

^{132}Sn 附近原子核的辛弱数同核异能态与 $N=82$ 壳演化研究进展

罗迪雯¹, 张集智¹, 李智焕^{1*}, 程奕源², 华辉¹

1. 北京大学物理学院, 核物理与核技术全国重点实验室, 北京 100871

2. 华东师范大学物理与电子科学学院, 上海 200241

* 联系人, E-mail: zhli@pku.edu.cn

2025-08-29 收稿, 2025-10-24 修回, 2025-10-28 接受, 2025-10-29 网络版发表

国家重点研发计划(2022YFA1602302)和国家自然科学基金(U2167201, 12035001)资助

摘要 远离 β 稳定线的原子核壳演化一直是核物理领域的热点研究课题. 近年来, 同核异能态, 尤其是半幻核中的辛弱数同核异能态, 成为了原子核壳演化研究中一个非常重要的探针, 能够直观反映壳结构的稳定性. 对于丰中子双幻核 ^{132}Sn 核区, 研究表明 $N=82$ 闭壳随着原子核靠近中子滴线有显著减小甚至完全消失的趋势, 而 $N=82$ 壳具体在哪个位置消失目前还未可知. 本文介绍了 ^{132}Sn 核区 $^{136,138}\text{Sn}$, ^{128}Pd , ^{130}Cd , ^{128}Ag 核中发现的辛弱数同核异能态以及 $N=82$ 壳演化研究进展. 其中, 我们实验团队开展了对丰中子奇奇核 ^{128}Ag 核的衰变谱学实验研究, 发现 ^{128}Ag 具有辛弱结构的同核异能态, 其衰变路径与邻近单幻偶偶核 ^{128}Pd 和 ^{130}Cd 中的结构非常相似. 对比邻近的同中子核 ^{130}In , 一个重要的发现是它们最低的 9^- 和 10^- 能级次序出现了反转. 我们利用壳模型对 ^{128}Ag 核中同核异能态的结构特性进行了研究. 在不考虑质子 $Z=50$ 和中子 $N=82$ 跨壳激发的情况下, 壳模型计算结果很好地解释了实验观察到的 ^{128}Ag 核中同核异能态的结构和衰变路径. 通过分析质子-中子相互作用的不同成分, 发现同中子核 ^{128}Ag 和 ^{130}In 中出现的 9^- 和 10^- 能级反转现象可以归因于质子-中子相互作用中辛弱数不守恒的成分. 研究结果有力支持了中子 $N=82$ 主壳在银同位素中的稳定性.

关键词 幻数, 同核异能态, 辛弱数, 质子-中子相互作用, $N=82$ 壳

原子核是由强相互作用的质子和中子构成的量子多体系统, 其稳定性与核子数目密切相关. 当核子数为2, 8, 20, 28, 50, 82及126时, 系统表现出额外的稳定性, 这些数字被称为“幻数”, 通过引入自旋-轨道耦合的壳模型成功解释了这些幻数^[1,2]. 早期, 对原子核壳效应的研究主要集中在 β 稳定线附近的核素, 闭壳外存在少数粒子或空穴, 其简化的组态显著降低了量子多体问题的复杂性, 为理解原子核结构提供了关键基础. 随着放射性束物理的发展, 研究范围已扩展到远离 β 稳定线的核区. 在轻丰中子核区, 研究发现一些传统中子幻数消失, 同时观测到新的中子幻数, 这些新现象引起了广

泛关注^[3-5]. 在更重的丰中子核区, 幻数(如 $N=82$, 126)是否会发生类似的壳演化, 仍是一个亟待探索的科学问题.

能够反映极端条件下原子核壳演化的实验可观测量有原子核质量、 β 衰变半衰期等基态性质, 还有第一个 2^+ 态的激发能等谱学信息. 原子核的质量不仅直接反映了核结合能的特点, 还能提供壳层结构、对能和核子-核子相互作用的关键信息. 在过去一个多世纪里, 人们发展了各种质量测量技术, 其中潘宁阱、储存环和多反射飞行时间质谱仪等高精度质谱仪已被用于测量远离 β 稳定线原子核的质量. 最近, Ge等人利用韦斯

引用格式: 罗迪雯, 张集智, 李智焕, 等. ^{132}Sn 附近原子核的辛弱数同核异能态与 $N=82$ 壳演化研究进展. 科学通报, 2026, 71: 874–882

Luo D, Zhang J, Li Z, et al. Progress on seniority isomers in the nuclei near ^{132}Sn and $N=82$ shell evolution (in Chinese). Chin Sci Bull, 2026, 71: 874–882, doi: [10.1360/CSB-2025-5441](https://doi.org/10.1360/CSB-2025-5441)

屈莱大学加速器实验室的同位素分离在线装置(IGI-SOL)和JYFLTRAP彭宁阱质谱仪对 ^{100}Sn 附近的基态 $^{95-97}\text{Ag}$ 核以及 ^{96}Ag 同核异能态进行了高精度质量测量^[6], 新测得的质量反映了银同位素中 $N=50$ 中子壳层的稳定性, 同时验证了 $N=Z$ 线附近最新的*ab initio*方法、密度泛函理论和壳模型的适用性. β 衰变半衰期的长短反映的是原子核通过 β 衰变达到更稳定状态的速度, 与原子核的结构和相互作用密切相关. 处于幻数附近的原子核, 由于其核结构相对稳定, 因此半衰期相对较长. 例如, Xu等人在日本理化学研究所RIBF装置上新测量了20个丰中子核($Z=27\sim 30$)的半衰期^[7], 系统研究了这一系列相邻原子核的 β 衰变半衰期随中子数变化的规律. 结果显示在质子数 $Z=28$ 、中子数 $N=50$ 处, β 衰变半衰期的斜率变化最明显, 表明 ^{78}Ni 很好维持了其双幻数性质. 第一个 2^+ 态的激发能指的是原子核从基态 0^+ 跃迁到第一个 2^+ 激发态所需的能量, 幻数附近的原子核由于核子填满了壳层, 基态接近球形, 壳层间隙较大, 跨壳形成激发态所需要的能量就越大, 因此第一个 2^+ 激发能的大小可以直接反映原子核幻数的消失和出现. 例如, 人们在 $^{24}\text{O}(N=16)$, $^{52}\text{Ca}(N=32)$, $^{54}\text{Ca}(N=34)$ 和 $^{68}\text{Ni}(N=40)$ 中观测到第一个 2^+ 态的激发能明显偏高, 暗示了新幻数16, 32, 34和40的出现^[4]. 近年来, 在幻数附近的谱学研究中, 同核异能态(isomer)日益成为原子核壳演化一个重要的探针, 尤其是辛弱数同核异能态.

