

600MeV $^{18}\text{O} + ^{\text{nat}}\text{Pb}$ (厚靶) 系统生成 Hg 同位素独立产额测量(II) 结果与分析*

张立 郑继文 赵进华 秦芝 杨永峰 胡青元 张纯
王积成 郭天瑞 靳根明

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

摘要 报道了 600MeV ^{18}O 轰击 $^{\text{nat}}\text{Pb}$ (厚靶)生成的质量数在 180—209 之间的 Hg 同位素产物独立截面的测量结果. 通过与 600MeV 质子轰击天然铅靶生成 Hg 同位素产额分布的比较, 讨论了几个质量区段 Hg 同位素的生成机制. 测量结果也与相对论重离子碎裂反应双质子移出道的产额分布进行了比较. 结果表明, 中能重离子与中子较富集靶核组成的反应系统对生成丰中子类靶余核具有较明显的优势.

关键词 同位素分布 独立截面 反应机制

1 引言

在中能或相对论重离子反应产物分布的研究中, 尽可能多的获得独立产额是许多工作孜孜以求的目标. 因为独立产额分布与炮弹与靶核之间碰撞条件及随后的蒸发过程结束时刻的产物分布相对应, 而该时刻的分布则可以与碰撞过程中核核相互作用系统的激发、能量与角动量的转移及激发核的退激建立直接联系^[1,2].

关于相对论重离子引起的靶碎裂与高能质子散裂反应靶产物的比较已有过许多研究, 并从中引出了所谓极限碎裂和因子化现象^[1,3,4]. 极限碎裂是指炮弹总动能在某一阈值之上, 靶余核的分布变得与能量近似无关. 因子化是指质子与较轻重离子引起的反应中所产生的相同靶碎片的截面之差只在于一个常数因子, 其大小接近于质子与较轻重离子引起的反应总截面之比^[2,4]. 目前普遍认为入射粒子总能量在 2GeV 以上时, 上述二规律是充分满足的^[1,4]. 在中等能量区的质子和重离子引起的反应产物的详细比较, 特别是近靶产物的比较, 数据还相当缺乏. 本工作所提供的 600MeV ^{18}O 轰击 $^{\text{nat}}\text{Pb}$ 靶所得的汞同位素分布, 可以与由西欧中心 (CERN) 的 600MeV 质子引起的同一反应的结果^[5,6]进行比

1997-10-21收稿, 1998-04-10收修改稿

* 国家自然科学基金(19575056)和中国科学院重大项目资助

较,并为理解重离子核反应与高能质子反应的类靶产物分布随轰击能量的变化提供了一套较好的实验数据.本文中所得的同位素分布也与1GeV/u的¹⁹⁷Au轰击²⁷Al靶产生的相应于双质子移出反应道生成的Ir同位素的分布^[7]进行了比较,对理解相对论重离子的周边反应过程与中能重离子周边过程的差异提供了重要实验数据.有关实验方法通过递次衰变子体 γ 活性的测量来提取第一代产物截面的原理方法和截面提取技术已在文献[8,9]中有详细描述.

2 测量结果

本工作得出从¹⁸⁰Hg至²⁰⁹Hg共计22种放射性汞同位素的生成截面,每种汞同位素截面提取时所使用的 γ 射线、厚靶平均截面测量值、误差以及相关信息列于表1中.截面值

