丰中子区近 ^{132}Sn 原子核的壳演化研究进展

陈志强, 李智焕*, 吴婧, 吴鸿毅, 李湘庆, 徐川, 华辉

北京大学物理学院, 核物理与核技术国家重点实验室, 北京 100871;

* 联系人, E-mail: zhli@pku.edu.cn

2021-02-05 收稿, 2021-03-26 修回, 2021-03-26 接受, 2021-03-29 网络版发表

国家重点研发计划(2018YFA0404403)和国家自然科学基金(12035001, 12075006, 11675003, 11875075, 11235001)资助

摘要 弱束缚区原子核传统幻数的消失和新幻数的产生一直是放射性核束物理的前沿研究方向. 近年来, 基于世界各地大科学装置的研究已经积累了丰硕的成果. 在远离稳定线的轻丰中子区, 人们已经发现8, 20, 28传统中子幻数的消失和新中子幻数14, 16, 34等的出现. 在中重丰中子区, 已有的实验和理论研究显示, 50和82传统中子闭壳随着中质比的增大, 有减弱直至消失的趋势. 利用日本理化学研究所的放射性束流装置, 我们开展了对 ^{123}Pd 和 ^{125}Pd 核的 β 衰变实验研究, 在衰变子核 ^{123}Ag 和 ^{125}Ag 的低激发能区发现了具有 β 放射性的同核异能态. 利用新发现的同核异能态, 讨论了奇质量Ag同位素核中由 $\pi g_{9/2}$ 和 $\pi p_{1/2}$ 两个轨道形成的 $Z=40$ 亚闭壳能隙在 $N=82$ 附近的演化, 发现在 $N=82$ 处, $Z=40$ 亚闭壳能隙可能存在明显的减小. 为进一步了解壳演化的微观机制, 使用包含张量力的壳模型计算了这个质量区单粒子轨道的演化. 结果显示, 相比于 $N=50$ 处, $Z=40$ 亚闭壳能隙在 $N=82$ 处存在明显的减小, 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 $N=82$ 时的演化起到非常重要的作用.

关键词 幻数, 远离 β 稳定线, 壳演化, 张量力, $N=82$ 壳隙

当原子核的核子数满足2, 8, 20, 28, 50, 82及126时, 原子核性质会表现出格外的稳定性, 这些数字因而被称为原子核的“幻数”. Mayer^[1]和Haxel等人^[2]利用包含自旋轨道耦合的壳模型对幻数进行了成功的解释, 他们开创性的工作被授予1963年诺贝尔物理学奖. 早期, 对原子核壳效应的研究主要集中在 β 稳定线附近. 近些年, 随着研究逐渐向远离稳定线的方向扩展, 人们发现在某些区域原子核壳结构发生了显著变化, 有些传统幻数不再成立, 出现了一些新的幻数. 这些新现象的发现受到了人们极大的关注. 目前, 从实验和理论上探究原子核弱束缚区传统幻数的消失和新幻数的产生是放射性核束物理一个非常活跃的前沿研究方向^[3]. 它一方面有助于人们理解量子多体系统的结构形态和相互作用机制, 另一方面也为寻找可能存在的较长寿命新核

素提供指导. 从核素图上看^[4], 中子滴线与 β 稳定线之间有宽阔的区域, 对于处在同一同位素链上的丰中子核, 其价中子分布可能横跨多个中子次壳层或主壳层, 因此成为系统研究幻数和壳层演化的理想对象.

传统壳幻数发生变化最早的证据来自Thibault等人^[5]对 $N=20$ 附近 $^{31,32}\text{Na}$ ($Z=11$)丰中子同位素核的质量测量实验, 他们发现, $^{31,32}\text{Na}$ 的结合能比理论所预言的 $N=20$ 闭壳结合能大很多. 之后, 对 $N=20$ 、 $Z=10\sim 12$ 丰中子核的进一步系统研究发现, 这些核的特性(例如核质量、结合能、激发能级、 β 衰变道和电磁矩等)与传统壳模型的描述出现了很大的偏离, 表明 $N=20$ 的幻数效应消失了. 由于 $N=20$ 能隙的减小, 原子核性质受到 $N=20$ 之上中子 pf 壳闯入轨道的影响, 表现出反常特性, 人们将这一区域形象地命名为“反转岛”^[6]. 与此同时,

