

文章编号: 1007-4627(2011)04-0423-05

# 原子核基态双质子衰变的研究进展\*

徐树威, 谢元祥

(中国科学院近代物理研究所, 甘肃 兰州 730000)

**摘要:** 基态双质子衰变是质子滴线区原子核的一种奇异衰变。它可以揭示质子滴线区原子核外层质子对的结构行为, 检验现有核模型理论应用于极端条件下原子核的正确性。搜索基态双质子衰变是人们广泛关注的一个实验难题, 直到理论预言提出后 40 多年才取得明显进展。简要介绍了这一研究的进展情况。

**关键词:** 基态双质子衰变; 质子滴线;  $B\rho$ -TOF- $\Delta E$  方法; 光学时间投影室

**中图分类号:** O571.32<sup>+4</sup>      **文献标志码:** A

## 1 物理意义和理论预言

如果核素非常远离  $\beta$  稳定线, 其中子或质子的结合能就会等于零, 这就到达了核素图的极限部位——中子滴线或质子滴线。就缺中子侧而言, 处在质子滴线部位的核素其质子的结合能等于零, 质子就该自动脱离原子核。但由于库仑位垒和离心位垒的阻挡, 即使质子的结合能为零, 甚至为负值, 只要它的分离能(相当于负结合能)低于位垒高度, 质子要脱离原子核还必须穿透位垒。这个可观察的质子穿透位垒的时间过程就是人们常说的直接质子衰变过程。如果核素沿缺中子方向更加远离  $\beta$  稳定线, 其质子的分离能明显高于位垒, 质子就会立即脱离原子核。这样的核素就不复存在。因此, 滴线区是可存活原子核的边缘核区。合成与研究滴线区的原子核, 如观测质子滴线区原子核的直接质子衰变和缓发质子衰变, 是属于极端条件下物理学的范

畴, 成了原子核物理的一个前沿领域。到目前为止, 已经发现了 30 多种直接(单)质子衰变核素, 它们主要是在质子数 = 57~81 的区域内的奇  $Z$  核素。观测到的质子分离能大多在 1.0~1.5 MeV 之间。如果质子数低于 50, 可观测的质子分离能有可能低于 1 MeV。人们知道, 质子的对能一般为 1~2 MeV, 因此对于滴线区某些偶  $Z$  核素从基态同时发射一对质子比通过单质子衰变更为有利。这种现象被称为基态双质子衰变。观测基态双质子衰变可以确定质子对所处的壳模型轨道, 可以获得双质子穿透位垒的信息, 进一步检验原子核的质量预言和壳模型在滴线区的正确性。

20 世纪 60 年代初, 前苏联科学家 Goldanskii 根据预言的原子核质量和结合能计算指出<sup>[1]</sup>: 邻近质子滴线的外侧存在一种奇异的基态双质子衰变。他还说, 双质子既可以<sup>2</sup>He 的形式发射, 也可以同

表 1 不同理论预言的 2p 衰变的半衰期<sup>[5]\*</sup>

作者	预言核素的 $T_{1/2}/\text{ms}$			
	<sup>38</sup> Ti	<sup>39</sup> Ti	<sup>45</sup> Fe	<sup>48</sup> Ni
Brown <sup>[3]</sup>		2~140	0.002~0.3	0.001~0.2
Ormand <sup>[4]</sup>	$(0.4\sim 2.3)\times 10^{-12}$	0.4~2000	$10^{-5}\sim 10^{-1}$	0.01~3660
Audi <sup>[5]</sup>	$2\times 10^{-6}\sim 6$	$\infty$	$4\times 10^{-4}\sim 10^6$	

\* 用位垒穿透来确定半衰期时, 采用 Audi & Wapstra 评估的质量, 其结果列入第 3 行。

\* 收稿日期: 2011-03-30; 修改日期: 2011-05-03

\* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10735010)

作者简介: 徐树威(1938—), 男, 湖南长沙人, 研究员, 从事实验核物理研究; E-mail: xsw@impcas.ac.cn

时发射两个空间无关联的质子。1988 年,他又进一步指出 $^{22}\text{Si}$ ,  $^{31}\text{Ar}$ ,  $^{39}\text{Ti}$  和  $^{42}\text{Cr}$  是可能的候选核<sup>[2]</sup>。后人的实验表明:前三者主要通过  $\beta$  衰变(包括  $\beta$  缓发质子衰变),而没有观测到双质子衰变。于是出现了新的理论预言<sup>[3-4]</sup>(见表 1), 候选核是 $^{39}\text{Ti}$ ,  $^{45}\text{Fe}$ ,  $^{48}\text{Ni}$  和  $^{38}\text{Ti}$ 。

