

重离子碰撞中能量储藏同人射道动力学^{*}的关系^{*}

曾祥华 葛凌霄 左维

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

1993年3月1日收到

摘 要

用仅密度相关的 BUU 模型讨论了在重离子碰撞中能量储藏与入射道动力学(入射能、碰撞参数、碰撞系统)的依赖关系,以及碰撞系统的极不对称性对激发能的影响。

关键词 激发能,入射能,碰撞参数,碰撞系统。

1 引 言

加速器的发展,为研究中能区重离子碰撞提供了一个很好的工具.研究中能重离子碰撞对认识极端条件下原子核的性质有很重要的意义,也为探索从低能到高能重离子碰撞的统一描述提供了可能性.中能区重离子碰撞是平均场、两体碰撞和泡利原理共同发生作用的能区.此能区有很多新的特征,反应机制也发生了许多变化.在中心碰撞时,随着能量的升高,反应机制由全融合、非全融合向碎裂转化.同时,理论描述也开始逐步完善.用 Boltzmann-Uehling-Uhlenbeck (BUU)方程^[1,3,4]来描述碰撞动力学不仅克服了 TDHF 理论描述中能的不足,而且还能描述高能核子-核子相互作用的 Cascade 模型.目前,中能重离子碰撞,特别是在中低能过渡区,热核的形成和衰变是理论工作者^[3,6,9]和实验家们^[5-7]非常感兴趣的课题.在实验上有关温度的测量、激发能的提取已做了不少的工作,但是,还有许多新的特征有待研究.如一个核可容纳的最大激发能为多少?激发能储藏的动力学极限是什么?原子核内部性质和结构会怎样影响动力学限制?热核发展至碎裂的条件是什么?入射道动力学对激发能到底有多大影响?基于此,本文用 BUU 模型,在局域密度参数化势下讨论了激发能对入射道动力学(入射能、碰撞参数、碰撞系统)的依赖关系。

2 模 型

核子-核子相互作用随时间发展的 BUU 方程为^[1,2,4]:

^{*} 国家自然科学基金和中国科学院 LWTZ-1298 经费资助。

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + \frac{\mathbf{p}}{m} \cdot \nabla_r - \nabla_r U \cdot \nabla_p\right) f(\mathbf{r}, \mathbf{p}, t) = I_{\text{coll}}, \quad (1)$$

I_{coll} 为碰撞项, 取 Uehling-Uhlenbeck 形式:

$$I_{\text{coll}} = - \int \frac{d^3 p_1 d^3 p_1' d^3 p_2}{(2\pi)^9} \sigma_{\text{nn}} v_{12} [f f_2 (1 - f_1') (1 - f_2') - (1 - f) (1 - f_2) f_1' f_2'] (2\pi)^3 \delta^3(\mathbf{p} + \mathbf{p}_2 - \mathbf{p}_1' - \mathbf{p}_2'), \quad (2)$$

σ_{nn} 取自由核子-核子碰撞截面, v_{12} 是碰撞核的相对速度. $U(\rho)$ 是平均场, 这里取密度相关的势, 表达式为:

$$U(\rho) = A(\rho/\rho_0) + B(\rho/\rho_0)^\sigma, \quad (3)$$

其中, A, B, σ 为参数, 在计算中采用的是硬势和软势, 对应的压缩系数分别是 380 和 200 MeV, 其值见表 1.

表 1 两组常用的 SKYRME 参数化势

| $A(\text{MeV})$ | $B(\text{MeV})$ | σ | $K(\text{MeV})$ |
|-----------------|-----------------|----------|-----------------|
| -123 | 303 | 2 | 380 |
| -198 | 81 | 7/6 | 200 |

激发能的计算公式^[3]由下面得到: 定义集体流 $\mathbf{J}(\mathbf{r})$,

$$\mathbf{J}(\mathbf{r}) = \int \frac{\mathbf{p}}{m} f(\mathbf{r}, \mathbf{p}, t) d^3 p, \quad (4)$$

对应的集体动能为:

$$E_{\text{coll}} = \frac{1}{2} m \int \frac{\mathbf{J}^2(\mathbf{r})}{\rho(\mathbf{r})} d^3 r. \quad (5)$$

系统的总能量可以表示为内能和集体能的贡献, 即:

$$E_{\text{tot}} = E_{\text{int}} + E_{\text{coll}}. \quad (6)$$

系统的激发能 E^* 可由内能和基态时的动能及势能得出:

$$E^* = E_{\text{int}} - E(T = 0, \rho), \quad (7)$$

其中

$$E(T = 0, \rho) = \int [\tau(r) + \omega(r)] d^3 r, \quad (8)$$

$\tau(r)$ 是零温托马斯分布

$$\tau(r) = \frac{\hbar^2}{2m} \left(\frac{3}{2} \pi^2 \rho \right)^{2/3}. \quad (9)$$

由式(2)得出势能密度 $U(\rho)\rho$, 即可计算出 $\omega(r)$.

