

# 缺中子稀土区滴线附近新的 $\beta$ 缓发质子衰变\*

徐树威<sup>1)</sup> 李占奎 谢元祥 于涌 潘强岩 王春芳  
邢建萍 马瑞昌 葛元秀 王旭东

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

**摘要** 用重离子束<sup>36</sup>Ar和<sup>32</sup>S轰击缺中子同位素靶<sup>92</sup>Mo, <sup>96</sup>Ru和<sup>106</sup>Cd产生了质子滴线附近的 $\beta$ 缓发质子先驱核<sup>125</sup>Nd, <sup>121</sup>Ce, <sup>128</sup>Pm, <sup>129</sup>Sm, <sup>135</sup>Gd, <sup>137</sup>Gd和<sup>139</sup>Dy. 配合氦喷嘴带传输系统用“p- $\gamma$ ”符合方法对它们进行了首次肯定的鉴别. 它们的半衰期分别为: 0.60(15)s, 1.1(1)s, 1.0(3)s, 0.55(10)s, 1.1(2)s, 2.2(2)s和0.6(2)s. 用统计模型理论计算对实验测定的<sup>125</sup>Nd, <sup>121</sup>Ce, <sup>129</sup>Sm, <sup>135</sup>Gd, <sup>137</sup>Gd和<sup>139</sup>Dy的 $\beta$ 缓发质子衰变的能谱和分支比进行了拟合. 提取出<sup>125</sup>Nd, <sup>121</sup>Ce, <sup>129</sup>Sm, <sup>135</sup>Gd, <sup>137</sup>Gd和<sup>139</sup>Dy的基态自旋-宇称分别为 $5/2^{\pm}$ ,  $5/2^{\pm}$ ,  $1/2^{+}$ (或 $3/2^{+}$ ),  $5/2^{+}$ ,  $7/2^{\pm}$ 和 $7/2^{+}$ . 实验初步指认的基态自旋(宇称值与Nilsson能级图的预言值相符间接表明这6个核素的基态具有大形变, 形变参数 $\beta_2$ 在0.3左右.

**关键词** 质子滴线  $\beta$ 缓发质子衰变  $\beta$ 缓发质子先驱核 基态自旋-宇称

## 1 引言

产生极端条件下的原子核并研究它们的奇异核性质是当今原子核物理学的最前沿领域之一. 尝试合成质子滴线区的新核素, 研究产生它们的方法, 测定它们的基本核性质, 观测它们奇异的 $\beta$ 缓发质子( $\beta p$ )衰变, 并以此来检验现有的核理论模型等等是十分有兴趣的. S. Hofmann<sup>[1]</sup>曾经推测在核素图上稀土区质子滴线应沿 $Z=0.743N+11.6$ 的直线分布. Möller等人<sup>[2]</sup>的理论计算表明在上述滴线区的原子核具有很大的形变. 从实验上来确定它们的形变大小, 是研究大形变对滴线区核性质影响的基础, 显然是很有意义的.

利用重离子引起的融合蒸发反应来产生稀土区质子滴线附近的先驱核, 其缓发质子反应道的分截面一般都小于 $\mu b$ . 为了从实验上研究这个区域的 $\beta p$ 衰变, 提高测量效率是至关重要的. 为了鉴别和测量滴线附近的( $p$ 衰变, 我们曾建议采用“氦喷嘴带传输系统”+“p- $\gamma$ ”符合方法来代替国际上流行的“在线同位素分离器”+“X- $\gamma$ ”符合方法<sup>[3,4]</sup>. 这样做的优点在于可

\* 国家自然科学基金(19975057), 中国科学院九五重大项目子课题和国家重点基础研究发展规划(G2000077402)资助

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

以把测量效率相对提高 50—100 倍. 因而成功地发现了稀土区滴线附近的 7 种新的先驱核  $^{125}\text{Nd}$ ,  $^{121}\text{Ce}$ ,  $^{128}\text{Pm}$ ,  $^{129}\text{Sm}$ ,  $^{135}\text{Gd}$ ,  $^{137}\text{Gd}$  和  $^{139}\text{Dy}$ , 并且测量了它们的  $\beta p$  衰变, 其中  $^{128}\text{Pm}$  是人们期待具有质子放射性的滴线核<sup>[1, 5-7]</sup>. 此外, 我们还利用统计模型对实验结果进行了拟合, 初步指认了  $^{121}\text{Ce}$ ,  $^{125}\text{Nd}$ ,  $^{129}\text{Sm}$ ,  $^{135}\text{Gd}$ ,  $^{137}\text{Gd}$  和  $^{139}\text{Dy}$  等 6 个核素的基态自旋-宇称.

