



丰中子Zn核素奇特核结构讨论和展望

王姝婧 白世伟 杨晓菲

Exotic Nuclear Structure of Neutron-rich Zn Isotopes

WANG Shujing, BAI Shiwei, YANG Xiaofei

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.37.2019CNPC34>

引用格式:

王姝婧, 白世伟, 杨晓菲. 丰中子Zn核素奇特核结构讨论和展望[J]. *原子核物理评论*, 2020, 37(3):291–300. doi: 10.11804/NuclPhysRev.37.2019CNPC34

WANG Shujing, BAI Shiwei, YANG Xiaofei. Exotic Nuclear Structure of Neutron-rich Zn Isotopes[J]. *Nuclear Physics Review*, 2020, 37(3):291–300. doi: 10.11804/NuclPhysRev.37.2019CNPC34

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于不稳定核基本性质测量的原子核结构研究

Study of Nuclear Structure by the Measurement of the Ground State Properties of Unstable Nuclei
原子核物理评论. 2018, 35(4): 382–389 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.35.04.382>

基于RIBLL2的奇特原子核电荷改变截面实验测量进展

Progress of the Charge-changing Cross Section Measurements of Exotic Nuclei at RIBLL2
原子核物理评论. 2018, 35(4): 362–368 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.35.04.362>

用于核物理研究的精密激光光谱技术的发展和展望

Development and Prospect of Precision Laser Spectroscopy Techniques for Nuclear Physics Study
原子核物理评论. 2019, 36(2): 161–169 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.36.02.161>

原子核基态性质的系统研究

Systematic Study on Ground State Properties of Nuclei
原子核物理评论. 2017, 34(3): 469–475 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.34.03.469>

丰中子锶同位素的投影壳模型研究

Projected Shell Model Studies for Neutron-rich Sr Isotopes
原子核物理评论. 2018, 35(1): 10–17 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.35.01.010>

可能的原子核形状及硬度演化性质:基于能量面计算的系统分析(英文)

Possible Properties on Nuclear Shape and Stiffness Evolution:A Systematic Analysis Based on Nuclear-Energy-Surface Calculations
原子核物理评论. 2017, 34(3): 481–487 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.34.03.481>

文章编号: 1007-4627(2020)03-0291-10

丰中子 Zn 核素奇特核结构讨论和展望

王姝婧, 白世伟, 杨晓菲[†]

(北京大学物理学院和核物理与核技术国家重点实验室, 北京 100871)

摘要: 不稳定核结构是当前核物理研究的前沿热点问题之一, 尤其是针对丰中子幻数核附近的区域。中子数 $N=40, 50$ 附近镍区域核素展现出丰富的结构特征, 激励了众多理论和实验研究。原子核的基本性质与核的结构密切相关, 这里我们选择分析丰中子 Zn ($Z=30$) 同位素的基本性质来进一步了解这一核区的核结构特征。本文回顾了在欧洲核子中心 (CERN) 的 ISOLDE 测量 Zn 同位素的实验, 基于 $^{62-80}\text{Zn}$ 核素基态和长寿命同核异能态的自旋、磁矩、电四极矩以及电荷均方根半径等基本性质, 并结合各种大规模壳模型计算结果, 系统地讨论了这一核区的壳结构演化、幻数特征、奇特形变和形状共存, 以及核子间关联激发等物理现象。最后, 基于已有的实验数据和物理现象, 以及理论预言的 $N=50$ 以上镍核区的能级演化特征, 我们提出在 ISOLDE 的共线共振电离光谱装置上测量更加丰中子的 $^{81,82}\text{Zn}$ 核素基本性质的实验设想。

关键词: 激光光谱学; 自旋; 磁矩; 电荷半径; 壳演化; 形状共存; 形变

中图分类号: O572.33

文献标志码: A

DOI: 10.11804/NuclPhysRev.37.2019CNPC34

1 引言

原子核是由核力控制的量子多体复杂系统。类似原子中的电子系统, 原子核存在量子壳层结构, 形成幻数 (如 $N, Z=8, 20, 28, 50, 82$)。随着放射性束流的产生以及同位素分离技术的发展, 对远离稳定线核素的实验研究成为可能, 并揭示出原子核众多奇特结构现象, 如晕核、集团结构、幻数变化、壳演化、奇特形变等。其中对丰中子双幻核附近核性质和结构的研究有助于我们更好地理解核子之间的相互作用^[1-2], 是目前核结构研究的前沿热点之一。丰中子的 ^{78}Ni 核素, 是理论预言的中质比最大的极端丰中子双幻核, 其附近核素的性质和结构变化多年来吸引了众多实验和理论研究^[2-9]。

针对丰中子双幻核 ^{78}Ni 附近核素的大量实验和理论研究表明该核区包含丰富的结构信息。例如: (1) Otsuka 等^[10] 在 2005 年发现核子核子有效相互作用的张量力部分可以影响单粒子有效能级的变化, 并预言在丰中子的 Ni 区域, 随着中子填充 $g_{9/2}$ 轨道, 质子的 $p_{2/3}$ 和 $f_{5/2}$ 轨道会发生反转。此理论预言被随后一系列实验结果直接验证^[11-13]。(2) 实验测量的 Ni 区域偶偶核的第一个 2^+ 态激发能显示, 在 Ni 同位素链 $N=40$ 处有明显的亚壳效应^[14]。近期实验测量的 Cu 同位素的电荷半径也显示 $N=40$ 处有较弱的亚壳特征, 并发现随着质子

数增加, 这种亚壳效应逐步减弱^[15]。而其它邻近核素的磁矩、电荷半径、质量、寿命、激发态能量等实验数据均表明在 Zn、Ga、Ge 等同位素链中有明显增强的集体效应^[12, 16-17]。(3) 早在 20 世纪 80 年代已有实验结果表明在幻数 $N=50$ 附近的 Ge, Se 等核素中有形变迹象, 可能存在形状共存现象^[18]。(4) Ni-Ga 的核素质量数据有力地支持 $N=50$ 的闭壳效应。同时, 这一核区核素的寿命、 4^+ 和 2^+ 态能级和跃迁几率之比 $B(E2; 4_1^+ \rightarrow 2_1^+)/B(E2; 2_1^+ \rightarrow 0_{g.s.}^+)$ 的实验测量结果也进一步支持了 ^{78}Ni 的双幻特性^[3, 6-7, 19]。

锌 (Zn) 核素在 $Z=28$ 的满壳之上多两个质子, 处于球形核 (Ni 同位素) 与形变核 (Ge 同位素) 的过渡区域。当中子数在 $N=28$ 至 50 两个中子幻数之间时, Zn 同位素链会展现闭壳效应和集体效应的特征^[20]。因此, 实验上可通过系统地研究 Zn 同位素的结构, 来加深理解丰中子镍区域表现出的丰富核结构现象。原子核的基本性质与原子核的内在结构密切相关, 也可以用于检验不稳定核区发展起来的原子核理论模型, 曾为不稳定核奇特结构研究作出过独特贡献^[21], 如用于研究壳演化、幻数特征、形变等核结构现象。激光光谱学技术^[22] 是通过测量不稳定原子核外电子的超精细结构和同位素移位, 来精确提取原子核的自旋、磁矩、电四极矩和电荷半径等基本性质信息^[23]。本文将简要介绍在 ISOLDE-CERN

收稿日期: 2019-12-30; 修改日期: 2020-05-28

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2018YFA0404403); 国家自然科学基金项目 (11875073, U1967201)

作者简介: 王姝婧 (1996-), 女, 新疆乌鲁木齐人, 博士研究生, 从事粒子物理与原子核物理研究; E-mail: 1801110106@pku.edu.cn

[†] 通信作者: 杨晓菲, E-mail: xiaofei.yang@pku.edu.cn.

