

超重原子核与新元素合成*

姜义铭^{1,2} 张丹丹¹ 周善贵^{1,2,†}

(1 中国科学院理论物理研究所 北京 100190)

(2 中国科学院大学物理科学学院 北京 100049)

2025-07-02 收到

† email: sgzhou@itp.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20250901

CSTR: 32040.14.wl20250901

Superheavy nuclei and synthesis of new elements

JIANG Yi-Ming^{1,2} ZHANG Dan-Dan¹ ZHOU Shan-Gui^{1,2,†}

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

(2 School of Physical Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

摘要 合成新元素、探索原子核的质量和电荷极限是当前重要的科学前沿。由于量子壳效应的影响,理论预言在已知核素版图“大陆”之外存在一个“超重稳定岛”。迄今为止,人类在探索“超重稳定岛”的过程中,已经取得了重要进展,合成了从104号(钔)到118号(奥)共15种超重元素,填满了元素周期表的第七周期。目前,119号和120号元素的合成工作也在进行中。实验上合成这些超重元素采用的都是重离子熔合蒸发反应,然而,基于这一反应机制合成新元素面临许多困难和挑战。探索超重原子核的性质及其合成机制,仍需要大量理论和实验方面的工作。文章介绍超重原子核与新元素合成的研究背景,总结实验和理论研究进展,分析面临的挑战,并对未来进行展望。

关键词 新元素, 超重原子核, 量子壳效应, 重离子熔合, 裂变

Abstract The synthesis of new elements, sitting at the heart of our exploration of the limits of mass and charge of atomic nuclei, is one of the major challenges in modern science. Based on the quantum shell effect, theoretical predictions have been made of an “island of stability” of superheavy nuclei beyond the known “mainland” in the chart of nuclides. Significant progress has been made in exploring this island of stability, with the synthesis of 15 superheavy elements, from element 104 (rutherfordium, Rf) to element 118 (oganesson, Og), so the seventh period of the periodic table is now complete. These superheavy elements have been produced by using heavy-ion fusion reactions, by means of which experiments to synthesize elements 119, 120 and beyond are being carried out or planned. To achieve this purpose and to land on the island of stability, more efforts should be made to study the structure properties and synthesis mechanism of superheavy nuclei. This article presents an overview of the research in this field, summarizes experimental and theoretical progress and challenges, and provides a perspective for future developments.

Keywords new elements, superheavy nuclei, quantum shell effects, heavy-ion fusion, fission

* 国家重点基础研究发展计划(批准号: 2023YFA1606500; 2024YFE0109800)、国家自然科学基金(批准号: 12447101; 12375118; 12435008; W2412043)和中国科学院B类先导科技专项(批准号: XDB34010100; XDB0920100)资助项目, 本文部分计算得到中国科学院理论物理研究所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

1869年,门捷列夫提出元素周期表,揭示了元素周期律。自此,发现和合成新元素、扩展元素周期表,成为物质科学的重要前沿领域。1911年,卢瑟福提出原子的核式结构模型,证实了原子核的存在。1913年,莫塞莱通过实验发现,元素周期表的元素排布与原子核的核电荷数相关。1932年,查德威克发现中子,随后海森伯提出原子核由质子和中子组成,至此揭示了原子核的基本成分。然而,原子核中最多可以容纳多少个质子和中子,元素周期表是否存在尽头,至今仍是未解之谜。

一般将原子序数为104及以上的元素称为超重元素,目前实验上合成的最重元素为118号元素氮。超重元素具有更大的核电荷数,其核结构和化学性质与已知元素可能存在差异,这将为核物理、原子物理、化学等领域或学科的发展带来新的机遇与挑战。此外,稳定或长寿命的超重元素可能具有重要的应用价值。因此,2005年美国*Science*杂志将“是否存在稳定的超重元素”列为125个有待解决的科学问题之一,2021年相关问题仍被列入该杂志携手上海交通大学发布的“125个科学问题:探索 and 发现”^[1]。

文章将从“超重稳定岛”的理论预言开始,简要介绍超重原子核与新元素合成的研究背景、超重元素的化学性质;综述超重原子核和超重元素的实验和理论研究进展,特别是文献[2]发表以来十余年的进展;探讨合成新元素面临的挑战并展望未来的发展。

2 超重稳定岛的理论预言

从原子层次看,核电荷数存在上限。若将原子核看作是一个点电荷,根据量子力学,原子内层电子的运动速度 $v \sim Z\alpha c$ (Z 为核电荷数, α 为精细结构常数, c 为光速)。考虑相对论效应,电子的运动速度不能超过光速,因此,核电荷数最多

不能超过 $1/\alpha \approx 137$,即核电荷数为137及以上的元素无法存在。进一步考虑到原子核不是一个点电荷,而是带正电荷的质子分布在一定的空间里,由量子电动力学计算,核电荷数的极限可提升至173^[3]。

从原子核层次看,原子核的稳定性由核力和库仑力的竞争决定。经典的液滴模型给出,短程吸引的核力使原子核倾向于保持为球形,而长程排斥的库仑力会使原子核倾向于具有拉长的形变,两者的竞争使得原子核存在一个位垒,这个位垒会阻止原子核发生裂变,决定原子核的裂变寿命。由于核力的饱和性,核力导致的吸引效应近似与核子数成正比,而库仑排斥效应近似正比于质子数的平方。因此,质子数越大,库仑排斥在原子核中的效应越显著,裂变位垒的高度也会越低^[4]。当质子数达到或超过104时,原子核的裂变位垒几乎消失,即 $Z \geq 104$ 的原子核寿命极短(小于 10^{-14} s),来不及俘获电子以形成原子。

然而,原子核是一个量子多体系统,量子壳效应对原子核具有显著影响。实验表明,原子核中存在幻数,质子数或中子数等于幻数的原子核比相邻的原子核更稳定,例如2、8、20、28、50和82等。目前已知最大的质子幻数为82,最大的中子幻数为126。1949年,迈耶和延森等人提出了原子核的壳层结构模型,通过引入较强的自旋—轨道耦合,成功解释了原子核中的幻数,揭示了量子壳效应的重要性,并因此获得了诺贝尔物理学奖^[5]。基于该模型,如果量子壳效应足够强,对于下一个质子和中子幻数附近的原子核,可能出现足够高的裂变位垒,从而存在一系列稳定或长寿命原子核,突破经典理论给出的104号元素上限。这些由于量子壳效应存在的原子核被称为超重原子核,相应的元素被称为超重元素,它们所在的区域被称为“超重稳定岛”^[6]。然而,这种量子壳效应是否足够强,仍存在争议,相关讨论一直持续到20世纪60年代^[7]。

对于超重原子核结构的理论研究,通常有两类模型:宏观—微观模型和微观模型。前者主要基于液滴模型等宏观模型,通过引入微观修正来

包含量子效应，具有计算复杂度低、易于开展系统性计算的优势。后者以密度泛函理论为代表，从核子自由度出发构建原子核体系的哈密顿量，具有更好的微观基础，同时计算成本显著增加。

