

文章编号: 1007-4627(2003)04-0235-04

## ${}^7\text{Be}$ 半衰期的精确测量\*

刘志毅, 李成波, 王思广, 周 静, 孟秋英, 卢绍军, 周书华

(中国原子能科学研究院核物理研究所, 北京 102413)

容超凡, 袁大庆

(中国原子能科学研究院计量测试部, 北京 102413)

**摘 要:** 用两套  $\gamma$  谱仪精确测量了注入到天然铍和天然金中的  ${}^7\text{Be}$  发生电子俘获的半衰期. 测得  ${}^7\text{Be}$  在天然铍中半衰期为 53.275(25) d, 在天然 Au 中为 53.270(19) d. 该结果还表明, 在这两种材料中  ${}^7\text{Be}$  半衰期的相对变化小于 0.12%.

**关键词:** 电子俘获; 衰变率; 电子亲合势;  $\gamma$ -谱

**中图分类号:** O571.322      **文献标识码:** A

### 1 引言

放射性核素的半衰期, 特别是发生电子俘获和内转换过程的半衰期, 与核外物理和化学环境有密切关系<sup>[1-3]</sup>. 精确测量这些核素的半衰期以及研究它们在不同核外环境中半衰期的变化, 在许多领域有着重要的应用, 如核物理、核天体物理、凝聚态物理、地球化学、地球年代学和核废物处理等. ${}^7\text{Be}$  衰变率在研究太阳中微子丢失问题上还有着特殊的意义<sup>[4-6]</sup>. 精确确定  ${}^7\text{Be}$  衰变率与研究其随核外环境变化的规律可以更精确地抽取区性  ${}^7\text{Be} + e^- \rightarrow {}^7\text{Li} + \nu$  这一天体物理中重要反应的矩阵元, 结果能更好地了解实验值与理论值之间的差异. 近年来, 随着探测手段和测量技术的提高, 这一课题又成为当前的研究热门之一.  ${}^7\text{Be}$  是发生电子俘获的最轻的放射性核素, 具有简单的电子壳层结构, 因而是研究核外环境对半衰期影响的最合适核素之一.  ${}^7\text{Be}$  衰变发生电子俘获反应  ${}^7\text{Be} + e^- \rightarrow {}^7\text{Li} + \nu$ , 大约 10% 布居到  ${}^7\text{Li}$  的第一激发态, 其余的布居至  ${}^7\text{Li}$  的基态.  ${}^7\text{Li}$  的第一激发态通过放出 478 keV  $\gamma$  射线退激至  ${}^7\text{Li}$  的基态<sup>[7]</sup>. 本实验借助探测该 478 keV  $\gamma$  射线来测量  ${}^7\text{Be}$  的半衰期.

### 2 实验

利用中国核工业计量站 5SDH-2 型串列加速器

提供的能量为 3.2 MeV 和流强为 5  $\mu\text{A}$  的质子束轰击厚度为 500  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$  的氟化锂靶, 发生  ${}^7\text{Li}(p, n){}^7\text{Be}$  反应, 将反冲出来的  ${}^7\text{Be}$  分别注入到天然铍箔和天然金箔中, 这样就得到两块在金属铍和金中的  ${}^7\text{Be}$  源样品. 两台用于测量的同轴高纯锗探测器分别置于两套相距 4 m 的屏蔽体中, 屏蔽体从内到外分别由有机玻璃、铝、铜、铅四层屏蔽材料组合构成. 两个  ${}^7\text{Be}$  源分别置于这两个探测器探头上约 2 cm 处. 为减小短半衰期核素对测量的影响, 样品冷却约 40 d 后开始正式测量. 这两套  $\gamma$  谱仪测量的  $\gamma$  射线能谱由 KODAQ 数据获取系统记录. 以 1 h 作为一个时间间隔记录下一个能谱, 这样测量大约 67 d. 为减小由两套测量系统的死时间、探测器、

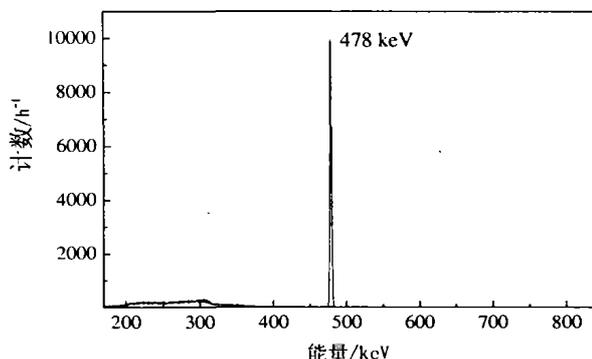


图 1 在 Au 中  ${}^7\text{Be}$  的典型  $\gamma$  谱

收稿日期: 2003 - 05 - 15; 修改日期: 2003 - 06 - 19

\* 基金项目: 中国原子能科学研究院院长基金资助项目(13HI13-ZSH)

作者简介: 刘志毅(1976-), 男(汉族), 山东兖州人, 硕士, 研究实习员, 从事核外环境对核性质影响的研究.

