

^{90}Nb 和 ^{91}Nb 的高自旋态结构*

崔兴柱^{1,2} 竺礼华^{1,1)} 吴晓光¹ 李广生¹ 温书贤¹ 王治民¹ 贺创业¹ 张振龙^{1,2}
孟锐^{1,2} 马瑞刚¹ 骆鹏³ 郑勇³ 霍俊德² M. M. Ndontchueng⁴

1 (中国原子能科学研究院 北京 102413)

2 (吉林大学物理学院 长春 130023)

3 (中国科学院兰州近代物理研究所 兰州 730000)

4 (Université de Douala, Faculté de Sciences, B.P. 8580 Cameroun)

摘要 用能量为80MeV的 ^{19}F 束通过反应 $^{76}\text{Ge}(^{19}\text{F}, \text{xn})$ 布居了 ^{90}Nb 和 ^{91}Nb 的高自旋态. 通过在束测量分析 ^{90}Nb 和 ^{91}Nb 退激射线的符合级联关系, 发现了新的属于 ^{90}Nb 和 ^{91}Nb 的跃迁, 建立了 ^{90}Nb 和 ^{91}Nb 的高自旋态能级纲图. 通过经验壳模型计算指定了部分能级的组态, 并结合实验DCO比值和与相邻核素的系统比较, 确认了新能级的自旋和宇称.

关键词 高自旋态 在束伽马谱学 能级纲图 原子核壳模型 组态

1 引言

在幻数核附近, 由于能态的角动量由核子的角动量耦合形成, 没有转动的贡献, 核子间的相互作用比较容易研究. 中子数 $N \sim 50$ 区的大量研究^[1-4]表明, 该核区的核素大多具有球形核结构, 一些以 ^{88}Sr 作为核心的壳模型计算^[5-10]与实验数据符合得很好. ^{90}Nb 的质子数和中子数分别为41和49, 分别临近 $L-S$ 耦合和 $j-j$ 耦合的闭壳, 接近球形核, 而 ^{91}Nb 的质子数和中子数分别为41和50, 中子为闭壳结构. 它们具有明显的壳层结构, 高自旋态呈现较强的粒子性. 在本工作中分别观察到了属于上述两个核的新的 γ 跃迁. 用经验壳模型计算方法, 根据邻近核的低能部分提取两体相互作用, 计算出部分能级的能量, 通过与实验能级能量的比较, 确定了部分能级的组态.

2 实验和数据分析

本实验采用 $^{76}\text{Ge}(^{19}\text{F}, \text{xn})$ 反应来布居 ^{90}Nb 和 ^{91}Nb 的高自旋态. ^{19}F 束流是由中国原子能科学研究院的HI-13串列加速器提供的, 束流能量为80MeV. 靶由厚度为 $2.2\text{mg}/\text{cm}^2$ 的 ^{76}Ge 和 $10\text{mg}/\text{cm}^2$ 厚的铅衬组成. 退激 γ 射线由15台HPGe-BGO反康谱仪

测量(其中5台放置于与束流线为 90° 的位置, 4台放置于 44.6° , 4台放置于 135.4° , 其余2台分别放置于 54.7° 和 125.3°)共记录了 68×10^6 个二重 γ - γ 符合事件. 通过离线反演生成对称化的 $E_\gamma \sim E_\gamma$ 二维矩阵. 采用Radware软件对该二维矩阵进行 γ 射线开窗分析, 得到各 γ 射线之间的级联关系, 得到的 ^{90}Nb 和 ^{91}Nb 的部分纲图分别如图1, 图2所示. 由于本次实验采用了重离子束和较高的能量, C.A.Fields实验^[11]中 ^{90}Nb 低能部分的 γ 射线未在本实验中观测到.

