



^{95}Nb 高自旋态研究

洪锐 李聪博 李会东 郑云 吴晓光 李天晓 李韵秋 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 the Nucleus ^{95}Nb

HONG Rui, LI Congbo, LI Huidong, ZHENG Yun, WU Xiaoguang, LI Tianxiao, LI Yunqiu, 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.41.2023CNPC12>

引用格式:

洪锐, 李聪博, 李会东, 郑云, 吴晓光, 李天晓, 李韵秋, 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. ^{95}Nb 高自旋态研究[J]. 原子核物理评论, 2024, 41(1):244–249. doi: 10.11804/NuclPhysRev.41.2023CNPC12

HONG Rui, LI Congbo, LI Huidong, ZHENG Yun, WU Xiaoguang, LI Tianxiao, LI Yunqiu, 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 the Nucleus ^{95}Nb [J]. Nuclear Physics Review, 2024, 41(1):244–249. doi: 10.11804/NuclPhysRev.41.2023CNPC12

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[\$^{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>

[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>

[\$A = 90\$ 质量区能级结构与系统学研究](#)

Structural Investigation in $A \approx 90$ Mass Region and Comparison in Its Vicinity

原子核物理评论. 2023, 40(4): 519–526 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.40.2022110>

[双幻核 \$^{16}\text{O}\$ 附近核素 \$^{14}\text{C}\$, \$^{14,15}\text{N}\$, \$^{14-18}\text{O}\$ 能谱结构的壳模型计算分析](#)

Spectral Structure Analysis of Nuclei ^{14}C , $^{14,15}\text{N}$, and $^{14-18}\text{O}$ Near Double Magic Nucleus ^{16}O by Shell Model Calculations

原子核物理评论. 2020, 37(3): 563–568 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.37.2019CNPC54>

[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>

[丰中子 \$A \sim 100\$ 质量区内的扁椭球高 \$K\$ 同核异能态](#)

Oblate High- K Isomers in the Neutron-rich $A \sim 100$ Region

文章编号: 1007-4627(2024)01-0244-06

^{95}Nb 高自旋态研究

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

- (1. 西华大学理学院, 成都 610039;
2. 中国原子能科学研究院, 北京 102413;
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 $^{82}\text{Se}(^{18}\text{O}, \text{p}4\text{n})^{95}\text{Nb}$, 布居了 ^{95}Nb 的高自旋态。利用多探头中国联合伽马探测阵列进行了在束 γ 测量, 研究了 ^{95}Nb 核的高自旋态能级结构。基于 γ - γ 符合关系扩展了 ^{95}Nb 的能级纲图, 发现了 25 条新的 γ 跃迁和 21 条新的能级, 并调整了部分能级的摆放位置。将新的能级结构与壳模型计算进行了比较和讨论。结果表明, 要正确的描述 ^{95}Nb 核的高自旋态(自旋值大于 39/2) 能级结构, 应考虑质子跨越 38 子壳 $f_{5/2} \rightarrow g_{9/2}$ 核心激发。

关键词: 高自旋态; 能级纲图; 线极化测量; 壳模型

中图分类号: O571.23

文献标志码: A

DOI: 10.11804/NuclPhysRev.41.2023CNPC12

0 引言

由于 $Z=38$ 亚壳与 $N=50$ 幻数壳的存在, $A \sim 90$, $N \sim 50$ 核区的核素大多具有近球形核结构, 低激发态主要表现出单粒子运动的特性^[1]。对于 $N=50$ 和 56 之间的核结构, 通常理解为这些壳层之上核子的单粒子激发^[2-5]。随着中子数的增加, $A \sim 100$ 的原子核一般会经历从球形向形变核的转变, 当中子数超过 56 时, 这个质量区域的原子核形状会发生快速的形状转变, 价核子数目的增多和激发能的增加更可能会使原子核的高自旋态出现集体运动和核芯激发现象。

通过本组之前对 $A \sim 90$ 质量区 Nb 同位素的研究发现, 对于 $N > 50$ 的稳定线以及稳定线附近的 $^{92}, ^{93}\text{Nb}$ 核^[4-5], 中等自旋能级可由 $Z=38$ 的核芯激发或 $N=56$ 的亚壳层激发形成, 更高自旋的能级会涉及 $N=50$ 的核芯激发。然而, 由于实验的困难, 稳定线右侧的丰中子 Nb 同位素高自旋态信息非常缺乏。Bucurescu 等^[1]利用

