

28MeV/u¹⁸O 与全阻止厚天然铅靶反应中 丰中子汞同位素的截面测量*

王积成 张立 郭光辉 赵进华 郑纪文

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

1994-06-10 收稿

摘 要

本次实验利用 28MeV/u 的 ¹⁸O 束流和一套在线熔化铅靶装置以及 $4\pi\Delta E_{\beta}$ - γ 符合技术,测量了该中能重离子反应中丰中子汞同位素 ²⁰⁵⁻²⁰⁸Hg 生成的相对截面比以及绝对截面的近似值。并外推出了 ²⁰⁹Hg 的可能生成截面。发现由靶核 ²⁰³Pb 削裂两个质子添加一个中子而生成 ²⁰⁷Hg 的截面有一个突然的比较大的下降,这可以由反应的 Q 值的变化规律得到解释。

关键词 在线熔化铅靶,相对截面,转移反应,衰变曲线。

对重离子炮弹在中子数较为富集的同位素靶上引起的奇异的转移反应的研究,使人们对原子核的认识向着中子滴线的丰中子区域拓展。但是,到目前为止,对低能重离子引起的转移反应,已经做了许多研究,积累了比较丰富的实验数据^[1-3],而对中能重离子引起的转移反应生成类靶丰中子核素的研究,却还缺少比较有说服力的数据。利用中能重离子引起的转移反应生成丰中子类靶或类弹产物是合成新丰中子核素并研究其衰变性质的有利手段,而通过对已知丰中子同位素在中能重离子转移反应中的生成截面的系统测定以及通过对其截面变化规律的观察,可以外推出未知丰中子核在该反应中可能的生成截面,这对我们在实验中选择目标核及其弹靶组合具有非常重要的指导意义。所以,中能重离子转移反应中类靶丰中子产物生成截面的测量和同位素分布的系统测定,无论对中能重离子反应机制的研究,还是对合成新的丰中子核素及衰变性质的研究都具有非常重要的指导意义。

IMP 的杨维凡等人利用放射化学的方法系统研究了 $47\text{MeV/u}^{12}\text{C} + ^{133}\text{Cs}, ^{209}\text{Bi}, ^{197}\text{Au}$ 反应中类靶产物 I、Pt、Au、Hg 同位素的生成截面,得到了比较好的结果^[4,5]。但是,这种方法的一个缺点是对中能重离子反应中生成的异常丰富的同位素的分离不可能十分干净,造成 γ 谱异常复杂,本底很高且缺中子一边截面比较高,所以对低截面的丰中子一边不能够测得比较远。例如,他们对汞同位素在丰中子一边仅仅测到了 ²⁰³Hg,这就使得他们的结果具有一定的局限性。我们利用一套热色谱式分离产物的在线熔化铅靶装置^[7]和

* 国家自然科学基金和中科院八五重大课题双重资助项目。

$4\pi\Delta E_{\beta}-\gamma$ 符合技术^[8],高效率、高选择性地收集到了 $28\text{MeV}/\text{u}^{18}\text{O}$ 束流轰击厚的天然铅靶反应中生成的汞元素,在测量中抑制了来自缺中子汞同位素的谱线,高效率地探测丰中子核,从而测量了丰中子汞同位素 $^{205-208}\text{Hg}$ 的相对截面比和绝对截面的近似值,外推出了 ^{209}Hg 的可能的生成截面。这对我们进一步合成并确证丰中子新核素 ^{209}Hg 打下了良好的基础。

