

^{134}Ba 核的高激发态能级结构研究*

车兴来^{1,1)} 朱胜江¹ 李明亮¹ 禹英男¹ 陈永静¹ 丁怀博¹
徐强¹ 竺礼华² 吴晓光² 李广生² 刘颖² 贺创业²

1 (清华大学物理系 北京 100084)

2 (中国原子能科学研究院 北京 102413)

摘要 在中国原子能科学研究院 H-13 串列加速器上, 通过重离子核反应 $^{130}\text{Te}(^9\text{Be}, 5\text{n})$ 与在束 γ 谱的实验技术, 对 $A=130$ 缺中子核区的 ^{134}Ba 核的高自旋态进行了研究, 建立了 ^{134}Ba 核的新的能级纲图, 最高自旋态扩展到 $20\hbar$. 除验证了以前报道的大部分能级与跃迁外, 将基带的能级扩展到 10^+ , 同时发现了基于 10^+ 同质异能态以上的众多的能级与跃迁. 对实验结果的系统学分析表明, 10^+ 同质异能态为 yrast 陷阱, 起源于两中子组态, 可能具有 $\gamma \approx -120^\circ$ 的长椭形状, 在其以上的能级表现出很强的单粒子性, 具有复杂的结构. 基带中观测到明显的集体回弯现象, 推转壳模型的计算表明, 此集体回弯是由一对中子的顺排所致, TRS 计算表明, 随着转动频率的增加, 核的形状发生明显的变化, 基带中在中子顺排后核具有 $\gamma \approx -60^\circ$ 的扁椭形状.

关键词 核结构 集体回弯 γ - γ 符合测量 同质异能态

1 引言

^{134}Ba 核位于 $A=135$ 的过渡核区, 其中子数为 78, 接近 $N=82$ 满壳层, 预计其基态的 β 形变较小, 并且具有软的 γ 形变. 而在高自旋态下其结构特性则比较复杂, 因为位于该区内的核质子的费米面处于 $h_{11/2}$ 亚壳层的底部, 中子的费米面位于 $h_{11/2}$ 亚壳层的顶部, 在高自旋态下, 一对 $h_{11/2}$ 价质子的顺排将驱动核向长椭形状变化, 而一对 $h_{11/2}$ 价中子的顺排使核向扁椭形状变化^[1]. 高自旋下由多准粒子组态形成的能态或转动带, 可使原子核形成不同的形状. 另一方面, 近期的研究表明, 该区中中子数 $N < 82$ 的很多偶偶核中都存在建立在 10^+ 态上的长寿命同质异能态以及在同质异能态以上的能级结构, 比如 ^{134}Ce ^[2, 3], ^{136}Ce ^[4], ^{138}Nd ^[5], ^{140}Sm ^[6] 等. 这些 10^+ 同质异能态被认为起源于两中子 $[\nu h_{11/2}]^{-2}$ 组态, 对其研究能给出原子核结构的重要信息^[2]. 在以前关于 ^{134}Ba 较高激发态的报道中, 文献[7]利用 $^{133}\text{Cs}(\alpha, 1\text{p}3\text{n})$ 反应, 发现了 ^{134}Ba 的两个长寿命同质异能态 (10^+ , 5^-), 指定其组态分别为

$[\nu h_{11/2}]^{-2}$, $h_{11/2} \otimes \nu s_{1/2}$ (或 $d_{1/2}$), 并且系统性地比较了其基带能级. 而文献[8]通过 $^{128}\text{Te}(^{10}\text{B}, 1\text{p}3\text{n})$ 反应, 扩展了 ^{134}Ba 的能级结构, 系统地比较了负宇称旁带, 给出其产生机制. 本文报道对于 ^{134}Ba 高自旋态能级结构的进一步研究, 主要是对基带的扩展及基于 10^+ 同质异能态以上的能级结构的识别, 从而进一步丰富了 ^{134}Ba 的在束能级结构的信息.