1 辛弱数同核异能态

原子核的同核异能态一般是指寿命较长的激发态, 通过测量其衰变性质可以提供有关原子核结构及壳演化的重要信息^[8]. 根据同核异能态在跃迁过程中所涉及的阻碍机制, 主要分为形状同核异能态(shape isomer)、自旋同核异能态(spin isomer)和 K 同核异能态(K isomer)^[8-10]. 对于shape isomer来说, 退激过程受阻是因为初、末态原子核形状发生变化. 原子核在形变拉伸的过程中, 势能面存在第二个能量极小值, 第一能量极小值为基态, 这种退激过程依赖量子隧穿效应, 发生概率小, 退激困难, 导致了原子核shape isomer的形成^[10]. 重核中的裂变同核异能态(fission isomer)属于shape isomer的一种, 其衰变过程表现为发射 γ 射线跃迁到基态和自发裂变成两个更轻的核之间的竞争, 比较典型的是 ^{242}Am 核^[11], 其fission isomer的寿命长达14 ms. Spin isomer形成的原因在于原子核激发态退激时发射的 γ 射线具有较高的多极性, 使得衰变过程变得缓慢, 比

如 $^{180\text{m}}\text{Ta}$ ^[10], 由 $J^\pi=9^-$ 能级处跃迁到基态 $J^\pi=1^+$, 自旋改变量 $\Delta I=8$, 其 9^- 能级寿命大于 7×10^{15} 年. K isomer主要出现在轴对称的形变核中, 并且形状为长椭或扁椭球. K 是一个量子数, 指的是指总角动量在对称轴上的投影. 在此类核中, 原子核激发态的衰变不仅取决于核自旋的大小, 还取决于核自旋矢量的方向. K 在衰变前后的变化值 ΔK 如果大于 γ 衰变的多级性 λ 时, 跃迁就会受阻, 形成 K isomer. 例如在 $^{180\text{m}}\text{Hf}$ ^[12]中, 存在一个1.1 MeV能级的 $I=8^-$ 和 $K=8$ 的isomer, 半衰期为5.5 h, 通过一个58 keV, $\lambda=1$ 的跃迁到一个 $I=8^+$, $K=0$ 的态, 此时 $\Delta K=8$, 显然违反了 $\lambda>\Delta K$ 的跃迁条件.

辛弱数同核异能态(seniority isomer)是spin isomer的一种特殊类型, 其形成机制与核子对关联效应密切相关. 辛弱数(seniority, ν)定义为单 j 轨道上未能配对耦合角动量 $J=0$ 的核子数^[13]. 在半幻偶核中, $\nu=2$ 的同核异能态是最典型且可预测的情形, 在高 j 轨道上, 两个全同粒子组态可以耦合为 $I=0$ 至 $I=2j-1$ 之间的偶自旋态, 如图1(a)所展示的两个核子占据 $j=9/2$ 轨道时的能级结构^[14]. 当其处于基态时, j 轨道上所有价核子配对, 辛弱数 $\nu=0$; 当其在转晕态时, 一对价核子破对, $\nu=2$. 由于原子核从最高自旋态 $2j-1$ 向 $2j-3$ 态跃迁的 γ 能量通常较低, 导致其通过 $E2$ 跃迁退激时常形成寿命在10 ns~100 μs 范围内的seniority isomer^[15-17]. 对于 n 个核子占据高 j 轨道的情况, 若 $E2$ 跃迁满足辛弱数守恒($\Delta\nu=0$), 则激发态的能量与 n 无关^[15], 且 $E2$ 跃迁强度 $B(E2)$ 值正比于 $[(2j+1)/2-n]^2$. 当价核子占据高 j 轨道接近半满, 即 $n=(2j+1)/2$ 时, $B(E2)$ 显著减弱, 呈现U型分布, 如图1(b)所示. 与此形成对比的是辛弱数不守恒的 $E2$ 跃迁($\Delta\nu=2$), $B(E2)$ 值正比于 $(2-\nu+n)(2j+3-\nu-n)$, 随着 n 变化呈倒U型分布, 并在中壳层处达到最大值^[18].

目前已在不同核区半幻核的特定轨道上观测到了seniority isomer, 包括 $\pi g_{9/2}$ 壳层轨道上的 $N=50$ 同中子素^[19]、 $\pi g_{9/2}$ ^[20,21]和 $\pi h_{11/2}$ ^[22]壳层轨道上的 $N=82$ 同中子素、 $\pi h_{9/2}$ ^[23]与 $\pi h_{11/2}$ ^[24]壳层轨道上的 $N=126$ 同中子素、 $\nu g_{9/2}$ 次壳层中的Ni同位素^[25,26]、 $\nu f_{7/2}$ 次壳层中的Sn同位素^[27], 以及 $\nu g_{9/2}$ 次壳层中的Pb同位素^[28]. 这些核素展现出高度相似的能级结构及相应的U型 $B(E2)$ 分布, 表明 $\pi g_{9/2}$ 轨道与其他轨道之间基本不发生混合, 且辛弱数被认为近似守恒. 由于 $B(E2)$ 值对不同壳层轨道组态混合的敏感性很高, 若壳层间隙减小, 增强的质子-中子相互作用可能诱发核子跨壳激发, 使原子核表现出集体行为, 此时 $B(E2)$ 值的变化趋势可能会偏离辛弱数

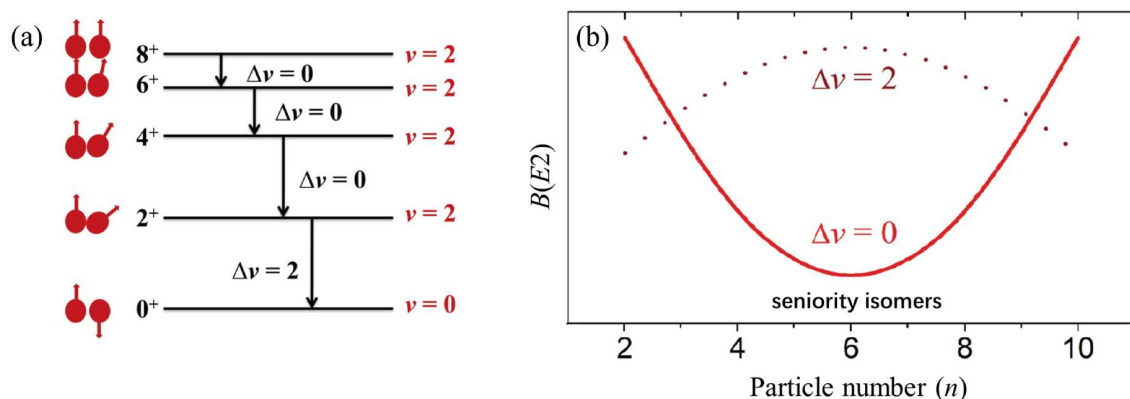


图1 (a) 单壳 $(9/2)^2$ 组态的能级结构和(b)电四极约化跃迁强度 $B(E2)$ 值随 $j=9/2$ 轨道粒子占据数变化示意图^[14]