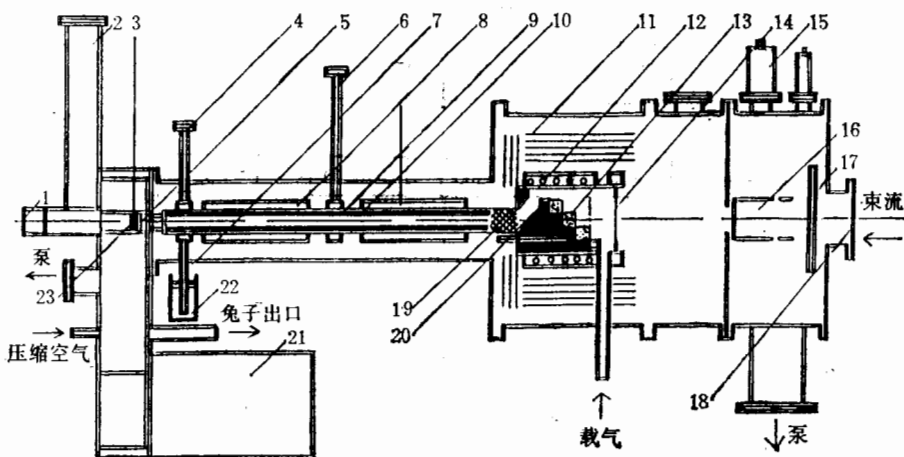


图 1 实验中所用的在线熔化铅靶装置结构示意图

- 1.电磁驱动器 2.收集器盒 3.橡胶垫圈 4.半导体温度传感器 5.金收集箔 6.热偶 7.冷却棒 8.加热器 9.热色谱传输管 10.Ta 箔 11.热屏蔽套 12.加热炉 13.梯形靶室 14.靶窗 15.真空规管 16.法拉第桶 17.束流监视器 18.束流窗 19.石英毛 20.W-Re 热偶 21.步进电机 22.液氮 23.跑兔

本文报告了利用 $28\text{MeV}/\text{u}^{18}\text{O}$ 束流轰击厚的天然铅靶(靶厚 $500\text{mg}/\text{cm}^2$) 生成丰中子汞同位素的相对截面比和绝对截面的近似值。实验利用了兰州重离子加速器 SSC 上的 ^{18}O 束和一套特殊的在线熔化铅靶装置。在线熔化铅靶装置的结构如图 1 所示,这套在线熔化铅靶装置是在原来成功的用于合成鉴别 ^{208}Hg ^[6] 的那套离线熔化铅靶装置^[7] 的基础上发展起来的。在产生、挥发、传输、分离和收集汞同位素方面,两者在原理上是一致的。只不过在线熔化铅靶装置使以上全部过程均在束条件下完成。为了能够使得熔化铅靶装置适应于在束的情况,对原来的离线熔化铅靶装置做了两点改进:第一是使用了一个阶梯式的石墨靶盒,有效靶面积为一个直径 25mm 的圆;第二是收集器用 $10\text{mg}/\text{cm}^2$ 的金箔代替了原来的氧化银粉末。这就使得收集器能够被自动传送到低本底的测量站。在整个实验过程中,靶箱温度被非常严格地控制在 $630^\circ\text{C}-650^\circ\text{C}$,而传输管冷端的温度被控制在 -10°C 至 -20°C ,这就使得反应中直接产生的 Bi、Tl 等核素不能被传输到收集器而被收集到金箔上,只有汞才能通过传输管到达收集器而被收集到金箔上。

在低本底的铅室里面,安放了一个 $4\pi\Delta E_{\beta}$ 探测器和一个高纯锗 γ 探测器, $4\pi\Delta E_{\beta}$ 探测器由两块 0.5mm 厚、直径 25mm 的国产 ST401 型塑料闪烁体构成,两块塑料闪烁体间隔 1.6mm ,收集到汞的金箔利用一块插板放置到两块塑料闪烁体之间的中心位置,高纯锗探头距离样品 20mm 。 $4\pi\Delta E_{\beta}-\gamma$ 符合测量可以将来自电子俘获的 γ 射线强度抑制 $25-30$ 倍,但对来自 β^- 和 β^+ 衰变的 γ 射线具有 60% 的探测效率。 $4\pi\Delta E_{\beta}-\gamma$ 符合谱中

平均康普顿本底水平比 γ 单谱降低了3—5倍^[8]. HpGe 探头效率为40%, 对1.332MeV γ 线分辨为2.2keV.