3 计算结果及讨论

本文在 BUU 框架下用局域密度相关的势采用试验粒子和网格法计算了能量储存和

入射道动力学之间的关系。计算时采用每个核子对应100个实验粒子，时间步长为0.5 fm/c。其传播由牛顿方程来决定。对不同入射能量($E_{lab} = 10, 20, 30, 40, 50, 55, 60, 80, 100 \text{ MeV/u}$)，采用硬势，计算了中心碰撞时 $^{40}\text{Ca} + ^{40}\text{Ca}$ 激发能随入射能量的依赖关系。结果表明在 $E_{lab} = 55 \text{ MeV/u}$ 左右时，单核子激发能达到极大值 $\varepsilon_{max}^* = 5.1 \text{ MeV}$ 。如图1是单核子激发能随入射能量的变化关系。这说明对对称系统 $\text{Ca} + \text{Ca}$ ，核子的内部激发能有一个极限值，从动力学观点来看，入射能量超过 55 MeV/u ，激发能下降，这是碎裂跃迁的结果，内部能量转化为碎片的动能。因此靠增加入射能量来增大系统的激发能不太可能。但在低于最大激发能的入射能量时，激发能是随着入射能量的增加而迅速增加。而对 $^{20}\text{Ne} + ^{197}\text{Au}$ 极不对称的系统， $E_{lab} = 200 \text{ MeV/u}$ 左右时，激发能趋于饱和(如图2)，这与实验上用 Ar 轰击 $\text{Au}, \text{Th}, \text{U}^{[6]}$ 得到的激发能达到饱和相一致。但理论计算的结果比实验测得的达到饱和激发能的入射能量大一些，这需要改善模型来进一步研究。通过 $\text{Ca} + \text{Ca}$ 和 $\text{Ne} + \text{Au}$ 系统的研究得到：中能重离子碰撞过程中的能量储存明显地和碰

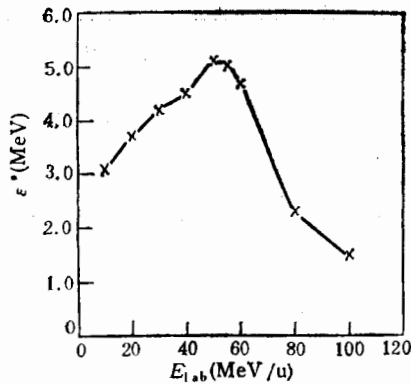


图1 $^{40}\text{Ca} + ^{40}\text{Ca}$ 系统激发能随能量的变化
($b = 0, \text{Hard}$).

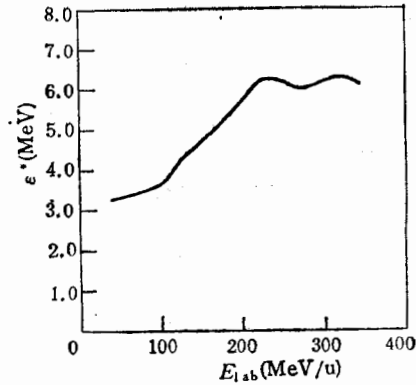


图2 $^{20}\text{Ne} + ^{197}\text{Au}$ 系统激发能随能量的变化
($b = 0, \text{Hard}$).