2 实验、数据处理与结果

实验是在中国原子能科学研究院 H-13 串列加速器上进行的, 用 $^{130}\text{Te}(^9\text{Be}, 5\text{n})$ ^{134}Ba 重离子融合-蒸发反应布居 ^{134}Ba 的高自旋态. 所用同位素 ^{130}Te 靶的厚度为 $2.34\text{mg}/\text{cm}^2$, 蒸发在厚度为 $20\text{mg}/\text{cm}^2$ 的金靶衬上. ^9Be 束流的能量为 45MeV . 由 14 个反康高纯 Ge 探测器组成的联合在束 γ 谱探测装置测量高自旋态退激产生的 γ - γ 符合事件. Ge 探测器相对于 1.333MeV γ 射线的能量分辨率在 1.8 — 2.4keV 之间. 本次实验的目的是同时研究 $^{134, 135}\text{Ba}$ 的高自旋态能级结构, 实验时

2006-10-09 收稿

* 国家自然科学基金(10375032, 10575057)和教育部博士点基金(20030003090)资助

1) E-mail: chexl02@mails.tsinghua.edu.cn

通过 γ 射线的激发函数测量将45MeV确定为布居两核高自旋态的最佳束流能量. 离线处理建立了两维符合矩阵, 得到具有 7.7×10^7 个(去除本底后)符合事件数的两维符合矩阵, 以供 γ - γ 符合分析. 为了确定 γ 跃迁的多极性, 从而确定能级的自旋和宇称, 还分别建立了两维方向关联矩阵, 用以作为取向核态的方向关联强度(DCO)比率的分析. 符合数据利用Radware程序包进行分析^[9].