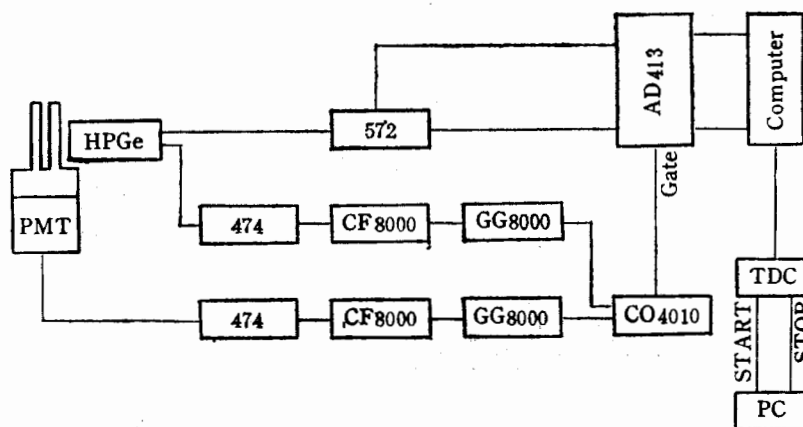


图2 实验中探测器几何布局及所用的电子学线路

利用图2所示的探测器几何布局和电子学线路, 将 $4\pi\Delta E_{\beta-\gamma}$ 符合谱和 γ 单谱同时由微机获取系统以时间序列谱的形式记录下来. 实验共照射和收集了60个样品, 其中58个样品照射时间为200s, 测量时间根据丰中子汞同位素半衰期的不同分为三组, 依次分别为20, 10和5min. 有两个样品照射了40min, 测量了90min, 以便观测寿命较长的 ^{208}Hg . 实验中间隔性地用 ^{152}Eu 源进行了能量刻度和效率刻度.

表1 鉴别和计算中所使用的汞同位素的衰变性质

同位素	半衰期 (min)	主要 γ 射线能量 (keV)	分支比(%)
^{203}Hg	5.2	203.7	2.2
^{206}Hg	8.15	304.8	27
^{207}Hg	2.9	351	76.6
^{208}Hg	42	473.5	67
^{187}HgG	2.2	203.4	18.9
		205.5	10.4
		233.4	100
		305.7	4
^{189}HgA	7.6	203.8	71
		248.5	95
^{189}HgB	8.6	351.6	4.8
		565.5	48

实验结束后, 在计算机上利用一套程序对所获取的数据进行了处理. 首先对丰中子汞同位素 $^{203-208}\text{Hg}$ 的存在进行了鉴别, 表1列出了鉴别中所使用的汞同位素的衰变性质

质^[9]。在一套由若干样品相加所得 γ 单谱的时间序列谱中,由 203.7keV γ 峰中按分支比和探测效率扣除来自 ^{187}Hg 和 ^{189}Hg 的贡献,便得到了 ^{205}Hg 的成份,从而得到了 ^{205}Hg 的衰变曲线,所得半衰期在误差范围内与已知结果符合得很好。在 304.8keV γ 峰中按分支比与探测效率扣除来自 ^{187}Hg 的贡献便得到 ^{206}Hg 的衰变曲线。利用同样的办法得到了 ^{207}Hg 和 ^{208}Hg 的衰变曲线,所得半衰期均在实验误差范围内与已知值很好地符合。图 3 给出了 $^{205-208}\text{Hg}$ 的衰变曲线。有了衰变曲线以后,在同一个 γ 单谱中,便可得到 $^{205-207}\text{Hg}$ 的相对截面比,因为在照射时间和测量时间都比较短的谱中观察不到 ^{208}Hg ,而在照射时间和测量时间都比较长的谱中观察不到 $^{205-207}\text{Hg}$,所以利用截面较大寿命适中的 ^{189}HgB 作为过渡,通过它的 γ 线 565.5keV 在一套短时间谱中测得它与 ^{207}Hg 的截面比,再在一套长时间谱中测得它与 ^{208}Hg 的截面比,于是便可得到 ^{207}Hg 和 ^{208}Hg 的相对截面比。

