

元素分离样品中丰中子同位素 弱 γ 活性探测 *

张立 王积成 赵进华 杨永峰
郑纪文 秦芝 张纯 郭天瑞

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

1996-10-17 收稿

摘 要

HPGe γ 探测器的 γ 能量信号与 $4\pi\Delta E\beta$ 探测器的 β 射线能损信号符合后再与BGO探测的 β^+ 衰变的正电子湮灭511 keV γ 信号作反符合组成一种新的探测系统. 该系统可使 γ 谱测量的康普顿本底下降约一个数量级. 对缺中子同位素衰变 γ 射线的探测作强抑制的同时, 丰中子同位素衰变 γ 射线的探测仍能保持相对单谱为 $(46 \pm 3)\%$ 的高效率. 使用该系统对已被合成的丰中子核素 ^{208}Hg 的半寿命进行了一次新的测定. 所得新的 ^{208}Hg 半寿命测定值 $41.5^{+5.0}_{-4.1}\text{min}$, 与以往用放射化学母牛法给出的结果一致, 测量误差有较大改进.

关键词 丰中子核素, $\text{EC}+\beta^+$ 衰变, 符合测量, 半衰期.

1 引 言

中能丰中子炮弹在中子数较为富集的靶核上引起的多核子转移反应, 是合成重质量区新丰中子同位素的一条重要途径^[1]. 但基于元素分离和时间序列 γ 谱分析来作核素鉴别时却遇到因产物同位素链太长而引起的困难. 伴生的各缺中子同位素链产物往往长达二十余种以上, 且通常会以较高的截面生成(如几十 mb 至数百 μb). 它们的 γ 衰变活性形成了高的康普顿本底. 而期待的新丰中子同位素却往往只能以极低的截面生成(如几个 μb). 这些新丰中子同位素及其子体的衰变 γ 射线, 即使其能量不与其它 γ 射线混杂, 也会因强度太弱而被淹没在本底中. 本文描写的探测系统是为了解决这一难题而发展的. 其目的是: 显著降低 γ 能谱测量的康普顿本底并有选择性地强烈抑制缺中子同位素 $\text{EC}+\beta^+$ 衰变产生的 γ 的探测, 而同时不明显降低对丰中子同位素 β^- 衰变跟随 γ 的探测效率.

* 国家自然科学基金和中国科学院“八五”重大课题资助.

2 原理方法

本探测系统是以探测质量数 $A > 170$ 的重丰中子为目标而发展的. 由 β 衰变的基本理论可知, 在重核区, 缺中子放射性核 β 衰变的两种模式正电子发射 (β^+ 衰变) 与轨道电子俘获 (EC 衰变) 相比较, EC 衰变占绝对优势^[2]. 而在离 β 稳定线不太远时, 丰中子放射性核通常以 100% 的发射电子 (β^-) 方式衰变^[2]. 通过测量与 β^+ 和 β^- 射线符合的 γ 射线谱, 即可剔除尾随 EC 衰变的 γ 射线, 或至少使这些 γ 射线的探测受到强烈抑制. 本实验使用自制的一台称之为 $4\pi\Delta E\beta$ 的 β 能损信号探测器来获得 β 粒子发射信号, 它由两片厚度为 0.5mm 的 ST401 型塑料闪烁体作为探测介质, 间隙为 1.6mm, 探测样品被放入此间隙中心, 探测器对面积为 $\phi 6\text{mm}$ 的样品形成近 $90\% \times 4\pi$ 的立体张角. 这个探测器的具体结构和相应的电子学线路见文献 [3].

