

用 QMD 模型研究晕核 $^{11}\text{Be} + ^{208}\text{Pb}$ 的 熔合机制*

王 宁^{1,2} 李祝霞^{1,3,4}

1(中国原子能科学研究院 北京 102413)

2(西北大学物理系 西安 710069)

3(兰州重离子加速器国家实验室原子核理论中心 兰州 730000)

4(中国科学院理论物理研究所 北京 100080)

摘要 通过用 QMD 模型研究晕核 $^{11}\text{Be} + ^{208}\text{Pb}$ 的近垒熔合反应,发现晕核引起的熔合反应中,并存着两种相互竞争的机制:一方面当入射晕核 ^{11}Be 靠近靶核时,由于 ^{11}Be 是弱束缚体系,与靶核的相互作用可使其很容易破裂或少数核子被靶核俘获形成核子转移反应,从而对于熔合表现出压制;另一方面当 ^{11}Be 的少数中子进入靶核并与靶核相互作用而使得靶核有些激发,而使局部半径增大,导致熔合势垒降低,熔合截面增强. 用 QMD 模型计算出的熔合截面与实验值基本符合,垒附近表现出增强效应.

关键词 晕核 熔合 势垒

1 引言

近几年来,随着放射性核束物理的发展,人们对滴线附近的丰中子和丰质子核素的研究兴趣倍增. 因为这些核素远离 β 稳定线,有可能表现出一些新的物理现象:如 ^{11}Li , ^{11}Be 等原子核呈现出中子晕结构. 这些特性对于多年来在比较稳定的原子核的基础上建立起来的传统核物理理论是一个尖锐的挑战. 这些奇异核素的性质、结构以及反应动力学的研究使我们对原子核微观世界的内在规律有进一步的认识. 而且,对这些奇异核素的研究对于超重元素的合成以及核天体物理的进一步发展有极为重要的意义.

近年来,理论上对中子晕(皮)核的近垒熔合反应截面存在着两种截然不同的预言:一种认为晕核的扩展得很远的中子密度分布能引起靶核熔合势垒的降低,从而熔合会增强^[1,2];另一种认为晕核这种弱束缚系统具有非常低的中子分离能,核系统很容易破裂,从而熔合会减弱^[3,4]. 而实验上得到的结论与理论一样也存在着很大的分歧,由于实验难

2000-03-20 收稿

* 国家自然科学基金资助(19975073)

度很大,还难以对目前争论做出肯定的结论. 我们认为,由于晕核中子密度分布扩展很远导致的靶核熔合势垒的降低而引起的熔合增强与弱束缚系统容易破裂之间存在着一种复杂的动力学的竞争机制.

量子分子动力学模型(QMD)是一种微观动力学模型,用它来研究重离子碰撞有一定的成功之处^[5],在文献[6]中已成功地用 QMD 模型研究熔合反应. 我们将 QMD 模型用于晕核引起的熔合反应是一个新的尝试.

2 用 QMD 模型模拟 $^{11}\text{Be} + ^{208}\text{Pb}$ 的熔合反应

用 QMD 模型研究晕核引起的反应是一个新的挑战. 由于 ^{11}Be 是一个丰中子晕核,它的带晕的结构,以及丰中子的特点,使得在运用 QMD 模型时,要对程序做相应的改进,比如,(a)在抽样 ^{11}Be 初始核时,不能沿袭传统的球形或 Woods-Saxon 密度分布. 而要严格按照 Hartree-Fock 理论计算的 ^{11}Be 的密度分布^[7]; (b)对质子数、中子数差别引起的对称能以及核子-核子碰撞同位旋相关性要作相应的考虑.

