

$A \sim 100$ 区 Tc 同位素能级结构的研究*

沈水法^{1,2,3,1)} 王凤歌⁴ 方克明⁵ 许甫荣³

1 (核资源与环境教育部重点实验室(东华理工大学) 南昌 330013)

2 (东华理工大学核工程技术学院 抚州 344000)

3 (北京大学物理学院 北京 100871)

4 (中原工学院电子与信息工程学院 郑州 450007)

5 (中国科学院上海应用物理研究所 上海 201800)

摘要 用投影壳模型对¹⁰¹Tc的受激正/负宇称转晕态结构进行了探讨,为了从定量结果中抽取出物理内容也作出了正宇称转晕带的能带图.此外,各自起源于 $3/2^-$ [301], $5/2^-$ [303]和 $1/2^+$ [431]尼尔逊态的3个带也在这个模型框架下进行了分析.到目前为止,在 $Z \sim 42-44$ 区关于 $N=52-54$ 的中间核性质知之甚少,为了解这些“过渡核”,以⁹⁵Tc为例,对其能级结构也进行了研究.

关键词 投影壳模型 正/负宇称态 能带图

1 引言

$A \sim 100$ 质量区丰中子过渡核呈现出复杂的结构,它既不服从球形壳模型计算又不服从几何模型方法^[1],近几年来它们在被广泛地研究^[2].主要原因之一是形状转变性质,这展示出复杂的低能态结构.这些复杂的结构是由于在这些核里面起作用的各种力(核力,离心力和科里奥利力的拆对效应及由于质子、中子是费米子而引起的成对效应和阻塞效应)的共存和竞争的结果.两个支壳层闭壳 $Z=38$ 或 40 和 $N=56$ 的存在^[2],和对特定核子数这些能隙的消失对这些低位结构的复杂性有贡献.特别地,价核子数目介于球形和强形变两个极限之间的过渡核越加难于描述.本工作报道奇质子核¹⁰¹Tc₅₈的能级结构,这已被几个小组研究过^[1-3],以及属于“过渡核”的⁹⁵Tc₅₂.

2 投影壳模型(PSM)框架下¹⁰¹Tc能级结构的计算

本工作报道¹⁰¹Tc中确认的5个带的研究.¹⁰¹Tc中正/负宇称晕带的结构在过去已进行过广泛的研究,

前者的组态为 $\pi g_{9/2}$,后者在非轴对称转子的描述中由组态 $\pi p_{1/2}$ 与其他负宇称轨道混合引起^[1].投影壳模型的详细描述见文献[4],本工作着重于强调计算和讨论,目的是阐明¹⁰¹Tc核.近年来,投影壳模型在核素图的各个区域内在解释形变核的一系列性质上取得了很大的成功,这个建立在量子力学基础之上的模型的一个显著方面是它用一个简单的物理解释来描述高自旋数据的精密细节^[5].同时我们看到国内一些学者在投影壳模型方面作了一些工作,特别值得一提的是中国原子能研究院的高早春博士对此有新的发展^[6,7].

在目前的投影壳模型(PSM)计算中,修正后的谐振子势的Nilsson参数 κ 和 μ 的值采用文献[8]给出的值(Nilsson势用的是轴对称的谐振子势,并考虑自旋-轨道耦合和其他修正项).对强度 Δ 由奇偶质量差得出^[9],

$$\Delta_p = \frac{1}{4} \{ B(N, Z-2) - 3B(N, Z-1) + 3B(N, Z) - B(N, Z+1) \}, \quad (1)$$

$$\Delta_n = \frac{1}{4} \{ B(N-2, Z) - 3B(N-1, Z) + 3B(N, Z) - B(N+1, Z) \}, \quad (2)$$

2006-08-15 收稿

* 国家重点基础研究发展规划(2006CB708409),国家自然科学基金(10547140, 10525520, 10475002),江西省自然科学基金(0612003)和国家博士后科学基金(20060390370)资助