Figure 1 (a) Schematic level scheme for $(9/2)^2$ configuration in single-j shell and (b) variation of the reduced transition probabilities $B(E2)$ value with the occupied number of particles in the $j=9/2$ shell^[14]

的结构特征。因此,在原子核弱束缚区域, seniority isomer的能级结构以及 $B(E2)$ 值的U型分布不仅能够反映壳结构的稳定性,也可作为验证壳模型在这些核区适用性的重要依据^[6]。

2 ^{132}Sn 附近原子核的辛弱结构与壳演化

近年来,丰中子核 ^{132}Sn ($Z=50$, $N=82$)附近区域的壳演化成为研究热点。理论预言 $N=82$ 壳层能隙会随着原子核逐渐靠近中子滴线显著减小,幻数82会逐渐消失^[29-31]。Jungclaus和Watanabe等人通过衰变谱学实验,在 $N=82$ 同中子素 ^{130}Cd 和 ^{128}Pd 中观测到了 8^+ 的 seniority isomer^[20,21],其衰变的能级结构非常相似,第一个 2^+ 激发态能量相对其他同位素较高,且 $B(E2; 8^+ \rightarrow 6^+)$ 跃迁强度值符合U型分布特征,表明 $N=82$ 闭壳在Cd和Pd同位素中仍保持显著的稳定性。目前该丰中子区其他不同 Z 同位素中的同核异能态等谱学数据仍比较缺乏, $N=82$ 壳具体消失的位置尚未明确。研究 $N=82$ 壳的演化规律具有双重重要意义:在核结构方面,它关乎极端条件下壳模型的有效性;在核天体物理方面,该区域正好位于快中子俘获过程(r 过程)路径上,其壳结构性质、核质量、 β 衰变率等参数直接影响 r 过程模拟的准确性,对理解太阳系元素丰度分布中 $A \sim 130$ 峰的成因至关重要^[32-34]。因此,这一区域是当前实验和理论研究的重点关注对象。我们研究团队在这个核区之前已经开展了一些相关工作,通过对 ^{123}Pd 和 ^{125}Pd 核的 β 衰变实验研究,在衰变子核 ^{123}Ag 和 ^{125}Ag 的低激发态中首次观测到具有 β 放射性的同核异能态。实验结果表明,在 $N=82$ 附近,相比 $N=50$ 处,奇质量Ag同位素中由 $\pi g_{9/2}$ 和 $\pi p_{1/2}$ 两个

轨道形成的 $Z=40$ 亚闭壳能隙呈现显著减小的特征,这一现象通过壳模型计算得到验证,研究发现张量力对Ag同位素中 $\pi g_{9/2}$ 和 $\pi p_{1/2}$ 轨道以及 $Z=40$ 亚闭壳能隙在接近 $N=82$ 时的演化起着决定性的作用^[35,36]。由于 ^{132}Sn 附近原子核的研究主要集中在偶偶核和奇 A 核,对奇奇核的系统研究相对匮乏。奇奇核有独特的结构特征:其最外层的价中子和价质子均处于未配对状态,辛弱数可能会增加,组态混合也会增加,这为研究质子-中子相互作用在 $N=82$ 壳层演化中的作用机制提供了理想的研究条件,且对于深入理解极端中子过剩条件下理论模型的修正和拓展具有重要意义。

本文主要聚焦丰中子 ^{132}Sn 核区,介绍 $^{136,138}\text{Sn}$ ^[27], ^{128}Pd ^[21], ^{130}Cd ^[37], ^{128}Ag ^[38]核中发现的辛弱数同核异能态以及 $N=82$ 壳演化研究进展。这些核的衰变实验都是在日本理化学研究所(RIKEN)的放射性核束装置(RIBF)^[39]上完成的,利用345 MeV/核子的 ^{238}U 束流轰击 ^9Be 靶,产生大量的丰中子碎裂产物。借助BigRIPS和ZeroDegree谱仪,对生成的碎裂产物进行分离、提纯和鉴别。相关目标核被注入到阻停探测器WAS3ABi阵列中。除了测量注入粒子的信息,WAS3ABi阵列同时测量衰变出射的 β 粒子,环绕WAS3ABi阵列四周的EURICA探测器阵列测量衰变过程中放出的 γ 射线,具体的实验描述见文献^[40]。

2.1 $^{136,138}\text{Sn}$ 中的 6^+ seniority isomer

在辛弱数框架下,当Sn丰中子同位素的中子处于跨过 $N=82$ 壳的 $\nu f_{7/2}$ 轨道上时,理想情况下会形成一个纯中子激发的 6^+ isomer(辛弱数 $\nu=2$),Korgul等人首先

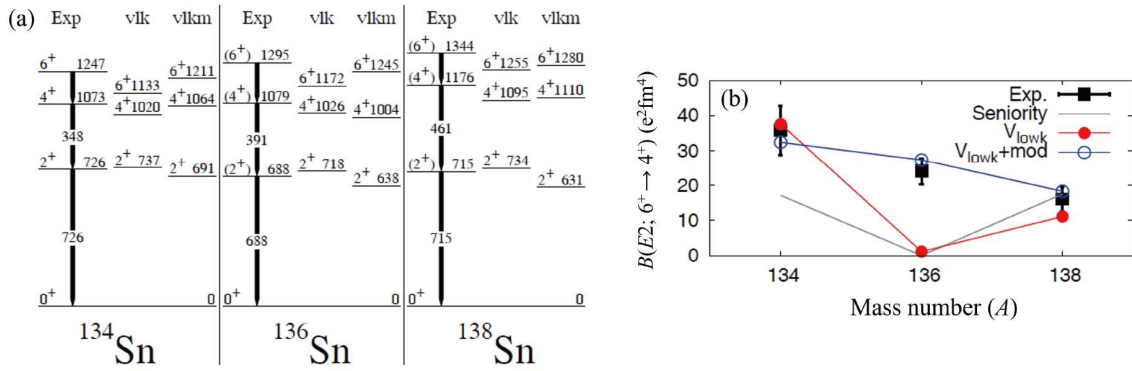


图 2 (a) $^{134,136,138}\text{Sn}$ 部分能级结构的实验值和理论值. (b) Sn 同位素中的 $B(E2; 6^+ \rightarrow 4^+)$ 约化跃迁强度值, 壳模型计算结果中现实有效相互作用和修正的相互作用分别用 $V_{\text{low-k}}$ (vlk) 和 $V_{\text{low-k}} + \text{mod}$ (vlkm) 表示^[27]