早期核结构理论采用唯象单粒子势，如 Woods—Saxon 势、Nilsson 势等，预言 $Z = 114$ 和 $N = 184$ 分别是 ^{208}Pb 之后的下一个质子和中子幻数^[8]，在这两个幻数对应的双幻核附近，量子壳效应可能足够强，以产生足够高的裂变位垒，阻止原子核发生裂变，从而形成相对稳定的超重核。在随后的半个多世纪中，更多的唯象单粒子势和多种宏观—微观模型都给出了类似的预言，包括近期发展的 Koura—Yamada 势(一种改进的 Woods—Saxon 势)^[9]和 Weizsäcker—Skyrme 模型^[10]等。基于 Koura—Yamada 势还预言了更多可能的幻数，包括质子幻数 $Z = 126$ 、138、154 和 164 以及中子幻数 $N = 228$ 和 308。

对于微观模型，Skyrme—Hartree—Fock + BCS 模型预言，除了 $Z = 114$ 、 $N = 184$ 之外，还存在 $Z = 120$ 、126， $N = 172$ 等幻数^[11]；采用 Gogny 密度泛函的 Hartree—Fock—Bogoliubov (HFB) 计算表明，稳定岛的中心位于质子数 $Z = 120$ 和中子数 $N = 184$ 附近^[12]；球形相对论连续谱 Hartree—Bogoliubov 模型则预言了质子幻数 $Z = 120$ 、132、138 以及中子幻数 $N = 172$ 、184、198、228、238、258^[13]；形变相对论连续谱 Hartree—Bogoliubov 模型给出的质子幻数和中子幻数分别为 $Z = 120$ 和 $N = 184$ 、258^[14, 15]；相对论 HFB 理论预言了质子幻数 $Z = 120$ 、138 和中子幻数 $N = 172$ 、184、228、258^[16]。表 1 列出了不同理论模型对超重核区幻数的预言，可以看出，中子幻数和质子幻数的理论预言仍存在较大差别。

考虑高阶形变(十六极、三十二极和六十四极等)对原子核结构的影响，宏观—微观模型^[17]和微观模型^[18]均预言 $Z = 108$ 、 $N = 162$ 的 ^{270}Hs (铪-270)是形变双幻核。从图 1 可以看出，其附近的核素会形成一个超重“浅滩”，连接已知核区和“超重稳定岛”^[19]。目前，实验上已经发现 $Z = 108$ 、 $N = 162$ 对应形变亚壳^[20, 21]，其附近存在一

表 1 不同理论模型对超重核区质子幻数和中子幻数的预言

模型	质子幻数 Z	中子幻数 N
Woods—Saxon 势、Nilsson 势等 ^[8]	114	184
Koura—Yamada 势 ^[9]	114、126、138、154、164	184、228、308
Weizsäcker—Skyrme 模型 ^[10]	114、120	184
Skyrme—Hartree—Fock + BCS 模型 ^[11]	114、120、126	172、184
Gogny—Hartree—Fock—Bogoliubov 模型 ^[12]	120	184
球形相对论连续谱 Hartree—Bogoliubov 模型 ^[13]	120、132、138	172、184、198、228、238、258
形变相对论连续谱 Hartree—Bogoliubov 模型 ^[14, 15]	120	184、258
相对论 Hartree—Fock—Bogoliubov 模型 ^[16]	120、138	172、184、228、258

系列相对稳定的超重核，这证实了超重“浅滩”的存在，为探索“超重稳定岛”和合成超重新元素提供了重要支撑。

3 超重元素的化学性质

对于较轻的元素而言，核外电子的运动速度远小于光速，其动质量和静质量几乎相同，非相对论理论已经可以很好地描述元素的化学性质。然而超重元素具有较大的核电荷数，原子核产生的库仑电场更强，核外电子运动速度更快，动质量远大于静质量。在第七周期元素中，内层电子的动质量大约比静质量大 80%—90%，相对论效应十分显著。因此，超重元素的化学性质可能与已知的元素周期律的外推性不一致。

在超重原子中，相对论效应主要分为三种：直接相对论效应、间接相对论效应和自旋—轨道耦合^[22]。下面以第七周期的超重元素为例来讨论。原子核产生的库仑电场，对内层电子有很强的吸引作用。这种效应不仅仅对 K 层和 L 层的内层电子起作用，还会显著影响到 $7s$ 轨道和 $7p_{1/2}$ 轨道上的价电子，使其波函数与原子核重叠几率增加，能级能量降低，这种效应被称为直接相对论效应。 $6s$ 和 $6p_{1/2}$ 电子轨道收缩，会导致这两个轨道上的电子对原子核库仑电场的屏蔽效应增强，从而使外层的 $6d$ 和 $6f$ 等电子轨道离原子核更远，能级升

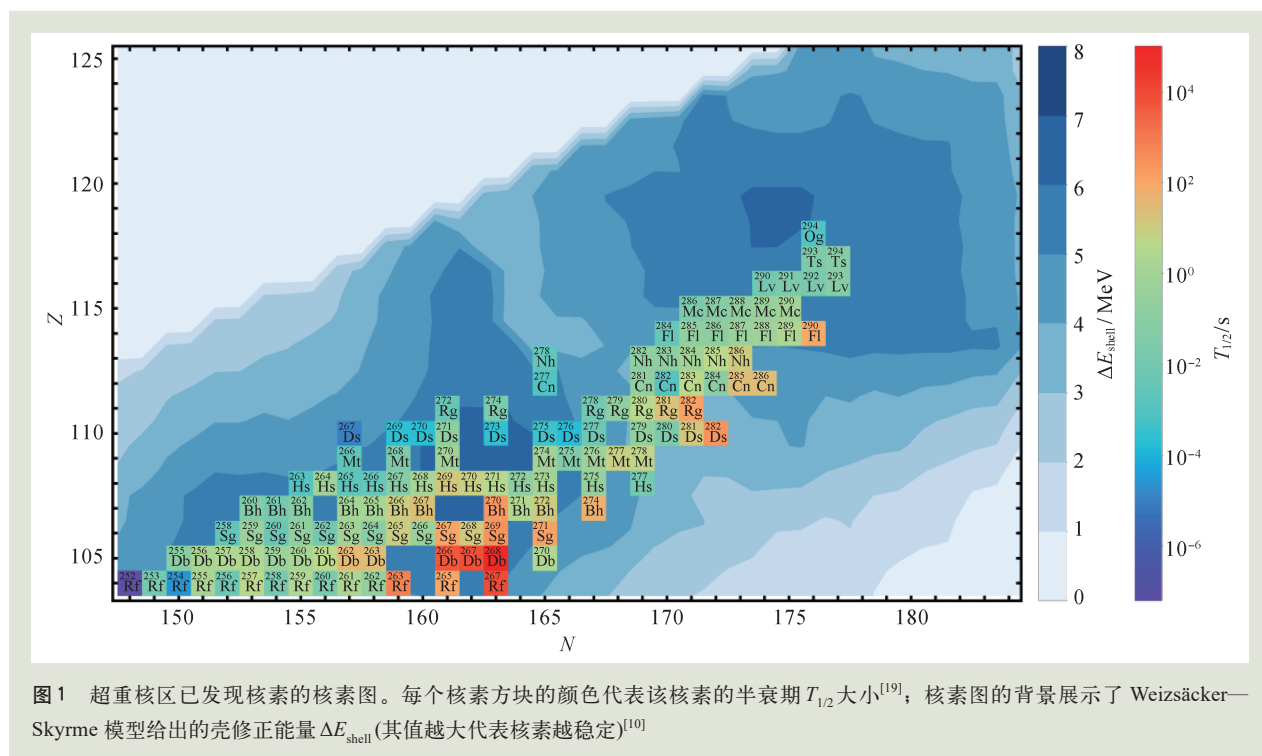
高, 这种效应被称为间接相对论效应。自旋—轨道耦合也是相对论效应的一种体现, 较强的自旋—轨道耦合效应导致 $7p_{1/2}$ 和 $7p_{3/2}$ 轨道发生较大的劈裂, 对电子的壳层结构有着重要的影响。理论分析表明, 这三种相对论效应的强度均随着原子核电荷数 Z 的增加而增加, 近似与 Z^2 成正比。因此, 相对论效应对于超重元素的化学性质具有更加不可忽视的影响^[22-24]。图2展示了目前已经发现的超重元素部分电子能级的非相对论和相对论计算结果^[25, 26], 体现了相对论效应对于超重元素电子能级结构的重要作用。

