

晕核及弱束缚核的近垒熔合¹

刘祖华

(中国原子能科学研究院 北京 102431)

摘 要 阐述了晕核近垒熔合反应研究的意义; 叙述了理论上关于晕核破裂与入射道相对运动的耦合使熔合截面增强还是阻禁了晕核熔合两种相反观点的争论, 以及晕核熔合反应实验研究的现状; 探讨了用弱束缚核代替晕核进行实验研究以求对理论上的争论作出判断的构想.

关键词 晕核 弱束缚核 近垒熔合

分类号 O571.4

1 引言

近二十年来, 对稳定核引起的近库仑位垒和垒下重离子熔合反应进行了广泛深入的实验和理论研究^[1]. 实验上发现, 垒下熔合截面比一维位垒量子穿透计算的大几个量级. 深入的研究表明, 这一增强是普遍现象, 起因于碰撞核之间的相对运动与核内部自由度之间的耦合. 这种耦合引起相互作用位垒的移动和劈裂, 导致熔合位垒呈现一个分布而不是原先的一维位垒. 现已有可靠方法^[2,3]直接从实验数据抽取位垒分布, 以显示作为熔合过程门厅(Doorway state)态的一些重要的耦合道.

远离稳定线的核具有与稳定核不同的密度分布, 比稳定核小得多的粒子或粒子对分离能. 特别是中子和质子分布的差异产生中子晕或质子晕以及出现可能存在的软偶极共振. 由于晕核的以上特性, 使国际核物理界对晕核的熔合反应产生了浓厚兴趣, 其原因在于: (1) 与天体核合成密切相关. 例如, 最近研究发现, 由于¹³C 的 $2s_{1/2}$ 轨道具有晕结构, $^{12}\text{C}(n, \gamma)^{13}\text{C}(1/2^+)$ 直接中子捕获截面异常大^[4]. 又如¹⁶O(p, γ)¹⁷F 直接质子捕获, 跃迁到¹⁷F 的 $5/2^+$ 基态与跃迁到 $1/2^+$ 第一激发

态的分支比随能量变化有明显不同^[5]. 由于¹⁷F 的 $1/2^+$ 第一激发态的晕特性, 跃迁到这个态的 S 因子显著增大. ¹³C 和¹⁷F 的 $1/2^+$ 第一激发态的晕结构自然会对 CNO 循环产生影响. (2) 希望通过晕核熔合反应的研究为超重元素合成提供新的途径.

2 理论界的争论

大量理论研究表明, 由于晕核异常大的表面弥散, 两碰撞核在较大距离就出现核吸引力, 因而其相互作用势垒低于相应的稳定核的作用势垒. 势垒降低, 量子穿透几率增大, 熔合截面增加. 而碰撞过程中晕核软偶极共振模式的激发, 入射道相对运动与软偶极共振激发的耦合, 使熔合位垒呈现一个分布, 实际上也降低了有效位垒高度, 从而使熔合截面增强. 图 1 给出了¹¹Li + ²⁰⁸Pb 熔合激发函数的理论预言^[6, 7]. ¹¹Li 是理论学家们讨论最多的中子晕核. 图中的点线是考虑了¹¹Li 双中子晕的表面弥散后的一维位垒穿透计算, 实线是加上与软偶极共振耦合后的耦合道模型计算结果. 理论界对于晕核的以上两种特性导致熔合截面增强有共识.

然而由于晕中子或中子对结合能非常

小, 碰撞过程中晕核易破裂. 对于晕核破裂对近垒熔合反应的影响, 存在着完全相反两种观点的争论. Dasso 和 Vitturi^[6]在耦合道模型的框架下, 考虑入射道与破裂道的耦合, 其计算结果如图 1 虚线所示. 他们强烈

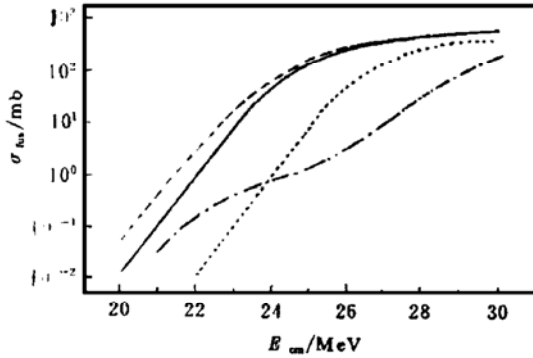


图 1 $^{11}\text{Li} + ^{208}\text{Pb}$ 熔合激发函数的理论预言
为考虑了表面弥散后的计算结果, ——为加上与软偶极共振耦合后的耦合道模型计算结果, ---为 Dasso 等人的计算结果, - · - 为 Hussein 等人的计算结果.