电子学系统的不同引起的系统误差,对调两样品位置后,继续测量约 35 d. 图 1 是在 Au 中  $^7\text{Be}$  的一个典型  $\gamma$  谱.

### 3 数据分析与实验结果

$\gamma$  射线在探测器中产生的全能峰脉冲高度近似服从高斯分布,因此选择 478 keV  $\gamma$  射线峰谱段范围在  $\pm 5\sigma$  ( $\sigma$  为表征峰形宽度的特征量),就包括了近 100% 的全能峰脉冲计数. 抽取该  $\gamma$  射线净计数主要分为以下几步: (1) 积分 478 keV  $\gamma$  射线峰谱段内的每道计数,得到该峰谱段的总面积; (2) 用平滑阶梯函数表示连续本底谱,求出该谱段范围内的本底面积; (3) 用已经求出的总面积减去本底面积,得到 478 keV  $\gamma$  峰的净峰面积,即净计数<sup>[8]</sup>. 通过上面的步骤从每一能谱中得到净峰面积后,进行净峰面积的死时间修正;根据香港天文台提供的标准时间校对获取系统的时钟后,对每一能谱对应的时间进行修正,最后得到源的活度.

本实验分交换源位置前和交换源位置后两个阶

段进行测量,故在一定程度上消除了由系统带来的误差. 实验初期,每套系统获取的总计数率约为 100/s,对于这样较低水平的计数率,探测器的偶然符合损失是可以忽略的. 在测量过程中,样品被牢固的安置在 HPGe 探测器探头上方,不会因几何位置的变动而造成探测效率的变化. 经比较计算,由选择扣谱区间带来的峰面积的人为误差不足 0.1%,是统计误差的 1/4. 综上所述,统计误差乃是本实验中所考虑的主要误差来源.

图 2 中, (a) 和 (b) 为交换源位置前两源活度的实验数据, (c) 和 (d) 为交换源位置后两源活度的实验数据. 用最小二乘法以每一点活度统计误差平方的倒数为权重拟合活度的衰变曲线,得到放射源的衰变率,其误差为曲线拟合误差. 对每个源在交换样品前后两阶段的衰变率进行加权平均得到它们的衰变率,将其转换成半衰期后,最后得到  $^7\text{Be}$  在天然 Be 中的半衰期为  $(53.275 \pm 0.025)$  d, 在天然 Au 中为  $(53.270 \pm 0.019)$  d.

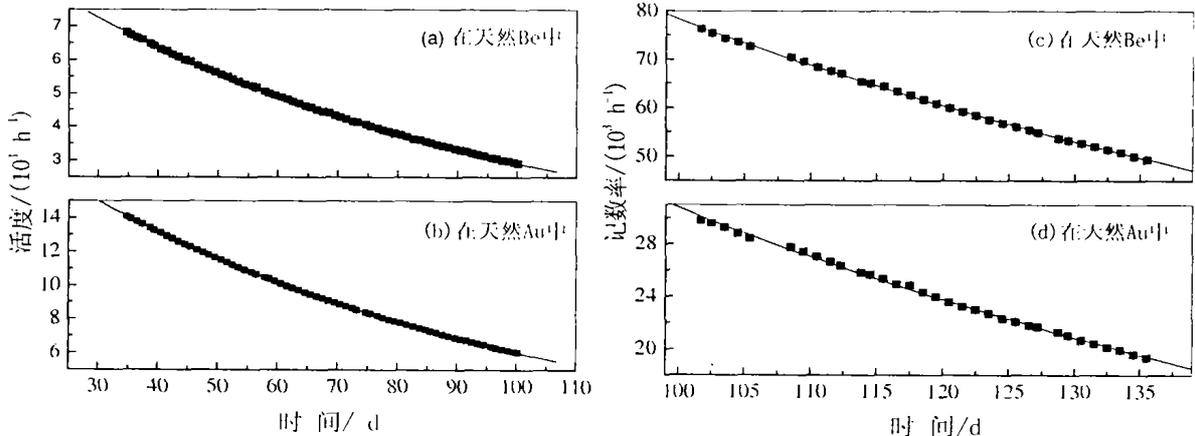


图 2 活度的实验数据及其拟和曲线  
(a)和(b) 交换源位置前; (c)和(d) 交换源位置后.