引用格式: 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

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, doi: 10.1360/TB-2021-0155

对丰中子O同位素核的研究发现, $N=14$ 、 16 具有增强稳定性的幻数性质(即新幻数)^[3,7~10], 但 $N=14$ 新幻数效应在相邻的 N 和 C 同位素中并没有被观测到^[3,11~14]. 除了 $N=20$ 的幻数, 人们相继发现 $N=8$ 和 28 传统幻数在远离稳定线的区域可能也不再有效^[15~17]. 与此同时, 2013年的一篇*Nature*封面文章^[18]报道了丰中子核 ^{54}Ca ($N=34$)的谱学研究, 发现在 Ca 同位素链上, 除了已知的 ^{40}Ca ($N=20$)和 ^{48}Ca ($N=28$)这两个双幻核外, ^{54}Ca ($N=34$)可能也具有双幻核的特性, $N=34$ 很可能是新的幻数. 近期丰中子 Ca 同位素核的质量测量实验^[19]、 ^{54}Ca 单中子敲出反应实验^[20]以及 $N=34$ 同中子核 ^{52}Ar 的谱学实验^[21]进一步支持了 $N=34$ 闭壳的存在.

对于更大的传统幻数 $N=50$ 和 82 , 研究发现, 远离 β 稳定线的丰中子核 ^{78}Ni ($Z=28$, $N=50$)^[22]和 ^{132}Sn ($Z=50$, $N=82$)^[23~25]都很好地保持了双幻核的特性. 对于 $N=50$ 的幻数, 研究发现, 在 $Z>28$ 的同中子素中仍然有效^[3]. 对于 $Z<28$ 的同中子素, 由于它们远离稳定线, 产生截面非常低, 实验研究难度较大, $N=50$ 的幻数是否仍然有效目前实验上还没有确切的结论. 对于 $N=82$ 的幻数, 相对于双幻核 ^{132}Sn ($Z=50$, $N=82$), 研究发现, 随着 Z 的增加(中质比减少), 其仍然有效^[3]. 而随着 Z 的减少(中质比增加), 研究发现, $N=82$ 主闭壳在 ^{130}Cd ($Z=48$)和 ^{128}Pd ($Z=46$)同中子偶偶核中虽然仍然稳固, 但是能隙有逐渐减小的趋势^[26,27]. 我们实验团队对 $N=82$ 附近 $^{123,125}\text{Ag}$ ($Z=47$)同位素核低激发能区结构的研究发现, $N=82$ 的能隙在 $Z=47$ 时可能会明显减小^[28]. 目前, $Z<46$ 的 $N=82$ 同中子素中实验数据非常缺乏, 理论预言当 Z 减小到 40 附近时, $N=82$ 的幻数效应可能完全消失^[29,30].

虽然包含自旋-轨道相互作用的传统壳模型在解释稳定核区幻数上取得了巨大的成功, 但是在解释以上远离稳定线区域幻数的消失或新幻数的出现时却显得无能为力, 为此人们做了非常多的尝试, 试图给出合理的物理解释. 目前比较有代表性的解释是由Otsuka等人^[31~33]给出的. 他们研究发现, 有效核力中的张量力成分在奇特原子核的壳结构演化中扮演着极其重要的角色, 因此在壳模型中引入了有限程的张量力, 通过它对核相互作用势的修正, 进而修正单粒子能级, 解释了远离稳定线核区幻数的演化这一现象.

