



近球形核 ^{94}Nb 的高自旋态研究

李韵秋 李聪博 郑云 李天晓 吴晓光 洪锐 吴鸿毅 郑敏 赵子豪 贺子阳 李金泽 李广顺 郭成宇 倪磊 周振翔 贺创业 刘伏龙 周小红 柳敏良 张玉虎 王守宇 王硕 竺礼华

High-spin States in near Stable Nucleus ^{94}Nb

LI Yunqiu, LI Congbo, ZHENG Yun, LI Tianxiao, WU Xiaoguang, HONG Rui, WU Hongyi, ZHENG Min, ZHAO Zihao, HE Ziyang, LI Jinze, LI Guangshun, GUO Chengyu, NI Lei, ZHOU Zhenxiang, HE Chuangye, LIU Fulong, ZHOU Xiaohong, LIU Minliang, ZHANG Yuhu, WANG Shouyu, WANG Shuo, ZHU Lihua

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.41.2023CNPC10>

引用格式:

李韵秋, 李聪博, 郑云, 李天晓, 吴晓光, 洪锐, 吴鸿毅, 郑敏, 赵子豪, 贺子阳, 李金泽, 李广顺, 郭成宇, 倪磊, 周振翔, 贺创业, 刘伏龙, 周小红, 柳敏良, 张玉虎, 王守宇, 王硕, 竺礼华. 近球形核 ^{94}Nb 的高自旋态研究[J]. 原子核物理评论, 2024, 41(1):250–255. doi: 10.11804/NuclPhysRev.41.2023CNPC10

LI Yunqiu, LI Congbo, ZHENG Yun, LI Tianxiao, WU Xiaoguang, HONG Rui, WU Hongyi, ZHENG Min, ZHAO Zihao, HE Ziyang, LI Jinze, LI Guangshun, GUO Chengyu, NI Lei, ZHOU Zhenxiang, HE Chuangye, LIU Fulong, ZHOU Xiaohong, LIU Minliang, ZHANG Yuhu, WANG Shouyu, WANG Shuo, ZHU Lihua. High-spin States in near Stable Nucleus ^{94}Nb [J]. Nuclear Physics Review, 2024, 41(1):250–255. doi: 10.11804/NuclPhysRev.41.2023CNPC10

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

一些近期发现的同核异能态的壳模型解释

Shell-Model Explanation on Some Newly Discovered Isomers

原子核物理评论. 2020, 37(3): 447–454 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.37.2019CNPC18>

$^{235, 237}\text{Np}$ 高自旋态的理论研究

Theoretical Investigation of the High-spin States in $^{235, 237}\text{Np}$

原子核物理评论. 2022, 39(4): 413–420 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.39.2022047>

第一性原理无核芯壳模型计算原子核谱因子

Ab initio no-core Shell Model for Nuclear Spectroscopic Factor

原子核物理评论. 2022, 39(3): 286–295 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.39.2022042>

丰中子核 $^{63, 65, 67}\text{Mn}$ 的在束 γ 谱学研究

In-beam γ Spectroscopy of Neutron-rich $^{63, 65, 67}\text{Mn}$

原子核物理评论. 2020, 37(3): 548–553 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.37.2019CNPC55>

基于壳模型对力加四极力研究 sd 和 pf 壳偶偶原子核

Shell Model Study of Even-even sd and pf Shell Nuclei With the Pairing Plus Quadrupole-quadrupole Interaction

原子核物理评论. 2020, 37(3): 509–515 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.37.2019CNPC10>

基于相对论Hartree-Fock理论的原子核壳结构性质研究

Nuclear Shell Structure Properties Described by Relativistic Hartree-Fock Theory

文章编号: 1007-4627(2024)01-0250-06

近球形核 ^{94}Nb 的高自旋态研究

李韵秋¹, 李聪博^{1,†}, 郑云¹, 李天晓¹, 吴晓光¹, 洪锐^{1,2}, 吴鸿毅¹, 郑敏¹, 赵子豪^{1,3},
贺子阳¹, 李金泽¹, 李广顺⁴, 郭成宇⁵, 倪磊⁵, 周振翔⁵, 贺创业¹, 刘伏龙¹, 周小红⁴,
柳敏良⁴, 张玉虎⁴, 王守宇⁶, 王硕⁶, 竺礼华⁷

