

^{146}Sm 核高自旋态的实验观测*

张玉虎^{1,2} Y. Gono³ T. Morikawa⁴ E. Ideguchi² S. Mitarai³ A. Odahara³
M. Shibata³ T. Kishida² K. Morida² A. Yoshita² H. Kumagai² T.
Murakami⁵ M. Oshima⁴ H. Iimura⁴ M. Shibata⁴ S. Hamata⁴ H.
Kusakari⁶ M. Sugawara⁷ M. Ogawa⁸ M. Nagajima⁸ M. Ishihara²

1 (中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

2 (Riken, Wako-shi, Saitama 351-01, Japan)

3 (Department of Physics, Kyushu University, Hakozaki, Fukuoka 812, Japan)

4 (Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai, Ibaragi 319-11, Japan)

5 (National Institute of Radiological Sciences, Inage, Chiba 263, Japan)

6 (Faculty of Education, Chiba University, Chiba 263, Japan)

7 (Faculty of Natural Sciences, Chiba Institute of Technology, Narashino, Chiba 275, Japan)

8 (The graduate School of Nagatsuda, Tokyo Institute of Technology, Yokohama, Kanagawa 227, Japan)

1995-12-27 收稿

摘 要

用能量为 95 MeV 的 ^{13}C 束流, 轰击天然厚 Ba 靶, 对 ^{146}Sm 的高自旋态进行了实验研究, 观测到 17 条新的 γ 射线和 11 条新能级, 能级纲图延伸到了激发能为 10.3 MeV 处, 在此高激发能区, 能级结构仍呈现粒子组态的特性, 没有发现长寿命的同质异能态.

关键词 γ 射线, 新能级, 高自旋态.

1 引 言

在质量数 $A=150$ 的轻稀土区, 通常认为以中子数 $N=88$ 为界, 丰中子一边为变形核, 其低位激发态呈现出很好的转动带结构; 在缺中子一边, 随着中子数的减少, 原子核逐渐从形变向球形发生转变. 因此, 这一过渡区原子核的高自旋态能级结构包含了丰富的核结构知识. 这里中子数 $N=82$ 、质子数 $Z=64$ 的 ^{146}Gd 核与 ^{208}Pb 核相似, 具有双闭壳的特性^[1], 为典型的球形核. 从 ^{146}Gd 核中拿去或向 ^{146}Gd 中添加几个核子时, 会极大地改变原子核的结构性质. 在高自旋状态下, 核结构性质非常强烈地依赖于具体的粒子组态, 因此人们提出了不同的模型试图从理论上解释过渡区的核结构特性. 这些模型尽管能解释一些特定核的高自旋态核结构性质, 但推广到更大的核区往往是不成功的, 特

* 部分得到中国科学院归国留学人员择优支持基金和中国博士后科学基金会的资助.

别是在更高自旋、更高激发能区, 很高的能级密度以及构成这些能级的组态混合, 使得理论和实验研究均遇到了很大的困难。

对于稳定的 Sm 同位素, ^{144}Sm (中子数 $N=82$) 的高自旋态表现为典型的球形核结构特征, 而 ^{154}Sm (中子数 $N=92$) 的能级则为常见的形变核转动能级结构。处于两者之间的核素的高自旋态, 包含着原子核从球形核到形变核过渡的核结构信息。相对于双闭壳核 ^{146}Gd , ^{146}Sm 可以视为两个质子空穴和两个价中子与核芯 ^{146}Gd 的耦合。对于其高自旋态的研究, 可得到准粒子之间有效相互作用的知识。另外, 根据 Bohr 和 Mottesson 的理论预言^[2], 在更高自旋区, 原子核的高自旋态将由数个准粒子的角动量顺排构成, 此时, 原子核将呈现出扁椭球形变。实验观测中, 这种高自旋态表现为能级间隔的不规则性, 而且在转晕线上常常出现长寿命的同质异能态。Pederson 等人曾发现处于 $64 < Z < 71$, $83 < N < 88$ 核区存在一个高自旋同质异能态岛^[3]。受这一结论的影响, 人们对高自旋同质异能态的研究大都局限在这一核区内。最近, 在对高自旋同质异能态的系统性研究中, 发现处于双闭壳 ^{146}Gd 核下面的 ^{144}Pm ^[4]、 ^{145}Sm ^[5] 和 ^{146}Eu ^[6] 核素也存在高自旋同质异能态。这些结果说明, 高自旋同质异能态可能在更大的核素区存在。考虑到 ^{146}Sm 比 ^{145}Sm 多一个价中子, 对 ^{146}Sm 高自旋态的研究, 可以探索此核是否存在与 ^{145}Sm 具有类似粒子组态的高自旋同质异能态, 通过符合数据的分析, 可将能级纲图向更高激发能区推进, 为理论研究提供更多的核谱学数据。

