

超重原子核与超重元素*

周善贵^{1,2,3,†}

(1 中国科学院理论物理研究所 理论物理国家重点实验室 北京 100190)

(2 兰州重离子加速器国家实验室原子核理论中心 兰州 730000)

(3 华中师范大学 核物质科学协同创新中心 武汉 430079)

2014-08-10收到

† email:sgzhou@itp.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20141206

Superheavy nuclei and superheavy elements

ZHOU Shan-Gui^{1,2,3,†}

(1 State Key Laboratory of Theoretical Physics, Institute of Theoretical Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

(2 Center of Theoretical Nuclear Physics, National Laboratory of Heavy Ion Accelerator, Lanzhou 730000, China)

(3 Center for Nuclear Matter Science, Central China Normal University, Wuhan 430079, China)

摘要 研究超重原子核和超重元素,探索原子核的电荷和质量极限,是重要的科学前沿领域。超重原子核的存在源于量子效应。上个世纪60年代,理论预言存在一个以质子数114和中子数184为中心的超重稳定岛,这极大地促进了重离子加速器及相关探测设备的建造和重离子物理的发展。到目前为止,实验室合成了118号及之前的超重元素。其中116号、114号和113号以下的新元素已被命名。利用重离子熔合反应合成更重的超重元素还面临着很多挑战,需要理论与实验密切结合,探索超重原子核性质与合成机制,以登上超重稳定岛。文章概要介绍了超重原子核和超重元素的研究背景、实验进展以及面临的挑战,并展望了未来的发展。

关键词 超重原子核, 超重元素, 量子壳效应, 重离子熔合

Abstract The study of superheavy nuclei and superheavy elements and the exploration of the existence limits of the charge and mass of atomic nuclei is at the forefront of modern science. The existence of superheavy nuclei is mainly due to quantum shell effects. In the 1960s, based on the stability originating from shell effects, it was predicted that an island of stability centered at $Z=114$ and $N=184$ should exist. This prediction advanced the construction of heavy ion accelerators and related detectors and the development of heavy ion physics. So far, new elements with a charge number up to 118 have been synthesized in laboratories. The elements with $Z=116$ and 114 and $Z<113$ have already been named. There are many challenges to synthesize even heavier elements by using heavy ion fusion reactions. More efforts should be made to study the properties of superheavy nuclei both experimentally and theoretically. In this article, the background, experimental progress, and challenges concerning the study of superheavy nuclei will be presented, and future prospects discussed.

Keywords superheavy nuclei, superheavy elements, quantum shell effects, heavy ion fusion

* 国家重点基础研究发展计划(批准号:2013CB834400)、国家自然科学基金(批准号:11121403,11120101005,11211120152,11275248)资助项目;中国科学院知识创新工程重要方向项目(批准号:KJCX2-EW-N01);本文部分计算工作得到中国科学院理论物理研究所及理论物理国家实验室高性能计算平台和中国科学院计算机网络信息中心超级计算中心的支持

1 引言

一般把 104 号(钔, Rf)及其之后的元素称为超重元素。原子核中的量子壳效应是这些超重元素存在的根本原因。超重原子核与超重元素研究涉及到原子核的电荷和质量极限的探索, 是一个重要的科学前沿领域。由于超重原子核的核电荷数非常大, 核外电子运动速度很快, 相对论效应变得非常重要, 有可能导致核外电子排布不再遵循已知的规律, 进而影响到这些元素在周期表上的位置。因此, 超重元素的研究不仅涉及到原子核物理, 也涉及到原子物理; 不仅是物理学家关心的问题, 也是化学家关心的问题。2005 年, 美国的 *Science* 杂志发布了 125 个有待解决的科学问题, 其中之一就是, 是否存在稳定的超重元素^[1]。

2 超重稳定岛的理论预言

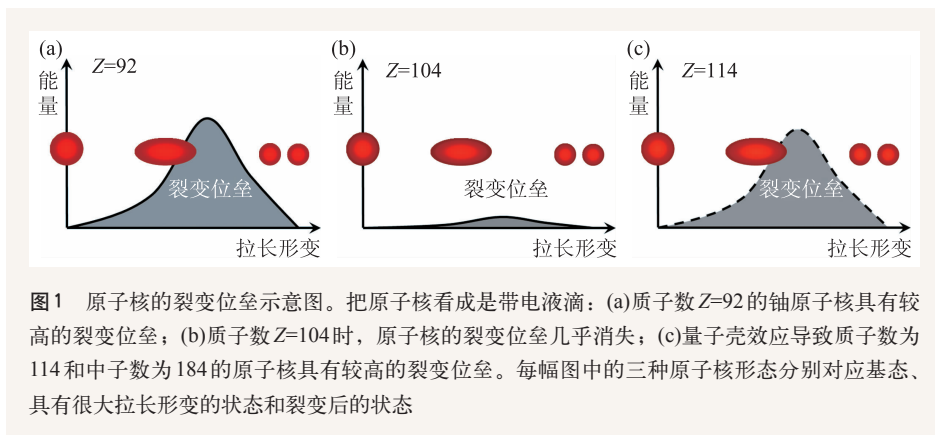
1911 年, 卢瑟福提出原子的核式结构模型: 原子的正电荷集中在中心一个极小的区域内, 电子围绕这个核心运动。1932 年, 查德威克发现了中子后, 海森伯即提出, 原子核是由质子和中子组成的。然而, 原子核内能容纳多少个质子和中子, 是否存在原子核的电荷和质量极限等, 仍然是悬而未决的问题。