的共线激光谱 (collinear laser spectroscopy, COL-LAPS)^[24] 装置上开展的 Zn 同位素的超精细结构测量实验。通过系统地分析 ⁶²⁻⁸⁰Zn 同位素基态和同核异能态的基本性质, 并借助不同模型空间的各种壳模型有效相互作用计算结果, 本文将详细讨论 Zn 同位素所展现出的丰富结构特征。文章最后, 我们将基于已有的实验测量和物理讨论, 提出针对更丰中子 Zn 同位素中子轨道演化研究的进一步实验研究计划。

2 实验方法

利用激光谱测量 ⁶²⁻⁸⁰Zn 核素超精细结构的实验是在欧洲核子中心 (CERN) 的 ISOLDE 在线同位素分离装置实验终端 COLLAPS 上完成的。不稳定的 Zn 同位素是通过 1.4 GeV 的质子束轰击厚 UC_x 靶反应产生, 再利用激光离子源^[25] 选择性电离到 Zn 的离子态 (Zn II) 后进行后续质量分离。为了压制荧光测量方法的本底^[22], 在将 Zn 离子束传输到实验终端前, 先经过射频四极冷却聚焦器^[26] 冷却并积累 200 ms, 并提供宽度为 5 μs 的 Zn 离子脉冲。脉冲离子束在激光谱实验终端经过电荷

交换室 (内部充有高密度的钠蒸汽) 被中性化, 使得 Zn 原子最外层电子布居在 4s4p ³P₂ 亚稳态。连续钛宝石激光器提供的基频光 (利用高精度波长计锁频在 961.450 8 nm) 经倍频系统后产生 480.725 4 nm 波长的光束。倍频后的激光波长匹配 Zn 原子的 4s4p ³P₂ → 4s5s ³S₁ 跃迁频率。当激光束与中性化后的 Zn 脉冲原子束在激光谱装置共线传输时, Zn 原子核外的电子被共振激发到 4s5s ³S₁ 激发态。激发态电子退激产生荧光被由四套光电倍增管探测器组成的荧光探测系统收集。在具体的实验中, 激光频率固定不变, 通过调节 Zn 束流的能量并利用多普勒效应来改变原子吸收的激光频率, 从而达到电子能态超精细能级共振的目的。实验中通过电子学和数据获取系统得到收集的荧光强度和束流能量 (原子吸收激光频率) 的函数谱图, 即超精细结构谱图^[27]。后续的数据分析过程中, 通过最小 χ² 法^[28] 来系统地拟合 ⁶²⁻⁸⁰Zn 同位素的超精细结构谱, 即可精确提取超精细结构常数和同位素移位等原子物理参量。这些参量与原子核的性质直接相关, 由此可以模型无关地提取 ⁶²⁻⁸⁰Zn 同位素的自旋、磁矩、电四极矩及均方根电荷半径参量 (表 1)。

表 1 超精细结构谱中提取的 ⁶²⁻⁸⁰Zn 同位素的自旋、磁矩、电四极矩及均方根电荷半径^[20, 27]

Isotope	I^π	μ_{exp}/μ_N	$Q_{s,\text{exp}}/\text{b}$	$\delta\langle r^2 \rangle^{68,A}/\text{fm}^2$	Isotope	I^π	μ_{exp}/μ_N	$Q_{s,\text{exp}}/\text{b}$	$\delta\langle r^2 \rangle^{68,A}/\text{fm}^2$
⁶² Zn	0 ⁺	-	-	-0.493(3)[52]	⁷³ Zn	1/2 ⁻	+0.5585(5)	-	0.318(3)[37]
⁶³ Zn	3/2 ⁻	-0.282(1)	+0.20(2)	-0.389(9)[43]	^{73m} Zn	5/2 ⁺	-0.8527(14)	+0.43(4)	0.322(6)[37]
⁶⁴ Zn	0 ⁺	-	-	-0.279(4)[34]	⁷⁴ Zn	0 ⁺	-	-	0.375(4)[44]
⁶⁵ Zn	5/2 ⁻	+0.7695(16)	-0.024(15)	-0.257(7)[25]	⁷⁵ Zn	7/2 ⁺	-0.7887(9)	+0.16(2)	0.349(3)[51]
⁶⁶ Zn	0 ⁺	-	-	-0.121(4)[16]	^{75m} Zn	1/2 ⁻	+0.5580(9)	-	0.373(6)[51]
⁶⁷ Zn	5/2 ⁻	+0.875479(9)	+0.122(10)	-0.089(6)[8]	⁷⁶ Zn	0 ⁺	-	-	0.421(4)[57]
⁶⁸ Zn	0 ⁺	-	-	0	⁷⁷ Zn	7/2 ⁺	-0.9074(1)	+0.48(4)	0.440(5)[64]
⁶⁹ Zn	1/2 ⁻	+0.557(2)	-	0.026(6)[9]	^{77m} Zn	1/2 ⁻	+0.562(2)	-	0.455(11)[64]
^{69m} Zn	9/2 ⁺	-1.1613(7)	-0.39(3)	0.073(3)[8]	⁷⁸ Zn	0 ⁺	-	-	0.474(3)[70]
⁷⁰ Zn	0 ⁺	-	-	0.142(3)[15]	⁷⁹ Zn	9/2 ⁺	-1.1866(10)	+0.40(4)	0.461(3)[77]
⁷¹ Zn	1/2 ⁻	+0.551(1)	-	0.227(7)[23]	^{79m} Zn	1/2 ⁺	-1.018(1)	-	0.639(8)[75]
^{71m} Zn	9/2 ⁺	-1.049(1)	-0.26(3)	0.191(3)[23]	⁸⁰ Zn	0 ⁺	-	-	0.465(4)[84]
⁷² Zn	0 ⁺	-	-	0.292(3)[30]					

3 物理讨论

基于以上实验数据, 我们将讨论在 Zn 核素中发现的多个重要奇特物理现象。例如, 结合大规模壳模型计算, 系统讨论当中子填充 $g_{9/2}$ 轨道时, ^{63-79g,m}Zn 核的结构从单粒子特性到形变再到单粒子特性的壳层演化; 并通过分析质子在 Z=28 之上轨道的占据几率与 Zn 同位素电荷半径奇偶歧离现象的关联, 揭示核子关联激发

对原子核尺寸的影响; 在 ⁷⁹Zn 中首次确认了长寿命的 1/2⁺ 同核异能态, 并分析估算出其寿命和能级范围, 结合此能态的磁矩和电荷半径得到丰中子双幻核 ⁷⁸Ni 附近形状共存的实验证据; 发现了 ⁷³Zn 核素的长寿命激发态具有反常增大的电四极矩, 结合理论计算发现其具有三轴形变特征等。我们将基于 ⁶²⁻⁸⁰Zn 基本性质详细讨论与之相关的壳结构演化、核半径与核子关联、以及形变与形状共存等物理问题。

3.1 壳结构与演化

实验确定了丰中子 $^{63-79}\text{g,mZn}$ 同位素基态和同核异能态的自旋宇称，其中 $^{73-79}\text{g,mZn}$ 的自旋宇称是激光光谱实验首次确定，这些核低能级系统性如图 1 (粗线给出的是本次实验观察并测量的长寿命基态和同核异能态) 所示。值得注意的是，在 ^{73}Zn 的激光光谱测量中排除了

可能的 $9/2^+$ 同核异能态，并确认了文献 [29–30] 中自旋为 $5/2^+$ 寿命在 13 ms 左右的同核异能态的存在 [31]。同时，实验首次发现了 $N=49$ 核素 ^{79}Zn 的 $1/2^+$ 长寿命同核异能态并分析确认其寿命在几百个 ms 量级 [32]，为 ^{78}Ni 双幻核附近丰富的核结构图像又增加了一笔。关于此同核异能态所揭示的新的结构信息将在 3.3 节中详细讨论。