2 实验方法

实验是在日本原子力研究所 (JAERI) 串列静电加速器实验室完成的。用能量为 95 MeV 的 ^{13}C 束流轰击天然 Ba 靶 (^{138}Ba 的丰度为 72%), ^{146}Sm 的高自旋态由 $^{138}\text{Ba}(^{13}\text{C}, 5n)^{146}\text{Sm}$ 反应产生。实验中采用了常规的在束 γ 测量技术, 使用 5 台带有 BGO 反康普顿抑制的高纯锗探测器, 测量了反应产物的单谱和符合谱。符合数据按诸事件以三参数 $\gamma_1 - \gamma_2 - t_{\gamma_1, \gamma_2}$ 的方式记录在磁带上, 这里 t_{γ_1, γ_2} 表示两个 γ 射线到达探测器时的相对时间差。用 ^{152}Eu 标准源和已知的 ^{146}Sm 自身的 γ 射线对高纯锗探测器做了能量刻度和效率刻度, 对 ^{60}Co 放射源的 1.33 MeV 谱线高纯锗探测器的能量分辨在 2.0—2.3 keV 之间, 时间分辨约为 10 ns。

鉴于 ^{146}Sm 的高自旋态能级仍呈现为粒子组态的特征, 熔合蒸发剩余核会迅速地通过发射统计 γ 射线布居到 ^{146}Sm 核很高自旋态处的晕线上, 所以, 尽管用了常规的探测设备, 在 γ 单谱中仍然能分辨出高激发能、高自旋态处的分立 γ 射线。

为了寻找长寿命的同质异能态, $\gamma - \gamma$ 符合的时间窗选定为 $1 \mu\text{s}$ 。在离线数据处理过程中, 通过对时间谱加窗, 建立了瞬时符合矩阵和延迟符合矩阵。对这两个矩阵中某些已知 γ 射线做开窗谱, 并分析开窗谱中 γ 射线的相对强度的变化, 可初步确定是否存在高自旋同质异能态。在 95 MeV 的入射能量下, 熔合蒸发余核 ^{146}Sm 与 ^{145}Sm 的产额相当。我们对 ^{145}Sm 核已知的 γ 射线, 考察了它们的瞬时符合谱和延迟符合谱中的 $\gamma - \gamma$ 符合关系以及 γ 射线的相对强度变化, 结果表明, 在本实验条件下, 大部分 ^{145}Sm 的 γ 射线来源于它的高自旋同质异能态 ($E_x = 8.8 \text{ MeV}$, $J^\pi = 49/2^+$, $T_{1/2} = 0.96 \mu\text{s}$) 的退激^[5]。采用同样的方法, 分析 ^{146}Sm 核已知的 γ 射线的开窗谱, 无迹象表明在激发能达

