

在量子分子动力学模型中与 N, Z 有关的宏观势对碎片形成的影响*

李君清^{1)a} 刘建业^{1)a} 赵恩广^{1)b} 朱全伶^a

a (中国科学院近代物理研究所 兰州 730000) b (中国科学院理论物理研究所 北京 100080)

1992 年 11 月 27 日收到

摘 要

基于 Quantum Molecular Dynamics (QMD) 模型, 在 Skyrme 类型势, Yukawa 和库仑相互作用势外, 又考虑了与碎片集团的中子、质子数相关的宏观势, 即液滴模型中的对称能再加上壳修正能和对修正能。这样的考虑改善了中能重离子反应中集团形成的合理结构。

关键词 重离子, 碰撞, 量子, 集团。

近年来, 量子分子动力学模型^[1] (QMD) 有效地描述了中高能区域的重离子碰撞中的碎片的形成问题。此模型直接基于 Skyrme 类型的核子-核子相互作用, 辅以长程的 Yukawa 相互作用以给出一合理的核表面, 并加上有效库仑相互作用。基于这种类型的相互作用而不是平均场, 可以一个事件一个事件地模拟核子运动, 保留了核子间的关联和涨落, 因此可以描述反应过程中集团的形成^[2,3]。集团的形成机制一般地可以认为是: 当炮弹以中高能轰击靶核时, 此复合系统开始被压缩了, 其间可能发射一些核子, 然后系统开始膨胀, 这时由于核子之间的短程吸引相互作用而形成了一个的集团^[4]。但是 QMD 模型中核子的传播过程是由经典正则方程给出的, 因而在整个反应过程中, 每个核子实际上都被看成是一个个的经典粒子, 尽管粒子是以位置和动量的双高斯波包描述的。反应中判断集团的方法是, 把所有相距在 3fm 之内的核子看成是一个集团,

最近, 我们检验了由 QMD 模型所计算的碎片集团的中子数和质子数, 发现某些所谓的“集团”具有非常不合理的中质比。实际上发现有 2 个, 3 个甚至 4 个中子或质子凑在一起形成的所谓质量数为 2, 3, 4 的集团。几个质子也能单独在一起是因为原模型对库仑力的考虑过于简单; 它实际上把原子核看成是个均匀带电体, 每个核子都带有电荷 Z/A 。

Skyrme 力通常用于正常核。在反应过程中核物质密度可能是极端地高或低。加之运动方程是经典正则方程而不是薛定谔方程, 所以很难给出碎片核的特征性质来。为了弥补其不足, 在 Skyrme 力之外, 除了补充表面效应的 Yukawa 势, 又加了一项与集团的

* 中国科学院理论物理学科特别支持费部分资助。

1) 中国高科技中心客座研究人员。

子和质子数有关的宏观相互作用。我们所用的哈密顿量是:

$$H = V_{loc} + V_{Yuk} + V_{Coul} + V_i(N_i, Z_i)/A_i, \quad (1)$$

式中 N_i 和 Z_i 是第 i 个集团的中子数和质子数。

$$V_{loc} = t_1 \cdot \delta(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2) + t_2 \cdot \delta(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2)\delta(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_3), \quad (2)$$

$$V_{Yuk} = t_3 \frac{\exp(-|\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2|/m)}{|\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2|/m}, \quad m = 0.8\text{fm}, \quad (3)$$

$$V(N, Z) = V_{symmetry} + V_{shell} + V_{pair}, \quad (4)$$

其中,

$$V_{symmetry} = K[a_1 A - a_2 A^{2/3}] \left(\frac{N-Z}{A} \right)^2, \quad (5)$$

为液滴模型中的液滴能中的对称能项。且 $K = 1.79$, $a_1 = 15.677$, $a_2 = 18.56$, N, Z, A 分别为各集团的中子数, 质子数和质量数。 V_{pair} 是对能。 V_{shell} 是壳修正能, 对此, 用了如下的唯象公式^[5]:

$$S(N, Z) = C \left[\frac{F(N) - F(Z)}{(A/2)^{2/3}} - C_1 A^{1/3} \right], \quad (6)$$