## 2 德国 GSI 与法国 GANIL 的成功探索

合成滴线区核素的产额非常低,人们必须首先设法合成这些候选核。1996 年,Blank 等<sup>[5]</sup>在德国重离子研究中心(GSI)用 $^{58}\text{Ni}$ 束流引起的炮弹碎裂反应首次合成了 3 个 $^{45}\text{Fe}$ 核,并估计其半衰期可能长于穿越碎片分离器的飞行时间 350 ns。但未能发现 $^{48}\text{Ni}$ ,也未能明确看到 $^{38}\text{Ti}$ 。加之 $^{45}\text{Fe}$ 的预言半衰期适合于实验测量,于是人们的兴趣集中到了候选核 $^{45}\text{Fe}$ 。

2002 年,Pfützner 等<sup>[6]</sup>发表了在 GSI 首次观测到 $^{45}\text{Fe}$ 的双质子衰变的实验证据。从 SIS 同步加速器引出 650 MeV/u 的 $^{58}\text{Ni}$ 束流轰击 4 g/cm<sup>2</sup> 的 Be 靶,通过炮弹碎裂产生目标核。用碎片分离器(FRS)把不同  $B\rho$  值的碎片分开(见图 1)。用塑料闪

烁体(SC1, SC2 和 SC3)测量飞行时间(TOF),并用一个四重电离室(MUSIC)测量能损( $\Delta E$ ),根据  $B\rho$ -TOF- $\Delta E$  方法的鉴别原理进一步指认了碎片的质量数和电荷数。分离指认的同时碎片 $^{45}\text{Fe}$ 穿过几个降能片(Degrader),速度逐渐减慢,最后进入探测器系统。探测系统是由 8 块 Si 探测器组成的望远镜。每片 Si 300  $\mu\text{m}$  厚,直径 60 mm。望远镜被 6 块弧形 NaI 晶体包围。晶体长 30 cm,其内外径分别为 8 和 40 cm。 $^{45}\text{Fe}$  停止在硅片中,会产生能量近 1 GeV 的大信号。这就是时间的零点。此后,与 Si 探测器相连的一组前置放大器快速复原,几微秒之后 Si 探测系统就能跟踪能量低到 1 MeV 的衰变质子信号。这个质子信号要与外围 NaI 信号反符合,确认它与  $\beta$  衰变无关,而是直接质子衰变。经过近 6 d 的实验,他们最终观测到了 6 个 $^{45}\text{Fe}$ 的衰变事件。只有 5 个事件观测到了衰变能量和时间。其中 4 个事件是直接双质子衰变,其衰变能为 1.1(1) MeV,与理论预言值相近;另一个事件相关的衰变能为 10 MeV,是来自  $\beta$  缓发质子衰变。 $^{45}\text{Fe}$  的衰变半衰期确定为  $3.6^{+2.6}_{-1.0}$  ms。直接双质子衰变分支比估计为 80%。

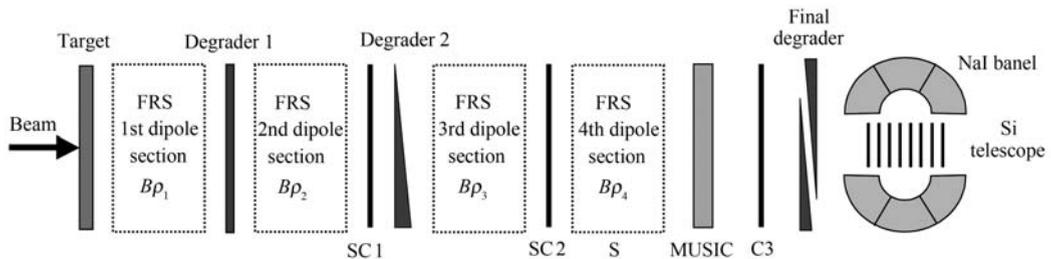


图 1 GSI 用于观测 $^{45}\text{Fe}$ 双质子衰变的实验装置示意图<sup>[6]</sup>

仅 5 d 后, Giovinazzo 等<sup>[7]</sup>在 *Phys. Rev. Lett.* 上发表了在法国重离子大加速器国家实验室(GANIL)观测 $^{45}\text{Fe}$ 直接双质子衰变的实验结果。他们利用 75 MeV/u 的 $^{58}\text{Ni}$ 束流轰击 240  $\mu\text{m}$  厚的天然 Ni 靶,通过中能炮弹碎裂产生目标核。用 LISE3 对碎片按  $B\rho$  值分离。采用类似的  $B\rho$ -TOF- $\Delta E$  方法把 $^{45}\text{Fe}$ 碎片引入探测器系统。用 Si 探测器来观测直接质子衰变。同时在其周围测量了  $\beta$  射线,并通过反符合把与  $\beta$  衰变有关的事件与直接质子衰变事件区分开来。经过 36 h,他们共计观测了 22 个 $^{45}\text{Fe}$ 碎片注入到探测器系统。其中 12 个事件的衰变能谱构成一个明显的峰,从而确定:双质子

