

# 质子滴线附近的 $\beta$ 缓发质子衰变\*

徐树威<sup>1,1)</sup> 李占奎<sup>1</sup> 谢元祥<sup>1</sup> 黄文学<sup>1</sup> 舒能川<sup>2</sup> 陈永寿<sup>2</sup> 许甫荣<sup>3</sup> 王鲲<sup>4</sup>

1 (中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

2 (中国原子能科学研究院核物理研究所 北京 102413)

3 (北京大学技术物理系 北京 100871)

4 (上海原子核研究所 上海 201800)

**摘要** 简要回顾了实验小组在过去8年中获得的实验结果,即采用氦喷嘴快速带传输系统+“p- $\gamma$ ”符合方法,在稀土区质子滴线附近首次观测了9种新核素的 $\beta$ 缓发质子衰变,在 $A=90$ 核区的 $N=Z$ 线附近获得了5种核素的 $\beta$ 缓发质子衰变的新数据.并把这14种核素的半衰期,自旋宇称,形变以及生成反应截面的实验值与流行的核模型理论预言进行了系统地对比讨论.从中看出:(1) $^{85}\text{Mo}$ ,  $^{92}\text{Rh}$ 以及“等待点”核 $^{89}\text{Ru}$ 和 $^{93}\text{Pd}$ 半衰期的实验值比近期Möller等人的宏观-微观理论预言值[At. Data Nucl Data Tables, 66, 131(1997)]长5—10倍,因而明显地影响天体rp过程生成的核素丰度;(2)实验指认的质子滴线核 $^{142}\text{Ho}$ 和 $^{128}\text{Pm}$ 的自旋宇称与流行理论预言不符,但用Woods-Saxon-Strutinsky方法可以计算得到相符的位能面;(3)实验估计的9种稀土核的生成截面比通用的Alice和HIVAP程序的计算值要小1—2个数量级.

**关键词** 质子滴线  $\beta$ 缓发质子衰变 氦喷嘴带传输系统+“p- $\gamma$ ”符合方法 自旋宇称形变 反应生成截面

## 1 引言

通俗地说,核素图中的滴线是可存活原子核的边缘线.滴线附近核素的中子数( $N$ )与质子数( $Z$ )之比具有极值.合成滴线附近的核素并观测它们的奇异衰变是属于极端条件下物理学的研究范畴,是当前原子核物理学的一个前沿领域.其中缺中子稀土区近滴线核素曾被理论预言具有大形变<sup>[1]</sup>,是研究奇异衰变、对关联和形变相互关系的理想对象,而特别为人们所关注. S.Hofmann 曾经推测在核素图上稀土区奇 $Z$ 核的质子滴线应沿 $Z=0.743N+11.6$ 的直线分布<sup>[2]</sup>.过去二三十年来就曾有不少实验小组研究过这个区域的10来种奇 $Z$ 核的直接质子发射性<sup>[3]</sup>.在 $A=90$ 区,质子滴线与 $N=Z$ 线相近,也与核天体物理中rp(快质子吸收)过程的反应路径靠近,所以这个区域也是同行们很感兴趣的<sup>[4]</sup>.研究来自原子核激发态的质子发射,即 $\beta$ 缓发质子( $\beta p$ )衰变,是与基态

直接质子放射性密切相关的.它可以提供近质子滴线核的低位态性质和生成截面的基本信息,从而成了我们小组最近8年中的主要工作目标.利用兰州重离子加速器提供的 $^{32}\text{S}$ ,  $^{36}\text{Ar}$ 和 $^{40}\text{Ca}$ 等束流轰击缺中子同位素靶来产生目标核素.针对近滴线核生成截面很低的难点,自行研制了氦喷嘴快速带传输系统,并提出和运用了“质子-伽马”符合方法对核素进行了分离鉴别,使测量效率提高了约50倍,因而观测到了它们的 $\beta$ 缓发质子衰变.结果,在稀土区质子滴线附近共发现了9种新核素,其中 $^{142}\text{Ho}$ 和 $^{128}\text{Pm}$ 是理论预言的质子滴线核(图1(a))<sup>[5-9]</sup>;在 $A=90$ 核区的 $N=Z$ 线附近,获得了5种核素的 $\beta$ 缓发质子衰变的新数据<sup>[10-12]</sup>,其中 $^{89}\text{Ru}$ 和 $^{93}\text{Pd}$ 是理论预言的,核天体rp(快质子吸收)过程的“等待点”核(图1(b)).