在重元素中, 相对论效应已经有所体现。金的颜色呈现出金黄色, 而原子序数较小的同族元素银呈现出银白色, 这是由于在金原子中, 相对论效应导致 $5d$ 轨道上升, $6s$ 轨道降低, 此时 $5d$ 能带带 $6s$ 能带的跃迁能量对应于可见光区域的蓝色, 这种吸收使金呈现现金黄色。金属元素汞在常温常压下呈现液态, 这是由于汞的 $6s$ 轨道被填满, 相对论效应导致 $6s$ 轨道降低并趋于稳定, 极大地削弱了汞原子间金属键的强度。

在超重元素中, 相对论效应的体现更为显著。重元素钷和镭是第七周期的主族金属元素, 根据

元素周期律, 它们将比第六周期的铯和钡元素更活泼。然而, 钷和镭的第一电离能要比铯和钡略大, 性质更加稳定, 这是由于相对论效应导致 $7s$ 电子轨道能量更低, 与其上未被占据的最低能级 $7p_{1/2}$ 相距更远。可以预期第八周期的 119 和 120 号超重元素将会呈现出更加稳定的性质。同时, 相对论效应使得 $7p_{1/2}$ 轨道能级降低, 这两个 s 区元素也可能表现出一定的 p 区元素的性质^[27]。如图2所示, 在超重核区相对论效应导致 $7s$ 轨道下降, $6d$ 轨道上升。对于 104 号元素钅、105 号元素锗和 106 号元素镱来说, $7s$ 轨道能量比 $6d$ 轨道能量低; 对于 107—112 号超重元素, $7s$ 轨道能量也会比 $6d_{5/2}$ 轨道能量更低, 出现了轨道能级反转^[28]。此外, 112 号元素镆和 114 号元素鈇表现出部分惰性气体的性质^[29, 30], 而 118 号元素鿫可能会表现得比其他稀有气体更加活泼, 偏离传统的元素周期律。这是由于相对论效应导致 $7s$ 轨道和 $7p_{1/2}$ 轨道更加稳定, 镆和鈇恰好分别填满了这两条轨道。而对于鿫来说, 更高能量的 $7p_{3/2}$ 轨道被填满, 可能会具有更加活泼的性质^[31]。

可以看出, 相对论效应会显著影响超重原子中电子轨道的结构和稳定性。随着原子序数的进



一步增大,电子轨道填充情况变得更加复杂,元素的性质也会更加难以预测,元素周期律已经不能很好地描述超重元素的性质。怎样理解元素周期律随核电荷数的变化,包含更多元素的周期表将呈现什么样的结构,都是重要的科学问题。

4 超重元素的合成机制与实验进展

4.1 在自然界中寻找超重元素

目前,人们已经在自然界中找到了元素周期表中的绝大多数元素,其中最重的是铀元素。然而,自然界中是否存在超重元素,仍是值得探索的问题。宇宙中各种元素的产生,主要来源于不同天体环境中发生的不同核过程。在双中子星并合和超新星爆发等极端的天体环境下,剧烈的快中子俘获过程可能会产生丰中子的超重核,并被抛撒在宇宙中,如果这些核素的寿命足够长,就有可能被探测到。自20世纪70年代以来,一直有研究团队试图在自然界中寻找超重元素^[32-40],包括在宇宙线、陨石以及天然材料中寻找,取得了一些进展,但是目前没有确切的证据表明自然界中存在超重元素^[40]。

为了在宇宙线中寻找超重元素,相关研究团队在美国“长期暴露设施”(Long Duration Exposure Facility, LDEF)卫星进行了超重宇宙射线实验,但是并没有发现超重元素^[32]。在陨石形成和存活的过程中,保留了大量和宇宙线相互作用的信息,因此从陨石中寻找超重元素是一种可能的途径。俄罗斯的研究团队从铁陨石中提取了结构稳定的橄榄石晶体,发现了重离子径迹中包括3个 $105 < Z < 130$ 的超重核素,但这一发现有待进一步确认^[33, 39]。探索稀有自发裂变事件也是发现超重元素的一种方法。俄罗斯杜布纳联合核子研究所在深地实验室进行了长达一年的测量,仍然没有观测到超出自然本底水平的稀有自发裂变事件^[33, 34]。此外,同族元素往往具有类似的化

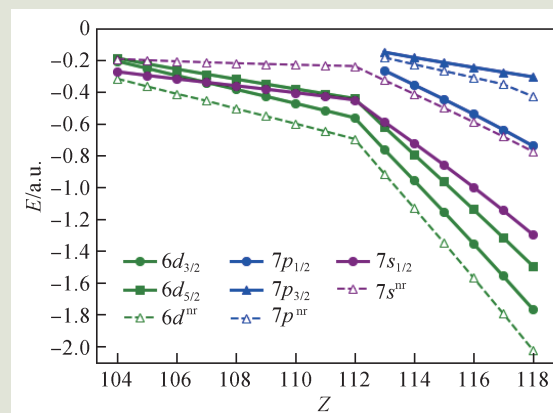


图2 相对论效应对超重元素部分电子能级的影响,实线和实心符号代表考虑相对论效应的电子能级^[25],虚线和空心符号代表非相对论计算得到的电子能级^[26]

学性质,以此为依据,能指导我们对超重元素的搜寻。俄罗斯科学家从里海和贝加尔湖的几千吨浓盐水中,提取了富含铅元素的样品,从中寻找114号元素,然而也没有发现超重元素的迹象^[34]。除此之外,有团队利用感应耦合等离子体—扇形磁场质谱法在天然的钍和金中发现了疑似超重原子核存在的证据^[35, 36]。

虽然相关探索已历经半个多世纪,目前仍没有发现自然界中超重元素存在的确切证据,但是这些研究推动了对超重元素的理解和技术的进步,对探索“超重稳定岛”起到了重要的推动作用。

4.2 超重元素的合成机制

目前,主要利用核反应在实验室人工合成超重元素和相应的超重核。铀是目前在自然界中找到的质子数最大的元素,对于质子数大于铀的元素,中子俘获反应是重要的合成手段^[41, 42]。中子俘获反应的主要机制为:原子核在俘获中子后,发生 β 衰变,生成质子数更大的反应产物。自20世纪40年代以来,利用在反应堆和核爆炸中产生的高通量中子,已经实现了93—100号元素的合成。采用包含一个质子(氢核、氘核、氚核)和包含两个质子(α 粒子)的轻离子轰击相应的靶核,也是合成重元素的主要途径,利用这种方法,最重