在上述符合 γ 谱中, 缺中子同位素 β^+ 衰变产生 γ 的探测未能受到抑制. 为进一步提高探测丰中子同位素 γ 活性的灵敏度, 采取了抑制 β^+ 衰变放射 γ 的措施. 根据正电子湮没理论^[4], 在实验室系里, β^+ 衰变发射的正电子被介质阻止后发射两条方向相反、能量各为电子静止质量 511 keV 的 γ 射线. 由于正电子在大多数介质中的寿命只有 10^{-10}s 量级, 可以通过探测其中任意一条 511 keV γ 射线来得到 β^+ 衰变的信息. 基于这一原理, 我们在 $4\pi\Delta E\beta$ 探测器的一侧放置了一块等效体积约为 $140\text{mm} \times 70\text{mm} \times 50\text{mm}$, 面积为 $140\text{mm} \times 70\text{mm}$ 的 BGO 晶体探测器, 面正对样品, 相距 5 cm. HPGe γ 探测器与 BGO 探测器相对地放在 $4\pi\Delta E\beta$ 探测器的另一侧. BGO 探测器输出的 γ 谱中明显可见 511 keV 强 γ 峰. 由于 BGO 探头能量分辨较差, 以该峰前沿和后沿分别降至峰高 10% 为准开一 γ 能量窗, 用一单道将窗内时间逻辑信号提出来与前者符合的 γ 能谱反符合, 用此种方法得到的反符合 γ 谱中 β^+ 衰变产生的 γ 部分地被剔除了.

3 测试结果

由图 1 给出的三种能谱的比较可明显看出, 图 (b) 相对于 (a) 降低了约一个数量级, 图 (c) 相对 (b) 略有下降. 同时可以看出, 在图 (a) 中某些非常强的 γ 射线在图 (b)、(c) 谱中明显降低了, 而能量为 344.8、778.9 keV 的两条 γ 射线的强度未见明显减弱, 反而相对地变得突出了. 由 ^{152}Eu 衰变纲图可知, 此两条 γ 射线恰是 β^- 衰变发射的^[5].

为描写探测系统在实现突出显示弱的丰中子 γ 射线的的能力, 引入一表征系统相对抑制本领的参量 R_s , 定义为:

$$R_s = I_a \times C_i / I_i \quad (i = b, c), \quad (1)$$

其中 I_a 为某一被考察 γ 组份在图 1 (a) 中的计数, I_i 为该组份对应地在图 1 (b) 和 (c) 中的计数. C_i 指对那些无相对抑制作用的 γ 射线的符合效率, 取决于探测器的几何和时间特性, 符合 (包括反符合) 开门信号阈, 探测器输出的信号高度、时间歧离以及总计数率等因素. 以下分几种不同类型 β 衰变产生的 γ 来讨论:

- 1) 单一 β^- 衰变. 式 (1) 中定义的相对抑制本领均是相对于 100% β^- 衰变的跟随 γ 而

言的,即对此情况相对抑制本领恒等于 1. 记相应的 R_s 为 $R_s^{e^-}$, 则有:

$$R_s^{e^-} = 1; \quad C_i = I_i / I_a. \quad (2)$$

由 (2) 式可得,相对于单谱 (a) 与 $4\pi \Delta E \beta$ 信号符合 γ 谱探测效率为

$$C_b = I_b / I_a, \quad (2.1)$$

加入反符合后的 γ 能谱探测效率为:

$$C_c = I_c / I_a. \quad (2.2)$$

2) EC 衰变比例接近 100%. 这样一些 γ 射线可以用来定出探测系统对 EC 衰变跟随 γ 的相对抑制本领, 记作 R_s^{EC} :

$$R_s^{EC} = I_a \times C_b / I_b. \quad (3)$$

实际情况很难找到纯 100% EC 衰变 γ 源, 即使小比例的 β^+ 混杂也会对 R_s^{EC} 的确定带来较大影响. 在已知 β^+ 混杂成份 $f(\beta^+)$ 的情况下:

$$I_a = I_a^0 \times (1 - f(\beta^+)), \quad (3.1)$$

$$I_b = I_b^0 \times (1 - f(\beta^+)) \times C_b, \quad (3.2)$$

I_a^0, I_b^0 即为该 γ 射线在图 1 (a)、(b) 中的峰下计数.

