

^{133}Sm 和 ^{149}Yb 的 β 缓发质子衰变*

徐树威^{1;1)} 谢元祥¹ 李占奎¹ 许甫荣² 刘红亮²

1 (中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

2 (北京大学技术物理系 北京 100871)

摘要 利用 $^{40}\text{Ca}+^{96}\text{Ru}$ 融合蒸发反应产生了近质子滴线核 ^{133}Sm ,配合氦喷嘴带传输系统采用“质子- γ ”符合方法观测了它们的 β 缓发质子衰变,其中包括半衰期、质子能谱、第二代子核低位态之间的 γ 跃迁,并估计出衰变到第二代子核不同低位态的分支比.通过统计理论拟合上述实验数据,指认了 ^{133}Sm 的自旋宇称的可能范围.并用Woods-Saxon Strutinsky方法计算了限制组态的 ^{133}Sm 的核势能面,通过对比发现 ^{133}Sm 的自旋宇称可能有两种成分: $5/2^+$ 和 $1/2^-$.这一结果与2001年发表的 $^{133}\text{Sm}(\text{EC}+\beta^+)$ 衰变的简单衰变纲图是相容的.此外用同一方法分析了2001年Eur. Phys. J. A12: 1—4中发表的有关 ^{149}Yb 的 β 缓发质子衰变实验数据,由此指认了 ^{149}Yb 的基态自旋宇称为 $1/2^-$.

关键词 β 缓发质子衰变 核势能面 自旋 宇称

1977年前苏联Dubna实验室Bogdanov等人^[1]曾发表过 ^{133}Sm 的 β 缓发质子(βp)衰变的实验数据,其半衰期为 $(3.2\pm 0.4)\text{s}$.他们仅仅通过统计理论计算拟合缓发质子能谱,建议 ^{133}Sm 的自旋宇称应为 $5/2^+$.1985年美国LBL实验室的Wilmarth等人^[2]利用在线同位素分离器研究和发表过 ^{133}Sm 的 βp 衰变的实验结果, ^{133}Sm 的 βp 衰变的半衰期为 $(2.8\pm 0.2)\text{s}$.他们观测到了 ^{133}Sm βp 衰变后所产生的能量为213keV的 γ 射线,这条 γ 射线对应于第二代子核 ^{132}Nd 的 $2^+ \rightarrow 0^+$ 的跃迁. Wilmarth等人指出:如果认为 ^{133}Sm 的自旋宇称为 $5/2^+$,那么根据统计模型计算布居到 ^{132}Nd 的 4^+ 的分支比为12%,但他们并没有观测到强度相当的 ^{132}Nd 的 $4^+ \rightarrow 2^+$ 的跃迁,即398keV γ 射线.因此Wilmarth等人对Bogdanov等人的建议提出了质疑.1993年Breitenbach等人^[3]报道,观测到了属于 ^{133}Sm ($\text{EC}+\beta^+$)衰变的能量为369.6keV和156.8keV的 γ 射线,它们的半衰期为 $(3.7\pm 0.7)\text{s}$.2001年我们^[4]建议了 ^{133}Sm ($\text{EC}+\beta^+$)衰变的简单衰变纲图.根据Galindo-Uribarri等人^[5]报道的 ^{133}Pm 的能级纲图,我们建议的衰变纲图中的 $214.5\text{keV}+x$, $84.5\text{keV}+x$ 和 $0.0+x$ 的能级应修改为分别对应于 $7/2^+$, $5/2^+$ 和 $3/2^+$.我们注

意到,这些衰变 γ 射线分成了无相互联系的两组.一组包括有一条84.5keV γ 射线,它对应于子核 ^{133}Pm 的 $5/2^+$ 至 $3/2^+$ 的 γ 跃迁,可以认为这条 γ 射线是来自母核 ^{133}Sm 的 $5/2^+$ 的衰变,其半衰期为 $(2.8\pm 0.5)\text{s}$;另一组包括369.6和156.8keV的 γ 射线,其半衰期测定为 $(3.4\pm 0.5)\text{s}$;这两组 γ 射线的半衰期也有些不同.

本工作旨在对 ^{133}Sm 的 βp 衰变实验进行进一步的研究.希望能够找到它的 βp 衰变和($\text{EC}+\beta^+$)衰变之间的关联,以便澄清前期文献中的相关结论.另外我们还对2001年本组^[6]发表的有关 ^{149}Yb 的 βp 衰变实验数据进行了统计模型分析.