- (1. 中国原子能科学研究院, 北京 102413;
2. 西华大学理学院, 成都 610039;
3. 吉林大学物理学院, 长春 130023;
4. 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000;
5. 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 100091;
6. 山东大学(威海)物理学院, 山东 威海 264209;
7. 北京航空航天大学物理科学与核能工程学院, 北京 100191)

摘要: 通过重离子熔合蒸发反应 $^{82}\text{Se}(^{18}\text{O}, p5n)^{94}\text{Nb}$ 布居了 ^{94}Nb 的高自旋态, 实验中使用的 ^{18}O 束流由中国原子能科学研究院的HI-13串列加速器提供, 束流能量为 82 和 88 MeV。在前人工作的基础上发现了 13 条新的 γ 跃迁并调整了部分能级的摆放位置, 将 ^{94}Nb 的自旋推至 24^{-} , 激发能至 10.6 MeV, 结合 DCO 比值和线极化测量对部分能级的自旋、宇称进行了指定。在质子 $\pi(1f_{5/2}, 2p_{3/2}, 2p_{1/2}, 1g_{9/2})$ 和中子 $(2p_{1/2}, 1g_{9/2}, 2d_{5/2}, 1g_{7/2})$ 空间下将 ^{94}Nb 的能级结构与壳模型计算结果进行了比较, 并探讨了 ^{94}Nb 的中子质子激发机制。

关键词: 高自旋态; 在束谱学; 原子核壳模型

中图分类号: O571.23

文献标志码: A

DOI: 10.11804/NuclPhysRev.41.2023CNPC10

0 引言

$A \sim 90$, $N \sim 50$ 核区的原子核大多数都具有球形或近球形结构, 激发态以内禀单粒子激发为主, 其高自旋态可由多质子激发或中子核芯激发与质子激发的耦合产生。由于价核子数量较少, 该核区大部分核的高自旋态可用壳模型得到解释^[1-5]。丰中子核 ^{94}Nb ($Z=41$, $N=53$) 相对 $Z=38$ 子壳及 $N=50$ 闭壳外有 3 个价质子和 3 个价中子, 预期和其临核具有相似的能级结构, 可以用壳模型进行解释。通过本组之前对 Nb 同位素的研究发现: 对于 $N \leq 50$ 核素, 低位能级主要涉及质子在 $\pi(p_{1/2}, g_{9/2})$ 轨道的激发; 激发能达到 4~5 MeV 时 $N=50$ 的中子满壳能够被打破, 形成中子粒子-空穴 $[(g_{9/2})^{-1}(d_{5/2})^1]$ 组态核芯激发。对 $N > 50$ 的 Nb 同位素的中等自旋能级可由 $Z=38$ 的核芯激发或 $N=56$ 的核芯激发形成; 对于这些核素, 更高自旋的能级才涉及 $N=50$ 的核芯激发(粒子-空穴激发)^[1-4]。此外, 在相邻的 $^{92,93}\text{Nb}$ 同位素中都发现了由

M1 跃迁组成的规则的扁椭转动带结构^[5-7]。随着中子数增加, 逐渐远离 $N=50$ 闭壳, 通过研究 ^{94}Nb 的高自旋态能级结构有助于我们研究该核区原子核的形变情况, 探究核子变化对 ^{94}Nb 能级结构的影响。

在本实验之前, Mărginean 等^[8]通过 $^{19}\text{F}(^{82}\text{Se}, \alpha 3n\gamma)^{94}\text{Nb}$ 反应将 ^{94}Nb 的自旋(能量)推高到 $18\hbar(6.5 \text{ MeV})$, 但未确定能级的宇称和部分自旋。Bucurescu 等^[9]使用 OXBASH 选择 GWB 模型空间以及 GWB XG 相互作用对 ^{94}Nb 中 12^{+} 以下的能级进行了计算, 理论计算结果与实验结果符合较好。因此, 进一步扩展 ^{94}Nb 核的能级纲图, 探究 ^{94}Nb 在高自旋态下发生的物理现象, 是很有意义的。本文将详细介绍 ^{94}Nb 高自旋态的实验研究结果, 在扩展其能级纲图的基础上, 利用壳模型计算能级的组态, 探讨 ^{94}Nb 的中子质子激发机制。

1 实验和数据分析

本实验采用 $^{82}\text{Se}(^{18}\text{O}, p5n)^{94}\text{Nb}$ 反应来布居 ^{94}Nb 的

收稿日期: 2023-06-28; 修改日期: 2023-10-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11975315, U1932209, U2167202, U2167201); 稳定支持基础科研计划资助

