

# 新核素 $^{65}\text{Se}$ 半衰期的首次实验测定\*

黄文学 徐晓冀 胡志强 马瑞昌

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

1995-03-10 收稿

## 摘 要

根据  $^{40}\text{Ca} (^{28}\text{Si}, 3n)$  反应中观测到的  $^{65}\text{Se}$   $\beta$  延迟质子衰变实验数据, 拟合计算粒子望远镜对运动放射源的绝对探测效率, 精确测定了  $^{65}\text{Se}$  的半衰期为  $9.6_{-4.1}^{+5.3}$  ms, 其  $\beta$  延迟质子能量为  $3.70 \pm 0.08$  MeV, 由此修订了  $^{65}\text{Se}$  的部分衰变纲图.

**关键词** 新核素, 半衰期, 探测效率, 部分衰变纲图.

## 1 引 言

远离  $\beta$  稳定线新核素半衰期的测定是一项基本的且有意义的工作, 由它可确定核的  $\beta$  衰变几率、衰变类型和  $\beta$  延迟粒子发射分支比, 从而有助于判断核的衰变机制.

在实验上对于半衰期的测量, 一般地, 常常是首先测出核衰变的时间序列谱, 再由衰变关系求出此核的半衰期. 这种方法比较直观, 但是对于质子滴线附近的核, 由于其寿命很短, 仅为几十毫秒甚至几毫秒以下, 而产生截面却只有微巴量级, 这就给核的指定和半衰期的精确测量带来了困难. 为搜寻短寿命、低截面的远离  $\beta$  稳定线新核素, 实验上已发展了一种喷氦技术 (Helium-jet), 其具体工作原理可参考文献 [1]. 靶室中的反应产物被快速地传输到探测室, 在探测室内有一个转动收集盘, 喷到盘上的反应产物在此形成放射源, 它被盘带着旋转经过粒子望远镜 (由  $\Delta E$ 、 $E$  及  $E_{\text{reject}}$  金硅面垒半导体探测器组成) 而被探测. 调节盘的转速, 可使具有某一寿命的核的活性相对突出而使其它活性得到抑制. 通过观察比较在转速变化时未知核活性相对于已知核活性变化的规律, 可以相对地定出未知核的半衰期.

现在我们发展了一种新的测定半衰期的有效方法, 即: 将核的可能的半衰期作为参数, 以实验数据拟合计算粒子望远镜对运动放射源的绝对探测效率, 从而可以直接而精确地确定未知核的半衰期.

我们知道, 宏观反应截面公式可以表示为

$$\sigma = \frac{R}{P \cdot \eta \cdot \Phi \cdot N \cdot B}, \quad (1)$$

\* 国家自然科学基金和中国科学院“八五”重大科研项目资助.

其中  $R$  为峰下积分计数,  $P$  为喷氦系统的传输系数,  $\eta$  为探测器(粒子望远镜)的绝对探测效率,  $\Phi$  为积分束流,  $N$  为靶厚,  $B$  为先驱核粒子衰变分支比. 若在同一次实验中, 实现同一反应道, 用同一传输系统, 探测同一个核, 在收集盘的不同转速情况下, 可以得到下述公式:

$$\frac{\eta_1(g, t_{w1}, t_{1/2})}{\eta_2(g, t_{w2}, t_{1/2})} = \frac{R_1 \times \Phi_2}{R_2 \times \Phi_1}, \quad (2)$$

其中  $\eta$  为粒子望远镜的绝对探测效率, 它是各探测器的几何因子  $g$ , 转盘转速  $t_w$  和核半衰期  $t_{1/2}$  的函数. 在对探测效率的计算中, 考虑到了各种可能的因素, 例如, 考虑了反应产物从靶室到收集室的传输过程中的衰变; 放射源随转盘运动被探测时, 源的半衰期和转盘转速对探测效率的影响; 面源上放射性的分布; 放射源注入点到望远镜中心轴线的距离; 多层准直器对探测的限制, 以及放射源运动轨迹偏离标准轨迹圆对探测效率的影响等, 因而计算所得到的是绝对探测效率. 文献[2]详尽叙述了绝对探测效率的计算方法. 从(2)式还可以看出: 这种由实验数据拟合计算绝对探测效率而得到的核的半衰期, 其误差将是很小的. 这是因为采用了效率相除, 大大地消除了计算中系统误差对半衰期的影响.

