

# $\beta$ 缓发双质子衰变核 $^{26}\text{P}$ 半衰期的测定

周宗源

(南京大学)

J. CERNY M. CABLE J. HONKANEN R. PARRY

(Lawrence Berkeley Lab, U.S.A.)

## 摘 要

本文介绍了实验测定短寿命核素半衰期的一种有效而可行的方法,并已在实验上测定出  $^{26}\text{P}$  的半衰期为  $20^{+35}_{-15}\text{ms}$ . 实验值与理论计算符合得很好.

## 一、引 言

近年来,重离子加速器和核实验技术所取得的进展已极大地增加了合成新核素的可能性,不仅相继发现了一系列的新核素,而且还发现了许多新的核现象.诸如质子放射性, $\beta$  缓发核、双质子、双中子、三中子衰变以及  $^{14}\text{C}$  发射等<sup>[1]</sup>.使原子核物理的实验广度和精度有了大大地扩展和提高.

我们在劳伦斯-伯克利实验室通过实验发现了  $\beta$  缓发双质子衰变现象<sup>[2,3]</sup>,并测定了  $\beta$  缓发双质子衰变核  $^{22}\text{Al}$  和  $^{26}\text{P}$  的半衰期<sup>[2,4]</sup>.有关  $^{26}\text{P}$  不同衰变方式测定的实验在文献 [4]、[5]、[6] 里有详细描述,本文着重描述  $^{26}\text{P}$  半衰期测定的原理、装置和结果.

利用加速器研究远离  $\beta$  稳定线短寿命的核素时,采用了一项重要的实验技术,即所谓氦喷 (Helium-jet) 传输技术.它利用高温高压氦气将靶上反冲的反应产物从靶室这个强辐射区快速而有效地传输到装有探测系统的被屏蔽的低本底测量区.被氦气所传输的反应产物最后喷射在旋转着的收集转轮上,由面对着收集轮的探测器望远镜鉴别、记录反应产物的放射性.在这个过程中,反应产物按指数规律衰变,选用适当短的不锈钢毛细管,缩短从靶到收集器的传输时间,就可以在避免高强度本底干扰的情况下,通过望远镜鉴别粒子方法,挑选出我们所要搜寻的新的短寿命核素,并测量其性质.

利用氦喷技术和粒子甄别及质子-质子符合技术,我们发现  $^{26}\text{P}$  除  $\beta$  缓发单质子衰变 (其质子能量为 7.269 MeV 和 6.827 MeV) 外<sup>[4]</sup>,还存在着另一种衰变方式—— $\beta$  缓发双质子衰变<sup>[5]</sup>,该双质子衰变机制是以级联发射为主的,每个质子的能量分别为  $3.699 \pm 0.015$  MeV 和  $1.210 \pm 0.015$  MeV,总的双质子能量为  $4.927 \pm 0.020$  MeV.衰变纲图<sup>[6]</sup>如图 1 所示.从图可知,  $^{26}\text{P}$  由超允许  $\beta$  衰变由基态跃迁到子核  $^{26}\text{Si}$  的  $T=2$  的同位旋相似态,随后通过单质子衰变跃迁到  $^{25}\text{Al}$  的基态和第一激发态,同时还通过级联发射  $p_1$  和  $p_2$

的双质子衰变跃迁到  $^{24}\text{Mg}$  的基态。

出现在远离稳定线核区的  $\beta$  缓发单质子衰变是缺中子核核谱研究中的有用的工具, 它不仅可用来测定其  $\beta$  衰变的子核的同位旋相似态的质量, 而且也用来确定其  $\beta$  衰变的半衰期。本文就是极好的例子。

## 二、实验方法

### 1. 测量原理

为了测量短寿命核的半衰期, 一种较好的技术是测量不同转速时收集转轮上所收集的反应产物的放射性。在我们的装置中, 需要考虑在质子望远镜系统所张的立体角内, 放射性反应产物所停留的时间。假设它为  $\tau$ , 那么我们所观测到的放射性计数将是

$$N_0 - N_0 e^{-\lambda\tau}$$

其中  $N_0$  为放射性产物刚刚进入探测器立体角内时的总个数;  $\lambda$  为该核素的衰变常数。如果反应产物里包含三种放射性核素, 其衰变常数分别为  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 、 $\lambda_3$ , 当收集转轮以慢速旋转时, 则有