$^{82}\text{Se}(^{16}\text{O}, \text{1p}2\text{n})^{95}\text{Nb}$ 反应, ^{16}O 束流能量为 48 MeV, 布局了 ^{95}Nb 的高自旋态, 由于入射粒子能量较低, 所得纲图信息较少, 并未对高自旋能级进行指定。

因此, 进一步扩展丰中子侧 Nb 同位素能级纲图, 揭示其单粒子激发和集体运动的共存和竞争, 是很有意义的。本文将详细介绍 ^{95}Nb 高自旋态的实验研究结果, 在扩展其能级纲图的基础上, 通过把实验结果和壳模型计算结果相比较, 探讨 ^{95}Nb 的激发机制。

1 实验和数据分析

在 HI-13 串列加速器上, 利用中国联合伽马探测阵列, 最多可放置 40 个 Ge 探测器, BGO 和 HPGe 探测器分别与法兰相连, 径向距离可通过螺杆调节, 如图 1 所示。采用 $^{82}\text{Se}(^{18}\text{O}, \text{1p}4\text{n})^{95}\text{Nb}$ 熔合蒸发反应, ^{18}O 束流能量为 82 和 88 MeV, 对 ^{95}Nb 的能级结构进行研究, 平均束流强度为 90 nA, 靶由厚度为 0.85 mg/cm² 的 ^{82}Se 和 4.45 mg/cm² 厚的金衬组成。探测系统是由 28 台带反

收稿日期: 2023-06-30; 修改日期: 2023-12-18

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项目

作者简介: 洪锐(1999-), 男, 四川沐川人, 学士, 从事核结构研究; E-mail: quinlanhrhg@163.com

† 通信作者: 李聪博, E-mail: lichb@ciae.ac.cn; 李会东, E-mail: huidongli888@163.com

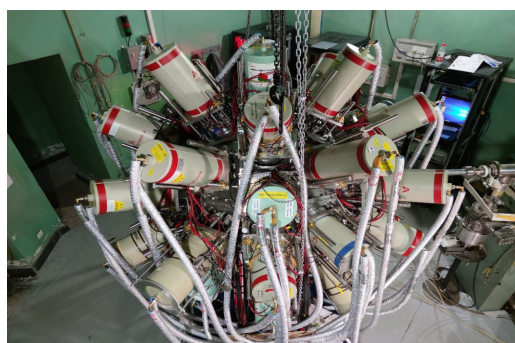
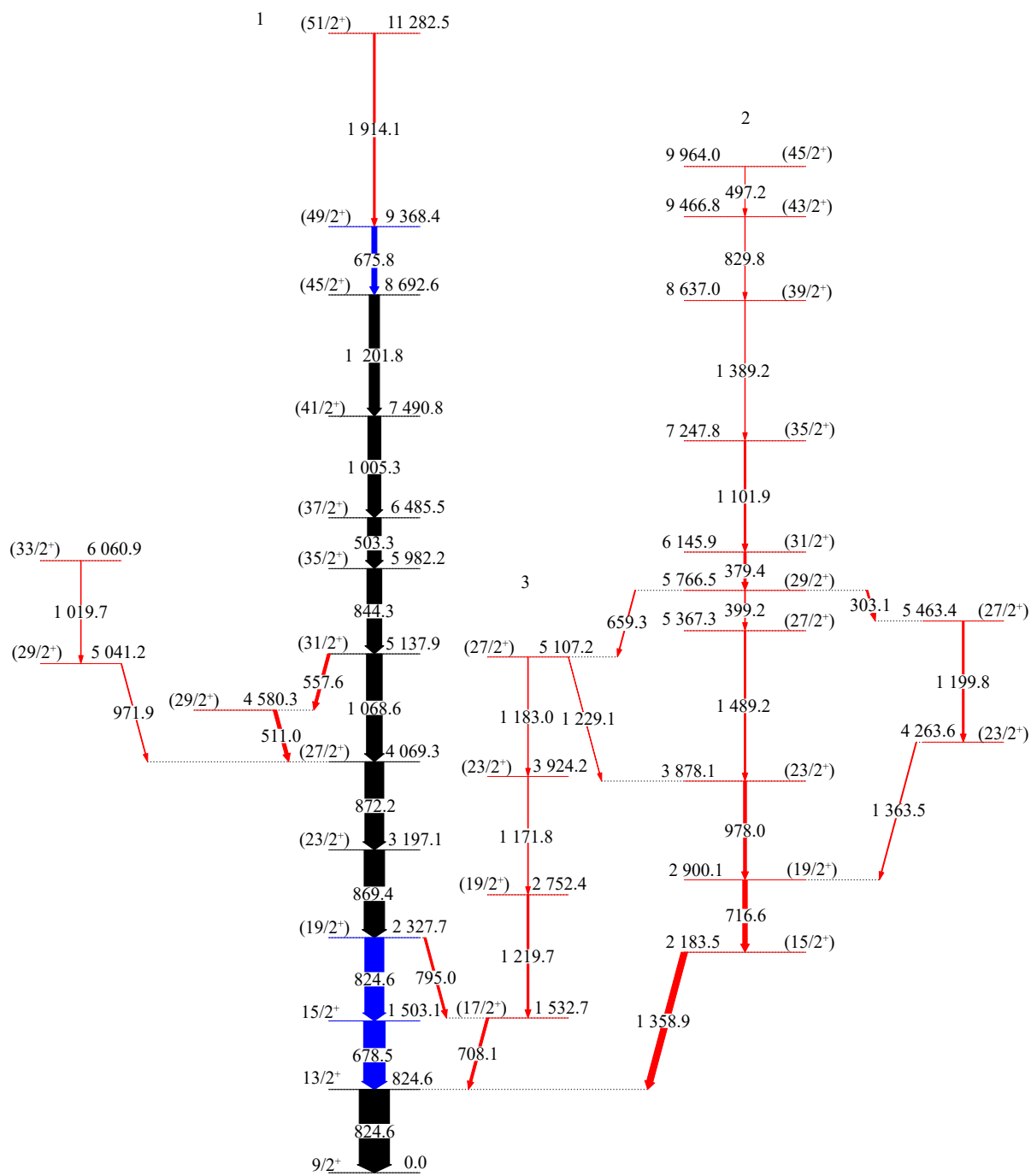


