

经验壳模型和近球形 ^{142}Pm 核高自旋态能级结构*

柳敏良^{1,1)} 张玉虎¹ 周小红¹ 郭应祥¹ 刘忠¹
雷祥国¹ 何建军¹ 郑勇¹ 竺礼华² 温淑贤²

1 (中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)
2 (中国原子能研究院 北京 102413)

摘要 通过反应 $^{128}\text{Te}(^{19}\text{F}, 5\text{n})^{142}\text{Pm}$ 研究了双奇核 ^{142}Pm 的高自旋态能级结构, 建立了 ^{142}Pm 核高自旋态能级纲图. 根据能级结构的系统性, 识别了四个两准粒子态. 根据经验壳模型计算建议了几个新建的关键能级的组态. 67 微妙同质异能态被指定为一个全顺排四空穴态 $(\pi g_{7/2}^{-1} d_{5/2}^{-2} \nu h_{11/2}^{-1})_{13^-}$.

关键词 高自旋态 能级纲图 经验壳模型

选择 ^{142}Pm 作为实验研究的目標核是由于在本实验前此核的低位能级结构还只是用 $^{142}\text{Nd}(d, 2n\gamma)$ 和 $^{142}\text{Nd}(p, n\gamma)$ $^{142}\text{Nd}(p, n\gamma)$ 反应研究过, 发现了一个 2ms 同质异能态, 同质异能态的组态被建议为 $\pi d_{5/2}^{-1} \nu h_{11/2}^{-1}$, 而此同质异能态上的晕态能级则

未被研究^[1]. 因此, 我们采用重离子融合蒸发反应 $^{128}\text{Te}(^{19}\text{F}, 5\text{n})^{142}\text{Pm}$ 布局了 ^{142}Pm 的高自旋态. 详细的实验过程和结果见文献^[2].

本工作建立的能级纲图如图 1 所示. 根据能级结构的系统性, 我们建议 9^- 为 $\pi g_{7/2}^{-1} \nu h_{11/2}^{-1}$; 9^+ , 10^+ , 11^+

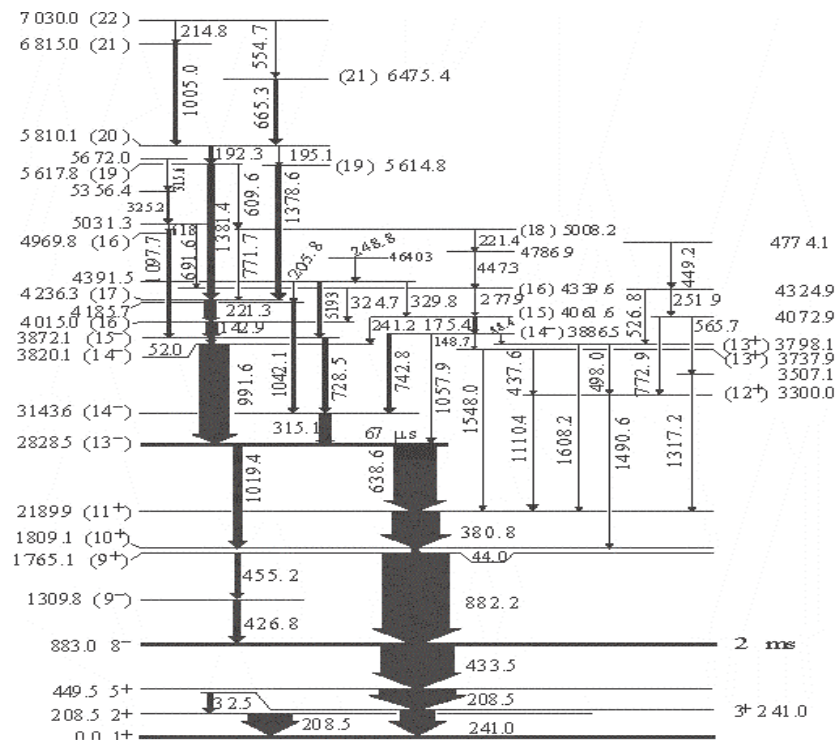


图 1 本工作建立得 ^{142}Pm 能级纲图

* 国家自然科学基金(10375077,10221003), 国家重点基础研究发展规划项目(TG2000077400)和中国科学院资助
1) E-mail: liuml@impcas.ac.cn