Figure 2 (a) Experimental and theoretical partial level schemes of $^{134,136,138}\text{Sn}$. (b) Reduced transition probabilities $B(E2; 6^+ \rightarrow 4^+)$ in the Sn isotopes. The results of shell-model calculations using the realistic effective interaction and modified interaction are labeled with $V_{\text{low-k}}$ (vlk) and $V_{\text{low-k}} + \text{mod}$ (vlkm), respectively^[27]

在 ^{134}Sn (^{248}Cm 源自裂变产生) 中观察到了这个 isomer^[41]. 随后, Simpson 等人利用 RIKEN 的 RIBF 装置在 ^{136}Sn 和 ^{138}Sn ^[27] 中也观测到了 6^+ seniority isomer 以及衰变产生的级联 γ 射线, ^{136}Sn 和 ^{138}Sn 的 6^+ isomer 的半衰期分别为 46(7) ns 和 210(45) ns. 如图 2(a) 所示, ^{134}Sn , ^{136}Sn 和 ^{138}Sn 中实验观测到的 2^+ , 4^+ , 6^+ 态的能量随中子数变化近乎不变, 其能级结构与壳模型计算预测值也相符合, 其中理论计算采用的是基于 CD-Bonn 势的 $V_{\text{low-k}}$ 有效相互作用, 壳模型空间取的是 $0h9/2$, $2p_{3/2}$, $2p_{1/2}$, $1f_{7/2}$, $1f_{5/2}$ 和 $0i_{13/2}$ 中子轨道. 然而, 从图 2(b) 中可以看到 ^{136}Sn 中实验提取的 $B(E2; 6^+ \rightarrow 4^+)$ 跃迁强度值偏离了单纯的辛弱数框架和理论计算值, 通过调整 $v_{f_{7/2}}^2$ 矩阵元, 降低了中子配对作用强度, 重现了 ^{136}Sn 观测到的 $B(E2; 6^+ \rightarrow 4^+)$ 跃迁强度值. 这项工作揭示了极端丰中子区核子配对机制的复杂性, 可以作为检验该核区壳模型相互作用适用性的基准.

2.2 ^{128}Pd 和 ^{130}Cd 中的 8^+ seniority isomer

Watanabe 等人研究了 ^{128}Pd 和 ^{126}Pd 的谱学信息^[21]. ^{128}Pd 作为 r 过程等待点关键核素, 新发现的 8^+ seniority isomer 半衰期为 5.8(8) μs , 其能级结构和之前 GSI 研究过的 $N=82$ 同中子素 ^{130}Cd ^[20] 非常相似, 如图 3(a) 所示, 符合质子 $\pi g_{9/2}$ 轨道上 $v=2$ 的辛弱数结构特征. ^{128}Pd 和 ^{130}Cd ($N=82$) 中第一个 2^+ 态的能量分别为 1311 和 1325 keV, 显著高于 ^{126}Pd 和 ^{128}Cd ($N=80$) 中的 693 和 646 keV, 表明 $N=82$ 壳在 Pd 和 Cd 同位素中依然是保持的. 图 3(b) 展示了 $N=50$ 和 $N=82$ 同中子素的 $B(E2; 8^+ \rightarrow 6^+)$ 跃迁强度值,

$N=50$ 同中子素的 $B(E2; 8^+ \rightarrow 6^+)$ 值随着质子数变化呈现的是辛弱数框架下的 U 型分布, ^{128}Pd 和 ^{130}Cd 中 $B(E2; 8^+ \rightarrow 6^+)$ 值也符合半幻核中辛弱数守恒的规律, 这些实验证据进一步支持了 Pd 和 Cd 同位素中 $N=82$ 壳的稳定性. 最近, Jungclaus 等人更加精确测量了 ^{130}Cd 的谱学信息^[37], 在高数据统计下, 8^+ seniority isomer 的半衰期重新测定为 224(4) ns, 且首次确定了 6^+ isomer 的半衰期为 57(3) ns. 结合大规模壳模型 (LSSM) 计算, 新的实验信息可以帮助提取双幻核 ^{132}Sn 的质子和中子有效电荷, 通过与 ^{100}Sn 类似的实验信息进行比较, 得到了有效电荷同位旋依赖性的可靠信息, 分析表明同位旋矢量贡献部分随着中子过剩数目增加下降的速度比理论预测的更快, 而同位旋标量电荷在整个 $N=50 \sim 82$ 壳层几乎保持不变. 这项研究将为未来更丰中子核区的理论计算提供有效电荷参数.

2.3 ^{128}Ag 中的辛弱结构

我们研究团队近期对丰中子奇奇核 ^{128}Ag 开展了谱学研究^[38], 为 $N=82$ 壳层演化研究提供了新的实验证据. 基于对 ^{128}Ag 衰变产物的符合测量分析, 并类比同位素 ^{96}Ag 中 15^- 的 isomer 衰变的能级结构, 我们建立了 ^{128}Ag 核的衰变纲图 (图 4), 首次确认了 ^{128}Ag 中 16^- 同核异能态以及建立在 9^- 能级上的结构. 由于 $16^- \rightarrow 14^-$ 跃迁能量较低且内转换系数较高, 本次实验没有观测到该跃迁. 但根据 ^{96}Ag 的系统学和壳模型计算, 可以合理推测它是存在的. 假设 ^{128}Ag 中 $16^- \rightarrow 14^-$ 跃迁的能量在 20~80 keV, 对应的 $B(E2; 16^- \rightarrow 14^-)$ 跃迁强度值为