合成到了101号(钔)元素。由于目前能用于实验的靶材料核电荷数有限,合成比钔更重的元素,需要采用比 α 粒子更重的离子(即包含更多的质子)作为弹核,通过重离子熔合蒸发反应来实现。

迄今为止,所有的超重元素和超重原子核都是通过重离子熔合蒸发反应合成的。理论上描述重离子熔合蒸发反应合成超重原子核的机制,一般把整个过程分为相对独立的三步^[43]:俘获过程、复合核形成过程和存活过程,如图3所示。首先,弹核以一定的入射能量轰击靶核,若两者能克服它们之间的库仑位垒(垒下穿透或垒上越过),即形成一个双核体系(dinuclear system, DNS),此即俘获过程。俘获截面随入射能量增大而增大,实验上一般选取高于库仑位垒的质心系入射能量。俘获过程形成的双核体系不稳定。对于合成超重核的重离子反应,该体系会以极大的概率发生准裂变,在很短的时间内分裂为类弹和类靶碎片;但是,该体系仍有很小的概率形成超重复合核,此即复合核形成过程。一般地,入射能量越大,越容易形成复合核。这样形成的复合核激发能很大(十几至几十个MeV),因此发生裂变的概率很大;如果该复合核发射一个或多个中子,激发能降低同时保持质子数不变,超重核即可“存活”,这个过程被称为存活过程。

超重复合核的存活概率,取决于其激发能大

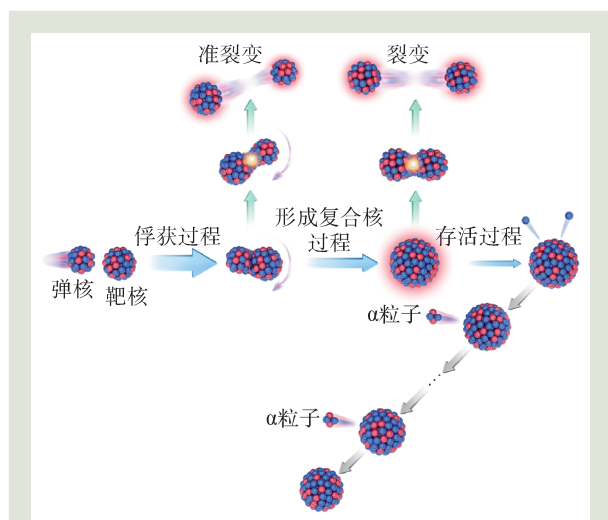


图3 利用重离子熔合蒸发反应合成超重核的三步过程及合成的超重核发生 α 衰变示意图

小和裂变位垒高度以及中子分离能的大小:激发能越高,存活概率越小;裂变位垒越高,存活概率越大。“存活”下来的超重核一般处于能量较低的激发态,激发能小于中子分离能,通过 γ 衰变退激到基态或同核异能态,进而发生一系列 α 衰变到相对稳定的原子核,实验上通过测量这一系列衰变的特征谱线,并结合 α 衰变链上最后的子核,鉴别合成的超重核(图3)。

基于重离子熔合蒸发反应合成超重核的截面一般很小,且随入射能量有较大的变化。为了得到尽可能大的合成截面,通过选取合适的靶核和弹核,科学家提出了热熔合、冷熔合和温熔合机制。这里的“热”、“冷”和“温”指的是超重复合核体系的激发能大小。热熔合机制于20世纪60年代由Seaborg等人提出,利用较轻的重离子(^{12}C , ^{15}N , ^{18}O , ^{22}Ne 等)作为弹核,确定相应的铜系靶核,并选取合适的入射能量。热熔合反应形成的超重复合核激发能一般在40 MeV以上,需要发射4个或更多中子才能退激。相对于轻离子核反应,利用重离子轰击铜系靶核,可以熔合形成更重的复合核。热熔合反应体系的质量/电荷不对称度仍然较大,因此其反应截面较大。102—106号元素的合成,就是基于热熔合机制。

然而,随着复合核体系的质子数逐渐增加,其裂变概率越来越大,合成截面也越来越小,为了合成更重的元素,1974年Oganessian提出了冷熔合机制^[44],利用双幻核 ^{208}Pb 或者与其相邻的 ^{209}Bi 作为靶核,根据目标超重核确定对应的弹核,并选取库仑位垒附近的质心系入射能量 $E_{\text{c.m.}}$ 。由于 ^{208}Pb 和 ^{209}Bi 的比结合能较大,这样的反应体系 Q 值(为负)绝对值较大,相应地,超重复合核激发能 $E^* = E_{\text{c.m.}} + Q$ 较小,通常发射一个中子后就可以形成超重核,这意味着存活概率较大,从而给出较大的合成截面。这种方法形成的超重核往往是非常缺中子的。基于冷熔合机制,科学家合成了107—113号元素。

冷熔合机制合成的超重原子核,均位于形变双幻核 ^{270}Hs 形成的“浅滩”附近。在这个“浅

滩”附近，由于 $Z=108$ 、 $N=162$ 形变亚壳的存在，裂变位垒较高，合成的超重核较为稳定^[45]。但随着质子数进一步增大，合成的超重核会远离这个核区，裂变位垒降低，合成截面急剧减小，接近实验探测灵敏度极限，为此科学家又提出了温熔合机制。温熔合机制（有文献仍称其为热熔合机制）是指利用双幻核 ^{48}Ca 作为弹核，针对目标超重核确定对应的靶核。与冷熔合机制相比，温熔合反应形成的超重复合核的激发能更高；但由于 ^{48}Ca 的比结合能较大，复合核的激发能相对于热熔合机制稍小一些，一般在30—40 MeV，发射3个左右中子即可以形成超重核。由于铜系靶核的中子数与质子数之比（中质比）相较于 ^{208}Pb 和 ^{209}Bi 更大，与冷熔合反应合成的超重核相比，温熔合反应合成的超重核尽管仍是缺中子核，但中子数会多一些，更接近下一个中子幻数，因此裂变位垒较高，从而存活概率较大，给出较大的合成截面。利用温熔合机制，114—118号元素最终也被成功合成。

对于 β 稳定线附近的原子核，中质比会随着质子数的增加而越来越大，因此，从 β 稳定线附近选取弹核和靶核，基于熔合蒸发反应只能合成缺中子超重核。合成理论预言的“超重稳定岛”中心附近的原子核，需要探索新的合成机制，目前讨论较多的有两种方案：一种是利用丰中子的放射性核束轰击靶核，但由于束流强度的限制，目前的技术条件不足以支持超重核合成实验；另一种方案是采用重离子间的多核子转移反应，这种反应是介于少数核子转移反应和深度非弹性散射之间的一种反应过程^[46—52]，通过在弹核和靶核之间转移核子，实现目标核的合成。目前，实验上通过多核子转移反应合成的大多数核素均位于丰中子一侧。多核子转移反应是合成丰中子重核的有效方法，是通往“超重稳定岛”的一条可能路径^[48, 52, 53]。然而，这一反应目前只成功合成了质子数 $Z=100$ 附近和更小质量区的原子核，离超重核区还较远。如何利用多核子转移反应产生超重原子核，仍然需要理论和实验的共同探索。