从原子层次看, 核电荷数存在一个上限。若把原子核看成是一个点电荷, 由玻尔的量子论可知, 原子内层电子的运动速度 $v \sim Zac$, 其中 Z 为质

子数, 即核电荷数, a 为精细结构常数, c 为光速。电子的运动速度不能超过光速, 因此核电荷数 Z 不能大于 $1/a=137$ 。因此, 不存在 137 号以上的元素。当然, 原子核不是点电荷, 而是有一定的大小, 其电荷具有一定的空间分布。考虑到这一因素, 利用量子电动力学给出的元素存在的限制可以放宽到 $Z < 173$ ^[2]。

从原子核的层次看, 原子核的电荷和质量极限主要取决于核子之间的短程核力和质子之间的长程库仑力之间的竞争。库仑力倾向于原子核处于具有较大拉长形变的状态, 而核力则使得原子核尽量保持球形。这个竞争导致在原子核中可能出现一个位垒, 阻挡原子核发生裂变(见图 1)。图 1(a)和图 1(b)给出了把原子核看成经典带电液滴时的基态、具有很大拉长形变的状态和裂变后的状态以及裂变位垒的情况。其中图 1(a)显示了铀元素(质子数 $Z=92$)原子核对应的裂变位垒。由于这个裂变位垒较高, 可以在很大程度上阻挡裂变的发生, 所以某些铀同位素的寿命很长。由于核力的饱和性, 核力的效应近似与核子数成正比, 而库仑力的效应大致与质子数的平方成正比。因此, 质子数越大, 库仑斥力效应越显著, 阻挡原子核裂变的位垒就越低^[3]。如果把原子核看成是经典的带电液滴, 当质子数达到 104 左右时, 原子核的裂变位垒就几乎消失, 无法阻挡原子核发生裂变, 见图 1(b); 换言之, 原子核质子数即核电荷数的上限为 104, 不存在 104 号以上的元素。

然而, 在原子核这个有限量子多体系统中,



量子效应起着非常重要的作用。由于量子效应, 在原子核中存在显著的壳层结构(见图 2)。这种壳层结构有很多表现。例如, 与相邻的原子核相比, 质子数或中子数等于某些特定数目的原子核更稳定, 在自然界中存在的更多。因此, 人们把这些数称为

幻数。例如， ^{208}Pb (铅-208) 由 82 个质子及 126 个中子组成。82 和 126 分别是目前已知最大的质子和中子幻数。因此， ^{208}Pb 是双幻核，非常稳定。对质子来说，目前已知的幻数为 2, 8, 20, 28, 50 和 82；对中子来说，除了与质子相同的以外，还有 126 这个幻数。

1949 年，Mayer 和 Jensen 等人通过引入很强的自旋轨道耦合效应，提出了原子核的壳层结构模型，成功地解释了原子核的幻数^[4](见图 2)。图 2 左侧为未考虑自旋自由度时的单粒子能级，用径向量子数 (1, 2, 3 等数字) 和轨道量子数 (s, p, d, f, g, h 和 i 分别表示轨道角动量为 0, 1, 2, 3, 4, 5 和 6) 来标记。右侧为考虑自旋轨道耦合效应后的单粒子能级分布。这时，轨道角动量非零的能级劈裂为两条，分别为自旋向上和自旋向下。从图 2 可见，只有引入较大的自旋轨道劈裂，才能解释 20 以上的幻数。由于这个贡献，Mayer 和 Jensen 于 1963 年获得诺贝尔物理学奖。之后，很快就有人想到，量子壳效应可能会导致质子数大于 104 的超重原子核相对稳定地存在。若忽略中子和质子之间的差别，自然地，82 之后的质子幻数也应该为 126，因此可能存在质子数为 126 的超重原子核^[5]；在这些原子核中，质子数远大于当时已知最重元素的核电荷数。当然，针对量子壳效应是否足以使得高电荷数原子核稳定或相对稳定地存在，也有很多争论^[6]；这类定性的或半定量的讨论一直持续到上个世纪 60 年代中期。

1966 年，Strutinsky 提出了一个定量描述壳效应的方法^[7]。这个方法很快被用来研究超重原子核。基于不同形式的唯象平均势场给出的核子单粒子能级，定量计算量子壳效应，并在恰当考虑质子之间的库仑相互作用后，Sobiczewski 等人以及 Meldner 分别从理论上预言 ^{208}Pb 之后的质子幻数为 114，中子幻数为 184^[8]。而且，这两个幻数附近的壳效应足够强，使得质子数为 114、中子数为 184 的原子核及其附近的原子核存在足够高的裂变位垒，阻挡这些原子核发生裂变，见图 1(c)。因此，这些原子核比较稳定，形成所谓

的“超重稳定岛”，岛上的原子核可能具有较长的寿命。

3 超重原子核与超重元素实验研究进展

基于上述理论预言，在元素核合成过程中可能会产生超重核，进而在自然界中留下痕迹。如果这些超重核的寿命很长，在自然界中甚至还可能存在的迹象。因此，自上个世纪 70 年代起，很多科学家开始在自然界寻找超重元素^[9]。但是，一直没有取得令人信服的结果。一直到近些年，这类探索仍在继续^[10]。