根据在弱束缚区中子幻数(壳层)演化的研究结果, 可以发现其在轻核区和中重核区表现出不同的特征. 在轻核区, 由于单粒子轨道能级密度比较低, 往往少数核子的特殊关联性质就可能影响能级间隙的巨大变化,

幻数(壳层)随同位旋通常呈现出跳跃式的演化, 理论描述和预言往往比较困难. 在中重质量区, 幻数(壳层)的演化相对平缓. 由 $N=50$ 和 82 的演化规律看, 在中质比相对小的区域, 幻数基本能够保持, 但是当中质比增加到一定值, 原子核远离 β 稳定线时, 幻数可能会消失. 对 $N=82$ 沿中质比增加方向的演化研究, 不仅对原子核结构非常重要, 同时对核天体物理也非常重要. 这个区域正好处于核天体环境中快中子俘获过程(简称“ r ”-过程)的路径上, 而原子核的壳结构性性质、质量、 β 衰变性质和中子俘获概率等信息为模拟“ r ”-过程的进程以及太阳系中元素丰度提供了重要的计算输入量, 对理解太阳系元素丰度分布图中 $A\sim 130$ 峰附近元素丰度非常关键, 因此一直是实验和理论研究的热点. 下面结合我们实验团队近期对丰中子 Ag 同位素的研究成果, 介绍双幻核 ^{132}Sn 西南区域 $N=82$ 壳演化的最新研究进展.

1 $N=82$ 的壳演化

对于 $N=82$ 的壳能隙, 早在20年前就有理论预言在远离 β 稳定线丰中子区会显著减小, 闭壳效应会逐渐消失^[34~36]. 由于实验产生这个质量区的非常丰中子核($N\sim 82$ 附近)比较困难, 到目前为止, 只有少数 $Z\leq 50$ 的核素被实验研究过. 对于可能的双幻核 ^{132}Sn ($Z=50$, $N=82$), 人们通过由 ^{132}Sn 束流引起的(d , p)转移反应, 通过逆运动学研究了邻近 ^{133}Sn 核中能级的单粒子特性, 表明 ^{132}Sn 仍然很好保持了双幻核的特性^[23]. 同时, 利用高精度潘宁阱对 $^{132,134}\text{Sn}$ 的质量测量也表明, $N=82$ 有很大的能级间隙, 没有出现理论预言的壳消失的情况^[25].

对于 $Z<50$ 的 $N=82$ 同中子素, 目前质量测量和衰变谱学是研究其 $N=82$ 壳演化的主要手段. Jungclaus等人^[26]基于对 $N=82$ 的同中子素 ^{130}Cd 中 8^+ 同核异能态衰变的测量, 首次建立了 ^{130}Cd 核的低激发能谱. 通过对比幻数核 ^{76}Ni 和 ^{98}Cd 的结构及壳模型计算, 发现 $Z=48$ 的 ^{130}Cd 核中 $N=82$ 闭壳效应依然显著. 最近, Manea等人^[37]通过对丰中子 Cd 同位素的质量测量, 系统研究了这个区域的中子结合能随质子数 Z 的变化趋势(图1). $N=82$ 壳隙主要由 $h_{11/2}$ 和 $f_{7/2}$ 两条中子轨道构成, 壳隙两侧中子轨道的相对位置对壳隙的大小非常重要. 从图1可以看到, $N=82$ 的能隙一直到 $Z=48$ 处都维持得很好, 这与衰变实验的结果是一致的. 对于 $Z=46$ 的同中子素 ^{128}Pd , Watanabe等人^[27]同样通过对其 8^+ 同核异能态衰变的测量, 首次建立了 ^{128}Pd 的低激发能谱. 对 Pd 同位素低激发能级的系统研究发现, 从 ^{126}Pd 到 ^{128}Pd , 其第一个 2^+ 激发

图1 (网络版彩色) $N=81$ 和 $N=83$ 同中子素中低激发态的中子结合能^[37]

Figure 1 (Color online) Neutron binding energies of the low-lying nuclear states of the $N=81$ and $N=83$ isotones^[37]