为了确定新观测到的能级的自旋及宇称, 还对实验数据进行了DCO(方向角关联)比值分析. 首先建立了一个DCO二维 $E_\gamma - E_\gamma$ 矩阵, 即以位于与束流方向成 90° 的探测器探测到的 γ 射线能量作为二维 $E_\gamma - E_\gamma$ 矩阵的 x 轴, 将其他角度探测器探测到的 γ 射线能量作为二维 $E_\gamma - E_\gamma$ 矩阵的 y 轴. 根据得到的DCO矩阵就可以提取各 γ 射线的DCO比值, 经过与已知多级性的 γ 射线的DCO比值的比较, 从而得到各条 γ 射线的多极性^[7]. DCO比值的定义为

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

其中 $I_{\gamma_1}(\theta)$ 为在二维 $E_\gamma - E_\gamma$ 矩阵的 y 轴上用 γ_2 射线开窗得到的 γ_1 的计数, $\gamma_1(90^\circ)$ 为在 x 轴上用 γ_2 射

* 国家重点基础研究发展规划项目(TG2000077405)和国家自然科学基金(10175090,10105015,10375092)资助

1) E-mail: zhulh@iris.ciae.ac.cn

线开窗得到的 γ_1 的计数, θ 为除 90° 外的角度,
 $\varepsilon_\gamma(\theta)$ 为 θ 角度上所有探测器对 γ 射线的探测效率.

线则对应于 $\Delta I = 1$ 的跃迁.

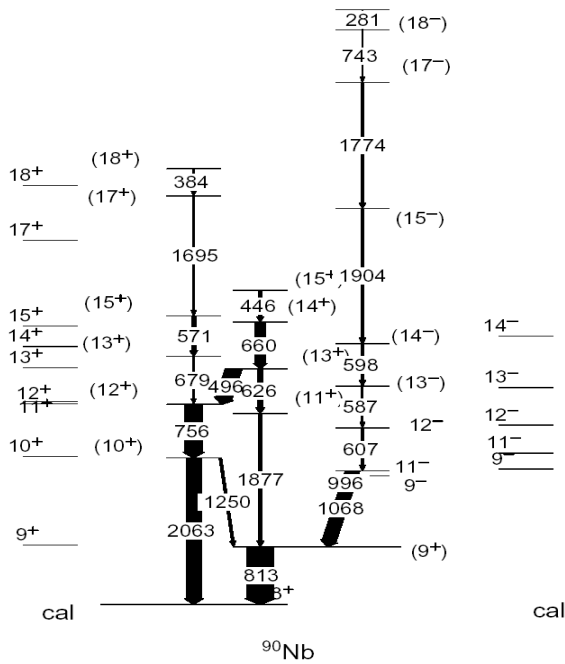


图1 ^{90}Nb 的能级纲图

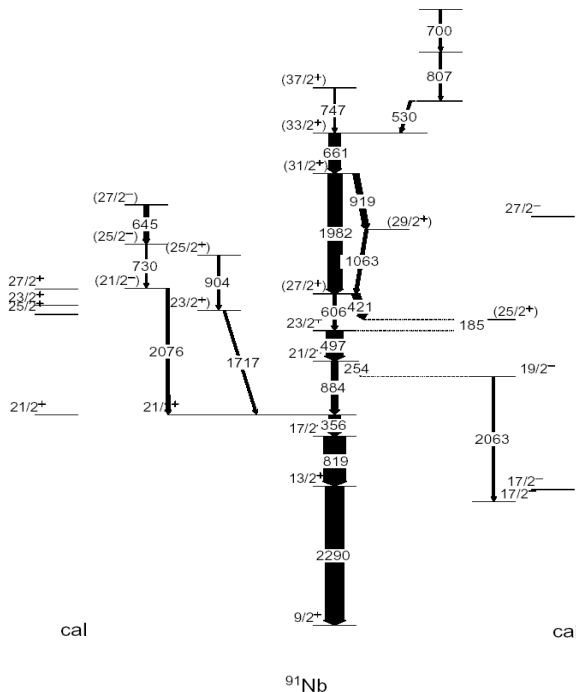


图2 ^{91}Nb 的能级纲图

表1是这次实验中观测到的部分 γ 射线的DCO比值, 通过与已知多级性 γ 射线的比较即可以定出新得到 γ 射线的多级性. 从表中可以看出, γ 射线的DCO比值明显分为两组. DCO比值接近1.5的 γ 射线对应于 $\Delta I = 2$ 的跃迁, 而DCO比值接近0.5的 γ 射

