

Are there stable high-atomic-number elements?

是否存在稳定的高原子序数原子核?

梁午阳, 许甫荣*

北京大学物理学院, 北京 100871

* 联系人, E-mail: frxu@pku.edu.cn

2016-06-27 收稿, 2016-07-06 修回, 2016-07-06 接受, 2016-08-01 网络版发表

摘要 自然界中的原子核绝大多数是稳定的, 形成所谓的 β 稳定区域. 原子序数 $Z>83$ 的重核和超重核不稳定, 可以发生裂变或 α , β 衰变, 寿命总体随着原子序数增加而减小. 对于是否存在稳定的高原子序数原子核一直存在争议. 本文主要从历史、当前超重元素实验合成状况和量子力学壳模型等方面, 讨论“是否存在稳定的高原子序数原子核”.

关键词 超重核, 稳定岛, 实验合成, 壳模型

我们知道, 物质是由原子或分子组成, 而原子又由原子核和核外电子构成. 在原子世界, 当原子核外的电子数等于某些特定的数目(2, 10, 18, 36, 54, 86)时, 原子的化学性质特别稳定, 它们很难与别的元素产生反应, 所以叫做惰性气体元素. 在原子核世界, 同样有类似的现象, 质子数 Z 或中子数 $N=2, 8, 20, 28, 50, 82$ 和 $N=126$ 称为幻数, 原子核比较稳定. 当质子数和中子数均为幻数时, 原子核内的核子(质子和中子的统称)结合得最紧密, 原子核特别稳定, 称为双幻核. 在核素图上, 存在一条 β 稳定线, 这条线可以近似用 $Z = \frac{Z+N}{1.98+0.0155(Z+N)^{2/3}}$ 表示^[1], 在这条线两侧的一个狭长区间内的原子核是稳定的, 即这个区域内的原子核不会发生 β 衰变. 稳定原子核总共不到300个, 它们是自然界存在的, 而绝大部分原子核是不稳定的, 它们会发生衰变成为其他原子核. 在 β 稳定线右侧的原子核称为丰中子核, 核内的少数中子会通过 β 衰变(放出负电子)变成质子, 直至到达 β 稳定区域成为稳定核. 在 β 稳定线左侧的原子核称为丰质子核, 核内的质子会通过正 β 衰变(放出正电子)变成中子, 直至 β 稳定区域成为稳定核.

随着质子数的增大, 库仑排斥力越来越强. 根据经典的液滴模型, 在 $Z>104$ 的情况下由于强库伦排斥作用原子核不能存在, 但目前的实验已经合成了原子序数等于118的超重元素. 超重元素的存在是由于核子多体体系的量子壳效应. 原子核内的核子跟核外电子类似具有壳层分布, 量子壳效应会降低原子核的能量(增加结合能), 从而约束更多的核子. 那么, 是否存在稳定的更高原子序数的原子核呢?

早在20世纪60年代, Nilsson等人^[2]就根据壳模型预言了原子核存在超重稳定岛. 岛的中心应该位于下一个质子和中子幻数. 理论预言 $N=126$ 之后的下一个中子幻数是 $N=184$, 而 $Z=82$ 之后的质子幻数预言却是模型相关的, 可能是 $Z=114$ 或 120 或 126 . 二十世纪六七十年代人们曾试图在自然界寻找超重元素, 但一直没有找到. 目前合成的超重元素都是在实验室利用重离子加速器合成的. 被加速的重离子束打到靶核上, 产生融合反应生成复合核, 复合核蒸发少量中子退激生成超重核. 由于融合反应截面非常小, 所以实验合成超重元素极其困难. 目前常用的合成超重元素的实验方法主要有两种: 冷融合和热融合. 冷融合的入射离子能量稍低些, 生成的复合核激发

引用格式: 梁午阳, 许甫荣. 是否存在稳定的高原子序数原子核? 科学通报, 2016, 61: 2869–2871

Liang W Y, Xu F R. Are there stable high-atomic-number elements? (in Chinese). Chin Sci Bull, 2016, 61: 2869–2871, doi: 10.1360/N972016-00737

能大概在10~20 MeV(兆电子伏特), 经过蒸发1~2个中子退激生成超重核. 热融合入射离子能量稍高些, 生成的复合核激发能大概在30~40 MeV, 再蒸发3~4个中子退激生成超重核. 最近又提出了超热融合方法, 入射离子的能量略高于热融合. 实际上, 入射离子的能量不能太低, 也不能太高. 太低的入射能量不能使重离子克服强大的库仑排斥力而形成复合核; 太高的入射能量也不利于复合核的形成或者形成的复合核由于太高的激发能容易发生裂变或蒸发更多的核子而不利产生超重核的产生.

实验合成超重元素从20世纪90年代开始才有突破性进展. 以德国GSI为代表的核物理实验团队主要利用冷融合方法, 使用质子幻数核 ^{64}Ni 为代表的入射离子束轰击双幻核 ^{208}Pb 为代表的靶, 已经合成了包括 $Z=110, 111, 112$ 元素在内的超重元素^[3]. 以俄罗斯联合核子所为代表的实验团队主要利用热融合反应, 使用丰中子双幻核 ^{48}Ca 为入射离子束加速轰击超铀元素合成超重核, 已经合成了包括 $Z=114\sim 118$ 的超重元素^[4,5,6]. 中国科学院近代物理研究所的实验团队及合作者也开展了长期间的超重核合成工作, 取得了很大的成功, 占据世界超重核合成一席之地, 已经合成了 $Z=107$ 和 110 等超重元素^[7,8]. 但目前合成的超重元素还都是缺中子的, 离 $N=184$ 中子幻数还差6个中子左右. 它们是不稳定的, 成活寿命比较短, 主要通过发射 α 粒子衰变成为更轻的原子核. 原理上, 要到达超重稳定岛中心, 还需要增加复合核的中子数, 这需要更丰中子束流去轰击丰中子靶核, 或者用更重的离子束通过大质量转移合成超重元素(比如: 铀轰击铀), 但这些目前还没有成功, 还需要艰难的实验探索.