地认为, 与破裂道的耦合使晕核的近垒和垒下熔合截面进一步增强. 换言之, Dasso 和 Vitturi 认为碰撞过程中晕核的破裂是熔合反应中重要的门厅态, 其效应有利于晕核近垒和垒下熔合. 而 Hussein 等人^[7]持有完全相反的观点. 他们在光学模型的基础上, 引入极化势来考虑晕核熔合过程中的破裂道效应, 得到熔合截面为

$$\sigma_{\text{fus}} = \frac{\pi}{k^2} \sum_l (2l + 1) T_l^{\text{opt}} P_l^s, \quad (1)$$

式中, k 是入射道小波矢, T_l^{opt} 和 P_l^s 分别是相对运动轨道角动量为 l 时光学模型穿透系数和考虑破裂后弹核成活几率. 由于弹核成活几率 P_l^s 小于 1, 晕核破裂使其近垒熔合截面明显减小, 如图 1 虚点线所示. 因而 Hussein 等人认为晕核易破裂, 对近垒熔合起着阻禁作用.

3 实验研究现状

近几年来, 世界上具有放射性核束装置

的各大实验室积极开展了这方面的实验研究. 以下给出一些主要的实验结果.

3.1 $^9\text{Be} + ^{209}\text{Bi}$

^{11}Be 是个中子晕核, 其最后一个中子的结合能 $S_n = 0.503 \text{ MeV}$, 晕中子的结合很松散, 有很大的破裂截面, 因此是研究破裂对熔合影响的理想系统. 为了便于比较, 也测量了 $^9\text{Be} + ^{209}\text{Bi}$ 熔合激发函数. 实验在日本 RIKEN 进行, 是意大利 Padova 大学与日本 RIKEN 合作研究项目. 在线测量复合核蒸发 xn 后余核的 α 衰变. 实验结果如图 2 所示. $^{11}\text{Be} + ^{209}\text{Bi}$ 的熔合截面是 $4n$ 、 $5n$ 裂变道截面之和. $^9\text{Be} + ^{209}\text{Bi}$ 的总熔合截面是 $2n$ 、 $3n$ 、 $4n$ 裂变道截面之和. 图中的虚线是简化耦合道程序 CCFUS 计算, 实线是 Wong 模型计算. 后者采用 M3Y 核子-核子相互作用双折叠模型求得的势垒参数. 计算中考虑了 ^{11}Be 晕中子的表面弥散. 而理论预言 ^{11}Be 不存在软偶极共振, 所以不必考虑与该道的耦合. CCFUS 和 Wong 模型计算中都没有考虑 ^{11}Be 、 ^9Be 的破裂效应. 由于 ^{11}Be 中子晕的表面弥散, 使 ^{11}Be 的核半径比由 $1.18A^{1/3} \text{ fm}$ 系统化公式得出的核半径大 $\Delta r = 0.24 \text{ fm}$, 因而 $^{11}\text{Be} + ^{209}\text{Bi}$ 的理论计算熔合截面明显大于 $^9\text{Be} + ^{209}\text{Bi}$ 的熔合截面. 而实验结果却表明, ^9Be 、 $^{11}\text{Be} + ^{209}\text{Bi}$ 的熔合截面在近垒和垒下大致相同, 均与 $^{11}\text{Be} + ^{209}\text{Bi}$ 的 CCFUS 和 Wong 模型的预言值相符. 用 Dasso 和 Vitturi 的耦合道模型处理^[6], 拟合 ^9Be 数据, 得到与破裂道的耦合强度 $F_0 = 1.5 \text{ MeV}$, 而对于 ^{11}Be 数据, 耦合强度 $F_0 = 0$ ^[8], 即不需考虑 ^{11}Be 破裂对熔合的影响. 以上结果显然与 ^{11}Be 比 ^9Be 易破裂的事实相抵触. RIKEN 的 ^{11}Be 实验数据实际上还存在以下 2 个问题: (1) 由于放射性核束实验难度大, 垒下能区数据精度差; (2) CASCADE 计算表明, 垒下能区应有大的 $3n$ 中子蒸发道 (^{217}Fr) 截面, 由于 ^{217}Fr 的 α 衰变

半衰期为 2.2 ms, 所以 RIKEN 的实验无法测到. 如把 ^{11}Be 现有的实验结果加上 CASCADE 计算的 3n 道截面, 则得图 2 中正空三角所示的上限. 由于裂变截面在垒下能区是垒上数据的外推值, 如果把裂变截面减去, 就为图 2 中倒空三角所示的下限.