1) E-mail: shfshen@ecit.edu.cn

此称为四点公式. 核总结合能值 B 取自文献[10], 只要有实验值就取实验值. 结果为 $\Delta_p=1.5725\text{MeV}$ 和 $\Delta_n=0.9275\text{MeV}$. 用BCS形式处理对关联. 在考虑对关联时, 包括3个谐振子壳, 对中子 $N=3, 4, 5$, 对质子 $N=2, 3, 4$, 用Nilsson+BCS形式进行了形状计算, Hartree-Fock-Bogoliubov 能量 E_{HFB} (实际上是用 Nilsson+BCS 形式进行了形状计算, E_{HFB} 与由 Nilsson+BCS 方法计算所得的形变能差别不会很大, 参见文献[4]附录A. 1) 随四极形变参数 ε_2 的变化示于图1. 图中 E_{HFB} 有两个极小值, 各自对应于长椭球形状 ($\varepsilon_2=0.28$) 和球形 ($\varepsilon_2=0.00$), 这两个极小可考虑为可能的平衡形变形状. 过去的工作显示, 这个核有中等形变的长椭球形状, 下面的计算中, 我们在形变 $\varepsilon_2=0.28$ 构建壳模型基, 这与Savage等人^[3]的工作所取值相符, 在那里轴对称粒子-转子模型中, 用形变 $\delta=0.28$ 成功解释 ^{101}Tc 中观测到的结构. 比较文献[3]中图4和文献[11]中图10(b), 发现Savage等人所采用的形变参数 δ 等于 Browne 等人^[11] 所用的 ε , 也等于本工作中 Nilsson+BCS 计算所得的 ε_2 . 此后 $|\phi(\varepsilon_2=0.28)|$ 写为 $|0\rangle$, 十六极形变参数 $\varepsilon_4=-0.007$ 取自 Möller 等人^[10] 的编评.

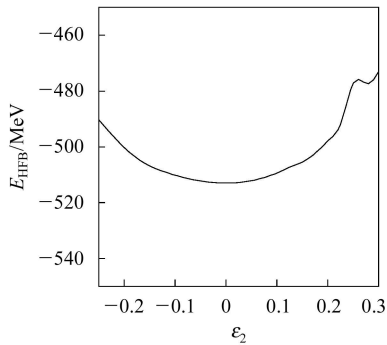


图1 ^{101}Tc 的 Hartree-Fock-Bogoliubov 能量 E_{HFB} 随四极形变参数 ε_2 的变化

考虑到正宇称晕带情况下, 奇质子占据 $1g_{9/2}$ 子壳, 特别是 $5/2^+$ [422] 轨道, 所以计算中基态 (basis states) 限制在对质子为 $N=4$ 主壳接近于费米面的 Nilsson 态, 即对质子选取 $g_{9/2}$ 子壳的所有轨道, 并从它们形成多准粒子态. 计算结果和与实验结果的比较示于图2. $5/2^+$, $7/2^+$ 和 $9/2^+$ 能级的实验值取自 Blachot^[12] 的编评, 其余取自 Hoellinger 等人^[1] 和 Dejbakhsh 等人^[2] 对 ^{101}Tc 核的在束研究. 可以看出, 计算结果除了低位态 $7/2^+$ 和 $9/2^+$ 能级以外, 基本能描述实验数据. 理论计算预言, ^{101}Tc 的基态为 $7/2^+$ 而实验为 $9/2^+$, 如 Arias 等人在 IBFM-2 框架下计算的结果^[13]. Tc 同位素链正宇称晕带的演变显示: 虽然

^{97}Tc 展示典型的弱耦合行为, Tc 重一点的同位素的激发态趋向于一个强耦合图像. 这意味着对弱形变核 ^{97}Tc 其质子费米能接近 $\pi g_{9/2}$ 子壳的低- Ω 态, 而对大一点形变的 $^{103-105}\text{Tc}$ 核其质子费米面靠近 $\pi g_{9/2}$ 子壳的 $5/2^+$ 轨道. 人们注意到, ^{103}Tc 是显示转动带规则次序的核, 即使其能级劈裂还是很大^[14, 15]. 伴随 $\pi g_{9/2}$ 组态的带显示一个大的旋称劈裂, 对这个区域里的有些核 (如 Ag) 这伴随着一个大的 γ 形变^[16], 计算结果也显示这种旋称劈裂, 但没有这么大, 这可能是因为我们目前的计算程序假定核是轴对称的, 对那些具有 γ 形变的核不能作定量讨论^[17].