2.1 ^{11}Be 初始核的准备

由 Hartree-Fock 理论计算出来的 ^{11}Be 的密度分布,如图 1 所示,利用 Monte-Carlo 随机抽样来制作一些合理的 ^{11}Be 初始核. 由一些实验数据,比如结合能、方均根半径等,对 ^{11}Be 初始核先做初步筛选,找出一些合理的,然后让这些初始核自身演化 $800\text{fm}/c$,观察每个核的结合能、方均根半径随时间的变化以及所有核子的运动轨迹,找出一些结合能、方均根半径在实验值的附近波动,而且具有明显晕结构的核作为 ^{11}Be 的初始核. 图 2 是其中一个初始核在 $800\text{fm}/c$ 期间的所有核子的运动轨迹. 从图中可以很清楚地看出核芯以及围绕在核芯外围的一个中子晕. 我们从 30000 个事件中找出了 10 个比较合理的 ^{11}Be 的初始核作为 $^{11}\text{Be} + ^{208}\text{Pb}$ 反应中的弹核.

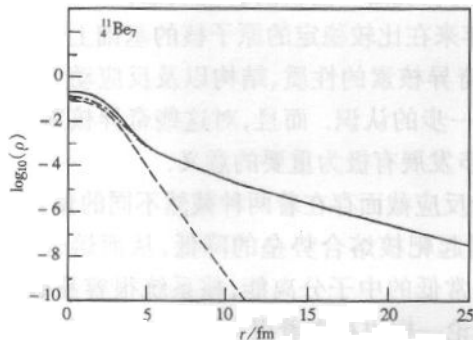


图 1 ^{11}Be 的物质密度分布
 ---- 质子密度分布, - · - 中子密度分布,
 —— 中子+质子密度分布.

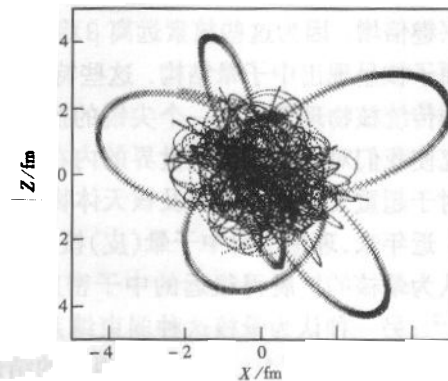


图 2 ^{11}Be 初始核在自身演化 $800\text{fm}/c$ 期间所有核子的轨迹
 ... 核芯核子的轨迹, +++ 晕中子的轨迹.

2.2 ^{208}Pb 初始核的准备

按照 ^{208}Pb 的 Woods-Saxon 密度分布,用传统的办法,制作 ^{208}Pb 的初始核. 我们从 10000 个事件中找出 10 个比较理想的 ^{208}Pb 的初始核作为靶核. 这些 ^{208}Pb 的初始核,它们的基态性质(密度分布、动量分布、结合能、方均根半径)都符合的很好而且能稳定 $500\text{fm}/c$.

2.3 反应过程的模拟

从 10 个 ^{11}Be 初始核与 10 个 ^{208}Pb 初始核中分别随意地选出一个来做为弹核与靶核,设置它们的初始距离 ($L_0 \geq 20\text{fm}$)、入射能量 E 、碰撞参数 b , 形成一个反应事件. 从大量的反应事件中来研究它们的反应,包括核子的转移机制、熔合机制、势场的变化、各种反应的激发函数以及其他一些有趣的事情. 例如计算激发函数,对每一个能量点和每一个碰撞参数,我们制造 100 个反应事件. 从这 100 个反应事件中,数出熔合的事件的个数、单中子转移的个数以及双中子转移的个数. 从而,便知道了各种反应道的几率 $g(E, b)$, 各种反应截面也就可以由下面公式计算出来:

$$\sigma = 2\pi \int_0^{b_{\max}} b g(E, b) db.$$

3 结果与分析

3.1 熔合的判据

a. 在 TDHF (Time Dependent Hartree-Fork) 理论计算熔核所采用的判据是: 当入射核贴在靶核表面旋转一到几圈或者在靶核中振荡几个来回时, 就与靶核熔合在一起形成复合核^[6].