表1 600MeV¹⁸O + ^{nat}Pb(厚靶)系统生成汞同位素产物平均截面

Hg同位素 质量数A	半衰期 $T_{1/2}^{[10]}$	使用的特征 γ 射线 能量(keV) ^[11]	测量截面 (μ b)	Hg同位素 质量数A	半衰期 $T_{1/2}^{[10]}$	使用的特征 γ 射线 能量(keV) ^[11]	测量截面 (μ b)
180	3.0s	¹⁸⁰ Re-902.8	17 \pm 5.4			¹⁹⁰ Au-296	704 \pm 127
181	3.6s	¹⁸¹ Ir-107.6	55 \pm 14 ^{a)}	191g	49min	^{191g} Au-277.9	542 \pm 95 ^{a)}
		¹⁸¹ Re-365.5				^{191g} Au-284.1	
182	10.8s	¹⁸² Au-154.9	38 \pm 18 ^{a)}	191m	50.8min	^{191m} Hg-578.8	584 \pm 80
		¹⁸² Ir-127.1		192	4.85h	¹⁹² Hg-274.8	1327 \pm 200
183	9.4s	^{183g} Os-381.8	36 \pm 11			¹⁹² Hg-306.6	1255 \pm 196
		^{183m} Os-1102.0	32 \pm 9.7			¹⁹² Au-316.5	1092 \pm 273
184	30.6s	¹⁸⁴ Hg-156.0	82 \pm 16 ^{a)}	193g	3.80h	^{193g} Hg-861.1	451.5 \pm 90
		¹⁸⁴ Hg-236.2		193m	11.8h	^{193m} Hg-573.3	391.8 \pm 78
		¹⁸⁴ Au-163.2		193		^{193gm} Hg-258.0	848 \pm 127
185	49.1s	¹⁸⁵ Ir-1828.8	134 \pm 27	195g	9.9h	^{195g} Hg-180.3	1357 \pm 203
186	1.38min	¹⁸⁶ Hg-111.9	235 \pm 35			^{195g} Hg-779.8	1080 \pm 173
		¹⁸⁶ Hg-227.8	232 \pm 37	195m	41.6h	^{195m} Hg-560.3	475 \pm 70
		^{186g} Ir-434.8	161 \pm 32	197g	64.1h	^{197g} Hg-191.1	492 \pm 74
		^{186m} Ir-987.0	93 \pm 19	197m	23.8h	^{197m} Hg-133.9	1479 \pm 222
187+	2.4min	¹⁸⁷ Pt-709.2	277 \pm 50 ^{b)}	199m	49min	^{199m} Hg-374.1	299 \pm 60
187m	1.93min					^{199m} Hg-158.4	293 \pm 59
188	3.25min	¹⁸⁸ Hg-190.0	541 \pm 81 ^{a)}	203	46.6d	²⁰³ Hg-279	852 \pm 300 ^{c)}
		¹⁸⁸ Au-266.0		205	5.2min	²⁰⁵ Hg-203.7	460 \pm 115 ^{c)}
189g	7.6min	^{189m} Au-166.7	166 \pm 20	206	8.15min	²⁰⁶ Hg-305.1	81 \pm 16
189m	8.6min	^{189m} Au-166.7	449 \pm 72	207	2.9min	²⁰⁷ Hg-351.3	15.4 \pm 5
190	20min	¹⁹⁰ Hg-142.7	948 \pm 142	208	41min ^{d)}	²⁰⁸ Hg-583.1	5.0 \pm 1.8
		¹⁹⁰ Hg-171.5	1017 \pm 150	209	35s ^{e)}	²⁰⁹ Tl-465.1	1.8 \pm 0.6
		¹⁹⁰ Au-301.8	758 \pm 136			²⁰⁹ Tl-324.0	2.1 \pm 0.7

a) 两条或多条 γ 射线推算出截面的平均; b) g态和m态截面之和; c) 累积截面; d) 见参考文献[12]; e) 见参考文献[13].

的误差主要包括元素分离和收集总效率的涨落、熔化态铅靶材料密度的变化、束流漂移以及计数统计误差。

3 数据分析

本工作所给出的截面是对 ^{18}O 束流的轰击能量从 600MeV 至库仑位垒以及有效天然铅靶厚 $670\text{mg}/\text{cm}^2$ 所取的平均截面。在如此宽能量范围内包括的反应机制是相当复杂的。本文仅就与质子散裂反应及相对论重离子碎裂反应的比较对实验结果进行一些讨论。