图 1 中国联合伽马探测阵列实物图

康的高纯锗(或 Clover)探测器和 1 台小平面探测器组成。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 8 台。

用 ^{60}Co , ^{133}Ba 和 ^{152}Eu 标准放射源对探测器进行了能量和效率刻度。将实验数据离线反演成 γ - γ 二维对称矩阵, 用于分析 γ - γ 符合关系, 提取 γ 跃迁的强度和建立能级纲图。处理实验数据后得到的 ^{95}Nb 纲图, 如图 2 所示, 图中标红射线是在此次实验中新发现的射线, 标蓝射线调整了摆放顺序。

图 2 本次实验得到的 ^{95}Nb 能级纲图

为进一步确定新发现能级的自旋, 利用 90° 和 150° 方向上的探测器构建二维 γ - γ DCO 矩阵, DCO 比例系数为

$$R_{\text{DCO}} = \frac{I_{\theta}^{\gamma_1}(\text{gated by } \gamma_2 \text{ at } 90^\circ) \varepsilon_{\theta}^{\gamma_1} \varepsilon_{90^\circ}^{\gamma_2}}{I_{90^\circ}^{\gamma_1}(\text{gated by } \gamma_2 \text{ at } \theta) \varepsilon_{90^\circ}^{\gamma_1} \varepsilon_{\theta}^{\gamma_2}}, \quad (1)$$

其中: γ_2 是用来开窗的, 已知极性的电四极 ($\Delta I=2$) 跃迁, 与该跃迁存在符合关系的纯四极跃迁的 R_{DCO} 值在 1.0 附近, 而纯偶极跃迁的值在 0.5 附近; 公式中 $I_{\theta}^{\gamma_1}$ 和 $I_{90^\circ}^{\gamma_1}$ 分别是在 150° 和 90° 方向上开窗射线 γ_2 得到的射线 γ_1 的强度; θ 为小角度方向 150° ; ε 为 90° 或 150° 方向不同能量跃迁的探测器效率。