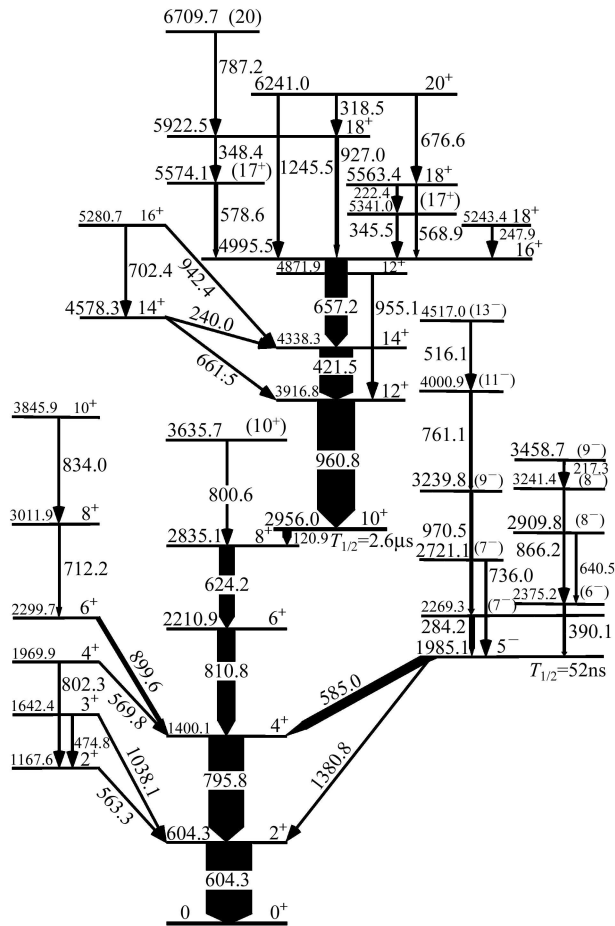


图 1 ^{134}Ba 能级纲图

通过 γ - γ 符合关系、相对跃迁强度、DCO比率的分析, 建立了 ^{134}Ba 新的能级纲图, 如图1所示. 对照文献[8]的结果, 在中自旋态部分, 对于基带的 8^+ 态以上, 新识别了能量为3636keV的 10^+ 态能级, 以800.6keV γ 跃迁与 8^+ 态相连. 扩展了图1中左边的 6^+ 以上的3012keV (8^+)与3846keV (10^+)两个能级, 以712.2, 834.0两条 γ 跃迁相连. 而对于右边的负宇称能级, 在4001keV能级以上, 新发现了一个4517keV的能级, 以516.1keV γ 跃迁与之相连, 而在文献[8]中的2375keV以上的682.5keV γ 跃迁在本实验中没有被发现. 由于能量为2956keV的 10^+ 能级为半衰期 $T=2.6\mu\text{s}$ 的同质异能态^[7], 其上

面的跃迁和下面的跃迁之间没有符合关系, 而在此同质异能态以上的能级与跃迁在以前的实验中没有任何报道. 在此次实验中发现了一系列的强的未知的 γ 跃迁, 利用激发函数与这些 γ 跃迁间的符合关系来确定未知跃迁归属, 确认它们属于 ^{134}Ba 的 γ 跃迁, 而这些跃迁只能来自于长寿命同质异能态以上, 从而建立了在2956keV的 10^+ 同质异能态以上的高自旋态能级结构. 图2为 $^{134,135}\text{Ba}$ 有代表性的特征峰的激发函数. 其中, 604, 796, 811keV为 ^{134}Ba 的 10^+ 同质异能态以下的 γ 跃迁, 而657, 961keV为 10^+ 同质异能态以上的新的 γ 跃迁, 204, 343, 1052keV则为 ^{135}Ba 的 γ 跃迁^[10]. 从图中可以看到, 961, 657keV γ 跃迁的激发函数和 ^{134}Ba 已知 γ 峰的激发函数一致. 在排除了其属于污染反应产物的可能性后, 我们确认其属于 ^{134}Ba . 图3给出了对604.7和961keV γ 射线开门所得符合门谱的例子. 从门

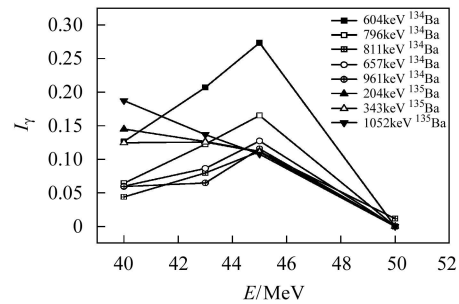


图 2 $^{134,135}\text{Ba}$ 核某些特征峰的激发函数

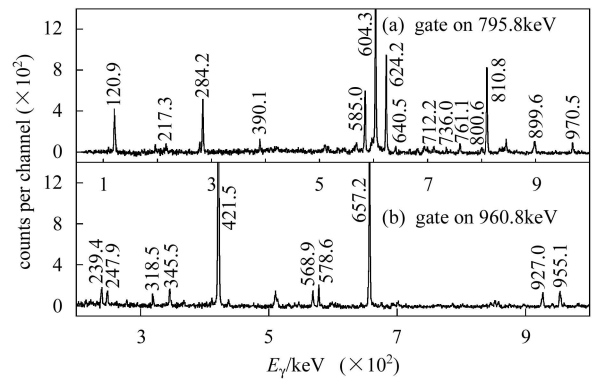


图 3 对 ^{134}Ba 数据分析的符合门谱

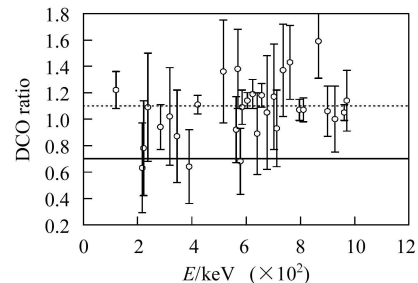


图 4 测得的 ^{134}Ba γ 跃迁的 DCO 比率

谱中我们可以清楚地看到与开门的 γ 峰对应的符合 γ 峰. 自旋与宇称的确定参考文献[7,8]的结果, 以及本实验测得的DCO比率, 如图4所示. 由于一些 γ 峰的统计性较弱, 实验给不出其比率. 一般而言, 如果跃迁的DCO比值在1.1上下, 我们认为其为四极跃迁; 如果DCO比值在0.7上下, 则为偶极跃迁.