## 2 实验方法

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. 由 SFC 加速器引出能量为 220MeV 的  $^{36}\text{Ar}^{11+}$  或 171MeV 的  $^{32}\text{S}^{9+}$  重离子束, 穿过 1.94mg/cm<sup>2</sup> 厚的 Havar 窗和降能片, 进入充满一个大气压氦气的靶室再轰击不同的富集的同位素靶:  $^{92}\text{Mo}$  (2.0mg/cm<sup>2</sup>, 97%),  $^{96}\text{Ru}$  (2.8mg/cm<sup>2</sup>, 94%) 和  $^{106}\text{Cd}$  (2.5mg/cm<sup>2</sup>, 75%). 束流强度约为 0.5e $\mu$ A. 核反应产生的放射性产物在氦气中慢化, 附着在添加剂上, 经过 6m 长的毛细管喷射在一个真空收集室的传送带上. 所用添加剂是  $\text{PbCl}_2$ , 其工作温度大约为 430 $^{\circ}\text{C}$ . 然后经过快速带传输系统把附着在传送带上的放射性周期性地送到屏蔽好的低本底区. 最后进行  $p-\gamma_1(X)-\gamma_2(X)-t$  符合测量. 两块全耗尽的 570mm<sup>2</sup>  $\times$  0.35mm 的金硅面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. 每一块金硅面探测器背后又放有一台 HpGe(GMX) 型探测器测量  $\gamma(X)$  射线. 所用的数据获取系统装载在一台 486PC 上. 其它实验细节请参考文献[1].

## 3 实验结果

### 3.1 $^{125}\text{Nd}$

图 1 是  $^{36}\text{Ar} + ^{92}\text{Mo}$  反应产物的. 用 2.5—5.5MeV 质子开门所测量到的  $\gamma(X)$  射线谱. 除 X 射线和 511keV $\gamma$  射线外, 我们指认了图 1 中其余强  $\gamma$  射线所属的  $\beta p$  先驱核. 其中 142 和 306keV 的  $\gamma$  峰被指认属于  $\beta p$  先驱核  $^{125}\text{Nd}$  的“女儿”核  $^{124}\text{Ce}$  中  $2^+ \rightarrow 0^+$  和  $4^+ \rightarrow 2^+$  的  $\gamma$  跃迁<sup>[9]</sup>. 在 2.5—6.0MeV 质子和 142keV $\gamma$  射线双重开门谱中, 在能量低于 600keV $\gamma$  的区域内仅发现一个 4 个计数的小峰. 它的能量为 35.8keV, 与  $P, K_{\alpha} X$  射线能量相当. 这意味着 142keV $\gamma$  跃迁是与一种 Nd 同位素的 EC/ $\beta^+$  衰变相关. 用 2.5—5.5MeV 质子开门的 142keV $\gamma$  射线的衰变曲线显示在图 2 的上方, 由此可提取出新核素  $^{125}\text{Nd}$  的半衰期为  $0.60 \pm 0.15\text{s}$ . 在图 1 中, 142keV 和 306keV $\gamma$  射线的强度, 以及对应于  $^{124}\text{Ce}$  中  $6^+ \rightarrow 4^+$  的  $\gamma$  跃迁的 444keV 处的本底水平被用来估计衰变到  $^{124}\text{Ce}$  中不同末态的  $\beta p$  衰变分支比 ( $\text{Br}_{\beta p}$ ) 的相对值. 结果是:  $100(2^+)$ ,  $26 \pm 6(4^+)$  和  $< 3(6^+)$ . 用 142keV $\gamma$  射线开门的质子能谱表示在图 2 中. 它是在  $^{124}\text{Ce}$  中跟随发射 142keV $\gamma$  射线的  $^{125}\text{Nd}$  的  $\beta p$  能谱. 在能谱中能量低于 2MeV 的成份主要来源于正电子在探测器中的堆集. 另一方面, 用修订的统计模型<sup>[9]</sup> 计算了  $\beta p$  能谱及馈送到“女儿”核  $^{124}\text{Ce}$  中不同末态的  $\text{Br}_{\beta p}$ . 在计算中, 采用了粗糙理论预言的无结构的  $\beta$  强度函数和基于后移费米气体模型假定的能级密度公式. 与实验数据拟合最好

的 $^{125}\text{Nd}$ 的自旋-宇称的指定值是 $5/2^+$ . 拟合的 $\text{Br}_{\beta p}$ 值分别为67.0和65.8% ( $2^+$ ), 21.4和16.3% ( $4^+$ )以及0.5和0.2% ( $6^+$ ), 它们也能合理地复现实验测量的 $\beta p$ 能谱(图2).