虽然在自然界中寻找超重元素的努力没有取

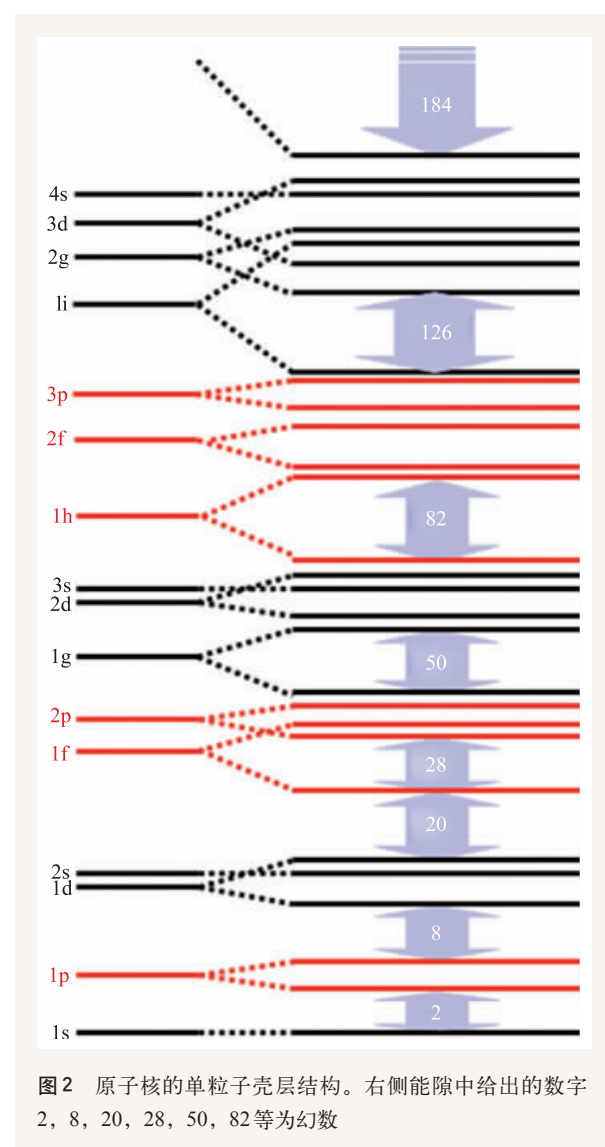
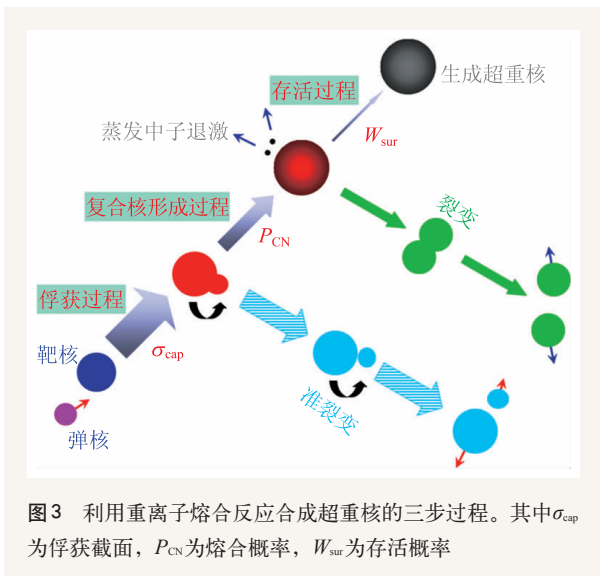


图 2 原子核的单粒子壳层结构。右侧能隙中给出的数字 2, 8, 20, 28, 50, 82 等为幻数



得进展，但科学家在人工合成超重元素的工作中却取得了很大的成功。事实上，从上个世纪40年代起，科学家就开始探索利用人工方法合成比铀重的新元素^[11]。对于超铀元素，可以利用中子俘获的方法来合成。原子核俘获中子后，发生 β 衰变，质子增加1个；94号至100号元素就是利用这个方法在反应堆中合成的。在实验室里，利用轻离子（质子、氘核、氚核、 α 粒子等）轰击靶核，最重可以合成到101号元素。对于更重的元素，由于靶材料的限制，需要用比 α 粒子重的重离子作炮弹（弹核），轰击合适的靶（靶核），使弹核与靶核熔合来合成。

前面提到的关于超重稳定岛的理论预言，极大地促进了国际上重离子加速器和相关探测设备的建造以及重离子物理的发展。很多著名的实验室，包括德国重离子物理研究所(GSI)，俄罗斯Dubna联合核子研究所，美国Livermore国家实验室和Berkeley国家实验室，法国国家重离子加速器实验室(GANIL)，日本理化学研究所(RIKEN)，我国的兰州重离子加速器国家实验室(HIRFL)等，都投入了大量的人力和物力，建造或改进了重离子加速器和相关探测设备，探索超重稳定岛。