3 结果讨论

从图1可以看出, ^{134}Ba 的能级结构比较复杂. 在基带中, 其 $E(4_1^+)/E(2_1^+)$ 比值为2.32, 而该比值在 ^{132}Ba 中为2.43, ^{136}Ba 中为2.28. ^{134}Ba 中的 $E(4_1^+)/E(2_1^+)$ 的比值介于相邻两个核中间, 说明其基态形变值稍小于 ^{132}Ba 而大于 ^{136}Ba . 图5为基带的

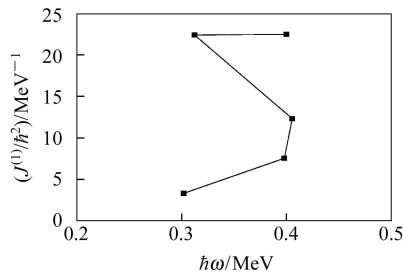


图5 ^{134}Ba 中基带的第一类转动惯量 $J^{(1)}$ 随转动频率 $\hbar\omega$ 的变化图

图7给出了推转壳模型计算得到的 ^{134}Ba 核的中子和质子准单粒子能级图, 计算中使用前面TRS计算得到的基态形变参数. 由图7可以看出一对中子在 $\hbar\omega \approx 0.36\text{MeV}$ 出现顺排, 和实验符合得很好; 而质子顺排直到 $\hbar\omega$ 接近0.6MeV时才出现. 因此, 我们认为一对中子顺排引起了 ^{134}Ba 的集体回弯. 结合TRS的计算, 可以认为一对 $h_{11/2}$ 中子的顺排驱动 ^{134}Ba 核具有 $\gamma \approx -60^\circ$ 的形状. 值得提到的是, 在邻近核 ^{134}Ce 中也观测到相似的现象.

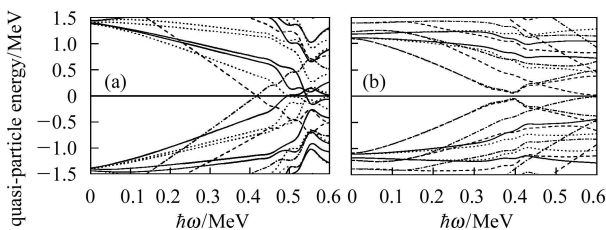


图7 ^{134}Ba 准粒子能级图
(a) 准质子, (b) 准中子, 实线: $(\pi, \alpha)=(+, +1/2)$, 点线: $(\pi, \alpha)=(+, -1/2)$, 点划线: $(\pi, \alpha)=(-, +1/2)$, 虚线: $(\pi, \alpha)=(-, -1/2)$.

第一类转动惯量 $J^{(1)}$ 随转动频率 $\hbar\omega$ 的变化图. 从图中可以看出, ^{134}Ba 在 $\hbar\omega \approx 0.4\text{MeV}$ 开始出现集体回弯, 而回弯的频率约为0.36MeV.

为了进一步了解 ^{134}Ba 的形变特性及引起集体回弯的机制, 我们进行了推转壳模型的计算, 计算包括TRS(总罗斯面)以及准单粒子能级. 计算基于WoodsSaxon势和单极、四极对相互作用, 详细的细节见文献[11—13]. TRS的计算结果如图6所示. 可以看到, ^{134}Ba 基态具有小的 β 形变. 在基态时, 原子核为长椭($\hbar\omega=0$ 时, $\gamma=-7^\circ$)形变, 随着转动频率的增大, 核趋向三轴($\hbar\omega=0.3, 0.4\text{MeV}$ 时, $\gamma \approx -90^\circ$)形变, 当转动频率 $\hbar\omega > 0.4$ 时, 核的形状变为扁椭($\hbar\omega=0.5\text{MeV}$ 时, $\gamma \approx -63^\circ$). 据此可以认为此核的形状在 $\hbar\omega=0.4\text{MeV}$ 之后发生突变.