表1 本次实验部分 γ 射线的DCO数据

E_γ^a	I_γ^b	R_{DCO}^c	$\sigma\lambda^d$	J_i^π	J_f^π	E_i^e/keV
^{90}Nb						
813.4	100(10)	0.50(0.09)	M1	9^+	8^+	813.4
996.3	26.8(5.2)	0.88(0.67)	E1	9^-	9^+	1809.7
1067.5	52.1(7.2)	1.48(0.37)	M2	11^-	9^+	1880.9
1249.9	8.9(3.7)	0.78(0.37)	M1	(10^+)	9^+	2062.8
2062.8	56.3(7.5)	1.61(0.30)	E2	(10^+)	8^+	2062.8
607.1	8.1(2.8)	0.72(0.43)	M1	12^-	11^-	2488.0
1876.6	12.1(3.5)	1.97(1.60)	E2	(11^+)	(9^+)	2690
775.6	65.2(8.1)	1.35(0.51)	E2	(12^+)	(10^+)	2818.4
495.8	60.7(7.8)	0.57(0.21)	M1	(13^+)	(12^+)	3316.3
626.3	6.3(2.5)	1.30(0.64)	E2	(13^+)	(11^+)	3316.3
676.6	4.5(2.1)	0.22(0.16)	M1	(13^+)	(12^+)	3495.0
587.1	5.0(2.5)	0.35(0.29)	M1	(13^-)	(12^-)	3075.1
597.5	8.5(2.9)	0.66(0.35)	M1	(14^-)	(13^-)	3672.6
660.4	37.6(8.2)	0.43(0.20)	M1	(15^+)	(13^+)	3976.7
446.4	12.8(4.2)	0.56(0.53)	M1	(15^+)	(13^+)	4423.1
571.4	14.9(3.8)	0.78(0.52)	$(E2)^f$	(15^+)	(13^+)	4066.4
1694.6	7.0(2.6)	2.23(1.40)	E2	(17^+)	(15^+)	5761.0
384.0	5.3(2.3)	0.35(0.25)	M1	(18^+)	(17^+)	6145.0
1904.2	3.3(1.8)	0.49(0.31)	M1	(15^-)	(14^-)	5576.8
1774.4	6.6(2.6)	1.66(0.62)	E2	(17^-)	(15^-)	7351.2
743.2	2.1(1.4)	0.71(0.44)	M1	(18^-)	(17^-)	8094.4
281.3 ^g	1.1(1.0)					8375.7
^{91}Nb (假定2290keV相对强度为100)						
421.1	35.8(7.7)	0.35(0.17)	M1	$(27/2^+)$	$(25/2^+)$	5452.5
1063.4	14.9(7.3)	0.58(0.24)	$M1^f$	$(29/2^+)$	$(27/2^+)$	6515.8
919.0	26.7(5.4)	0.62(0.24)	M1	$(31/2^+)$	$(29/2^+)$	7434.9
1982.5	67.1(8.4)	0.78(0.32)	$(E2)^f$	$(31/2^+)$	$(27/2^+)$	7434.5
661.7	52.0(7.5)	0.43(0.20)	M1	$(33/2^+)$	$(31/2^+)$	8095.6
1717.4	10.0(4.6)	0.55(0.29)	M1	$(23/2^+)$	$(21/2^+)$	5182.0
904.3	5.7(2.3)	0.40(0.15)	M1	$(25/2^+)$	$(23/2^+)$	6086.7
2076.2	15(4.0)	2.53(1.04)	E2	$(21/2^-)$	$(21/2^+)$	5541.4
730.1	10(3.3)	1.29(0.30)	E2	$(25/2^-)$	$(21/2^-)$	6271.5
645.3	9(3)	0.48(0.16)	M1	$(27/2^-)$	$(25/2^-)$	6919.8

^a γ^- 射线的能量误差约为0.5keV; ^b γ^- 射线相对强度; ^c由多级性为2的 γ^- 射线开窗得到的 R_{DCO} 值; ^d由 R_{DCO} 得出的射线多级性; ^e衰变能级的能量; ^f多级性由进一步的系统比较确定; ^g峰很弱无法确定其多级性.