1989年, 曾对在美国伯克利实验室(LBL)做的  $^{28}\text{Si} + ^{40}\text{Ca}$  实验<sup>[1]</sup> 做过一次仔细地分析, 鉴定出了在此反应中产生的新核素  $^{65}\text{Se}$ , 其  $\beta$  延迟质子衰变能量在  $3.75 \pm 0.05\text{MeV}$ , 半衰期为  $10.8^{+4.1}_{-3.7}\text{ms}$ . 此结果已在本刊中、英版上发表<sup>[3]</sup>, 并被法国斯特拉斯堡核素图(CHART OF THE NUCLIDES - STRASBOURG 1992)采用. 当时使用的判据是:

$$\frac{\sigma_{\text{Alice}}(^{61}\text{Ge})}{\sigma_{\text{exp}}(^{61}\text{Ge})} = \frac{\sigma_{\text{Alice}}(^{65}\text{Se})}{\sigma_{\text{exp}}(^{65}\text{Se})}, \quad (3)$$

$$\frac{\sigma_{\text{Alice}}^{113\text{MeV}}(^{65}\text{Se})}{\sigma_{\text{Alice}}^{128\text{MeV}}(^{65}\text{Se})} = \frac{\sigma_{\text{exp}}^{113\text{MeV}}(^{65}\text{Se})}{\sigma_{\text{exp}}^{128\text{MeV}}(^{65}\text{Se})}, \quad (4)$$

即, 认为:  $^{61}\text{Ge}$  与  $^{65}\text{Se}$  这两元素的 ALICE 计算截面与实验截面之比应该相等; 在炮弹 ( $^{28}\text{Si}$ ) 能量分别为  $113\text{MeV}$  和  $128\text{MeV}$  时, ALICE 计算的  $^{65}\text{Se}$  产生截面之比与相应的实验截面之比应该相等. 也就是说: 对不同的核, ALICE 计算截面与实验截面之比相等; 对同一个核, 不同能量下 ALICE 计算截面之比与实验截面之比也应相等. 大量的实验事实证明, 随着原子核的不同, 虽然 ALICE 计算的截面与实验截面之间, 有着明显不同的差异, 但其截面之比却差异很小, 特别是相邻核之间截面比的差异就更小, 所以以上的判据基本上是可信的. 1993年, 美国伯克利实验室重做了  $^{28}\text{Si} + ^{40}\text{Ca}$  实验, 声称他们也观察到了  $^{65}\text{Se}$  的  $\beta$  延迟质子衰变, 但是没有得到  $^{65}\text{Se}$  的半衰期<sup>[4]</sup>. 本文用实验数据拟合计算粒子望远镜的绝对探测效率的新方法(以上提到的), 不依赖于任何理论假设, 去测定  $^{65}\text{Se}$  的半衰期.

## 2 实验结果和分析

图1和图2展示了  $^{28}\text{Si}$  束流能量分别为  $113\text{MeV}$  和  $128\text{MeV}$  时, 用粒子望远镜所测

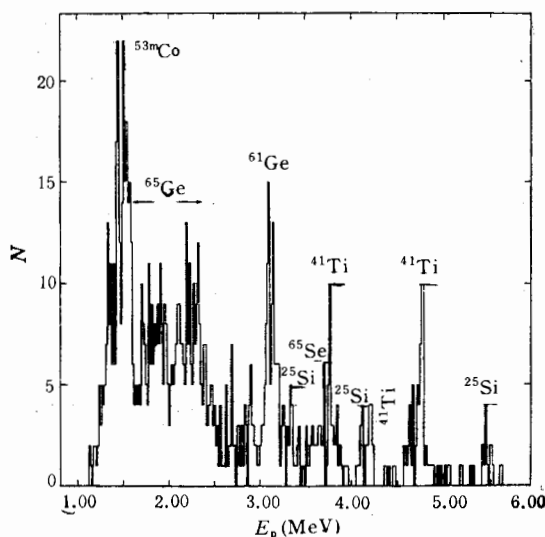


图1  $^{113}\text{MeV } ^{28}\text{Si}$  轰击  $\text{Ca}$  靶所得的质子谱  
束流积分为  $30\text{ mC}$ , 收集盘转速为  $1\text{ 圈/分钟}$ 。

到的在  $^{28}\text{Si} + ^{40}\text{Ca}$  反应中产生的先驱核的质子衰变谱<sup>[1]</sup>。其中,  $128\text{ MeV}$  的谱是在两种转盘速度下 ( $1.0\text{rpm}$  和  $6.7\text{rpm}$ , 即: 每分钟转 1 圈和每分钟转 6.7 圈) 得到的。谱中  $1.57\text{MeV}$  的峰是  $^{53\text{m}}\text{Co}$  的低位同质异能态的直接质子衰变<sup>[5]</sup>, 其它峰分别来自先驱核  $^{65}\text{Ge}$ ,  $^{61}\text{Ge}$  和  $^{41}\text{Ti}$  的  $\beta$  延迟质子衰变<sup>[6]</sup>。  $^{41}\text{Ti}$  早在 1966 年已由实验发现, 是一个人们熟知的  $\beta$  延迟质子先驱核, 其主要的几组质子能量与相对强度如表 1 所示。

