

## 同核异能素百年回顾

(北京大学 王一平、孟杰 摘译自 Philip Walker, Zsolt Podolyák. *Physics World*, 2021, (4): 29)

同核异能素指原子核的长寿命激发态，通常发生 $\gamma$ 跃迁、 $\beta$ 衰变、裂变、 $\alpha$ 衰变、质子发射等衰变。原子核激发态的半衰期常不到1 ps。寿命多长才能被称为同核异能素并无统一界定。一般认为，为了能够计数，同核异能素的半衰期应该长于1 ns。同核异能素通常可以通过重核裂变、重离子反应、超强激光等方法产生。自同核异能素被发现以来的一个世纪，核物理学家已经发现了近2500种半衰期大于10 ns的原子核激发态。

### 发现

同核异能素由德国科学家奥托·哈恩于1921年在柏林的凯撒威廉化学研究所发现。哈恩和他的同事莉泽·迈特纳系统地研究了铀-238衰变到稳定的铅-206的复杂过程。哈恩发现，他当时称为UI的铀-238，可以通过发射 $\alpha$ 粒子形成

UX<sub>1</sub>(钍-234)，然后通过 $\beta$ 衰变，跃迁到UZ(镭-234的基态)或者UX<sub>2</sub>(镭-234的激发态)。换句话说，哈恩发现镭-234原子核有两个不同的态：半衰期为7小时的基态和半衰期为1分钟的激发态(图1)。

哈恩关于同核异能素的发现是否受到英国化学家弗雷德里克·索迪的启发，至今尚未定论。当时，科学家广泛接受的概念是英国化学家索迪发现的同位素，即具有相同的质子数、不同的中子数(当时中子尚未被发现)的原子核。在1917年发表的论文中，索迪假定存在“具有相同原子量以及化学性质，但是稳定性及破裂模式不同的同位素”。原则上，索迪已经预言了同核异能素。

哈恩的工作标志着同核异能素的发现。然而，直到1932年詹姆斯·查德威克发现中子，同核异能素的概念才被真正理解。1934年，同核异能素一词才出现在理论物理学家乔治·伽莫夫的论文中。

1936年，德国物理学家卡尔·冯·魏茨泽克给出了同核异能素的合理的解释。他意识到，所有原子核都有角动量或自旋，质子和中子轨道组合，会形成不同的原子核自旋态。这类类似于不同原子空间分布的化学异构体。如果激发态与基态

的自旋很不相同，它需要很长时间发射 $\gamma$ 射线衰变到基态。如镭-234的两个态，自旋相差四个单位( $4\hbar$ )。这使 $\gamma$ 衰变如此之慢，以至激发态更可能发生 $\beta$ 衰变。

### 科学意义

同核异能素在核物理研究中有重要意义。原子核的壳模型于1949年，分别由玛丽亚·梅耶以及奥托·哈克塞尔、汉斯·詹森和汉斯·休斯独立建立。正如原子壳层只能容纳一定数目的电子，原子核壳层中能够容纳的中子和质子数同样有限制。填满第1个壳是两个核子，填满后续的壳，对应的核子数被称为“幻数”，依次为8、20、28、50、82等。但是，原子核和电子的壳层模型不完全一样。电子之间的自旋-轨道力为弱排斥力，核子之间的自旋-轨道力为强吸引力。这种差别将影响自旋结构，特别是同核异能素的形成。

近年来，核物理学家发现质子幻数依赖于原子核中的中子数。反之，中子幻数也依赖于原子核中的质子数。在稳定原子核中是幻数，而在不稳定的原子核中可能不再是幻数。这促使我们考虑构建不稳定原子核的结构模型。对此，同核异能素非常重要。

探索元素存在的极限，是核物理学家的一个梦想。原子序数等于或大于104的元素称为超重元素。超重元素对原子核物理、分子物理和化学都有重要意义。超重元素的寿命很短，在自然界不存在，只能通过熔合反应在实验室合成。目前

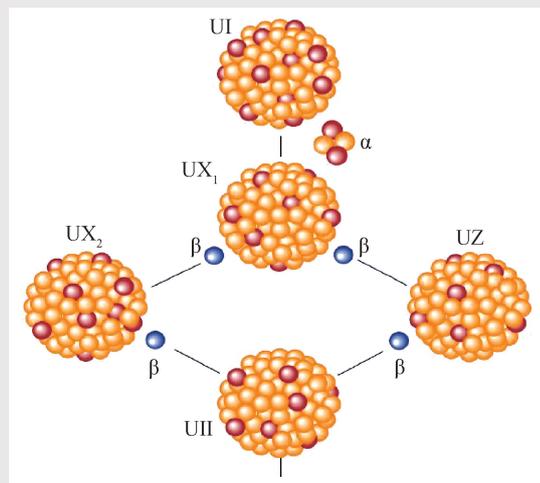


图1 UI(铀-238)的衰变过程。UI发射 $\alpha$ 粒子形成UX<sub>1</sub>(钍-234)，然后发生 $\beta$ 衰变，跃迁到UZ(镭-234的基态)或UX<sub>2</sub>(镭-234的激发态)，UZ和UX<sub>2</sub>发生 $\beta$ 衰变形成UII(铀-234)