由于DCO数据只能确定 γ 射线的跃迁多级性, 不能指定跃迁是磁跃迁还是电跃迁. 通过对邻近的核的能级纲图进行分析, 并做系统性比较, 推定 ^{90}Nb 和 ^{91}Nb 中部分能级的自旋和宇称. 而在Nilsson单粒子能级图中, 可以看到 $N = 49$ 的三个核的基态价核子都是位于 $g_{9/2}$ 轨道的一个质子和一个中子空穴, 因此这3个核的能级结构非常相似,如图3所示. 而 $N = 50$ 的同中子素具有位于 $g_{9/2}$ 轨道的一个质子, 他们的能级结构也非常相似,如图4. 但是, 这些核的能级结构存在一些差别, 这主要是由于它们的价核子所处的平均场和价核子的激发状态不完全相同.

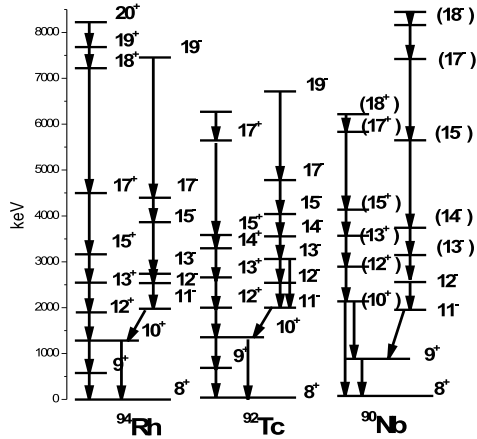


图3 $N = 49$ 的临近 ^{90}Nb 的同中子素的纲图比较

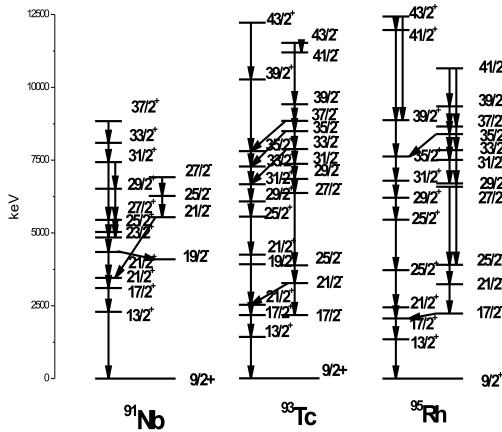


图4 $N = 50$ 的临近 ^{91}Nb 的同中子素的纲图比较

3 经验壳模型计算

由于 ^{90}Nb 和 ^{91}Nb 的中子数分别为49和50, 接近或等于 $N = 50$ 的满壳结构, 所以可以用近球形的壳模型的经验公式来描述. 选择 ^{90}Zr 作为核芯, 通过研究核外价核子的组态, 以及由附近核的低激发态提取的价核子间的相互作用以及价核子和声子间的相互作用, 来研究 ^{90}Nb 和 ^{91}Nb 的能级结构^[12,14].

至于不选 ^{88}Sr 作为我们计算的核芯, 是因为选 ^{90}Zr 计算比较简单, 而计算结果表明其计算结果和实验数据符合很好. 对 ^{90}Nb 的 10^+ 态能级, 其能量可描述为

$$E_{\{\pi g_{9/2} \otimes \nu g_{9/2}\} [8^+ \otimes 2^+] 10^+}^{90\text{Nb}} = E_{[\pi g_{9/2} \otimes 2^+] 11/2^+}^{91\text{Nb}} + E_{[\nu g_{9/2} \otimes 2^+] 13/2^+}^{89\text{Zr}} - E_{2^+}^{90\text{Zr}} + \Delta(\pi g_{9/2} \otimes \nu g_{9/2}) 8^+ + S, \quad (2)$$

其中

$$\Delta(\pi g_{9/2} \otimes \nu g_{9/2}) 8^+ = E_{[\pi g_{9/2} \otimes \nu g_{9/2}] 8^+} - (E_{\pi g_{9/2}}^{91\text{Nb}} + E_{\nu g_{9/2}}^{89\text{Zr}}) - S, \quad (3)$$

$S = B(^{90}\text{Nb}) + B(^{90}\text{Zr}) - B(^{89}\text{Zr}) - B(^{91}\text{Nb})$ 为质量过剩项.