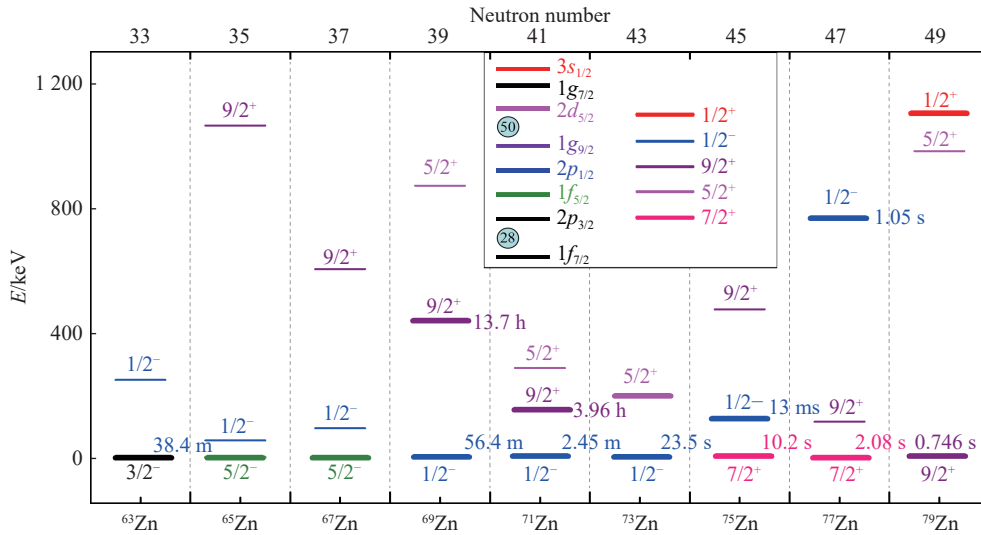


图 1 (在线彩图) $^{63-79}\text{Zn}$ 核素低能级图

粗线给出的是本次实验观察并测量的长寿命基态和同核异能态，其中 $^{73-79}\text{g,mZn}$ 的自旋和宇称是激光光谱实验首次确认，而寿命和能级信息取自 NNDC。

在理想壳模型框架下，原子核的自旋、磁矩 (g 因子：磁矩与自旋的比值) 与原子核中未配对的价核子在特定轨道的填充相关。特别是在幻数核附近，这些参量可以用来探索原子核能级的波函数 [33]。为了研究这些奇- A Zn 同位素中价中子 (或空穴) 填充的中子轨道，我们在图 2 中比较了实验得到的 $^{63-79}\text{Zn}$ 基态和同核异能态的 g 因子 (图中红色和蓝色点) 和计算的有效单粒子 g 因子。图 2 中虚线表示不同中子轨道 (如 $Z=28$ 闭壳以上 $p_{3/2}$, $f_{5/2}$, $p_{1/2}$, $g_{9/2}$) 对应的有效 g 因子。结合图 1 和图 2，我们可以简单推断从 $N=33$ 到 $N=49$, Zn 核素中的价中子分别填充理想壳结构中的 $f_{5/2}$, $p_{1/2}$, $g_{9/2}$ 轨道。对于 ^{63}Zn 核素，尽管有 33 个中子，最后一个价中子未填充 $f_{5/2}$ 而是填充在更低的 $p_{3/2}$ 轨道形成一个价空穴，留一对中子在 $f_{5/2}$ 轨道，从而形成自旋为 $3/2$ 的基态。而这个态 g 因子的实验值落在了轨道 $p_{3/2}$ 和 $f_{5/2}$ 的有效单粒子 g 因子计算值的中间，表明此能级的波函数由单中子在 $p_{3/2}$ 和 $f_{5/2}$ 轨道以不同概率占据形成的混合组态。而这一能态的电四极矩值 $Q_s = +0.20(2)$ 也表明其具有相对较大的形变，支持磁矩推断出的混合组态特性。对于 $^{69-79}\text{Zn}$ 核素，其正宇称态 (如 $5/2^+$,

$7/2^+$, $9/2^+$) 均是由未配对的价中子占据在中子 $g_{9/2}$ 轨道形成，而负宇称的 $1/2^-$ (基态或同核异能态) 是由 $p_{1/2}$ 轨道上单中子空穴形成。其中非常规的 $5/2^+$, $7/2^+$ 等能态，主要由占据在 $\nu g_{9/2}$ 轨道的三个准自由价中子组成的 $(\nu 1g_{9/2}^3)[5/2^+]$ 或 $(\nu 1g_{9/2}^3)[7/2^+]$ 组态贡献，也就是常说的“seniority-3”组态 [34]。关于这些具有“seniority-3”组态的能级结构分析将在下文 3.3 节中进行详细介绍。对于 ^{79}Zn 的 $1/2^-$ 能态，从实验的超精细能谱图 (仅有三个共振峰，详情参考文献 [32]) 就可以毫不含糊地确认其自旋，但宇称的指定需间接通过图 2 所示的 g 因子推断。实验得到的 $1/2^-$ 能态的 g 因子为 -2.036 (较大的负值)，远离 $\nu p_{1/2}$ 有效单粒子 g 因子计算值 $+0.89$ (较大的正值)，而更接近于 $N=50$ 闭壳层以上 $\nu s_{1/2}$ 轨道的有效单粒子 g 因子 (较大的负值)。这间接证明此能态的宇称为正，主要由中子跨壳激发到更高的 $\nu s_{1/2}$ 轨道而形成的 $2h-1p$ 闯入态，其波函数主要组态为 $(1g_{9/2}^{-2}3s_{1/2}^1)[1/2^+]$ 。同时，我们从图 2 中也可知，此能态的实验 g 因子与计算的有效单粒子 g 因子值有一定偏差，表明有其他组态的混合存在的可能，如单中子越壳激发到 $N=50$ 以上的 $\nu(1g_{9/2}^{-2}2d_{5/2}^1)[1/2^+]$ 组态 [32]。

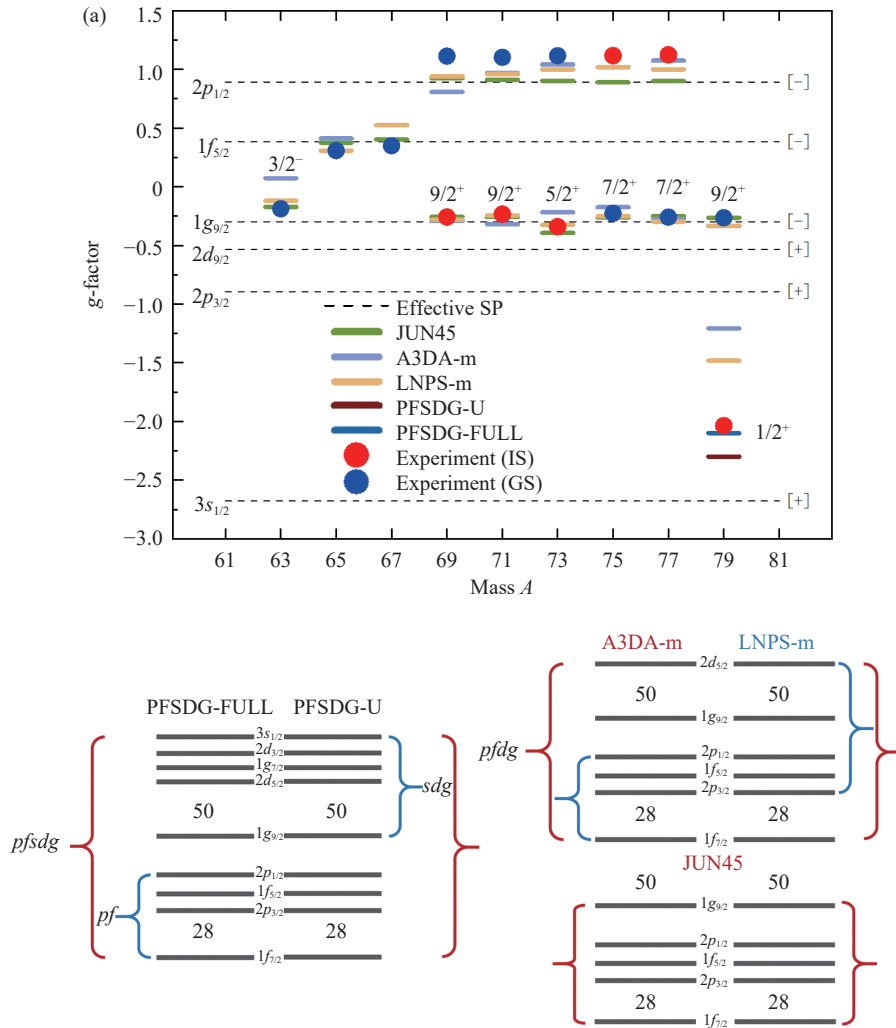


图 2 (在线彩图) 实验测量 g -因子和壳模型理论比较

(a) $^{63-79}\text{Zn}$ 基态和同核异能态有效 g -因子实验值与不同壳模型相互作用下的有效单粒子值对比; (b) 不同壳模型相互作用的模型空间。