利用重离子熔合蒸发反应合成超重核可看成是一个三步过程^[12](见图3)。(1)俘获过程：弹核与靶核克服它们之间的库仑位垒，形成一个双核体

系。(2)复合核形成过程(熔合过程)：虽然这个双核体系有很大的概率分裂为类弹和类靶碎片(准裂变)，但仍有很小的概率形成超重复合核。(3)存活过程：超重复合核激发能较高，发生裂变的概率极大；但超重复合核也有一定的概率通过发射一个或多个中子退激发，保持电荷数不变，从这个意义上说，超重核可以存活下来。发射中子后，超重核或处于基态，或处于能量较低的激发态，再通过发射一系列 α 粒子而产生进一步的衰变。实验上可以测量这一系列特征 α 射线谱，并结合 α 衰变链上最终子核的鉴别来确定所合成的超重核。

一般说来，利用重离子熔合蒸发反应合成超重核的反应截面非常小。实验需要持续很长的时间，有时几个星期甚至几个月才能合成一个超重原子核。因此，科学家要想方设法寻找合适的弹靶组合(即合适的弹核和靶核)，并把弹核加速到合适的能量，尽可能地使超重核的合成截面最大化。上个世纪70年代，Oganessian提出^[13]，利用双幻核 ^{208}Pb 或相邻的 ^{209}Bi 做靶，针对待合成的目标超重核，选择合适的弹核和入射能量，可以得到较大的超重核合成截面。在这类方法中，弹核与靶核熔合而成的超重复合核的激发能通常较低(冷)，有较大的存活概率，发射一个中子后，就可以生成超重核，所以称为冷熔合反应。利用冷熔合反应合成的超重原子核，非常缺中子，经过一系列 α 衰变，最后衰变至已知原子核。如果利用双幻核 ^{48}Ca 作为弹核，针对目标超重核，选择合适的靶核和入射能量，能得到较大的熔合截面，进而给出较大的超重核合成截面。在这种方法中， ^{48}Ca 与相应的靶核熔合而成的超重复合核，其激发能一般较高(热)，存活概率相对较小，通常需要发射3到4个中子，才能退激到超重核的基态或能量较低的激发态，所以称为热熔合反应。利用热熔合反应合成的超重原子核，尽管也是在 β 稳定线的缺中子一侧，但比起冷熔合反应合成的超重核来，中子数稍多一些；这些超重原子核，经过一系列 α 衰变，最终子核一般仍会发生裂变，这给实验鉴别最终子核和确认所合

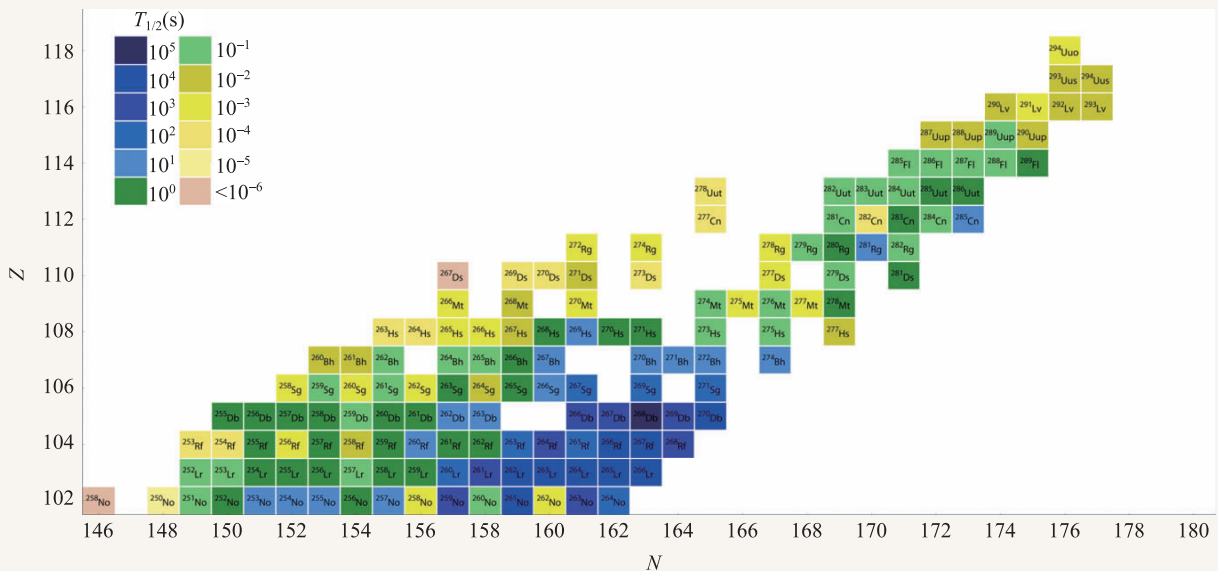


图4 实验室合成的超重原子核及寿命(横轴 N 表示中子数,纵轴 Z 表示质子数。图例给出原子核的半衰期 $T_{1/2}$,以秒为单位)

成的超重核带来了一定的困难。

上个世纪80年代以来,科学家在实验室合成了 $Z \leq 118$ 号元素的很多超重原子核(见图4)。一个由国际纯粹与应用物理联合会与国际纯粹与应用化学联合会所任命的联合工作组负责考察新元素的实验发现工作。一旦这个工作组最终认可了一个新元素的实验发现,即邀请发现者建议该新元素的名称。