此外, 本工作还利用线极化测量方法确定 γ 跃迁的电磁特性。利用放置在 90° 的分辨率较好的 Clover 探测器测量平行和垂直方向的康普顿散射事件来确定入射光子的极化度 (非对称度), 把符合事件处理为平行散射事件矩阵和垂直散射事件矩阵。非对称度公式^[6]为

$$A(\theta) = \frac{a(E_\gamma)N_{\perp} - N_{\parallel}}{a(E_\gamma)N_{\perp} + N_{\parallel}}, \quad (2)$$

其中: $a(E_\gamma)$ 为极化效率刻度曲线, 是 Clover 探测器对平行和垂直散射的 γ 跃迁探测效率的比值; $N_{\perp}$ 和 $N_{\parallel}$ 分别为实验测量的与反应平面垂直和平行的康普顿散射光子的计数。每个 Clover 探测器可以分为 4 块晶体, 利用 90° 方向上的 Clover 探测器 (此方向 $A(\theta)$ 有最大值)。实验时伽马射线入射到任意一晶体上, 与之相邻的两个晶体探测到的康普顿散射光子被认定分别对应于垂直和平行的康普顿事件。此外, 四块晶体探测效率不同, 需要对探测器的效率进行修正。作极化探测效率刻度曲线时, 使用没有被极化的放射源 ^{133}Ba 和 ^{152}Eu 进行刻度, 选取水平和垂直事件进行计算, 公式定义为: $a(E_\gamma) = N_{\parallel}/N_{\perp}$, 将得到的不同能量下的 $a(E_\gamma)$ 进行直线拟合。拟合公式为: $a(E_\gamma) = 0.99517 - 2.66262 \times 10^{-5} \times E_\gamma$ 。 $A(\theta)$ 的计算值若为正, 该跃迁为电跃迁, 若为负, 则为磁跃迁。图 3

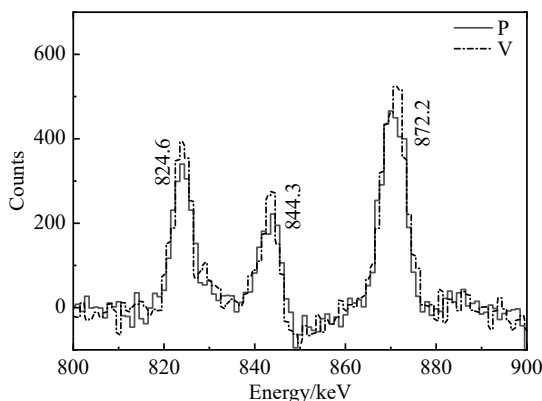


图 3 824 keV 伽马跃迁开门得到 824.6, 844.3 和 872.2 keV 跃迁在垂直 (V) 和平行方向 (P) 的能谱

为利用 824 keV 伽马跃迁开门得到的 824.6, 844.3 和 872.2 keV 跃迁在垂直 (V) 和平行方向 (P) 的能谱, 从图中可以看到, 824.6, 844.3 和 872.2 keV 的水平方向计数明显小于垂直方向计数, 为电跃迁。结合之前的 DCO 测量结果, γ 跃迁 DCO 比值如图 4 所示, 可判断它们三者均为电四极跃迁, 以此类推可得到其他 γ 跃迁的电磁特性。

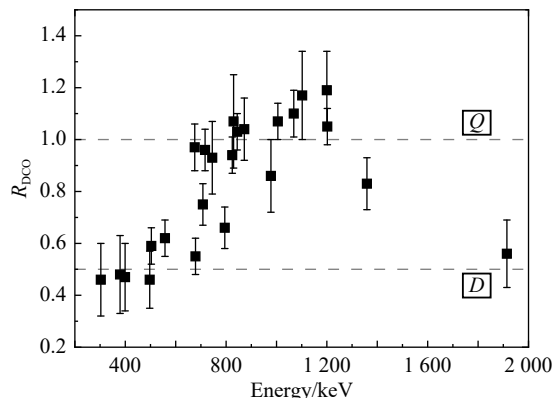


图 4 实验提取 γ 射线的 DCO 比值, 其中 Q 为四极跃迁, D 为偶极跃迁

2 结果与讨论

2.1 能级纲图

本工作之前, Bucurescu 等^[1]利用 ^{82}Se (^{16}O , $1p2n$) ^{95}Nb 反应, 将 ^{95}Nb 自旋和能量推高至 $33/2 \hbar$ 态和 8.7 MeV。如图 2 所示, 我们用已知的 γ 射线开窗寻找新的 γ 射线, 在其基础上发现了约 25 条新的 γ 射线、21 个新的能级, 建立了 2 个新的序列 (序列 2 和 3), 自旋推高到了 $51/2 \hbar$, 激发能约 11 MeV; 此外, 根据符合和强度关系调整了部分能级位置的摆放。图 5 为此次基态跃迁能量 824 keV 开窗谱和 678.5 keV 开窗谱。