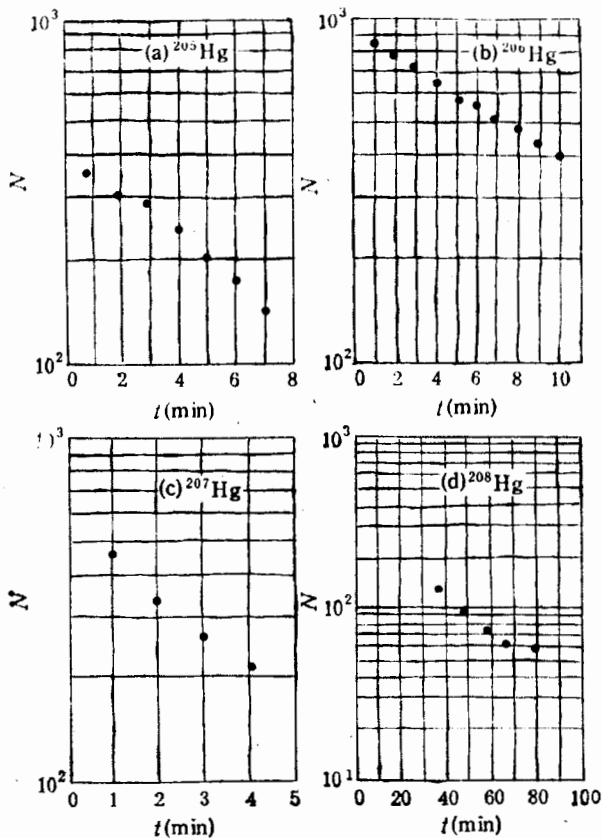


图 3

(a) ^{205}Hg 的 203.7keV γ 线的衰变曲线 (b) ^{206}Hg 的 304.8keV γ 线的衰变曲线 (c) ^{207}Hg 的 351keV γ 线的衰变曲线 (d) ^{208}Hg 的 473.5keV γ 线的衰变曲线

结果表明, ^{205}Hg 与 ^{206}Hg 相对截面比为 3.3, ^{206}Hg 与 ^{207}Hg 相对截面比为 7, ^{207}Hg 与 ^{208}Hg 相对截面比为 3。这就是说从 $-2p-1n$ 反应到 $-2p$ 反应,截面下降比较平缓,

而从 $-2p$ 反应到 $-2p+1n$ 反应,截面有一个突然的比较陡的下降,但从 $-2p+1n$ 反应到 $-2p+2n$ 反应,截面下降又变得比较平缓。这一变化规律除了从反应的 Q 值的变化能得到一些启示外,目前尚找不到合理的解释,但是,我们仍然可以从这一趋势外推出 ^{209}Hg 在这一反应中的可能生成截面。

实验中对束流强度没有做精确测量,只是做了间歇性的监测,所以这里只能取一个平均值为 18nA ,在线熔化铅靶装置的传输效率也没有做精确测定。取固定值为 30% ,利用下列公式便可计算出 ^{205}Hg 的绝对截面的近似值。

$$\sigma = S\lambda/[IN_s\epsilon_1\epsilon_2\eta(1 - e^{-\lambda t_1})(e^{-\lambda t_2} - e^{-\lambda t_3})],$$

这里 S : γ 峰面积; λ :核素衰变常数; I :平均束流强度; N_s :单位面积靶核数; ϵ_1 :探头绝对探测效率; ϵ_2 :收集效率; η : γ 分支比; t_1 :照靶时间; t_2 :卸靶至开测时间间隔; t_3 :卸靶至测谱结束时间间隔。有了 ^{205}Hg 的绝对截面的近似值,利用相对截面比,便可分别得到 $^{205-208}\text{Hg}$ 的绝对截面近似值以及外推出的 ^{209}Hg 截面的可能值,将计算结果与反应 Q 值共同列于表2。

表2 $28\text{MeV/u } ^{18}\text{O} + ^{208}\text{Pb}$ 反应中中子汞同位素 $^{205-209}\text{Hg}$ 截面