德国GSI利用冷熔合反应合成了107至112号超重元素^[14]。这些新元素都已被命名。2009年,GSI的科学家Hofmann领导的团队建议112号元素名为Copernicium,元素符号为Cn,以纪念天文学家哥白尼(Copernicus),这个建议于2010年得到采纳^[15]。我国科学技术名词审定委员会于2011年公布了该元素的中文名称“镅”^[16]。在Dubna联合核子研究所,科学家利用热熔合反应合成了113至118号元素^[17]。经过前述联合工作组的考察,114号元素与116号元素的发现于2011年得到最终确认。这两个新元素的发现者对它们的名称提出了建议:为纪念联合核子研究所弗廖罗夫(Flerov)核反应实验室,114号元素被命名为flerovium,元素符号为Fl;为纪念美国利弗莫尔(Livermore)国家实验室,116号元素被命名为livermorium,元素符号为Lv。2012年5月,该建

议得到了采纳^[18](见图5)。我国科学技术名词审定委员会于2013年公布了这两个元素的中文名称“铁”和“钷”^[19]。值得指出的是,最近,115号和117号元素的合成在德国GSI也得到了验证^[20, 21]。

在经过长期探索和积累,验证了德国GSI利用冷熔合反应合成的110至112号元素之后,科学家利用冷熔合反应,在日本RIKEN成功合成了113号元素^[22]。在我国,兰州重离子加速器国家实验室(HIRFL)在超重核合成方面也取得了进展,先后合成了超重新核素²⁵⁹Db^[23]和²⁶⁵Bh^[24],并于2011年成功进行了110号元素的一个核素²⁷¹Ds的合成实验^[25]。

从图4可见,实验室合成的超重新核素可以大致分为两个区域。利用冷熔合方法合成的原子核集中于该核素图的左上部分,核电荷数最大为113。其中中子数最多的核素为²⁷⁷Cn(镅-277)和²⁷⁸Uut(113号元素尚未命名,根据惯例,暂用Uut表示),有165个中子。利用热熔合反应合成的原子核集中于该核素图的右上部分,核电荷数最大为118。其中中子数最多的核素为²⁹³Lv(钷-293)和²⁹⁴Uus(117号元素尚未命名,根据惯例,暂用Uus表示),有177个中子。由此可见,实验室合成的超重原子核,其中子数与理论预言的下一个中子幻数184还相差很多。正因为如此,这些超重核

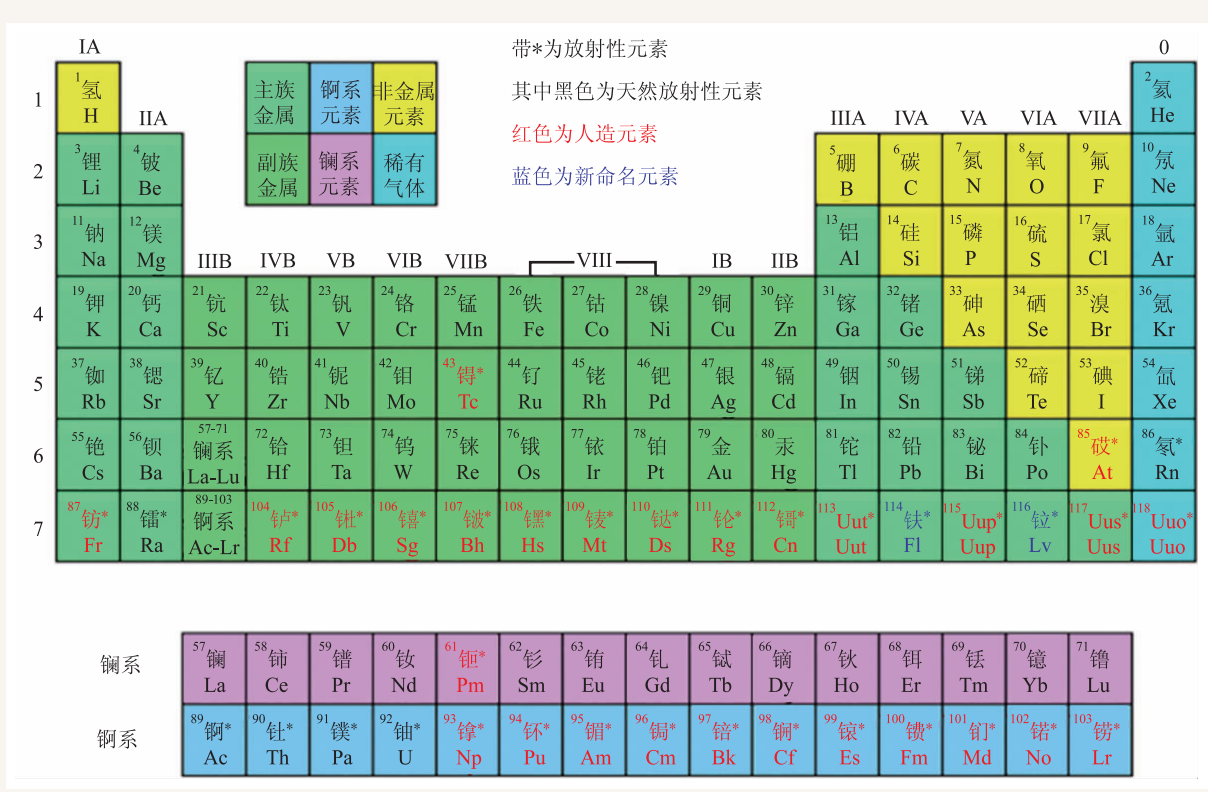


图5 元素周期表^[26]

