

近垒能区 ${}^6\text{Li} + {}^{208}\text{Pb}$ 熔合激发函数测量*

吴岳伟 刘祖华 林承键 张焕乔 阮明
杨峰 李志常 刘建成
(中国原子能科学研究院 北京 102413)

摘要 测量了 ${}^6\text{Li} + {}^{208}\text{Pb}$ 熔合反应近垒能区全熔合截面, 并与考虑非弹道耦合和不考虑耦合的 CCFUS 程序计算做了比较. 结果表明在垒上能区, 破裂使熔合截面减小, 在垒下能区, 破裂对熔合截面的影响基本上可以忽略.

关键词 弱束缚核 熔合反应 破裂效应 PACE2 程序 CCFUS 程序

1 引言

近几年来, 人们对晕核和弱束缚核的近垒熔合反应很感兴趣, 特别是破裂对熔合截面的影响成为一个备受大家关注的问题. 我们知道, 中子晕的存在对晕核的熔合截面造成两方面可能的影响. 面使得晕核的核半径 $r_0 A^{1/3}$ 系统化值明显偏大, 从而使熔合位垒降低, 熔合截面增强; 另一方面又由于成晕核子的分离能较小, 使得晕核容易破裂, 可能会对熔合和其他一些反应道造成影响. 关于前一点, 理论上意见是一致的, 即晕核的核半径弥散增强了熔合截面. 但关于后一点, 目前却存在着不同的看法. 理论上一种观点认为破裂反应分走了熔合反应的一部分入射流, 所以会使熔合截面减弱^[1], 另一种观点从耦合道理论出发却认为破裂反应的发生, 相当于多开了一个反应道, 正如非弹性散射道与其他入射道的耦合会导致熔合截面增强一样, 破裂道与其他入射道的耦合也会导致垒下熔合截面增强^[2].

至于实验上, 人们对晕核垒下熔合反应的研究很早就开始了, 而破裂对熔合截面、熔合位垒分布的影响是其中的一项重要内容. 1997 年, 有人在美国的 NSCL 研究了 ${}^{38}\text{S} + {}^{181}\text{Ta}$ 体系的熔合一裂变反应, 发现 ${}^{38}\text{S}$ 的垒下熔合截面增强^[3]. 对于 ${}^{17}\text{F} + {}^{208}\text{Pb}$, 近垒熔合截面基本不变^[4]. 但是 1996 年和 1998 年在

日本 RIKEN 做的 ${}^9\text{Be} + {}^{209}\text{Bi}$ 和 ${}^{11}\text{Be} + {}^{209}\text{Bi}$ 实验, 也发现两个体系的熔合截面几乎没有多大差别, 破裂对熔合截面的影响似乎不大^[5,6]. 此后, 人们还研究了 ${}^6\text{He} + {}^{209}\text{Bi}$ ^[7] 和 ${}^{4,6}\text{He} + {}^{238}\text{U}$ ^[8] 体系, 得出的结论是垒下熔合截面增强. 从上述情况来看, 对这个问题, 目前不论理论上还是实验上都还没有定论, 需要通过做更多的实验来分析验证. 由于在目前条件下, 放射性束实验很难获得高精度的实验结果, 因此在本实验中我们用稳定的弱束缚核 ${}^6\text{Li}$ (分离能 $s_0 = 1.475\text{MeV}$) 来研究熔合反应中破裂对熔合截面的影响.

2 实验方法

实验是在中国原子能科学研究院的 HI-13 串列加速器上完成的. 准直的 ${}^6\text{Li}$ 束流轰击 ${}^{208}\text{Pb}$ 靶. 入射束 ${}^6\text{Li}$ 能量为 $25.75\text{ MeV} \leq E_{\text{cm}} \leq 39.00\text{ MeV}$, 能量步长为 0.576 MeV . 靶厚约 $350\mu\text{g}/\text{cm}^2$, 蒸发在 Cu 底衬上. Cu 底衬足够厚以保证反冲的蒸发残核全部阻止在 Cu 底衬内. 两个 Si 半导体探测器作为监视器安置在前角区 $\pm 24.3^\circ$ 处, 距离靶中心 $14.6 \pm 0.1\text{cm}$. 前置光栏孔径为 1.1mm , 测量弹性散射并作熔合截面归一. 在背角区 $+160^\circ$ 和 -160° , 距离靶中心分别为 6.4 ± 0.1 和 $6.8 \pm 0.1\text{cm}$ 处, 放置

2002-06-03 收稿

* 国家重点基础研究发展规划(G2000077400)资助

了两组 Si 半导体 $\Delta E-E$ 探测器望远镜,前置光栏孔径分别为 4.36 和 4.18mm,作蒸发核发射 α 粒子的在线测量. 每测量一个能量点换一次靶,换下来的靶放在真空罐里贴近孔径为 20mm 的 Si 半导体探测器作离线测量,测熔合核蒸发中子后的长寿命剩余核放出的 α 粒子.