合成的最重元素原子序数为118。具有同核异能素的最重元素是铽，原子序数为110。铽-270同核异能素的半衰期为4 ms，比半衰期为0.2 ms的基态更稳定。这表明同核异能素在超重元素合成中有极其关键的作用。

太阳系中，约一半比铁重的元素是在恒星碰撞或爆炸中合成的。尽管有争议，但是中子星合并和超新星爆炸是最可能的天体环境。在这样极端的天体环境中，将产生自然界不存在的极端中子—质子比的原子核。不过，少数极端中子—质子比的原子核可以在实验室产生。如同核异能素钷-128m，它的半衰期为6  $\mu$ s。这个时间足以将它从加速器移至低本底环境进行研究。研究表明，82依旧是幻数，钷-128m在恒星爆炸的元素合成中有重要作用。

### 应用

除了上述科学意义，当半衰期大于1 s时，同核异能素在医学成像、核电池、超精度钟表、 $\gamma$ 射线激光等领域有很高的实用价值。

**医学成像：**在医学上，放射性同位素可用于诊断和治疗(图2)。应用最广泛的是铟-99的一种同核异能素，每年达2000万例。它只发射能量为141 keV的单一 $\gamma$ 射线，没有伴随的 $\beta$ 粒子，对成像非常理想。同时，它的半衰期为6小时，足够扫描特定器官，并在短时间衰变，从而减小对患者的辐射剂量。作为所关注器官的亲分子的一部分，它被引入人体用作骨骼、大脑和心脏扫描的示踪器。然而，它的快速衰变使它不能被存储，这迫使医院订购其母核钼-99。在核反应堆中，钼-99通过铀-235裂变产生，半衰期为66小时。钼-99衰变产生铟-99，医院通过化学方法，从钼铟混合物

中提取铟-99。

**核时钟：**钷-229是目前已知能量最低的同核异能素，为8.1 eV，对应波长为150 nm的光。测量该激发能至今仍是挑战，需要发展新型的辐射探测器。电中性的钷-229原子，半衰期仅为7  $\mu$ s，理论预测它的离子半衰期比它长若干个量级。于是，物理学家提出许多可能的应用，包括建造比所有已知时钟更精确的时钟、研究基本的自然常数是否随时间改变等。

**核电池：**同核异能素中，每原子储存的能量为几个MeV，可通过光照射释放，从而用于制造一种新型的超级电池。天然存在的一个同核异能素钷-180m，是目前已知的寿命最长的同核异能素，其半衰期比宇宙年龄还长，激发能为75 keV，可通过1 MeV的光照射释放能量。由于钷-180m需要的照射能量太高，另一个选择是钷-93同核异能素。它储存的能量为2425 keV，可通过5 keV的光照射释放。然而，它的半衰期只有7小时。因此，科学家又转向钷-242同核异能素。它储存的能量为49 keV，半衰期为141年，其能量可以通过4 keV的光照射释放。

**$\gamma$ 射线激光：**把原子核处于同核异能态的铯原子气体冷却到100 nK，形成玻色—爱因斯坦凝聚，从而产生一种新的物态。这些原子将处于能量最低的“凝聚态”，但原子核处于激发态。这是一种违反直觉的奇异物态。通过聚焦同核异能素衰变时放出的相干 $\gamma$ 射线，可以制造“ $\gamma$ 射线激光”。目前，这种“ $\gamma$ 射线激光”还没有制造出来。

### 现状和展望

一个世纪过去了，关于同核异能素还有很多问题有待研究。前面



图2 同核异能素用于诊断和治疗。同核异能素作为所关注器官亲分子的一部分被引入人体，用作扫描示踪器

提到，原子核自旋发生大的改变，可能会形成同核异能素。自旋是矢量，有大小和方向。事实上，存在一种改变自旋方向的同核异能素——“K-同核异能素”。自1955年被诠释以来，至今已有100多种。通常存在于橄榄球形的重原子核中，自旋指向原子核的长轴，衰变后自旋与长轴垂直。

还有一种同核异能素——“形状同核异能素”，当衰变到基态时，形状发生显著改变，如从球形变成椭球。自20世纪60年代初被发现以来，至今已有约50种。在很重的原子核中，还存在它的一个分支——“裂变同核异能素”，衰变时自发裂变成两个较轻的原子核。由于裂变限制了原子核质量的上限，裂变同核异能素对理解重核的稳定性至关重要。

目前，最重元素的原子序数为118，以物理学家尤里·奥加涅相的姓氏命名。同核异能素可以帮助我们发现更重的元素，理解恒星爆炸、生命元素的合成，打开了我们了解自身起源的一扇窗户。