

High-spin spectroscopy and the onset of quasicollective structures in ^{69}Ga

Mingxi Lyu

2025.10

Introduction

Experiment

Level Scheme

Discussion

Summary

Introduction

背景：质量数 A 在 60-70 的原子核在单粒子激发和集体激发中展现了丰富的相互作用。在 $N=40$ 的亚壳层闭合附近，形变驱动轨道（例如 $g_{9/2}$ ）开始影响核结构。奇 A 核镓同位素中，随着自旋增加，球形到形变组态的演化仍是研究热点。

目的：研究 ^{69}Ga 的核结构演化，尤其是高自旋下集体激发的产生。
通过扩展能级图和识别新的高自旋结构来明确高 j 轨道的作用，并为理论模型提供基准。

方法：利用 $^{26}\text{Mg}(^{48}\text{Ca}, p4n)$ 反应对 ^{69}Ga 中的高自旋态进行研究。（ γ 射线探测器阵列和碎片质量分析仪）
通过出射 γ 射线之间的关系来构建能级图；通过角分布和相关测量来确定自旋。
使用采取 JUN45 和 jj44b 有效相互作用的壳模型及倾斜轴推转协变密度泛函理论 (TAC-CDFT) 进行计算。

结果：将 ^{69}Ga 的能级扩展至约 15MeV 和 $45/2\hbar$ 自旋。
低自旋态可由单粒子激发描述，壳模型计算结果与实验吻合良好。
高自旋态观测到三组连续的 E2 跃迁序列，表明准集体行为开始显现；TAC-CDFT 计算表明其源于质子和中子 $g_{9/2}$ 轨道的排列组态，说明高角动量下 ^{69}Ga 出现形变。

Experiment

对于符合 ^{69}Ga 反冲识别的事件，只考虑经过康普顿抑制的 $\gamma-\gamma$ 与 $\gamma-\gamma-\gamma$ 符合事件。退激相关的事件可排序为完全对称化的三维 $E_\gamma-E_\gamma-E_\gamma$ 立方体；与 ^{69}Ga 相关的事件可排序为完全对称化的二维 $E_\gamma-E_\gamma$ 矩阵。之后即可利用 RADWARE 进行分析。能级图基于符合关系与强度考虑构建。

新识别能级的自旋与宇称可通过角分布获得，其中角分布拟合函数取：

$$W(\theta) = a_0[1 + a_2P_2(\cos\theta) + a_4P_4(\cos\theta)]$$

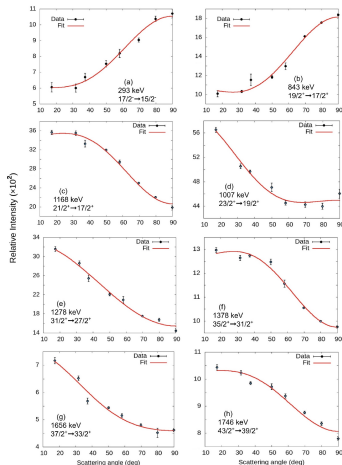
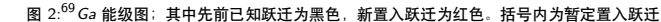


图 1: ^{69}Ga 中部分跃迁的角分布



Low-spin States(S-P)

单粒子行为主导的低自旋态:

$3/2^-$: 基态 (三个价质子处于 $p_{3/2}$ 轨道)

$5/2^-$ (574keV): 第一激发态

图 3(a) 中展示了 SI 序列低自旋区域跃迁

$7/2^-$ (1337keV):

图 3(b) 中除了已知低自旋跃迁, 还观测到了连接中等自旋态的新识别跃迁
出现包含电四极跃迁的标记为 SIII 的新识别的高自旋序列

$9/2^+$ (1972keV): 正宇称带带首

M1、E1 跃迁与 M1+E2 混合跃迁

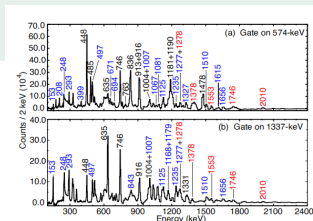


图 3: 574keV 与 1337keV 中单门符合谱。黑色、蓝色和红色分别对应已知、新识别的低自旋能级和类转动四极跃迁

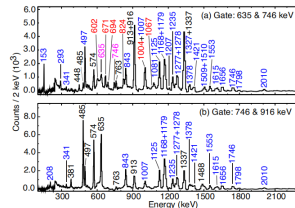


图 4: 双门符合谱。黑色、彩色分别对应已知和新确定跃迁谱线; 其中落于 2719keV 为红色, 与门控符合为洋红色

High-spin States(Quascollective)

准集体行为主导的高自旋态:

连续 E2 跃迁 (集体转动特征): 将能级图从约 4.5MeV 扩展至约 15MeV

正宇称晕带 SI: $21/2+$ 到 $45/2+$

正宇称特征伙伴带 SII, SIII

负宇称集体序列 NPI

Sidebands

连续 E2 跃迁表明转动带 (SIII) 的出现, 其能级能量大致服从 $E \propto I(I+1)$, 自旋依次增加 $\Delta I = 2\hbar$, 从 $27/2+$ 到 $47/2+$.