在本次实验的 678.5 keV 开窗谱中, 如图 5(b) 所示, 发现了 675.8 keV, 并且 872.2 keV 与自身没有级联关系, 利用 708.1 keV 和 795.0 keV 的级联加和关系和能量强度, 修改了 678.5 keV 的位置在两条 824.2 keV 之间, 并且根据能量强度关系, 确定 675.8 keV 在能级 8 692.6 keV 之上。在序列 1 不同 γ 跃迁的开窗谱中, 发现了更高自旋态 $49/2^+$ 之上的 1 914.1 keV 跃迁。在能级 4 069.3 keV 之上, 分别发现了 557.6, 511.0, 971.9, 1 019.7 keV 的退激序列。

在本次实验 824.2 keV 的开窗谱中, 如图 5(a) 所示, 可以观测到 1 358.9, 716.6 keV 的正宇称退激序列, 通过级联关系、强度关系和级联加和关系确定了 716.6 keV 往上的两条退激路径。与此同时, 在 708.1 keV 开窗谱

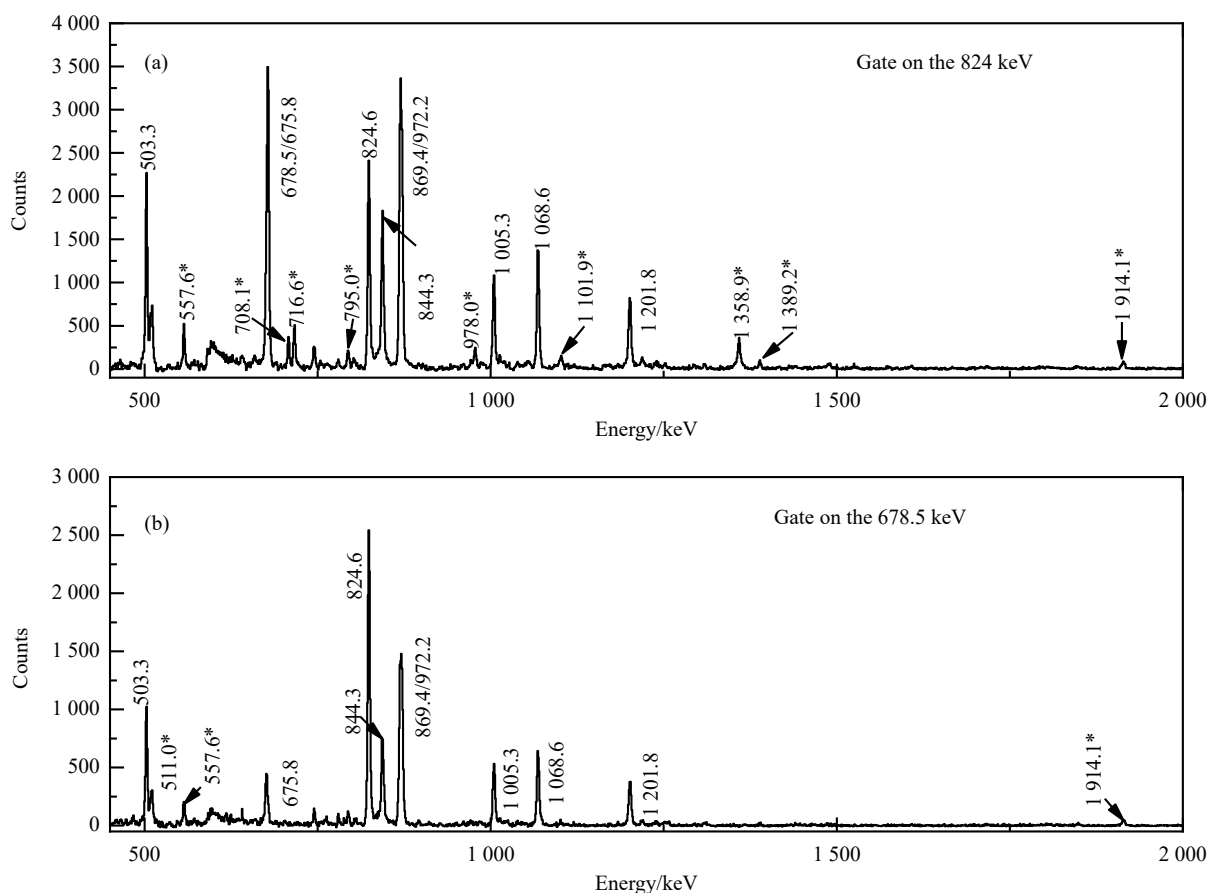


图5 (a) 为 824 keV 开窗谱, (b) 为 678.5 keV 开窗谱

中, 发现了 1 219.7, 1 171.8, 1 183.0 和 659.3 keV 的级联顺序, 且它们的级联加和关系和序列 2 相呼应。这增加了序列 3 的合理性。对于基态跃迁, 708.1 和 1 358.9 keV 只与 824.6 keV 有级联关系, 这能够从实验上确定 824.6 keV 为基态跃迁。