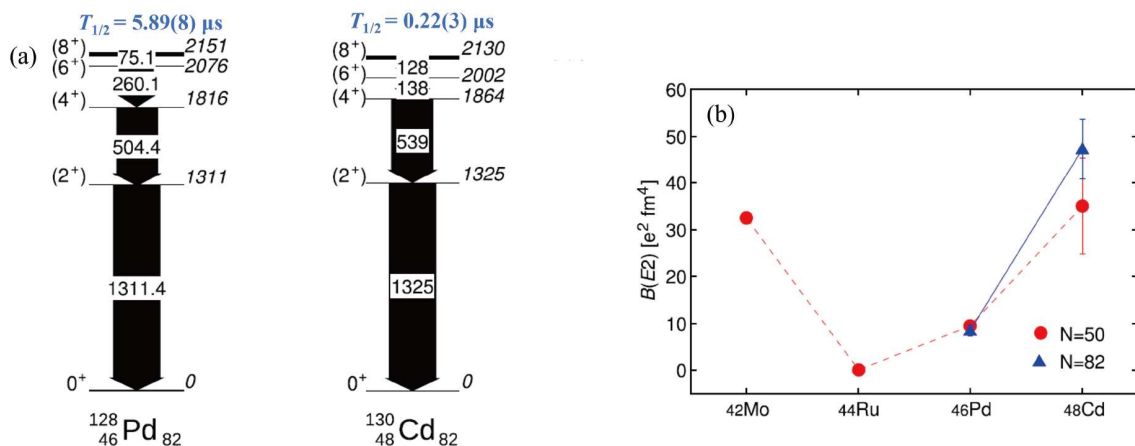


图 3 (a) ^{128}Pd 和 ^{130}Pd 部分能级图. (b) $N=50$ 和 $N=82$ 同中子素的 $B(E2; 8^+ \rightarrow 6^+)$ 约化跃迁强度值^[21]
Figure 3 (a) Partial level schemes of ^{128}Pd and ^{130}Pd . (b) Reduced transition probabilities $B(E2; 8^+ \rightarrow 6^+)$ in the $N=50$ and 82 isotones^[21]

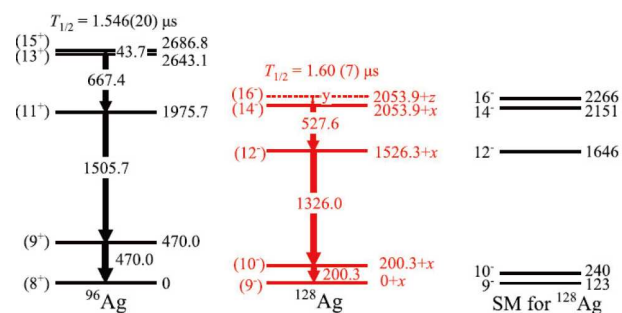


图 4 ^{128}Ag 能级图与壳模型计算、 ^{96}Ag 部分能级图的对. 能量取keV, x 和 z 分别代表 ^{128}Ag 中 9^- 和 16^- 态^[38]
Figure 4 Level scheme of ^{128}Ag in comparison with shell model calculations and partial level scheme of isotope ^{96}Ag . Energies are in keV. x and z denote the unknown excitation energy of the 9^- and 16^- states in ^{128}Ag , respectively^[38]

0.67~4.42 W.u., 与 ^{96}Ag 中 $B(E2; 15^+ \rightarrow 13^+)$ 跃迁强度值 2.90(10) W.u.基本一致. 本工作发现 ^{128}Ag 中 10^- 和 9^- 的能级次序和相邻同中子素 ^{130}In 中存在显著不同. ^{130}In 的组态是 $\pi(g_{9/2})^{-1} \otimes \nu(h_{11/2})^{-1}$, 已经观测到其具有一个最低位的 10^- 同核异能态^[42], 9^- 能级预期比 10^- 能级高. 为了更深入了解 ^{128}Ag 的结构特点以及 $N=82$ 附近奇奇核的结构演化规律, 我们进行了壳模型计算, 采用 $V_{\text{MU}} + \text{M3Y}$ 有效相互作用^[43,44], 其中 V_{MU} 提供有效相互作用中的中心力和张量力部分, 而 M3Y 提供有效相互作用中两体自旋轨道力的部分, 模型空间的选取考虑了两种情况: 一种是质子在 $Z=28 \sim 50$ 主壳, 中子在 $N=50 \sim 82$ 主壳(多 j 壳); 另一种是限制质子只在 $1g_{9/2}$ 轨道, 中子只在 $h_{11/2}$ 轨道(单 j 壳). 这两种情况的计算都采用了核子配近似^[45~49]. 如图4所示, 在不需要考虑质子和中子跨

壳激发的情况下, 多 j 壳的计算与实验数据符合得非常好, 表明银同位素中 $N=82$ 的壳得到了很好的保持.

研究表明在严格的辛弱数框架下, 单 j 壳波函数也可以很好地代表多 j 壳波函数. 为了进一步研究 ^{128}Ag 和 ^{130}In 中 10^- 和 9^- 能级次序反转的机制, 我们在单 j 壳框架下进行了计算. 对于单 j 壳, 同时考虑了几种情况, 结果如图5(a)和(b)所示. (1) 若不考虑质子-中子相互作用, ^{128}Ag 和 ^{130}In 中的 9^- 和 10^- 能级能量是简并的. (2) 包含质子-中子相互作用并在辛弱数框架下对其进行多极分解, 加入辛弱数守恒的质子-中子相互作用成分后, ^{128}Ag 和 ^{130}In 中的 9^- 能级均高于 10^- 能级能量. (3) 进一步加入了辛弱数不守恒的质子-中子相互作用, 可以看到 ^{128}Ag 的 9^- 和 10^- 能级出现反转, 同时 ^{130}In 的 9^- 和 10^- 能级保持不变. 这表明质子-中子相互作用中辛弱数不守恒的成分是造成 ^{128}Ag 和 ^{130}In 中 10^- 和 9^- 能级次序反转的关键因素. 图5(a)中给出了该框架下 ^{128}Ag 的 9^- 和 10^- 能级中不同辛弱数组分的占比, 可以看到它们辛弱数 $v_\pi=1$ 和 $v_\pi=3$ 的组分有明显的混合.

我们比较了图4中 ^{128}Ag 中的 $16^- \rightarrow 10^-$ 的能级结构和图2中单幻核 ^{128}Pd 和 ^{130}Cd 中 $8^+ \rightarrow 0^+$ 的辛弱数结构, 发现它们的结构非常相似. 由于 $g_{9/2}$ 轨道上的质子间破对, ^{128}Ag 中 16^- , 14^- 和 12^- 能级的辛弱数为 $v_\pi=3$, 16^- 态由于 $16^- \rightarrow 14^-$ 跃迁能量低而形成seniority isomer, 而 10^- 能级的价质子辛弱数 $v_\pi=1$, 12^- 能级跃迁到 10^- 能级发生了辛弱数 $\Delta v_\pi=2$ 的变化, 与单幻核 ^{128}Pd 和 ^{130}Cd 中 $2^+ \rightarrow 0^+$ 跃迁的辛弱数变化($\Delta v_\pi=2$)一致. 对于 $^{128}\text{Ag}(Z=47)$ 中, 其 $B(E2; 16^- \rightarrow 14^-)$ 跃迁强度值推断范围在0.67~4.42 W.u.之间, 与 $^{128}\text{Pd}(Z=46)$ 和 $^{130}\text{Cd}(Z=48)$ 的 $B(E2; 8^+ \rightarrow 6^+)$ 跃迁强度值