为 $\pi h_{11/2} \nu h_{11/2}^{-1}$ 两粒子多重态^[2].在奇奇核¹⁴²Pm中两准粒子态能够提供的最大角动量是 11^+ ,因此2189.9keV(11^+)以上能级应该是四准粒子态和两准粒子耦合集体震动态的竞争.以 $Z=64$, $N=82$ 为核实,基于一下几个理由我们建议¹⁴²Pm中67微秒同质异能态为全顺排四空穴态 $(\pi g_{7/2}^{-1} d_{5/2}^{-2} \nu h_{11/2}^{-1})_{13^-}$.首先,全顺排态 $(\pi g_{7/2}^{-1} d_{5/2}^{-1})_{6^+}$ 在临近的偶偶核¹⁴⁴Sm中是一个880ns同质异能态^[3],添加一个 $h_{11/2}$ 中子空穴后形成的全顺排态 $(\pi g_{7/2}^{-1} d_{5/2}^{-2} \nu h_{11/2}^{-1})_{23/2^-}$ 在¹⁴³Sm

中也是一个寿命长达30ms的同质异能态^[4],再添加一个 $d_{5/2}$ 质子空穴后形成的全顺排态 $(\pi g_{7/2}^{-1} d_{5/2}^{-2} \nu h_{11/2}^{-1})_{13^-}$ 在¹⁴²Pm中成为一个长寿命的同质异能态,由于 $h_{11/2}$ 中子空穴位于费米面下,因此¹⁴⁴Sm同质异能态的激发能相对较低,而¹⁴³Sm和¹⁴²Pm同质异能态的激发能相近^[3-4].其次,我们把 $(\pi g_{7/2}^{-1} d_{5/2}^{-2} \nu h_{11/2}^{-1})_{13^-}$ 分解成 $((\pi g_{7/2}^{-1} d_{5/2}^{-2})_{15/2^+} \otimes \nu h_{11/2}^{-1})_{13^-}$,用经验壳模型计算了 $(\pi g_{7/2}^{-1} d_{5/2}^{-2} \nu h_{11/2}^{-1})_{13^-}$ 态的激发能^[4-8]:

$$E(\text{core}; J) = E(\text{core}; J_{12}) + E(\text{core}; J_3) + S + W^2(J_1 J_2 J J_3; J_{12} J_{23}) \nu(2, 3) + W^2(J_2 J_1 J J_3; J_{12} J_{23}) \nu(1, 3),$$

$$S = B(\text{core}; J) + B(\text{core}) - B(\text{core}; J_{12}) - B(\text{core}; J_3),$$

$$E_{((\pi g_{7/2}^{-1} d_{5/2}^{-2})_{15/2^+} \otimes \nu h_{11/2}^{-1})_{13^-}} = E_{(\pi g_{7/2}^{-1} d_{5/2}^{-2})_{15/2^+}} + E_{\nu h_{11/2}^{-1}} + S + \nu_{(\pi g_{7/2}^{-1} \nu h_{11/2}^{-1})_{9^-}} + 2 \sum_{I=7,8} (\sqrt{9(2I+1)} W(\frac{5}{2} \frac{5}{2} \frac{19}{2} \frac{11}{2}; 4I))^2 \nu_{(\pi d_{5/2}^{-1} \nu h_{11/2}^{-1})_I} = 2723,$$

$$\nu_{(\pi g_{7/2}^{-1} \nu h_{11/2}^{-1})_{9^-}} = E_{(\pi g_{7/2}^{-1} \nu h_{11/2}^{-1})_{9^-}} - E_{\pi d_{7/2}^{-1}} - E_{\nu h_{11/2}^{-1}} + B(^{145}\text{Gd}) + B(^{145}\text{Eu}) - B(^{144}\text{Eu}) - B(^{146}\text{Gd}) = -550.1,$$

$$\nu_{(\pi g_{5/2}^{-1} \nu h_{11/2}^{-1})_{8^-}} = E_{(\pi g_{5/2}^{-1} \nu h_{11/2}^{-1})_{8^-}} - E_{\pi d_{5/2}^{-1}} - E_{\nu h_{11/2}^{-1}} + B(^{145}\text{Gd}) + B(^{145}\text{Eu}) - B(^{144}\text{Eu}) - B(^{146}\text{Gd}) = -430.6,$$

$$S = B(^{142}\text{Pm}) + B(^{146}\text{Gd}) - B(^{143}\text{Pm}) - B(^{145}\text{Gd}) = 1265.9,$$