作者简介: 李韵秋(1999-), 女, 黑龙江绥化人, 硕士研究生, 从事粒子物理与原子核物理研究; E-mail: 1727715916@qq.com

† 通信作者: 李聪博, E-mail: lichb@ciae.ac.cn

高自旋态。实验在中国原子能科学研究院核物理国家实验室 HI-13 串列加速器的新一代伽马探测阵列上完成。实验使用的探测器阵列由 24 套带 BGO 反康的高纯锗探测器和 5 个 Clover 探测器组成 (合计 29 台), 其中 6 台探测器放置在与束流夹角为 150° 的方向, 7 台探测器放置在 60° 方向, 90° 和 120° 方向各放置 8 台, 如图 1 所示。实验使用的 ^{18}O 束流能量为 82 和 88 MeV, 靶核是 ^{82}Se , 靶厚度为 0.85 mg/cm^2 , 使用厚度为 4.45 mg/cm^2 的 Au 作为衬底。有效束流时间为 108 h, 共探测到 1.2×10^{10} 个双重 γ - γ 符合事件。



图 1 实验使用的探测器阵列

经过能量刻度后, 将实验数据离线反演为 γ - γ 二维对称矩阵, 采用 Linux 下的 GSPware 软件对矩阵进行离线分析, 根据与已知 γ 射线的符合关系结合强度判断, 得到了如图 2 所示的 ^{94}Nb 能级纲图。Marginean 等 [8] 的文章中观察到的射线在此次实验中均有观察到, 图中标 * 的射线是在此次实验中新发现的射线, 标 # 的射线根据强度关系改变了其摆放位置。

原子核自旋取向一定时, 其发射 γ 射线的概率与原子核自旋方向和发射 γ 射线方向的夹角有关。实验上可以通过测量 DCO (Direction Correlation Method) 比值来提取有关跃迁 γ 射线多极性的信息, 具体操作是将与束流方向成 150° 探测器探测的 γ 射线能量放在 X 轴上, 与束流方向成 90° 方向探测器探测的 γ 射线能量放在 Y 轴上, 生成一个非对称矩阵, 然后通过开窗结果提取各 γ 射线的 DCO 比值, 根据比值对 γ 射线的多极性做出判断。

DCO 比值的定义为

$$R_{\text{DCO}} = \frac{I_{\gamma_1}(\theta) / \varepsilon_{\gamma_1}(\theta) \varepsilon_{\gamma_2}(90^\circ)}{I_{\gamma_1}(90^\circ) / \varepsilon_{\gamma_1}(90^\circ) \varepsilon_{\gamma_2}(\theta)},$$

其中: γ_2 是开窗所用的已知跃迁极性的射线; γ_1 是用 γ_2 开窗得到的未知跃迁极性的目标射线; $I_{\gamma_1}(\theta)$ 为在二维

矩阵的 Y 轴上用 γ_2 开窗得到的 γ_1 计数; $I_{\gamma_1}(90^\circ)$ 为在 X 轴上用 γ_2 开窗得到的 γ_1 计数; $\varepsilon_{\gamma}(\theta)$ 为 150° 方向上的探测器对 γ 射线的探测效率; $\varepsilon_{\gamma}(90^\circ)$ 为 90° 角的探测器对 γ 射线的探测效率。利用本实验 $4n$ 反应道 ^{94}Mo 中已知的 $E2$ γ 射线 (703 keV) 开窗发现, 当观察到的 γ 跃迁是纯 $E2$ 跃迁 (850 keV) 时, 得到的 DCO 比值约为 1, 当观察到的 γ 跃迁是纯 $E1$ 跃迁 (1 038 keV) 时, 得到的 DCO 比值约为 0.5, 这一结果在图 3 中用实心圆点表示。