${}^6\text{Li}$ 和 ${}^{208}\text{Pb}$ 完全熔合生成 ${}^{214}\text{At}$, ${}^{214}\text{At}$ 通过发射 1n, 2n, 3n, 4n 分别衰变成子核 ${}^{213}\text{At}$, ${}^{212}\text{At}$, ${}^{211}\text{At}$, ${}^{210}\text{At}$, 这些子核都是通过放射 α 粒子衰变的,因此可以根据其放出的 α 粒子能量及半衰期通过在线、离线测量来得到 ${}^{214}\text{At}$ 发射 1n, 2n, 3n, 4n 的截面. 把这些截面加起来即可得到本实验中所要的生成 ${}^{214}\text{At}$ 的全熔合截面.

图 1 是在线测量得到的二维谱开窗投影后的一维总能量谱. ${}^{211}\text{At}$ 衰变有二个分支,一个以 41.7% 的分支比衰变放出能量为 5.867 MeV 的 α , 如图中所示. 另一个分支通过轨道电子俘获衰变到 ${}^{211}\text{Po}$, ${}^{211}\text{Po}$ ($T_{1/2} = 0.516\text{ s}$) 再发射能量为 7.45 MeV 的 α 粒子. 这个分支放出的 α 粒子因与 ${}^{212}\text{At}$ 发射的 α 粒子(其 α 粒子能量为 7.681 MeV)能量相近而混进了在线谱的 2n 峰,所以在计算 2n 截面时必须把这一部分扣除. 另外,由于短寿命的 1n 蒸发道的统计太少,没法比较精确地从本底中扣出来,我们最后没有得到该蒸发道的截面,但这并不影响我们最后的结论. 因为通过在线和离线分析,我们发现全熔合截面的绝大部分贡献来自长寿命的 3n, 4n 蒸发道,短寿命的 2n 蒸发道截面对全熔合截面的贡献很小,而 1n 蒸发道截面比 2n 截面还要小 7—8 倍,所以可以不用考虑.

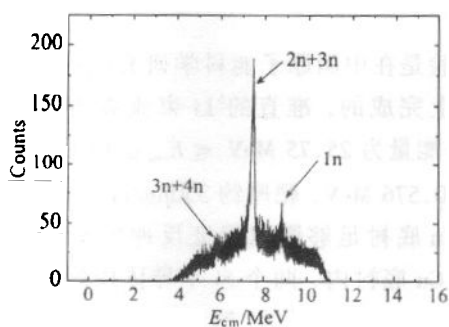


图 1 $\Delta E-E$ 半导体探测器在线测得的二维谱开窗投影所得的总能量谱

图 2 是最后一块靶辐照结束后放在靶室中做的离线测量谱. 从图中可以很明显看出三群不同能量的 α 粒子, 5.305 MeV 对应 4n 成分, $T_{1/2} = 138.38\text{d}$. 5.867 和 7.450 MeV 对应 3n 成分衰变的两个分支, $T_{1/2} = 7.214\text{h}$.

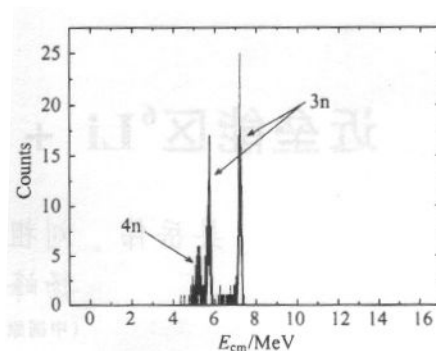


图 2 离线测量谱

图中 3 个峰分别对应 5.305, 5.867, 7.450 MeV.

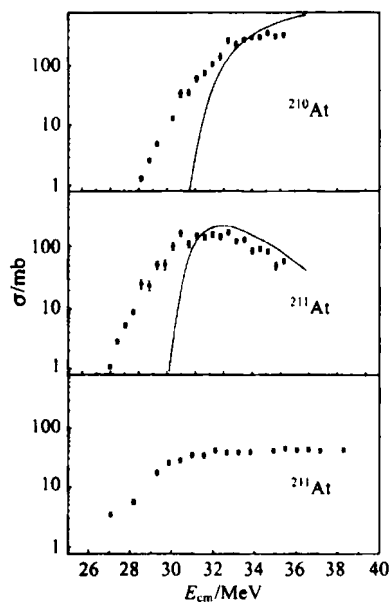


图 3 ${}^{214}\text{At}$ 蒸发中子分道截面.

实点为实验结果,实线为 PACE2 计算结果.