态能量有较大的增加, 表明 $N=82$ 闭壳效应在 $Z=46$ 的 ^{128}Pd 中也依然显著。

在该核区, 人们发现, $N=82$ 的中子闭壳与其质子 $Z=50$ 的主壳和 $Z=40$ 的亚壳能够互相影响。Taprogge 等人^[30] 较为系统地研究了两者间的关联关系, 给出了 $N=50$ 和 82 同中子素的第一个 2^+ 激发态能量随质子的变化(图2)。由图2(a)可以看到, 对于 $N=50$ 的同中子核, 在 $Z=40$ 的地方存在着明显的闭壳效应, ^{90}Zr 是一个双幻核。但是, 对于 $N=82$ 同中子素, 理论计算表明, 在 $Z=40$ 处却没有出现明显的闭壳效应, 此时 $Z=40$ 可能不再是一个很好的亚壳, 意味着相对应的 $N=82$ 主壳在 $Z=40$ 附近也可能消失了。由于中子壳和质子壳的这种相互关联关系, $Z=40$ 的壳效应成为判断 $N=82$ 主壳是否仍然存在的一个重要依据。 $Z=40$ 的亚壳主要由 $g_{9/2}$ 和 $p_{1/2}$ 两条质子轨道间能隙构成, 该质量区奇 Z 核中与这两条轨道相关的能级结构将提供这两条轨道能隙的重要信息, 因此受到了人们的极大关注。

我们通过衰变开展了对 $N=82$ 附近丰中子 $\text{Ag}(Z=47)$ 核结构的研究。为了说明 $Z=40$ 亚壳间如何能在 Ag 同位素中演化, 图3系统给出了 $N=48\sim 78$ 的奇 A Ag 同位素核中最低 $9/2^+$ 和 $1/2^-$ 能级之间的能量差异。可以看到, 在缺中子一侧, 能量间距的系统趋势与理论计算^[38,39] 均表明, 其在 $N=50$ 处出现最大值, 此时 $Z=40$ 和 $N=50$ 的壳层很稳定。随着中子数的增加, 能量差迅速减小。在 $^{105}\text{Ag}(N=58)$ 时, 这两个能级的次序发生了反转, $1/2^-$ 态成为最低态。 $9/2^+$ 和 $1/2^-$ 能级之间的能量差在中子 $N=58\sim 70$ 区域相对平坦。到了 $^{119}\text{Ag}(N=72)$, $1/2^-$ 能级位于 $7/2^+$ 基态和 130 keV 的 $9/2^+$ 激发态之间^[40]。对于更丰中

图2 (网络版彩色) $N=50$ (a) 和 $N=82$ (b) 同中子素第一个 2^+ 激发态能量的系统性演化^[30]。实心方点为实验值, 实心圆点和星点线均为理论计算结果。实线、短线和点线分别对应逐渐增大 $\pi p_{1/2}-\pi p_{3/2}$ 轨道之间能隙(0.5、1.0和1.5 MeV)的壳模型计算结果

Figure 2 (Color online) Energies of the first 2^+ in $N=50$ (a) and $N=82$ (b) isotones^[30]. The filled square points are the experimental values, and the filled circle points and star points are the theoretical results. The lines (solid, dashed, and dotted) represent the results of shell-model (SM) calculations assuming an increase of the $\pi p_{1/2}-\pi p_{3/2}$ splitting by 0.5, 1.0, and 1.5 MeV, respectively

图3 (网络版彩色) Ag 同位素中低激发 $1/2^-$ 和 $9/2^+$ 态实验能级差的系统学演化^[28]。阴影区域覆盖的范围对应 ^{119}Ag 核中已知实验数据的不确定性

Figure 3 (Color online) Systematics of experimental energy differences between the lowest-lying $1/2^-$ and $9/2^+$ states in Ag isotopes^[28]. The range of the shaded region for ^{119}Ag corresponds to the uncertainties of the experimental data

子的 Ag 同位素, 到目前为止, 只有基于系统学在 $^{121,123,125}\text{Ag}$ 中指定了 $9/2^+$ 态^[41-44], 实验上还没有关于 $1/2^-$ 态的任何信息。

上述衰变实验在日本理化学研究所(RIKAGAKU KENKYUSHO/Institute of Physical and Chemical Research, RIKEN)完成, 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。该工作感兴趣的 $^{122-126}\text{Pd}$ 核被注入到粒子阻停探测器