对轴对称形变

$$S_{crit} = 2C_1 d_0^2 \left(1 - \frac{C_2 Z^2}{2C_1 A} \right), \quad (7)$$

而 $C_1 = a_2 \left[1 - K \left(\frac{N-Z}{A} \right)^2 \right]$, $d_0 = 0.27$, $C_2 = 0.717$, $C = 5.8$ 。

$$V_{shell}(N, Z) = S_{crit} [1 + \lg(S/S_{crit})], \quad (8)$$

如果

$$Q_N = C_q \frac{M(I)^{5/3} - M(I-1)^{5/3}}{M(I) - M(I-1)}, \quad C_q = 0.6, \quad (9)$$

$$M(I) = 0, 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126, 184 \dots,$$

当 $I = 1, 2, 3 \dots 9 \dots$,

$$M(I-1) \leq N \leq M(I),$$

$$F(N) = Q_N [N - M(I-1)] - C_q [N^{5/3} - M(I-1)^{5/3}], \quad (10)$$

只要将式中的 N 用 Z 代替, 则 $F(Z)$ 具有与 $F(N)$ 同样的函数形式。(2)、(3) 式中所用参数见文献[6]。

$$V_{pair} = \begin{cases} \frac{12}{\sqrt{A}} - \frac{10}{A}, & \text{奇-奇核} \\ \frac{10}{A}, & \text{奇}A\text{核} \\ -\frac{12}{\sqrt{A}} + \frac{10}{A}, & \text{偶-偶核} \end{cases} \quad (11)$$

正则方程在 x 方向有插分形式: $\Delta x_i = \frac{p_{x_i}}{E_i} \Delta t$, 式中, Δx_i 为第 i 个粒子在 x 方向的位移, p_{x_i} 为动量, E_i 为总能量, Δt 为时间间隔。对这个总能量, 粒子在不同的集

团里给予宏观势影响的修正。在 y, z 方向的处理相同。

由于考虑了与 N, Z 有关的势, 那些具有合理中质比的碎片集团, 特别是其中 N 或 Z 有一个或两个都是幻数的集团, 就比别的情况的碎片集团显得特别地稳定。为此, 在数值计算的每个时间间隔里都必须判断每个核子此刻分别处于什么样的集团里。

我们将与 N, Z 有关的势 $V(N, Z)$ 用于计算 $^{40}\text{Ca}(30\text{MeV}/A) + ^{40}\text{Ca}$ 反应, 碰撞参