本实验是在中国科学院兰州重离子加速器国家实验室进行的.实验装置请见文献[7]的图1.由SFC加速器引出的 $^{40}\text{Ca}^{12+}$ 重离子束先穿过 $1.89\text{mg}/\text{cm}^2$ 厚的Havar窗,进入充满一个大气压氦气的靶室,穿过氦气层和铝降能片,最后轰击富集的金属同位素靶 ^{96}Ru .靶子的富集度好于85%,其厚度约为 $1.4\text{mg}/\text{cm}^2$.束流强度约为 40pnA . ^{133}Sm 是通过融合蒸发 2pn 反应道产生的.反应产物在靶室中慢化并附着在添加剂的大分子团上,经过氦喷嘴驱动喷射到放置于收集室的传送带上.然后快速带传输系统把附着在传送带上的放

2006-01-24 收稿

* 国家自然科学基金(10375078, 10475002)资助

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

射性周期性地送到屏蔽好的低本底区, 进行 $p-\gamma(X)-t$ 符合测量以便观测反应产物的 β 缓发质子衰变^[7-9]. 传送带移动时间为0.16s. 毛细管的长度6m. 所用添加剂是 $PbCl_2$, 其工作温度大约为 $430^\circ C$. 两块全耗尽的 $570mm^2 \times 350\mu m$ 的金硅面垒半导体探测器用来测量质子, 它们被分别放置在传送带的两侧. 每一块金硅面垒探测器背后又放有一台 $HpGe(GMX)$ 型探测器测量 $\gamma(X)$ 射线. 测得的质子和 $\gamma(X)$ 射线的能谱和时间谱分别用符合方式或单谱方式获取.

图1显示的是用2.5—6.0MeV的质子开门的属于反应产物的衰变 $\gamma(X)$ 谱. 除511keV γ 射线和X射线外, 在图1中所有的强 γ 射线所属的 βp 先驱核都被标记出来了. 其中最强的213keV是由于 ^{133}Sm 的 βp 衰变所产生的, 它对应于孙子核 ^{132}Nd 的 $2^+ \rightarrow 0^+$ 跃迁^[10]. 此外属于 ^{133}Sm 的 βp 衰变的还有398, 611和824keV等3条 γ 射线. 它们分别对应于第二代子核 ^{132}Nd 的 $4^+ \rightarrow 2^+$, $2_2^+ \rightarrow 2^+$ 和 $2_2^+ \rightarrow 0^+$ 的跃迁^[10].

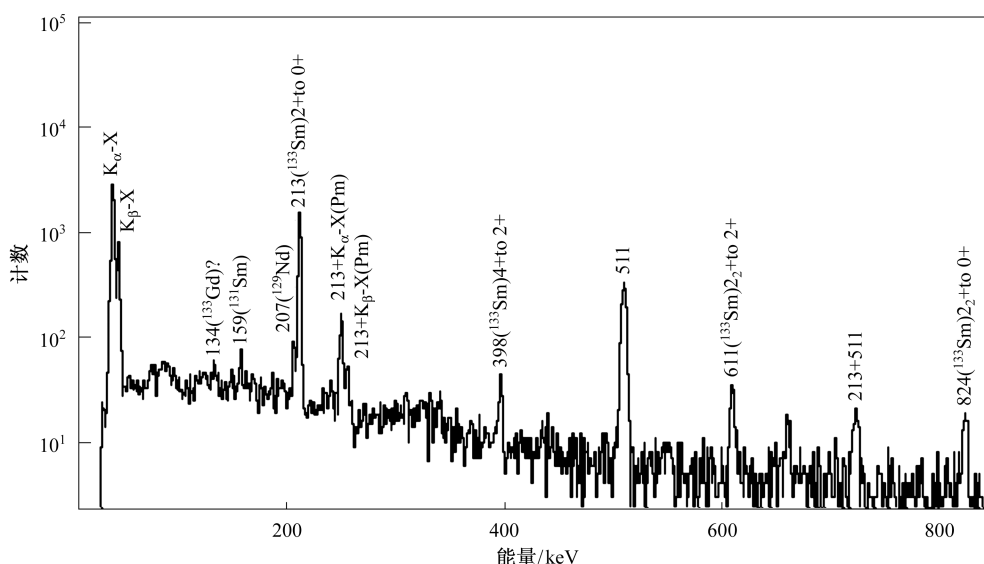


图1 用2.5—6.0MeV的质子开门的反应产物的衰变 $\gamma(X)$ 谱

图2给出了213keV γ 射线开门的缓发质子能谱. 其中右上角是缓发质子开门的213keV γ 射线的时间衰变曲线, 由此得到的衰变半衰期为 $(3.2 \pm 0.7)s$.

