

文章编号: 1007-4627(2004)04-0379-03

激发核系统中最大 Lyapunov 指数、密度涨落 以及多重碎裂之间的关系*

张英逊, 吴锡真, 李祝霞

(中国原子能科学研究院, 北京 102413)

摘 要: 基于量子分子动力学模型, 系统地研究了从⁴⁸Ca 到²⁹⁸114 一系列核素在不同温度下的最大 Lyapunov 指数、密度涨落以及体系多重碎裂之间的关系. 发现最大 Lyapunov 指数随温度变化有一峰值出现(该峰值所对应的温度为“临界温度”), 在该临界温度时体系的密度涨落达到最大, 碎块的质量分布能够给出较好的 Power Law 指数. 通过对最大 Lyapunov 指数与密度涨落随时间变化行为的研究, 发现密度涨落的时间尺度要大于混沌的时间尺度, 意味着混沌的概念可以用来研究体系的多重碎裂过程. 最后还给出了有限体系相变的临界温度随体系大小变化的规律.

关键词: 最大 Lyapunov 指数; 密度涨落; 多重碎裂

中图分类号: O571.4 **文献标识码:** A

近来, 研究相变过程中的密度涨落的反常增长与微观尺度上体系混沌度的快速增长之间的联系已经引起人们的关注. 我们知道, 最大 Lyapunov 指数(LLE)量度了系统混沌度的大小, 也给出了系统在相空间膨胀的速率^[1].

基于量子分子动力学模型, 我们详细研究了一系列核系统的 LLE、密度涨落随时间演化的规律以及在不同温度下的 LLE、密度涨落以及碎块的质量分布规律的变化.

LLE 的定义为 $\lambda = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n\tau} \ln \frac{\|dX_n\|}{\|dX_0\|}$. 考虑到有限核体系多重碎裂过程不满足各态历经的特殊性, 我们利用系综平均的方法给出了 $\lambda(t)$ 在不同温度下的变化行为(如图 1 所示). 从图中可以看出, $T = 11$ MeV 时 $\lambda(t)$ 的行为与 $T = 2$ 和 $T = 30$ MeV 时的行为很不相同. 对于 $T = 11$ MeV 时, 我们发现 LLE 在 $t = 130 - 175$ fm/c 之间会有一平台出现, 这个过程实际对应于碎片的形成过程. 考虑到碎裂体系的特殊性, 取该时间段上的 $\lambda(t)$ 作为所研究的碎裂体系的 LLE. 为了研究有限体系相变的临界温

度, 作为例子, 图 2 给出了¹²⁴Sn, ²⁰⁸Pb 两个体系的 LLE 随温度的变化关系. 从图中可以发现, LLE 随着温度的增加而增加, 并且在某一温度达到极大(“临界温度”). 这是由于, 在临界温度以前, 涨落随温度增加而增加造成的. 温度高于临界温度以后, 体系迅速碎裂, 集体膨胀运动占据了主要作用, LLE 随温度增加而减小. 通过对体系的密度涨落随时间、温度变化的研究, 我们也得出密度

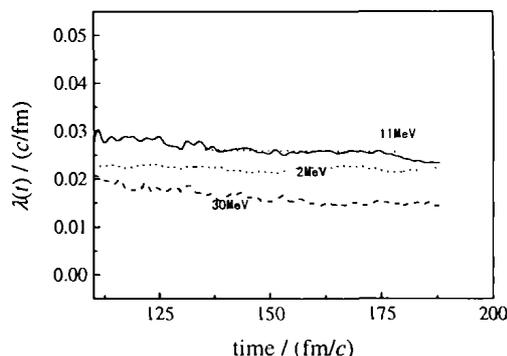


图 1 体系²⁰⁸Pb 在 $T = 2, 11, 30$ MeV 时的 $1/t \|dX(t)\| / \|dX_0\|$ 随时间的变化行为

收稿日期: 2004 - 08 - 16

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10175093, 10175089, 10235030, 10235020); 核工业基金资助项目; 国家重点基础研究发展规划资助项目(G20000774)

作者简介: 张英逊(1977-), 男(汉族), 陕西蒲城人, 博士生, 从事中能重离子核反应中的同位旋问题的研究;

E-mail: zhyx@iris.ciae.ac.cn

涨落在临界温度时会出现反常增长, 且其增长的特征时间约为 150 fm/c, 而这一时间尺度大于混沌的特征时间(约为 40 fm/c). 这意味着, 混沌的概念可以被用来研究体系多重碎裂的相变过程. 对于密度涨落随温度的变化, 发现其类似于 $\lambda \sim T$ 的变化规律. 对于较重的系统, LLE 以及密度涨落在同一个温度(“临界温度”)下达到极大值(图 3), 并且此时的碎块的质量(电荷)分布满足 Fisher 的 Power law 的规律, 还给出了各自体系相应的关于质量与电荷的 Power law 指数. 通过对一系列核的研究, 我们给出了“临界温度”与有限体系大小的规律. 最后, 通过理论与数值计算的研究还表明, 体系的 LLE 与密度涨落的大小成正比.