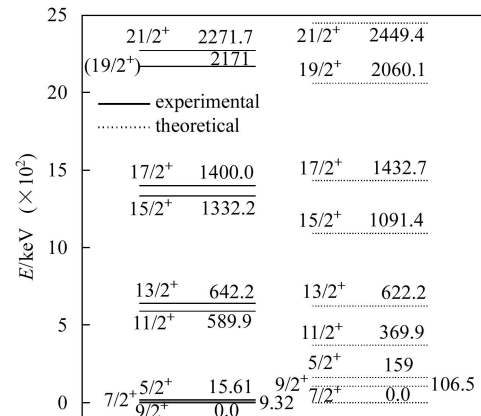


图2 ^{101}Tc 正宇称晕带的投影壳模型计算值与实验结果的比较

事实上, 在现在的例子 ^{101}Tc 中, 就像上面提到的正宇称晕带起源于 $\pi g_{9/2}$ 组态, 可以发现, 质子费米能位于侵入子壳 $1g_{9/2}$ 的 $K=5/2$ 和 $K=7/2$ 准粒子态之间, 所以这些能级附近的轨道在物理上是很重要的. 选取 $1g_{9/2}$ 子壳的 $K=1/2$, $K=3/2$, $K=5/2$ 和 $K=7/2$ 的质子准粒子态来架构准粒子基, 而没有选择中子准粒子态, 因而最后组态空间是4维. 壳模型组态空间由投影每一个这些准粒子态到好的角动量构筑, 然后哈密顿量在此空间中对角化. 文献[4]提及的能带图示于图3中, 该图中实心圆表示正宇称晕带各成员, 它是由最后对角化步骤 (带混杂) 得到的^[18], 正是这种能带图使得我们能够方便地用来从定量结果中抽取出物理内涵^[4]. $I=5/2$ 能级具有起源于 $5/2^+$ [422] Nilsson 态的单准粒子带特性, 显示 $K=1/2$ 和 $K=3/2$ 态对此态影响较小, 而因为 $|K| \leq I$ 的限制 $K=7/2$ 带在此角动量时不可能参与进来. 然后 $K=7/2$ 带与 $K=5/2$ 带混合对正宇称晕带有贡献. 简言之, 当它们 (包括 $K=1/2$ 和 $K=3/2$ 带) 越靠近实心圆, 它们对正宇称带的贡献就越大.

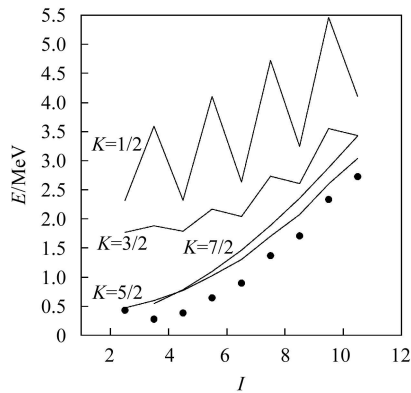


图 3 ^{101}Tc 正宇称晕带的能带图(包括实心圆都是投影壳模型的计算结果)

对负宇称晕带的计算时, 组态空间由取 $N=5$ ($N=3$) 主壳中接近费米面的中子(质子)准粒子态架构, 即对质子取 $\pi p_{1/2}$ 轨道及其他接近它的轨道. 对负宇称晕带也取形变参数 $\varepsilon_2=0.28$ 时, 计算结果能最好

地重现实验值, 理论与实验的比较示于图 4 中.

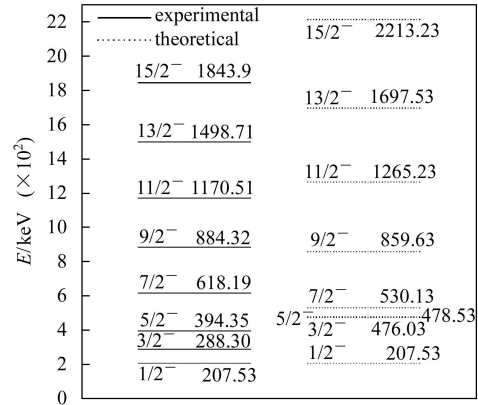


图 4 ^{101}Tc 实验观测到的负宇称晕带与用投影壳模型预言结果的比较

实验能级取自文献[3], 图中显示所有的计算能级次序与实验相符.