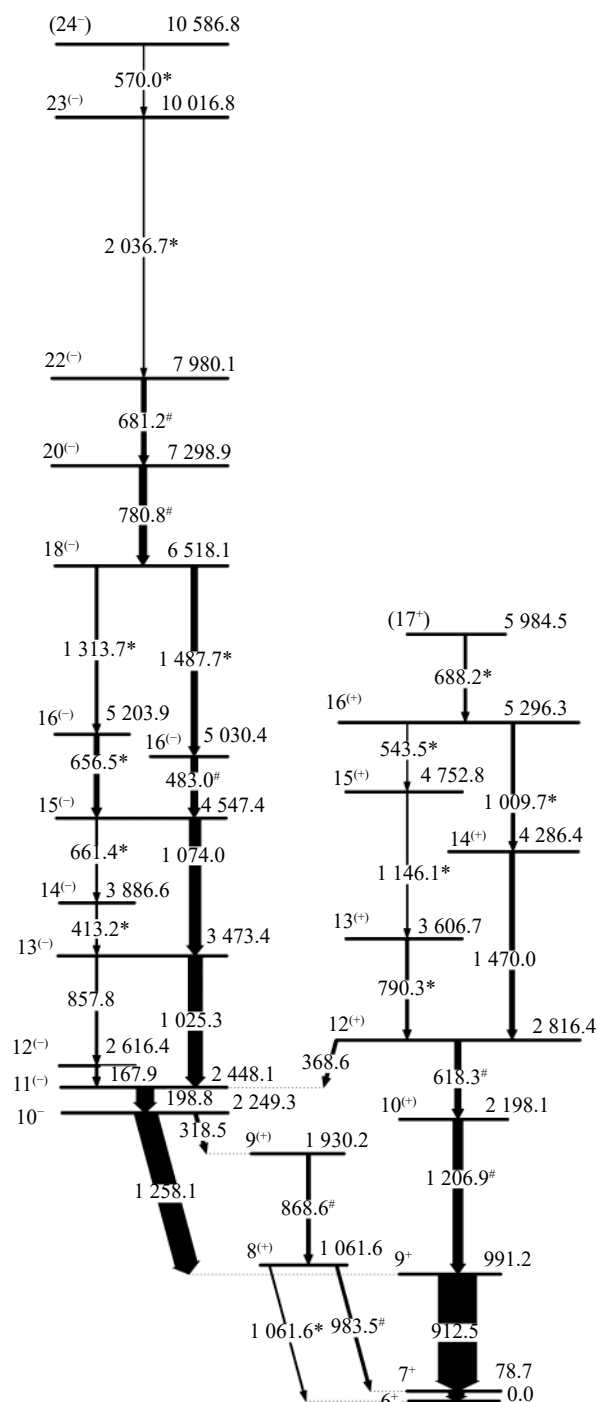


图 2 ^{94}Nb 能级纲图

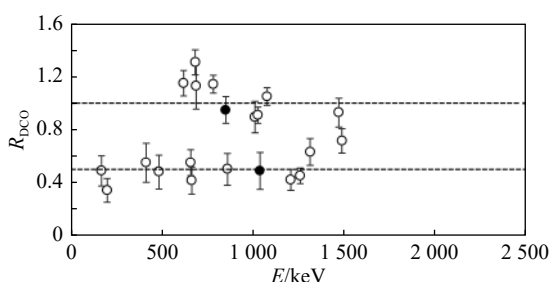


图3 DCO测量结果(对基态跃迁912 keV进行开窗)

图3给出了对属于 ^{94}Nb 的 γ 跃迁(912 keV)进行开窗后得到的DCO结果,文献[1]中认为该跃迁是一个 $\Delta I=2$ 的跃迁,此次实验得到的DCO比值证实了912 keV是一个 $\Delta I=2$ 的跃迁。图上可以看出,DCO比值明显分为两组,DCO比值位于0.5附近的跃迁 $\Delta I=1$,位于1.0附近的跃迁 $\Delta I=2$,DCO值中可能会带入其他原子核的污染,导致结果偏离0.5和1.0,这种情况需要计算多个与其有级联关系的 γ 射线的DCO比值,才能确定其跃迁极性。

线极化测量可以确定 γ 射线的电磁跃迁特性,其原理是线性极化的 γ 射线方向分布取决于辐射的类型(磁跃迁/电跃迁),线极化度的表达式为 $P(\theta) = \frac{A(\theta)}{Q(\phi, E_\gamma)}$,其中 $A(\theta) = \frac{a(E_\gamma)N_{\parallel} - N_{\perp}}{a(E_\gamma)N_{\parallel} + N_{\perp}}$, $A(\theta)$ 为非对称度, Q 为极化灵敏度,与入射 γ 射线的能量以及实验装置的几何布居有关; $N_{\parallel}$ 和 $N_{\perp}$ 分别是与反应平面平行和垂直的康普顿散射事件的计数, a 是Clover探测器对平行和垂直散射的 γ 射线探测效率的比值, E_γ 是 γ 射线的能量, θ 是取向轴与发射的 γ 射线之间的夹角, ϕ 为散射角。Clover探测器有四块晶体,如图4所示,实验时把Clover探测器放在与束流垂直的方向上, γ 射线入射到任一个晶体上时,将与之相邻的两个晶体在加和时间窗(80 ns)内探测到的散射光子认为是垂直和平行的康普顿事件[10, 11]。