2016年6月国际纯粹与应用化学联合会International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) 经过推荐公示了 $Z=113, 115, 117$ 和 118 新合成的超重元素命名建议. 113 号元素最先由日本科学家合成,

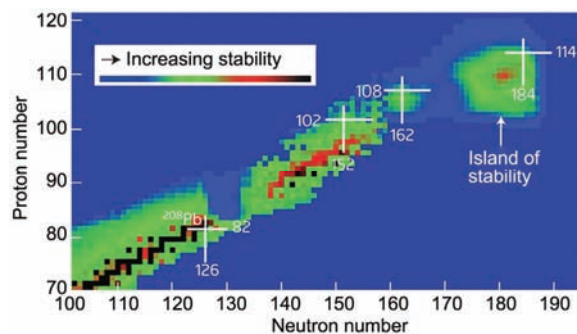


图1 (网络版彩色) 预言的质子数 $Z=114\sim 126$ 、中子数 $N=184$ 附近的长寿命超重稳定岛

Figure 1 (Color online) Predicted island of stability around proton number $Z=114\sim 126$ and neutron number $N=184$

建议命名为Nihonium, 元素符号为Nh. 115 号元素由俄罗斯和美国科学家合作合成, 建议命名为Moscovium, 元素符号为Mc. 117 号元素由俄罗斯杜布纳联合核子所和美国田纳西等科学家合作合成, 建议命名为Tennesine, 元素符号为Ts. 118 号元素由俄罗斯杜布纳联合核子所科学家Oganessian领导的实验团队和美国科学家合作合成. Oganessian在超重核合成方面做出了巨大的开拓性贡献, 领导合成了多个到目前为止最重的超重核. 为表彰他在超重核合成方面所做出的贡献, 118 号元素被建议以他的名字命名, 称为Oganesson, 元素符号为Og.

在2008年的美国化学学会第235届国际会议上, Oganessian提出了第二个具有更高原子序数 $Z=164$ 附近的可能稳定岛. 但如果要合成这样的超重原子核, 需要新的更强的重离子加速器. 目前这只是一种预言, 还需要长期艰苦的实验努力来证实. 超重元素的合成增加了元素周期表中的新成员, 它们很有可能具有不同寻常的物理和化学性质, 需要我们去研究. 稳定(或长寿命)超重元素还可能具有非凡的应用价值, 比如裂变强中子源, 将影响科学与技术发展.

参考文献

- Lu X T, Jiang D X, Ye Y L. Nuclear Physics (in Chinese). Beijing: Atomic Energy Press, 2000 [卢希庭, 江栋兴, 叶沿林. 原子核物理. 北京: 原子能出版社, 2000]
- Nilsson S G, Nix J R, Sobiczewski A, et al. On the spontaneous fission of nuclei with Z near 114 and N near 184. Nucl Phys A, 1968, 115: 545-562
- Hofmann S, Munzenberg G. The discovery of the heaviest elements. Rev Mod Phys, 2000, 72: 733
- Oganessian Y T, Yeremin A V, Popeko A G, et al. Synthesis of nuclei of the superheavy element 114 in reactions induced by ^{48}Ca . Nature, 1999, 400: 242-245

-
- 5 Oganessian Y T, Utyonkov V K, Lobanov Y V, et al. Experiments on the synthesis of element 115 in the reaction $^{243}\text{Am} (^{48}\text{Ca}, \text{xn}) ^{291-x}\text{115}$. Phys Rev C, 2004, 69: 021601(R)
 - 6 Oganessian Y T, Utyonkov V K, Lobanov Y V, et al. Observation of the decay of $^{292}\text{116}$. Phys Rev C, 2004, 63, 011301(R)
 - 7 Gan Z G, Guo J S, Wu X L, et al. New isotope ^{265}Bh . Euro Phys J A, 2004, 20: 385–387
 - 8 Zhang Z Y, Gan Z G, Ma L, et al. Observation of the superheavy nuclide ^{271}Ds . Chin Phys Lett, 2012, 29: 012502
-

Are there stable high-atomic-number elements?

LIANG WuYang & XU FuRong

School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China

Most of nuclei existing in the nature are stable. For nuclei with proton number Z larger than 83, nuclei become unstable, and decay by fission or emitting α and β particles. Their lifetimes normally decrease with increasing proton number. It is still a debate whether there exist stable nuclei with high proton numbers. In this article, we discuss whether there exist stable nuclei with high proton numbers, and briefly review the history and current status related to syntheses of superheavy elements.

superheavy elements, island of stability, experimental syntheses, quantum shell model

doi: 10.1360/N972016-00737



许甫荣

北京大学物理学院教授，博士生导师。分别于1984年、1987年、1993年获北京大学学士、硕士、博士学位。1995~2000年分别在瑞典和英国从事博士后研究工作。2005年获国家杰出青年科学基金。2001~2015年担任北京大学物理学院技术物理系主任。现任中国-美国“奇特核”理论物理研究所(CUSTIPEN)执行主任，北京大学-中国科学院兰州重离子国家实验室联合核物理中心主任，教育部高等学校核工程与核技术教指委副主任委员，核物理与核技术国家重点实验室副主任，英国萨瑞大学客座教授。