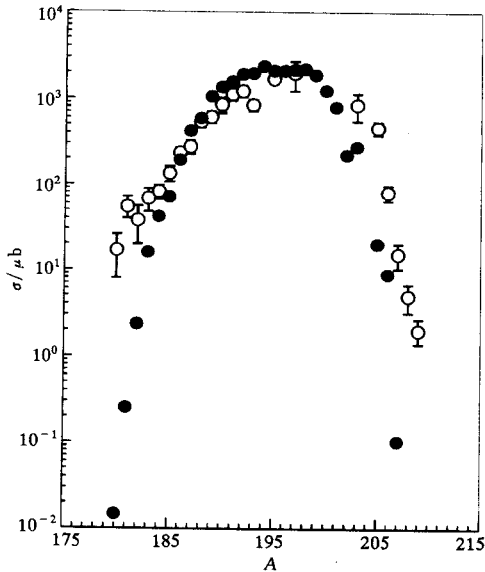


图 1 以 $600\text{MeV}^{18}\text{O} + {}^{208}\text{Pb}$ (厚靶) (空心圆点) 与 $600\text{MeV} p + {}^{208}\text{Pb}$ 所得 (实圆点) Hg 同位素分布^[6] 的比较

换言之,如果扣除掉平均轰击能量的影响,在实验误差范围内两组反应对应的质量分布峰附近的同位素生成截面可以认为基本一致。对质子束引起反应的这部分产物的生成机制可统称为高能质子散裂反应。对 ^{18}O 重离子束实际上是类熔合反应过程形成激发的双核或类复合核体系的蒸发余核。假设 $600\text{MeV}^{18}\text{O}$ 炮弹最可几的动量转移为总动量的 $2/3$, 扣除反应 Q 值后的类熔合最可几激发能约 300MeV , 以平均每核子蒸发消耗 $11\text{—}15\text{MeV}$ 激发能计,最可几蒸发核子数应在 $20\text{—}27$ 之间。类复合核体系质量数的最可几值按 $219\text{—}220$ 计,则最可几的蒸发余核大致在质量数 $190\text{—}200$ 之间,这恰与质量分布曲线具有较高截面的平台部分相对应。

(2) 质量数在 $A = 187$ 以下产物应来源于更高激发的复合核退激。由于本实验中 ^{18}O 束流的最高轰击能量为 $33.3\text{MeV}/u$, 导致很高激发的几率随激发能的提高而迅速下降,这与较低质量数的汞同位素的截面下降趋势相符。基于最低质量数为 180 的汞同位素的观察,可反推出伴随完全线性动量转移的高激发全熔合在本工作所研究的中能区(低能部

图 1 中显示出本工作所得出的 $600\text{MeV}^{18}\text{O}$ 轰击厚的全阻止天然铅靶所得到的汞同位素平均生成截面与 CERN 的在线同位素分离器上所测得的 600MeV 质子轰击厚 ($170\text{g}/\text{cm}^2$) 天然铅靶所得到的汞同位素产物平均截面^[6] 的比较。两实验所观察的汞同位素质量范围大致相同,所不同的是本工作是采用了核化学方法,故对无 γ 活性的生成核不能给出测量截面值。而 CERN 所使用的是测量分离器引出离子流的方法。仔细比较两组汞同位素产额分布,可以看出:

(1) 在质量分布峰附近,本工作所得截面系统地比 CERN 所得截面略低一点,这可归因于本实验使用的 ^{18}O 炮弹平均总能量(对 $600\text{—}70\text{MeV}$ 范围平均)比质子束对应的平均能量 ($600\text{—}335\text{MeV}$) 要低一些所致。

分的全熔合不能生成如此低质量数的类靶产物) 仍有相当的几率。

比较 $180 < A < 187$ 区的两组汞同位素生成截面, 质子引起反应测得的截面反而低于 ^{18}O 束引起的截面。这是比较费解的。一种可能的解释是 600—335 MeV 的质子与靶核相互作用形成全熔合系统的几率比 33.3 MeV/u 至 4 MeV/u 的 ^{18}O 炮弹的平均几率低得多。造成这种不同的另一可能的原因是实验条件的不同, 这将在下一节中讨论。

(3) ^{18}O 束流所得的分布比质子束所得的分布在丰中子汞同位素一侧明显地拓宽了, 表明了重离子束在生成丰中子重类靶余核方面具有明显的优势。其生成机制可归为准弹或深部非弹性碰撞中的多核子转移。因为丰中子类靶余核只能在导致较低激发的周边反应过程中生成。