的寿命不长。但从图4也可以看到，随着中子数的增加，一个同位素链上的超重原子核的寿命逐渐变长。以112号元素为例，中子数为165的²⁷⁷Cn(锗-277)的半衰期仅为1.1 ms。中子数增加4个，²⁸¹Cn(锗-281)的半衰期增大了两个数量级，为0.1 s。中子数增加到173时，²⁸⁵Cn(锗-285)的半衰期为29 s。因此，可以期待，进一步增大中子数，超重核的寿命会继续增长；如果到达理论预言的超重岛中心，原子核寿命可能更长。

4 超重原子核与超重元素研究面临的问题与挑战

当前，超重核的实验室合成遇到了很多困难。困难之一是，超重核合成反应截面非常小。目前，利用冷熔合机制合成的核电荷数最大的超重元素是113号。基于冷熔合机制合成113号超重元素的反应截面仅为22 fb(飞靶)^[22]。利用热熔合反应合成Z>118的超重元素的实验尚未取得进

展，仅有的几个实验探索给出的反应截面上限也在几十个飞靶量级^[27, 28]。如此小的合成截面，已经达到当前实验设备的极限。为克服这个困难，需要强流加速器和可耐强流的靶，以增大超重核的产生率；也需要更先进的探测设备，以提高探测效率。目前，俄罗斯Dubna联合核子研究所正在建设超重元素工厂(SHE Factory)，将有望大幅提高超重核的合成率和探测效率，以系统研究超重核性质。

第二个困难是，到目前为止，实验室合成的这些超重原子核，包括114号元素的同位素，中子数与理论预言的下一个中子幻数184还相差很多。这是由于随着质子数的增加，对于β稳定线附近的原子核，其中子数与质子数之比越来越大。因此，利用β稳定线附近的原子核作为弹核与靶核，合成的超重核一定是缺中子的。解决这一困难的可能途径有两个：一是利用丰中子的放射性核束轰击靶核，但放射性核束的流强非常低，尚无法用于超重核合成实验；二是利用多核

子转移反应合成超重核，这在目前仍处于探索阶段。

第三个困难是，利用重离子熔合蒸发反应合成更重的超重元素，所需的靶材料非常稀少，而且通常具有放射性。

如果上述困难能够得以解决，合成了长寿命的超重核，随之而来的另一个难题是如何鉴别它们。目前采用的通过追踪 α 衰变链来鉴别超重核的方法，只适用于短寿命的超重核。对于长寿命的超重核，需要探索新的鉴别方法。

理论研究对于探索超重核具有非常重要的意义。一方面，如前所述，上个世纪60年代关于超重稳定岛的理论预言促进了重离子物理的发展。另一方面，理论研究对于未知超重元素的合成也具有重要的参考意义。例如，在117号新元素合成实验之前，很多理论家即针对弹靶组合、入射能量等进行了预言^[29-32]。又如，为鉴别超重核，需要测量 α 衰变谱，这通常也需要与理论结果进行比较^[24]。

鉴于目前实验探索超重稳定岛面临很多问题，理论研究以及实验与理论的结合更突显其重要性。与研究其他核区的原子核一样，超重核的理论研究也涉及结构、衰变与反应等方面。在超重核结构的理论研究方面，有很多重要问题需要进一步探索。这些问题包括：(1)超重核区的壳层结构及幻数，这直接决定了超重岛的中心位置；(2)超重核的质量^[33]、形状^[34, 35]、同核异能态^[36, 37]等性质；(3)超重核的势能面^[38, 39]、鞍点性质、鞍点及其附近原子核的形状特性、裂变路径以及与裂变相关的质量参数等。

超重岛的位置涉及到超重核的寿命、合成机制等关键问题。因此，如何更好地预言稳定的或者长寿命的超重元素岛的中心位置，仍是对理论工作者的极大挑战。量子壳效应是超重核存在的根本原因。早期的核结构理论预言， $Z=114$ 和 $N=184$ 是下一个双幻核。但后来的理论研究给出的预言很不相同(见文献[40]及其中的文献)。例如，采用不同的参数，Skyrme-Hartree-Fock模型预言的幻数除了 $Z=114$ 和 $N=184$ 以外，还有 $Z=120$

和 $N=172$ ， $Z=126$ 和 $N=184$ ^[41]，而相对论平均场模型则预言质子幻数 $Z=120$ ，132和138以及中子幻数 $N=172$ ，184，198，228，238和258^[42]。此外，张量力对超重核区壳层结构的影响也需要考虑^[43]。

当前，更为突出的理论问题是超重核合成机制的研究。在理论研究中，针对利用重离子熔合反应合成超重核的三步过程(见图3)，需要计算俘获截面、熔合概率和存活概率。目前，已经建立了很多理论模型，用于研究重离子熔合蒸发反应，计算合成超重核截面^[29-32, 44-49]。这些模型都能很好地描述熔合蒸发剩余截面的已有实验结果。但是，对于未知核区，各种模型所得结果相差甚远。即使对于已有实验结果的核区，不同的模型给出的熔合概率也有较大的分歧。这些分歧主要源于：(1)在计算反应截面，尤其是计算复合核存活概率时，所采用的核结构信息具有很大的不确定性；(2)不同的模型基于不同的熔合机制，因而给出不同的熔合概率。因此，除了前面提到的超重核结构外，探索重离子熔合机制^[50-52]对于超重核合成机制的研究也是至关重要的。