用同样的方法我们可以得到其他的能态的结构. 本次计算的部分结果分别列于表2和表3. 同时, 为了便于比较, 我们将计算值也分别在图1, 图2中绘出.

表2 ^{90}Nb 中部分能级壳模型计算值与观测值的比较

J^π	$E_{\text{exp}}/\text{keV}$	configuration	$E_{\text{calc}}/\text{keV}$
9^-	1808	$\pi g_{9/2} \otimes \nu p_{1/2}^{-1} g_{9/2}^{-1} s_{1/2}$	1905
11^-	1880	$\pi g_{9/2} \otimes \nu p_{1/2}^{-1} g_{9/2}^{-1} d_{3/2}$	2132
12^-	2487	$\pi g_{9/2} \otimes \nu p_{1/2}^{-1} g_{9/2}^{-1} d_{5/2}$	2524
13^-	3074	$\pi p_{1/2}^{-1} g_{9/2}^2 \otimes \nu g_{9/2}^{-1}$	3053
14^-	3671	$\pi f_{5/2}^{-1} g_{9/2}^2 \otimes \nu g_{9/2}^{-1}$	3770
9^+	813	$\pi g_{9/2} \otimes \nu g_{9/2}^{-1}$	834
10^+	2063	$[\pi g_{9/2} \otimes \nu g] 8^+ \otimes 2^+$	2083
11^+	2689	$[\pi g_{9/2} \otimes \nu g_{9/2}^{-1}] 9^+ \otimes 2^+$	2857
12^+	2818	$\pi g_{9/2} \otimes \nu g_{9/2}^{-2} s_{1/2}$	2826
13^+	3315	$\pi g_{9/2} \otimes \nu g_{9/2}^{-2} s_{1/2}$	3334
14^+	未观测	$\pi g_{9/2} \otimes \nu g_{9/2}^{-2} d_{3/2}$	3632
15^+	4067	$\pi g_{9/2} \otimes \nu g_{9/2}^{-2} d_{5/2}$	3923
17^+	5761	$\pi f_{5/2}^{-1} p_{1/2}^{-1} g_{9/2}^3 \otimes \nu g_{9/2}^{-1}$	5129
18^+	6145	$\pi f_{5/2}^{-1} p_{1/2}^{-1} g_{9/2}^3 \otimes \nu g_{9/2}^{-1}$	5900

表3 ^{90}Nb 中部分能级壳模型计算值与观测值的比较

J^π	$E_{\text{exp}}/\text{keV}$	configuration	$E_{\text{calc}}/\text{keV}$
$27/2^+$	6916	$\pi p_{1/2}^{-1} g_{9/2}^2 \otimes \nu f g_{9/2}^{-1} s_{1/2}$	6274
$21/2^+$	3465	$\pi g_{9/2} \otimes \nu g_{9/2}^{-1} d_{3/2}$	3490
$23/2^+$	5182	$\pi g_{9/2} \otimes \nu g_{9/2}^{-1} d_{5/2}$	5267
$25/2^+$	5116	$\pi g_{9/2} \otimes \nu g_{9/2}^{-1} g_{7/2}$	5031
$27/2^+$	5452	$\pi p_{1/2}^{-1} f_{5/2}^{-1} g_{9/2} g_{7/2} d_{5/2}$	5531
$29/2^+$	6515	$\pi f_{5/2}^{-1} p_{3/2}^{-1} g_{9/2} g_{7/2} d_{5/2}$	6382

从表2中可以看出四准粒子态的大部分计算与实验得到的能级数据基本相符, 但是基于六准粒子态计算的 17^+ 和 18^+ 两个能态已经偏离了实验数据很多, 不过还可以描述大致的规律. 这可能是由于组态混杂引起的, 也可能是从相邻核中提取剩余相互作用时所选的组态不正确所致. 通过上述计算, 我们可以进一步确定各能级的自旋及宇称指定的正确性.