b. 用 QMD 模型模拟 $^{11}\text{Be} + ^{208}\text{Pb}$ 的熔合反应, 采用类似于 TDHF 理论计算熔合采用的判据, 即: 观察系统中所有核子位置的变化, 就会发现: 当 ^{11}Be 以一个相对较大的碰撞参数入射, 靠近靶核时, ^{11}Be 会变形并拉长, 其中的一两个中子较先进入 ^{208}Pb 核中, 随后, ^{11}Be 的其他核子会依次进入靶核, 并贴在靶核的表面附近旋转, 旋转一两圈后, ^{11}Be 的所有核子会被耗散得基本均匀分布于复合核中. 至此, 认为复合核已经形成.

3.2 晕核少数中子的转移以及靶核势场的降低

当入射晕核靠近靶核时, 库仑长程作用使得部分运动动能转化为核的内部激发能, 由于晕核是弱束缚体系, 与靶核的相互作用可能使其破裂或少数核子被靶核俘获形成核子转移反应. 我们研究了 ^{11}Be 破裂成 $1n + ^{10}\text{Be}$ 或 $2n + ^9\text{Be}$, 而后破裂出来的这一个或两个中子被 ^{208}Pb 俘获的情形, 结果发现: 反应中当 ^{11}Be 的两个中子转移到 ^{208}Pb 中可以引起 ^{208}Pb 的熔合势场降低约 1 到 2 个 MeV. 然而, 当 ^{11}Be 的单个晕中子转移到 ^{208}Pb 中则不能引起 ^{208}Pb 的势场明显降低. 而且, 能量较低时, 单中子转移反应截面要比双中子转移反应截面

大一个量级左右. 这主要是因为单中子的分离能大约是 0.5MeV, 而双中子的分离能则高达 7MeV 左右. ^{11}Be 的外围的一个中子晕轨道半径很大, 非常容易剥离, 对于非常大的碰撞参数下的周边碰撞, 主要是单中子转移反应.

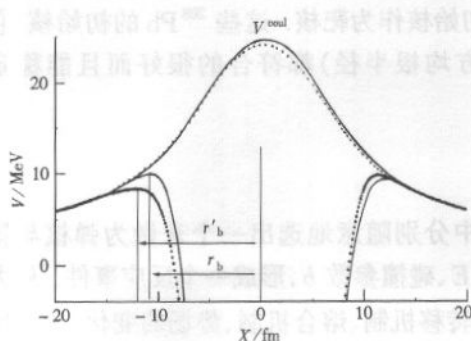


图 3 ^{11}Be 两个中子转移到 ^{208}Pb 引起靶核势场的变化

——靶核初始时刻的势场, ... 两个中子转移靶核的势场;
 $r_b = 11\text{fm}, r'_b = 12.3\text{fm}.$

为什么 ^{11}Be 的少数中子的转移能引起靶核的势场降低呢? 当入射晕核靠近靶核时, 库仑相互作用使得靶核有一点激发, 加上 ^{11}Be 破裂后两中子进入靶核并与靶核相互作用而使得靶核更加激发而局部半径变大. 如图 3 所示, 在初始时刻靶核势场的半径大约为 $r_b = 11\text{fm}$, 而两个中子转移到靶核后, 靶核势场的局部半径 $r'_b = 12.3\text{fm}$, 明显增大. 而库仑势是从内到外逐步减小的, 当核半径增大时, 库仑势与 Skyrme 势的叠加便相应地减小, 从而靶核的势垒高度便会有所降低.