其中 E , B ^[9], ν , W 分别代表激发能,结合能,两体剩余相互作用和Racah系数;在¹⁴⁴Eu,没有观察到 $(\pi d_{5/2}^{-1} \nu h_{11/2}^{-1})_{7^-}$ 态,一个建议的理论值为1450keV,由此我们获得:

$$\nu_{(\pi d_{5/2}^{-1} \nu h_{11/2}^{-1})_{7^-}} = 1450 - E_{\pi d_{5/2}^{-1}} - E_{\nu h_{11/2}^{-1}} +$$

$$B(^{145}\text{Gd}) + B(^{145}\text{Eu}) - B(^{144}\text{Eu}) -$$

$$B(^{146}\text{Gd}) = -108.6$$

计算的2723keV激发能与实验观察的同质异能态2828.5keV激发能一致.至于¹⁴⁴Eu中没有出现

类似的同质异能态很容易理解,因为¹⁴⁴Eu核根本不可能出现类似四空穴态.最后,同质异能态的成因也是比较容易理解的,退激同质异能态的638.6keV M2/E3, 1019.4keV E3衰变相应于组态从四空穴态 $(\pi g_{7/2}^{-1} d_{5/2}^{-2} \nu h_{11/2}^{-1})_{13^-}$ 到两准粒子态 $(\pi h_{11/2} \nu h_{11/2}^{-1})$ 的改变,也就是 $(\pi g_{7/2}^{-1} d_{5/2}^{-2} \nu h_{11/2}^{-1})_{13^-} \rightarrow \pi g_{7/2}^{-1} d_{5/2}^{-2} h_{11/2} \nu h_{11/2}^{-1}$,实质上是 $\pi d_{5/2}^{-1} \rightarrow \pi g_{7/2}^{-1} h_{11/2}$ 受阻的两粒子跃迁,与2ms同质异能态衰变类似.

类似地,我们计算了 $|((\pi g_{7/2}^{-2})_6 \pi d_{5/2}^{-1})_{17/2} \otimes \nu h_{11/2}^{-1}; 14^- \rangle$ 态的激发能^[4-8]:

$$E_{(((\pi g_{7/2}^{-2})_6 \pi d_{5/2}^{-1})_{17/2} \otimes \nu h_{11/2}^{-1})_{14^-}} = E_{((\pi g_{7/2}^{-2})_6 \pi d_{5/2}^{-1})_{17/2}} + E_{\nu h_{11/2}^{-1}} + S + \nu_{(\pi d_{5/2}^{-1} \nu h_{11/2}^{-1})_{8^-}} + 2 \sum_{I=8,9} (\sqrt{12(2I+1)} W(\frac{7}{2} \frac{7}{2} \frac{23}{2} \frac{11}{2}; 6I))^2 \cdot \nu_{(\pi g_{7/2}^{-1} \nu h_{11/2}^{-1})_I} = 3139.1,$$

$$\nu_{(\pi g_{7/2}^{-1} \nu h_{11/2}^{-1})_{9^-}} = -550.1, \quad \nu_{(\pi d_{5/2}^{-1} \nu h_{11/2}^{-1})_{8^-}} = -430.6,$$

$$S = B(^{142}\text{Pm}) + B(^{146}\text{Gd}) - B(^{143}\text{Pm}) - B(^{145}\text{Gd}) = 1265.9,$$

在¹⁴⁴Eu中,没有观察到 $(\pi g_{7/2}^{-1} \nu h_{11/2}^{-1})_{8^-}$ 态,由于空穴-空穴相互作用表现为吸引,因此可以假设 $(\pi g_{7/2}^{-1} \nu h_{11/2}^{-1})_{8^-}$ 组态中 $g_{7/2}$ 价质子空穴和 $h_{11/2}$ 价

中子空穴两体剩余相互作用的最大值为0.理论计算的3139.1keV激发能与实验观察值3143.6keV相当接近,因此我们建议¹⁴²Pm中3143.6keV能级组态

为 $|((\pi g_{7/2}^{-2})_6 \pi d_{5/2}^{-1})_{17/2} \otimes \nu h_{11/2}^{-1}; 14^- \rangle$.