4.3 超重元素合成的实验进展与元素命名

自理论预言了“超重稳定岛”以来，科学家经过半个多世纪的努力，已经成功合成了 $Z \leq 118$ 的15种超重元素。早在1974年以前，美国伯克利国家实验室和俄罗斯的杜布纳联合核子研究所就利用热熔合反应合成了102至106号元素^[54]，其中后三个为超重元素。德国重离子物理研究所(GSI)历时十余年，利用冷熔合反应合成了107至112号超重元素^[55]。1999年至2009年，杜布纳联合核子研究所利用温熔合反应合成了113至118号元素^[56, 57]。2003年，德国GSI重复了115号元素的合成实验，证实了115号元素的合成^[58]。2004年，日本理化学研究所基于冷熔合机制合成了113号元素^[59]。2014年美国橡树岭国家实验室和德国GSI证实了杜布纳团队合成的117号元素^[60]。至此元素周期表的第七周期已经被填满(图4)。

在合成超重元素的过程中，新元素的命名工作也同步开展。国际纯粹与应用物理联合会和国际纯粹与应用化学联合会为此成立了一个联合工作组，负责考察和认定新元素的实验发现，并邀请发现者建议新元素的名称。从104号开始的15种超重元素，均以人名、地名或国名进行命名。例如，113号元素命名为Nihonium，符号为Nh，该名称源于日本的国名(Nihon)；118号元素被命名为Oganesson，符号为Og，该名称意在向俄罗斯核物理学家Oganessian致敬，他是冷熔合机制的提出者，并在114—118号元素的发现和超重稳定岛的实验探索等方面取得了杰出成就^[61]。

在我国，传统上每种元素都有一个汉字表示的中文名。对于新元素的中文命名，由我国科学技术名词审定委员会负责征集、审议并确定命名方案^[62]。其中，最近的七个元素中文命名方案如下：2011年公布了112号元素的中文名“镆”^[63]；2013年公布了114号元素的中文名“镭”和116号元素的中文名“𫓛”^[64, 65]；2017年公布了113号元素中文名“铈”，115号元素中文名“镆”，117号元素中文名“𫓛”和118号元素中文

名“氮”^[66]。

4.4 超重新元素合成的现状

迄今为止，科学家已经利用熔合反应合成了123种超重核素^[21]。然而，目前已知中子数最大的核素²⁹³Lv和²⁹⁴Ts，距离理论预言的中子幻数 $N=184$ 仍然差7个中子。从图1可以看出，对于 $Z=110-118$ 号元素的同位素链，随着中子数增加，距离理论预言的“超重稳定岛”中心越来越近，原子核的半衰期越来越大，即原子核的寿命越来越长。因此，可以期待，进一步增大中子数，超重核的寿命将会继续增加。

如今，距离上一个新元素合成已经过去十余年。为了将元素周期表拓展到第八周期，实验家和理论家以极大的兴趣，投入大量精力进行探索。德国 GSI 已经对 119 号和 120 号元素的合成进行了多次尝试，但只得到了合成截面的上限。

当前，国际上有四个重要的核物理科研机构正在或即将开展新元素合成实验。日本 RIKEN 以 ^{51}V 为弹核、以 ^{248}Cm 为靶核进行了 119 号元素

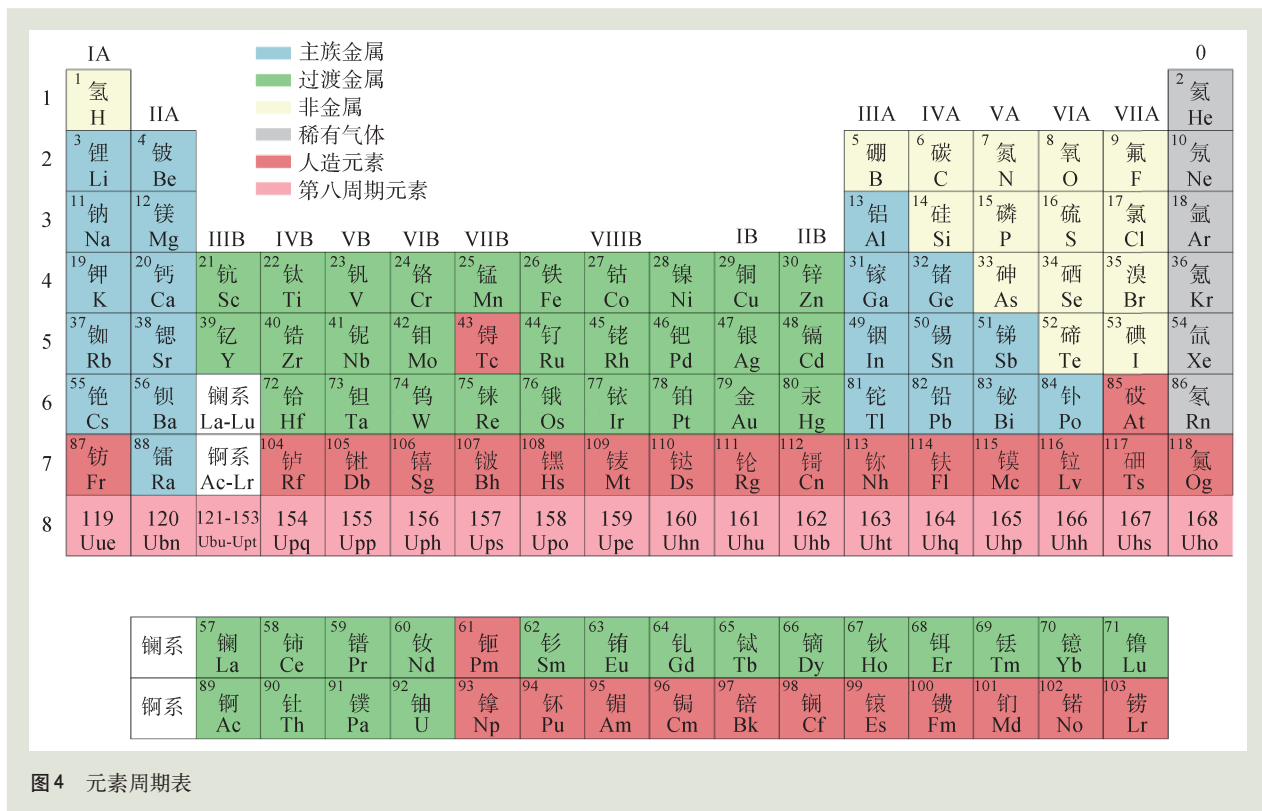
合成实验，束流时间长达 428 天，给出的合成截面上限为 4.85 fb。俄罗斯杜布纳联合核子研究所将以 ^{54}Cr 为弹核、以 ^{248}Cm 为靶核进行 120 号元素合成实验。美国的伯克利国家实验室计划以 ^{50}Ti 为弹核、以 ^{249}Cf 为靶核进行 120 号元素合成实验。

在新元素合成方面，我国科研人员也投入了大量的人力物力。截止到目前，我国已经合成了 41 种新核素，包括两个超重新核素 ^{259}Db 和 $^{270}\text{Bh}^{[67]}$ 。中国科学院近代物理研究所的实验团队正在计划以 ^{54}Cr 为弹核、以 ^{243}Am 为靶核进行 119 号元素合成实验。