$$N_1^s = K_1 N_{01} (1 - e^{-\lambda_1 \tau_s}), \quad (1)$$

$$N_2^s = K_2 N_{02} (1 - e^{-\lambda_2 \tau_s}), \quad (2)$$

$$N_3^s = K_3 N_{03} (1 - e^{-\lambda_3 \tau_s}). \quad (3)$$

当我们改变收集轮转速时, 如以快速旋转, 则短寿命核素的贡献将相对增加, 这时我们所观测到的这三种核素的放射性则为

$$N_1^f = K_1 N_{01} (1 - e^{-\lambda_1 \tau_f}), \quad (4)$$

$$N_2^f = K_2 N_{02} (1 - e^{-\lambda_2 \tau_f}), \quad (5)$$

$$N_3^f = K_3 N_{03} (1 - e^{-\lambda_3 \tau_f}). \quad (6)$$

其中  $K_s$ 、 $K_f$  为收集轮分别以慢速和快速旋转时, 在不同收集距离下, 探测器测到的放射性衰变的归一化因子。

假如在这三种核素中有两种核素的半衰期是已知的, 也即已知  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ , 那么原则上通过对  $N_1^s$ 、 $N_1^f$ 、 $N_2^s$ 、 $N_2^f$ 、 $N_3^s$ 、 $N_3^f$  的测量, 通过这六个方程联立, 就可以解得包括  $\tau_s$ 、 $\tau_f$ 、 $\lambda_3$  在内的六个未知数。由此测得第三种未知核素的半衰期  $(T_{1/2})_3 = \ln 2 / \lambda_3$ 。

在上述的测量中, 有两点必须加以考虑:

(1) 沉积在收集转轮上的放射性产物并不是点源, 而是具有一定的分布。

(2) 当收集轮转动时, 源对计数望远镜系统所张的立体角随时间  $t$  而改变, 因而探测系统的探测效率随时间而改变, 即有  $\varepsilon(t)$ 。

综合这两项考虑, 可有

$$\frac{N_i^f}{N_i^s} = K \left( \frac{1 - e^{-\lambda_i \tau_s}}{1 - e^{-\lambda_i \tau_f}} \right) \frac{P(\tau_s)}{P(\tau_f)}, \quad (7)$$

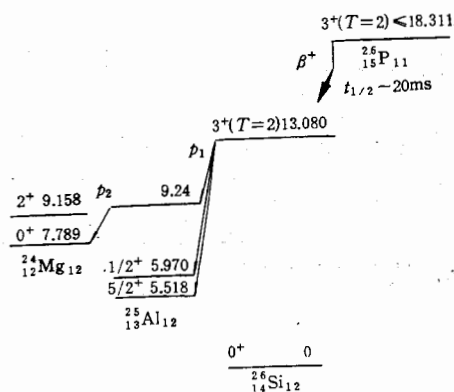


图 1  $^{26}\text{P}$  的衰变纲图

$$P(\tau) = \frac{\int_0^{\tau} e^{-\lambda t} \varepsilon(t) dt}{\int_0^{\tau} e^{-\lambda t} dt} \quad (8)$$

其中  $N_i$ 、 $N'_i$  为收集转轮分别以慢速和快速旋转时,所观测到的某种核素的衰变计数; $K$  为不同收集距离的归一化因子; $P(\tau)$  为计数效率  $\varepsilon$  在时间 0 到  $\tau$  期间不是常数所作的修正; $\tau$  为  $\varepsilon$  趋于 0 的那一时刻(即源出了探测器所张立体角的那一时刻)。

如果已知收集转轮的转速和质子望远镜的立体角,我们不难算出  $\tau_i$  和  $\tau'_i$ , 然而这两项是很难确定的,而我们借助于对另外两种已知核的相对测量,就可以很方便地确定  $\tau$  和  $\tau'_i$ , 从而确定  $(T_{1/2})_s$ 。