始态的自旋宇称或者为 $3/2$, 或者是 $1/2$ 与 $5/2$ 两种成分的混合.

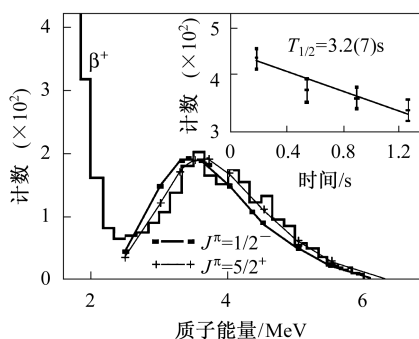


图2 用213keV特征 γ 射线开门的缓发质子能谱以及与缓发质子符合的213keV γ 射线的时间衰变曲线

利用改进的统计模型^[11, 12]计算了 ^{133}Sm 经过 β 缓发质子衰变后, 布居到第二代子核 ^{132}Nd 的不同低位态的相对分支比, 其结果列在表1之中. 我们实验估计的布居到213, 611和824keV的相对分支比分别为: 50 ± 4 , 3.0 ± 0.5 和 5 ± 1 . 与表1对比, 可以期待 ^{133}Sm 初

表1 对于 ^{133}Sm 的 β 缓发质子衰变计算得到的衰变布居到第二代子核 ^{132}Nd 不同低位态的相对分支比

初始态的 自旋和宇称	基态 (0^+)	213keV (2^+)	611keV (4^+)	824keV (2_2^+)
$1/2^-$	56.6	39.6	0.5	3.3
$1/2^+$	51.3	43.5	1.1	4.0
$3/2^-$	37.7	54.0	3.7	4.7
$3/2^+$	38.3	54.1	2.4	5.2
$5/2^-$	22.5	60.9	11.1	5.5
$5/2^+$	15.8	64.2	13.7	6.3

$B_p = 1.53 MeV$.

我们利用Woods-Saxon Strutinsky方法^[13]计算了 ^{133}Sm 的组态限制的核势能面(见图3). 计算表明为了使 ^{133}Sm 的位能极小, 核具有扁椭球形变, 它的最后一个中子处于 $3/2[402]$ 轨道是不可能的. 相反, 在 ^{133}Sm 的势能面中看到在 $\beta_2 = 0.327$ 和 $\gamma = -0.025^\circ$ 处存在一个极小, 它对应的组态是 $\nu 1/2^-$ [541]. 对于组态 $\nu 5/2^+[402]$ 的势能面也看到在 $\beta_2 = 0.291$ 和

$\gamma = 0.000^\circ$ 处存在一个极小. 在能量上 $5/2^+$ 态的极小仅比 $1/2^-$ 态的极小高 120keV. 所以我们认为 ¹³³Sm 的 βp 衰变的初始态有 $1/2^-$ 和 $5/2^+$ 的两种成分. 其中 $1/2^-$ 态约占 3/4, 而 $5/2^+$ 态约占 1/4. 图 2 也显示初始态为 $1/2^-$ 或 $5/2^+$, 由统计模型计算得到的缓发质子能谱都可以与实验能谱相符. 再看 2001 年我们^[4] 建议的 ¹³³Sm($EC+\beta^+$) 衰变简单衰变纲图, 一组包括有 84.5keV γ 射线是来自母核 ¹³³Sm 的 $5/2^+$ 的衰变, 其半衰期为 2.8s; 另一组包括的 369.6 和 156.8keV 的 γ 射线可能解释为来自 $1/2^-$ 的衰变, 其半衰期测定为 3.4s. 观测到的 βp 衰变导致的 213keV γ 射线衰变包含有上述两种成分, 所以半衰期在两者之间, 为 3.2s. 图 4 就是我们重新建议的 ¹³³Sm 的简单衰变纲图.