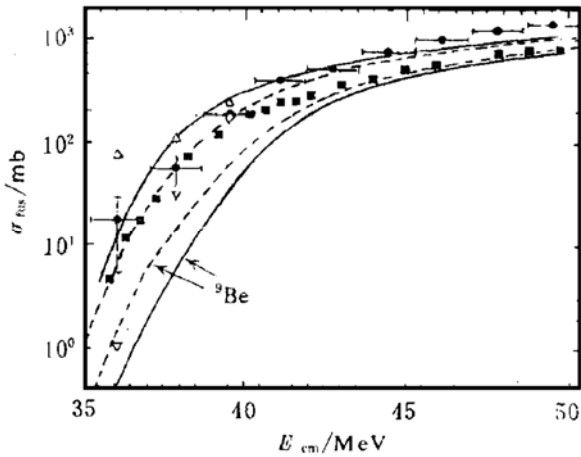


图 2 ^9Be 、 $^{11}\text{Be} + ^{208}\text{Bi}$ 熔合截面与 CCFUS (---) 及基于 M3Y 核子-核子相互作用的双折叠势的 Wong 模型(—) 计算结果的比较

RIKEN ^9Be 、 $^{11}\text{Be} + ^{209}\text{Bi}$ 垒下熔合实验的目的在于研究晕核破裂对垒下熔合的影响. 然而, 从现有的实验结果却无法得出合理的结论.

3.2 $^9,^{11}\text{Be} + ^{238}\text{U}$

实验^[9]在法国 GANIL 进行, 用 ^9Be 和 ^{11}Be 轰击厚度为 1.60 mg/cm^2 的 U_3O_8 靶. 裂变碎块用一组平行板雪崩计数器 (PPAC) 测量. PPAC 覆盖 4π 空间的 70%. 用两裂变碎块的折叠角 (θ_{ff}) 技术区分熔合裂变和转移裂变. 裂变事件集中于折叠角 $\theta_{\text{ff}} = 180^\circ$ 区域.

^9Be 、 $^{11}\text{Be} + ^{238}\text{U}$ 的裂变截面作为 E_{cm}/V_b 的函数如图 3 所示. 其中, V_b 是一维位垒高度, 对于 $^9\text{Be} + ^{238}\text{U}$, $V_b = 42.5 \text{ MeV}$; 而对于 $^{11}\text{Be} + ^{238}\text{U}$, $V_b = 39.6 \text{ MeV}$. 由图可见, $^9\text{Be} + ^{238}\text{U}$ 和 $^{11}\text{Be} + ^{238}\text{U}$ 的激发函数在 $E_{\text{cm}}/V_b = 1.0$ 附近呈现不同的行为, 即 $^9\text{Be} + ^{238}\text{U}$ 的激发函

数在垒下和近垒随能量的增大呈指数上升, 而 $^{11}\text{Be} + ^{238}\text{U}$ 的激发函数在近垒基本上不随能量变化, 低于 $^9\text{Be} + ^{238}\text{U}$ 相应值. 所以 GANIL 的实验结果不支持 Dasso 和 Vitturi^[6]理论. 而 Hussein 等人^[7]预言晕核破裂阻禁近垒熔合, 其熔合截面比不考虑与破裂道的耦合时低一个数量级. 实验结果似乎定性地支持了 Hussein 等人的理论预言.