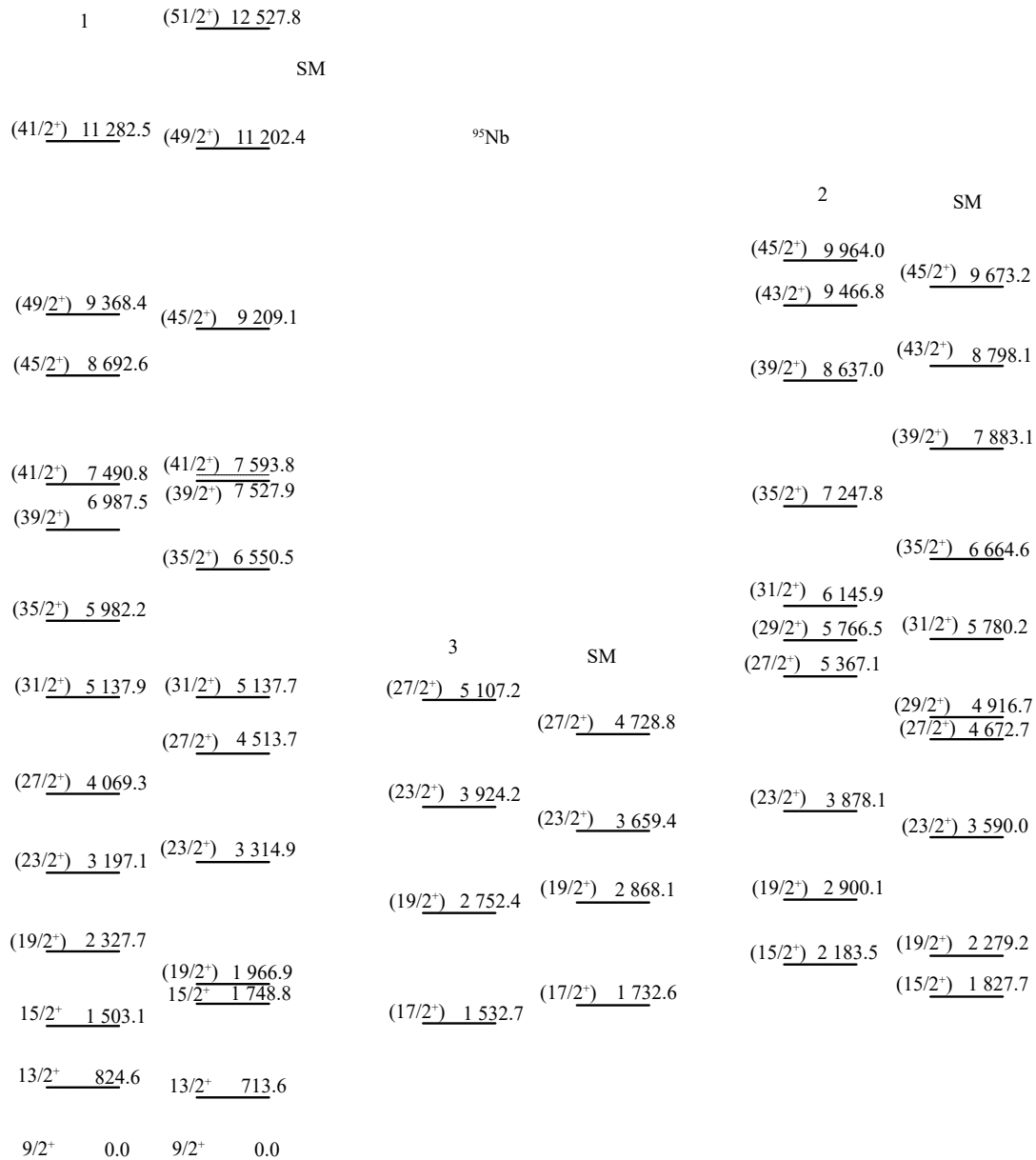
2.2 壳模型计算

为了解释 ^{95}Nb 的激发能级的实验观测值, 我们利用壳模型程序 Nushellx^[7] 对 ^{95}Nb 的激发能级进行计算。选取的壳模型空间为 GWB, 相互作用势为 GWBXG^[8]。壳模型空间总共由 10 条轨道组成: $\pi(f_{5/2}, p_{3/2}, p_{1/2}, g_{9/2}), \nu(p_{1/2}, g_{9/2}, g_{7/2}, d_{5/2}, d_{3/2}, s_{1/2})$ 。每条轨道所对应的单粒子能量分别为: -5.322, -6.144, -3.941, -1.250, -0.696, -2.597, 5.159, 1.830, 4.261 和 1.741 MeV。考虑到壳模型计算的复杂性和耗时性, 对计算的组态空间进行截断, 只将各态的主要组态成分考虑进去, 而其他次要的组态成分则忽略。实验结果和壳模型计算结果如图 6 所示。

^{95}Nb 费米能级为 $\pi g_{9/2}$ 和 $\nu d_{5/2}$, 相对于 $Z=38$ 和 $N=50$ 的核心外面有三个价质子和四个价中子。由于质子高 $jg_{9/2}$ 轨道单粒子激发能较低, 而中子高 $jg_{7/2}$ 轨道的