表 1 探测系统性能测试的一组典型结果

性能参数 ⁽¹⁾	测试源 γ (keV)	测试值
R_s^{EC}	¹⁵² Eu 121.78	17.0
	¹⁹² Hg 275.0	14.4
$R_s^{e^-}$	²² Na 1275	2.4
	¹⁸⁶ Hg 112.1 ⁽²⁾	2.9
C_b	¹⁵² Eu 344.8	51.3%
C_c		46.6%
C_b	¹⁵² Eu 778.9	53.0%
C_c		46.9%

(1) 各参数定义见正文; (2) 参考文献[6]; 其余见文献[5].

$$I_b = I_a^0 \times C_b \times f(EC) / (f(EC) + f(\beta^+)), \quad (4.3)$$

按照上述原理, 我们从用于测试的 γ 源 ¹⁵²Eu、²²Na 以及通过核反应化学分离样品得到 ¹⁹²Hg、¹⁸⁶Hg 的某些特征 γ 射线, 定出探测系统有关参数 (见表 1).

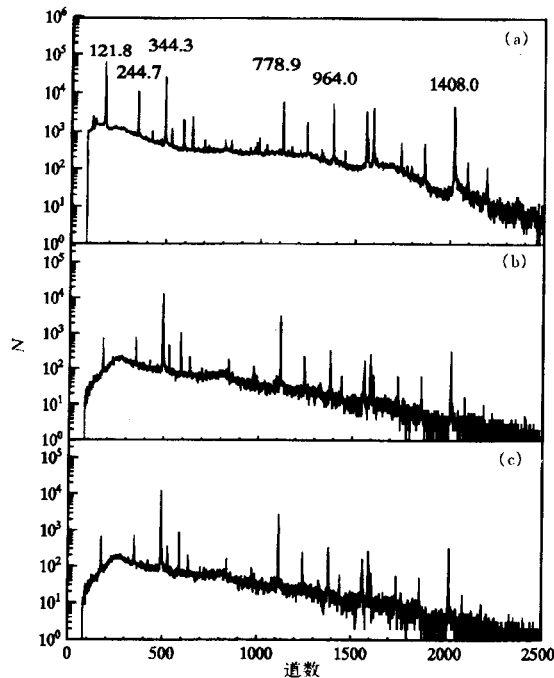


图 1 ¹⁵²Eu γ 源测试谱

(a) HPGe 探测器输出 γ 单谱; (b) 与 $4\pi \Delta E \beta$ 信号符合的 γ 能谱; (c) 符合的 γ 谱与 BGO 输出的 511 keV 能量窗内信号反符合能谱. 主要的 γ 峰已指出 (单位 keV).

3) $\beta^+ + EC$ 衰变. 当确知某一 γ 射线对应的两种 β 衰变馈入成份 β^+, EC 的相对比 $f(EC), f(\beta^+)$. 且 β^+ 占有不可忽略成份的情况下, 即可用来确定对 β^+ 衰变跟随 γ 的相对抑制本领 $R_s^{e^+}$:

$$R_s^{e^+} = I \times C_c / I_c. \quad (4)$$

按照与第二种情况类似的方法, 可推得:

$$I = I_a^0 \times f(\beta^+) / (f(EC) + f(\beta^+)), \quad (4.1)$$

$$I_c = I_c^0 - I_b \times C_c / C_b, \quad (4.2)$$

4 ^{208}Hg 半寿命测定

作为这一探测系统实际应用之一例,我们给出用此系统重新测定丰中子同位素 ^{208}Hg 半寿命的结果.

在文献[7,8]中,我们已经给出 ^{208}Hg 同位素的鉴别程度,及第一次半寿命测量结果.限于可利用束流条件限制,当时合成 ^{208}Hg 使用的反应是30 MeV/u的 ^{12}C 束轰击厚的天然铅靶.用离线的熔化铅靶气相热色谱方法将生成的Hg元素产物分离出来^[9].由于用 γ 单谱测量无法观察到 ^{208}Hg 或其子体的衰变 γ 线, ^{208}Hg 的鉴别是借助于放射化学挤奶法,即用液体化学方法周期性地萃取出其衰变子体Tl,用多定标数据获取技术观测 ^{208}Hg 子体 ^{208}Tl 衰变特征 γ 而实现的^[7,8].