图4 部分 ^{123}Ag 和 ^{125}Ag 的能级纲图与壳模型计算结果的对比^[28]. 箭头粗细正比于跃迁强度
 Figure 4 Partial level schemes of ^{123}Ag and ^{125}Ag in comparison with the SM calculations^[28]. The arrow widths are proportional to their absolute intensities

WAS3ABi阵列中发生衰变, WAS3ABi同时测量衰变出射的 β 粒子, 环绕其四周的EURICA探测器阵列测量衰变过程中放出的 γ 射线, 具体的实验细节描述见文献^[28]. 基于对衰变出射产物进行符合测量的实验数据, 建立了 $^{123,125}\text{Pd}$ 核的 β 衰变纲图(图4), 在衰变子核 $^{123,125}\text{Ag}$ 中首次确认了 $1/2^-$ 同核异能态的位置以及建立在 $1/2^-$ 同核异能态上的能级结构.

基于在 $^{123,125}\text{Ag}$ 核中新发现的 $1/2^-$ 同核异能态, 将奇 A Ag同位素中最低 $9/2^+$ 和 $1/2^-$ 能级之间的能量差系统性推到更靠近 $N=82$ 的丰中子一侧, 见图3中的新数据点. 由新的结果可以看出, 对于 $Z=47$ 的Ag同位素, 相比于 $N=50$ 处, 在 $N=82$ 附近, $Z=40$ 亚闭壳能隙可能存在明显的减小. 为了深入了解壳演化的微观机制, 利用包含张量力的 $V_{\text{MU}}+\text{LS}$ 相互作用^[32]壳模型计算了丰中子Ag同位素中质子轨道的有效单粒子能(图5). 研究表明, 随着中子数接近82, 中子逐渐占据 $\nu h_{11/2}$ 轨道. 由于 $\pi g_{9/2}$ 和 $\nu h_{11/2}$ 波函数之间存在非常大的重叠, 它们之间的单极力相较于 $\pi p_{1/2}$ 和 $\nu h_{11/2}$ 轨道之间的单极力大得多, 因而

图5 (网络版彩色)通过 $V_{\text{MU}}+\text{LS}$ 相互作用计算得到的Ag同位素中质子有效单粒子能(a)以及中子在 $h_{11/2}$ 轨道的占据情况(b)^[28]. (a)中虚线计算结果只考虑了中心力和自旋轨道力, 而实线则同时包含了中心力、自旋轨道力和张量力

Figure 5 (Color online) Proton effective single-particle energies in Ag isotopes calculated by the $V_{\text{MU}}+\text{LS}$ interaction (a), and the neutron occupation number in the $h_{11/2}$ shell (b)^[28]. In (a), the dashed lines are obtained only with the central and spin-orbit forces, while the solid lines include the central, spin-orbit, and tensor forces

$\pi g_{9/2}$ 轨道的位置变化比 $\pi p_{1/2}$ 轨道也剧烈得多,造成 $\pi g_{9/2}$ 和 $\pi p_{1/2}$ 轨道之间的能级间隙减小, $Z=40$ 的亚壳减弱。反之, $\pi g_{9/2}$ 和 $\nu h_{11/2}$ 之间的张量力也影响到 $\nu h_{11/2}$ 轨道的位置,使 $N=82$ 壳间隙减小。

2 总结与展望

在弱束缚区探究原子核幻数变化以及壳层结构的演化是目前的热门研究课题,受到人们极大的关注。对于较轻质量弱束缚区的壳演化研究,到目前为止,人们已经从理论和实验两个方面取得了丰硕的成果。对于中重丰中子区,由于从实验上对该区域开展深入研究仍然存在不小的难度,实验上尚缺乏足够的证据解释

和支持该区域的壳演化。目前已有的实验和理论研究显示,50和82传统中子幻数随着中质比的增大,有减弱直至消失的趋势。但是,对于50和82壳层具体在哪个位置完全消失,目前还没有确切的结论,这成为实验和理论关注的焦点。理论上已经发现张量力对丰中子区82壳层的演化起到非常重要的作用,之前人们对这个核区的研究主要关注于偶偶核和奇 A 核,对奇奇核的研究较少。奇奇核由于最外层价中子和价质子都未配对,它们之间的关联不仅对深入理解张量力在 $N=82$ 壳演化中的角色起到关键的作用,还会提供张量力的重要信息,未来深入开展这个质量区奇奇核结构的实验研究是很有意义的。