由于弹靶组合的限制, 119号和120号元素的合成反应可能与热熔合、冷熔合和温熔合反应都不尽相同, 需要理论和实验合作探索合成机制。

5 合成超重新元素面临的挑战

实验方面最大的挑战是超重新元素合成截面极小。利用冷熔合反应最重合成到 113 号元素，其反应截面仅有 $19 \text{ fb}^{[68]}$ 。理论预言，新元素合成截面也在这个量级，甚至可能更小。在现有的重



离子加速器和探测设备上,这个量级的截面意味着要数月甚至数年才能观测到一个事件。此外,重铀系靶材料的稀少也是目前相关实验面临的一个巨大困难。

利用重离子熔合反应合成的超重原子核都是缺中子的。如何合成丰中子超重原子核,是核物理领域的一个重要问题。多核子转移反应很有可能是解决这一问题的关键。目前,实验上通过原子核的特征 α 衰变来鉴别超重核素。对于超重稳定岛上的原子核,若其足够稳定,不具有 α 放射性或 α 衰变寿命过长,就需要发展鉴别超重原子核的新方法。

在理论方面,超重核的结构和衰变性质与合成机制等仍有待进一步探索。在超重核的结构研究方面,主要问题包括:超重核区壳层结构和幻数的预言,这直接决定了“超重稳定岛”的中心位置;超重核的势能曲面、裂变位垒、裂变路径等,这些性质决定超重核的裂变稳定性,也为超重核的合成机制研究提供必要的输入参数^[69, 70];超重核的质量^[71]、形状^[72–74]、同核异能态^[75, 76]等性质的理论预言;等等。在超重核的合成机制方面,主要问题包括:重离子熔合蒸发反应中俘获截面、融合概率和存活概率的计算,超重核合成截面的预言;新反应机制的探索^[78–87];等等。

目前,对于已知超重核,现有的理论模型给出的合成截面与实验数据大致相符。然而,在未知核区,这些理论模型给出的预言存在较大的分歧。这些分歧一方面源自不同的理论模型所基于的假设和所采用近似不同,另一方面源自输入反应模型的核结构信息存在不确定性。原子核是复杂的有限量子多体系统,如何深入理解理论模型背后的物理图象,并减小核结构输入量的不确定度,给出可靠的合成截面预言,是理论研究方面的重要挑战。

6 总结与展望

合成新元素、拓展元素周期表涉及核物理、原子物理和化学等领域或学科,是物质科学探索的重要前沿。在过去的几十年里,世界多国在超

重核和超重元素研究方面投入了巨大的人力和物力,取得了重大进展,人工合成了104—118号15种超重元素,产生了深刻的社会影响。尽管如此,仍然有很多重要的科学问题有待解决:“超重稳定岛”是否存在,超重元素的化学性质是否符合已知的元素周期律,超重原子核中是否存在奇特结构等。为了解决这些问题,需要进一步开展超重原子核和新元素的研究工作。

然而,目前超重原子核和新元素的合成仍面临实验和理论两方面的诸多困难和挑战。实验上,合成截面极小对加速器和探测装置提出了极高的要求,生产稀有重铀系元素同位素靶材料迫在眉睫,如何合成丰中子的超重核和发展新的鉴别方法,都是极大的挑战。理论上,现有的模型在未知核区的预言仍然具有较大的不确定性,如何改进理论模型,减小计算结果的不确定度,也是超重核研究面临的重要问题。

日本RIKEN、俄罗斯杜布纳联合核子研究所、美国伯克利国家实验室和中国科学院近代物理研究所正在或即将进行新元素合成实验,以开启元素周期表第八周期。包括上述实验室在内的一些科研机构也在积极开展超重新核素的合成和超重原子核性质的系统研究,以拓展核素版图,探索“超重稳定岛”。成功登上“超重稳定岛”,其科学价值和社会价值都是无法估量的。

致谢 谨以此文纪念我们敬爱的赵恩广老师(1940.7.12—2024.10.14),他开启了中国科学院理论物理研究所的超重原子核与新元素研究,在我国超重原子核与新元素合成理论研究中做出了重要贡献。感谢与甘再国、郭璐、贺晓涛、黄明辉、Shivani Jain、李君清、陆晓、吕炳楠、孟杰、任中洲、王兵、王楠、王宁、许甫荣、徐瑚珊、杨华彬、张丰收、张肇西、张振华、张志远、祝龙、邹冰松、左维等的讨论。

参考文献

- [1] Are There Stable High-atomic-number Elements? Science, 2005, 309: 83; Sanders S (Eds.), Levine A G (Wr.). 125 Questions: Exploration and Discovery. Science/AAAS Custom Publishing Office & Shanghai Jiao Tong University, 2021