以上我们仅通过实验确认自旋和磁矩值来讨论 Zn 同位素的壳结构演化, 而对于每个能态波函数组态结构的具体描述, 需要借助于壳模型的理论计算。图 2(b) 中给出了五种不同模型空间的壳模型相互作用, 这些相互作用计算的理论 g -因子的值在图 2(a) 中与实验结果进行对比。曾成功描述了 Cu 和 Ga 同位素磁矩和电四极矩的 JUN45 相互作用 [11–12], 是以 ^{56}Ni 为核心, 以质子中子 $f_{5/2}pg_{9/2}$ 轨道为模型空间的。可以看出, 除了 ^{79}Zn 的 $1/2^+$ 同核异能态外, 所有的实验结果均能被 JUN45 壳模型相互作用很好地描述, 例如, 自旋为 $1/2^-$ 的 $^{69,71,73,75m,77m}\text{Zn}$ 的 g -因子与理论计算的结果基本一致, 壳模型给出的波函数组态也符合 $\nu p_{1/2}$ 单中子空穴; 自旋为 $9/2^+$, $7/2^+$, $5/2^+$ 的 $^{69m,71m,73m,77,79}\text{Zn}$ 的 g -因子与壳模型理论计算值也很好符合, 计算也能给出价中子布局在 $g_{9/2}$ 的主导组态。值得注意的是, ^{73}Zn 的 $5/2^+$ 同核异能态的 g -因子稍微偏离附近其他同

位素的结果, 暗示这一能态可能存在多组态混合的形变特征。基于 JUN45 的壳模型理论计算的波函数组态也给出一致的结论, 其中贡献最大的组态成分也仅有 10%。

由于 JUN45 相互作用的模型空间局限于 $N=50$ 以下的 $pf_{5/2}g_{9/2}$, 无法用于描述丰中子 ^{79}Zn 同核异能态 $1/2^+$ 的磁矩。因此, 我们采用了 A3DA-m [35] 和 LNPS-m [36] 两种相互作用, 它们通过模型空间拓展允许 $\pi f_{7/2}$ 轨道上的质子跨 $Z=28$ 满壳激发以及 $\nu g_{9/2}$ 轨道上的中子跨 $N=50$ 满壳激发, 并成功用于镍核区壳层演化和形变特征的描述 [35, 37]。如图 2(a) 所示, A3DA-m 和 LNPS-m 两种相互作用已经能够计算 ^{79}Zn $1/2^+$ 能态的磁矩。但其模型空间仍局限于只包含 $N=50$ 闭壳以上 $\nu d_{5/2}$ 轨道 (图 2(b))。而上文讨论过的 $1/2^+$ 组态可能以 $(1g_{9/2}^{-2}3s_{1/2}^1)[1/2^+]$ 主导, 所以理论计算的结果与实验值偏差很大 [27]。进一步我们借助了新发展的 PFSDG-U 相互作用 [9] (模型空间: 质子 pf 轨道和中子 sdg 轨道,

如图 2(b) 来解释此闯入能态。如图 2(a) 所示, 理论结果已经非常接近实验值, 进一步表明此 $1/2^+$ 能态是由 $1p-2h$ 激发的 $(1g_{9/2}^{-2}3s_{1/2}^1)[1/2^+]$ 组态主导, 验证了其闯入态特征。近期, 日本东京大学的 Otsuka 等 [38] 发展了新的壳模型相互作用 PFSDG-FULL, 将模型空间拓展到质子中子 $pfsg$ 轨道, 考虑了质子中子跨 $Z=N=28$ 和 $Z=N=50$ 闭壳激发的影响。最新 PFSDG-FULL 理论计算的磁矩结果与实验值完全一致, 计算的波函数也给出其主要组态为 $(1g_{9/2}^{-2}3s_{1/2}^1)[1/2^+]$, 并与 $(1g_{9/2}^{-2}2d_{5/2}^1)[1/2^+]$ 组态有一定几率的混合, 再次确认 ^{79}Zn 中 $1/2^+$ 同核异能态 $1p-2h$ 闯入态结构特征。

由于 Zn 同位素有偶数个质子, 很难从自旋磁矩的实验结果中直接研究质子壳层的演化特征。但结合壳模型计算不同核素能态中质子在不同轨道的布局情况, 我们也可以间接讨论质子轨道的变化。根据 JUN45 和 A3DA-m 等相互作用对 $^{69-79}\text{Zn}$ 奇- A 核中正宇称 $9/2^+$, $7/2^+$, $5/2^+$ 能态波函数的计算结果, 我们可以分析出(详情请参考文献 [31]), 当中子数在 $N=45$ 到 $N=47$ 变化时, 质子布居从 $\pi p_{3/2}$ 到 $\pi f_{5/2}$ 出现了明显的反转, 而之前的实验测量得到在 Cu ($Z=29$)(Ga ($Z=31$)) [11-12] 同位素中中子从 $N=43$ 到 $N=45$ ($N=47$ 到 $N=49$) 时, 质子 $\pi p_{3/2}$ 到 $\pi f_{5/2}$ 发生反转, 这些都是张量力引起的壳演化现象的典型事例。

3.2 核半径与核子关联

电荷半径是原子核最基本的性质之一, 是研究诸如晕核、壳/亚壳效应 [39]、核子关联 [15]、核形变和形状共存 [32, 40] 等结构信息的重要物理观测量 [20]。同时, 中等质量区丰中子核素的电荷半径数据对于检验和发展核理论模型至关重要。目前的理论模型在某种程度上可以大体描述电荷半径的整体变化规律, 但对于某一核素电荷半径的精确计算或某一同位素链电荷半径微小的细节变化来说还存在很大的困难 [41-43]。原子核电荷半径的另一个有趣的特征是它的奇偶歧离效应: 多数奇- N 核电荷半径小于相邻偶- N 核半径的平均值。这种奇偶歧离效应一般被认为是由对效应引起, 即奇- N 核中未配对的核子限制了某一特定轨道核子的对激发, 继而减弱了质子对激发 [44-45], 导致电荷半径较小。因此, 上述实验测量得到的电荷半径(如表 1 所列)的系统分析可帮助我们进一步了解 Zn 同位素的结构信息。

图 3(a) 给出 Cu、Zn、Ga 同位素的电荷半径 ($\langle r^2 \rangle$) 减去液滴模型计算的球体贡献 ($\langle r^2 \rangle_0$) 后的“残余”电荷半径 ($\langle r^2 \rangle - \langle r^2 \rangle_0$) 图 [20]。这些“残余”电荷半径反映的就是减去球形部分贡献后, 剩余的形变和核子关联等对电

荷半径的贡献。“残余”电荷半径整体呈现抛物线型, 表明了以下核结构特征: (1) $N=28$ 和 $N=50$ 具有很强的壳效应。原子核在幻数附近更接近于球形, 而相关的形变或者核子关联激发效应很小。所以“残余”电荷半径的值会接近于零或者达到极小。(2) Cu 同位素的“残余”电荷半径在 $N=40$ 附近出现极小值, 反映了弱 $N=40$ 亚壳效应。此极小值在 Zn 同位素的“残余”电荷半径中几乎消失, 说明 $N=40$ 亚壳效应随着质子数的增加(自由核子的增多)逐渐消失, 相应的集体效应逐渐增强。虽然 Ga 同位素的“残余”电荷半径在 $N=40$ 附近有一明显下降, 而这一特征被认为是反转的奇偶歧离效应 [15, 17] 和 $N=40$ 以上 Ga 核素中出现的大形变导致 [12]。此反转的奇偶歧离效应和 $N=40$ 以上的形变现象也同时出现在 Zn 同位素链。