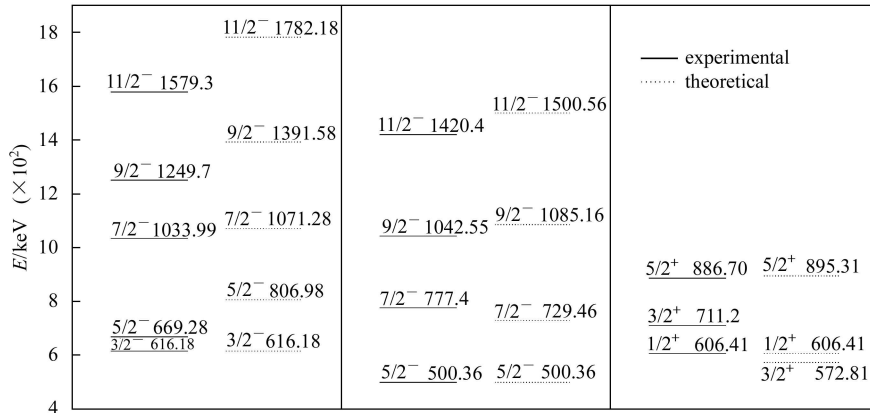


图 5 ^{101}Tc 中分别起源于组态 $3/2^-$ [301], $5/2^-$ [303] 和 $1/2^+$ [431] 的带结构及与投影壳模型计算结果的比较

图 5 显示由 Savage 等人^[3] 鉴别出的分别起源于 $3/2^-$ [301], $5/2^-$ [303] 和 $1/2^+$ [431] 组态的 3 个带及与 PSM 预言的比较, 对 $3/2^-$ [301] 和 $5/2^-$ [303] 带的复现较好, 对 $1/2^+$ [431] 带的拟合不能令人满意, 能级 $1/2^+$ 和 $3/2^+$ 的顺序与实验不符, 但对这两个态其他的自旋也是允许的, 而且由粒子-转子模型计算结果显示伴随这个带的是相对纯的 $1/2^+$ [431] Nilsson 带, 纯度依赖于自旋从 58% 到 91%. 然而, 用 PSM 对这 3 个带的计算中, 理论结果各自基于纯 $3/2^-$ [301], $5/2^-$ [303] 和 $1/2^+$ [431] Nilsson 态^[17], 它们是壳模型对角化(组态混杂)前的结果.

3 ^{95}Tc 受激正/负宇称带的投影壳模型 (PSM) 描述

质子和中子数分别为 $Z \approx 40$ 和 $N \approx 50$ 的核是许

多理论研究的主题. 到现在为止, 无论从实验还是从球形壳模型计算都已经很好地建立起了在 $Z \sim 42-44$ 区域 $N \leq 51$ 的核甚至在很高的角动量时, 单粒子激发在核能级结构中占优势; 而 $N \geq 55$ 的核建立起集体行为. 这区域的一个例子就是上面所研究的 ^{101}Tc ^[19]. 到目前为止, 关于 $N=52-54$ 的中间核则知之甚少. 为了解这些“过渡核”, 选择 ^{95}Tc 为例, 从理论上研究它的高自旋态. 现在的计算中, 对中子(质子)分别考虑 $N=3, 4, 5$ ($N=2, 3, 4$) 主壳, 投影壳模型采用对加四极哈密顿量, 包括四极对力项^[4]. 已有的工作指出, ^{95}Tc 为中等形变核, 所以我们用基形变 $\varepsilon_2=0.20$ 对 ^{95}Tc 作计算. 有趣的是对正宇称带的计算倾向于这样的形变选择, 其实别人从粒子-转子模型的观点对这进行过讨论^[20], 从文献 [20] 的图 1 和文献 [11] 的图 10(b) 的比较, 发现 Zeghib 所采用的形变参数 δ 等于 Browne 等人所用的 ε , 也等于本工作中所用的 ε_2 , 十六极形

变参数 $\varepsilon_4 = -0.007$ 取自 Möller 等人^[10] 的编评, 能级实验值取自文献 [21]. 最近, 有一个用 $^{65}\text{Cu} + ^{36}\text{S}$ 反应对 ^{95}Tc 进行在束研究的报道^[22], 其工作得出的 ^{95}Tc 能级纲图在很大程度上与以前的工作^[21] 相一致.

目前的工作中, 对隙 Δ 也用四点公式计算^[9], 能隙参数 Δ_p 和 Δ_n 也可用下式计算:

$$\Delta_{p(n)} = \frac{4.8}{Z(N)^{1/3}}, \quad (3)$$

$$\Delta_{p(n)} = \frac{11.2}{A^{1/2}}, \quad (4)$$

$$\Delta_{p(n)} = \frac{1}{2} [2B(Z, N) - B(Z-1, N) - B(Z+1, N)]. \quad (5)$$

(5) 式为三点公式^[23]. 核的总结合能值 B 取自文献 [10], 如果有实验值的就尽量取实验值, 其结果是 $\Delta_p = 1.5075\text{MeV}$ 和 $\Delta_n = 0.8425\text{MeV}$. Nilsson 势中出现的自旋-轨道力参数 κ 和 μ 取自 Zhang 等人的工作^[8], 除了对于质子, 其 $N=3$ 和 4 主壳的 Nilsson 参数取自文献 [20]. 基态限制在接近费米面的 Nilsson 态. 计算正宇称态的时候, 包括 $g_{9/2}$ 子壳的所有态 ($1/2^+[440]$, $3/2^+[431]$, $5/2^+[422]$, $7/2^+[413]$ 和 $9/2^+[404]$), $g_{7/2}$ 子壳的 $1/2^+[431]$ 和 $3/2^+[422]$ 态及 $d_{5/2}$ 的 $1/2^+[420]$ 态. 对于负宇称态, 取 $p_{1/2}$, $p_{3/2}$ 和 $f_{5/2}$ 子壳的 6 个态, 即 $1/2^- [301]$, $1/2^- [310]$, $1/2^- [321]$, $3/2^- [301]$, $3/2^- [312]$ 和 $5/2^- [303]$ 态. 图 6 显示正宇称带的实验所测各态激发能量 (图中只给出能量较低的几个态) 及与 PSM 计算结果的比较. 图中显示理论值普遍大于测量值. 但我们仍然可以发现各计算能级的方式和次序与实验结果一致, 特别是 $5/2^+$, $7/2^+$, $9/2^+$ 这 3 个反常耦合态的次序. 另一方面, 本工作中对负宇称带用一个较大的形变参数 (例如四极形变 $\varepsilon_2 = 0.225$) 似乎给出与实验的较好符合. 对负宇称带的由理论决定的能量与实验数据的比较示于图 7 中 (同样图中也只给出能量较低的几个态).

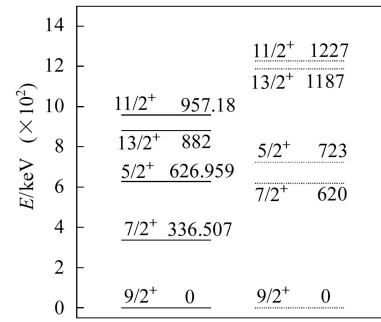


图 6 ^{95}Tc 中实验观测到的正宇称带 (实线) 与投影壳模型计算结果 (虚线) 的比较

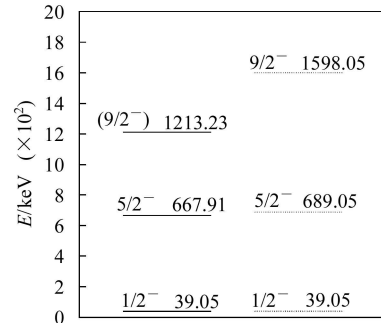


图 7 ^{95}Tc 中实验观测到的负宇称带 (实线) 与投影壳模型预言结果 (虚线) 的比较

同样很明显理论计算值较实验值偏高. 这些结果 (对正/负宇称带理论计算值普遍高于实验测量值) 显示 ^{95}Tc 为一过渡区核^[24]. 这里我们要强调的是所有这些态 (对正宇称和负宇称带) 都是一次对角化得到的, 而没有对个别态的调整 (参数).

结果显示这个仅有几个参数的简单壳模型能够成功地解释 ^{95}Tc 的大部分能级结构^[25]. 我们试图显示如果 ^{95}Tc 是形变的, 那它的基本特征能够自然地解释. 我们想强调的是形变 $\varepsilon_2 = 0.20$ 主要基于 Zeghib 等对 ^{95}Tc 电磁跃迁性质的模型分析^[20], 以及适合过去工作^[3, 26, 27] 对其他 Tc 同位素的系统性. 它的形变介于强形变和微弱形变区, 它的结构展示在这两个区发现的特征.