衰变能为  $(1.14 \pm 0.04)$  MeV;  $^{45}\text{Fe}$  的衰变半衰期为  $4.7^{+3.4}_{-1.4}$  ms。GANIL 的工作进一步深入。如 Dos-sat 等<sup>[8]</sup>又报道了改进的结果:他们在 GANIL 观测到 30 个注入碎片,其中 17 个与  $\beta$  衰变无关。由后者的能谱定出精确的双质子衰变能为  $(1.154 \pm 0.016)$  MeV;  $^{45}\text{Fe}$  的衰变半衰期为  $1.6^{+0.5}_{-0.3}$  ms。他们在同一文章中还报道:利用相同的弹靶组合,观测到了 4 个 $^{48}\text{Ni}$ 的注入碎片,提取的半衰期为  $2.1^{+2.1}_{-0.7}$  ms。但 4 个事件中只有一个具有双质子衰变的特征,不与  $\beta$  射线符合,其衰变能量为 1.35(2) MeV。这一个事件还不足以成为 $^{48}\text{Ni}$ 存在  $\beta$  双质子衰变的确实证据。2005 年,Blank 等<sup>[9]</sup>还在 *Phys.*

*Rev. Lett.* 报道在 GANIL 观测到了  $^{54}\text{Zn}$  的直接双质子衰变的实验结果。他们利用  $74.5\text{ MeV/u}$  的  $^{58}\text{Ni}$  束流(平均流强为  $4\ \mu\text{A}$ )轰击  $250\ \mu\text{g/cm}^2$  的天然 Ni 靶,通过中能炮弹碎裂产生目标核。利用测量  $^{45}\text{Fe}$  的相同方法观测到 8 个注入的  $^{54}\text{Zn}$  碎片,定出半衰期为  $3.2^{+1.8}_{-0.8}\text{ ms}$ ; 其中 7 个是直接质子衰变,

双质子衰变能为  $(1.48 \pm 0.02)\text{ MeV}$ , 并估计出核反应生成截面约为  $100\text{ fb}$ 。这个截面很低,与合成  $Z=113\sim 118$  超重新元素的生成截面的数量级相近。所幸中能炮弹碎裂反应可以采用比较厚的靶子,每天还观测到了两个事件。上述 GANIL 和 GSI 的主要实验结果都列于表 2。

表 2 GANIL 和 GSI 探索基态  $\beta$  双质子衰变的主要实验结果

母核	衰变能/MeV	半衰期/ms	分支比(%)	观测到的事件数	实验室
$^{45}\text{Fe}$	1.1(1)	$3.6^{+1.6}_{-0.8}$	80	4	GSI <sup>[6]</sup>
$^{45}\text{Fe}$	1.154(16)	$1.6^{+0.3}_{-0.2}$	57	17	GANIL <sup>[8]</sup>
$^{48}\text{Ni}$	1.35(2)	$2.1^{+0.4}_{-0.3}$	25	1	GANIL <sup>[8]</sup>
$^{54}\text{Zn}$	1.48(2)	$3.2^{+1.8}_{-0.8}$	86	7	GANIL <sup>[9]</sup>

### 3 实现双质子的关联测量及其重要副产品

上述 GSI 和 GANIL 的实验并不完美,他们用的 Si 探测器不能区分所测量的粒子是单质子还是双质子。确认为双质子是基于物理分析。更为重要的是,这种方法不能确定测得的是  $^2\text{He}$ , 还是同时发射两个空间无关联的质子。只有实现两个质子的关联测量,如观测它们的径迹才能回答这个问题。为此,2007 年波兰的 Miernik 和 Dominik 等<sup>[10]</sup> 研制了针对核衰变成像的光学时间投影室(OTPC)。

电荷放大阶段发射的紫外光被波长移相器转化为可见光,并被光电倍增管记录,同时还用一百万像素的 CCD 数码相机拍照。照相产生的是一个二维的图像,而光电倍增管的时间取样能给出不同时间与二维图像垂直方向的信息。二者合一就形成了完整的三维径迹图像。