4 结论

实验布居了 ^{90}Nb 和 ^{91}Nb 的高自旋态, 得到了新的能级结构, 实验结果和经验壳模型的计算符合得很好. 表明了 ^{90}Nb 和 ^{91}Nb 具有较好的壳层结构, 是一个近球形核. 通过经验壳模型计算与实验能级的比较确定了一些 ^{90}Nb 和 ^{91}Nb 高自旋态的价核子组态.

本工作是在中国原子能科学研究院HI-13串列加速器上完成的, 加速器运行组为实验提供稳定的高品质束流, 许国基研究员提供了实验靶, 在此表示感谢,

同时作者还要感谢兰州近代物理研究所的张玉虎、柳敏良等人在经验壳模型计算方面给予的指导和帮助.

参考文献(References)

- 1 Warburton E K, Olness J W, Lister C J. *J. Phys.*, 1986, **G12**: 1017
- 2 Tulapurkar A A, Das P, Mishra S N. *Phys. Rev.*, 1996, **C54**: 2904
- 3 Schubart R, Jungclaus A, Harder A. *Nucl. Phys.*, 1995, **A591**: 515
- 4 Ghugre S S, Patel S B, Bhowmik R K. *Phys. Rev.*, 1995, **C51**: 1136
- 5 Ji Xiang-Dong, Wildental B H. *Phys. Rev.*, 1988, **C37**: 1256
- 6 B Lomqvist J, Rydström L. *Phys. Scr.*, 1985, **31**: 31
- 7 Muto K, Shimano T, Horie H. *Phys. Lett.*, 1984, **135B**: 349
- 8 Stefanova E A, Danchev M, Schwenger R. *Phys. Rev.*, 2002, **C65**: 034323
- 9 Johnstone I P, Johnstone L D. *Phys. Rev.*, 1997, **C55**: 1227
- 10 Arnell S E, Foltescu D, Roth H A. *Phys. Rev.*, 1994, **C49**: 51
- 11 Fields C A, De Boer F W N, Kraushaar J J. *Nucl. Phys.*, 1981, **A363**: 311
- 12 Piiparinen M, Atac A, Blomqvist J. *Nucl. Phys.*, 1986, **A605**: 191
- 13 LI Guang-Sheng, *Chin. Phys. Lett.*, 1999, **16**(11): 796
- 14 Bayer S, Byrne A P, Dracoulis G D. *Nucl. Phys.*, 2001, **A694**: 3

Study of High Spin States in ^{90}Nb and ^{91}Nb *

CUI Xing-Zhu^{1,2} ZHU Li-Hua^{1:1)} WU Xiao-Guang¹ LI Guang-Sheng¹ WEN Shu-Xian¹
 WANG Zhi-Min¹ HE Chuang-Ye¹ ZHANG Zhen-Long^{1,2} MENG Rui^{1,2} MA Rui-Gang¹
 LUO Peng³ ZHENG Yong³ HUO Jun-De² M. M. Ndontchueng⁴

1 (China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

2 (Department of Physics, Jilin University, Changchun 130023, China)

3 (Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

4 (Université de Douala, Faculté de Sciences, B.P. 8580 Cameroun)

Abstract The high spin states of ^{90}Nb and ^{91}Nb have been populated via reaction $^{76}\text{Ge}(^{19}\text{F}, \text{xn})$ at beam energy of 80MeV. The de-exciting γ -rays have been measured with in-beam γ -ray spectroscopy method. After γ - γ coincidence analysis, the new level scheme of ^{90}Nb and ^{91}Nb was established. Based on the semi-empirical shell model calculations, the configurations of the levels have been suggested, in addition, the spins and parities of the new levels have been assigned according to the experimental DCO values and to the systematic comparison with the neighboring nuclei.

Key words high spin state, in-beam γ -ray spectroscopy, level scheme, nuclear shell model, configuration

* Supported by Major State Basic Research Development Program (TG2000077405) and National Natural Science Foundation of China(10175090,10105015, 10375092)

1) E-mail: zhulh@iris.ciae.ac.cn