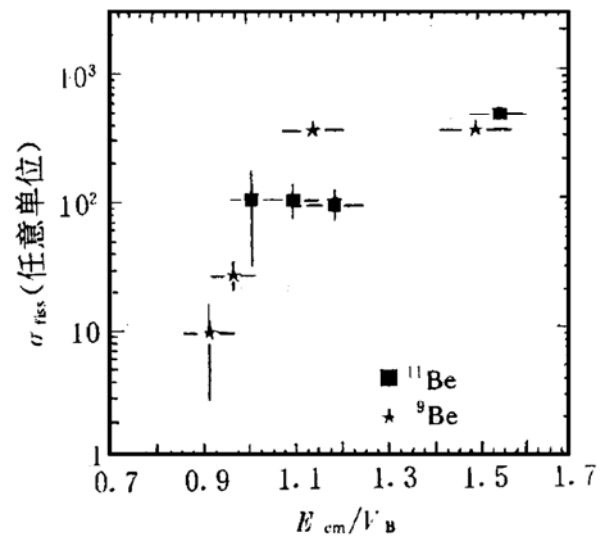


图 3 ^9Be 、 $^{11}\text{Be} + ^{238}\text{U}$ 裂变截面随 E_{cm}/V_b 的变化

3.3 $^6,^7\text{Li} + ^9\text{Be}$, $^6,^7\text{Li} + ^{12}\text{C}$

^6Li 、 ^7Li 是弱束缚核, 其 α 分离能分别为 $S_\alpha = 1.47 \text{ MeV}$ 和 2.45 MeV . 实验在巴西的 Sao Paulo 大学进行, $^6,^7\text{Li}$ 入射能量为 $1 \sim 5 \text{ MeV/u}$, 用 5 个三重望远镜探测器探测带电粒子和蒸发残余. 图 4 显示其中一个反应 $^6\text{Li} + ^9\text{Be}$ 的实验结果^[10]. 由图可见, 实验结果在垒上能区明显低于 Glas 和 Mosel 模型^[11]的理论预言, 而与 Hussein 等人^[7]的处理加上不完全熔合的理论结果一致. Sao Paulo 的实验结果证明在垒上能区, 弹核破裂使熔合截面减小, 但对近垒和垒下能区不能给出任何结论. 除了 ^6Li 、 $^7\text{Li} + ^9\text{Be}$, ^6Li 、 $^7\text{Li} + ^{12}\text{C}$, 他们还研究了一系列轻核系统垒上能区的熔合几率 $P_F = \sigma_F / \sigma_R$, 其中 σ_F 和 σ_R 分别为熔合

截面和反应截面. 他们发现, 熔合几率 P_F 与有效分离能 ϵ_c 有明显的依赖关系, 其中 $1/\epsilon_c = 1/\epsilon_{靶} + 1/\epsilon_{弹核}$.

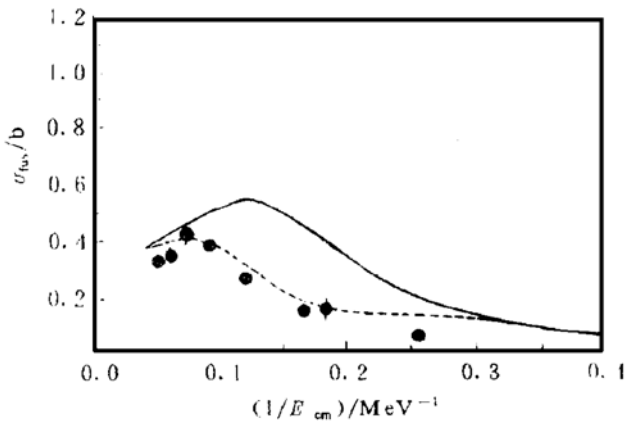


图 4 ${}^6\text{Li}+{}^9\text{Be}$ 熔合截面随 $1/E_{cm}$ 的变化
——为 Glas 和 Mosel 模型^[11] 预言结果,
.....为 Hussein 等人^[7] 的理论处理加上不完全熔合的计算结果.

4 解决争论的可行途径

放射性核束的熔合反应实验难度很大, 困难在于: (1) 放射性核束强度比稳定束小 10^6 , 而垒下熔合截面小, 要得到足够数据统计, 需要很长的束流时间; (2) 放射性核束能量不单一, 而是有一分布, 在垒下能区熔合激发函数随能量指数上升, 能量不确定性会使熔合截面出现数量级的系统误差.