参考文献 (References)

- Hoellinger F, Schulz N, Courtin S. Eur. Phys. J., 1999, **A4**: 319
- Dejbakhsh H, Mouchaty G, Schmitt R.P. Phys. Rev., 1991, **C44**: 119
- Savage D G, Hurol Aslan, Crowe Ben et al. Phys. Rev., 1997, **C55**: 120
- Hara K, SUN Y. Int. J. Mod. Phys., 1995, **E4**: 637
- Palit R, Sheikh J A, SUN Y et al. Phys. Rev., 2003, **C67**: 014321
- GAO Z C, CHEN Y S, MENG J. Chin. Phys. Lett., 2004, **21**: 806
- GAO Z C, CHEN Y S, SUN Y. Phys. Lett., 2006, **B634**: 195
- ZHANG J Y, XU N, Fossan D B et al. Phys. Rev., 1989, **C39**: 714
- Bohr A, Mottelson B R. Nuclear Structure. Benjamin, New York, Amsterdam, 1969, **I**: 169
- Möller P, Nix J R, Myers W D et al. Atom. Data and Nucl. Data Tables, 1995, **59**: 185
- Edgardo Browne, Dairiki Janis M, Raymond E Doebler et

- al. Table of Isotopes (Seventh Edition). Ed Lederer C M, Shirley V S. A Wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons, Inc., New York
- 12 Jean Blachot. Nuclear Data Sheets, 1998, **83**(1): 54—62
- 13 Arias J M, Alonso C E, Lozano M. Nucl. Phys., 1987, **A466**: 295
- 14 Bauchet A, Deloncle I, Porquet M G et al. Acta Phys. Hung. N. S., 2001, **13**: 189
- 15 Bauchet A, Deloncle I, Porquet M G et al. Eur. Phys. J., 2001, **A10**: 145
- 16 Keller H J, Frauendorf S, Hagemann U et al. Nucl. Phys., 1985, **A444**: 261; Frauendorf S. Proceeding of International Symposium on In-Beam Nuclear Spectroscopy. Debrecen, Hungary, 1984
- 17 Rizzutto M A, Cybulska E W, Emediato L G R et al. Nucl. Phys., 1994, **A569**: 547
- 18 SUN Y, Hara K. Comp. Phys. Comm., 1997, **104**: 245
- 19 SHEN Shui-Fa, WANG Feng-Ge, GU Jia-Hui et al. Journal of the Physical Society of Japan, 2006, **75**: 014201
- 20 Zeghib S. Physica Scripta., 2003, **67**: 106
- 21 Marshall K A, Thompson J V, Cook W B et al. Can. J. Phys., 1978, **56**: 117
- 22 Ghugre S S, Kharraja B, Garg U et al. Phys. Rev., 1999, **C61**: 024302; Erratum. Phys. Rev., 2000, **C62**: 029902
- 23 Bohr A, Mottelson B R. Nuclear Structure. Benjamin, New York, Amsterdam, 1969.I: 171
- 24 SHEN S F, LI Y, GU J H. HEP & NP, 2005, **29**: 139 (in Chinese)
(沈水法, 李燕, 顾嘉辉. 高能物理与核物理, 2005, **29**: 139)
- 25 SHEN Shui-Fa et al. The Eur. Phys. Jour., A, in press
- 26 Aslan H et al. Phys. Rev., 1996, **C54**: 576
- 27 Crowe B et al. Phys. Rev., 1998, **C57**: 590

Study of Nuclear Level Structure in Tc Isotopes with Mass $A \sim 100$ *

SHEN Shui-Fa^{1,2,3;1)} WANG Feng-Ge⁴ FANG Ke-Ming⁵ XU Fu-Rong³

1 (Key Laboratory of Nuclear Resources and Environment (East China Institute of Technology),
Ministry of Education, Nanchang 330013, China)

2 (School of Nuclear Engineering and Technology, East China Institute of Technology, Fuzhou 344000, China)

3 (School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

4 (School of Electric and Information Engineering, Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou 450007, China)

5 (Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract In the present work, the structures of the excited positive/negative-parity yrast states of ^{101}Tc are discussed by using a projected shell model, and a band diagram calculated for the positive-parity yrast band is also shown in order to extract physics out of numerical results. In addition, the analysis of other three bands originated from $3/2^- [301]$, $5/2^- [303]$, and $1/2^+ [431]$ Nilsson states, respectively, is also performed in the framework of this model. Until recently, very little property about the $N=52-54$ intermediate nuclei in the $Z \sim 42-44$ region has been known. In order to understand these “transitional nuclei”, we select the nucleus ^{95}Tc as an example. So in this work, we also present our investigation of the level structure in the ^{95}Tc nucleus.

Key words projected shell model(PSM), positive/negative-parity states, band diagram

Received 15 August 2006

* Supported by Major State Basic Research Development Program in China (2006CB708409), National Natural Science Foundation of China (10547140, 10525520, 10475002), Natural Science Foundation of Jiangxi Province (0612003) and China Postdoctoral Science Foundation (20060390370)

1) E-mail: shfshen@ecit.edu.cn