表 1  $^{41}\text{Ti}$  的几组主要的质子峰相对强度 ( $E_p > 3.0\text{ MeV}$ )

质子峰能量 (MeV)	3.08	3.69	3.75	4.64	4.73
相对强度	60.3	15.5	31.0	22.1	100

仔细分析这些谱, 我们有两个重要的发现: 第一,  $3.75\text{MeV}$  与  $4.73\text{MeV}$  两峰的比例显然与已知的  $^{41}\text{Ti}$  数据不同,  $3.75\text{MeV}$  峰的强度明显地增强了, 其中必有新的质子活性。而根据理论预言<sup>[7]</sup>,  $^{65}\text{Se}$  的  $\beta$  延迟质子能量就处于  $3.62$  至  $3.74\text{MeV}$  范围; 第二, 当收集盘转动加快时,  $3.75\text{ MeV}$  质子活性的计数明显增加, 特别引人注意的是, 此活性计数不仅是相对地增多, 其绝对计数也增多。这又使我们得出两个重要的结论: (1) 在  $3.75\text{ MeV}$  处出现的新质子活性必然是短寿命的。因为, 只有收集盘转动加快 (即收集时间变短) 才能使短寿命活性的计数相对增加; (2) 与原来想象的不同, 放射源并没有被喷射到粒子望远镜 (探测器) 的正前方。因为, 如果源被喷射到探测器正前方, 无论是长寿命或短寿命的活性, 在其运动经过探测器前被探测时, 转速加快只能使短寿命活性计数较之长寿命活性计数相对地增加, 而其绝对计数都应减少, 只不过长寿命的减少得多, 短寿命的减少得少而已。由此, 我们断定, 源没有被喷射到探测器正前方, 而是被喷射到偏向转盘旋转运动的“进”方向, 如图 3 所示的 A 点 (C 是转盘上面对探测

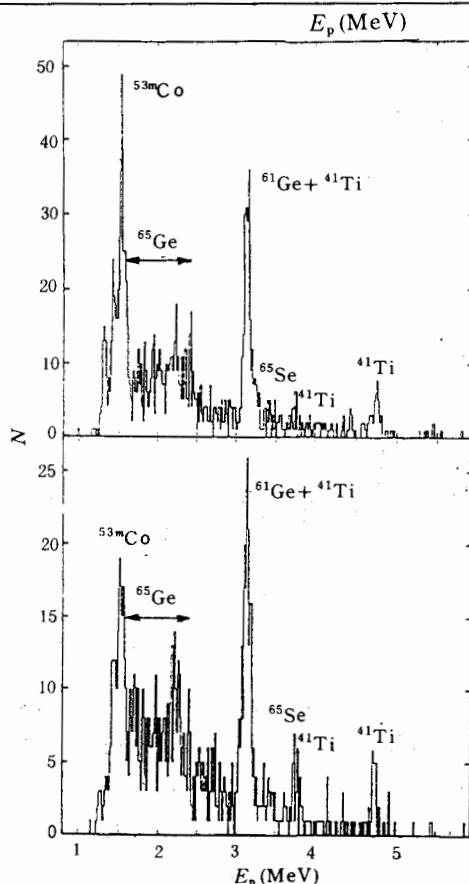


图2 128 MeV  $^{28}\text{Si}$  轰击 Ca 靶所得的质子谱  
 上图:束流积分为 35mC, 收集盘转速为 1 圈/分钟.  
 下图:束流积分为 27mC, 收集盘转速为 6.7 圈/分钟.

4.73 MeV 处的质子峰, 由剥谱分析, 就得到了各质子峰中分别来源于纯  $^{61}\text{Ge}$ 、 $^{41}\text{Ti}$  和  $^{65}\text{Se}$  的峰下质子计数, 见表 2.

根据当时实验的真实情况, 确定了各探测器的几何条件. 其中, 一个重要的工作是, 必须确定如前所述的放射源偏离粒子望远镜中心线的距离  $AC$  (见图 3). 为此, 首先利用  $^{41}\text{Ti}$  和  $^{61}\text{Ge}$  已知半衰期 (分别为 80ms 和 40 ms) 分别拟合公式 (2), 求出此偏离量  $AC$ . 令人吃惊的是, 它们竟然相当接近 (分别为 3.36mm 和 3.44 mm). 这也说明我们的分析方法是正确的. 然后由平均偏离量 ( $AC = 3.40 \text{ mm}$ ) 及其它与  $^{65}\text{Se}$  有关的实验参数 (几何参数, 积分计数, 积分束流等) 再次拟合计算公式 (2), 得到  $^{65}\text{Se}$  的半衰期为 9.6 ms.