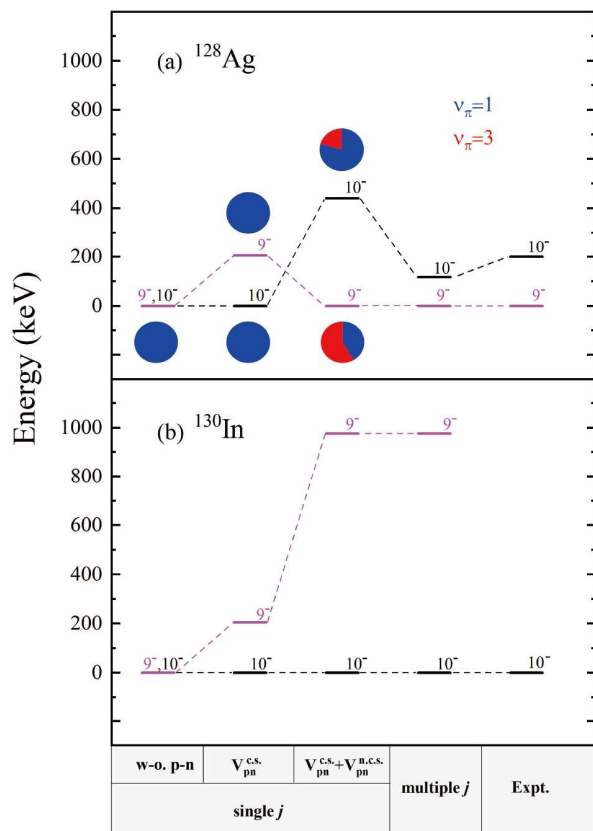


图5 (a) ^{128}Ag 和(b) ^{130}In 中 9^- 和 10^- 能级在不同设置下理论计算结果与实验数据的对比, 饼形图的蓝色和红色部分分别代表 ^{128}Ag 中 9^- 和 10^- 能级的 $v_\pi=1$ 和3成分的占比^[38]

Figure 5 Calculated excitation energy of the 9^- state with respect to the 10^- state (or vice versa) with different sets in comparison with experimental data, for (a) ^{128}Ag and (b) ^{130}In . The pie charts indicate the probabilities of the $v_\pi = 1$ and 3 components in blue and red, respectively, for the 9^- and 10^- states in ^{128}Ag ^[38]

(分别为0.22(4)和1.18(3) W.u.)非常匹配, 同时也与多 j 壳计算的3.11 W.u.及单 j 壳计算的3.12 W.u.理论值相符合. 除此之外, 由于单中子分离能的差异 $\Delta S_n(N)=S_n(N)-S_n(N+1)$ 也能够反映核壳层的稳定性强弱^[3], 根据原子质量评估AME2020^[50], 图6展示了Pd($Z=46$), Ag($Z=47$)和Cd($Z=48$)同位素链的 $\Delta S_n(N)$ 值随中子数 N 变化的规律, 可以看到三条曲线均在 $N=82$ 处出现了明显的峰. $N=82$ 壳在Pd和Cd同位素中的稳定性已经被证实, 这些相似的谱学特征和规律进一步支持了 $N=82$ 壳层在Ag同位素中的稳定性.

3 总结和展望

远离 β 稳定线的原子核幻数变化和壳层演化是核

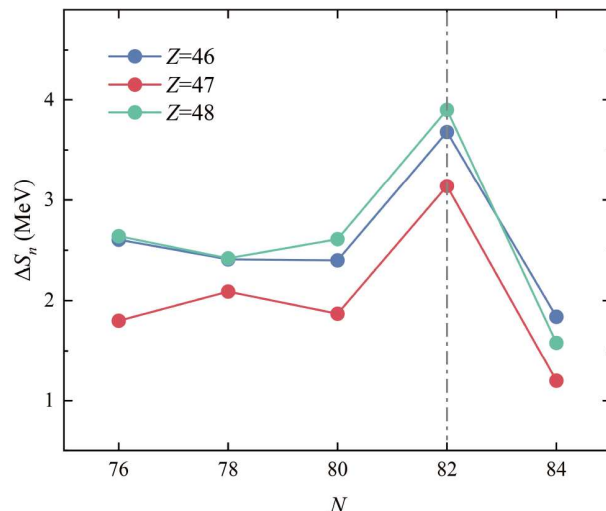


图6 Pd($Z=46$), Ag($Z=47$)和Cd($Z=48$)同位素链的 $\Delta S_n(N)$ 值随中子数 N 变化的系统学规律

Figure 6 Systematics of the $\Delta S_n(N)$ value for Pd($Z=46$), Ag($Z=47$) and Cd($Z=48$) isotopic chains as a function of neutron number N

物理研究的热门课题. 辛弱数同核异能态是原子核壳演化研究中一个非常重要的探针, 本文聚焦于 ^{132}Sn 核区, 介绍了 $^{136,138}\text{Sn}$, ^{128}Pd , ^{130}Cd , ^{128}Ag 核中发现的辛弱数同核异能态以及 $N=82$ 壳演化研究进展. 其中, 我们实验团队开展了丰中子奇奇核 ^{128}Ag 核的衰变谱学实验研究, 首次发现了 ^{128}Ag 具有辛弱结构的同核异能态, 并与单幻核 ^{128}Pd 和 ^{130}Cd 中的辛弱结构进行了比较, 同时利用壳模型对 ^{128}Ag 核中同核异能态的结构特性进行了研究. 实验和理论结果支持了中子 $N=82$ 主壳在银同位素中的稳定性. 对于更轻($Z<46$)的丰中子核区, 由于实验上研究的难度较大, 仍缺乏衰变谱学信息, 对该区域 $N=82$ 的壳演化规律还未可知. 令人感兴趣的是, 目前在 $A\approx 110$ 丰中子质量区($Z\approx 40$, $N\approx 70$), 人们已观测到丰富的结构现象, 包含扁椭、长椭以及三轴形变的形状相变和形状共存等, 表明这些核区可能存在壳效应与集体运动的竞争, 这为理解极端丰中子条件下的壳演化提供了很好的视角. 为了确认 $N=82$ 壳层究竟在何种中质比条件下完全消失及其内在机制, 进一步开展对更轻的 $N=82$ 同中子素的谱学实验研究是很必要的. 与此同时, 发展相关的理论模型, 如*ab initio*理论、密度泛函理论以及包含张量力、三体力的壳模型等, 验证核子间的有效相互作用, 对原子核的壳演化研究也至关重要.