两准粒子激发 $(\pi g_{7/2}^{-1} \nu h_{11/2}^{-1})_{9-}$ 耦合核实 ^{146}Gd 的集体八极震动 3^- 激发可以形成 12^+ 态, 它的激发能根据经验壳模型可以很简单地计算作^[3-5,8]:

$$\begin{aligned} E_{((\pi g_{7/2}^{-1} \nu h_{11/2}^{-1})_{9-} \otimes 3^-)_{12+}}^{142\text{Pm}} &= E_{(\pi g_{7/2}^{-1} \nu h_{11/2}^{-1})_{9-}}^{142\text{Pm}} + E_{3^-}^{145\text{Sm}} + \\ &\nu_{(\nu h_{11/2}^{-1} \otimes 3^-)_{17/2+}}^{143\text{Sm}} + \nu_{(\pi g_{7/2}^{-1} \otimes 3^-)_{13/2-}}^{143\text{Pm}} + S = 1309.8 + \\ &1810.1 + S(E_{(\nu h_{11/2}^{-1} \otimes 3^-)_{17/2+}}^{143\text{Sm}} - E_{\nu h_{11/2}^{-1}}^{144\text{Sm}} - E_{3^-}^{144\text{Sm}}) + \\ &(E_{(\pi g_{7/2}^{-1} \otimes 3^-)_{13/2-}}^{145\text{Eu}} - E_{\nu h_{11/2}^{-1}}^{145\text{Eu}} - E_{3^-}^{146\text{Gd}}) = 3077.9, \end{aligned}$$

这里的结合能项相互抵消 $S = 0$; 另外, 由于 ^{143}Pm 中没有观察到相应的 $(\pi g_{7/2}^{-1} \otimes 3^-)_{13/2-}$ 态, 我们用

$$\nu_{(\pi g_{7/2}^{-1} \otimes 3^-)_{13/2-}}^{143\text{Eu}} = (E_{(\pi g_{7/2}^{-1} \otimes 3^-)_{13/2-}}^{145\text{Eu}} - E_{\nu h_{11/2}^{-1}}^{145\text{Eu}} - E_{3^-}^{146\text{Gd}})$$

代替

$$\nu_{(\pi g_{7/2}^{-1} \otimes 3^-)_{13/2-}}^{143\text{Pm}} = (E_{(\pi g_{7/2}^{-1} \otimes 3^-)_{13/2-}}^{143\text{Pm}} - E_{\nu h_{11/2}^{-1}}^{143\text{Pm}} - E_{3^-}^{144\text{Sm}})$$

做了相应的计算.

两准粒子态 $(\pi h_{11/2} \nu h_{11/2}^{-1})_{11+}$ 与核实 ^{142}Nd 四极震动 2^+ 态耦合可以形成全顺排 13^+ 态, 它的激发能根

据经验壳模型可以很简单地计算作^[5,10,11]:

$$\begin{aligned} E_{((\pi h_{11/2} \nu h_{11/2}^{-1})_{11+} \otimes 2^+)_{13+}}^{142\text{Pm}} &= E_{(\pi h_{11/2} \nu h_{11/2}^{-1})_{11+}}^{142\text{Pm}} + E_{2^+}^{142\text{Nd}} + \\ &\nu_{(\nu h_{11/2}^{-1} \otimes 2^+)_{15/2-}}^{141\text{Nd}} + \nu_{(\pi h_{11/2} \otimes 2^+)_{15/2-}}^{143\text{Pm}} + S = \\ &2189.9 + 1575 + S + \\ &(\nu_{(\nu h_{11/2}^{-1} \otimes 2^+)_{15/2-}}^{141\text{Nd}} + \nu_{(\pi h_{11/2} \otimes 2^+)_{15/2-}}^{143\text{Pm}}) = 3873.8 \end{aligned}$$

同样, 这里的结合能项相互抵消 $S = 0$.