5 结束语与展望

超重原子核研究是理论与实验相结合、相互促进的一个典型例子。超重稳定岛的探索涉及一系列基本的科学问题。例如，元素存在的上限在哪里？超重元素的化学性质如何？是否仍然符合现有元素周期表给出的规律？是否存在奇特形状的超重原子核？超重核中同核异能态的寿命比基态还长吗？在超重核中是否存在新的衰变方式？是否存在空心原子核？等等。

基础科学研究具有延续性，只有经过长期积累，才有可能取得创新性成果，超重原子核与超重元素的研究也不例外。在这一领域取得重要成果的实验室，都历经了长达几十年的努力。例如，俄罗斯Dubna联合核子研究所从上个世纪50年代后期即开展重离子物理研究，日本RIKEN的

超重核实验组在2004年成功合成113号元素之前,默默地探索了20年。我国的超重原子核与超重元素研究起步较晚。过去的十几年里,在国家自然科学基金、中国科学院知识创新工程和国家重点基础研究发展计划项目等的支持下,我国的超重原子核研究在实验和理论两方面都取得了一些进展。

由于合成超重核具有极大的技术难度,相关研究不仅具有十分重要的科学意义,也是人类认识自然的能力和—个国家科技水平的最好展示。

参考文献

- [1] Science, 2005, 309: 83
- [2] Indelicato P. Nature, 2013, 498: 40
- [3] Bohr N. Nature, 1939, 143: 330; Bohr N, Wheeler J A. Phys. Rev., 1939, 56: 426
- [4] Mayer M G, Jensen J H D. Elementary Theory of Nuclear Shell Structure. New York: John Wiley & Sons, 1955
- [5] Wheeler J A. Nuclear Fission and Nuclear Stability. In: Niels Bohr and the Development of Physics: Essays Dedicated to Niels Bohr on the Occasion of His Seventieth Birthday. McGraw-Hill, 1955. pp. 163—184; Scharff-Goldhaber G. Nucleonika (Nucleonics), 1957, 15: 122; Werner F G, Wheeler J A. Phys. Rev., 1958, 109: 126
- [6] Myers W D, Swiatecki W J. Nucl. Phys., 1966, 81: 1; Siemens P J, Bethe H A. Phys. Rev. Lett., 1967, 18: 704
- [7] Strutinsky V M. Nucl. Phys. A, 1967, 95: 420
- [8] Sobiczewski A, Gareev F A, Kalinkin B N. Phys. Lett., 1966, 22: 500; Meldner H. Arkiv Fysik, 1967, 36: 593
- [9] Herrmann G. Nature, 1979, 280: 543
- [10] Marinov A, Rodushkin I, Kolb D *et al.* Int. J. Mod. Phys. E, 2010, 19: 131
- [11] 蔡善钰. 人造元素. 上海: 科学普及出版社, 2006
- [12] Zhao E G, Wang N, Feng Z Q *et al.* Int. J. Mod. Phys. E, 2008, 17: 1937
- [13] Oganessian Y. Lecture Notes in Physics, 1975, 33: 221
- [14] Hofmann S, Münzenberg G. Rev. Mod. Phys., 2000, 72: 733
- [15] Tatsumi K, Corish J. Pure Appl. Chem., 2010, 82: 753
- [16] 全国科学技术名词审定委员会. 中国科技术语, 2011, 13: 62
- [17] Oganessian Y. J. Phys. G, 2007, 34: R165; Oganessian Y *et al.* Phys. Rev. Lett., 2010, 104: 142502
- [18] Loss R D, Corish J. Pure Appl. Chem., 2012, 84: 1669
- [19] 全国科学技术名词审定委员会. 中国科技术语, 2013, 15: 60
- [20] Rudolph D, Forsberg U, Golubev P *et al.* Phys. Rev. Lett., 2013, 111: 112502
- [21] Khuyagbaatar J, Yakushev A, Düllmann C E *et al.* Phys. Rev. Lett., 2014, 112: 172501
- [22] Morita K *et al.* J. Phys. Soc. Jpn., 2004, 73: 2593; J. Phys. Soc. Jpn., 2012, 81: 103201
- [23] Gan Z G, Qin Z, Fan H M *et al.* Eur. Phys. J. A, 2001, 10: 21
- [24] Gan Z G, Guo J S, Wu X L *et al.* Eur. Phys. J. A, 2004, 20: 385
- [25] Zhang Z Y, Gan Z G, Ma L *et al.* Chin. Phys. Lett., 2012, 29: 012502
- [26] 孟旭, 赵恩广, 周善贵. 物理, 2014, 43: 215
- [27] Oganessian Y *et al.* Phys. Rev. C, 2009, 79: 024603
- [28] Düllmann C E. News from TASCA. In: The 10th Workshop on Recoil Separator for Superheavy Element Chemistry, October 14, 2011, GSI Darmstadt, Germany
- [29] Feng Z Q, Jin G M, Huang M H *et al.* Chin. Phys. Lett., 2007, 24: 2551
- [30] Shen C W, Abe Y, Boilley D *et al.* Int. J. Mod. Phys. E, 2008, 17: 66
- [31] Zagrebaev V, Greiner W. Phys. Rev. C, 2008, 78: 034610
- [32] Liu Z H, Bao J D. Phys. Rev. C, 2009, 80: 034601
- [33] Wang N, Liu M, Wu X *et al.* Phys. Lett. B, 2014, 734: 215
- [34] Ren Z, Toki H. Nucl. Phys. A, 2001, 689: 691
- [35] Chen Y S, Gao Z C. Nucl. Phys. Rev., 2013, 30: 278
- [36] Xu F R, Zhao E G, Wyss R *et al.* Phys. Rev. Lett., 2004, 92: 252501
- [37] Herzberg R D, Greenlees P T, Butler P A *et al.* Nature, 2006, 442: 896
- [38] Lu B N, Zhao E G, Zhou S G. Phys. Rev. C, 2012, 85: 011301(R)
- [39] Lu B N, Zhao J, Zhao E G *et al.* Phys. Rev. C, 2014, 89: 014323