Miernike 等<sup>[11]</sup> 在美国密歇根州立大学(MSU)超导回旋加速器实验室,利用  $161\text{ MeV/u}$  的  $^{58}\text{Ni}$  束流轰击  $800\text{ mg/cm}^2$  的天然 Ni 靶,通过中能炮弹碎裂产生目标核。用 A1900 碎片分离器按  $B\rho$  值分离核反应碎片。采用类似的  $B\rho\text{-TOF-}\Delta E$  方法把  $^{45}\text{Fe}$  碎片引入到 OTPC 中拍照。经过 9 d 实验,他们共计跟踪到 125 个  $^{45}\text{Fe}$  碎片,其中 87 个发生了直接双质子衰变,38 个发生了  $\beta$  缓发质子衰变。

图 3 给出了直接双质子衰变的照片。左边进入的长而轻的径迹是  $^{45}\text{Fe}$  碎片,两条亮的短径迹就是能量约为  $0.6\text{ MeV}$  的质子径迹,是碎片进入  $535\ \mu\text{s}$  后发射出来的。根据他们的实验,  $^{45}\text{Fe}$  的衰变半衰期为  $2.6(2)\text{ ms}$ , 直接双质子衰变的分支比为  $70(4)\%$ 。衰变过程中主要是同时发射两个空间无关联的质子。发射的双质子主要处于  $f$  轨道,处于  $p$  轨道的几率约为  $30(10)\%$ 。应当指出,在表 2 中有关  $^{45}\text{Fe}$  双质子衰变的半衰期和分支比, GSI 的结果和 GANIL 的结果是有差别的。二者的平均值正好与 Miernik 等人的结果相当。

利用上述实验装置, Miernik 等<sup>[12]</sup> 还得到了一个重要的副产品,即首次看到了  $^{45}\text{Fe}$  的  $\beta$  缓发 3 质

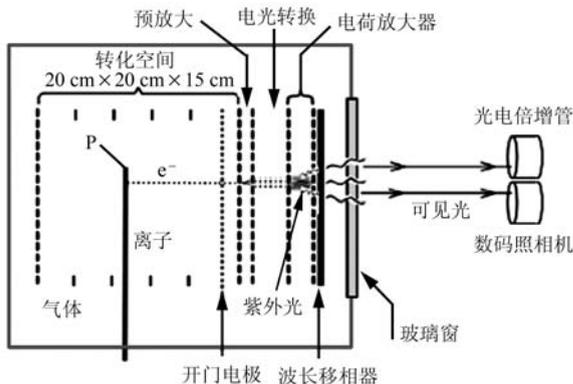


图 2 光学时间投影室(OTPC)的示意图<sup>[10]</sup>

OTPC(图 2)的工作原理如下:室内充有一个气压的流动气体,成分是 Ar 和 He 各 49%,  $\text{N}_2$  和  $\text{CH}_4$  各 1%。粒子及其衰变产物停止在  $20\text{ cm} \times 20\text{ cm} \times 15\text{ cm}$  的转换空间内。初始的电离电子以  $1.1\text{ cm}/\mu\text{s}$  速度漂移,经两级放大,增益可大于  $10^4$ 。在

子的径迹照片(图 4)。早在 1992 年 Bazin 等<sup>[13]</sup>曾报道他们在 GANIL 观测到<sup>31</sup>Ar 的  $\beta$  缓发 3 质子衰变。这也是世界上首次报道  $\beta$  缓发 3 质子衰变的实验结果。但 1999 年 Fynbo 等<sup>[14]</sup>在 CERN 用更有效的实验方法却没有观测到<sup>31</sup>Ar 的  $\beta$  缓发 3 质子衰变。而只是给出了<sup>31</sup>Ar  $\beta$  缓发 3 质子衰变分支比的上限  $1.1 \times 10^{-3}$ 。



图 3 用 OTPC 观测到的<sup>45</sup>Fe 双质子衰变的径迹照片<sup>[11]</sup>  
长径迹是<sup>45</sup>Fe 形成的, 两条短粗径迹是双质子。