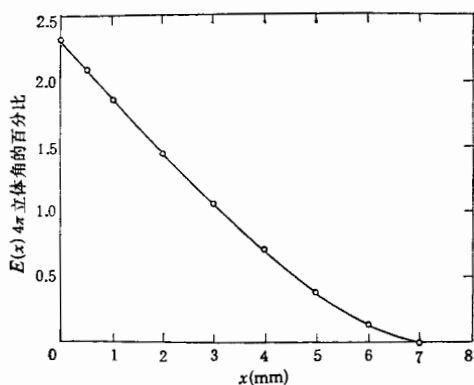


图2 单质子望远镜探测效率与源离开望远镜轴线的距离的函数关系

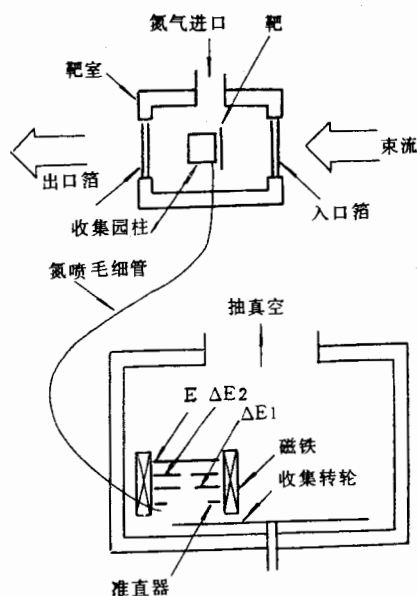


图3 靶室、氮喷、测量室装置示意图

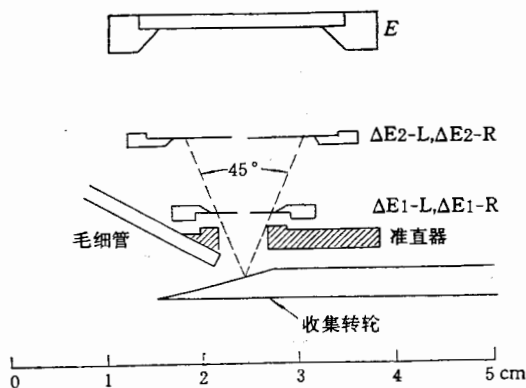


图4 双质子望远镜系统与氮喷毛细管及收集转轮的相对位置

对于单质子望远镜系统, 我们计算过  $E(x) \sim x$  的关系曲线, 如图 2 所示. 我们可以近似地把 0 到  $\tau$  范围内的  $E(t)$  处理为线性递减函数. 当我们采用  $\epsilon(t)$  的线性近似后, 则(7)式成为

$$\frac{N_i^s}{N_i^f} = K \frac{(e^{-\lambda_i \tau_s} + \lambda_i \tau_s - 1)}{(e^{-\lambda_i \tau_f} + \lambda_i \tau_f - 1)}. \quad (9)$$

我们先不考虑  $P(\tau)$  的修正, 可以粗略地确定  $\lambda_3$ , 然后根据(9)式作为修正, 可以较精确地测定出未知核素的半衰期. 这种技术用于  $^{26}\text{P}$  的半衰期测定, 原则上讲是精确的, 但是由于  $^{26}\text{P}$  低的产额和其他放射性本底的影响, 使其具有较大的误差. 其误差类似于  $^{21}\text{Al}$  的情况的讨论<sup>[6]</sup>.

## 2. 实验装置

本实验是在美国劳伦斯-伯克利实验室的 88 英寸回旋加速器上进行的. 装置如图 3 所示.

当强度为  $3-7\mu\text{A}$ , 能量为  $110-130\text{ MeV}$  的  $^3\text{He}^{+2}$  束流轰击  $^{28}\text{Si}$  靶时, 经由  $^{28}\text{Si} (^3\text{He}, p4n)^{26}\text{P}$  反应, 产生  $^{26}\text{P}$  核素, 此外还通过  $^{28}\text{Si} (^3\text{He}, x\alpha 2n)$  反应, 产生  $^{25}\text{Si}$ 、 $^{29}\text{S}$  和  $^{21}\text{Mg}$ . 从靶中反冲出来的反应产物通过内径为  $1.57\text{ mm}$ ,  $70\text{ cm}$  长的不锈钢毛细管, 用高温高压掺杂  $\text{NaCl}$  的氦喷系统传输到低本底区旋转着的收集轮上. 双质子望远镜系统正对着毛细管在转轮上的喷射点, 如图 4 所示. 整个测量室用铁、铅屏蔽并抽成低真空, 讯号经长电缆与 NIM 系统和计算机相连接, 用程序 CHAOS 获取并分析数据.