通过实验数据的分析与理论拟合,提取了上述14种核素的一些重要基态性质,包括衰变半衰期,自旋宇称,形变和质量剩余等,还估计了它们的生成反应截

\* 国家自然科学基金(10375078, 10175002),中国科学院综合计划局和国家重点基础研究发展规划(G2000077402)资助

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

面. 现在把这些实验结果与当前流行的核模型预言进行对比讨论.

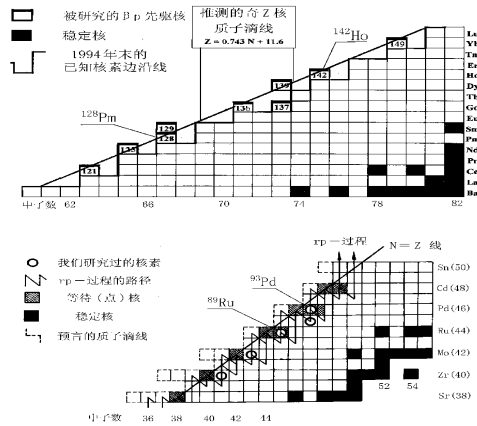


图1 缺中子稀土区的部分核素图(a),  $A=90$  区  $N=Z$  线附近的部分核素图(b)

## 2 半衰期

在稀土区实验确定的半衰期与流行理论的预言符合较好. 但是  $^{85}\text{Mo}$ ,  $^{92}\text{Rh}$  以及“等待点”核  $^{89}\text{Ru}$  和  $^{93}\text{Pd}$  半衰期的实验值比近期 Möller 等人<sup>[13]</sup> 的宏观-微观理论预言值长5—10倍(表1). 当前, Möller 等人的预言值常被用于核天体计算的输入参数, 如果用实验值代替将会引起核天体计算结果明显的改变. 利用网络方程计算了在X射线爆的典型条件下  $^{89}\text{Ru}$  和  $^{93}\text{Pd}$  的丰度随rp过程的进行时间的变化(图2). 网络中包括的核素从氢直到  $A=100$  的核区. 图中的虚线来自 Schatz H 等人<sup>[4]</sup> 的结果, 他所采用输入参数半衰期值主要引自 Möller 等人<sup>[13]</sup> 的预言值, 其中包括对  $^{93}\text{Pd}$ ,  $^{92}\text{Rh}$ ,  $^{89}\text{Ru}$  和  $^{85}\text{Mo}$  等4种核素的预言值. 如果仅将上述4种核素的半衰期代之以我们的实验值, 就可以计算得到图2中的实线. 由图可见, 在整个进行过程中实线均高于虚线, 特别是对这两种“等待点”核的峰值处的丰度而言, 由我们实验半衰期导至的峰值丰度比 Möller 等人的预言值所导至的峰值丰度要大4倍左右.

## 3 自旋宇称和形变

表2对比列出了我们拟合实验数据提取的9种稀土核素的自旋宇称等与几种流行的核模型的预言值. 由表2可见, 除了奇( $Z$ )-奇( $N$ )核  $^{142}\text{Ho}$  和  $^{128}\text{Pm}$  外, 对其他7种偶( $Z$ )-奇( $N$ )核而言, 理论预言值与实验结果基本相符. 理论上确定偶-奇核的基态自旋宇称的根据是最后一个中子所占有的轨道, 而后者是与核形变密切相关的. 由实验指认的基态自旋宇称与理论

预言相符的这个事实就间接说明了除  $^{149}\text{Yb}$  外, 这6种偶-奇核是具有  $\beta_2$  约为0.3的大形变核.

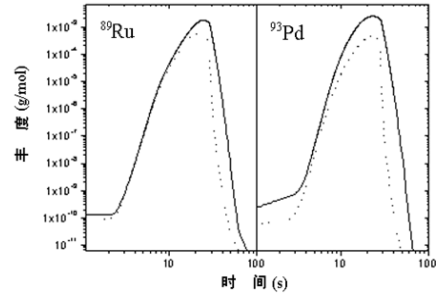


图2 在X射线爆的典型条件下, 即  $T_9=1.5$ ,  $\rho=1.5 \times 10^6 \text{ g/cm}^3$ , 根据网络方程计算得到的  $^{89}\text{Ru}$  和  $^{93}\text{Pd}$  的丰度作为rp过程的进行时间的函数

其中对  $^{93}\text{Pd}$ ,  $^{92}\text{Rh}$ ,  $^{89}\text{Ru}$  和  $^{85}\text{Mo}$  等4种核素的半衰期采用 Möller 等人<sup>[13]</sup> 的预言值所得到的计算结果表示为虚线; 4种核素的半衰期采用我们的实验结果所得到的计算结果表示为实线.