表2 ^{40}Ca 作炮弹轰击不同靶子时， ε_{max}^* 的大小及对应的 E_{lab}

| 靶子 | ^{40}Ca | ^{86}Kr | ^{108}Ag | ^{197}Au |
|-----------------------------------|------------------|------------------|-------------------|-------------------|
| $E_{lab}(\text{MeV/u})$ | 55 | 70 | 70 | 90 |
| $\varepsilon_{max}^*(\text{MeV})$ | 5.1 | 5.2 | 5.43 | 5.7 |

表3 用不同炮弹轰击 ^{40}Ca 时， ε_{max}^* 的大小及对应的 E_{lab}

| 炮弹 | ^{40}Ca | ^{86}Kr | ^{108}Ag | ^{197}Au |
|-----------------------------------|------------------|------------------|-------------------|-------------------|
| $E_{lab}(\text{MeV/u})$ | 55 | 70 | 80 | 90 |
| $\varepsilon_{max}^*(\text{MeV})$ | 5.1 | 5.4 | 5.5 | 5.65 |

撞系统的对称性有紧密的关系。对不同的系统,它达到极限激发能的人射能量不同,且极限激发能的值也有差异,如表 2 和表 3。

表 2 是用 ^{40}Ca 作为炮弹, ^{40}Ca 、 ^{86}Kr 、 ^{108}Ag 、 ^{197}Au 作为靶子时,单粒子极限激发能的值以及对应的人射能量。表 3 是 ^{40}Ca 作为靶子, ^{40}Ca 、 ^{86}Kr 、 ^{108}Ag 、 ^{197}Au 作为炮弹单粒子激发能的极大值以及对应的人射能量。结果表明,对称系统达到极限激发能的人射能量明显要比非对称系统低。随着非对称性增加,达到极限激发能的人射能量增加。一种可能的理解是:对对称系统,压缩要比非对称系统更大一些,压缩愈大,体积膨胀愈快,反应机制容易向碎裂转化。由表 2、3 可见,系统 $A+B$ 和系统 $B+A$ 的极限激发能是近似相同的。这似乎表明反应过程是可逆的。

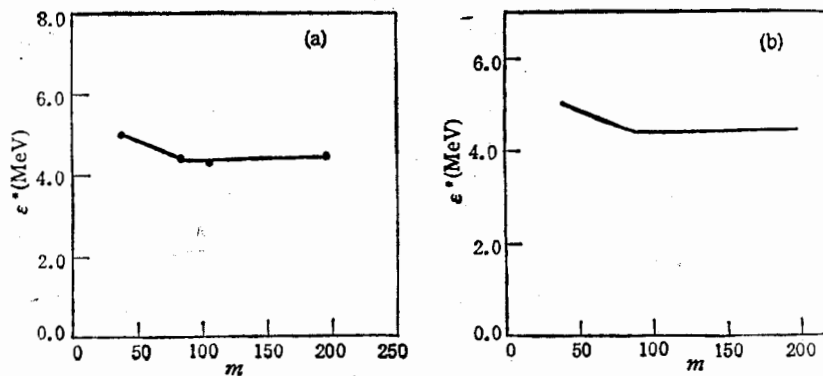


图 3 在同一入射能量下,不同系统 ϵ^* 随炮弹、靶质量的关系

(a) Ca 作炮弹时不同靶子的 ϵ^* 随靶质量的关系。(b) ^{40}Ca 作靶子时不同炮弹的 ϵ^* 随炮弹质量变化的关系。

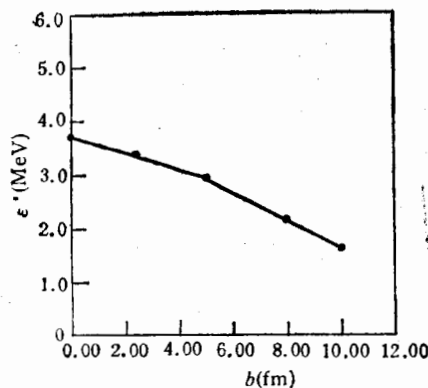


图 4 $^{20}\text{Ne} + ^{40}\text{Ca}$ ($E_{\text{lab}} = 50\text{MeV/u}$, Hard), ϵ^* 随碰撞参数变化的曲线

图 3 是在同一入射能量 ($E_{\text{lab}} = 50\text{MeV/u}$) 下,激发能对碰撞系统的依赖关系,图 3(a)是 ^{40}Ca 作为炮弹轰击不同靶 (^{40}Ca 、 ^{80}Br 、 ^{108}Ag 、 ^{197}Au) 时,单粒子激发能随靶质量的