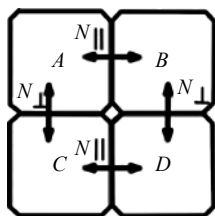


图4 Clover探测器极化测量示意图

实际上Clover探测器四块晶体的探测效率有一定差别,因此需要修正探测器在两个散射方向上的探测效率,使用本身无极化效应的放射源 ^{133}Ba 和 ^{152}Eu ,将所有Clover探测器水平和垂直方向谱叠加后提取峰面积,根据公式 $a = \frac{N_{\parallel}}{N_{\perp}}$,得到参数 a ,用直线拟合 a 随能量 E 的变化,拟合曲线如图5所示。可以看到, a 在300~1400 keV

范围内分布在1.0左右,且随着能量的升高呈现降低趋势。拟合公式为: $a = 0.99517 - 2.66262 \times 10^{-5} \times E$ 。

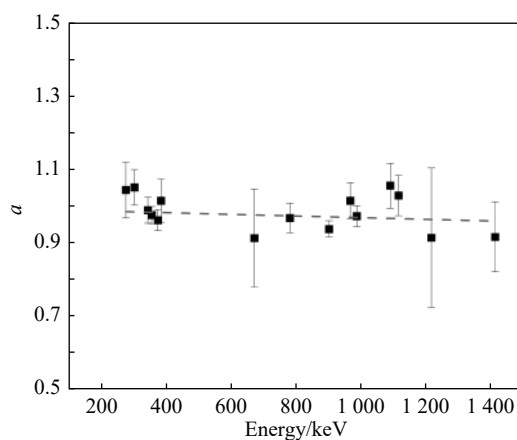


图5 Clover探测器极化效率a拟合曲线

为筛选更干净的能谱,在进行线极化数据的离线处理时建立两个非对称矩阵,将Clover探测器平行和垂直方向的康普顿符合事件能谱分别放在两个矩阵的X轴,将高纯锗探测器探测到的能谱放在Y轴,当高纯锗探测器和Clover探测器的两路在符合时间窗内同时探测到入射事件时,才认为它是一个符合事件,使用的符合时间窗是80 ns。由于单一能量的开窗谱计数较少,将数个与目标能量有级联关系且污染较少的开窗谱进行叠加。

图6给出了对199, 1025, 1075, 1470, 483, 681 keV γ 跃迁进行开窗后叠加的部分结果,图中可以看到912 keV的水平方向计数明显小于垂直方向计数,结合之前的DCO测量可判断912 keV是一个电四极跃迁。以此类推可得到其他 γ 跃迁的电磁特性。

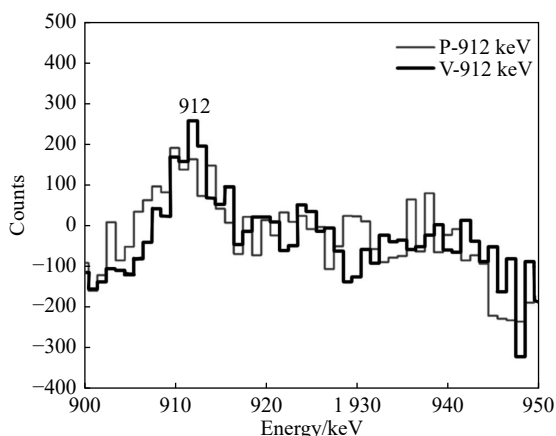


图6 对199, 1025, 1075, 1470, 483, 681 keV开窗后的叠加结果(截取912 keV部分)

2 讨论

从本工作建立的能级纲图(图2)来看,并没有发现

规则的转动结构，主要变现为无序的单粒子激发结构。考虑到 ^{94}Nb 的同位素 $^{90-93}\text{Nb}$ 以及邻核 $^{94-96}\text{Tc}$ ，均使用壳模型计算获得了与实验较为符合的结果 [6, 12]，因此在计算 ^{94}Nb 的能级时选择使用壳模型，采用 NUSHELLX 进行计算 [13]。在截断方式上，目前尝试的截断方式为 $\pi(f_{5/2})^{4-6}$, $(p_{3/2})^{2-4}$, $(p_{1/2})^{0-2}$, $(g_{9/2})^{1-5}$, $\nu(f_{5/2})^{6-6}$, $(p_{3/2})^{4-4}$, $(p_{1/2})^{2-2}$, $(g_{9/2})^{9-10}$, $(g_{7/2})^{0-4}$, $(d_{5/2})^{0-4}$, $(d_{3/2})^{0-0}$, $(s_{1/2})^{0-0}$ ，允许一个中子跨 50 壳跃迁，采用的相互作用势为 GWBXG [14]。各能级的计算结果和实验结果的比较如图 7 所示。