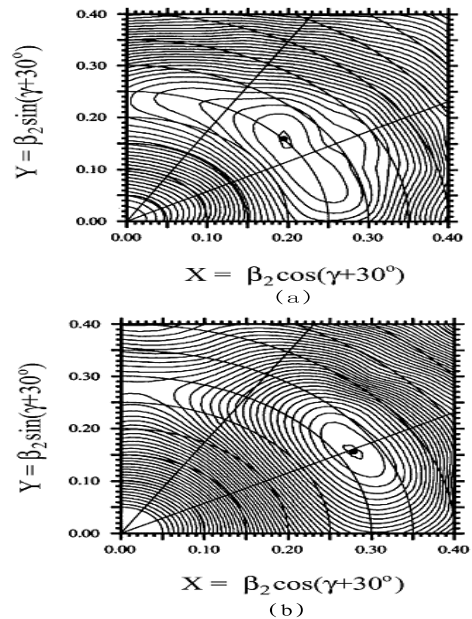


图3 (a)计算得到的  $^{142}\text{Ho}$  的(宇称,旋称) =  $(-,0)$  组态的核位能面

极小处的形变是  $\beta_2=0.251$  和  $\gamma=9.3^\circ$ .

(b)计算得到的  $^{128}\text{Pm}$  的(宇称,旋称) =  $(+,0)$  组态的核位能面

极小处的形变是  $\beta_2=0.319$  和  $\gamma=-0.8^\circ$ .

最近, 我们采用 Woods-Saxon-Strutinsky 方法<sup>[21]</sup> 计算了奇-奇核  $^{142}\text{Ho}$  和  $^{128}\text{Pm}$  的位能面(EPS). 结果发现对  $^{142}\text{Ho}$  而言, 在  $\beta_2=0.251$  和  $\gamma=9.3^\circ$  处有一个极小(图3(a)), 它所对应的组态是  $(\pi 7/2^- [523] \times \nu 7/2^+ [404]) 7^-$ ; 对  $^{128}\text{Pm}$  而言, 在  $\beta_2=0.319$  和  $\gamma=-0.8^\circ$  处也发现有一个极小(图3(b)), 它所对应的组态是  $(\pi 5/2^- [523] \times \nu 7/2^+ [523]) 6^+$ . 上述计算结果就与我们实验指认的这两种核素的自旋宇称范围相符了. 计算结果表明, 这两种核也具有大形变.

表 1  $A = 90$  区  $N = Z$  线附近5种核素的半衰期

核素	我们测量的半衰期/s	理论预言的半衰期/s			
		粗糙理论 <sup>[14,15]</sup>	Herndl & Brow <sup>[16]</sup>	微观理论 <sup>[17]</sup>	Möller等 <sup>[13]</sup>
<sup>81</sup> Zr	$5.3 \pm 0.5$	0.7—5.0			4.3
<sup>85</sup> Mo	$3.2 \pm 0.2$	0.5—3.0			0.37
<sup>89</sup> Ru	$1.2 \pm 0.2$	3.8	4.0	0.43—0.89	0.29
<sup>92</sup> Rh	$3.0 \pm 0.8$	1.1	4.3		0.35
<sup>93</sup> Pd	$1.3 \pm 0.2$	0.2—1.0	1.4	0.25—0.58	0.22