参考文献

- 1 Mayer M G. On closed shells in nuclei. II. *Phys Rev*, 1949, 75: 1969–1970
- 2 Haxel O, Jensen J H D, Suess H E. On the “magic numbers” in nuclear structure. *Phys Rev*, 1949, 75: 1766
- 3 Sorlin O, Porquet M G. Nuclear magic numbers: new features far from stability. *Prog Particle Nucl Phys*, 2008, 61: 602–673
- 4 Otsuka T, Gade A, Sorlin O, et al. Evolution of shell structure in exotic nuclei. *Rev Mod Phys*, 2020, 92: 015002
- 5 Nowacki F, Obertelli A, Poves A. The neutron-rich edge of the nuclear landscape: experiment and theory. *Prog Particle Nucl Phys*, 2021, 120: 103866
- 6 Ge Z, Reponen M, Eronen T, et al. High-precision mass measurements of neutron deficient silver isotopes probe the robustness of the $N = 50$ shell closure. *Phys Rev Lett*, 2024, 133: 132503
- 7 Xu Z Y, Nishimura S, Lorusso G, et al. β -Decay half-lives of $^{76,77}\text{Co}$, $^{79,80}\text{Ni}$, and ^{81}Cu : experimental indication of a doubly magic ^{78}Ni . *Phys Rev Lett*, 2014, 113: 032505
- 8 Walker P, Podolyák Z. 100 Years of nuclear isomers—Then and now. *Phys Scr*, 2020, 95: 044004
- 9 Garg S, Maheshwari B, Singh B, et al. Atlas of nuclear isomers—Second edition. *Atomic Data Nucl Data Tables*, 2023, 150: 101546
- 10 Walker P, Dracoulis G. Energy traps in atomic nuclei. *Nature*, 1999, 399: 35–40
- 11 Britt H C. Properties of fission isomers. *Atomic Data Nucl Data Tables*, 1973, 12: 407–414
- 12 Burson S B, Blair K W, Keller H B, et al. The radiations from hafnium. *Phys Rev*, 1951, 83: 62–68
- 13 Racah G. Theory of complex spectra. III. *Phys Rev*, 1943, 63: 367–382
- 14 Maheshwari B, Nomura K. Overview of seniority isomers. *Symmetry*, 2022, 14: 2680
- 15 Shalit A, Talmi I. Nuclear Shell Theory. New York: Academic Press, 1963
- 16 Walker P M, Podolyák Z. Nuclear isomers. In: Tanihata I, Toki H, Kajino T, eds. Handbook of Nuclear Physics. Singapore: Springer, 2022
- 17 Talmi I. Simple Models of Complex Nuclei. New York: Harwood Academic, 1993
- 18 Casten R F. Nuclear Structure from a Simple Perspective. New York: Oxford University Press, 2000
- 19 Pérez-Vidal R M, Gadea A, Domingo-Pardo C, et al. Evidence of Partial Seniority Conservation in the $\pi g_{9/2}$ Shell for the $N = 50$ Isotones. *Phys Rev Lett*, 2022, 129: 112501
- 20 Jungclaus A, Cáceres L, Górska M, et al. Observation of isomeric decays in the r -process waiting-point nucleus $^{130}\text{Cd}_{82}$. *Phys Rev Lett*, 2007, 99: 132501
- 21 Watanabe H, Lorusso G, Nishimura S, et al. Isomers in ^{128}Pd and ^{126}Pd : evidence for a robust shell closure at the neutron magic number 82 in exotic palladium isotopes. *Phys Rev Lett*, 2013, 111: 152501
- 22 McNeill J H, Blomqvist J, Chishti A A, et al. Exotic $N=82$ nuclei ^{153}Lu and ^{154}Hf and filling of the $\pi h_{11/2}$ subshell. *Phys Rev Lett*, 1989, 63: 860–863
- 23 Caurier E, Rejmund M, Grawe H. Large-scale shell model calculations for the $N = 126$ isotones Po–Pu. *Phys Rev C*, 2003, 67: 054310
- 24 Steer S J, Podolyák Z, Pietri S, et al. Single-particle behavior at $N = 126$: isomeric decays in neutron-rich ^{204}Pt . *Phys Rev C*, 2008, 78: 061302
- 25 Marchi T, de Angelis G, Valiente-Dobón J J, et al. Quadrupole transition strength in the ^{74}Ni nucleus and core polarization effects in the neutron-rich Ni isotopes. *Phys Rev Lett*, 2014, 113: 182501
- 26 Kolos K, Miller D, Grzywacz R, et al. Direct lifetime measurements of the excited states in ^{72}Ni . *Phys Rev Lett*, 2016, 116: 122502
- 27 Simpson G S, Gey G, Jungclaus A, et al. Yrast 6^+ Seniority Isomers of $^{136,138}\text{Sn}$. *Phys Rev Lett*, 2014, 113: 132502
- 28 Gottardo A, Valiente-Dobón J J, Benzoni G, et al. New isomers in the full seniority scheme of neutron-rich lead isotopes: the role of effective three-body forces. *Phys Rev Lett*, 2012, 109: 162502
- 29 Dobaczewski J, Hamamoto I, Nazarewicz W, et al. Nuclear shell structure at particle drip lines. *Phys Rev Lett*, 1994, 72: 981–984
- 30 Dobaczewski J, Nazarewicz W, Werner T R. Closed shells at drip-line nuclei. *Phys Scr*, 1995, T56: 15–22
- 31 Dobaczewski J, Nazarewicz W, Werner T R, et al. Mean-field description of ground-state properties of drip-line nuclei: pairing and continuum effects. *Phys Rev C*, 1996, 53: 2809–2840
- 32 Kratz K L, Pfeiffer B, Arndt O, et al. r -process isotopes in the ^{132}Sn region. *Eur Phys J A*, 2005, 25: 633–638
- 33 Arnould M, Goriely S, Takahashi K. The r -process of stellar nucleosynthesis: astrophysics and nuclear physics achievements and mysteries. *Phys Rep*, 2007, 450: 97–213
- 34 Mumpower M R, Surman R, McLaughlin G C, et al. The impact of individual nuclear properties on r -process nucleosynthesis. *Prog Particle Nucl Phys*, 2016, 86: 86–126
- 35 Chen Z Q, Li Z H, Hua H, et al. Proton shell evolution below ^{132}Sn : first measurement of low-lying β -emitting isomers in $^{123,125}\text{Ag}$. *Phys Rev Lett*, 2019, 122: 212502
- 36 Chen Z Q, Li Z H, Wu J, et al. Progress on nuclear shell evolution in neutron-rich region around ^{132}Sn (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2021, 66: 3537–