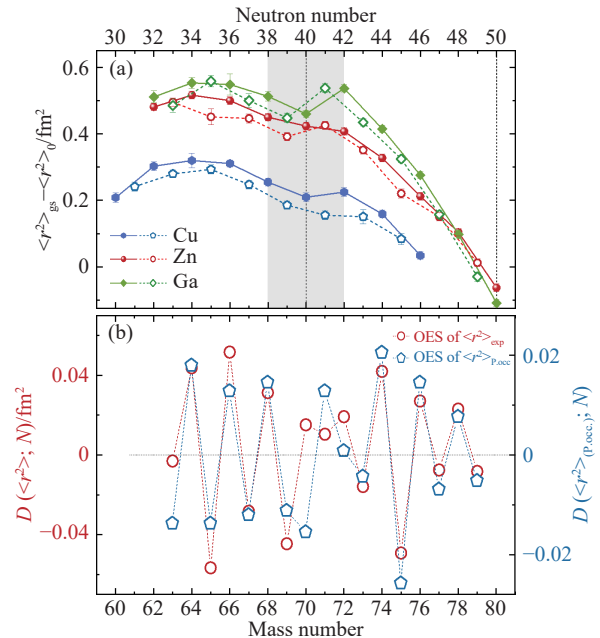


图 3 (在线彩图) 实验电荷半径和奇偶歧离效应 (a) Cu、Zn、Ga 同位素的电荷半径 ($\langle r^2 \rangle$) 减去液滴模型计算的球体贡献 ($\langle r^2 \rangle_0$) 后的“残余”电荷半径; (b) Zn 同位素电荷半径的奇偶歧离 $D(\langle r^2 \rangle, N)$ 与从质子跨 $Z=28$ 闭壳激发概率推导出的电荷半径奇偶歧离比较。

为了进一步研究 Zn 同位素链出现的奇偶歧离反转现象以及关联效应对电荷半径的影响, 我们利用壳模型 A3DA-m 计算了 $^{62-80}\text{Zn}$ 同位素基态和长寿命同核异能态质子跨 $Z=28$ 闭壳激发的几率, 并发现这个质子跨壳激发的几率和“残余”电荷半径的趋势类似(参考文献 [20] 图 2 和图 3 (a))。这些现象说明了中子数变化引起的与之关联的质子数跨壳激发与原子核的电荷半径的大小密切相关 [46]。图 3(b) 给出了中子数为 N 的 Zn 同位素半径和相邻的 $N-1$ 与 $N+1$ 的 Zn 同位素电荷半径平均

值之差 (即奇偶歧离的表达式)^[47-48]:

$$D(\langle r^2 \rangle, N) = \langle r^2 \rangle^N - \frac{1}{2} (\langle r^2 \rangle^{N-1} + \langle r^2 \rangle^{N+1}). \quad (1)$$

图中红色数据是通过表 1 中电荷半径数据计算得到, 而蓝色数据则是从壳模型理论计算的质子数跨壳激发几率推算得到。虽然目前很难用精确的理论来定量计算质子激发到不同的轨道对电荷半径的影响, 但从质子激发宏观推导得到的奇偶歧离效应与实验结果在一个量级范围内符合。图 3(b) 中两组结果均表现出如下特征: (1) 沿着整个 Zn 同位素链, 质子激发造成奇偶歧离的微小变化与电荷半径奇偶歧离变化趋势一致。(2) 奇质量数出现 $D(\langle r^2 \rangle, N) > 0$ 时, 说明这个区域存在奇偶歧离的反转, 如在图 3(b) $N=41$ 的位置。而质子激发结果没有明显地给出这一特征, 主要是在 A3DA-m 壳模型计算中由于 $N=40$ 前后中子轨道宇称反转抑制了中子激发, 从而导致质子激发的减小^[13]。(3) 接近 $N=50$ 中子闭壳时, 中子跨 $N=50$ 壳激发被极大限制从而导致质子跨壳激发减小, 也引起奇偶歧离效应的弱化。(4) 实验结果中 (图 3(a)) $N=45$ 的 Zn 核素电荷半径突然减小, 造成奇偶歧离较大的震荡, 同样的现象也出现在质子激发概率推导的电荷半径中。因此, 通过图 3 的定性分析, 我们已经可以明显地看出中子变化引起的质子关联激发与原子核尺寸的关系。而这一发现对于发展用于计算电荷半径的理论模型有很大的指导作用。

3.3 形变与形状共存

上文中针对磁矩和电荷半径的分析表明 Zn 同位素的几个核素出现了形变现象, 例如 $^{63,73}\text{Zn}$ 的磁矩 (g -因子) 与壳模型计算的比较说明其波函数是多组态混合, 电荷半径在 $N=40$ 之后的奇偶歧离反转也有部分形变的贡献。原子核的电四极矩也可以反映原子核形变的大小。因此, 这一节我们将在前文磁矩和电荷半径分析的基础上, 进一步讨论奇- A Zn 同位素的电四极矩以及与之相关的形变现象。

3.3.1 三轴形变

图 4 比较了 $^{63-79}\text{Zn}$ 核素中非 1/2 自旋态的实验电四极矩 (实心彩色点) 与不同壳模型计算结果。整体来看, 除了具有反常增大电四极矩的 ^{73}mZn , 两个不同模型空间的壳模型 JUN45 和 A3DA-m 均能很好地描述实验给出的电四极矩值。与前文磁矩给出的结果一致, 这些非 1/2 自旋能态分别由中子填充 $p_{3/2}$, $f_{5/2}$, $g_{9/2}$ 轨道形成。在简单壳模型的框架下, 当核子逐渐填充一个特定轨道时, 其电四极矩的值由负值 (单核子态) 逐渐增大至零 (半满壳) 再增大到正值 (单空穴态), 符合如下

公式描述的线性变化^[49]:

$$Q = -\langle r^2 \rangle \frac{2j-1}{2(j+1)} \left[1 - \frac{2(p-1)}{2j-1} \right], \quad (2)$$

其中: $\langle r^2 \rangle$ 为均方电荷半径; p 为处于角动量为 j 的轨道上的核子数。

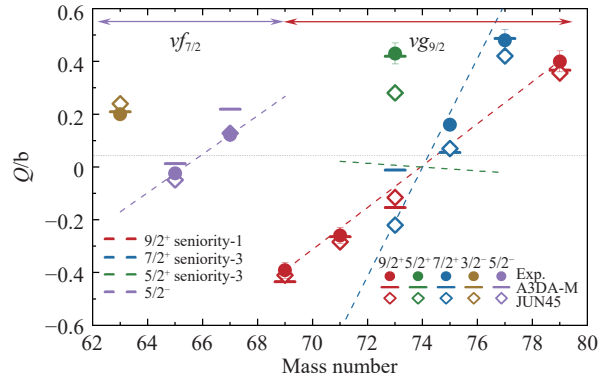


图 4 (在线彩图) $^{63-79}\text{Zn}$ 的非 1/2 自旋态的电四极矩实验值与不同壳模型相互作用下的理论值比较

当中子填充 $f_{5/2}$, $g_{9/2}$ 时, Zn 核素的电四极矩变化规律正好符合这些教科书经典结论。而对于 $^{73,75,77}\text{Zn}$ 的 $5/2^+$, $7/2^+$ 态, 如前文所讨论的, 是由填充在 $g_{9/2}$ 轨道的三个准自由核子形成的“senority-3”组态。因此, 在壳模型框架下, 我们假定 $^{69,79}\text{Zn}$ 的实验电四极矩值近似为 $g_{9/2}$ 轨道上的单中子电四极矩, 则可以计算得到“senority-1” (自旋 $9/2^+$), “senority-3” (自旋 $5/2^+$, $7/2^+$) 组态的电四极矩^[32], 如图 4 中彩色虚线所示 (计算细节参考文献 [32] 中式 (1))。同样地, 除了 ^{73}mZn , 其他的实验值均可以被“senority-1,3”组态所描述。