表 2 缺中子稀土区 9 种核素的自旋宇称和形变

目标核素	实验提取值	自旋和宇称 理论预言值				形变( $\epsilon_2$ ) <sup>[1]</sup>
		Arseniev <sup>[18]</sup>	Bongtsson <sup>[19]</sup>	Audi <sup>[20]</sup>	Möller <sup>[13]</sup>	
<sup>121</sup> Ce	$5/2^\pm$	$5/2^\pm$	$5/2^-$	$5/2^+$	$3/2^+$	0.29
<sup>125</sup> Nd	$5/2^\pm$	$5/2^+$	$5/2^+$		$5/2^+$	0.30
<sup>128</sup> Pm	$5^\pm, 6^\pm, 7^\pm$		$3^-$		$3^-$	0.30
<sup>129</sup> Sm	$1/2^+, 3/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$		$1/2^+$	0.30
<sup>135</sup> Gd	$5/2^+$	$5/2^+$	$5/2^+$	$5/2^+$	$5/2^+$	0.28
<sup>137</sup> Gd	$7/2^\pm$	$7/2^+$	$7/2^+, 1/2^+$	$7/2^+$	$9/2^-$	0.27
<sup>139</sup> Dy	$7/2^+$	$7/2^+$	$7/2^+$	$7/2^+$	$9/2^-$	0.26
<sup>142</sup> Ho	$5^\pm, 6^\pm, 7^\pm$	$5^-, 8^+$	$8^+$		$8^+$	0.25
<sup>149</sup> Yb	$1/2^\pm$	$1/2^-$	$1/2^-$	$1/2^+, 3/2^+$	$1/2^-$	-0.16

表 3 生产缺中子稀土区 9 种核素的融合蒸发反应截面

核素	生成反应	入射能 量/MeV	$\beta p$ 道分 截面/nb	$\beta p$ 衰变 分支比(%)	截面/ $\mu\text{b}$		
					实验提取值*	Alice <sup>[22]</sup>	HIVAP <sup>[23]</sup>
<sup>121</sup> Ce	$^{32}\text{S} + ^{92}\text{Mo}$	151	250	12	2.1	146	27
<sup>125</sup> Nd	$^{36}\text{Ar} + ^{92}\text{Mo}$	169	230	14	1.6	45	7.9
<sup>128</sup> Pm	$^{36}\text{Ar} + ^{96}\text{Ru}$	174	50	6	0.8	54	47
<sup>129</sup> Sm	$^{36}\text{Ar} + ^{96}\text{Ru}$	165	70	34	0.2	10	2.4
<sup>135</sup> Gd	$^{32}\text{S} + ^{106}\text{Cd}$	151	100	18	0.6	142	23
<sup>137</sup> Gd	$^{36}\text{Ar} + ^{106}\text{Cd}$	176	450	20	22.5	1770	93
<sup>139</sup> Dy	$^{36}\text{Ar} + ^{106}\text{Cd}$	176	160	11	1.5	90	12
<sup>142</sup> Ho	$^{40}\text{Ca} + ^{106}\text{Cd}$	202	85	7	1.2	109	64
<sup>149</sup> Yb	$^{40}\text{Ca} + ^{112}\text{Sn}$	185	200	6	3.5	40	17

\* 实验值的不确定因子为 3 倍

## 4 反应生成截面

表3列出了实验估计的9种稀土核的生成截面对比于通用的Alice和HIVAP程序的计算值. 表3中第3列是估计得到的 $\beta p$ 衰变道的分截面, 其误差约为2倍.再考虑到理论计算 $\beta p$ 衰变分支比(表3第5列)的不确定性, 最终实验估计得到的生成反应截面的误差因子为3倍. Alice<sup>[22]</sup>和HIVAP<sup>[23]</sup>是两种国际上的通用程序, 用于

计算重离子引起的融合蒸发反应的产物截面. 对与生成靠近稳定线附近的核素, 只要计算参数在合理范围内调整, 计算结果是可以很好地复现实验值的. 在我们的实验中产生的核素是远离稳定线的近滴线核, 结果由表3显示: 平均来说Alice程序的计算值要比实验值大一两个数量级, HIVAP程序的计算值也要比实验值约大1个数量级. 更具体的物理原因还有待进一步研究.

## 参考文献(References)

- Möller P, Nix J R, Myers W D et al. At Data Nucl Data Tables, 1995, **59**: 185—381
- Hofmann S. Radiochimica Acta, 1995, **70/71**: 93—105
- Sonzogni A A. Nucl. Data Sheets, 2002, **95**: 1—29
- Schatz H, Aprahamina A, Görres J et al. Phys. Rep., 1998, **294**: 167—263
- XU S W, XIE Y X, LI Z K et al. Z. Phys., 1996, **A356**: 227—228
- LI Z K, XU S W, XIE Y X et al. Phys. Rev., 1997, **C56**: 1157—1159