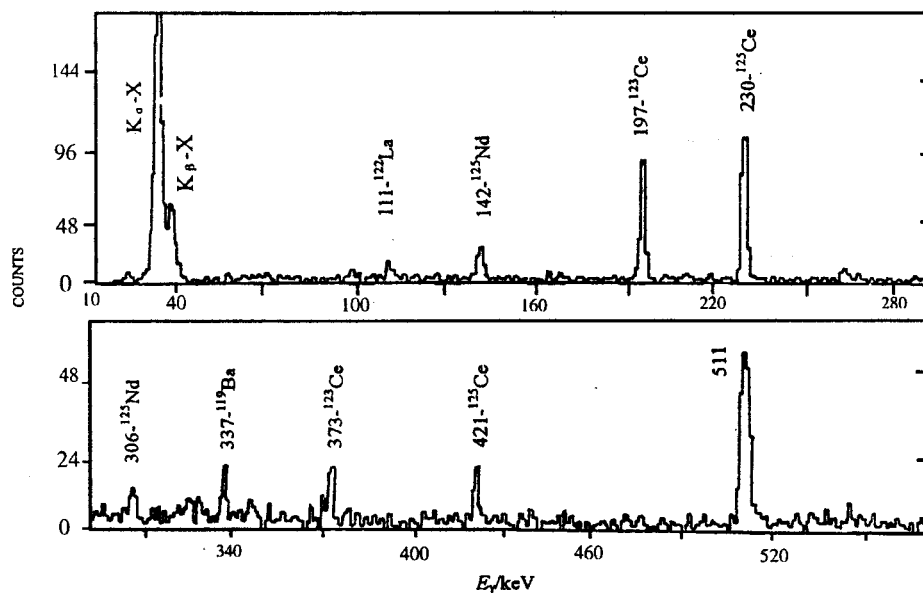


图1 实验观测到的, 与2.5—5.5MeV质子符合的 $^{36}\text{Ar} + ^{92}\text{Mo}$ 反应产物的 $\gamma(X)$ 谱  
图中强峰的标记是 $\gamma$ 射线的能量(以keV为单位)和它们对应的 $\beta p$ 先驱核.

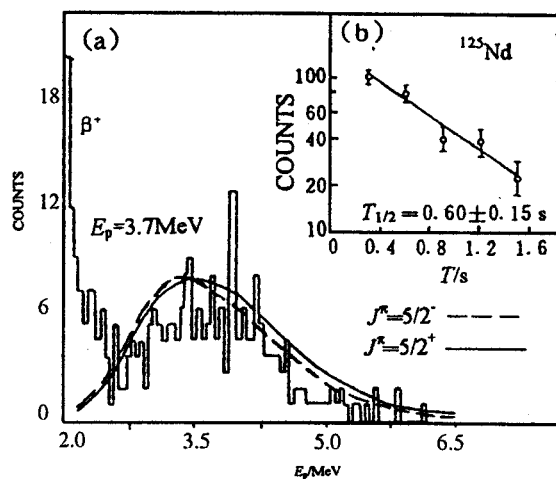


图2 用特征的142keV $\gamma$ 射线开门所观测到的先驱核 $^{125}\text{Nd}$ 的 $\beta$ 缓发能谱实线和虚线是用统计模型计算(见正文)得到的 $\beta p$ 能谱, 上方插图表示用2.5—5.5MeV质子开门测得的特征(射线的时间谱).

### 3.2 $^{128}\text{Pm}$

在 $^{36}\text{Ar} + ^{96}\text{Ru}$ 反应中,由 2.5—5.5MeV 开门的,反应产物的  $\gamma(X)$ 射线谱中观测到了一条 236.5keV $\gamma$ 射线. 它对应于 $^{127}\text{Pr}$ 中两个低位态之间的  $\gamma$ 跃迁<sup>[10]</sup>. 此外,用 2.5—5.5MeV 质子和 236.5keV $\gamma$ 射线双重开门的  $\gamma(X)$ 谱中,在 Nd—K $\alpha$ X 射线的能量处看到了一个小峰. 因此,我们指认 236.5keV $\gamma$ 跃迁属于 $^{128}\text{Pm}$ 经 EC/ $\gamma^+$ 衰变而发射质子后所产生的“女儿”核 $^{127}\text{Pr}$ . 从“p— $\gamma$ ”符合谱中 236.5keV $\gamma$ 射线的衰变曲线提取出 $^{128}\text{Pm}$ 的半衰期为(1.0 $\pm$ 0.3)s.

