第18卷 第5期　　高能物理与核物理　　Vol. 18, No. 5
1994年5月　　HIGH ENERGY PHYSICS AND NUCLEAR PHYSICS　　May, 1994

中高能重离子碰撞中的阵发混沌*

葛凌霄　张晓东　朱全伶
（中国科学院近代物理研究所　兰州　730000）

1993年3月8日收到

摘　要

在量子分子动力学模型计算多重碎裂基础上，应用阶乘矩方法分析了多重碎裂．对 ^{197}Au(200MeV/u)＋^{197}Au 碰撞系统进行了计算．发现多重分布有阵发混沌存在．并对临界现象做了初步讨论．

关键词　多重碎裂，阶乘矩，阵发混沌．

1 引　言

近年来，在有关复杂的多粒子产生现象的研究中，人们发现了阵发混沌（intermittency）现象．在相对论重离子碰撞研究中，间歇性已成为一个重要的实验观察量[1]，并被试图用于分析夸克胶子等离子体产生．这种大的、非统计性的涨落在原子核、强子、轻子碰撞中[2]都已被观察到．由于阵发混沌反映了物理系统的标度不变性，人们认识到阵发混沌可能是物理系统发生相变的普遍信号．在中高能（$\geqslant$ 100MeV/u）重离子碰撞中，多重碎裂已成为反应的主要机制，碎块质量多重数分布和电荷分布[3]接近于幂定理(Power-law)，类似于液-气相变的预言[4]，在临界区，碎块尺寸分布为 $N(S,\varepsilon)\propto S^{-\tau}f\cdot(\varepsilon S^{\sigma})$．$f(\varepsilon S^{\sigma})$ 为标度函数，ε 为关联长度，S 为碎块尺寸，τ、σ 为临界指数．所以，在中高能重离子碰撞中，系统可能已进入液气相变临界区．在此能区中，阵发混沌现象的存在，将对碎裂机制，液气相变的研究，有非常重要的意义．

渗透模型[5]和碎裂的统计模型[6]都已经给出了多重碎裂中的阵发混沌，但它们都是静态模型，不能真实反映重离子碰撞的机制及多重碎裂产生．利用一个能反映重离子碰撞的动力学行为的模型来研究临界现象和阵发混沌已成为一个迫在眉睫的问题．量子分子动力学（QMD）模型，在研究集团的形成和碎裂中有突出的优点．在这个模型中，每个核子由一个双高斯波包来表示，并直接通过两体、三体相互作用考虑核子间的相互作用势，对反应一个事件一个事件地模拟，保留了涨落和关联．在 QMD 模型基础上计算的碎块多重数分布[7,8]，都与实验符合得很好．利用 QMD 模型，对阵发混沌进行研究，不但能真实模拟阵发混沌在一个实际物理系统中的起源，而且也是对 QMD 模型本身的一个检验．

* 国家自然科学基金和中国科学院 LWTZ-1298 经费资助．

本文利用 QMD 模型，计算了 $^{197}Au + {}^{197}Au$ 系统在 200MeV/u 的入射能量下的阶乘矩 (Scaled Factorial Moments)，清楚地观察到了阵发混沌的存在，并对临界现象做了初步的讨论．

2 模　　型

假定每个核子在相空间中由一个双高斯波包表示，系统的 Wigner 分布函数为[9]

$$f(\boldsymbol{r},\boldsymbol{p},t)=\sum_i f_i(\boldsymbol{r},\boldsymbol{p},t)=\sum_i \frac{1}{(\pi\hbar)^3}\cdot\exp\{-(\boldsymbol{r}-\boldsymbol{r}_i)^2/2L-(\boldsymbol{p}-\boldsymbol{p}_i)^2\cdot 2L/\hbar^2\},\tag{1}$$

由方程(1)可得到系统在坐标空间中的密度

$$\rho(\boldsymbol{r},t)=\sum_i \frac{1}{(2\pi L)^{3/2}}\exp\{-(\boldsymbol{r}-\boldsymbol{r}_i)^2/2L\}.\tag{2}$$

模型中，直接通过两体和三体相互作用，得到核子间的相互作用势，我们选用了 Skyrme 类型的短程相互作用势，Yukawa (表面弥散)和 Coulomb 类型的长程相互作用势．其具体表达式及参数见文献[7]．对碎块集团的选取与文献[7,10]相同，即考虑核子为每个集团的组成部分．若两个核子间的距离小于临界值 3.0fm，可判断为相同的集团，在对所有核子重复判断后，系统便被分为孤立的核子和某些集团．

Bialas 和 Peschanski 提出的阶乘矩方法，对分析阵发混沌起了重要作用．类似于文献[5]，我们将碎块电荷 Z 的变化区间 ΔZ 分成 M 个窗口，每个窗口的尺寸 $\delta Z=\Delta Z/M$，然后计算阶乘矩:

$$\langle F_q\rangle=\frac{M^{q-1}}{\langle N\rangle^q}\left\langle\sum_{j=1}^{M}n_j(n_j-1)\cdots(n_j-q+1)\right\rangle,\tag{3}$$