- [2] 周善贵. 物理, 2014, 43: 817
- [3] Indelicato P. Nature, 2013, 498: 40
- [4] Bohr N. Nature, 1939, 143: 330; Bohr N, Wheeler J A. Phys. Rev., 1939, 56: 426
- [5] Mayer M G, Jensen J H D. Elementary Theory of Nuclear Shell Structure. New York: John Wiley & Sons, 1955
- [6] 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. Nukleonika (Nucleonics), 1957, 15: 122; Werner F G, Wheeler J A. Phys. Rev., 1958, 109: 126
- [7] Myers W D, Swiatecki W J. Nucl. Phys., 1966, 81: 1; Siemens P J, Bethe H A. Phys. Rev. Lett., 1967, 18: 704
- [8] Sobiczewski A, Gareev F A, Kalinkin B N. Phys. Lett., 1966, 22: 500; Meldner H. Ark. Fys., 1967, 36: 593; Nilsson S G, Nix G R, Sobiczewskiet A *et al.* Nucl. Phys. A, 1968, 115: 545; Nilsson S G, Tsang C F, Sobiczewskiet A *et al.* Nucl. Phys. A, 1969, 131: 1; Mosel U, Greiner W Z. Physik, 1969, 222: 261
- [9] Koura H, Chiba S. J. Phys. Soc. Jpn., 2013, 82: 014201
- [10] Mo Q, Liu M, Wang N. Phys. Rev. C, 2014, 90: 024320
- [11] Rutz K, Bender M, Burvenich T *et al.* Phys. Rev. C, 1997, 56: 238
- [12] Rodríguez-Guzmán R, Humadi Y M, Robledo L M. Eur. Phys. J. A, 2020, 56: 43
- [13] Zhang W, Meng J, Zhang S *et al.* Nucl. Phys. A, 2005, 753: 106
- [14] Zhang K, Cheoun M K, Choi Y B *et al.* At. Data Nucl. Data Tables, 2022, 144: 101488
- [15] Guo P, Cao X, Chen Z *et al.* At. Data Nucl. Data Tables, 2024, 158: 101661
- [16] Li J J, Long W H, Margueron J *et al.* Phys. Lett. B, 2014, 732: 169
- [17] Patyk Z, Sobiczewski A. Nucl. Phys. A, 1991, 533: 132
- [18] 裴俊琛, 许甫荣, 吴哲英 等. 原子核物理评论, 2003, 20: 116
- [19] Facility for Rare Isotope Beams, Michigan State University. Discovery of Nuclides Project. 2025. 06. 08, <https://frib.msu.edu/public-engagement/learning-resources-and-programs/brief-history-of-rare-isotopes>
- [20] Dvorak J, Brühlle W, Chelnokov M *et al.* Phys. Rev. Lett., 2006, 97: 242501
- [21] Oganessian Y T, Utyonkov V K, Abdullin F S *et al.* Phys. Rev. C, 2013, 87: 034605
- [22] Pershina V. Theor. Comput. Chem., 2004, 14: 1
- [23] Smits O R, Düllmann C E, Indelicato P *et al.* Nat. Rev. Phys., 2024, 6: 86
- [24] Smits O R, Indelicato P, Nazarewicz W *et al.* Phys. Rep., 2023, 1035: 1
- [25] Desclaux J P. At. Data Nucl. Data Tables, 1973, 12: 311
- [26] Schleyer P. Encyclopedia on Computational Chemistry. New York: Wiley, 1998
- [27] Morss L R, Edelstein N M, Fuger J (Eds.). The Chemistry of the Actinide and Transactinide Elements. Dordrecht: Springer, 2008
- [28] 秦芝, 范芳丽 等. 核化学与放射化学, 2009, 31: 1
- [29] Gaston N, Opahle I, Gäggeler H W *et al.* Angew. Chem. Int. Ed., 2007, 46: 1663
- [30] Seth M, Faegri K, Schwerdtfeger P. Angew. Chem. Int. Ed. Engl., 1998, 37: 2493
- [31] Fricke B. Struct. Bond., 1975, 21: 89
- [32] Donnelly J, Thompson A, O' Sullivan D *et al.* Astrophys. J., 2012, 747: 40
- [33] Ter-Akopian G M, Dmitriev S N. Nucl. Phys. A, 2015, 944: 177
- [34] Flerov G N, Ter-Akopian G M. Rep. Prog. Phys., 1983, 46: 817
- [35] Marinov A *et al.* Int. J. Mod. Phys. E, 2010, 19: 01
- [36] Marinov A *et al.* Int. J. Mod. Phys. E, 2009, 18: 03
- [37] Bagulya A V, Kashkarov L L, Kononova N S *et al.* JETP Lett., 2013, 97: 708
- [38] Testov D A, Briancon C, Dmitriev S N *et al.* Phys. At. Nucl., 2009, 72: 1
- [39] Korschinek G, Kutschera W. Nucl. Phys. A, 2015, 944: 190
- [40] 周小红, 徐珊珊. 物理, 2019, 48: 640
- [41] Diamond H, Fields P R, Stevens C S *et al.* Phys. Rev., 1960, 119: 2000
- [42] 蔡善钰. 人造元素. 上海: 科学普及出版社, 2006
- [43] Zhao E G, Wang N, Feng Z Q *et al.* Int. J. Mod. Phys. E, 2008, 17: 1937
- [44] Oganessian Y. Lecture Notes in Physics, 1975, 33: 221
- [45] Oganessian Y T, Sobiczewski A, Ter-Akopian G M. Phys. Scr., 2017, 92: 023003
- [46] Kratz J V, Loveland W, Moody K J. Nucl. Phys. A, 2105, 944: 117
- [47] Zagrebaev V I, Greiner W. Nucl. Phys. A, 2015, 944: 257
- [48] Zagrebaev V I, Greiner W. Phys. Rev. C, 2013, 87: 034608
- [49] Li C, Wen P, Zhang G *et al.* Phys. Lett. B, 2018, 776: 278
- [50] Zhu L, Su J, Xie W J *et al.* Phys. Rev. C, 2016, 94: 054606
- [51] Wang N, Guo L. Phys. Lett. B, 2016, 760: 236
- [52] Zagrebaev V, Greiner W. Phys. Rev. Lett., 2008, 101: 122701
- [53] Zagrebaev V, Greiner W. J. Phys. G: Nucl. Part. Phys., 2007, 34: 2265
- [54] Thoennessen M. The Discovery of Isotopes: A Complete Compilation. Springer, 2016
- [55] Hofmann S, Munzenberg G. Rev. Mod. Phys., 2000, 72: 733
- [56] Oganessian Y T, Sobiczewski A, Ter-Akopian G M. Phys. Scr., 2017, 92: 023003
- [57] Oganessian Y T, Utyonkov V K. Rep. Prog. Phys., 2015, 78: 036301
- [58] Rudolph D, Forsberg U, Golubev P *et al.* Phys. Rev. Lett., 2013, 111: 112502
- [59] Morita K, Morimoto K, Kaji D *et al.* J. Phys. Soc. Jpn., 2004, 73: 2593
- [60] Khuyagbaatar J, Yakushev A, Düllmann C H E *et al.* Phys. Rev. Lett., 2014, 112: 172501
- [61] Karol P J, Barber R C, Sherrill B M *et al.* Pure Appl. Chem., 2016, 88: 155
- [62] Zhou S G. Nucl. Data News, 2017, 118: 12
- [63] 全国科学技术名词审定委员会. 中国科技术语, 2011, 13: 62
- [64] 全国科学技术名词审定委员会. 中国科技术语, 2013, 15: 60
- [65] 孟旭, 赵恩广, 周善贵. 物理, 2014, 43: 215
- [66] 全国科学技术名词审定委员会. 中国科技术语, 2016, 18: 25

[67] 甘再国, 黄文学, 徐珊珊 等. 物理, 2024, 53: 803
 [68] Morita K. Nucl. Phys. A, 2015, 944: 30
 [69] Lu B N, Zhao E G, Zhou S G. Phys. Rev. C, 2012, 85: 011301(R)
 [70] Lu B N, Zhao J, Zhao E G *et al.* Phys. Rev. C, 2014, 89: 014323
 [71] Wang N, Liu M, Wu X *et al.* Phys. Lett. B, 2014, 734: 215
 [72] Perera U C, Afanasjev A V, Phys. Rev. C, 2022, 106: 024321
 [73] Ren Z, Toki H. Nucl. Phys. A, 2001, 689: 691
 [74] Chen Y S, Gao Z C. Nucl. Phys. Rev., 2013, 30: 278
 [75] Xu F R, Zhao E G, Wyss R *et al.* Phys. Rev. Lett., 2004, 92: 252501
 [76] Herzberg R D, Greenlees P T, Butler P A *et al.* Nature, 2006, 442: 896
 [77] Feng Z Q, Jin G M, Huang M H *et al.* Chin. Phys. Lett., 2007, 24: 2551
 [78] Shen C W, Abe Y, Boilley D *et al.* Int. J. Mod. Phys. E, 2008,

17: 66
 [79] Zagrebaev V, Greiner W. Phys. Rev. C, 2008, 78: 034610
 [80] Liu Z H, Bao J D. Phys. Rev. C, 2009, 80: 034601
 [81] Adamian G G, Antonenko N V, Scheid W *et al.* Nucl. Phys. A, 1998, 633: 409
 [82] Li J Q, Feng Z Q, Gan Z G *et al.* Nucl. Phys. A, 2010, 834: 353c
 [83] Siwek-Wilczynska K, Cap T, Kowal M *et al.* Phys. Rev. C, 2012, 86: 014611
 [84] Nasirov A K, Mandaglio G, Giardina G *et al.* Phys. Rev. C, 2011, 84: 044612
 [85] Wang N, Zhao E G, Scheid W *et al.* Phys. Rev. C, 2012, 85: 041601(R)
 [86] Zhu L, Xie W J, Zhang F S. Phys. Rev. C, 2014, 89: 024615
 [87] Zhang M H, Zhang Z Y, Gan Z G *et al.* Nucl. Sci. Tech., 2025, 36: 204