变化。图3(b)是 ^{108}Ag 、 ^{197}Au 、 ^{40}Ca 作为炮弹($E_{i,b} = 50\text{MeV/u}$, $b = 0$, 硬势)轰击 ^{40}Ca 靶时单粒子激发能随炮弹质量的依赖关系。碰撞系统 $^{40}\text{Ca} + ^{40}\text{Ca}$ 在 50MeV/u 时,已达到极限激发能。无论是Ca同 ^{86}Br 、 ^{108}Ag 、 ^{197}Au 的碰撞,还是 ^{86}Br 、 ^{108}Ag 、 ^{197}Au 同Ca的碰撞,由于非对称系统在 50MeV/u 时还未达到极限激发能,故这些非对称系统的激发能都低于Ca + Ca的激发能。但在 30MeV/u 入射能量时,碰撞系统都未达到极限激发能,计算结果显示炮弹越重,激发能越大,这与每个炮弹核子最可几线性动量转移有一个围绕着 $160 \sim 170\text{MeV/c}$ 的常数值相一致,对于能量或者线性动量储存重炮弹似乎比较的更有效。说明存在着动力学因素,阻止了激发能的增加。而且在入射道参数中,系统的非对称性起了很重要的作用。

在入射道参数中,碰撞参数也是一个十分重要的量。图4是对于 $^{20}\text{Ne} + ^{40}\text{Ca}$ 碰撞系统,入射能量 $E_{i,b} = 50\text{MeV/u}$ 时计算的激发能随碰撞参数的变化情况。对中心碰撞,由于炮弹和靶的相互作用几率很大,炮弹把入射动能转化为系统的内部激发能也增大,而周边碰撞相互作用几率减少,因而内部激发能随碰撞参数增大而减小。在 $b = 10\text{fm}$ 时单核子激发能仍有 1.6MeV ,这说明在此入射能量下仍有一定的能量储存。在 50MeV/u 入射能量时,实验指出转移反应还有少量的贡献。一般认为反应机制是参加者-旁观者图象或是两体过程或是深度非弹碰撞,能量储藏的主要来源是随机核子交换。这已被实验上测量类炮弹所证实。当然在周边碰撞中,热化还未达到,耗散能量并未被均匀分配到整个系统。而近中心碰撞系统能量储存较大,热核的形成趋于可能。

4 小 结

本文在BUU方程的框架下讨论了入射道动力学对激发能的关系,结果表明:

(1) 对于一个碰撞系统,存在着一个极限激发能。极限激发能的大小同入射道动力学参数有着紧密的关系。这个极限激发能来源于动力学限制,同静态时液-气相变的预言有大的差异。

(2) 入射道碰撞系统的非对称性对能量储藏起了很大的作用。对称系统达到激发能极限的入射能量一般要低于非对称系统。

(3) 入射能量超过达到极限激发能的入射能量后,是减小还是饱和同系统的非对称性有关。

(4) 在较高入射能量时,周边碰撞形成热核趋于可能。同用 4π 中子球观测激发能饱和的入射能量相比,目前理论计算结果过高。在模型的相互作用中考虑对称能和库仑能是必需的,这个工作正在进行。

参 考 文 献

- [1] Bertch G F et al., *Phys Rep.*, 160(1988) 189.
- [2] Dorso C. and Randrup J., *Phys. Lett.*, B188(1987) 287, B215(1988) 611.
- [3] S. Leray, C. Ngo and M. E. Spina, *Nucl. Phys.*, A495(1988) 283.
- [4] Ayik S. and Gregoire Ch. *Phys. Lett.*, B212 (1988) 296.
- [5] Jiang D X et al., *Nucl. Phys.*, A503(1989) 560.

- [6] Crema E et al., *Phys. Lett.*, **258**(1991) 266.
[7] Fatyga M et al., *Phys. Rev. Lett.*, **55**(1985) 1376.
[8] 葛凌霄、曾祥华等, *高能物理与核物理*, **14**(1990)278.
[9] Aichelin J., Peilert G. and Bohnet A., *Phys. Rev.*, **C37**(1988) 2451.

The Relationship Between the Energy Storage and the Entrance Channel Dynamics in HIC

Zeng Xianghua Ge Lingxiao Zuo Wei

(*Institute of Modern Physics Academia Sinic, Lanzhou 730000*)

Received on March 1, 1993

Abstract

The relationship between the energy storage and the entrance channel dynamics (i.e. incident energy, impact parameter and collision system) is studied by using the BUU model. The effects of the entrance channel mass asymmetries on the excitation energy of the compound systems are also discussed.

Key words excitation energy, incident energy, impact parameter, collision system.