其中，$\langle N\rangle$ 为反应事件的平均碎块多重性；n_j 为每一个事件中，第 j 个窗口中碎块的数目．由于碎块分布在每个小窗口 δZ 分布的不均匀性，给出了一个修正因子

$$R_q=M^{q-1}\sum_{m=1}^{M}\frac{\langle n_m\rangle^q}{\langle N_f\rangle^q},\tag{4}$$

其中 $\langle n_m\rangle=\frac{1}{N_{\rm events}}\sum_{i=1}^{N_{\rm events}}n_{m,i}$，$\langle N_f\rangle$ 为区间 ΔZ 中的平均碎块多重度，$N_{\rm events}$ 为产生事件的总数目．

Bialas 和 Peschanski[1] 注意到 $F_q^{\rm corr}=\langle F_q\rangle/R_q$ 可以消去统计涨落，如果去掉统计涨落，若多重产生服从平滑的分布，随着窗口的变窄，阶乘矩会达到饱和，最终趋于常数；反之，如果存在动力学涨落，阶乘矩会随窗口 δZ 的变化而变化．若 $F_q^{\rm corr}$ 随 δZ 的变化有指数行为

$$F_q^{\rm corr}\propto(\delta Z)^{-\alpha_q},\tag{5}$$

其中 α_q 为间歇指数，则此系统存在自相似的分形结构．分形的维数

$$d_q=\alpha_q/(q-1).\tag{6}$$

3 结果和讨论

图 1 为 QMD 计算的 $^{197}Au + ^{197}Au$ 系统在入射能量为 200MeV/u 时，中心碰撞所产生的电荷分布，其最主要的特征是符合幂定理 (Power-law)。其幂指数为 -2.92.

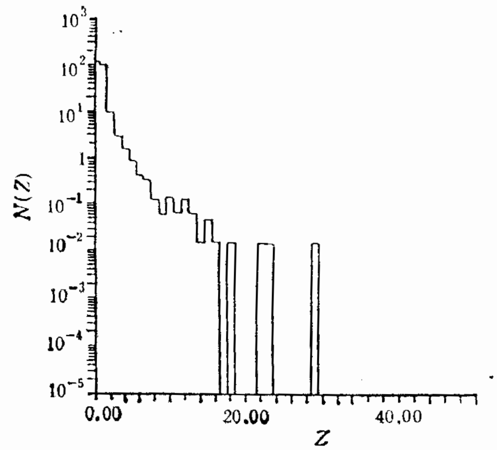

图 1 $^{197}Au(200MeV/u) + ^{197}Au$ 碰撞系统的电荷多重性分布

由于 QMD 模型是一个动力学模型，其碎块质量，电荷分布随时间的演化而发生变化。反应发生后在每个时间间隔上产生的碎块都可能是实验上有意义的观察量。在一次模拟中，将每 10fm/c 产生的碎块作为一个事件，并统计了在动力学过程中所有产生的事件。经过多次模拟，得到了足够多的事件。这样，它不但反映了反应的动力学演化，而且节省了大量的 CPU 时间，却不可避免地产生了非碎裂机制的产物。但在计算中，选择了 $N_{fr} \geqslant 3$ 且 $Z_{fr} \geqslant 3$ 的事件，N_{fr} 和 Z_{fr} 分别是碎裂多重数和电荷，即选择了产生中等质量碎片反应的事件，保证了这些事件是由碎裂产生的中间质量碎片。

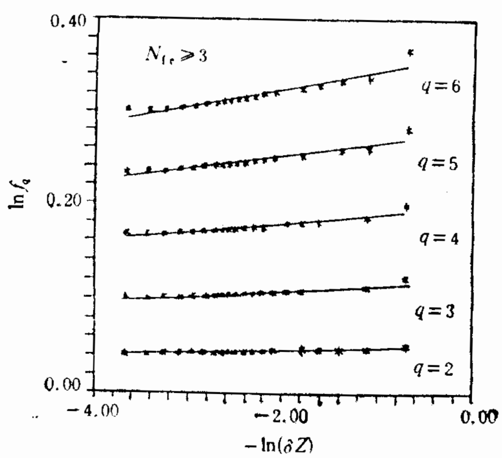

图 2 $\ln F_q^{corr}$ 与 $\ln\delta Z$ 的依赖关系(看正文)

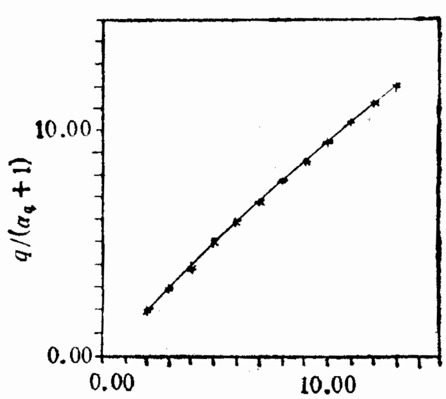

图 3 间歇指数与阶乘矩阶数的关系

F_q^{corr} 分布与 $-\ln(\delta Z)$ 的关系如图 2 所示。随着 δZ 的减小，F_q^{corr} 连续增长，符合 $F_q^{corr} \propto \delta Z^{-\alpha_q}$ 的关系。对 δZ 变量，利用最小二乘法拟合，得到了其斜率 α_q.

$$\alpha_2 = 0.0020, \alpha_3 = 0.0055, \alpha_4 = 0.0096, \alpha_5 = 0.0144,$$
$$\alpha_6 = 0.0195, \alpha_7 = 0.0260, \alpha_8 = 0.0317, \alpha_9 = 0.0387.$$

由此说明，在 QMD 模型中，动力学涨落在碎裂反应中起到了非常重要的作用，且清楚地

存在阵发混沌.