- 3543 [陈志强, 李智焕, 吴婧, 等. 丰中子区近 ^{132}Sn 原子核的壳演化研究进展. 科学通报, 2021, 66: 3537–3543]
- 37 Jungclaus A, Górka M, Mikołajczuk M, et al. Excited-state half-lives in ^{130}Cd and the isospin dependence of effective charges. *Phys Rev Lett*, 2024, 132: 222501
 - 38 Luo D W, Zhang J Z, Li Z H, et al. Seniority structure in neutron-rich nucleus ^{128}Ag : evidence for robustness of $N = 82$ shell closure in silver isotopes. *Phys Rev Lett*, 2025, 134: 232502
 - 39 Yano Y. The RIKEN RI Beam Factory Project: a status report. *Nucl Instruments Methods Phys Res Sect B-Beam Interact Mater Atoms*, 2007, 261: 1009–1013
 - 40 Watanabe H. Nuclear decay studies of rare isotopes. *Eur Phys J A*, 2019, 55: 19
 - 41 Korgul A, Urban W, Rząca-Urban T, et al. Properties of $N=84$, even-even nuclei populated in the spontaneous fission of ^{248}Cm . *Eur Phys J A*, 2000, 7: 167–176
 - 42 Nesterenko D A, Kankainen A, Kostensalo J, et al. Three beta-decaying states in ^{128}In and ^{130}In resolved for the first time using Penning-trap techniques. *Phys Lett B*, 2020, 808: 135642
 - 43 Otsuka T, Suzuki T, Honma M, et al. Novel features of nuclear forces and shell evolution in exotic nuclei. *Phys Rev Lett*, 2010, 104: 012501
 - 44 Bertsch G, Borysowicz J, McManus H, et al. Interactions for inelastic scattering derived from realistic potentials. *Nucl Phys A*, 1977, 284: 399–419
 - 45 Chen J Q. The Wick theorem for coupled fermion clusters. *Nucl Phys A*, 1993, 562: 218–240
 - 46 Chen J Q. Nucleon-pair shell model: formalism and special cases. *Nucl Phys A*, 1997, 626: 686–714
 - 47 Zhao Y M, Yoshinaga N, Yamaji S, et al. Nucleon-pair approximation of the shell model: unified formalism for both odd and even systems. *Phys Rev C*, 2000, 62: 014304
 - 48 Zhao Y M, Arima A. Nucleon-pair approximation to the nuclear shell model. *Phys Rep*, 2014, 545: 1–45
 - 49 Cheng Y Y, Shen J J, Fu G J, et al. Nucleon-pair wave functions in a single- j shell. *Phys Rev C*, 2019, 100: 014318
 - 50 Wang M, Huang W J, Kondev F G, et al. The AME 2020 atomic mass evaluation (II). Tables, graphs and references. *Chin Phys C*, 2021, 45: 030003

Summary for “ ^{132}Sn 附近原子核的辛弱数同核异能态与 $N=82$ 壳演化研究进展”

Progress on seniority isomers in the nuclei near ^{132}Sn and $N=82$ shell evolution

Diwen Luo¹, Jizhi Zhang¹, Zhihuan Li^{1*}, Yiyuan Cheng² & Hui Hua¹¹ School of Physics and State Key Laboratory of Nuclear Physics and Technology, Peking University, Beijing 100871, China² School of Physics and Electronic Science, East China Normal University, Shanghai 200241, China* Corresponding author, E-mail: zhli@pku.edu.cn

The investigation of shell evolution far from the β -stability line has been a forefront research topic in nuclear physics. It has been found that the magic numbers are not immutable in some mass regions, where some of the magic numbers disappear, meanwhile new ones appear. Recently, the south vicinity of ^{132}Sn ($Z=50$, $N=82$) has attracted particular interest not only in the purely shell structure perspective but also in its strong astrophysical implications, especially in improving our understanding of the $A=130$ peak of the solar r-process abundance distribution. Theoretical studies have predicted a significant reduction or even complete disappearance of the $N=82$ shell closure as nuclei approach the neutron drip line. In experiments, isomeric states and their decay mechanism are often used to obtain information on shell gaps. Particularly, the existence of seniority isomers is an indication of a significant shell gap. The low energy of the deexciting transitions, as well as the $B(E2)$ values following the characteristic U-shaped behavior, are good indications that a high- j orbital is well separated from the other ones. This paper reviews the progress in the study of seniority isomers observed in the nuclei $^{136,138}\text{Sn}$, ^{128}Pd , ^{130}Cd , ^{128}Ag , and the evolution of the $N=82$ shell in the ^{132}Sn region, which were performed at the Radioactive Isotope Beam Factory of RIKEN with the EURICA project. The 8^+ seniority isomers ($g_{9/2}^2$, $\nu=2$) were identified in ^{130}Cd and ^{128}Pd with $B(E2)$ values following the expected U shape, which manifests that the $N=82$ shell closure in the neutron-rich Cd and Pd isotopes. The spectroscopic studies of the very neutron-rich odd-odd nucleus ^{128}Ag have been performed by our group for the first time. A new seniority isomer with a half-life of $1.60(7)\mu\text{s}$ has been identified and is proposed to have a spin-parity of 16^- with a maximally aligned configuration comprising three proton holes in the $g_{9/2}$ orbital and one neutron hole in the $h_{11/2}$ orbital. Shell model calculations have been performed with the state-of-the-art monopole-based universal interaction V_{MU} plus a spin-orbit force from M3Y and using the nucleon-pair approximation. The new level structure in ^{128}Ag is quite well described by shell model calculations without invoking excitations across the $Z=50$ and $N=82$ shell gaps, and presents a good case of seniority scheme in odd-odd nuclei in the south vicinity of the double-magic nucleus ^{132}Sn . With a classification of various components of the proton-neutron interaction, the inversion of lowest-lying 9^- and 10^- states between ^{128}Ag and its neighboring isotone ^{130}In is found to be dynamically ascribed to the seniority-nonconserving proton-neutron interaction components in terms of rank-1 quasispin tensor operators. The structure above 10^- up to the 16^- isomer in ^{128}Ag shows remarkable similarities to seniority structures in the semimagic nuclei ^{128}Pd and ^{130}Cd . These spectroscopic features in ^{128}Ag indicate that the $N=82$ shell closure is still robust in silver isotopes and provide a new insight into the role played by the proton-neutron interaction in the structure of nuclei adjacent to the magic shell. To probe the evolution of the neutron $N=82$ shell further below ^{132}Sn and the underlying mechanism, the seniority pattern in the lighter odd- Z nuclei near the $N=82$ is of particular interest in future studies.

magic number, isomer, seniority, proton-neutron interaction, $N=82$ shell closuredoi: [10.1360/CSB-2025-5441](https://doi.org/10.1360/CSB-2025-5441)