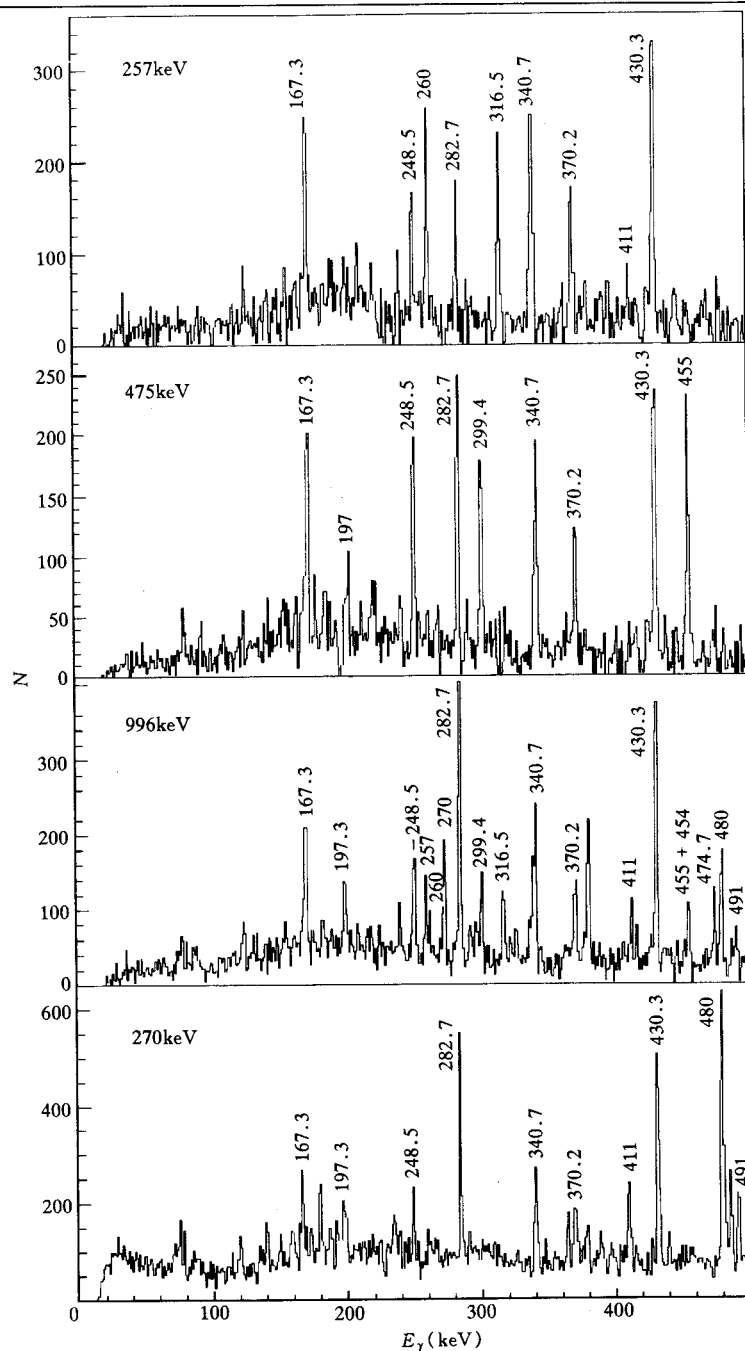


图1 用 ^{146}Sm 核中几个典型的新 γ 射线开窗的瞬时符合谱

10 MeV 区存在长寿命的同质异能态。

但是，对于 ^{146}Sm 核，除了已知的 γ 射线外，在我们的实验数据中，至少有16条新的 γ 射线可被指定为来自于 ^{146}Sm 核高自旋态的退激。图1给出了用能量为257、270、475、996 keV的 γ 射线开窗的瞬时符合谱，图中只给出了符合谱的低能部分，430 keV的谱线相应于 ^{146}Sm 低位 $6^+ \rightarrow 4^+$ 跃迁。

3 实验结果和讨论

通过对瞬态符合谱中 γ - γ 符合关系以及 γ 射线相对强度的分析, 图 2 给出了激发能延伸到 10.26 MeV 处的能级纲图. 激发能低于 6.2 MeV 的能级结构与文献 [7,8] 的结果基本一致, 但在我们的符合数据中, 明显地观测到 5 条新的 γ 跃迁, 相应的 γ 射线能量和初末态能级分别为: 454 keV (5206 keV \rightarrow 4753 keV)、656 keV (5874 keV \rightarrow 5218 keV)、755 keV (5972 keV \rightarrow 5218 keV)、614 keV (6131 keV \rightarrow 5518 keV) 和 257 keV (6131 keV \rightarrow 5874 keV). 激发能大于 6.2 MeV 的纲图, 是由本工作建立的, 包括 12 条新的 γ 射线和 11 条新的能级, 而且, 以 6177 keV 的能级为界, 分为两个没有交叉跃迁的分支. 从能级纲图上可以明显地看到, 激发能达 10 MeV 时, γ 跃迁能量仍然是不规则的, 这表明, 此时的高自旋态仍然是粒子组态构成的. 用纲图中的 γ 射线开窗, 其延迟符合谱中没有发现有多余的 γ 射线; 瞬态符合谱中, 级联 γ 射线之间没有发现由于同质异能态的存在而导致的相对强度的显著变化. 这也说明, 对 ^{146}Sm 核, 当激发能达到 10 MeV 时, 不存在长寿命的高自旋同质异能态. 这一结果与相邻 $N=84$ 同中子素的系统性是一致的.