从图 4 中可知, 只有具有 $fpg_{9/2}d_{5/2}$ 模型空间的 A3DA-m 相互作用可以准确计算 ^{73}mZn 的电四极矩值。A3DA-m 相互作用可允许质子和中子同时跨 $Z=28$ 和 $N=50$ 闭壳激发, 因此可以比较好地描述集体效应较强的能态, 如 ^{73}Zn 的 $5/2^+$ 同核异能态。计算结果的确表明, 在 $N=43$ 时, 中子布居在 $d_{5/2}$ 轨道的几率增大, 与此同时质子布居在 $f_{7/2}$ 轨道的几率减少, 也就是说, 质子跨 $Z=28$ 壳层, 中子跨 $N=50$ 壳层的几率增强, 且这两类激发均具有电四极的 E2 跃迁。 ^{73}Zn 中增强的集体效应与偶偶核 Zn, Ge, Se 在 $N=42$ 附近的形变结论一致^[50-53]。

采用蒙特卡罗方法的 A3DA-m 壳模型 (MCSM: Monte Carlo Shell) 计算可以提供原子核某能态的势能曲面, 因此可以帮助我们进一步分析 ^{73}mZn 的形状特征。图 5 是利用 MCSM 计算的 ^{73}mZn 势能曲面, 又称 T-plot, XY 坐标轴分别代表本征电四极矩 $Q_0 \propto \langle 2z^2 -$

$x^2 - y^2$), $Q_2 \propto \langle x^2 - y^2 \rangle$ 。图中白色圆圈代表 MCSM 基矢, 圆圈大小反映了每个基矢与本征态的重合几率, 也就是说反映每个基矢在总的波函数中的重要性。所以, 从整个圆圈密集分布的范围, 就可以推断每个能态的本征电四极矩的大小。显而易见, 图 5 的结果显示自旋为 $5/2^+$ 的 ^{73m}Zn 同核异能态具有三轴形变的特征, 这就解释为什么前文中我们无法用 seniority 或者简单的壳模型 (如 JUN45) 来描述实验测量的大的电四极矩。其实, 早期 β -衰变和 γ -谱学等实验结果也已经指出, 在偶偶核 $^{72,74}\text{Zn}$ 中也存在三轴形变, 但是奇-A 核 $^{71,75}\text{Zn}$ 中却没有这种现象^[31]。在同一个核区的 Ge^[54] 和 Se^[55-56] 同位素中也存在有三轴形变现象。

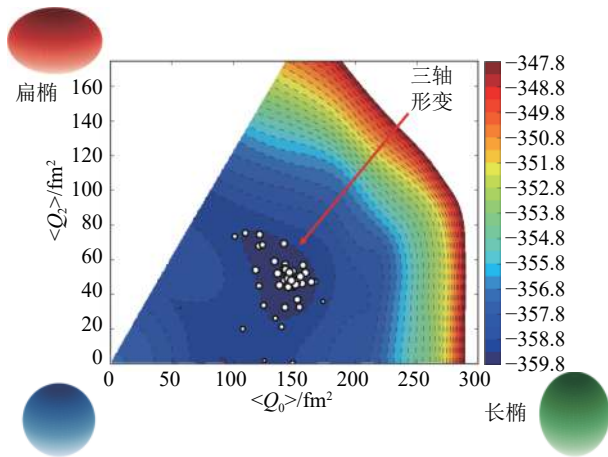


图 5 (在线彩图) 基于蒙特卡洛的 A3DA-m 壳模型计算的自旋为 $5/2^+$ 的 ^{73m}Zn 的势能曲面和 T-plot 图

3.3.2 形状共存

利用激光谱测量 Zn 同位素的基本性质实验中, 一个重要的发现是 ^{79}Zn 中的 $1/2^+$ 同核异能态。前文针对自旋, 磁矩的分析已经证明了这个能态具有闯入态的特征。综述文章^[57] 中曾详细讨论过不同核区具有闯入特征的核的形变, 而闯入态形变大多是由多质子 (或中子) 多空穴越壳激发引起, 一般具有较低的单粒子能 (一般 $< 1\text{MeV}$), 并形成与基态相对应的同核异能态, 因此也成为形状共存现象出现的信号之一。形状共存是在单幻数核附近存在的一种重要实验现象, 通常认为是闭壳的稳定特性和闭壳外的质子中子的剩余相互作用共同作用的结果, 一般表现为原子核的基态是一种形状而低能激发态是另一种形状。

激光谱实验确定的 ^{79}Zn 的基态 $9/2^+$ 和同核异能的闯入态 $1/2^+$ 是否也具有形状共存特征? 我们知道, $1/2^+$ 的能级最早通过转移反应得到^[58], 如图 1 所示。但是此实验确定的能级有 10% 以上的误差。这里讨论的激光谱实验中, 我们推算了 $1/2^+$ 的寿命在几百毫秒

的量级。这个长寿命特征, 结合 γ E2 跃迁能量与寿命的关系, 我们可以估算出 $1/2^+$ 的能级要么低于 $5/2^+$, 要么在 $< 1\text{MeV}$ 范围 (详情见参考文献^[32]), 符合形状共存现象出现在低能区 (一般 $< 1\text{MeV}$) 的特征。新发展的壳模型 PFSDG-U 计算结果也表明, $1/2^+$ 的能量是低于实验观察的 $5/2^+$ (详情参考文献^[27] 图 2)。最新的 γ 谱学实验研究系统地测量了 ^{79}Zn 激发态能级, 确认了 $1/2^+$ 的能级为 $943.0(3)\text{keV}$, 低于 $5/2^+$ 能量, 与我们的估算结果一致。基态 $9/2^+$ 的自旋、磁矩、电四极矩的实验结果均表明其具有单粒子特性, 也就是说其形状是近球形。从实验的电四极矩值我们也可以计算基态的形变参数 $\beta_2 \sim 0.15$ 。而对于具有闯入特性的 $1/2^+$ 激发态, 磁矩和壳模型计算的波函数混合组态也说明其可能具有形变特征。表 1 列出了 ^{79}Zn 基态和同核异能态的电四极矩, 说明其同核异能态具有反常增大的半径。因此, 我们可以利用同核异能态和基态的电四极矩差来计算 $1/2^+$ 能态的形变参数 $\beta_2 \sim 0.22$ 。对于近幻数附近核素 ^{79}Zn 来说, 形变参数为 0.22 可以确定为较大形变的能态。图 6 总结了最新的 ^{79}Zn 基态和同核异能态的能级和估算的形变参数。在低于 1MeV 的能量范围内, ^{79}Zn 核素出现了近球形的基态和形变的长寿命同核异能态, 有力地验证了形状共存现象的存在。这也是在 ^{78}Ni 附近核区首次观察到的形状共存现象存在的实验证据。近期直接针对 ^{78}Ni 核素的伽马谱学实验和壳模型理论研究也发现一个低能量的形变态, 与 ^{78}Ni 近球形的基态形成了形状共存的现象^[2, 9]。

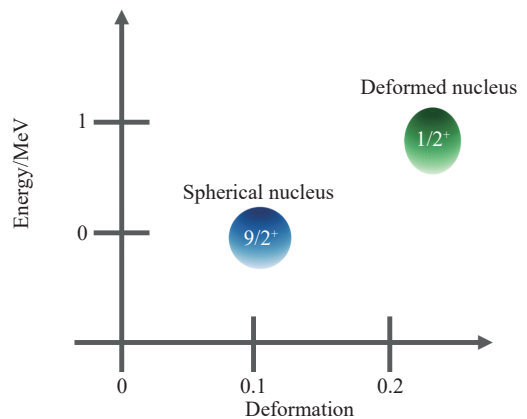


图 6 (在线彩图) ^{79}Zn 近球形的基态和形变的同核异能态的形状共存现象示意图

4 总结与展望

本文通过丰中子 Zn 同位素的共线激光谱实验提取的原子核自旋、磁矩、电四极矩和电荷半径等数据, 充分展示了基本性质与原子核结构 (壳演化、幻数、形变、

对效应、闯入等等)的密切关联。具体的讨论中,我们结合了不同模型空间中的大尺度壳模型计算的能级、基本性质、质子中子布局、势能曲面等,分别利用 Zn 核素的自旋和磁矩分析了这一核区壳结构的演化特征;利用实验提取的⁶²⁻⁸⁰Zn的电荷半径信息讨论了 $N=40, 50$ 的幻数特性, $N=40$ 以上区域形变现象,以及与中子变化引起的质子关联激发相关的奇偶歧离现象等;利用磁矩、电四极矩和电荷半径等综合信息确认了⁷⁸Ni附近形状共存现象和⁷³Zn中三轴形变现象。