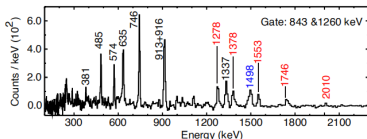


图 5: 843keV 与 1260keV 跃迁双门符合谱

Shell-model Interactions

NUSHELLX 程序计算；价空间 $f_{5/2}pg_{9/2}$ 中，低自旋态可由采取 JUN45 和 jj44b 有效相互作用的壳模型进行计算。

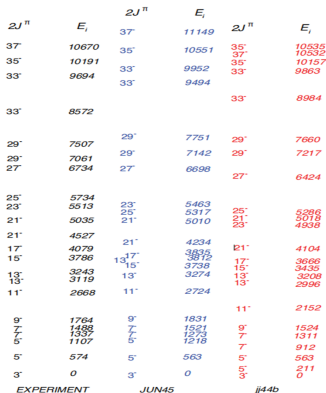


图 6: 负宇称态观测结果与模型计算对比

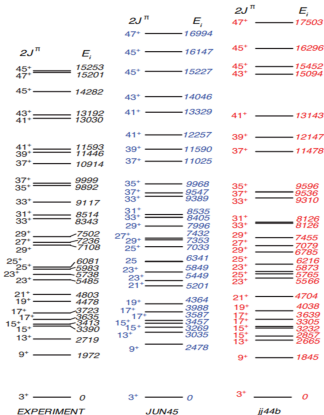


图 7: 正宇称态观测结果与模型计算对比

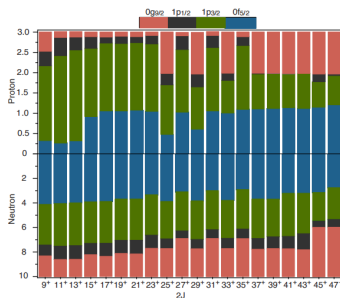
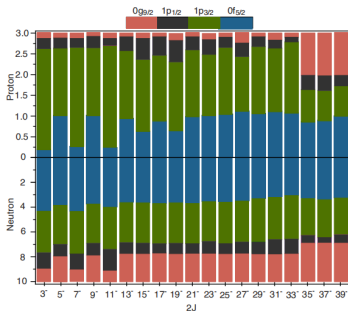


图 8,9:JUN45 计算得到负、正宇称态质子与中子在 $f_{5/2}$, $p_{3/2}$, $p_{1/2}$, 和 $g_{9/2}$ 轨道上的占据概率

负宇称态相对稳定，但 $g_{9/2}$ 轨道仍有不可忽略的占据；正宇称态在低自旋时尚能描述，但随着自旋增加， $g_{9/2}$ 轨道占据数急速增长，预示着原子核近球形到形变核的转变。

准集体行为出现微观原因：核子协同占据 $g_{9/2}$ 轨道，迫使原子核发生形变和集体转动。

对于理想刚性转子，其 J-E 图像斜率应为定值；Ga 中高自旋带 SII, SIII 函数曲线大致结构表明其存在集体转动行为，而存在弯曲则表明其集体转动与单粒子行为强烈耦合，即准集体行为。

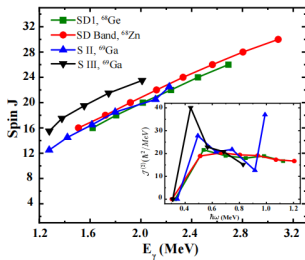


图 10: Ga 及临近核角动量与能量函数关系图

TAC-CDFT

为进一步研究集体行为，采用基于倾斜轴推转协变密度泛函理论 (tilted-axis-cranking covariant density functional theory, TAC-CDFT) 的计算。过程中使用类壳模型近似 (shell-model-like approach, SLAP) 来保证粒子数守恒的同时处理对关联。

对于粒子-粒子，采用单极相互作用；粒子-空穴使用 PC-PK1 相对论密度泛函计算。

通过对 SI 带的计算对比，可以发现：对于自旋 $I \leq 21/2$ 部分，对关联有着决定性作用，此时未配对核子组态为 $\pi(g_{9/2})^1$ ；而更高自旋下未配对核子组态变为 $\nu(1g_{9/2})^1 2 \otimes \pi(1g_{9/2})^1$ ，表明 $I = 25/2$ 附近可能存在回弯现象，此部分计算采用没有对关联情况，与实验数据符合良好。

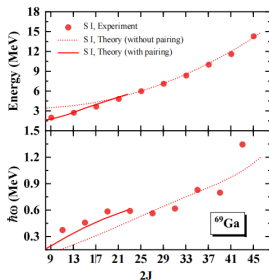


图 11: 正宇称带 SI 的计算能谱与角动量

可以发现, 对于正宇称带 SII, SIII; TAC-CDFT-SLAP 计算的结果 (不包含对关联) 与实验观测高度一致, 同时两个带之间相近的能级与曲线趋势, 说明这两个带源于同一个核形变与主要准粒子组态; 区别仅为未配对核子的特征量子数 ($\alpha = \pm 1/2$) 不同而产生的能级劈裂。

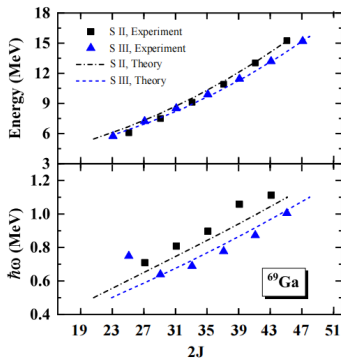


图 12: 正宇称带 SII, SIII 的计算能谱与角动量

Summary

本文研究极大地扩展了 ^{69}Ga 能级结构的认识，观测到了三个高自旋带；并解释了高自旋下集体行为的形成。

这些结果揭示了 $N=40$ 附近的高 j 轨道 ($g_{9/2}$) 对核结构的决定性影响，为了解 $A=70$ 附近区域奇 A 核的结构演化提供了宝贵的依据。

总之，对可能的特征伙伴带以及由 ($g_{9/2}$) 轨道上的核子引发的角动量排列现象的观测十分重要，可进一步研究单粒子激发随角动量的演化，以及形变驱动的轨道入侵导致的高自旋态下核子的集体行为的演化。

Thank you !