在本工作之前, 文献 [7,8] 曾研究过 ^{146}Sm 的高自旋态, 发现激发能 $E_x < 4.1$ MeV 的能级, 是由四准粒子组态以及两个价中子与核芯声子态的耦合构成的. 对于在 $4.1 \text{ MeV} < E_x < 6.1 \text{ MeV}$ 区的高自旋态, 理论上还没有给出圆满的解释. 目前 $E_x > 6.1 \text{ MeV}$ 的核谱学数据还未见报道. 由于本工作没有

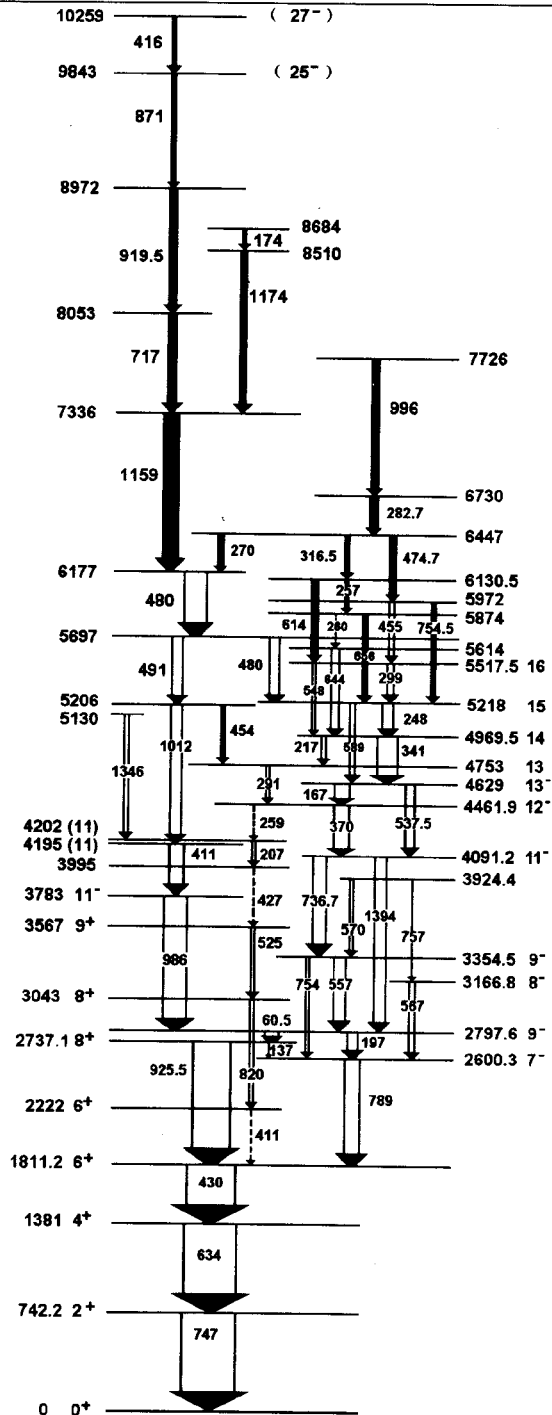


图 2 本工作建立的 ^{146}Sm 核的高自旋态能级纲图
能量单位为 keV, 虚线表示相应 γ 射线的相对强度无法确定. 黑体箭头表示本工作发现的跃迁; 箭头宽度表示相应 γ 射线的相对强度.

指定出新能级的自旋宇称,所以无法对其结构特性做深入的讨论.这里想通过同中子素系统性比较,定性地讨论一下能级 10259、9843keV 可能的组态结构.