- 7 XU S W, LI Z K, XIE Y X et al. Phys. Rev., 1999, **C60**: 061302(R)
- 8 XU S W, LI Z K, XIE Y X et al. Phys. Rev., 2001, **C64**: 017301
- 9 XU S W, LI Z K, XIE Y X et al. Eur. Phys. J., 2001, **A12**: 1—4
- 10 HUANG W X, MA R C, XU S W et al. Phys. Rev., 1999, **C59**: 2402—2405
- 11 LI Z K, XU S W, XIE Y X et al. Eur. Phys. J., 1999, **A5**: 351—352
- 12 XU S W, LI Z K, XIE Y X et al. Eur. Phys. J., 2001, **A11**: 375—377
- 13 Möller P, Nix J R, Kratz K L. At Data Nucl. Data Tables., 1997, **66**: 131—343
- 14 Takahashi K, Yamada M, Kondoh T. At. Data Nucl. Data Tables., 1973, **12**: 101—142
- 15 Horiguchi T, Tachibana T, Katakura J. Chart of the Nuclides 2000. Japanese data committee and nuclear data center, 2000
- 16 Hirsch M, Staudt A, Muto K et al. At Data Nucl. Data Tables., 1993, **53**: 165—178
- 17 Herndl H, Brown A B. Nucl. Phys., 1997, **A627**: 35—52
- 18 Arseniev D A, Sobiczewski A, Solviev V G. Nucl. Phys., 1969, **A126**: 15—35
- 19 Bengtsson T, Ragnarsson I. Nucl. Phys., 1985, **A436**: 14—80; Firestone R B. Table of Isotopes, 8th ed. 1996, Vol.II, Appedix H, H-7 and H-8
- 20 Audi G, Bersillon O, Blachot J et al. Nucl. Phys., 1997, **A624**: 1—124
- 21 Nazarewicz W, Dudek J, Bengtsson R et al. Nucl. Phys., 1985, **A435**: 397—447
- 22 Winn W G, Gutbrod H H, Blann M. Nucl. Phys., 1987, **A188**: 423—429
- 23 Reisdorf W. Z. Phys., 1981, **A300**: 227—238; Veselsky M. Z. Phys., 1997, **A356**: 403—410

## $\beta$ -Delayed Proton Decays Near the Proton Drip Line\*

XU Shu-Wei<sup>1,1)</sup> LI Zhan-Kui<sup>1</sup> XIE Yuan-Xiang<sup>1</sup> HUANG Wei-Xue<sup>1</sup> SHU Neng-Chuan<sup>2</sup>  
CHEN Yong-Shou<sup>2</sup> XU Fu-Rong<sup>3</sup> WANG Kun<sup>4</sup>

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

2 (Department of Nuclear Physics, China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

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

4 (Shanghai Institute for Nuclear Research, Shanghai 201800, China)

**Abstract** The experimental study on  $\beta$ -delayed proton decays near the proton drip line published by our group over the last 8 years were reviewed and summarized briefly, including first observation of 9 precursors in the rare-earth region and new measurements of 5 nuclei in the mass-90 region near  $N = Z$  line with the aid of the “p- $\gamma$ ” coincidence in combination with a He-jet tape transport system. Systematically comparing the experimental data with the current nuclear-model predictions, following points were represented. (1) the experimental half-lives for  $^{85}\text{Mo}$  and  $^{92}\text{Rh}$  as well as the predicted “waiting point” nuclei  $^{89}\text{Ru}$  and  $^{93}\text{Pd}$  are 5—10 times longer than the macroscopic-microscopic model predictions given by Möller et al [At. Data Nucl Data Tables, 66, 131(1997)]. It considerably influences the prediction of mass abundances of the nuclides produced in rp-process. (2) The current-model predictions are not consistent with the experimental spin-parity assignments of the proton drip-line nuclei  $^{142}\text{Ho}$  and  $^{128}\text{Pm}$ . However, the nuclear potential energy surface (PES) calculated by using a Woods-Saxon-Strutinsky method reproduced the experimental results. (3) The Alice code overestimated the production reaction cross sections of the studied 9 rare-earth nuclei by one order of magnitude or two, while HIVAP code overestimated them by one order of magnitude approximately.

**Key words** proton drip line,  $\beta$ -delayed proton decay, He-jet tape transport system + “p- $\gamma$ ” coincidence, spin-parity, production reaction cross section

\* Supported by National Natural Science Foundation of China(10375078,10175002), Major State Basic Research Development Program (G2000077402) and Chinese Academy of Sciences

1) E-mail: xsw@ns.lzb.ac.cn