近期大量实验结果已基本表明⁷⁸Ni具有双幻核特征 [3, 6, 7, 19], 但形状共存现象的发现使得相关的讨论并没有结束,也使得对⁷⁸Ni附近 $N=50$ 闭壳以上丰中子核素的研究更有吸引力。 $N=50$ 以上中子轨道如何演化? 近镍核素的电荷半径又是如何变化的? 这些问题的进一步深入探索会帮助我们更好地理解丰中子幻数附近核结构的特性。

图 7 给出了 $N=51$ 的同中子奇-A核的最低两个能级的系统演化。这些 $N=51$ 同中子核的基态 ($5/2^+$) 是单中子占据 $\nu 2d_{5/2}$ 轨道形成, 而第一激发 $1/2^+$ 能态是单中子激发到 $\nu 3s_{1/2}$ 轨道。图中实验数据表明, 当 fp 壳层中(从 $Z=40$ 到 $Z=34$) 质子数变化时, $N=50$ 闭壳以上中子 $\nu 3s_{1/2}$ 与 $\nu 2d_{5/2}$ 的能级间隙快速减小, 与简单的壳模型 $jj45pna$ 相互作用计算得到的结果一致 [59]。这种中子轨道的演化效应可以用质子-中子相互作用的张量力来解释: 即当填充在 $\pi f_{5/2}$ 的质子数逐渐减小时, 与中子 $\nu 2d_{5/2}$ 轨道吸引相互作用变弱, 而中子 $\nu 3s_{1/2}$ 轨道由于其 s 波性质而不受影响, 从而导致 $\nu 3s_{1/2}$ 与 $\nu 2d_{5/2}$ 两个壳层之间的相对能量减少。接着目前实验测量的⁹¹Zr到⁸³Ge第一激发能的变化进行系统外推, 在⁸¹Zn中很可能出现 $\nu 3s_{1/2}$ 与 $\nu 2d_{5/2}$ 轨道的反转现象, 即 $1/2^+$ 有可能成为⁸¹Zn的基态(如图中壳模型计算的结果)。目前基于手征有效场论的 $ab-initio$ 微观理论模型 $couple-cluster(CC)$ 已经预言了在⁷⁹Ni ($N=51$) 核素中, 基态的自旋宇称为 $1/2^+$ 。但是在国际现有的核物理大科学装

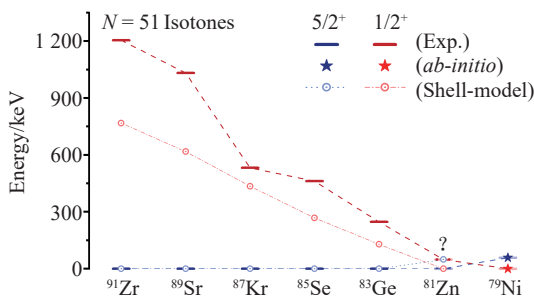


图 7 (在线彩图) 镍核区 $N=51$ 同中子核素基态和第一激发态能级图

置上, 由于束流强度非常有限, 很难进行⁷⁹Ni直接相关的实验研究, 故⁸¹Zn基态自旋的确定就变得尤为重要。基态自旋 $1/2^+$ 也有可能是 $2^+ \otimes 5/2^+$ 耦合而成。因此实验上不仅需要确定⁸¹Zn核素的基态自旋, 还需要磁矩信息来进一步分辨其主导波函数组态来自于中子 $\nu 3s_{1/2}$ 还是 $\nu 2d_{5/2}$ 轨道。

按上述讨论, 如果 $N=50$ 闭壳以上 $\nu 2d_{5/2}$ 和 $\nu 3s_{1/2}$ 中子轨道在⁸¹Zn和⁷⁹Ni中发生反转, 即 $\nu 3s_{1/2}$ 成为闭壳 $N=50$ 之上第一个轨道, 则有可能在这一区域出现中子皮效应。这些效应可能会部分反映在 $N=50$ 以上核素的电荷半径上, 如^{81,82}Zn。在图 8 中, 我们统计了镍区域电荷半径实验数据, 可以看到距离⁷⁸Ni的较近的 Cu, Zn 等核素, $N=50$ 以上的电荷半径数据缺乏。

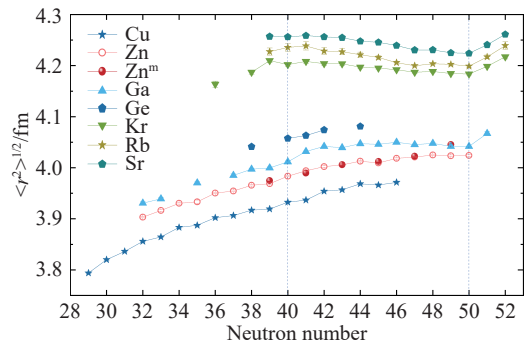


图 8 (在线彩图) 镍核区各同位素链的电荷半径

因此, 基于欧洲核子中心的 ISOLDE 放射性束流装置上的共线共振电离谱技术高灵敏度的优势 [60], 我们计划测量^{81,82}Zn核素的自旋、磁矩(电四极矩)和电荷半径等基本性质。目前, 针对^{64,66,67,68,70}Zn稳定核素的共线共振电离模式的离线测试工作已经完成, 分别测量了 Zn 原子 $^3P_{0,1,2} \rightarrow ^3D_{0,1,2}$ 等多个跃迁的超精细结构, 后续的数据分析将有助于我们进一步选择效率高、分辨率高的最优电离模型进行在线物理测量工作。

参考文献:

[1] WIENHOLTZ F, BECK D, BLAUM K, et al. *Nature*, 2013, 498: 346.
 [2] TANIUCHI R, SANTAMARIA C, DOORNENBAL P, et al. *Nature*, 2019, 569: 53.
 [3] XU Z Y, NISHIMURA S, LORUSSO G, et al. *Phys Rev Lett*, 2014, 113: 032505.
 [4] HAKALA J, RAHAMAN S, ELOMAA V V, et al. *Phys Rev Lett*, 2008, 101: 052502.
 [5] SAHIN E, GARROTE F L B, TSUNODA Y, et al. *Phys Rev Lett*, 2017, 118: 242502.
 [6] OLOVIER L, FRANCHOO S, NIIKURA M, et al. *Phys Rev Lett*, 2017, 119: 192501.
 [7] WELKER A, ALTHUBITI N A S, ATANASOV D, et al.