### 3.3 $^{129}\text{Sm}$

$^{36}\text{Ar} + ^{96}\text{Ru}$ 反应产物的“p— $\gamma$ ”符合谱中发现的 134keV $\gamma$ 射线被指认属于  $\beta(p)$ 先驱核 $^{129}\text{Sm}$ 的“女儿”核 $^{128}\text{Nd}$ 的,能量最低的  $2^+$ 态到基态  $0^+$ 态的  $\gamma$ (跃迁<sup>[11]</sup>). 馈送到 $^{128}\text{Nd}$ 中不同末态的  $\beta p$ 的相对分支比被估计为: 100( $2^+$ )和 <10( $4^+$ ). 从质子符合的 134keV $\gamma$ 射线的衰变曲线提取出 $^{129}\text{Sm}$ 的衰变半衰期为(0.55 $\pm$ 0.10)s. 用统计模型计算拟合实验结果最好的, $^{129}\text{Sm}$ 的自旋—宇称值是  $1/2^+$ 或  $3/2^+$ . 这样得到的  $Br_{\beta p}$ 值分别为: 54.8% ( $2^+$ )和 2.5% ( $4^+$ )或 64.4% ( $2^+$ )和 4.7% ( $4^+$ ),而且同样好地复现了实验测得的  $\beta p$ 能谱.

### 3.4 $^{137}\text{Gd}$

在 $^{36}\text{Ar} + ^{106}\text{Cd}$ 反应产物的,与质子符合的  $\gamma(X)$ 谱中观察到了两条  $\gamma$ 射线 255 和 431keV. 它们被指认属于先驱核 $^{137}\text{Gd}$ 的“女儿”核 $^{136}\text{Sm}$ 的  $2^+ \rightarrow 0^+$ 和  $4^+ \rightarrow 2^+$ 的  $\gamma$ 跃迁<sup>[12]</sup>. 根据与质子符合的 255keV $\gamma$ 射线的衰变曲线提取出 $^{137}\text{Gd}$ 的半衰期为(2.2 $\pm$ 0.2)s. 1983 年 Nitschke 等人<sup>[13]</sup>曾经测量过 $^{137}\text{Gd}$ 的  $\beta p$ 能谱和半衰期,但他们指出所测定的半衰期(7 $\pm$ 3)s 务必要在今后的实验中重新确认. 在实验中所确定的半衰期值与理论预言值(见表 1),和实验值的系统性都相符,但在实验误差范围内与 Nitschke 等人的结果不一致. 我们猜测 Nitschke 等人观察到的 $^{137}\text{Gd}$ 的  $\beta p$ 能谱混有来自另一种质子发射体的长寿命成份. 馈送到 $^{136}\text{Sm}$ 中不同末态的  $\beta p$ 的相对分支比估计为: 100( $2^+$ ), 51 $\pm$ 5( $4^+$ )和 <5( $6^+$ ). 用统计模型计算拟合实验结果最好的, $^{137}\text{Gd}$ 的基态自旋—宇称值是  $7/2^+$ . 它们给出了 $^{136}\text{Sm}$ 中末态的  $Br_{\beta p}$ 为: 58.0 和 63.3% ( $2^+$ ), 26.8 和 28.7% ( $4^+$ )以及 0.8 和 1.2% ( $6^+$ ),并且合理地再现了实验  $\beta p$ 能谱.

表 1  $^{121}\text{Ce}$ ,  $^{125}\text{Nd}$ ,  $^{128}\text{Pm}$ ,  $^{129}\text{Sm}$ ,  $^{135}\text{Gd}$ ,  $^{137}\text{Gd}$ 和 $^{139}\text{Dy}$ 等 7 个核素生成反应道, 经  $\beta p$ 衰变的部分反应道截面( $\sigma_{\beta p}$ )以及它们的半衰期

| 新核素               | 生成反应道                             | 炮弹<br>轰击能<br>量(MeV) | $\sigma_{\beta p}^*/\text{nb}$ | 半衰期<br>实验值<br>(s) | 半衰期的理论预言值(s)             |                      |        |        |                                   |
|-------------------|-----------------------------------|---------------------|--------------------------------|-------------------|--------------------------|----------------------|--------|--------|-----------------------------------|
|                   |                                   |                     |                                |                   | 粗糙理论 <sup>[16, 17]</sup> | 微观理论 <sup>[18]</sup> |        |        |                                   |
|                   |                                   |                     |                                |                   |                          | Hilf                 | Groote | Moller | 宏观—微观理论<br>Moller <sup>[19]</sup> |
| $^{121}\text{Ce}$ | $^{32}\text{S} + ^{92}\text{Mo}$  | 151                 | 250                            | 1.1 $\pm$ 0.1     | 0.4—1.5                  | 1.29                 | 1.51   | 1.04   | 0.91                              |
| $^{125}\text{Nd}$ | $^{36}\text{Ar} + ^{92}\text{Mo}$ | 169                 | 230                            | 0.65 $\pm$ 0.15   | 0.67                     | 0.79                 | 0.78   | 0.58   | 0.42                              |