对 ^{147}Gd 和 ^{145}Sm 这两个 $N=83$ 的同中子核,全顺排的粒子组态 $\pi(h_{11/2})^2 \otimes \nu(f_{7/2}h_{9/2}i_{13/2})$ 构成了长寿命的高自旋同质异能态,即:对 $^{147}\text{Gd}^{9,101}$, $E_x=8.59\text{ MeV}$, $J^\pi=49/2^+$, $T_{1/2}=0.56\mu\text{s}$;对 $^{145}\text{Sm}^{51}$, $E_x=8.786\text{ MeV}$, $J^\pi=49/2^+$, $T_{1/2}=0.96\mu\text{s}$.构成这种高自旋同质异能态的原因是由于跨越 $N=82$ 大闭壳、占据高 j Nilsson 轨道($f_{7/2}$ 、 $h_{9/2}$ 、 $i_{13/2}$)的中子激发.与其相对应, $N=84$ 同中子核 ^{146}Gd 和 ^{146}Sm 类似的高自旋同质异能态应具有 $\pi(h_{11/2})^2 \otimes \nu[(f_{7/2})^2 h_{9/2} i_{13/2}]$ 粒子组态. ^{146}Gd 核激发能为 10318 keV 的 27^- 态,被指定为具有上述的粒子组态^[10].此高自旋态之所以未构成一个高自旋同质异能态,可能是由于 27^- 态与 25^- 态为属于同一粒子组态结构下的多重态^[11].因此 ^{146}Sm 核中,激发能分别为 10259 keV 和 9843 keV 的两条能级,与 ^{146}Gd 中的 27^- 态和 25^- 态一样,也可能是 $\pi(h_{11/2})^2 \otimes \nu[(f_{7/2})^2 h_{9/2} i_{13/2}]$ 粒子组态下的两个多重态,自旋宇称分别为 27^- 和 25^- .全顺排($J^\pi=27^-$)态与 $(\nu f_{7/2}^2) 6^+$ 态之间的激发能差(对 ^{146}Sm 为 8448 keV,对 ^{146}Gd 为 8510 keV)与 ^{145}Sm 和 ^{147}Gd 中高自旋同质异能态的激发能非常接近, $27^- \rightarrow 25^- \gamma$ 跃迁能量(416 keV)与其 $6^- \rightarrow 4^- \gamma$ 跃迁能量(430 keV)相当,所以 $27^- \rightarrow 25^- \gamma$ 跃迁主要涉及 $(\nu f_{7/2}^2) 6^+ \rightarrow (\nu f_{7/2}^2) 4^+$ 两粒子多重态之间的波函数的变化,跃迁速度很快,这就是在 ^{146}Gd 和 ^{146}Sm 核中没有观测到 27^- 态为一个高自旋同质异能态的原因.必须指出上述讨论是定性的,而且需要通过跃迁几率的测量,从实验上加以证实.

感谢日本原子力研究所串列静电加速器实验室的工作人员为本工作提供了高品质的 ^{13}C 束流以及在实验中给予的很大帮助,张玉虎感谢在日本期间 RIKEN 提供的经济资助.

参 考 文 献

- [1] P. Kleinheinz *et al.*, *Z. Phys.*, **A284** (1978) 351.
- [2] A. Bohr, B. R. Mottelson, *Nuclear Structure* (Benjamin, New York, 1975), Vol.2.
- [3] J. Pederson *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **V39** (1977) 990.
- [4] 张玉虎等, *高能物理与核物理*, **20** (1996) 385.
- [5] A. Odahara *et al.*, *Z. Phys.*, **A350** (1994) 185.
- [6] E. Ideguchi *et al.*, *Bull. Phys. Soc. Jpn.*, (1993) 108.
- [7] C. H. King, *et al.*, *Phys. Rev.*, **C18** (1978) 2127.
- [8] J. Kownacki *et al.*, *Nucl. Phys.*, **A337** (1980) 464.
- [9] O. Bakender *et al.*, *Nucl. Phys.*, **A389** (1982) 93.
- [10] R. Broda *et al.*, *Z. Phys.*, **A305** (1982) 287.
- [11] M. Piiparinen *et al.*, *Phys. Lett.*, **B194** (1987) 468.

Experimental Observation of High Spin States in ^{146}Sm Nucleus

Zhang Yuhu^{1,2} Y. Gono³ T. Morikaawa⁴ E. Ideguchi² S. Mitarai³ A. Odahara³
M. Shibata³ T. Kishida² K. Morida² A. Yoshita² H. Kumagai² T. Murakami⁵
M. Oshima⁴ H. Iimura⁴ M. Shibata⁴ S. Hamata⁴ H. Kusakari⁶ M. Sugawara⁷
M. Ogawa⁸ M. Nagajima⁸ M. Ishihara²

1 (Institute of Modern Physics, The Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000)

2 (Riken, Wako-shi, Saitama 351-01, Japan)

3 (Department of Physics, Kyushu University, Hakozaki, Fukuoka 812, Japan)

4 (Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai, Ibaragi 319-11, Japan)

5 (National Institute of Radiological Sciences, Inage, Chiba 263, Japan)

6 (Faculty of Education, Chiba University, Chiba 263, Japan)

7 (Faculty of Natural Sciences, Chiba Institute of Technology, Narashino, Chiba 275, Japan)

8 (The graduate School of Nagatsuda, Tokyo Institute of Technology, Yokohama, Kanagawa 227, Japan)

Received 27 December 1995

Abstract

High spin states of ^{146}Sm have been experimentally studied by using ^{13}C (95 MeV) beam bombarding natural Ba target. Seventeen new γ -rays and eleven new levels were found and assigned to the level scheme of ^{146}Sm which extends up to 10.2 MeV excitation energy. Level structure still shows the characteristics of particle configurations. No long-lived high spin isomer was found up to such high excitation region.

Key words γ -rays, new energy levels, high spin states.