本实验采用总动能为600 MeV的 ^{18}O 束轰击厚的天然铅靶,预计 ^{208}Hg 生成截面较用 ^{12}C 束作轰击炮弹时会有较大提高.在束条件下分离并收集Hg元素产物^[10].束流辐照,亦即产物收集持续100 min,产物被收集到一10 mg/cm²的金箔上,而后将此金箔样品放入本探测系统的测试样品位置(见第二节),测时间序列 γ 谱,同时记录下单谱,与 $4\pi\Delta E\beta$ 符合谱以及加入反符合后的 γ 能谱.在单谱中, ^{208}Hg 及其子体 ^{208}Tl 的衰变 γ 射线不能显现出

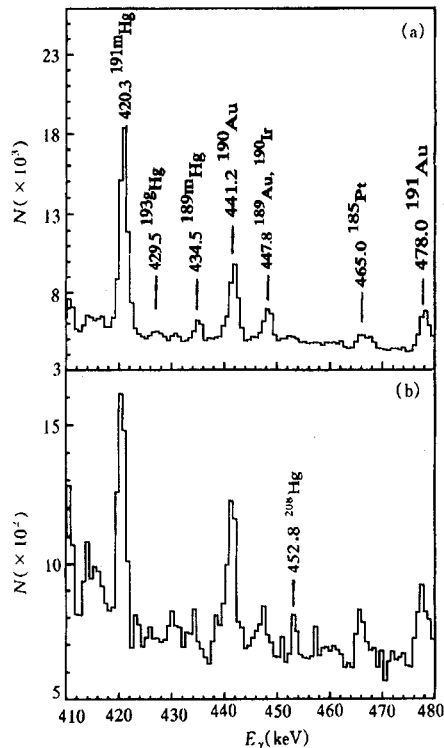


图2 ^{208}Hg 鉴别测量的单谱(a)和符合反符合后的 γ 谱(b)的比较

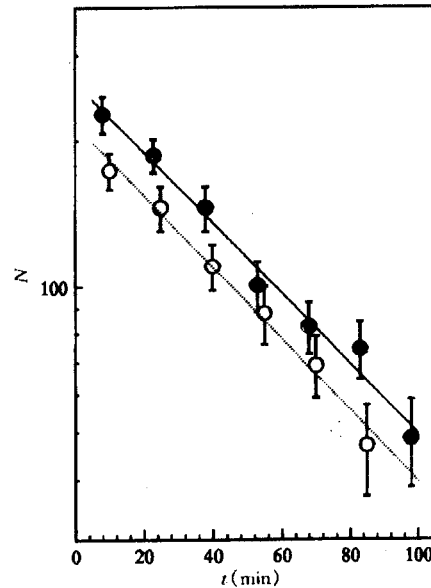


图3 分离的元素样品中观察到的452.8 keV和583.1 keV两条 γ 射线的时间衰减曲线

● 452.8 keV, $T_{1/2} = 41.5_{-4.1}^{+5.0}$ min;
○ 583.1 keV, $T_{1/2} = 40.9_{-7.3}^{+11.5}$ min;

本底以上, 但将符合及反符合加入后, 某些较强衰变 γ 射线便显示出来了。

图 2 是单谱 (a) 与加入抑制措施所得结果谱 (b) 的一个比较。到目前为止 ^{208}Hg 核的 β^- 衰变纲图尚未见报道, 但是其子核 ^{208}Tl 的一些低位态能级结构已从 ^{212}Bi 的 α 衰变研究得到部分确认。其中能量为 452.8 keV 的 γ 射线是 α 衰变跟随 γ 中分支比最高的^[6]。这条线在单谱 (a) 中被淹没在康普顿本底下, 但在加入抑制措施所得结果谱 (b) 中清晰可见。452.8 keV γ 射线的符合特性表明, 它很可能是尾随着丰中子核的 β^- 衰变, 因此有理由将其归结为一条 ^{208}Hg β^- 衰变跟随 γ 射线。同时也观察到子核 ^{208}Tl 的一条能量为 583.1 keV 的衰变 γ 射线。由于子核 ^{208}Tl 的半寿命 ($T_{1/2} = 3.053 \text{ min}$)^[2] 与母核 ^{208}Hg 的寿命相比非常短, 以及它唯一地来源于 ^{208}Hg 衰变, 因此它的衰变 γ 射线的时间衰减也同样能给出 ^{208}Hg 的半衰期。452.8 keV 和 583.1 keV 两条 γ 射线的时间衰减曲线示于图 3。两条 γ 射线所定出的 ^{208}Hg 的半衰期分别是 $41.5^{+5.0}_{-4.1} \text{ min}$ 和 $40.9^{+11.5}_{-7.3} \text{ min}$, 在误差范围内与以前用放射化学挤牛奶方法所得到的结果 $42^{+23}_{-12} \text{ min}$ ^[7,8] 一致。测量误差有较大改进。