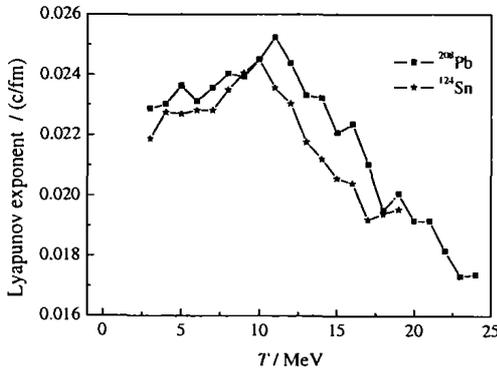


图 2 ¹²⁴Sn, ²⁰⁸Pb 两个体系的 LLE 随温度的变化关系

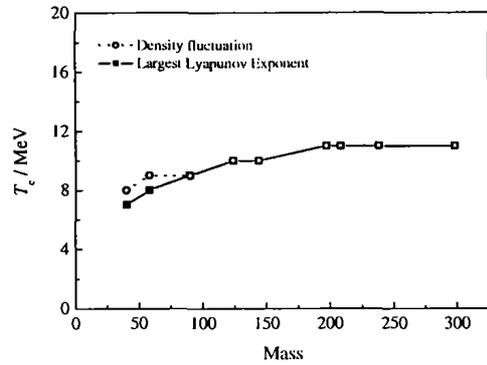


图 3 利用 LLE 和密度涨落所获得的临界温度的比较

通过研究得到以下几条结论:

(1) 核体系多重碎裂的相变过程中, 在临界温度附近体系的 LLE 与密度涨落随时间的演化, 都会出现反常现象, 且密度涨落的特征时间要大于混沌的特征时间.

(2) 对于较重的系统, 通过 LLE、密度涨落以及由碎块分布的 Power Law 的规律所给出的临界温度互相吻合.

(3) 在核体系的多重碎裂的相变过程中, LLE 将随着体系的密度涨落的增加而增加, 且其与多重碎裂过程也紧密相关.

(4) 临界温度(T_c)的有限体系效应. 对于较轻的系统, 体系的 T_c 随质量的增加而缓慢增加; 对于较重的系统, 体系的 T_c 趋于定值 11 MeV.

参 考 文 献:

[1] Zhang Yingxun, Wu Xizheng Li Zhuxia. Phys Rev, 2004,

C69: 044606, and reference therein.

Connection between the Largest Lyapunov Exponent, Density Fluctuation, and Multifragmentation in Excited Nuclear Systems *

ZHANG Ying-xun, WU Xi-zhen, LI Zhu-xia

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

Abstract: Within a quantum molecular dynamics model we calculate the largest Lyapunov exponent (LLE), the density fluctuation, and the mass distribution of fragments for a series of nuclear systems at

* **Foundation item:** National Natural Science Foundation of China(10175093, 10175089, 10235030, 10235020); Science Foundation of Chinese Nuclear Industry; Major State Basic Research Development Program (G20000774)

different initial temperatures. It is found that the LLE peaks at the temperature (“critical temperature”) where the density fluctuation reaches a maximal value and the mass distribution fragments is fitted best by the Fisher’s power law from which the critical exponents for mass and charge distribution are obtained. The time-dependent behavior of the LLE and density fluctuation is studied. We find that the time scale of the density fluctuation is much longer than that of inverse LLE, which means that chaotic motion can be developed well during the process of fragment formation. The finite-size effect on “critical temperature” for nuclear systems ranging from calcium to superheavy nuclei is also studied.

Key words: the largest Lyapunov exponent; density fluctuation; multifragmentation

(上接第 369 页)

Shell Structure of Superheavy Nuclei*

ZHANG Wei^{1,2}, MENG Jie^{1,2,3}, ZHANG Shuang-quan^{1,2}, GENG Lis-heng^{1,2,4}, H. Toki⁴

(1 *Center of Theoretical Nuclear Physics, National Laboratory of Heavy Ion Accelerator of Lanzhou, Lanzhou 730000, China;*

2 *School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China;*

3 *Institute of Theoretical Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China;*

4 *Research Center for Nuclear Physics (RCNP), Osaka University, Ibaraki, Osaka, 567-0047, Japan*)

Abstract: The magic proton and neutron numbers are searched in the superheavy region with proton number $Z=100-140$ and neutron number $N=(Z+30)-(2Z+32)$ by the relativistic continuum Hartree-Bogoliubov (RCHB) theory with interactions NL1, NL3, NLSH, TM1, TW99, DD-ME1, PK1, and PK1R. Based on the two-nucleon separation energies S_{2p} and S_{2n} , the two-nucleon gaps δ_{2p} and δ_{2n} , the shell correction energies E_{shell}^p and E_{shell}^n , the pairing energies E_{pair}^p and E_{pair}^n , and the pairing gaps Δ_p and Δ_n , some proton numbers and neutron numbers are suggested to be the magic numbers within the present approach. The shell quenching phenomena are observed in the region of the superheavy nuclei.

Key words: superheavy nuclei; relativistic mean field theory; shell structure

* **Foundation item:** Major State Basic Research Development Program of China(G2000077407); National Natural Science Foundation of China(10025522,10221003,10047001)