3 结果与讨论

本次实验测到的各分道截面如图 3 实点所示. 在统计模型 PACE2 程序计算中中子、质子、 α 粒子的系统化光学势参数都由程序自动给出,没有由外部输入可调参量. 对于 2n 分道截面,实验相对误差约 5%,主要来自拟合误差和统计误差. 对于 3n, 4n 分道截面,实验相对误差约 10%,主要来自系统误差,比如换下的靶放在低真空罐里作离线测量时所带来的立体角不确定以及由于真空度低而造成的分辨不足等. 根据统计模型 2n 截面垒上部分应该呈下降趋势,而在本实验中,这部分基本上是平滑的. 我们认为这主要是从 2n 峰中扣除 3n 成分没扣干净造成的. 因为要扣除 3n 成分,必须先通过离线测量计算 3n 截面,而由于本实验中离线测量误差较大,所以

扣的误差也较大.好在 $2n$ 截面对高能区的全熔合截面贡献不大,所以这个误差对全熔合截面的影响也不大.另外需要一提的是,由于 PACE2 程序没有考虑位垒穿透效应,所以垒下部分的计算结果不能描述实验.

把以上各分道截面加起来得到的全熔合截面如图4所示.在耦合道程序 CCFUS 计算中用的 ${}^6\text{Li}$ 的静态形变参量为 $\beta_2 = -0.005$.考虑耦合的计算中包含了 ${}^6\text{Li}$ 的两个激发态: $2.186\text{ MeV}, 3^+, \beta_2 = 1.6$; $4.310\text{ MeV}, 2^+, \beta_2 = 0.9^{[9]}$.起主要作用的是前一个.考虑到熔合过程中,由于相对运动与内部自由度的耦合使熔合位垒呈现一个分布,考虑耦合比不考虑耦合更符合实验事实.计算中允许由外部输入一个参量 ΔV ,对势阱深度作小的调节,位垒高度及半径则由程序根据所给的 ΔV 自动调整.当 $\Delta V = 10\text{ MeV}$ 时,实验值与理论值能最大程度拟合,此时给出位垒高度 $V_b = 30.59\text{ MeV}$,半径 $R_b = 10.86\text{ fm}$,曲率 $\hbar\omega = 5.12\text{ MeV}$.CCFUS 程序没有考虑破裂对熔合截面的

影响,因此通过实验结果与理论计算结果的比较,就能判断出破裂对熔合截面的影响.

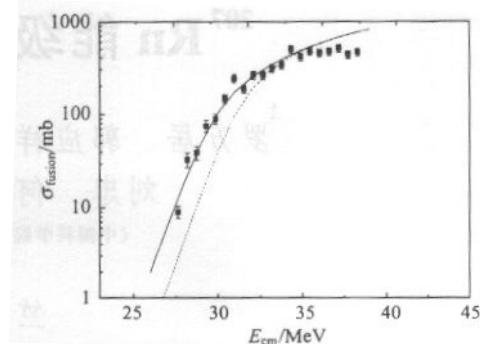


图4 ${}^6\text{Li} + {}^{208}\text{Pb}$ 全熔合截面
实点为实验结果,实线与虚线为考虑和不考虑非弹道耦合的 CCFUS 程序计算结果.

从图4可以看出在垒上能区理论值明显比实验值要大,这说明在这一能区破裂导致了熔合截面降低.至于在垒下能区,理论值与实验值基本上一致,说明破裂效应可以忽略不计.

参考文献 (References)

- Hussein M S, Pato M P. Phys. Rev., 1992, **C46**:377
- Dasso C H, Vitturi A. Phys. Rev., 1994, **C50**:R12
- Zyromski K E et al. Phys. Rev., 1997, **C55**:R562
- Rehm K F et al. Phys. Rev. Lett., 1998, **81**:3341
- Yoshida A et al. Phys. Rev. Lett., 1996, **B389**:457
- Signorini C et al. Eur. Phys. J., 1998, **A2**:227
- Kolata J J et al. Phys. Rev. Lett., 1997, **78**:2313
- Trotta M et al. Phys. Rev. Lett., 2000, **84**:2342
- Signorini C et al. Eur. Phys. J., 2001, **A10**:249

Measurement of Near-Barrier Fusion Excitation Function of ${}^6\text{Li} + {}^{208}\text{Pb}$ *

WU Yue-Wei LIU Zu-Hua LIN Cheng-Jian ZHANG Huan-Qiao

RUAN Ming YANG Feng LI Zhi-Chang LIU Jian-Cheng

(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

Abstract Near-barrier fusion excitation function of ${}^6\text{Li} + {}^{208}\text{Pb}$ system has been measured. The CCFUS calculations with and without the coupled elastic channels taken into account were performed. By comparing the theoretical and experimental results, we can conclude that at the above barrier energies, the fusion cross sections have decreased due to the break-up effects, but in the sub-barrier energy region, the influence of the break-up on the fusion cross section is modest.

Key words weakly-bound nuclei, fusion cross section, break up effect, PACE2 code, CCFUS code

Received 3 June 2002

* Supported by Major State Basic Research Development Program (G2000077400)