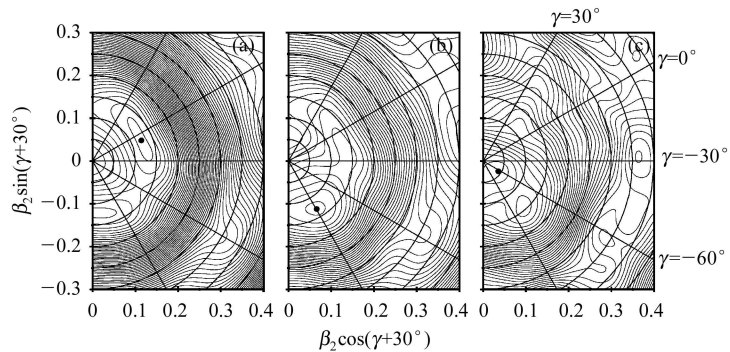


图6 用推转壳模型计算得到的 ^{134}Ba 的TRS图

(a) $\omega=0.0, \beta_2=0.124, \gamma=-7.34^\circ, \beta_4=-0.002$; (b) $\omega=0.3, \beta_2=0.130, \gamma=-89.5^\circ, \beta_4=-0.004$; (c) $\omega=0.5, \beta_2=0.043, \gamma=-63.7^\circ, \beta_4=0.012$.

文献[7,8]指出, 在 ^{134}Ba 的相邻同中子素中都存在长寿命 10^+ 同质异能态, 并且其寿命随质子数增加而减小. 在 $^{136}\text{Ce}^{[4]}, ^{138}\text{Nd}^{[5]}, ^{140}\text{Sm}^{[6]}$ 核中, 10^+ 同质异能态之上的能级具有一定的集体性, 表现为它们相邻同位素之间的集体转动能级的相似性, 可以用弱耦合模型近似描述. 比如 ^{138}Nd 核中 10^+ 同质异能态以上能级和 ^{139}Nd 核中 $11/2^-$ 态之上能级及 ^{140}Nd 中基态能级存在相似的结构 $^{[5]}$. 而 ^{134}Ba 中 10^+ 同质异能态以上的能级结构很不规则, 不具有这种集体性. 这和 ^{134}Ce 核中 10^+ 同质异能态以上的能级结构相类似. 文献[2]指出, ^{134}Ce 核中 10^+ 同质异能态为yrast陷阱, 起源于两中子组态, 为具有 $\gamma \approx -120^\circ$ 的长椭形状. 所以, ^{134}Ba 中的 10^+ 同质异能态也应是yrast陷阱, 应和 ^{134}Ce 的 10^+ 同质异能态具有相似的特性, 即: 起源于两中子组态, 为具有 $\gamma \approx -120^\circ$ 的长椭形状. 正是这种 $\gamma \approx -120^\circ$ 的长椭形状, 使得原子核的运动完全失去了集体性, 从而使得其上的能级表现出完全的粒子运动的特性. 对于这些单粒子能级组态的分析需要更多理论方面的工作.

建立在 1167keV (2^+) 及其以上的能级可能属于 γ 振动带, 其能级结构和同中子素 ^{138}Nd ^[5] 中相应结构很相似. 而建立在 5^- 态以上的负宇称能级结构在文献 [8] 中已经作了详细讨论. 在 2300keV (6^+) 能级以上新发现的能级系列的结构特性尚不清楚, 对它们的认识需要更多实验和理论的工作.