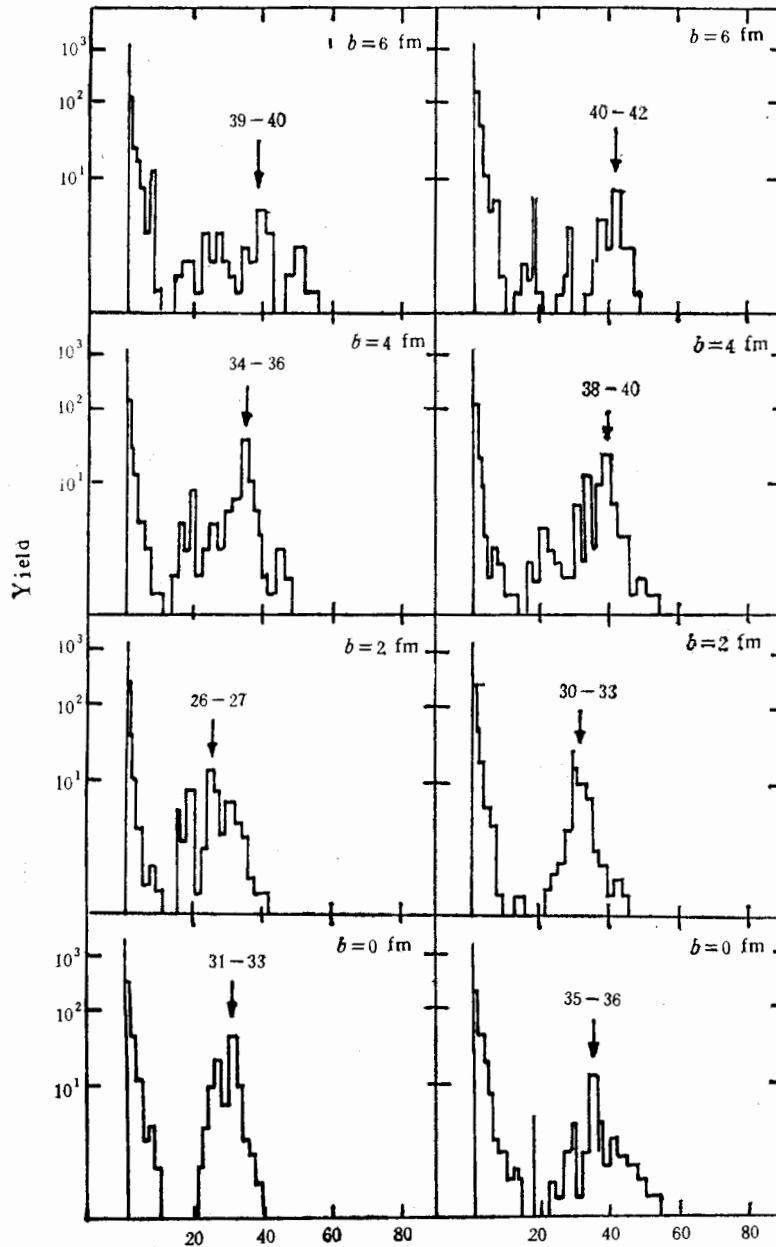


图1 对 $^{40}\text{Ca}(30\text{MeV}/A) + ^{40}\text{Ca}$ 反应在碰撞参数 $b = 0, 2, 4, 6\text{fm}$ 四种条件下质量数为 A 的集团的多重分布与 A 的关系

数为 $b = 0, 2, 4, 6\text{fm}$ 4 种情况。图 1 给出了反应碎片的多重性随碎片质量的分布。左边一列是考虑了 $V(N, Z)$ 修正的情况, 右边一列是没有考虑 $V(N, Z)$ 的情况。两种情况表现了相当相似的行为, 多重性分布都基本上具有两种分量。每个图左边的第一分量包括了单个核子和非常轻的粒子的贡献, 这主要是压缩阶段发射出来的, 以及后来从大块核物质中蒸发出来的产物。因为 $30\text{MeV}/A$ 并不是特别高的能量, 炮弹和靶的复合体系膨胀时不可能瞬时碎裂, 会有一些大块物质的复合体系存在。对右边的第二分量先讨论没有考虑 $V(N, Z)$ 的情况。中心碰撞时, 这个第二分量峰值分布在类弹或类靶核附近, 它主要来源于大块核物质的蒸发剩余物。当 $b = 2\text{fm}$ 时, 这个分量移向左边质量数较小的方向, 因为这时弹核给系统带进了一定的角动量而使系统不够稳定, 较大块的核物质不易形成。当 b 更大时, $b = 4, 6\text{fm}$ 时, 这个分量又渐渐移向右方。因为这时弹、靶核相距较远, 两核间相互作用越来越弱, 相对运动能量的耗散较小, 有较少的粒子发射。这个分量基本上是不完全深部非弹反应的产物。对这 4 种情况, 图 1 左列中考虑了 $V(N, Z)$ 的第二分量都比右列更移向左方。这是因为 ^{40}Ca 是个双幻核, 当反应中两核相接触时, 复合系统却没有任何幻数, $V(N, Z)$ 中对称能和壳修正能的变化使得系统比不考虑这部分能量时更加不稳定。