图 2 中本工作所测得的汞同位素分布与 GSI 小组利用 1 GeV/u ^{197}Au 束轰击厚度为 $1.4\text{g}/\text{cm}^2$ 的 ^{27}Al 靶, 以碎片反冲分离器 (FRS) 所测得的 Ir 元素的同位素分布进行了比较。实验测得的 600 MeV ^{18}O 轰击 ^{208}Pb 厚靶的平均截面转化到 ^{208}Pb 靶的截面。转化的具体做法是首先将对 ^{208}Pb 靶所测得汞同位素分布曲线光滑 (光滑时考虑到了 ^{203}Hg 和 ^{205}Hg 截面为累积截面的因素), 而后假设实验所观测到的 ^{209}Hg 产物可唯一地归结为天然铅靶中的 ^{208}Pb 组份的贡献。这一假设的合理性可由以下两点来证实: 一方面由 ^{208}Pb 靶核生成 ^{209}Hg 的 $-2p + 3n$ 反应道的截面要高出由 ^{207}Pb 核生成 ^{209}Hg 的 $-2p + 4n$ 截面 3—4 倍; 另一方面 ^{208}Pb 同位素在天然铅靶中所占的组份 52.3% 高出 ^{207}Pb 所占组份 22.1% 1 倍以上, 二因素之积使这一假设在实验误差范围内是允许的。在同位素分布向 ^{208}Pb 靶核转换过程中, 对相同的 $-2p \pm xn$ 出射道, 忽略了截面对靶核质量数的响应。

由图 2(b) 可以看出, 随同位素产物与靶核质量数之差 ΔA 的加大, 相对论重离子碎裂截面对中、低能反应下减少同样质量数的类靶余核截面之比逐渐增加, 至 ΔA 为 20 附近达到最大的值 16.8; 此后随 ΔA 进一步加大比值反而下降, 至 $\Delta A \approx 25$ 附近趋近于 1。对 1 GeV/u ^{197}Au 轰击 ^{27}Al 靶反应系统, Ir 同位素分布的形成主要归结于核弹碎裂及伴随其后的中子蒸发, 其截面要比中能情况下类熔合复合系统中子蒸发过程截面高得多, 但可蒸发的最大中子数受到极限激发条件的制约, 导致在高 ΔA 时比例趋近 1。

4 问题与讨论

(1) 高能质子引起的缺中子近靶产物截面非常类似于总动能相同的中能重离子引起

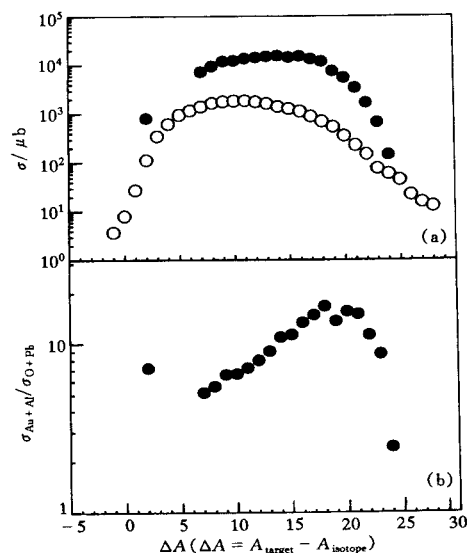


图 2 (a) 600 MeV ^{18}O 轰击 ^{208}Pb 厚靶的汞同位素产物分布 (空心圆点) 与 1 GeV/u $^{197}\text{Au} + ^{27}\text{Al}$ 反应 Ir 同位素分布^[7] (实心圆点); (b) 与 $-2p \pm xn$ 出射道对应的 ^{197}Au 弹核碎裂截面对 ^{208}Pb 靶余核截面之比

的类靶产物截面. 这一事实证实了高能质子束因其射程远高于中能重离子的射程, 可利用靶厚非常大, 在提供高强度近靶的放射性束方面具有明显的优势, 是重离子束不能替代的. 但质子引起的反应无法向靶核内添加中子, 在合成丰中子类靶余核上受到局限.