激发能较高, 所以 ^{95}Nb 低位能级主要由 $\pi(p_{1/2} g_{9/2})$ 轨道激发。正如壳模型的计算结果所给出的那样, 基态 $9/2^+$ 由质子轨道 $1g_{9/2}$ 上未成对的质子表示。随着自旋的增加, $23/2^+$ 及以上开始涉及质子轨道 $2p_{1/2}$ 质子对向轨道 $1g_{9/2}$ 激发, 例如, $31/2^+$ 和 $35/2^+$ 态, 它们的质子组态都为 $\pi(1g_{9/2})^3$ 。当自旋更高时, 将涉及中子轨道 $d_{5/2}$ 上的中子跨 56 亚壳向更高能量的 $3s_{1/2}$ 轨道激发, 例如, $35/2^+$ 态, 中子组态为 $\nu(1g_{7/2})^1(2d_{5/2})^2(3s_{1/2})^1$ 。在高自旋态时, 如 $39/2^+$ 和 $45/2^+$ 态时, 涉及质子轨道 $1f_{5/2}$ 上的质子跨 $Z=38$ 壳的核芯激发, 质子组态为 $\pi(1f_{5/2})^5(2p_{1/2})^1(1g_{9/2})^3$ 。

从图 6 中可以看出, 壳模型计算整体符合较好, 对于高自旋能级, 实验能级和计算结果相差较大。通常情况下, 特定能级的计算值与实验值的偏差程度取决于被忽略的组态成分对这一能级波函数的贡献程度。忽略了特定能级的重要组态成分将会导致这条能级的计算值比实验值大很多。对于本工作中的壳模型计算结果在高激发态出现的明显差异, 最主要原因可能是在 GWB 相互作用空间没有考虑 $h_{11/2}$ 轨道。因此, 进一步进行壳模型计算的意义在于, 能够揭示其中子激发与质子激发的竞争和相互作用。