### 4 结果与讨论

本实验分别测量了注入到天然铍和天然金中的  $^7\text{Be}$  半衰期,也是第一次以这两种材料作为一对参照注入材料测量  $^7\text{Be}$  半衰期可能发生的变化. 实验结果表明,在本实验测量精度 (0.12%) 内,没有测量到注入到天然铍和天然金中的  $^7\text{Be}$  半衰期的差异,该实验结果和 Ray 等<sup>[9]</sup>用 TB-LMTO 方法计算的结果是一致的,因此他们的模型有助于对这一问题的理解,具体讨论见文献<sup>[10]</sup>. 表 1 中按文献发

表的时间顺序列出了半个世纪以来  $^7\text{Be}$  半衰期的实验值. 可以看出,早期发表的实验值误差较大且不能很好的相互重叠. 近 20 年来,随着实验技术与探测手段的提高,  $^7\text{Be}$  半衰期测量的精度也不断提高,但是由于一些文献没有具体提供  $^7\text{Be}$  所处的核外环境信息,在理论上还没有对  $^7\text{Be}$  随核外环境变化做出合理解释,因此还不能肯定地说这些实验值之间的差异来自于核外环境的影响. 目前,精确测量  $^7\text{Be}$  半衰期及研究其随核外环境变化仍具有重要意义.

表 1  ${}^7\text{Be}$  半衰期的实验值

编号	半衰期/d	文献	备注
1	$52.93 \pm 0.22$	11, 12	
2	$53.61 \pm 0.17$	13	
3	$53 \pm 0.4$	14	
4	$53.5 \pm 0.2$	15	
5	$53.1 \pm 0.3$	16	
6	$53.52 \pm 0.1$	17	
7	$53 \pm 0.3$	18	
8	$53.17 \pm 0.02$	19	
9	$53.284 \pm 0.004$	20	
10	$53.12 \pm 0.07$	21	注入到氟化锂中
11	$53.42 \pm 0.01$	22	
12	$53.107 \pm 0.022$	23	注入到石墨中
13	$53.174 \pm 0.037$	同上	注入到氮化硼中
14	$53.195 \pm 0.052$	同上	注入到钽中
15	$53.311 \pm 0.042$	同上	注入到金中
16	$53.270 \pm 0.019$	本实验	同上
17	$53.275 \pm 0.025$	本实验	注入到铍中

## 参 考 文 献:

- [1] Emery G T. Perturbation of Nuclear Decay Rates[J]. *Ann Rev Nucl Sci*, 1972, **22**: 165.
- [2] Hahn H P, Born H J, Kim J I. Survey on the Rate Perturbation of Nuclear Decay[J]. *Radio Acta*, 1976, **23**: 23.
- [3] Dostal K P, Nagel M, Pabst D. Variations in Nuclear Decay Rates[J]. *Z Naturforsch*, 1977, **32a**: 345.
- [4] Bahcall J N, Huebner W F, Lubow S H, *et al.* Standard Solar Models and the Uncertainties in Predicted Capture Rate of Solar Neutrinos[J]. *Rev Mod Phys*, 1982, **55**: 767.
- [5] Wolfenstein L, Krastev P I. How Large is the  ${}^7\text{Be}$  Neutrino Flux from the Sun? [J]. *Phys Rev*, 1997, **D55**: 4 405.
- [6] Chauhan B C, Dev S. A Natural Explanation of Be/B Neutrino Flux Anomaly in the RSFP Scenario[J]. *Phys Soc Japan*, 1997, **66**: 917.
- [7] Firestone R B, Shirley V S, Chu S Y F, *et al.* Table of Isotopes CD-ROM[M]. New York: John Wiley & Sons Inc, 1996, 272.
- [8] 古当厂. 放射性核素活度测量的方法和技术[M]. 北京: 科学出版社, 1994, 244—246.
- [9] Ray A, Das P, Saha S K, *et al.* Observation of Large Change of  ${}^7\text{Be}$  Decay Rate in Au and  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and Its Implication[J]. *Phys Lett*, 1999, **B455**.
- [10] Liu Zhiyi, Li Chengbo, Wang Sigang, *et al.* Measurement of  ${}^7\text{Be}$  Decay Rate in Be and Au[J]. *Chin Phys Lett*, 2003, **20**: 829.
- [11] Segrè E, Wiegand C E. Experiments on the Effect of Atomic Electrons on the Decay Constant of  ${}^7\text{Be}$  [J]. *Phys Rev*, 1949, **75**: 39.
- [12] Segrè E, Wiegand C E. Erratum: Experiments on the effect of atomic electrons on the decay constant of  ${}^7\text{Be}$  [J]. *Phys Rev*, 1951, **81**: 284.
- [13] Kraushaar J J, Wilson E D, Bainbridge K T. Comparison of the Values of the Disintegration Constant of  ${}^7\text{Be}$  in Be,  $\text{BeO}$ , and  $\text{BeF}_2$ [J]. *Phys Rev*, 1953, **90**: 610.
- [14] Bouchez P, Tobailem J, Robert J, *et al.* Nouvelle Détermination de la Différence des Périodes de  ${}^7\text{Be}$  Métallique et de  ${}^7\text{BeF}_2$ [J]. *J Phys Rad*, 1956, **17**: 363.
- [15] Wright H W, Wyatt E I, Reynolds S A, *et al.* Half-lives of Radionuclides I[J]. *Nucl Sci Eng*, 1957, **2**: 427.
- [16] England J B A, Reece B L. A Study of the ( ${}^3\text{He}$ ,  ${}^7\text{Be}$ ) Reaction in  ${}^{12}\text{C}$ [J]. *Nucl Phys*, 1965, **72**: 449.
- [17] Johlige H W, Aumann D C, Born H J. Determination of the