如上所述, 理论界对于晕核熔合两种相反观点的争论焦点在于晕核破裂对近垒和垒下熔合的影响. 晕核, 例如 ${}^{11}\text{Li}$ ($S_{2n} = 0.29$ MeV)、 ${}^{11}\text{Be}$ ($S_n = 0.503$ MeV) 分离能都很低, 极易破裂. 而弱束缚核, 如 ${}^6\text{Li}$ ($S_\alpha = 1.47$ MeV)、 ${}^7\text{Li}$ ($S_\alpha = 2.45$ MeV) 和 ${}^9\text{Be}$ ($S_n = 1.67$ MeV) 也有较大的破裂截面. 鉴于稳定束流的强度和能量分辨远优于放射性核束, 虽然弱束缚核的破裂几率比晕核小得多, 但用弱束缚核代替晕核来研究晕核熔合中的破裂效应仍是一条可行的途径. 此外, 在实验结果与理论计算比较时, 还需确定入射道与破裂道之间的耦合强度 F_0 . 为了确定势参数及

F_0 , 实验上除测量熔合激发函数外, 还需测量弹性散射角分布和弹核破裂截面随能量的变化, 并进行严格的耦合道模型计算, 才能对晕核破裂使近垒和垒下熔合截面是进一步增强还是阻禁近垒熔合的两种观点作出合理的实验判断.

5 小结

晕核近垒熔合是当前国际上核物理研究的前沿课题之一. 理论上, 晕核破裂对熔合过程的影响存在着两种观点的争论. 解决的办法, 只能由实验来作出判断. 由于放射性核束熔合反应实验的难度大, 虽然各实验室作了大量的努力, 但至今还未能就晕核破裂是增强还是阻禁近垒熔合作出明确的实验判断. 不过, 用弱束缚核代替晕核来研究晕核破裂效应可能是一条可行的实验途径.

参 考 文 献

- 1 Beckerman M. Subbarrier Fusion of Atomic Nucler. Phys Rep, 1985, 129: 145~223
- 2 Rowley N, Satchler G R, Stelson P N. On the Distribution of Barriers Interpretation of Heavy-ion Fusion. Phys Lett, 1991, B254: 25~29
- 3 Rowley N, Timmers H, Leigh J R *et al.* Barrier Distributions from Elastic Scattering. Phys Lett, 1996, B373: 23~29
- 4 Otsuka T, Ishihara M, Fukunishi N *et al.* Neutron Halo Effect on Direct Neutron Capture and Photodisintegration. Phys Rev, 1994, C49: 2289~2292
- 5 Morlock R, Kunz K, Mayer A *et al.* Halo Properties of the First $1/2^+$ State in ${}^{17}\text{F}$ from the ${}^{16}\text{O}(p, \gamma){}^{17}\text{F}$ Reaction. Phys Rev Lett, 1997, 79: 3837~3840
- 6 Dasso C H, Vitturi. Does the Presence of ${}^{11}\text{Li}$ Breakup Channels Reduce the Cross Section for Fusion Processes? Phys Rev, 1994, C50: R12~14
- 7 Hussein M S, Pato M P, Canto L F *et al.* Near-barrier Fusion of ${}^{11}\text{Li}$ with Heavy Spherical and Deformed Targets, Phys Rev, 1992, C46: 377~379
- 8 Liu Z H, Signorini C, Li Z C *et al.* Subbarrier Fusion of ${}^9, {}^{11}\text{Be} + {}^{209}\text{Bi}$. Proc 8th International Conference on Nuclear Reaction Mechanisms. (下转第 143 页)

(上接第 137 页)

- ed. Gadioli E, Varenna, Italy, June, 1997
- 9 Fekou-Youmbi V, Sida J L, Alamanos N *et al.* Sub-coulomb Fusion with Halo Nuclei. Nucl Phys, 1995, A583: 811~816
- 10 Takahashi J, Munhoz M, Szanto E M *et al.* Is Fusion Inhibited for Weakly Bound Nuclei. Phys Rev Lett, 1997, 78: 30~33
- 11 Glas D, Mosel U. On the Critical Distance in Fusion Reactions. Nucl phys, 1975, A237: 429~446

Fusion around Coulomb Barrier with Halo or Weakly Bound Nuclei

Liu Zuhua

(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102431)

Abstract Study of fusion around coulomb barrier with halo nuclei are presently a very important topic, especially due to the debate about the influence of break up process in fusion. The theoretical debate and experimental status of halo nucleus fusion are reviewed. Fusion with weakly bound nuclei in stead of halo ones is discussed.

Key words halo nuclei weakly bound nuclei fusion around coulomb barrier