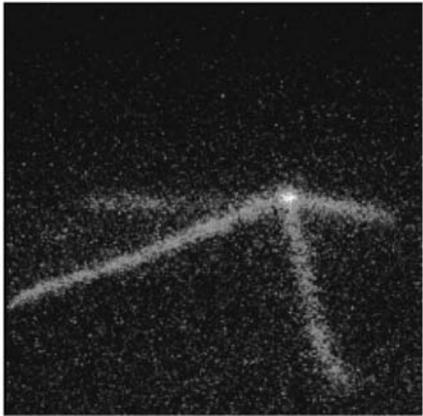


图 4 用 OTPC 观测到的<sup>45</sup>Fe  $\beta$  缓发 3 质子衰变的径迹照片<sup>[12]</sup>  
长径迹是从左面入射的<sup>45</sup>Fe, 其它 3 条径迹代表  $\beta$  衰变后产生的 3 个质子。

## 4 展望

根据法国 Blank 设想<sup>[15]</sup>, 近期内可以探索邻近核<sup>59</sup>Ge, <sup>63</sup>Se 和<sup>67</sup>Kr 的基态双质子衰变。理论预言的这 3 种核素的双质子衰变能在 1.15~1.85 MeV

的范围以内。但他担心这些核的  $\beta$  衰变分支比太强, 使直接双质子衰变不易被实验观察。

研究基态双质子衰变的另一个核区应当是稀土及邻近区域。相对轻核而言, 这个区域的库仑位垒高, 更有利于实验观测(单)质子衰变和直接双质子衰变。目前已经观测到的直接(单)质子衰变都集中在这个区域。观测双质子衰变可以与邻近的单质子衰变对比, 便于从中获得系统的、更为灵敏的质子滴线核结构信息。但实验面临的挑战是目标核的产生几率要比<sup>45</sup>Fe 和<sup>54</sup>Zn 的更低。因为偶 Z 质子滴线核要比奇 Z 质子滴线核更缺中子。如果采用低能融合蒸发反应来产生目标核, 炮弹的流强一个粒子微安, 初步估计其计数率要比<sup>54</sup>Zn 的计数率至少低一两个数量级。当然, 要着手实验探索, 首先必须对目标核的衰变性质进行尽可能精确的理论预言。

## 参考文献 (References):

- [1] Goldanskii V I. Nucl Phys, 1960, **19**: 482.
- [2] Goldanskii V I. Phys Lett, 1988, **B212**: 11.
- [3] Brown B A. Phys Rev, 1991, **C43**: R1513.
- [4] Ormand W E. Phys Rev, 1996, **C53**: 214.
- [5] Blank B, Czajkowski S, Davi F, *et al.* Phys Rev Lett, 1996, **77**: 2983.
- [6] Pfützner M, Badura E, Bingham C, *et al.* Eur Phys J, 2002, **A14**: 279.
- [7] Giovinazzo J, Blank B, Chartier M, *et al.* Phys Rev Lett, 2002, **89**: 102501.
- [8] Dossat C, Bey A, Blank B, *et al.* Phys Rev, 2005, **C72**: 054315.
- [9] Blank B, Bey A, Canchel G, *et al.* Phys Rev Lett, 2005, **94**: 232501.
- [10] Miernik K, Dominika W, Czyrkowski H, *et al.* Nucl Instr and Meth, 2007, **A581**: 194.
- [11] Miernik K, Dominik W, Janas Z, *et al.* Phys Rev Lett, 2007, **99**: 192501.
- [12] Miernik K, Dominik W, Janas Z, *et al.* Phys Rev, 2007, **C76**: 041304(R).
- [13] Bazin D, Del Moral R, Dufour J P, *et al.* Phys Rev, 1992, **C45**: 69.
- [14] Fynbo H O U, Axelsson L, Åystö J, *et al.* Phys Rev, 1999, **C59**: 2275.
- [15] Blank B. Inter J Mod Phys, 2009, **E18**: 2124.

# Recent Progress for Observation of Ground-state Two-proton Decay<sup>\*</sup>

XU Shu-wei<sup>1)</sup>, XIE Yuan-xiang

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

**Abstract:** The ground-state two-proton decay is an exotic decay beyond proton drip line. It deals with the structure behavior of the proton pair at outside orbital in a proton drip-line nucleus, and can be used to check the current nuclear model under extreme condition. Experimental observation of ground-state two-proton decay has been widely considered as a challenge because of very low production cross section. In this short paper, the breakthrough of searching ground-state two-proton decay is briefly reviewed, which was made more than 40 years after the early theoretical prediction was proposed.

**Key words:** ground-state two-proton decay; proton drip line;  $B\rho$ -TOF- $\Delta E$  method; optical time projection chamber

---

\* **Received date:** 31 Mar. 2011; **Revised date:** 3 May 2011

\* **Foundation item:** National Natural Science Foundation of China(10735010)

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