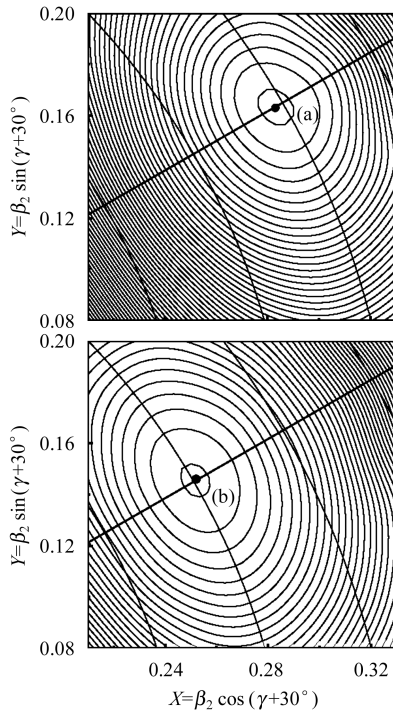


图 3 计算得到的 ¹³³Sm 的核势能面
(a) 和 (b) 分别对应自旋宇称为 $1/2^-$ 和 $5/2^+$.

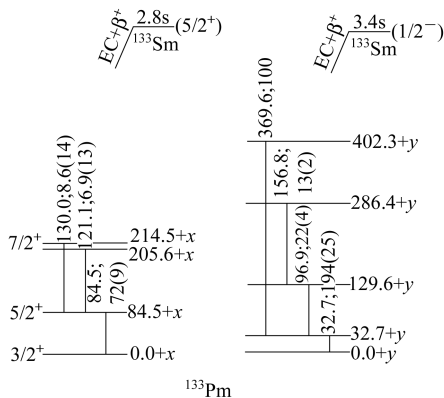


图 4 建议的 ¹³³Sm($EC+\beta^+$) 衰变的简单衰变纲图

2001 年本组^[6] 曾发表了有关 ¹⁴⁹Yb 的 βp 衰变实验数据, 本工作对这些数据进行了统计模型分析, 用统计模型计算了 ¹⁴⁹Yb 经过 β 缓发质子衰变后, 布居到第二代子核 ¹⁴⁸Er 的不同低位态的相对分支比. 其结果列在表 2 之中. 另一方面, 我们实验估计的布居到第二代子核 ¹⁴⁸Er 的 2^+ 态 (647keV) 能级分支比是 4^+ 态 (1524keV) 能级^[14] 分支比的 50 倍以上. 与表 2 对比, ¹⁴⁹Yb 初始态的自旋为 $1/2$ 或 $3/2$ 是比较合理的.

表 2 对于 ¹⁴⁹Yb 的 β 缓发质子衰变计算得到的衰变布居到第二代子核 ¹⁴⁸Er 的不同低位态的相对分支比

初始态的自旋和宇称	基态(0^+)	647keV(2^+)	1524keV(4^+)
$1/2^-$	83.0	16.8	0.2
$1/2^+$	77.7	22.1	0.2
$3/2^-$	70.0	29.3	0.7
$3/2^+$	70.7	28.8	0.5
$5/2^-$	55.3	42.2	2.4
$5/2^+$	49.8	47.2	3.0

$B_p = -0.32\text{MeV}.$

我们利用 Woods-Saxon Strutinsky 方法计算了 ¹⁴⁹Yb 的组态限制的核势能面, 其结果是 ¹⁴³Dy 的基态自旋和宇称为 $1/2^-$, 对应的组态是 $\nu 1/2^- [521]$, 其四极形变 $\beta_2=0.166$, $\gamma=60^\circ$ (如图 5 所示).