从图 7 可以看出，对于正宇称，壳模型的计算与实

验得到的能级数据基本相符，但是基态计算的 6^+ 和 7^+ 两个能态偏离了实验数据的能级顺序，不过还是可以描述大致的规律。这可能是由于组态混杂引起的。原子核 ^{94}Nb 质子数为 41，中子数为 53，由于 $Z=38$ 外的两个 $2p_{1/2}$ 质子配对，因此基态主要来自于未配对的质子 $1g_{9/2}$ 耦合 $N=50$ 外一个未配对的 $2d_{5/2}$ 中子。相比轻的 Nb 同位素， ^{94}Nb 在 ^{88}Sr 核心外的三个价质子和三个价中子， $\pi(g_{9/2})^3 \otimes \nu(d_{5/2})^2 g_{7/2}$ 全顺排态可提供的最大角动量为可达到 $19\hbar$ 。目前实验观察正宇称到 17^+ ，壳模型得到的 $7^+ \sim 17^+$ 态是 $\pi(g_{9/2})^3 \otimes \nu d_{5/2}(g_{7/2})^2$ 组态的多重态，主要表现为处在 $2p_{1/2}$ 轨道的两个质子激发到 $1g_{9/2}$ 轨道耦

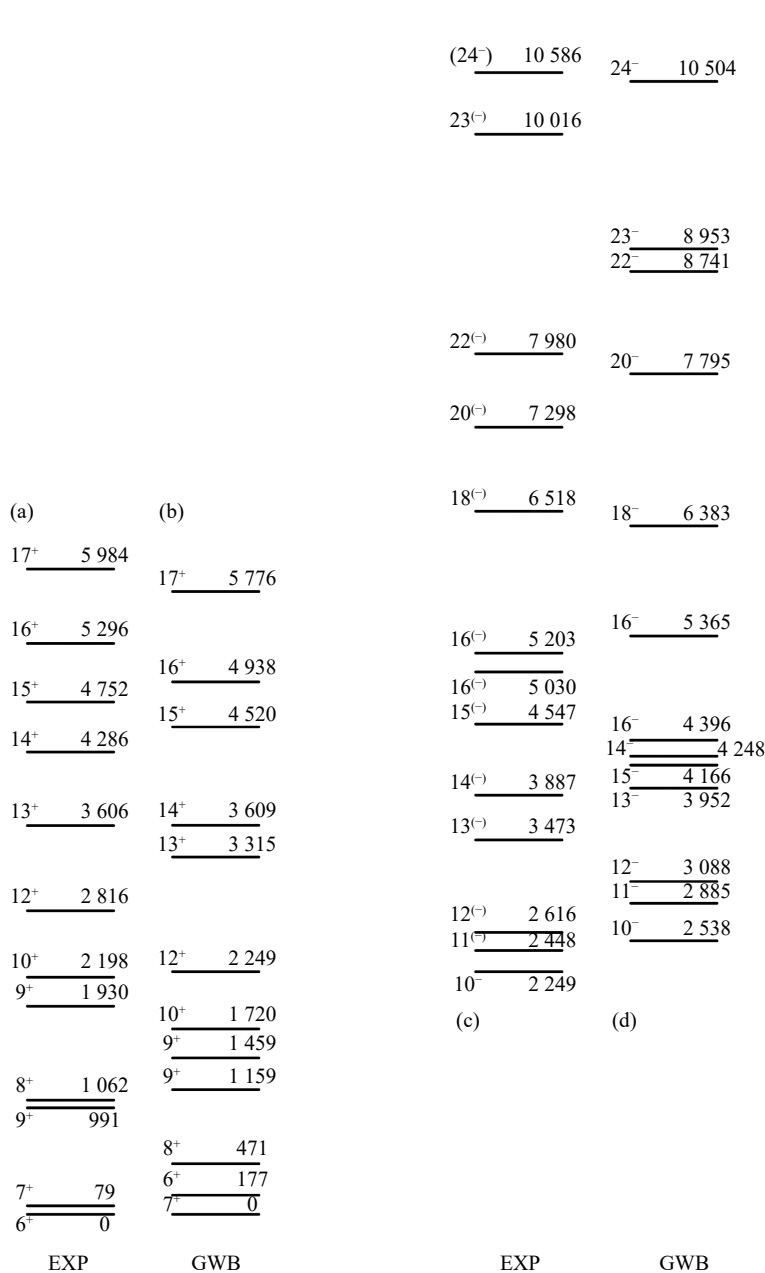


图 7 正宇称实验结果 (a) 与计算结果 (b)，负宇称实验结果 (d) 与计算结果 (d)

合拆对的中子 $d_{5/2}$ 和一个 $d_{3/2}$ 中子跃迁到 $g_{7/2}$ 轨道, 且其中尤其高自旋都混合了少量的质子跨 $Z=38$ 的组态成分。由于 $\pi(g_{9/2})^3 \otimes \nu d_{5/2}(g_{7/2})^2$ 组态所能耦合出的最大角动量就是 19, 因此 19 态往上的激发态应当会涉及到更多的核子激发, 计算结果也显示在 20^+ 的组态涉及质子跨 38 壳激发, 可惜的是本次实验未观测到, 期待将来开展更多的 ^{94}Nb 高自旋态实验研究来验证。

对于负宇称序列, 18^- 以下壳模型的计算与实验得到的能级数据基本相符, 18^- 以上能级壳模型预测与实验差异较大。最低的 10^- 态, 其组态涉及一个处于负宇称轨道的 $2p_{1/2}$ 的质子激发到 $1g_{9/2}$ 耦合一个未配对的 $2d_{5/2}$ 中子。 $11^- \sim 16^-$ 态为 $\pi p_{1/2}(g_{9/2})^2 \otimes \nu(d_{5/2})^2 g_{7/2}$ 组态的多重态, 其能提供的最大角动量为 16。 18^- 以上壳模型的计算主要涉及 $f_{5/2}$ 到 $g_{9/2}$ 的跨 $Z=38$ 的核心激发。另外, 从目前与实验数据对比的情况来看, 还没有出现中子跨 $N=50$ 跨壳激发。不过, 在我们的壳模型计算中, 在负宇称的 26^- 态开始出现中子 $1g_{9/2}$ 到 $2d_{5/2}$ 核芯激发。具体的情况还需要进一步的实验研究来验证。壳模型计算结果在高激发态出现明显差异的情形, 可能与如下因素有关: **GWB** 壳模型空间没考虑 $h_{11/2}$ 组态成分对这些能级结构的影响程度; 早期根据低自旋数据建立的 **GWB** 相互作用势不适合解释高自旋能级结构; 弱形变使得基于球形核的理论计算结果与实验值出现偏差。

3 结论

本工作利用重离子熔合蒸发反应 $^{82}\text{Se}(^{18}\text{O}, p5n)^{94}\text{Nb}$ 布居了丰中子核 ^{94}Nb 的高自旋态, 扩展了 **Nb** 核区的原子核结构信息; 结合 **DCO** 和线极化测量, 确定了部分能级的宇称和自旋; ^{94}Nb 中低激发态主要来源于价质子从 $2p_{1/2}$ 轨道被激发到 $1g_{9/2}$ 轨道和中子 $2d_{5/2}$ 到 $1g_{7/2}$ 的贡献。随着原子核激发能的增加, 核子在这些轨道轨道的激发不足以产生较高的角动量, 需要包含质子在 $f_{7/2} \rightarrow g_{9/2}$ 轨道的激发。对于跨 $N=50$ 幻数壳的核芯激发,

在目前的实验数据中基本不参与角动量的形成; 壳模型计算预测大概到 $26\hbar$ 时 ^{94}Nb 中可能会出现跨 $N=50$ 幻数壳的中子核芯激发。尽管目前的壳计算很好地再现了低激发态, 但它们没能合理地描述较高激发态。为了对 ^{94}Nb 高自旋态的能级结构做出较可靠的解释, 发展新的相互作用和在更大的组态空间开展壳模型是必要的。

致谢 本工作是在中国原子能科学研究院串列加速器上完成的, 感谢加速器运行组为本实验提供了稳定的束流。

参考文献:

- [1] CUI X Z, ZHU L H, WU X G, et al. *Phys Rev C*, 2005, 72: 044322.
- [2] LUO P W, WU X G, SUN H B, et al. *Phys Rev C*, 2014, 89: 034318.
- [3] WU Y H, LU J B, LUO P W, et al. *Chin Phys Lett*, 2014, 34: 042102.
- [4] WU Y H, LU J B, REN Z, et al. *Phys Rev C*, 2022, 105: 034344.
- [5] REN Z, LU J B, DONG G X, et al. *Phys Rev C*, 2023, 108(4): 044301.
- [6] ZHENG Y, WU Y H, WU X G, et al. *Phys Rev C*, 2019, 100: 014325.
- [7] WAKABAYASHI Y, FUKUCHI T, GONO Y, et al. *Journal of the Physical Society of Japan*, 2007, 76(11): 114202.
- [8] MĂRGINEAN N, BUCURESCU D, CĂȚA-DANIL G, et al. *Phys Rev C*, 2000, 62: 034309.
- [9] BUCURESCU D, RUSU C, Ma N, et al. *Phys Rev C*, 2007, 76(6): 064301.
- [10] STAROSTA K, MOREK T, DROSTE C, et al. *Nucl Instr and Meth A*, 1999, 423: 16.
- [11] FANG Y D, ZHANG Y H, ZHOU X H, et al. *High Energy Physics and Nuclear Physics*, 2007, 31(10): 938. (in Chinese)
(方永得, 张玉虎, 周小红, 等. 高能物理与核物理, 2007, 31(10): 938.)
- [12] CUI X Z, ZHU L H, WU X G, et al. *High Energy Physics and Nuclear Physics*, 2004, 28: 27. (in Chinese)
(崔兴柱, 竺礼华, 吴晓光, 等. 高能物理与核物理, 2004, 28: 27.)
- [13] BROWN B A, RAE W D M, MCDONALD E, et al. *MSU-NSCL Report*, 2007, 524: 1.
- [14] ZHANG C, WANG S, GU J. *Phys Rev C*, 1999, 60(5): 054316.

High-spin States in near Stable Nucleus ^{94}Nb

LI Yunqiu¹, LI Congbo^{1,†}, ZHENG Yun¹, LI Tianxiao¹, WU Xiaoguang¹, HONG Rui^{1,2}, WU Hongyi¹, ZHENG Min¹, ZHAO Zihao^{1,3}, HE Ziyang¹, LI Jinze¹, LI Guangshun⁴, GUO Chengyu⁵, NI Lei⁵, ZHOU Zhenxiang⁵, HE Chuangye¹, LIU Fulong¹, ZHOU Xiaohong⁴, LIU Minliang⁴, ZHANG Yuhu⁴, WANG Shouyu⁶, WANG Shuo⁶, ZHU Lihua⁷

(1. China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China;

2. Department of Science, Xihua University, Chengdu 610039, China;

3. Department of Physics, Jilin University, Changchun 130023, China;

4. Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

5. State Key Laboratory of Nuclear Physics and Technology, Department of Physics, Peking University, Beijing 100091, China;

6. Department of Physics, Shandong University (Weihai), Weihai 264209, Shandong, China;

7. Physical and Nuclear Energy and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: High spin states of ^{94}Nb have been studied with the $^{82}\text{Se}(^{18}\text{O}, \text{p}5\text{n})^{94}\text{Nb}$ fusion evaporation reaction at beam energy of 82 and 88 MeV. The experiment was performed at the HI-13 tandem accelerator of the China Institute of Atomic Energy. The previously reported level schemes of ^{94}Nb have been extended and modified up to an excitation energy of 10.6 MeV and a spin and parity of $24^{(-)}$ with 13 new γ -transitions. Based on DCO ratios and linear polarization measurements, spin-parity have been assigned up to the highest level observed. The level structures in ^{94}Nb have been interpreted in terms of the shell model calculations performed in the configuration space $\pi(1f_{5/2}, 2p_{3/2}, 2p_{1/2}, 1g_{9/2})$ for the protons and $\nu(2p_{1/2}, 1g_{9/2}, 1g_{7/2}, 2d_{5/2})$ for the neutrons, and the neutron proton excitation mechanism of ^{94}Nb was discussed.

Key words: high spin state; in-beam γ -ray spectroscopy; nuclear shell model

Received date: 28 Jun. 2023; Revised date: 28 Oct. 2023

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(11975315, U1932209, U2167202, U2167201)

† Corresponding author: LI Congbo, E-mail: licb@ciae.ac.cn