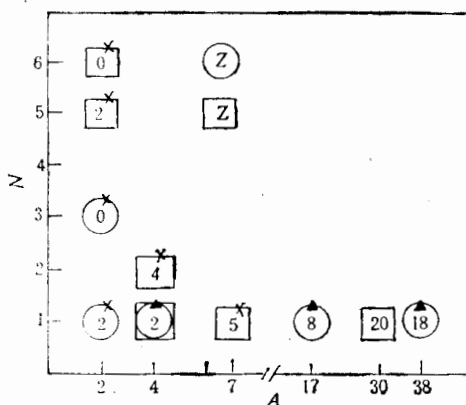


图 2 同样反应中 $b = 2\text{fm}$ 时特别不合理的所谓集团和具有至少一个幻数的集团的数目及种类与质量数 A 的函数关系

图 2 中给出了对 $^{40}\text{Ca}(30\text{MeV}/A) + ^{40}\text{Ca}$ 反应 10 次模拟后, $b = 2\text{fm}$, 相互作用时间 $T = 200\text{fm}/c$ 时的反应碎片集团产物中的一些特别不合理的和特别稳定的(单幻或双幻数)集团。对带 $V(N, Z)$ 修正的计算中出现的特别不合理集团用圈表示, 不带 $V(N, Z)$ 的结果用方块表示, 并在圈和方块上打了叉。圈和方块中间的数表示集团的质子数。横轴标志集团的质量数, 竖轴标记该集团的个数。反应后出现的单幻或双幻核也分别按两种情况给出, 但在圈或方块上打了三角号。很显然考虑了 $V(N, Z)$ 修正的情况比没有考虑修正时具有较少的不合理集团和较多的带有幻数的核。

在图 3 中我们给出了在有 $V(N, Z)$ 修正和无修正两种情况下某些不合理集团怎样随反应时间进行演变。所取的条件与图 2 的相同。可发现在有 $V(N, Z)$ 修正的情况下, 某些不合理集团由于涨落而产生, 但因为有 $V(N, Z)$ 的修正, 这种不合理集团有慢

慢地被修正的趋势,最后只留下较少的数目。但对另一情况,所有的不合理集团在整个反应过程中看来都由系统的随机性质所支配。一旦一个集团形成了,这个集团的核子与别的集团都至少远离 3fm 以上,如果没有其中哪个核子的动量特别大,那么这个集团一般就一直存在下去。