在 200MeV/u 的 $^{197}Au + ^{197}Au$ 碰撞中，占优势的反应机制是多重碎裂. 产生多重碎裂的机制是什么？是近年来人们关注的问题，并且已从动力学和统计两种观点进行过讨论. 动力学观点认为，在碰撞动力学过程中，大的动力学涨落，也就是说，平均场和密度涨落是产生碎裂的主要因素. 用 QMD 方法计算了碰撞过程中，密度分布二极矩和其它一些集体变量如动量分布四极矩. 四极矩涨落的动力学演化[12]结果说明：一旦多重碎裂占主要优势，这些涨落是一直增加的；涨落的动力学演化和反应机制密切相关. 当然，这些涨落仍然是从常规的统计出发. 而阶乘矩 F_q^{corr} 排除了统计涨落，仅仅留下动力学涨落部分. 计算的阶乘矩会随窗口 δZ 的变化而变化具有指数行为并不是偶然的，它可能反映了反应机制跃迁的特性. 但这种规律能否是一个多重碎裂信号还需要继续研究.

文献[11]指出，在相变区，随阶乘矩阶数增大，存在一个临界值 q_{cr}，在此临界值处

$$\frac{\delta}{\delta q}[(\alpha_q + 1)/q]|_{q=q_{cr}} = 0. \tag{7}$$

在图 3 中，给出了阶乘矩的阶数 q 与 $q/(\alpha_q + 1)$ 的关系，但未能发现此临界值.

4 结　论

本工作在 QMD 模型计算多重碎裂基础上，应用阶乘矩方法分析了多重碎裂，为认识一个高激发核的反应机制跃迁提供了一些新的认识. 计算发现，对 200MeV/u 的 $^{197}Au + ^{197}Au$ 碰撞系统，反应机制为多重碎裂占优势，碎块多重分布有阵发混沌存在，动力学涨落是导致碎裂的一个重要因素. 但现在所做的多重数分布的研究尚不能指出临界现象的信号，也不能确定反应机制的跃迁就显示出临界现象的性质.

QMD 方法是一种模拟重离子碰撞的动力学模型，它成功地描述了碎裂和其它反应机制，再现了阵发混沌，这也说明，它可以是模拟真实的物理系统中阵发混沌和反应机制跃迁的一个有力且可行的工具.

参　考　文　献

[1] A. Bialas and R. Peschanski, *Nucl. Phys.*, **B**273 (1986) 703; B308(1988) 857.
[2] T. H. Burnett et al., *Phys. Rev. Lett.*, **50**(1983) 2062; P. Holynski et al., *Phys. Rev. lett.*, **62** (1989) 733.
[3] B. Jackbsson et al., *Nucl. Phys.*, **A509**(1990) 195.
[4] M. G. Fisher, *Physics*, **3**(1967) 225; X. Campi., *J. Phys.*, **19**(1986) 917.
[5] M. Ploszajczak and A. Tucholski, *Phys. Rev. Lett.*, **65**(1990) 1539.
[6] D. H. E. Gross et al., *Phys. Rev. Lett.*, **68**(1992) 146.
[7] 朱全伶、葛凌霄、李祝霞，高能物理与核物理，**16**(1992)658.
[8] J. Aichelin, *Phys. Rep.*, 202(1991) 235.
[9] P. Carruthers and M. Zachariasen, *Rev. Mod. Pyhs.*, **55**(1983) 245.
[10] C. Hartnack et al., *Nucl. Phys.*, **A495**(1989) 303.
[11] A. Bialas and R. Peschanski, *Phys. Lett.*, **B207**(1989) 59.
[12] 张晓东、朱全伶、葛凌霄，Ann. Report (IMP) 1992.

Intermittency in the Heavy Ion Collisions at Intermediate and High Energies

Ge Lingxiao Zhang Xiaodong Zhu Quanling
(*Institute of Modern Physics, Academia Sinica, Lanzhou* 730000)

Received on March 8, 1993

Abstract

The method of scaled factorial moments is used to study fluctuations of the fragment-size distribution based on the quantum molecular dynamics model. From the calculation of ^{197}Au (200MeV/u) + ^{197}Au central collision system, an intermittent pattern of fluctuations is found. In particular, the critical behavior is preliminarily discussed.

Key words multifragmentation, scaled factorial moments, intermittency.