3.3 熔合的动力学过程以及机制

图 4 给出一个典型的 $^{11}\text{Be} + ^{208}\text{Pb}$ 的熔合过程. 从图中可以看出熔合的过程可以分

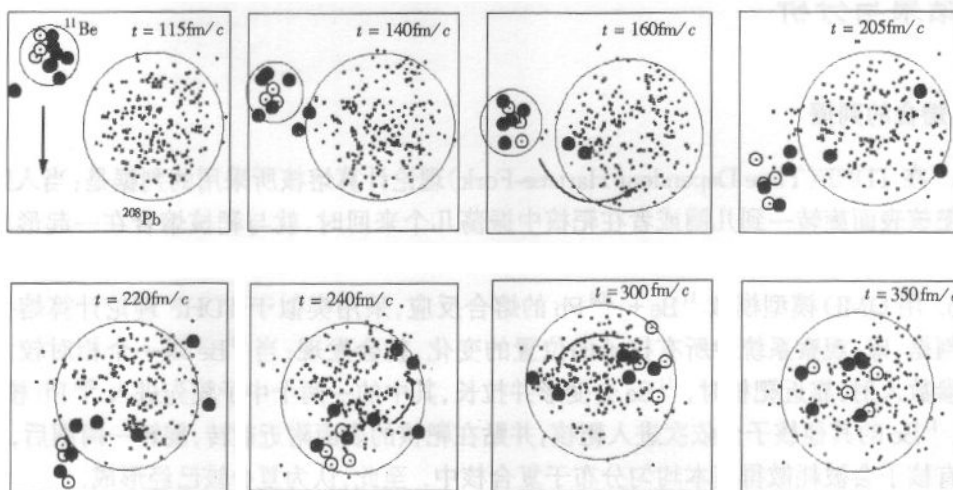


图 4 $^{11}\text{Be} + ^{208}\text{Pb}$ 的一个典型的熔合过程

入射能量为 7MeV/u, 碰撞参量 $b = 11\text{fm}.$ □, ○ ^{208}Pb 的质子和中子, ⊙ ^{11}Be 的质子, ● ^{11}Be 的中子.

为三个部分: 首先是少数中子转移. ^{11}Be 核是弱束缚核, 单中子分离能约 0.5MeV. 当 ^{11}Be 晕核靠近 ^{208}Pb 靶核时, 由于两核之间的相互作用, ^{11}Be 核外围的中子容易被靶核俘获. 从图中可以看出, 约在 $t = 120\text{fm}/c$ 时, ^{11}Be 的两个中子被 ^{208}Pb 俘获. 然后, ^{11}Be 的其他核子会留在靶核外面一段时间. 其实, 这个过程是一个 ^{11}Be 的其他部分与靶核的裂变与熔合的竞争的过程. 从前面讨论的核子转移反应可以知道, ^{11}Be 与靶核反应时, 有可能一个

或两个中子进入靶核而剩余的¹⁰Be或⁹Be继续朝前飞,也有可能剩余的¹⁰Be或⁹Be与靶核熔合形成复合核,在此存在着竞争.另外从核子转移反应还可以知道,当两个中子转移到靶核后,会引起靶核势垒高度降低.随着靶核势垒的降低,其他核子逐渐熔入靶核.我们研究了¹¹Be的一个质子在熔合过程中感受到的靶核势垒的高度,如图 5 所示,点线表示质子感受到的垒,实线表示初始时刻靶核的势垒.从图中可以看出,质子真正感受到的势垒要低于靶核初始时刻的势垒,说明靶核势垒降低了.最后,¹¹Be的所有核子在靶核中旋转或者振荡以便耗散自己的动能.如图 4 所示,约到 $t = 230\text{fm}/c$ 开始¹¹Be的所有核子在靶核中旋转最终形成了复合核.