悟理小言

诺贝尔奖 vs 产业

我在“固体中电子隧穿研究的奇妙旅程”(《物理》2025年4期285页)文中提到, 贾埃弗认为中国和韩国患有诺贝尔奖焦虑症。最近, 正巧在搜罗江崎玲于奈的科研人生资料时, 读到他执掌日本筑波大学后, 有一段关于“获得诺贝尔奖”与“成就产业”两者之间不同性质的鲜明对比解说, 如图所示。

江崎说, 就某一特定领域而言, 最终能否获得诺贝尔奖的原因, 来自于是否创造了影响深远的庞大“知识量”(左边纵轴); 最终能否成就产业的原

因, 则来自于是否创造了巨大“财富”(右边纵轴)。无论何者, 获得成功都需要创新性、突破性、先机性, 甚至运气, 以及漫长时间的累积和等待/煎熬(横轴)。而最初开风气之先的, 通常是“革命性”的突破, 如图中两条曲线底部的几段跳跃式上升, 那是来自极少数人的贡献。

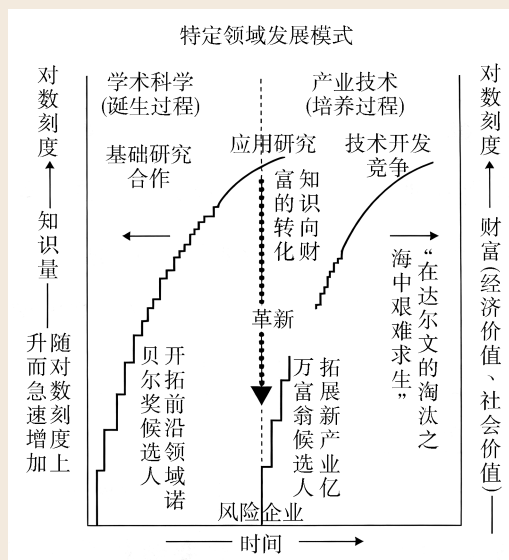
做出突破性知识量的人位于图中左下角位置, 做出创新性财富(以风险企业为代表)的人位于图中垂直虚线下方。经过漫长时间的挑战与考验, 成功的前者可能获得诺贝尔奖, 成功的后者可能成为亿万富翁。前者的主考官来自学术界, 后者的主考官来自市场。无论来自前者或是后者, 最终成功者都是极少数中的少数, 他们是艰辛的幸运儿。

就领域成长而言, 基础研究成熟之后(左半图曲线顶部的平缓上升时期), 才会进行应用研究(图中央虚线), 这是革新知识开始向财富转化的阶段。接下来, 应用研究成熟之后(右半图曲线顶部的平缓上升时期), 才会进行技术开发。所以一个领域的三个发展阶段是: 基础研究→应用研究→技术开发。

参与前一项竞赛的大多数算是成功者(非那些极少数获得诺贝尔奖的最成功者), 可能成为大学或研究机构中的学者。参与后一项竞赛者, 或许面对的是更加残酷的考验, 成为了一将功成万骨枯的被淘汰遗忘者; 而未被大浪淘走的(非那些极少数成为亿万富翁者), 则可能获得较优渥的收入。

所以, 追求知识与追求财富有本质上的区别, 虽未必水火不相容, 但基本上是鱼与熊掌甚难得兼。

(台湾阳明交通大学 林志忠 供稿)



关于“获得诺贝尔奖”与“成就产业”之间的关系(图片取自江崎玲于奈著、姜春洁译的《挑战极限: 诺贝尔物理学奖获得者的传奇人生》, 北京中信出版社, 2012年)

更低的抖动，更多的通道，更快的边缘

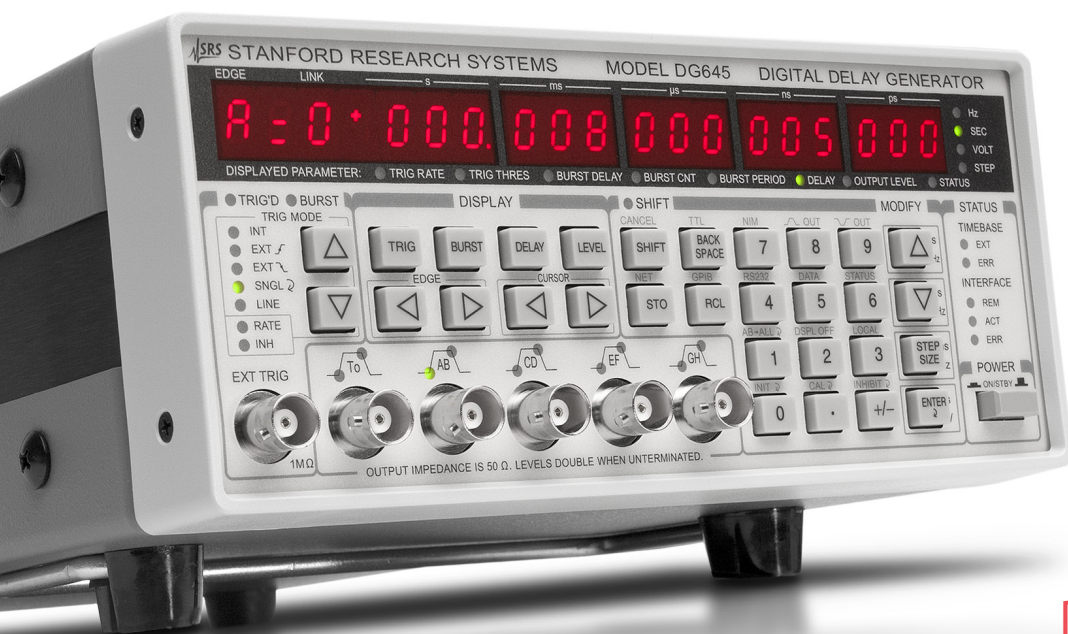
DG645 延时发生器...SRS独家提供

- ▶ 多达8个输出通道
- ▶ 延迟和脉宽控制
- ▶ <25ps抖动
- ▶ 1ns上升/下降时间
- ▶ 触发频率达10MHz
- ▶ 精密触发速率发生器
- ▶ 外部触发的突发模式
- ▶ GPIB, RS-232和以太网接口

DG645产生四个独立的脉冲输出—每个具自控延迟，脉冲宽度，振幅，及BNC输出通道。外部触发与任何输出之间抖动小于25 ps, 通道间抖动小于15 ps。其内置触发速率发生器提供小于100 ps 的时钟抖动。

10 MHz参考输入/输出可让您与锁模激光器或其他时基同步，选件铷钟或晶体时基可进一步提高精确度降低抖动。

DG645亦可用选配件拓展至几种不同组合设置的八通道输出。



DG645 ...\$5495 (全球通价格)



Stanford Research Systems

1290-D Reamwood Ave. Sunnyvale, CA 94089 · www.thinkSRS.com
Phone (408) 744-9040 · Fax (408) 744-9049 · info@thinkSRS.com

先锋科技股份有限公司
电话: 86-10-6263-4840
传真: 86-10-8261-8238
Email: sales@teo.com.cn

欧陆科技有限公司
电话: 86-10-6800-8213/16/17
传真: 86-10-6800-8212
Email: euro-tech.bj@euro-tech.com

北京东方科泰科技发展有限公司
电话: 86-10-5129-4988
传真: 86-10-5824-6090
Email: sales@bost-ltd.com



请扫描二维码了解更多详情