4 结论

通过重离子核反应与在束 γ 谱的实验技术, 对 $A=130$ 缺中子核区的 ^{134}Ba 核的高自旋态进行了研

究, 建立了 ^{134}Ba 的新的能级纲图, 最高自旋态扩展到 $20\hbar$. 对实验结果的分析表明: 10^+ 同质异能态为 yrast 陷阱, 起源于两中子组态, 可能具有 $\gamma \approx -120^\circ$ 的长椭形状; 在此同质异能态以上的能级表现出很强的单粒子性, 具有复杂的结构. 对基带的能级进行了扩展, 观测到集体回弯现象, 推转壳模型的计算表明, 此集体回弯起源于两个中子组态, TRS 计算表明其具有 $\gamma \approx -60^\circ$ 的扁椭形变.

作者感谢中国原子能科学研究院提供实验束流、靶以及在实验期间提供的各种帮助.

参考文献(References)

- Paul E S et al. Phys. Rev. Lett., 1987, **58**: 984
- Müller-Veggian M et al. Nucl. Phys., 1984, **A417**: 1893
- ZHU S J et al. HEP & NP, 2005, **29**(2): 130 (in Chinese)
(朱胜江等. 高能物理与核物理, 2005, **29**(2): 130)
- Lakshmi S et al. Nucl. Phys., 2005, **A761**: 1—21
- Angelis G de et al. Phys. Rev., 1994, **C49**: 2990
- Lunard S et al. Phys. Rev., 1990, **C42**: 174
- Morek T et al. Z. Phys., 1980, **A298**: 267
- LUO Peng et al. HEP & NP, 2004, **28**(3): 268 (in Chinese)
(骆鹏等. 高能物理与核物理, 2004, **28**(3): 268)
- Radford D C. Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., 1995, **A361**: 297
- CHE X L et al. EPJA, 2006, **30**: 347
- Bengtsson R et al. Nucl. Phys., 1972, **A237**: 139
- Frauendorf S et al. Phys. Lett., 1983, **B125**: 219
- XU F R et al. Phys. Rev., 2002, **65**: 021303(R)

Level Structure with High Excitation States in ^{134}Ba ^{*}

CHE Xing-Lai^{1,1)} ZHU Sheng-Jiang¹ LI Ming-Liang¹ YU Ying-Nan¹ CHEN Yong-Jing¹

DING Hui-Bo¹ XU Qiang¹ ZHU Li-Hua² WU Xiao-Guang²

LI Guang-Sheng² LIU Ying² HE Chuang-Ye²

1 (Department of Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

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

Abstract The high spin states in neutron-deficient ^{134}Ba nucleus have been studied by using heavy ion induced reaction $^{130}\text{Te}(^9\text{Be},5n)$ and in-beam γ -ray spectroscopy carried out at China Institute of Atomic Energy. The level scheme has been updated with spin up to $20\hbar$. Most of levels and transitions reported in the previous publications have been confirmed. The levels in the ground state band was expanded to 10^+ state, and many levels and transitions above the 10^+ isomer have been identified. Based on the systematical analyzing, the 10^+ isomer in ^{134}Ba is a yrast trap of prolate deformation with $\gamma \approx -120^\circ$ which is originated from two neutron configuration. Above the 10^+ isomer level, the new levels show strong single-particle motion and complex structural characteristics. The obvious collective back-bending has been observed in the ground state band. The CSM calculations indicate that the back-bending of ^{134}Ba is caused by alignment of a pair of $h_{11/2}$ quasi-neutrons. The nuclear shape has obviously changed with rotational frequency increasing according to the TRS calculations, and the nucleus probably has an oblate deformation with $\gamma \approx -60^\circ$ after the neutron alignment.

Key words nuclear structure, collective back-bending, γ - γ coincidence, isomer

Received 9 October 2006

* Supported by National Natural Science Foundation of China (10375032, 10575057) and Special Program of Higher Education Science Foundation (20030003090)

1) E-mail: chexl02@mails.tsinghua.edu.cn