(2) 用中能重离子反应合成低于靶原子序数元素的新丰中子核的方法, 不仅相对于质子反应具有优势, 而且相对于相对论重离子碎裂反应也表现出一定的优势. 对合成和研究重质量丰中子区新丰中子核而言, 在今后相当的长时间内仍具有不可替代的作用.

(3) 在 $180 < A < 187$ 区, 对质子引起反应测得的截面值反而低于本实验所得到的截面值, 这也可能是由于两个靶系统产物释放时间的不同所致. CERN 所用熔化靶系统最低平均产物释放时间也要 $30\text{s}^{[5,14]}$, 必然导致短寿命产物的严重损失. 而本工作中, 由于采用了特殊的靶箱结构^[8], 估计释放时间小于 5s , 由释放延迟而造成短寿命产物的损失要小得多. 由于延迟时间准确测量的困难, 本工作所给出的截面值未对此项损失修正.

(4) 表 1 中所列出的 ^{193}Hg 平均生成截面值非常低, 超出误差范围. 其主要原因是可能从参考文献 [11] 上引用的 γ 射线强度有问题. 查阅了历年有关 ^{193}Hg 衰变纲图和 γ 射线数据^[15], 发现不同作者给出的主要 γ 射线相对强度相差很大. 这个核的 γ 衰变有待进一步研究.

参 考 文 献

- [1] Summerer K et al. Phys. Rev., 1990, C42:2546—2561
- [2] Dufouz J P et al. Nucl. Phys., 1982, A387:157c—175c
- [3] Hufner J. Phys. Rep., 1985, 125:129—185
- [4] Friedlandez E M et al. In: Treatise on Heavy Ion Science, edited by D.A. Bromley (plenum, New York) 1985, 4:424—451
- [5] Ravn H L. Phys. Rep., 1979, 54:201—259
- [6] Jonson B et al. CERN Report, 1981, 81—09:640—643
- [7] Schmidt K -H et al. Phys. Lett., 1993, B300:313—316
- [8] Zhao Jinhua et al. High Energy Phys. Nucl. Phys. (in Chinese), 1998, 22(10):959
(赵进华等. 高能物理与核物理, 1998, 22(10):959)
- [9] Zheng Jiwen et al. Nuclear Chemistry and Radiochemistry, to be published
- [10] Nuclear Wallet Card (Fifth edition), edited by JAGDISH K.TULI, National Nuclear Data Center for The U. S. Nuclear Data Network.
- [11] REUS U, Westmeiez W. Atomic Data and Nuclear Data Tables, 1983, 29:1—406
- [12] Zhang Li et al. Chin. Phys. Lett., 1997, 14:507—510
- [13] Zhang Li et al. Phys. Rev., 1998, C58:156—163
- [14] Ravn H L. Nucl. Inst. Meth., 1994, B88:441—461
- [15] Shirley V S. Nuclear Data Sheets, 1990, 61:521—621

**Independent Yield Measurement for the Hg-Isotope
Products From 600MeV¹⁸O + ^{nat}Pb (Thick Target) System
(II) Experiment Results and Analysis***

Zhang Li Zheng Jiwen Zhao Jinhua Qin Zhi Yang Yongfeng Hu Qingyuan
Zhang Chun Wang Jicheng Guo Tianrui Jin Genming

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

Abstract The average independent production cross sections of the radioactive Hg isotopes in the mass range of 180 to 209, produced in 600MeV-¹⁸O bombardment on ^{nat}Pb (thick target), were measured. The production mechanisms for the Hg-isotope products at different mass section were discussed by means of a comparison with the Hg-isotope distribution obtained in 600 MeV proton bombardment on ^{nat}Pb. The measurement results were also compared with the Ir-isotope distribution observed from relativistic ¹⁹⁷Au projectile fragmentation reaction. The present experiment results showed that using intermediate-energy heavy ion beams bombarding neutron-rich heavy targets is a favourable reaction to produce neutron-rich heavy residues.

Key words isotope distribution, independent cross sections, reaction mechanism

Received 21 October 1997, Revised 10 April 1998

* Supported by the National Natural Science Foundation of China (19575056) and Major Subject of the Chinese Academy of Sciences