根据计算结果, 我们建议: 3737.9keV 能级为 $((\pi h_{11/2} \nu h_{11/2}^{-1})_{11+} \otimes 2^+)_{13+}$; 3300.0keV 能级为两准粒子 $(\pi g_{7/2}^{-1} \nu h_{11/2}^{-1})_{9-}$ 态耦合集体八极震动 3^- 激发 $(\pi g_{7/2}^{-1} \nu h_{11/2}^{-1})_{9-} \otimes 3^-$ 形成的全顺排 12^+ 态混合两准粒子态 $(\pi h_{11/2} \nu h_{11/2}^{-1})_{11+}$ 与核实 ^{142}Nd 四极震动 2^+ 态耦合形成的 12^+ 态 ($I_{\text{max}} - 1$).

要理解高位能级结构, 需要进一步的内转换, 极化, g 因子, 半寿命测量以及大规模的壳模型计算.

感谢北京串列加速器全体工作人员在实验中提供的方便和帮组.

参考文献(References)

- 1 Funke L, Fromm W D, Keller H J et al. Nucl. Phys., 1976, **A274**: 61
- 2 LIU M L, ZHANG Y H, ZHOU X H et al. Phys. Rev., 2004, **C70**: 014304
- 3 Kownack J, Ryde H, Sergejew V O et al. Nucl. Phys., 1972, **A196**: 498
- 4 Kownacki J, Ludziejewski J, Sujkowski Z et al. Nucl. Phys., 1974, **A236**: 125
- 5 HE J J, ZHANG Y H, ZHOU X H et al. Eur. Phys. J., 2000, **A9**: 157
- 6 Piiparinen M, Atac A, Blomqvist J et al. Nucl. Phys., 1996, **A605**: 191
- 7 Pakkanen A, Muhonen J, Piiparinen M et al. Nucl. Phys., 1982, **A373**: 237
- 8 Rakel D A, Kaczarowski R, Funk E G et al. Phys. Rev., 1980, **C21**: 59
- 9 Audi G, Wapstra A H. Nucl. Phys., 1995, **A595**: 409
- 10 Prade H, Doring J, Enghardt W et al. Z. Phys., 1987, **A328**: 501
- 11 Ludziejewski J, Arnold H. Z. Phys., 1977, **A281**: 287

Empirical Shell Model and High-Spin Level Structure of Near-spherical Nucleus ^{142}Pm *

LIU Min-Liang^{1;1)} ZHANG Yu-Hu¹ ZHOU Xiao-Hong¹ GUO Ying-Xiang¹ LIU Zhong¹
LEI Xiang-Guo¹ HE Jian-Jun¹ ZHENG Yong¹ ZHU Li-Hua² WEN Shu-Xian²

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

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

Abstract In-beam γ -ray spectroscopy experiment for odd-odd nucleus ^{142}Pm has been performed via the $^{128}\text{Te}(^{19}\text{F}, 5\text{n})^{142}\text{Pm}$ reaction. Detailed analysis of γ - γ coincidence relationships leads to a revised high-spin level scheme for ^{142}Pm above the previously known 2 ms 8^- isomer. The $\pi h_{11/2}\nu h_{11/2}^{-1}$ multiplet and the $(\pi g_{7/2}^{-1}\nu h_{11/2}^{-1})_{9^-}$ state in this nucleus have been identified based on systematic of corresponding states in neighboring odd-odd nuclei. Configurations of several levels have been suggested from an empirical shell model approach. The 67- μs isomer is proposed to be a fully-aligned 4-hole state with predominantly the $((\pi g_{7/2}^{-1}d_{5/2}^{-2})_{15/2^+} \otimes \nu h_{11/2}^{-1})_{13^-}$ configuration.

Key words high-spin, level scheme, empirical shell model

* Supported by NSFC(10375077,10221003), Major State Basic Research Development Program(G2000077400) and Chinese Academy of Sciences

1) E-mail: liuml@impcas.ac.cn