## 三、测量结果

在所测得的质子谱中, 除  $^{26}\text{P}$  的  $\beta$  缓发质子外, 还存在着较强的反应截面所产生的其他放射性, 如图 5 所示, 即还有  $(^3\text{He}, x\alpha 2n)$  反应所产生的  $^{21}\text{Mg}$ 、 $^{25}\text{Si}$  和  $^{29}\text{S}$  的  $\beta$  缓发质子, 而这些核素的  $\beta$  缓发质子衰变, 我们是熟知的<sup>[7]</sup>. 图 5(c), 轰击能量是  $60\text{ MeV}$ , 它低于  $^{26}\text{P}$  产生反应的阈能 ( $63.5\text{ MeV}$ ), 因此仅仅观察到  $^{29}\text{S}$  的两个  $\beta$  缓发单质子衰变峰, 其实验室坐标能量分别为  $7.114 \pm 0.015\text{ MeV}$  和  $7.581 \pm 0.015\text{ MeV}$ <sup>[7]</sup>. 图 5(b) 轰击能量是  $110\text{ MeV}$ , 出现  $^{26}\text{P}$  的  $7.269\text{ MeV}$  (实验室坐标) 的  $\beta$  缓发单质子峰, 但这时仍有很强的  $^{29}\text{S}$  和  $^{25}\text{Si}$  的本底干扰, (b) 图中标记的  $a$ 、 $b$  是指  $^{25}\text{Si}$  的两个弱质子峰<sup>[7]</sup>. 为了降低本底干扰, 我们采取了以下两个步骤: (A) 提高轰击能量到  $130\text{ MeV}$ , (B) 增加旋转收集轮的转速, 以降低长寿命核放射性的相对贡献. 所得到的结果是显著的, 如图 5(a) 所示. 这时大大降低了  $^{29}\text{S}$  和  $^{25}\text{Si}$  的本底, 不仅使  $^{26}\text{P}$  的  $7.269\text{ MeV}$  的单质子峰清晰可见, 而且在  $6.827\text{ MeV}$  处出现了另一个  $^{26}\text{P}$  的单质子峰, 如(a)中箭头所指. 它是与  $^{26}\text{Si}$  的  $T=2$  态向  $^{25}\text{Al}$  的第一激发态的质子衰变相一致的. 图 5 中  $5.4\text{ MeV}$  的质子峰是由  $^{25}\text{Si}$  和  $^{29}\text{S}$  共同贡献的, 它们的半衰期分别为  $220\text{ ms}$  和  $187\text{ ms}$ , 用 ALICE 程序计算的两者截面在  $110-130\text{ MeV}$  处大致相等.  $6.2\text{ MeV}$  的  $\beta$  缓发质子峰是  $^{21}\text{Mg}$  的贡献, 其半衰期为  $122\text{ ms}$ . 图中箭头所示的  $6.827\text{ MeV}$  和  $7.269\text{ MeV}$  质子峰是由  $^{26}\text{P}$  贡献的. 我们分别从快、慢转速下所测得的单质子谱中确定  $5.4\text{ MeV}$  的  $^{25}\text{Si}+^{29}\text{S}$ ,  $6.2\text{ MeV}$  的  $^{21}\text{Mg}$  和  $6.8\text{ MeV}$

的 $^{26}\text{P}$ 的相对计数 $N_1^i, N_2^i, N_3^i, N_4^i, N_5^i, N_6^i$ 分别为: 33869, 1831, 40, 12332, 887, 36,

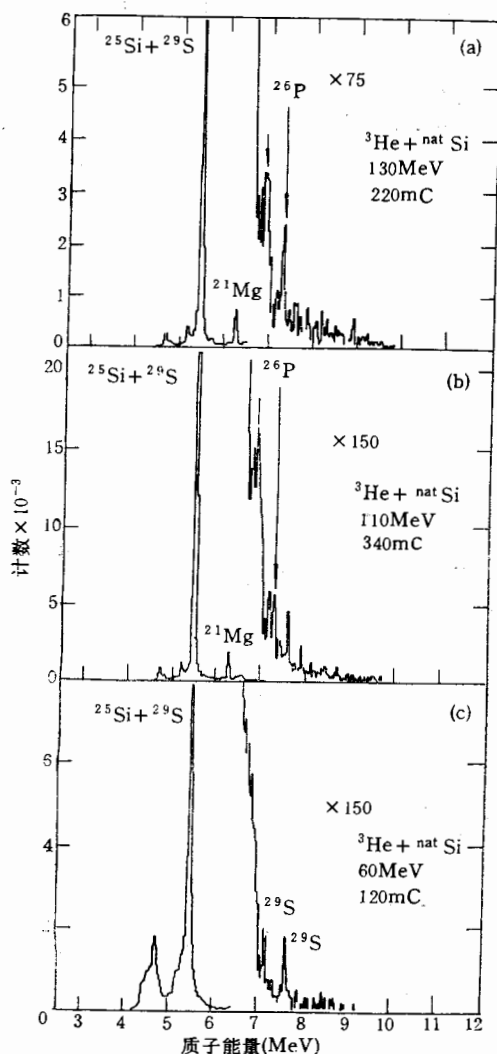


图5 不同轰击能量下的 $\beta$ 缓发单质子能谱

[图中以mc(毫库仑)标记的是束流轰击靶子的累积剂量]

限,因为7.269 MeV的缓发质子并不是这一 $\beta$ 衰变分支( $\sim 1.9\%$ )唯一的衰变过程,还存在着6.827 MeV的 $\beta$ 缓发质子,特别是已证实的还存在着较强的 $\beta$ 缓发双质子衰变<sup>[5,6]</sup>.