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 Part Nucl Phys*, 2008, 61: 602–673
- 4 Nazarewicz W. The limits of nuclear mass and charge. *Nat Phys*, 2018, 14: 537–541
- 5 Thibault C, Klapisch R, Rigaud C, et al. Direct measurement of the masses of ^{11}Li and $^{26-32}\text{Na}$ with an on-line mass spectrometer. *Phys Rev C*, 1975, 12: 644–657
- 6 Warburton E K, Becker J A, Brown B A. Mass systematics for $A=29-44$ nuclei: The deformed $A\sim 32$ region. *Phys Rev C*, 1990, 41: 1147–1166
- 7 Otsuka T, Suzuki T, Holt J D, et al. Three-body forces and the limit of oxygen isotopes. *Phys Rev Lett*, 2010, 105: 032501
- 8 Hoffman C R, Baumann T, Bazin D, et al. Evidence for a doubly magic ^{24}O . *Phys Lett B*, 2009, 672: 17–21
- 9 Janssens R V F. Unexpected doubly magic nucleus. *Nature*, 2009, 459: 1069–1070
- 10 Stanoiu M, Azaiez F, Dombrádi Z, et al. $N=14$ and 16 shell gaps in neutron-rich oxygen isotopes. *Phys Rev C*, 2004, 69: 034312
- 11 Elekes Z, Vajta Z, Dombrádi Z, et al. Nuclear structure study of $^{19,21}\text{N}$ nuclei by γ spectroscopy. *Phys Rev C*, 2010, 82: 027305
- 12 Strongman M J, Spyrou A, Hoffman C R, et al. Disappearance of the $N=14$ shell. *Phys Rev C*, 2009, 80: 021302
- 13 Stanoiu M, Soehler D, Sorlin O, et al. Disappearance of the $N=14$ shell gap in the carbon isotopic chain. *Phys Rev C*, 2008, 78: 034315
- 14 Soehler D, Stanoiu M, Dombrádi Z, et al. In-beam γ -ray spectroscopy of the neutron-rich nitrogen isotopes $^{19-22}\text{N}$. *Phys Rev C*, 2008, 77: 044303
- 15 Krieger A, Blaum K, Bissell M L, et al. Nuclear charge radius of ^{12}Be . *Phys Rev Lett*, 2012, 108: 142501
- 16 Navin A, Anthony D W, Aumann T, et al. Direct evidence for the breakdown of the $N=8$ shell closure in ^{12}Be . *Phys Rev Lett*, 2000, 85: 266–269
- 17 Bastin B, Grévy S, Soehler D, et al. Collapse of the $N=28$ shell closure in ^{42}Si . *Phys Rev Lett*, 2007, 99: 022503
- 18 Steppenbeck D, Takeuchi S, Aoi N, et al. Evidence for a new nuclear ‘magic number’ from the level structure of ^{54}Ca . *Nature*, 2013, 502: 207–210
- 19 Michimasa S, Kobayashi M, Kiyokawa Y, et al. Magic nature of neutrons in ^{54}Ca : First mass measurements of $^{55-57}\text{Ca}$. *Phys Rev Lett*, 2018, 121: 022506
- 20 Chen S, Lee J, Doornenbal P, et al. Quasifree neutron knockout from ^{54}Ca corroborates arising $N=34$ neutron magic number. *Phys Rev Lett*, 2019, 123: 142501
- 21 Liu H, Obertelli A, Doornenbal P, et al. How robust is the $N=34$ subshell closure? First spectroscopy of ^{52}Ar . *Phys Rev Lett*, 2019, 122: 072502
- 22 Taniuchi R, Santamaria C, Doornenbal P, et al. ^{78}Ni revealed as a doubly magic stronghold against nuclear deformation. *Nature*, 2019, 569: 53–58