5 结论和讨论

本工作所发展起来的特殊探测系统, 在探测元素分离样品中弱的丰中子 γ 活性中已被证明是特别有效的。它能使总的 γ 谱测量本底下降约一个数量级, 并强烈抑制缺中子同位素的 EC + β^+ 衰变跟随 γ 的探测。在此同时, 对丰中子同位素 β^- 衰变跟随 γ 的探测却能在较宽的能量范围保持相对于 γ 单谱测量为 $(46 \pm 3)\%$ 的效率。

由于 $4\pi\Delta E\beta$ 探测器大的覆盖立体角, 且塑料闪烁体对 β 射线能损信号的探测效率可认为是 100%, 使得对 EC 衰变跟随 γ 的探测抑制显得格外有效。相比之下, 由于探测正电子湮灭 511 keV γ 射线的 BGO 探测器覆盖立体角比 2π 张角小得多, 加之, 对 γ 射线探测效率的影响, 本系统对 β^+ 衰变跟随 γ 的抑制尚不够理想。此外, 由于 BGO 探测器较差的能量分辨, 反符合过程中, 对与能量落入 511 keV 能量窗内的 γ 射线相级联的 γ 线的探测也会产生某些抑制效应, 但对这部分 γ 的抑制最多也只能相当于对 β^+ 衰变 γ 抑制效果的一半, 本工作对此未做详细研究。

感谢兰州重离子加速器人员的大力支持。

参 考 文 献

- [1] 张 立, 核物理动态, **8**(1991)7.
- [2] 戴光曦等, 核素图册, 科学技术出版社重庆分社(1987).
- [3] 王积成等, 高能物理与核物理, **19**(1995)653.
- [4] 梅镇岳, 原子核物理, 科学出版社(1961).
- [5] Table of Isotope, 7th ed., Edited by C. M. Lederer *et al.*, Wiley, New York, 1978.
- [6] M. G. Porquet *et al.*, *Nucl. Phys.*, **A411**(1983)65.
- [7] Zhang Li *et al.*, *Phys. Rev.*, **C49**(1994)R599.
- [8] 张 立等, 高能物理与核物理, **18**(1994)296.
- [9] Zhao Jinhua *et al.*, *Chin. J. of Nucl. Phys.*, **14**(1992)267.
- [10] Zhao Jinhua *et al.*, Annual Report of IMP, (1995)150.

Detection of Weak γ -Activities of Neutron-Rich Isotopes in Element-Separated Sample

Zhang Li Wang Jicheng Zhao Jinhua Yang Yongfeng
Zheng Jiwen Qin Zhi Zhang Chun Guo Tianrui

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

Received 17 October 1996

Abstract

A new detection system was constructed by means of combination of a coincidence and an anticoincidence. The γ -ray energy signals detected by a HPGe detector were in coincidence with energy-loss signals of β rays detected by a $4\pi\Delta E\beta$ detector, then the coincidence output were in anticoincidence with the positron-annihilating 511 keV γ signals detected by a large BGO detector. This system may reduce the Compton background for γ -spectrum measurement by about one order of magnitude. With strong suppression to the detection of the decaying γ rays from neutron-deficient isotopes, the detection of the decaying γ rays from neutron-rich isotopes can keep a higher efficiency of $(46 \pm 3)\%$ compared to single-spectrum measurement. This system was used for determining the half-life of the neutron-rich isotope ^{208}Hg . A new value of $41.5^{+5.0}_{-4.1}$ min was obtained, which is in agreement with the earlier value obtained by radiochemical milking method, but the measurement error was substantially improved.

Key words neutron-rich isotope, $\text{EC} + \beta^+$ decay, coincidence, half-life.