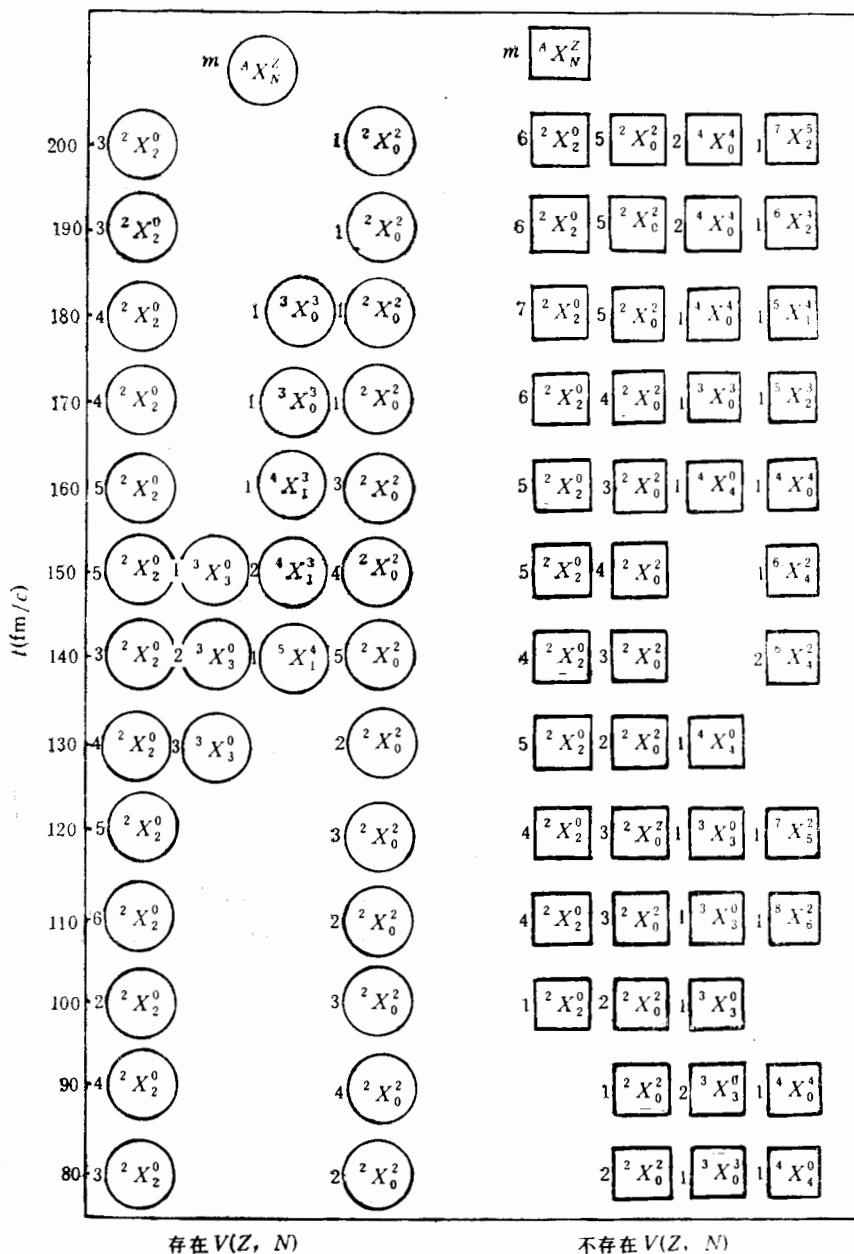


图 3 同样反应中 $b = 2\text{fm}$ 时某些不合理集团随时间的演变过程

圈表示有 $V(N, Z)$ 修正的结果,方块表示没有修正的结果。在圈和方块内标明的是质量数为 A , 有 N 个中子, Z 个质子的具体集团 X 。在圈和方块前所标的数字是存在于这种集团的数目。

但是很显然尽管有 $V(N, Z)$ 的修正, 在反应 200fm/c 以后, 仍然存在着一些不合理的集团. 因为 $V(N, Z)$ 是由集团里的 N, Z 数而计算的, 仅在集团形成以后, 如果集团的 N, Z 数不合理时, 这个修正的加入才使集团得到一个附加的激发能而使不合理集团更不稳定. 尤其是远离 β 稳定线时, 对称能可以很大. 相反, N, Z 合理分布时集团会结合得更加稳定. 因此 $V(N, Z)$ 的加入力图使各集团体现原子核的基本特征, 但仍不能彻底补救原问题的发生. 较好的方法是在解正则方程时也计算 $V(N, Z)$ 的梯度, 即 $\frac{\partial V}{\partial N}$ 和 $\frac{\partial V}{\partial Z}$, 从而在反应过程中预先阻止不合理集团的产生. 计算这点有些困难, 因为 $\frac{\partial V}{\partial N}$ 和 $\frac{\partial V}{\partial Z}$ 与 $\frac{\partial H}{\partial r}$ 密切相关, 具体处理起来比较麻烦. 但尽管如此, 进一步的尝试计算正在进

行之中.

感谢与葛凌霄同志的多次讨论.

参 考 文 献

- [1] J. Aichelin, *Phys. Rep.*, **202**(1991)235.
- [2] J. Aichelin, G. Peilert, et al., *Phys. Rev.* **C37**(1988)2451.
- [3] G. Peilert, H. Stocker, et al., *Phys., Rev.*, **C39**(1989)1402.
- [4] H. Stocker, J. A. Maruhn and W. Greiner., *Phys. Rev. Lett.*, **44**(1980)725.
- [5] W. D. Myers et al., LBL-Report, UCRL-11980(1965).
- [6] 朱全伶、葛凌霄、李祝震, 高能物理与核物理, **16**(1992)658.

Effect of N, Z Dependent Macroscopic Potential to cluster Formation in Quantum Molecular Dynamics

Li Junqing¹ Liu Jianye¹ Zhao Enguang² Zhu Quanling¹

¹ (Institute of Modern Physics, Academia Sinica, Lanzhou 730000)

² (Institute of Theoretical Physics, Academia Sinica, Beijing 100080)

Received on November 27, 1992

Abstract

Based on the QMD model, in addition to the Skyrme-type, Yukawa and Coulomb interactions, a macroscopic potential, which is dependent on the neutron and proton number N, Z of the cluster and consists of the symmetrical energy of liquid drop model and shell and pairing correction energies, has been taken into account. It improved the reasonable structure of the cluster formation in heavy ion reactions with intermediate energy.

Key words Heavy ion, Collision, Quantum, Cluster.