderbilt University, Nashville, TN 37235, USA;

² Nuclear Physics Division, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA 94720, USA

The paper reports the IUPAC recommendation for naming four new superheavy elements, and comments on the progresses and breakthrough in the studies of superheavy nuclei. IUPAC is naming element 113 as Nihonium (Nh), element 115 as Moscovium (Mc), element 117 as Tennessine (Ts), and element 118 as Oganesson (Og). The suggested names of the new elements are completely in accordance with IUPAC rules, having recognized the contributions of the related country, state, city and scientist, respectively. The seventh row of the Periodic Table of the Elements has now been completed, with the element 118 being the heaviest element synthesized, identified and recognized so far. Since the passed sixties theories predicted an island of stability with long half-lives at or near $N=184$ and $Z\geq 112$. The discoveries of the new superheavy elements were achieved based on the breakthrough in experimental efforts. In stead of cold fusion used for elements 107–113, the production cross sections for which were decreasing with increasing atomic number and down by about eight orders of magnitudes for element 113, hot fusion with ^{48}Ca beams bombarding neutron-rich actinides targets was employed to produce elements 114–118. Hot fusion was also used for the production of the element 113. Well designed separations and detections methods and facilities were employed to separate the products with very low production rates and to detect the decay chains. Newly developed detection methods extended the range of measurable half-lives to lower limits of $\sim 1\ \mu\text{s}$. The identifications of the superheavy nuclei were based on the detections of the sequential α decay and the following spontaneous fission of the final nucleus. The first evidences for the long sought island of stability and new superheavy elements have been regarded as the most important discoveries in nuclear physics in the last 30 years, providing understanding of the behavior of nuclear matter under the extreme stress of the ultra-large electrical forces.

naming new elements, superheavy elements 113, 115, 117 and 118, Periodic Table of the Elements, island of stability, nuclear matter under the extreme stress of the ultra-large electrical forces, hot fusion, breakthrough in the synthesis, separation, detection and identification of the superheavy nuclei

doi: 10.1360/N972016-00710