- Phys Rev Lett*, 2017, 119: 192502.
- [8] HAGEN G, JANSEN G R, PAPANBROCK T. *Phys Rev Lett*, 2016, 117: 172501.
- [9] NOWACKI F, POVES A, CAURIER E, et al. *Phys Rev Lett*, 2016, 117: 272501.
- [10] OTSUKA T, SUZUKI T, FUJIMOTO R, et al. *Phys Rev Lett*, 2005, 95: 232502(R).
- [11] FLANAGAN K T, VINGERHOETS P, AVGOULEA M, et al. *Phys Rev Lett*, 2009, 103: 142501.
- [12] CHEAL B, MANE E, BILLOWES J, et al. *Phys Rev Lett*, 2010, 104: 252502.
- [13] ICHIKAWA Y, NISHIBATA H, TSUNODA Y, et al. *Nature Physics*, 2019, 15: 321.
- [14] BRODA R, FORNAL B, KROLAS W, et al. *Phys Rev Lett*, 1995, 74: 868.
- [15] BISSELL M L, CARETTE T, FLANAGAN K T, et al. *Phys Rev C*, 2016, 93: 064318.
- [16] GUENAUT C, AUDI G, BECK D, et al. *Phys Rev Lett*, 2007, 75: 044303.
- [17] PROCTER T J, BILLOWES J, BISSELL M L, et al. *Phys Rev C*, 2012, 86: 034329.
- [18] HEYDE K, VAN ISACKER O, WAROQUIER M, et al. *Phys Rep*, 1983, 102: 291.
- [19] SHIGA Y, YONEDA K, STEPPENBECK D, et al. *Phys Rev C*, 2016, 93: 049904.
- [20] XIE L, YANG X F, WRAITH C, et al. *Phys Lett B*, 2019, 797: 134805.
- [21] BAI S W, YANG X F. *Nuclear Physics Review*, 2018, 35(4): 382. (in Chinese)
(白世伟, 杨晓菲. *原子核物理评论*, 2018, 35(4): 382.)
- [22] LIU Y C, BAI S W, YANG X F. *Nuclear Physics Review*, 2019, 36(2): 161. (in Chinese)
(刘永超, 白世伟, 杨晓菲. *原子核物理评论*, 2019, 36(2): 161.)
- [23] YANG X F(COLLAPS and CRIS collaboration). *J Phys: Conference Series*, 2018, 1024: 012031.
- [24] NEUGART R, BILLOWES J, BISSELL M L, et al. *J Phys G: Nucl Part Phys*, 2017, 44: 064002.
- [25] FEDOSSEEV V N, BERG L E, FEDOROV D V, et al. *Rev Sci Instrum*, 2012, 83: 02A903.
- [26] MANE E, BILLOWES J, BLAUM K, et al. *Eur Phys J A*, 2009, 42: 503.
- [27] WRAITH C, YANG X F, XIE L, et al. *Phys Lett B*, 2017, 771: 385.
- [28] CAMPBELL P, MOORE I D, PEARSON M R, et al. *Prog Part Nucl Phys*, 2016, 86: 127.
- [29] HUHTA M, MANTICA P F, ANTHONY D W, et al. *Phys Rev C*, 1998, 58: 3187.
- [30] VEDIA V, PAZIY V, FRAILE L M, et al. *Phys Rev C*, 2017, 96: 034311.
- [31] YANG X F, TSUNODA Y, BABCOCK C, et al. *Phys Rev C*, 2018, 116: 182502.
- [32] YANG X F, WRAITH C, XIE L, et al. *Phys Rev Lett*, 2016, 116: 219901.
- [33] NEYENS G. *Rep Prog Phys*, 2003, 66: 1251.
- [34] HEYDE K L. *The Nuclear Shell Model*[M]. 2nd ed, Berlin: Springer-Verlag, 1994.
- [35] TSUNODA Y, OTSUKA T, SHIMIZU N, et al. *Phys Rev C*, 2014, 89: 031301(R).
- [36] LENZI S M, NOWACKI F, POVES A, et al. *Phys Rev C*, 2010, 82: 054301.
- [37] HEYLEN H, BABCOCK C, BILLOWES J, et al. *Phys Rev C*, 2015, 92: 044311.
- [38] TSUNODA Y, OTSUKA T. Private communication.
- [39] DE WITTE H, ANDREYEV A N, BARRE N, et al. *Phys Lett B*, 2014, 98: 112502.
- [40] CHEAL B, GARDNER M D, AVGOULEA M, et al. *Phys Lett B*, 2007, 86: 127.
- [41] EKSTROM A, JANSEN G R, WENDT K A, et al. *Phys Rev C*, 2015, 91: 051301.
- [42] GARCIA RUIZ R F, BISSELL M L, BLAUM K, et al. *Nature Physics*, 2016, 12: 594.
- [43] HAMMEN M, NORTERSHAUSER W, BALABANSKI D L, et al. *Phys Rev Lett*, 2018, 121: 102501.
- [44] BISSELL M L, PAPUGA J, NAIDJA H, et al. *Phys Rev Lett*, 2014, 113: 052502.
- [45] NAZAREWICZ W, REINHARD P G. *Phys Rev C*, 2017, 95: 064328.
- [46] MILLER A J, MINAMISONO K, KLOSE A, et al. *Nature Physics*, 2019, 15: 432.
- [47] LIEVEN P, ARNOLD E, BORCHERS W, et al. *Europhys Lett*, 1996, 33: 11.
- [48] LYNCH K, WILKINS S, BILLOWES J, et al. *Phys Rev C*, 2018, 97: 024309.
- [49] LU X T. *Nuclear Physics*[M]. 2001: 07. (in Chinese)
(卢希庭. *原子核物理*[M]. 原子能出版社, 2001: 07)
- [50] AOI N, KANNO S, TAKEUCHI S, et al. *Phys Lett B*, 2010, 692: 302.
- [51] CHIARA C J, WALTERS W B, STEFANESCU I, et al. *Phys Rev C*, 2011, 84: 037304.
- [52] PERRU O, SORLIN O, FRANCHO S, et al. *Phys Rev Lett*, 2006, 96: 232501.
- [53] LOUCHART C, OBERTELLI A, GORGEN A, et al. *Phys Rev C*, 2013, 87: 054302.
- [54] GUO L, MARUHN J A, REINHARD P G. *Phys Rev C*, 2007, 76: 034317.
- [55] YOSHINAGA N, HIGASHIYAMA K. *J Phys Conf Ser*, 2013, 445: 012032.
- [56] BHAT G H, DAR W A, SHEIKH J A, et al. *Phys Rev C*, 2014, 89: 014328.
- [57] HEYDE K, WOOD J L. *Rev Mod Phys*, 2011, 83: 1655.
- [58] ORLANDI R, MUCHER D, RAABE R, et al. *Phys Lett B*, 2015, 740: 298.
- [59] MAURYA K, SRIVASTAVA P C, MEHROTRA. *IOSR-JAP*, 2013, 3: 52.
- [60] DE GROOTE R P, BILLOWES J, BINNERSLEY C L, et al. *Phys Rev C*, 2017, 96: 041302(R).

Exotic Nuclear Structure of Neutron-rich Zn Isotopes

WANG Shujing, BAI Shiwei, YANG Xiaofei[†]

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

Abstract: Nuclear structure of unstable nuclei, in particularly the nuclei near the magic number, has been one of the hot topics of nuclear physics study. Near the neutron magic number $N=40, 50$, rich nuclear structure phenomena appeared in the nickel region, in particularly for the neutron-rich isotopes, have stimulated intensive investigation from both theoretical and experimental aspects. In order to gain a better understanding of the nuclear structure in the nickel region, we choose to study the properties of neutron-rich Zn ($Z=30$) isotopes. In this paper, after a simple introduction of the laser spectroscopy experiment of Zn isotopes at CERN-ISOLDE, we reviewed the nuclear spins, magnetic moment, electric quadrupole moment and root mean square charge radius of the ground and long-lived isomeric states of $^{62-80}\text{Zn}$ isotopes. Based on these properties, together with shell-model calculation from different interactions, we discussed systematically the nuclear structure phenomena, such as the shell structure evolution, magicity, deformation and shape coexistence, and the cross-shell excitation of correlated nucleons. At the end, on the basis of the current experimental data and nuclear structure information, as well as the theoretical prediction of energy level evolution of $N=51$ isotones in nickel region, we propose to measure the basic properties of $^{81,82}\text{Zn}$ nuclei at the collinear resonance ionization spectroscopy setup at ISOLDE-CERN.

Key words: laser spectroscopy; nuclear spin; nuclear moment; charge radius; shell evolution; shape coexistence; deformation

Received date: 30 Dec. 2019; **Revised date:** 28 May 2020

Foundation item: National Key R&D Program of China (2018YFA0404403), National Natural Science Foundation of China (11875073, U1967201)

[†] **Corresponding author:** YANG Xiaofei, E-mail: xiaofei.yang@pku.edu.cn.