### 参 考 文 献

- [1] J. C. Hardy, *Science*, **227**(1985), 993.
- [2] M. D. Cable et al., *Phys. Rev.*, **C26**(1982), 1778.
- [3] M. D. Cable et al., *Phys. Rev. Lett.*, **50**(1983), 404.
- [4] M. D. Cable et al., *Phys. Lett.*, **B123**(1983), 25.
- [5] J. Honkanen et al., *Phys. Lett.*, **B133**(1983), 146.

$T_1$  和  $T_2$  则用  $^{25}\text{Si}$  和  $^{29}\text{S}$  的有效半衰期 204ms 和  $^{21}\text{Mg}$  的 122 ms 代入, 采用 HL 130 程序计算, 得到  $T_3 = 18$  ms. 考虑到分布源的实际情况和立体角随时间的变化, 根据(9)式经数值计算后可得  $T_3 = T_{1/2}(^{26}\text{P})$  为 20 ms, 根据 $^{26}\text{P}$ 的6.827 MeV 质子峰的计数误差, 同理可以计算得到其半衰期的误差为  $\begin{matrix} +35 \\ -15 \end{matrix}$ . 因此, $^{26}\text{P}$   $\beta$  缓发质子衰变的半衰期为  $20 \begin{matrix} +35 \\ -15 \end{matrix}$  ms.

理论上, Wildenthal<sup>[9]</sup> 用壳模型计算了 $^{26}\text{P}$  向子核  $^{26}\text{Si}$  跃迁直到 9 MeV 的激发态的允许跃迁和超允许跃迁的 $\beta$ 衰变, 曾预言了 $^{26}\text{P}$  的半衰期为 22 ms, 这被认为是其半衰期的上限, 因为还存在着向 9 MeV 以上的激发态跃迁的贡献.

假定一个纯费米跃迁,  $\log f_t$  值为 3.19 (这时伽莫夫-泰勒跃迁的贡献应被忽略)<sup>[9]</sup>, 利用我们所测得的半衰期 (20 ms) 可算出超允许跃迁的分支比为  $1.9 \begin{matrix} +3.5 \\ -1.4 \end{matrix} \%$ , 通过 $^{26}\text{P}$  的产额与轰击时所产生的其他放射进行比较, 可以知道对于 7.269 MeV 的 $^{26}\text{P}$  的有效截面为 1.8 nb, 它对应于总的产生截面 (100 nb) 的一个下限. 这只是一个下

[6  
[7  
[8  
[9

des  
hal

- [6] M. D. Cable et al., *Phys. Rev.*, C30(1984), 1276.  
 [7] Z. Y. Zhou et al., *Phys. Rev.*, C31(1985), 1941.  
 [8] 周宗源, “ $\beta$  缓发双质子衰变核  $^{26}\text{P}$  半衰期的测定”, 原子核物理, 待发表.  
 [9] D. H. Wildenthal, Private Communication, (1982).

## HALF-LIFE MEASUREMENT OF THE $\beta$ -DELAYED TWO-PROTON DECAY NUCLIDE $^{26}\text{P}$

ZHOU ZONGYUAN

(Nanjing University)

J. CERNY M. CABLE J. HONKANEN R. PARRY

(Department of Chemistry and Lawrence Berkeley Laboratory University of California, Berkeley, CA 94720)

### ABSTRACT

An effective and feasible method which is used to measure half-life of short-life nuclei is described. Half-life of the nuclide  $^{26}\text{P}$  was measured and its result is  $20^{+35}_{-15}$  ms. The observed half-life is in good agreement with theoretical calculation.

36,  
改半  
人,  
3 =  
兄和  
式经  
为  
子峰  
得到  
,  $^{26}\text{P}$

+35  
-15

模型  
4eV  
壬的  
j 22  
, 因  
之态

直为  
状应  
衰  
分支  
与衰  
可  
有效  
截面  
下  
存  
61.