- Relative Electron Density at the Be Nucleus in Different Chemical Combinations, Measured as Changes in the Electron-capture Half-life of  ${}^7\text{Be}$ [J]. Phys Rev, 1970, **C2**, 1 616.
- [18] Cressy P J. Half-lives of Some Cosmogenic Radionuclides:  ${}^7\text{Be}$ ,  ${}^{46}\text{Sc}$ ,  ${}^{54}\text{Mn}$ ,  ${}^{56}\text{Co}$ , and  ${}^{65}\text{Zn}$ [J]. Nucl Sci Eng, 1974, **55**: 450.
- [19] Lagoutine F, Legrand J, Bac C. Periodes de Quelques Radionuclides[J]. Intern J Appl Radiat Isot, 1975, **26**, 131.
- [20] Rutledge A R, Smith L V, Merritt J S. Decay Data for Radionuclides Used for the Calibration of X- and  $\gamma$ -ray Spectrometers[R]. NBS-SP-626, 1982, 5.
- [21] Jaeger M, Wilmes S, Kölle V, *et al.* Precision Measurement of the Half-life of  ${}^7\text{Be}$ [J]. Phys Rev, 1996, **C54**: 423.
- [22] Huh C A, Liu L G. Precision Measurements of the Half-lives of Some Electron-capture Decay Nuclides  ${}^7\text{Be}$ ,  ${}^{54}\text{Mn}$ ,  ${}^{83}\text{Rb}$ , and  ${}^{84}\text{Rb}$ [J]. J Radioanal Nucl Chem, 2000, **246**: 229.
- [23] Norman E B, Rech G A, Browne E, *et al.* Influence of Physical and Chemical Environments on the Decay Rates of  ${}^7\text{Be}$  and  ${}^{40}\text{K}$ [J]. Phys Lett, 2001, **B519**: 15.

## High Precision Measurement of Half-life of ${}^7\text{Be}$ \*

LIU Zhi-yi, LI Cheng-bo, WANG Si-guang, ZHOU Jing, MENG Qiu-ying, LU Shao-jun, ZHOU Shu-hua  
(Department of Nuclear Physics, China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

RONG Chao-fan, YUAN Da-qing

(CNNC Radiation Metrology and Measurement Center, Beijing 102413, China)

**Abstract:** The half-life of  ${}^7\text{Be}$  implanted in natural beryllium and in natural gold has been measured with high precision using two high-purity germanium detectors.  $T_{1/2} = 53.275(25)$  d in natural beryllium and  $T_{1/2} = 53.270(19)$  d in natural gold is obtained. Within our experimental precision, the difference in the effect of host media beryllium and gold on the half-life of  ${}^7\text{Be}$  isn't observed and an upper limit 0.12% of this effect can be set.

**Key words:** electron capture; decay rate; electron affinity;  $\gamma$ -spectrum

\* Foundation item: China Institute of Atomic Energy Director Foundation (13HI13-ZSH)