图 6 ^{95}Nb 实验结果和壳模型计算结果比较

每条序列左侧数字为实验值，右为英文为壳模型计算值。

3 总结

利用熔合蒸发反应 $^{82}\text{Se} (^{18}\text{O}, \text{p}4\text{n}) ^{95}\text{Nb}$ 布居了 ^{95}Nb 的高自旋态，扩展了 ^{95}Nb 的能级方案，对 ^{95}Nb 核的高自旋态能级纲图做了重要修改，新发现了 25 条 γ 跃迁和 21 条能级。利用 DCO 和线极化测量方法，确定了部分能级的自旋和宇称。为了更好地理解 ^{95}Nb 的能级结构，使用 Nushellx 程序进行了壳模型计算，结果表明， ^{95}Nb 较低自旋能级组态的主要成分由若干个 $\pi g_{9/2}$ 和 $\nu d_{5/2}$ 价核子构成，随着自旋增加出现 $\pi(p_{1/2} \rightarrow g_{9/2})$ 激发，在较高自旋能级中，将涉及 $\nu(d_{5/2} \rightarrow g_{7/2}, s_{1/2})$ 激发，当自旋大于 $39/2^+$ 和 $45/2^+$ 出现了质子跨 $Z=38$ 的核心激发。

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，感谢加速器运维组为实验提供了束流，同时感谢各位老师同学对实验各方面的帮助。

参考文献：

- [1] BUCURESCU D, PODOLYÁK Zs, RUSU C, et al. *Phys Rev C*, 2005, 71: 034315.
- [2] CUI Xingzhu, ZHU Lihua, WU Xiaoguang, et al. *Phys Rev C*, 2005, 72: 044322.
- [3] LUO Pengwei, WU Xiaoguang, SUN Huibin, et al. *Phys Rev C*, 2014, 89: 034318.
- [4] WU Yiheng, LU Jingbin, LUO Pengwei, et al. *Chin Phys Lett*, 2014, 34: 042102.

- [5] WU Y H, LU J B, ZHEN R, et al. *Phys Rev C*, 2022, 105: 034344. 938.)
- [6] FANG Y D, ZHANG Y D, ZHOU X H, et al. *High Energy Phys and Nucl Phys*, 2007, 31(10): 938. (in Chinese) [7] BROWN B A, RAE W D M. *Nuclear Data Sheets*, 2014, 120: 115.
- (方永得, 张玉虎, 周小红, 等. 高能物理与核物理, 2007, 31(10): [8] ZHANG Changhua, WANG Shunjin, GU Jinnan, et al. *Phys Rev C*, 1999, 60: 054316.

High-spin States in the Nucleus ^{95}Nb

HONG Rui^{1,2}, LI Congbo^{2,†}, LI Huidong^{1,†}, ZHENG Yun², WU Xiaoguang², LI Tianxiao², LI Yunqiu², WU Hongyi², ZHENG Min², ZHAO Zihao^{2,3}, HE Ziyang², LI Jinze², LI Guangshun⁴, GUO Chengyu⁵, NI Lei⁵, ZHOU Zhenxiang⁵, HE Chuangye², LIU Fulong², ZHOU Xiaohong⁴, LIU Minliang⁴, ZHANG Yuhu⁴, WANG Shouyu⁶, WANG Shuo⁶, ZHU Lihua⁷

(1. School of Science, Xihua University, Chengdu 610039, China;

2. China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China;

3. College 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, School of Physics, Peking University, Beijing 100091, China;

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

7. School of Physics and Nuclear Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: High-spin level structure of ^{95}Nb has been investigated using the multi-detector array of the conjoint gamma array in China via the $^{82}\text{Se}(^{18}\text{O}, \text{p}4\text{n})^{95}\text{Nb}$. Based on γ - γ coincidence relationships, the level scheme of ^{95}Nb has been modified and extended with 25 new γ rays and 15 new levels. The new level structure of ^{95}Nb has been compared with the shell model calculations. It is suggested that the proton core excitation($f_{5/2} \rightarrow g_{9/2}$) across $Z=38$ sub-shell should be taken into account in order to adequately describe the high-spin level structure in ^{95}Nb above spin of $39/2$.

Key words: high-spin states; level scheme; linear polarization; shell model

Received date: 30 Jun. 2023; **Revised date:** 18 Dec. 2023

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(11975315, U1932209, U2167202, U2167201); Continuous-support Basic Scientific Research Project

† **Corresponding author:** LI Congbo, E-mail: licb@ciae.ac.cn; LI Huidong, E-mail: huidongli888@163.com