器中心的点).

在用实验数据拟合公式 (2) 精确测定核的半衰期之前, 必须得出各有关特征峰的积分计数. 现在, 对于图 2 中束流能量为 128MeV 时, 转速为 1.0rpm 和 6.7rpm 两个谱分别进行统计. 由于谱的统计不够多, 能量分辨还不够好 (在 3.0—5.0MeV 范围内, 其相对能量分辨率约为 5% 至 2%), 难以使 4.73MeV 和 4.64MeV 两组峰明确分开, 从而认为 4.73MeV 的峰是由 4.73MeV 和 4.64MeV 两组质子峰贡献; 3.75MeV 的峰是由 3.75MeV 和 3.69MeV 两组质子峰贡献, 并且, 如上所述, 由于此峰的强度与  $^{41}\text{Ti}$  4.73MeV 主峰的强度比例反常, 且有短寿命的活性存在其中, 再考虑到对  $^{65}\text{Se}$  的理论预言, 所以有理由认为, 它是由  $^{41}\text{Ti}$  和  $^{65}\text{Se}$  的共同贡献. 另外, 也由于能量分辨的原因, 3.11 MeV 的峰实际上是  $^{61}\text{Ge}$  和  $^{41}\text{Ti}$  的 3.08MeV 峰的共同贡献. 并考虑到表 1 中所得  $^{41}\text{Ti}$  各主要质子峰的强度比. 这样, 对于在质子谱中对应于 3.08—3.11 MeV, 3.69—3.75MeV 和 4.63—

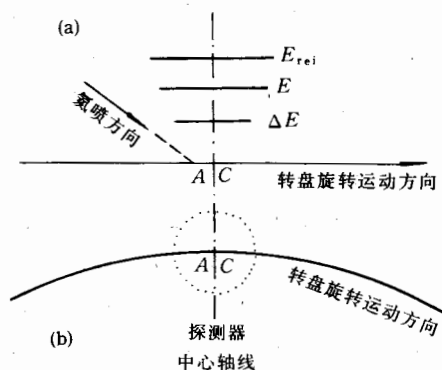


图3 放射源被喷射到探测器前的位置图示  
 (a) 侧视图; (b) 俯视图.

表2 质子谱中属于  $^{61}\text{Ge}$ 、 $^{41}\text{Ti}$  和  $^{65}\text{Se}$  的计数

质子峰 $E_p$ (MeV)	3.08 — 3.11 (MeV)			3.69 — 3.75 (MeV)			4.64 — 4.73 (MeV)
核素和 相对强度	$^{41}\text{Ti}$ (60.3) + $^{61}\text{Ge}$	$^{41}\text{Ti}$ (纯)	$^{61}\text{Ge}$ (纯)	$^{41}\text{Ti}$ (46.5)+ $^{65}\text{Se}$	$^{41}\text{Ti}$ (纯)	$^{65}\text{Se}$ (纯)	$^{41}\text{Ti}$ (122.1) (纯)
积分计数 (35mC, 1.0 rpm)	215	24	191	27	19	8	49
积分计数 (27m C, 6.7rpm)	164	14	150	41	11	30	29

现在讨论一下拟合计算中各参数对半衰期误差的影响. 首先, 估计几何条件的不准确所带来的误差极限, 例如, 当  $\Delta E$  探测器灵敏区半径从 4mm 变为 6mm 时, 拟合半衰期变为 9.66 ms; 当转盘到  $\Delta E$  探测器之间距离从 10mm 变到 5mm 时, 拟合半衰期变为 9.74 ms. 即: 几何条件的不准确对拟合计算的半衰期影响极小; 同样, 转速的不稳定 ( $\sim 1\%$ ) 对其影响也极小, 可以忽略不计. 因此, 半衰期误差主要来源于峰下积分计数的统计涨落. 考虑到最坏的情况, 得到半衰期的误差范围为  $\pm_{4.1}^{5.3}$  ms. 另外, 由剥谱拟合分析, 得  $^{65}\text{Se}$  的  $\beta$  延迟质子能量为  $3.70 \pm 0.08\text{MeV}$ .