| 新核素               | 生成<br>反应道                            | 炮弹<br>轰击能<br>量(MeV) | $\sigma_{\beta p}^0/nb$ | 半衰期<br>实验值<br>(s) | 半衰期的理论预言值(s)             |                      |        |        |         |
|-------------------|--------------------------------------|---------------------|-------------------------|-------------------|--------------------------|----------------------|--------|--------|---------|
|                   |                                      |                     |                         |                   | 粗糙理论 <sup>[16, 17]</sup> | 微观理论 <sup>[18]</sup> |        |        | 宏观-微观理论 |
|                   |                                      |                     |                         |                   |                          | Hilf                 | Groote | Moller |         |
| <sup>128</sup> Pm | <sup>36</sup> Ar + <sup>96</sup> Ru  | 174                 | 50                      | 1.0 ± 0.3         | 0.71                     | 1.8                  | 2.5    | 1.5    | 0.40    |
| <sup>129</sup> Sm | <sup>36</sup> Ar + <sup>96</sup> Ru  | 165                 | 70                      | 0.55 ± 0.10       | 0.58                     | 0.33                 | 0.62   |        | 0.20    |
| <sup>135</sup> Gd | <sup>32</sup> S + <sup>106</sup> Cd  | 151                 | 100                     | 1.1 ± 0.2         | 0.3-1.5                  | 1.1                  | 1.7    | 1.1    | 0.69    |
| <sup>137</sup> Gd | <sup>36</sup> Ar + <sup>106</sup> Cd | 176                 | 450                     | 2.2 ± 0.2         | 1-3                      |                      |        |        | 2.0     |
| <sup>139</sup> Dy | <sup>36</sup> Ar + <sup>106</sup> Cd | 176                 | 160                     | 0.6 ± 0.2         | 0.61                     | 0.57                 | 0.65   | 0.47   | 0.50    |

\* 误差因子为 2

### 3.5 <sup>139</sup>Dy

在<sup>36</sup>Ar + <sup>106</sup>Cd 反应产物的,与质子符合的  $\gamma(X)$  谱中观察到了一个清楚的 221keV $\gamma$  峰和一个小的 384keV $\gamma$  峰. 它们被指认属于先驱核<sup>139</sup>Dy 的“女儿”核<sup>138</sup>Gd 的  $2^+ - 0^+$  和  $4^+ - 2^+$  的  $\gamma$  跃迁<sup>[14]</sup>. 馈送到<sup>138</sup>Gd 中不同末态的  $\beta p$  的相对分支比被估计为 100( $2^+$ ) 和  $46 \pm 10$  ( $4^+$ ). 从与质子符合的 211keV $\gamma$  射线的衰变曲线提取出<sup>139</sup>Dy 的半衰期为:  $0.6 \pm 0.2s$ . 用统计模型计算拟合实验结果最好的,<sup>139</sup>Dy 的基态自旋-宇称为  $7/2^+$ . 它给出<sup>138</sup>Gd 中基态的  $Br_{\beta p}$  为 56.3% ( $2^+$ ) 和 30.9% ( $4^+$ ), 并且合理地复现了  $\beta p$  的实验能谱.