反 应	产 物	$Q_{\text{ss}}(\text{MeV})$	平均截面 (μb) ^{na}Pb ^{208}Pb	
$^{18}\text{O} + ^{208}\text{Pb}$	^{205}Hg	5.495	272	473
$^{18}\text{O} + ^{208}\text{Pb}$	^{206}Hg	5.462	82	150
$^{18}\text{O} + ^{208}\text{Pb}$	^{207}Hg	-8.035	11.8	21
$^{18}\text{O} + ^{208}\text{Pb}$	^{208}Hg	-13.84	4.1	6.7
$^{18}\text{O} + ^{208}\text{Pb}$	^{209}Hg	-29.71	1 左右	2 左右

需要指出的是,相对截面比的计算具有比较高的精确度,而绝对截面的计算由于两个估计因素,所以精确度难以评说。但是与反应 Q 值的变化趋势相比较,可以看出我们所得的结果是合理的。

表3 $11.4\text{MeV/u } ^{208}\text{Pb} + ^{nat}\text{W}$ 和 $11.4\text{MeV/u } ^{209}\text{Bi} + ^{nat}\text{W}$ 反应中 ^{205}Hg 、 ^{206}Hg 生成截面

反 应	产 物	转移核子	产物截面
$^{208}\text{Pb} + ^{nat}\text{W}$	^{205}Hg	$-2p-1n$	1.1mb
$^{208}\text{Pb} + ^{nat}\text{W}$	^{206}Hg	$-2p$	$372\mu\text{b}$
$^{209}\text{Bi} + ^{nat}\text{W}$	^{205}Hg	$-3p-1n$	$300\mu\text{b}$
$^{209}\text{Bi} + ^{nat}\text{W}$	^{206}Hg	$-3p$	$43\mu\text{b}$

表3列出了GSI利用 $11.4\text{MeV/u } ^{208}\text{Pb} + ^{nat}\text{W}$ 反应和 $11.4\text{MeV/u } ^{209}\text{Bi} + ^{nat}\text{W}$ 反应中 ^{205}Hg 、 ^{206}Hg 的生成截面^[10,11],可以看出尽管类弹产物截面比我们的类靶产物截面要高,但 ^{209}Bi 炮弹对生成更丰中子核素却是不利的,而 $11.4\text{MeV/u } ^{208}\text{Pb} + ^{nat}\text{W}$ 反应中 ^{205}Hg 、 ^{206}Hg 生成的相对截面比与我们的实验所得结果是一致的。

参 考 文 献

- [1] Ph. Dessagne et al., *Nucl. Phys.* **A426**(1984) 399.
- [2] K. Moody et al., *GSI Scientific Reports*, (1984) 93.
- [3] A. Turler et al., *GSI Scientific Reports*, (1984) 95.
- [4] 杨维凡等, 高能物理与核物理, **17**(1993)873.
- [5] 杨维凡等, 核物理动态, **10**,(1993)25.
- [6] Zhang Li et al., *Phys. Rev.*, **C49**(1994)27.
- [7] Zhao Jinhua et al., *Chin. J. of Nucl. Phys.*, **14**(1992) 267.
- [8] 王积成等, 高能物理与核物理, **19**(1995) 653.
- [9] Table of Lsotopes, 7th ed, edited by C. Michael Lederer and Virginia S. Shirley (Wiley, New York, 1978).
- [10] Ch. Wennemann et al., *Z. Phys.*, **A347**(1994) 185.
- [11] Meissner et al., *GSI Scientific Report*, (1992) 19.

Cross Section Measurements of Neutron-Rich Hg Isotopes in Reaction of 28MeV/u¹⁸O with Thick Natural Lead Target

Wang Jicheng Zhang Li Guo Guanghui

Zhao Jinhua Zheng Jiwen

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

Received 10 June 1994

Abstract

By using 28MeV/u¹⁸O beam, an on-line melting lead target equipment and 4 π - ΔE_{β} - γ coincident technique, the relative cross section ratios and absolute cross sections of neutron-rich nuclides ²⁰⁵⁻²⁰⁸Hg have been measured. The production cross section of ²⁰⁹Hg is extrapolated. The cross section of ²⁰⁷Hg produced by $-2p + 1n$ from target decreases suddenly, which may be explained by change of reaction Q value.

Key words on-line melting lead target, relative cross section, transfer reaction, decay curve.