- 23 Jones K L, Adekola A S, Bardayan D W, et al. The magic nature of ^{132}Sn explored through the single-particle states of ^{133}Sn . *Nature*, 2010, 465: 454–457
- 24 Rosiak D, Seidlitz M, Reiter P, et al. Enhanced quadrupole and octupole strength in doubly magic ^{132}Sn . *Phys Rev Lett*, 2018, 121: 252501
- 25 Dworschak M, Audi G, Blaum K, et al. Restoration of the $N=82$ shell gap from direct mass measurements of $^{132,134}\text{Sn}$. *Phys Rev Lett*, 2008, 100: 072501
- 26 Jungclauss 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
- 27 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
- 28 Chen Z, Li Z, 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
- 29 Wang H K, Kaneko K, Sun Y. Quenching of the neutron $N=82$ shell gap near ^{120}Sr with monopole-driving core excitations. *Phys Rev C*, 2015, 91: 021303
- 30 Taprogge J, Jungclauss A, Grawe H, et al. $1p_{3/2}$ proton-hole state in ^{132}Sn and the shell structure along $N=82$. *Phys Rev Lett*, 2014, 112: 132501
- 31 Otsuka T, Suzuki T, Fujimoto R, et al. Evolution of nuclear shells due to the tensor force. *Phys Rev Lett*, 2005, 95: 232502
- 32 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
- 33 Otsuka T. Exotic nuclei and nuclear forces. *Phys Scr*, 2013, T152: 014007
- 34 Dobaczewski J, Hamamoto I, Nazarewicz W, et al. Nuclear shell structure at particle drip lines. *Phys Rev Lett*, 1994, 72: 981–984
- 35 Dobaczewski J, Nazarewicz W, Werner T R. Closed shells at drip-line nuclei. *Phys Scr*, 1995, T56: 15–22
- 36 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
- 37 Manea V, Kartheim J, Atanasov D, et al. First glimpse of the $N=82$ shell closure below $Z=50$ from masses of neutron-rich cadmium isotopes and isomers. *Phys Rev Lett*, 2020, 124: 092502
- 38 Schmidt K, Divari P C, Elze T W, et al. Decay properties of very neutron-deficient isotopes of silver and cadmium. *Nucl Phys A*, 1997, 624: 185–209
- 39 Coraggio L, Covello A, Gargano A, et al. Realistic shell-model calculations for proton-rich $N=50$ isotones. *J Phys G-Nucl Part Phys*, 2000, 26: 1697–1708
- 40 Penttilä H, Äystö J, Eskola K, et al. First observation of the beta decay of ^{117}Pd and the discovery of a new isotope ^{119}Pd . *Z Phys A-Hadr Nucl*, 1991, 338: 291–294
- 41 Kim Y H, Biswas S, Rejmund M, et al. The impact of the intruder orbitals on the structure of neutron-rich Ag isotopes. *Phys Lett B*, 2017, 772: 403–408
- 42 Lalkovski S, Bruce A M, Jungclauss A, et al. Core-coupled states and split proton-neutron quasiparticle multiplets in $^{122-126}\text{Ag}$. *Phys Rev C*, 2013, 87: 034308
- 43 Stefanescu I, Walters W B, Mantica P F, et al. Spectroscopy of exotic $^{121,123,125}\text{Ag}$ produced in fragmentation reactions. *Eur Phys J A*, 2009, 42: 407–413
- 44 Ohya S. Nuclear data sheets for $A=123$. *Nucl Data Sheets*, 2004, 102: 547–718