### 3.6 <sup>135</sup>Gd 和 <sup>121</sup>Ce

根据以前发表的<sup>32</sup>S + <sup>106</sup>Cd<sup>[3]</sup> 和 <sup>32</sup>S + <sup>92</sup>Mo<sup>[15]</sup> 反应的实验结果, 得到了<sup>135</sup>Gd 和<sup>121</sup>Ce 的半衰期分别为  $(1.1 \pm 0.2)s$  和  $(1.1 \pm 0.1)s$ . 我们还可以提取出在<sup>135</sup>Gd 衰变到达“女儿”核<sup>134</sup>Sm 的  $2^+$  和  $4^+$  态的  $\beta p$  的相对分支比为 100 和  $< 28$ ; 在<sup>121</sup>Ce 衰变中到达“女儿”核<sup>120</sup>Ba 的  $2^+$  和  $4^+$  态的  $\beta p$  的相对分支比为 100 和 19(9). 指认<sup>135</sup>Gd 的基态自旋-宇称为  $5/2^+$ , 用统计模型计算给出到达“女儿”核<sup>134</sup>Sm 的  $Br_{\beta p}$  为: 66.1% ( $2^+$ ) 和 19.1% ( $4^+$ ), 并能大体上再现其  $\beta p$  能谱. 指认<sup>121</sup>Ce 的基态自旋-宇称为  $5/2^+$ , 统计模型计算给出到达“女儿”核<sup>120</sup>Ba 的  $Br_{\beta p}$  为: 68.8% 和 65.4% ( $2^+$ ) 以及 18.5 和 13.2% ( $4^+$ ), 也可以合理地复现其  $\beta p$  能谱.

## 4 讨论

上述 7 个核素, 生成它们的反应道, 其  $\beta p$  的部分反应道分截面  $\sigma_{\beta p}$  以及其半衰期的实验值和理论预言值都列在表 1 之中. 估算表 1 第 4 行中的  $\sigma_{\beta p}$  时, 对于<sup>128</sup>Pm 衰变, 假定随后发射 236.5keV $\gamma$  射线的  $Br_{\beta p}$  之和为 50%; 对于其余 6 个核的衰变其  $Br_{\beta p}$  值均采用统计模型的计算值. 对于表 1 中所列的 7 个反应道,  $\sigma_{\beta p}$  值均小于 500nb, 如果  $\beta p$  分支比为 1%, 则上述 7 个核素的生成截面均小于 50nb, 这比用 ALICE 程序<sup>[20]</sup> 估计的熔合蒸发反应截面要小

3—10 倍. 另外, 从总体上来说, Moller 等人<sup>[19]</sup>预言的半衰期值比实验结果都要短.

表 2  $^{121}\text{Ce}$ ,  $^{125}\text{Nd}$ ,  $^{128}\text{Pm}$ ,  $^{129}\text{Sm}$ ,  $^{135}\text{Gd}$ ,  $^{137}\text{Gd}$  和  $^{139}\text{Dy}$  的, 实验观测到的  $\beta\text{p}$  能谱的能量范围( $E_p$ )和矩心( $\bar{E}_p$ ), 以及它们的基态四极形变( $\epsilon_2$ )和自旋-宇称

| 新核素               | $E_p/\text{MeV}$ | $\bar{E}_p/\text{MeV}$ | $\epsilon_2^{[4]}$ | 基态自旋-宇称        |                          |                          |                      |                        |
|-------------------|------------------|------------------------|--------------------|----------------|--------------------------|--------------------------|----------------------|------------------------|
|                   |                  |                        |                    | 实验值            | 理论预言值                    |                          |                      |                        |
|                   |                  |                        |                    |                | Arsenicv <sup>[21]</sup> | Bengtson <sup>[22]</sup> | Audi <sup>[23]</sup> | Moller <sup>[19]</sup> |
| $^{121}\text{Ce}$ | 2.2-5.8          | 3.7                    | 0.292              | $5/2^+$        | $5/2^+$                  | $5/2^+$                  | $5/2^+$              | $3/2^+$                |
| $^{125}\text{Nd}$ | 2.2-6.2          | 3.7                    | 0.300              | $5/2^+$        | $5/2^+$                  | $5/2^+$                  |                      | $5/2^+$                |
| $^{128}\text{Pm}$ | 2.4-5.5          | 3.8                    | 0.300              |                |                          |                          |                      |                        |
| $^{129}\text{Sm}$ | 2.2-5.5          | 3.7                    | 0.300              | $1/2^+, 3/2^+$ | $1/2^+$                  | $1/2^+$                  |                      | $1/2^+$                |
| $^{135}\text{Gd}$ | 2.8-5.4          | 4.1                    | 0.283              | $5/2^+$        | $5/2^+$                  | $5/2^+$                  | $5/2^+$              | $5/2^+$                |
| $^{137}\text{Gd}$ | 2.3-6.5          | 3.9                    | 0.267              | $7/2^+$        | $7/2^+$                  | $7/2^+, 1/2^+$           | $7/2^+$              | $9/2^-$                |
| $^{139}\text{Dy}$ | 2.3-6.0          | 3.8                    | 0.258              | $7/2^+$        | $7/2^+$                  | $7/2^+$                  | $7/2^+$              | $9/2^+$                |