更重要的是, 超重稳定岛的探索可能具有重大的应用前景。在稳定核大陆附近的小岛上存在的钷和铀同位素, 其重要意义不言而喻。如果人类能够登上超重稳定岛, 可以期望, 岛上的这些原子核可能会对人类社会的发展产生更为重要和深远的影响。

致谢 中国科学院理论物理研究所温凯博士和孟旭同学分别为本文制作了图4和图5, 特此致谢。

[40] Sobiczewski A, Pomorski K. Prog. Part. Nucl. Phys., 2007, 58: 292

[41] Rutz K, Bender M, Burvenich T *et al.* Phys. Rev. C, 1997, 56: 238

[42] Zhang W, Meng J, Zhang S Q *et al.* Nucl. Phys. A, 2005, 753: 106

[43] Zhou X R, Qiu C, Sagawa H. Effect of Tensor Interaction on the Shell Structure of Superheavy Nuclei. In: Bai H B, Meng J, Zhao E G *et al.* (eds.). Nuclear Structure in China 2010—Proceedings of the 13th National Conference on Nuclear Structure in China, Chi-Feng, Inner Mongolia, China, 24—30 July 2010, Singapore: World Scientific, 2011, pp. 259—267

[44] Adamian G G, Antonenko N V, Scheid W *et al.* Nucl. Phys. A, 1998, 633: 409

[45] Li J Q, Feng Z Q, Gan Z G *et al.* Nucl. Phys. A, 2010, 834: 353c

[46] Siwek-Wilczynska K, Cap T, Kowal M *et al.* Phys. Rev. C, 2012, 86: 014611

[47] Nasirov A K, Mandaglio G, Giardina G *et al.* Phys. Rev. C, 2011, 84: 044612

[48] Wang N, Zhao E G, Scheid W *et al.* Phys. Rev. C, 2012, 85: 041601(R)

[49] Zhu L, Xie W J, Zhang F S. Phys. Rev. C, 2014, 89: 024615

[50] Zhang H Q, Lin C J, Jia H M *et al.* SCIENCE CHINA: Physics, Mechanics & Astronomy, 2011, 54 (S1): s6

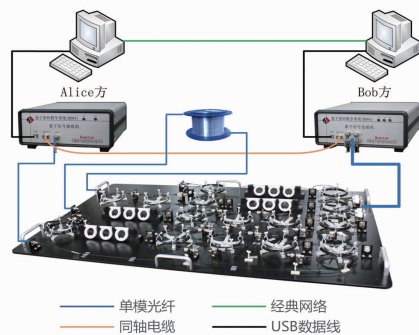
[51] Wen K, Sakata F, Li Z X *et al.* Phys. Rev. Lett., 2013, 111: 012501

[52] Dai G F, Guo L, Zhao E G *et al.* SCIENCE CHINA: Physics, Mechanics & Astronomy, 2011, 57: 1618



QKDEdu-S 量子密码教学科研系统

系统组成



组件清单

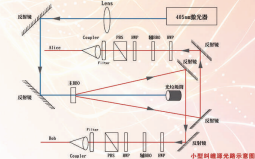
名称	数量
QKDEdu-T量子信号发射机	1
QKDEdu-R量子信号接收机	1
QKDEdu-P光学调试平台	1
光纤盘	1
同轴电缆	1
网线	1
可选配件	
PC (Windows XP以上操作系统)	2

QEPS小型纠缠源系统

系统组成



QEPS小型化纠缠源系统实物图



技术指标

泵浦光功率 (mW)	100
偶然符合计数率 (Hz)	< 10
单路光子亮度 (cps.)	> 100k
纠缠光子对亮度 (cps.)	> 10k
H, V偏振对比度	> 25:1
P, N偏振对比度	> 7:1
Bell不等式破坏程度	S > 2.3
可见度	92%

提供最专业的量子通信设备

物理专业: 探测器、小型纠缠源、高亮纠缠源、多光子纠缠等。

通信专业: BB84教学科研系统、B92教学科研系统、可商用的量子通信保密网络。

地址: 合肥市创新产业园D3楼 销售: 13395515356 传真: 0551-65368589
 电话: 400-885-0929 13395515359 邮箱: feng.liu@quantum-info.com
 0551-65333590 邮编: 230088 网址: http://www.quantum-info.com