### 3 结 论

完全根据实验数据, 利用剥谱分析方法, 拟合计算粒子望远镜对运动放射源的绝对探测效率, 得到  $^{65}\text{Se}$  的半衰期为  $9.6_{4.1}^{+5.3}$  ms, 其  $\beta$  延迟质子能量为  $3.70 \pm 0.08\text{MeV}$ .

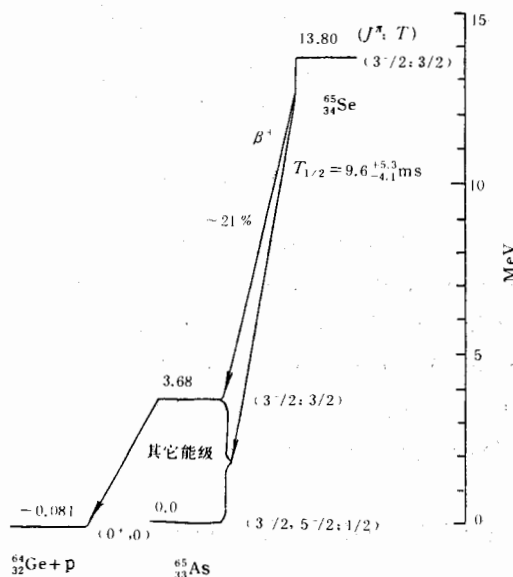


图4  $^{65}\text{Se}$  的部分衰变纲图  
所有的能量均以 MeV 为单位.

它与 Y. YOSHIZAWA 等人的预言值<sup>[8]</sup> 以及文献 [3] 的值都符合得较好. 这是迄今为止, 首次完全由实验测定的  $^{65}\text{Se}$  的核的半衰期. 根据  $^{65}\text{Se}$   $\beta$  延迟质子能量为 3.70 MeV, 和相应的超允许  $\beta$  跃迁  $\log ft$  值为 3.3, 得到  $^{65}\text{Se}$  的  $\beta$  延迟质子衰变分支比为  $\sim 21\%$ , 为此, 我们重新修订了  $^{65}\text{Se}$  的部分衰变纲图, 如图 4 所示, 其中  $^{64}\text{Ge}$  与  $^{65}\text{As}$  的基态质量采用了 G. Audi 和 A. H. Wapstra 的数值<sup>[9]</sup>. 其中,  $^{65}\text{Se}$  的基态角动量与宇称暂采用其镜核  $^{65}\text{Ga}$  的值.

### 参 考 文 献

- [1] M. A. C. Hotchkis, J. E. Reiff, D. J. Vieira *et al.*, *Phys. Rev.*, **C35** (1987) 315.
- [2] 胡志强、徐晓冀, 原子能科学技术, **28** (1994) 396.
- [3] 徐晓冀, 高能物理与核物理, **13** (1989) 156.
- [4] J. C. Batchelder, D. M. Moltz, T. J. Ognibene *et al.*, *Phys. Rev.*, **C47** (1993) 2038.
- [5] K. P. Jackson, C. U. Cardinal, H. C. Evans, *et al.*, *Phys. Lett.*, **B33** (1970) 281.
- [6] Richard G. Sextro, R. A. Gough, Joseph Cemy, *Nucl. Phys.*, **A234** (1974) 130.
- [7] 徐晓冀、区秀兰、程远, 高能物理与核物理, **15** (1991) 630.
- [8] Y. Yoshizawa, T. Horiguchi, M. Yamada, Chart of the Nuclides 1988, Japanese Nuclear Data Committee and Nuclear Data Center.
- [9] G. Audi, A. H. Wapstra, *Nucl. Phys.* **A565** (1993) 1.

## First Experimental Determination of Half-Life for New Nuclide $^{65}\text{Se}$

Huang Wenxue    Xu Xiaoji    Hu Zhiqiang    Ma Ruichang

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

Received 10 March 1995

### Abstract

By using experimental data obtained from the measurement of beta-delayed proton decay of  $^{65}\text{Se}$  produced in  $^{40}\text{Ca}(^{28}\text{Si}, 3n)$  reaction, the absolute detection efficiency of particle telescope for rotating radioactive source was imitatively calculated. The half-life of  $^{65}\text{Se}$  was thus accurately determined to be  $9.6^{+5.3}_{-4.1}$  ms. The  $\beta$ -delayed proton energy of  $^{65}\text{Se}$  was  $3.70 \pm 0.08$  MeV. The partial decay scheme of  $^{65}\text{Se}$   $\beta$ -delayed proton decay was revised and proposed.

**Key words** new nuclide, half-life, detection efficiency, partial decay scheme.