有关 7 个先驱核的  $\beta\text{p}$  能谱的性质及其基态自旋-宇称的实验指定值和理论预言都列在表 2 之中. 表 2 第 4 行中的四极形变参数  $\epsilon_2$  是 Moller 等人<sup>[4]</sup>基于宏观(微观质量模型)的预言值. 根据  $\epsilon_2$  值查找 Arseniev 等人<sup>[21]</sup>和 Bengtsson 等人<sup>[22]</sup>的 Nilsson 能级图得到了表 2 第 6, 第 7 行中的自旋-宇称值. 实验指定的 $^{135}\text{Gd}$ 的自旋-宇称值与所有的理论值, 与 Audi 等人根据实验值的系统性推断的期待值都完全一致. 实验指定的 $^{125}\text{Nd}$ 和 $^{129}\text{Sm}$ 的自旋-宇称值与所有的理论预言值一致. 关于 $^{121}\text{Ce}$ ,  $^{137}\text{Gd}$ 和 $^{139}\text{Dy}$ 的实验指定值仅仅与 Moller 等人<sup>[19]</sup>的理论预言值不一致. 如果按照 Moller 等人预言的 $^{121}\text{Ce}$ ,  $^{137}\text{Gd}$ 和 $^{139}\text{Dy}$ 的基态自旋-宇称值, 进行统计模型计算得到的  $\beta\text{p}$  的相对分支比与实验结果明显不符. 从理论上, 根据 Nilsson 能级图中最后一个中子的轨道来决定偶( $Z$ )-奇( $N$ )核的基态自旋(宇称强烈地依赖核的形变. 因此实验上初步指定的自旋-宇称值与参考文献<sup>[21, 22]</sup>中所预言的值相符, 间接说明表 2 的第 4 行中的 Nilsson 参数化四极形变  $\epsilon_2$  是合理的. 这也就是说, 上述 6 个偶( $Z$ )-奇( $N$ )核的基态是大形变的, 在球谐展开式中其形变参数  $\epsilon_2$  在 0.3 左右. 如果  $\epsilon_2 = 0.3$ , 相对球形核而言发射质子的库仑位垒就要降低, 用统计模型计算出的质子能谱的矩心( $\bar{E}_p$ )将向低能方向移动 0.1—0.2 MeV.

从原理上说, 我们提出的鉴别滴线区  $\beta$  缓发质子的“ $\text{p}-\gamma$ ”符合方法具有一定的普遍性. 目前正在考虑把它推广到其它的质量区.

作者感谢兰州重离子加速器国家实验室主任魏宝文院士的热情鼓励和支持. 感谢该实验室 SFC 加速器全体运行维护人员为本实验提供了品质优良的 $^{32}\text{S}$ 和 $^{36}\text{Ar}$ 重离子束.

## 参考文献(References)

- 1 Hofmann S. *Radiochimica Acta*, 1995, **70/71**: 93
- 2 Möller P, Nix J R, Myers W D et al. *At. Data Nucl. Data Tables*, 1995, **59**:185
- 3 XU Shu-Wei, XIE Yuan-Xiang, LI Zhan-Kui et al. *Z. Phys.*, 1996, **A356**:227; *Science in China*, 1997, **A27(5)**:434 (in Chinese)  
(徐树威, 谢元祥, 李占奎等. *中国科学*, 1997, **A, 27(5)**:434)
- 4 XU S W, LI Z K, XIE Y X et al. *Phys. Rev.*, 1997, **C60**:061302(R)
- 5 Larsson P O, Batsch T, Kirchner R et al. *Z. Phys.*, 1983, **A314**:9
- 6 Livingston K, Woods P J, Davis N J et al. *Phys. Rev.*, 1993, **C48**:3113
- 7 Beraud R, Emsallem A, Årje J et al. *Third INRP3-RIKEN Symposium on Heavy Ion Collisions*, Tokyo, Japan, 1994, 102; *Workshop IGISOL-6, Dubna, Russia*, 1997, 59
- 8 Imura H, Katakura J, Kitao K et al. *Nucl. Data Sheets*, 1997, **80**:895
- 9 Hornshøj P, Wilsky K, Hansen P G et al. *Nucl. Phys.*, 1972, **A187**:609; *Hardy J C. Phys. Lett.*, 1982, **B109**:242
- 10 James A N, Morrison T P, Nolan P J et al. In: Eastham D A and Joy A eds. *Nuclear Structure Appendix*, Daresbury Annual Report 1985/86. Warrington, UK: Daresbury Laboratory, 1986, 103
- 11 Moscrop R, Campbell M, Gelletly W et al. *Nucl. Phys.*, 1989, **A499**:565
- 12 Paul E S, Davis S, Vaska P et al., *J. Physics (London)*, 1993, **G19**:861
- 13 Nitschke J M, Cable M D, Zeite W D. *Z. Phys.*, 1983, **A312**:265
- 14 Lister C J, Varley B J, Moscrop R et al. *Phys. Rev. Lett.*, 1985, **55**:810
- 15 XU Shu-Wei, XIE Yuan-Xiang, LI Zhan-Kui et al. *Phys. Rev.*, 1997, **C56**:1157; XU Shu-Wei, XIE Yuan-Xiang, LI Zhan-Kui et al. *Science in China*, 1998, **A28(5)**:433(in Chinese)  
(徐树威, 谢元祥, 李占奎等. *中国科学*, 1998, **A, 28(5)**: 433)
- 16 Takahashi K, Yamada M, Kondoh T. *At. Data Nucl. Data Tables*, 1973, **12**:101
- 17 Horiguchi T, Tachibana T, Katakura J. *Charts of the Nuclides*, 1996
- 18 Hirsch M, Staudt A, Muto K et al. *At. Data Nucl. Data Tables*, 1993, **53**:165
- 19 Möller P, Nix J R, Kratz K-L. *At. Data Nucl. Data Tables*, 1997, **66**:131
- 20 Winn W G, Gutbrod H H, Blann M. *Nucl. Phys.*, 1972, **A188**:423
- 21 Arseniev D A, Sobiczewski A, Soloviev V G. *Nucl. Phys.*, 1969, **A126**:15
- 22 Bengtson T, Ragnarsson I. *Nucl. Phys.*, 1985, **A436**:14; Firestone R B. *Table of Isotopes*, 8th ed. 1996, Vol. II, Appendix H, H-7 and H-8
- 23 Audi G, Bersillon O, Blachot J et al. *Nucl. Phys.*, 1997, **A624**:1