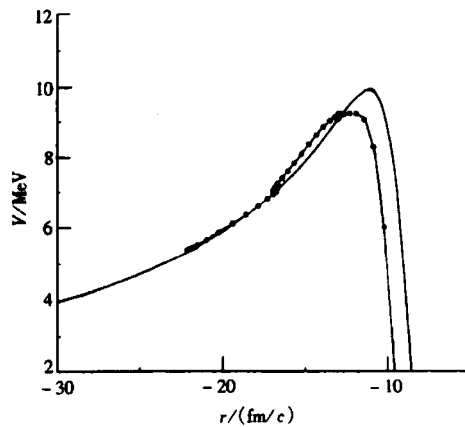


图 5 熔合过程中,质子感受到的²⁰⁸Pb的势场(---)与²⁰⁸Pb的初始时刻的势场(—)的比较

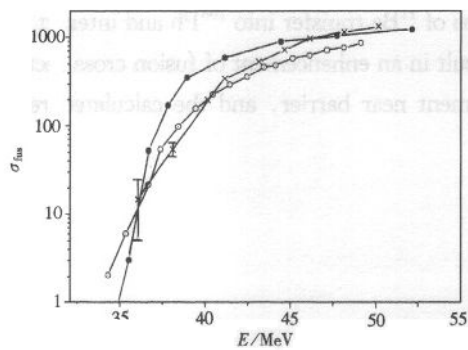


图 6 ¹¹Be + ²⁰⁸Pb 熔合反应的激发函数
--- QMD 模型的计算结果, —○— ⁹Be + ²⁰⁸Pb 的实验值, —×— ¹¹Be + ²⁰⁹Bi 的实验值.

3.4 熔合反应的激发函数

从大量的碰撞事件中,统计出熔合事件的个数,即得到熔合几率 $g_{\text{fus}}(E, b)$,利用公式 $\sigma_{\text{fus}} = 2\pi \int_0^{b_{\text{max}}} b g_{\text{fus}}(E, b) db$,可以计算出熔合截面,如图 6 所示,图中,点线代表 QMD 计算结果,圈线代表⁹Be + ²⁰⁸Pb 实验值,叉线代表¹¹Be + ²⁰⁹Bi 实验值.从图中可以看出, QMD 计算结果与实验值基本符合,而且在垒附近表现出增强效应.

用 QMD 模型来研究晕核引起的熔合反应是一个新的尝试.对于能量较低时,熔合反应的时间比较长,这样 QMD 模型中初始核的稳定时间就必须长一点,因而,模型还有待进一步的改进与发展.

参考文献 (References)

- 1 Takigawa N, Sagawa H. Phys Lett., 1991, **B265**:23
- 2 Takigawa N, Sagawa H. Nucl. Phys., 1992, **A538**:221c
- 3 Hussein M S et al. Phys. Rev., 1992 **C46**:377
- 4 Hussein M S et al. Nucl. Phys., 1995 **A592**:27
- 5 Hartnack C et al. Nucl. Phys., 1989, **A495**:303
- 6 Toshiki Maruyama et al. Phys. Rev. C, **V42**:386
- 7 Hamamoto I, Sagawa H, Zhang X Z. Nucl. Phys., 1999, **A648**:203

Study of Fusion Mechanism of Halo Nuclear $^{11}\text{Be} + ^{208}\text{Pb}$ by Applying QMD Model *

WANG Ning^{1,2} LI Zhu-Xia^{1,3,4}

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

2(*Physics Department, Northwest University, Xi'an 710069, China*)

3(*Center of Nuclear Theory, National Laboratory of Heavy Ion Accelerator, Lanzhou 730000, China*)

4(*Institute of Theoretical Physics, CAS, Beijing 100080, China*)

Abstract We have studied the fusion reaction for $^{11}\text{Be} + ^{208}\text{Pb}$ near barrier by applying QMD model, and find that in the fusion reaction induced by halo nuclei there simultaneously exist two mechanisms competing with each other. On one hand, ^{11}Be is a weakly bound nuclear system and is easily broke up caused by the interaction with target, when it approaches to target, so the fusion cross section is suppressed. On the other hand, several neutrons of ^{11}Be transfer into ^{208}Pb and interact with ^{208}Pb to cause the local radius of ^{208}Pb increase and result in an enhancement of fusion cross section. The fusion cross sections calculated show an enhancement near barrier, and the calculated results agree with the experimental data reasonably well.

Key words halo nuclear, fusion, potential barrier

Received 20 March 2000

* Supported by National Natural Science Foundation of China(19975073)