Summary for “丰中子区近 ^{132}Sn 原子核的壳演化研究进展”

Progress on nuclear shell evolution in neutron-rich region around ^{132}Sn

Zhi-Qiang Chen, Zhi-Huan Li*, Jing Wu, Hong-Yi Wu, Xiang-Qing Li, Chuan Xu & Hui Hua

State Key Laboratory of Nuclear Physics and Technology, School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China

* Corresponding author, E-mail: zhli@pku.edu.cn

The disappearance of traditional magic numbers and the generation of new magic numbers in weakly-bound nuclei have always been the frontier of physics with radioactive beam. In recent years, the research based on large scientific devices around the world has got fruitful results. In the light neutron-rich region far away from the β -stable line, it has been found that the traditional neutron magic numbers 8, 20, 28 disappear and the new neutron magic numbers 14, 16, 34 appear. In the medium and heavy neutron-rich regions, experimental and theoretical studies have shown that the traditional neutron magic numbers 50 and 82 tend to weaken or disappear with the increase of the neutron/proton ratio. For example, recent experimental studies have shown that the $N=82$ shell closure in ^{132}Sn , ^{130}Cd , and ^{128}Pd isotones is still robust, but a significant reduction of the $N=82$ gap was suggested to occur between Sn and Zr as a consequence of the absent $Z=40$ subshell gap. With the $Z=47$, the neutron-rich odd- A Ag isotopes are naturally of great interest. Their valence protons are assumed to fill the $\pi g_{9/2}$ and $\pi p_{1/2}$ orbitals, between which the $Z=40$ subshell gap is formed. The energy difference between the lowest lying $9/2^+$ and $1/2^-$ states in these neutron-rich odd- A Ag isotopes provides direct information on the $Z=40$ subshell gap. Therefore, to explore the $N=82$ shell evolution in Ag isotopes, the β -delayed γ -ray spectroscopy of neutron-rich $^{123,125}\text{Ag}$ isotopes is investigated at the Radioactive Isotope Beam Factory of RIKEN in the framework of the Euroball Riken Cluster Array project. The long-predicted $1/2^-$ β -emitting isomers in $^{123,125}\text{Ag}$ are identified for the first time. Shell-model calculations have been performed using the KSHELL code with the state-of-the-art monopole-based universal interaction V_{MU} plus a spin-orbit force from M3Y ($V_{\text{MU}}+\text{LS}$), and give an overall satisfactory description of experimental levels in $^{123,125}\text{Ag}$, particularly for the low-lying levels. The calculations indicate that, as approaching $N=82$, the wave functions from the $\pi g_{9/2}$ and $\pi p_{1/2}$ orbitals dominate low-lying states of Ag isotopes. With the newly observed $1/2^-$ isomeric states in $^{123,125}\text{Ag}$, the systematic energy difference between the lowest $9/2^+$ and $1/2^-$ states along Ag isotopic chain indicates an increasing trend beyond ^{125}Ag , which reveals that the $Z=40$ subshell gap starts to be restored toward $N=82$. Extrapolating the trend toward $N=82$, a considerable diminishment of the $Z=40$ subshell gap is expected. To get more insight into the microscopic origin of shell evolution in this region, the effective single-particle energies are calculated for the proton orbitals in the region of $N=68-82$ with the $V_{\text{MU}}+\text{LS}$ interaction. It is found that, if only the central + spin-orbit parts are considered, the $\pi p_{1/2}$ orbital lies below the $\pi g_{9/2}$ orbital in the whole region of $N=68-82$. In contrast, with the inclusion of the tensor part (especially the $\pi g_{9/2}\text{-vh}_{11/2}$ monopole), the $\pi g_{9/2}$ orbital is affected much more than the $\pi p_{1/2}$ orbital, and the spacing between $\pi g_{9/2}$ and $\pi p_{1/2}$ orbitals is notably reduced, consequently, resulting in the inversion of these two orbitals at $N\sim 74$, which is compatible with the experimental inversion position. The tensor force manifests its crucial role in the modification of the order of the proton orbitals and the size of the $Z=40$ subshell gap in Ag isotopes mainly through the $\pi g_{9/2}\text{-vh}_{11/2}$ monopole. *Vice versa*, our calculations indicate that this tensor force will also influence the behavior of the $\text{vh}_{11/2}$ orbital, which is important for the $N=82$ shell gap.

magic number, far from β -stability line, shell evolution, tensor force, $N=82$ shell gap

doi: [10.1360/TB-2021-0155](https://doi.org/10.1360/TB-2021-0155)