## Nen $\beta$ -Delayed Proton Decays in the Rare-Earth Region Near the Proton Drip Line \*

XU Shu-Wei LI Zhan-Kui XIE Yuan-Xiang YU Yong PAN Qiang-Yan WANG Chun-Fang  
XING Jian-Ping MA Rui-Chang GE Yuan-Xiu WANG Xu-Dong  
(*Institute of Modern Physics, The Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 73000, China*)

**Abstract** The  $\beta$ -delayed proton precursors  $^{125}\text{Nd}$ ,  $^{128}\text{Pm}$ ,  $^{129}\text{Sm}$ ,  $^{137}\text{Gd}$  and  $^{139}\text{Dy}$  near the proton drip-line were produced by the irradiation of  $^{92}\text{Mo}$ ,  $^{96}\text{Ru}$  and  $^{106}\text{Cd}$  with an  $^{36}\text{Ar}$  beam, and conclusively identified for the first time by using proton-gamma coincidence in combination with a He-jet tape transport system. Their half-lives were determined to be 0.60(15)s, 1.0(3)s, 0.55(10)s, 2.2(2)s and 0.6(2)s, respectively. The measured energy spectra of  $\beta$ -delayed protons and estimated proton branching ratios to the final states in "daughter" nuclei for the precursors  $^{125}\text{Nd}$ ,  $^{129}\text{Sm}$ ,  $^{137}\text{Gd}$  and  $^{139}\text{Dy}$ , as well as the previously reported ones for the precursors  $^{135}\text{Gd}$  and  $^{121}\text{Ce}$ , were fitted by a statistical model calculation. The ground-state spins and parities of  $^{121}\text{Ce}$ ,  $^{125}\text{Nd}$ ,  $^{129}\text{Sm}$ ,  $^{135}\text{Gd}$ ,  $^{137}\text{Gd}$  and  $^{139}\text{Dy}$  were then assigned as  $5/2^+$ ,  $5/2^+$ ,  $1/2^+$  (or  $3/2^+$ ),  $5/2^+$ ,  $7/2^+$  and  $7/2$ , respectively. The consistency between the experimental spin-parity assignment and the predicted Nilsson diagrams indirectly indicates that ground states of  $^{121}\text{Ce}$ ,  $^{125}\text{Nd}$ ,  $^{129}\text{Sm}$ ,  $^{135}\text{Gd}$ ,  $^{137}\text{Gd}$  and  $^{139}\text{Dy}$  are highly deformed with  $\beta_2 \sim 0.3$ .

**Key words** proton drip-line,  $\beta$ -delayed proton decay,  $\beta$ -delayed proton precursors, ground-state spin and parity

---

\* Supported by National Natural Science Foundation of China(19975057), Major Subject of The Chinese Academy of Sciences and Major State Basic Research Development Program(G2000077402)