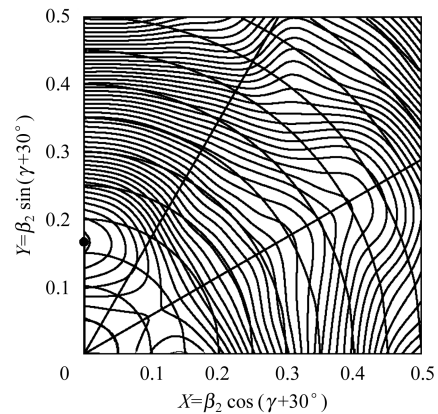


图 5 计算得到的 ¹⁴⁹Yb 的核势能面

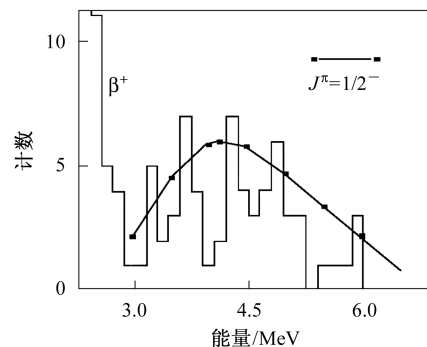


图 6 用 647keV 特征 γ 射线开门的缓发质子能谱与统计模型拟合曲线

此外我们假定 ^{149}Yb 的初始态为 $1/2^-$, 用统计模型计算得到的缓发质子能谱与实验结果也符合得好

(见图6). 所以我们最终建议 ^{149}Yb 的基态自旋宇称为 $1/2^-$.

参考文献(References)

- 1 Bogdanov D D, Demyanov A V, Karnaukhov V A et al. Nucl. Phys., 1977, **A276**: 229—236
- 2 Wilmarth P A, Nitschke J M, Lemmert P K et al. Z. Phys., 1985, **A321**: 179—180
- 3 Breitenbach J, Braga R, Wood J L et al. Inst. of Physics Conf. Series, 1993, **132**: 575—578
- 4 XU Shu-Wei, XIE Yuan-Xiang, WANG Xu-Dong et al. Eur. Phys. J., 2001, **A11**: 277—278; Eur. Phys. J., 2001, **A12**: 375 (Erratum)
- 5 Galindo-Uribarri A, Ward D, Andrews H R et al. Phys. Rev., 1996, **C54**: 1057—1069
- 6 XU Shu-Wei, LI Zhan-Kui, XIE Yuan-Xiang et al. Eur. Phys. J., 2001, **A12**: 1—4
- 7 XU Shu-Wei, LI Zhan-Kui, XIE Yuan-Xiang et al. Phys. Rev., 2005, **C71**: 054318
- 8 XU Shu-Wei, XIE Yuan-Xiang, LI Zhan-Kui et al. Phys. Rev., 1999, **C60**: 061302(R)
- 9 XU Shu-Wei, XIE Yuan-Xiang, LI Zhan-Kui et al. Z. Phys., 1996, **A356**: 227—229
- 10 Khazov Yu, Rodinov A A, Sakharov S et al. Nucl. Data Sheets, 2005, **104**: 497—790
- 11 Hornshoj P, Wilsky K, Hansen P G et al. Nucl. Phys., 1972, **A187**: 609—623
- 12 Hardy J C. Phys. Lett., 1982, **B109**: 242—246
- 13 Nazarewicz W, Dudek J, Bengtsson R et al. Nucl. Phys., 1985, **A435**: 397—447
- 14 Bhat M R. Nucl. Data Sheets, 2000, **89**: 972—974

β -Delayed Proton Decays of ^{133}Sm and ^{149}Yb *

XU Shu-Wei^{1,1)} XIE Yuan-Xiang¹ LI Zhan-Kui¹ XU Fu-Rong² LIU Hong-Liang²

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

2 (Department of Technical Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract ^{133}Sm was produced via fusion evaporation in the reaction $^{40}\text{Ca}+^{96}\text{Ru}$. Its β -delayed proton decay was studied by means of “p- γ ” coincidence in combination with a He-jet tape transport system, including half-lives, proton energy spectra, γ -transitions following the proton emissions, and the branching ratios to the low-lying states in the grand-daughter nuclei. The possible spins and parities of ^{133}Sm were extracted by fitting the experimental data with a statistical model calculation. The configuration-constrained nuclear potential energy surfaces of ^{133}Sm were calculated by using the Woods-Saxon Strutinsky method. Comparing the experimental and calculated results, the spins and parities of ^{133}Sm were assigned to be $5/2^+$ and $1/2^-$, which is reconciled with our published simple (EC+ β^+) decay scheme of ^{133}Sm in 2001. In addition, our experimental data on the beta-delayed proton decay of ^{149}Yb reported in Eur. Phys. J., 2001, A12: 1—4 was also analyzed by using the same method. The spin and parity of ^{149}Yb was assigned to be $1/2^-$.

Key words β -delayed proton decay, nuclear potential energy surface, spin, parity

Received 24 January 2006

* Supported by National Natural Science Foundation of China (10375078, 10475002)

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