

原子核有序到混沌相变与大变形的稳定性*

吴锡真^{1,2)} 顾建中³⁾ 卓益忠^{1,2,3)} 李祝霞^{1,2,3)}

1) (中国原子能科学研究院 北京 102413)

2) (兰州重离子加速器国家实验室原子核理论研究中心 兰州 730000)

3) (中国科学院理论物理研究所 北京 100080)

摘 要 从原子核有序到混沌相变的观点讨论原子核大变形的稳定性, 从而对核裂变和某些核结构问题以新的理解.

关键词 最邻近单粒子能级间距分布 泊松分布 维格纳分布 裂变 巨超形变态

分类号 O571.21

在有限量子系统中, 随系统参数的变化, 系统行为发生显著变化, 将这类现象称为相变. 在原子核中, 从有序到混沌和从混沌到有序的相变是一种重要的相变现象, 它与核的单粒子运动和核变形的稳定性密切相关. 实验揭示的一系列重要事实, 为这类研究提供了坚实的背景. 例如, 在核的激发能接近中子结合能处, 即约 8 MeV 时, 实验显示核的相邻能级间距分布很好地服从维格纳分布, 即系统为 GOE^[1]. Garrett 收集了质量数为 155 至 185 之间的 2 500 个核素接近 Yrast line 附近的能级间距分布, 显示了极好的泊松分布^[2], 说明核在基态附近呈现明显的规则运动. 另外一个非常重要的实验是, 关于¹⁹²Hg 全 γ 谱的测量. 根据这个谱, 人们抽出了超形变态(即裂变同质异能态)与正常形变态之间 γ 跃迁的信息, 即从冷的具有分立能级的有序态过渡到热的具有准连续能级的混沌态以及相反的跃迁, 这是核内存在有序 \rightleftharpoons 无序相变的极好事例^[3]. 从这些实验现象说明核作为一个有限量子体系, 其中既存在规则和混沌运动, 也存在体现这些运动行为转变的相变, 并且这种相变与核的集体运动,

如裂变和核结构问题有着密切关系. 所以从有序 \rightleftharpoons 无序相变的观点来理解裂变现象和核变形稳定性是当前核物理研究的一个基本观点和基本问题. 根据最近建立在简化模型基础上的计算^[4], 在具有扁椭球形变的平均场中, 八极形变能引起单粒子运动呈现明显的混沌行为, 而对长椭球形变场, 则八极形变不能导致混沌出现. 考虑到原子核是对其大振幅运动从理论和实验两方面都进行过研究的唯一量子体系, 因此将上述研究推广到包括裂变和巨超形变等原子核大形变空间将具有重要意义, 这就将核内混沌现象、裂变运动、超形变及巨超形变等核结构问题联系起来. 本文在更真实的核模型, 即双中心壳模型基础上, 对核的单粒子谱的统计性质与核变形稳定性的关系进行了探索性研究. 鉴于颈部坐标对裂变和巨超形变研究的重要性, 因此本文首先对颈部坐标对单粒子谱统计性的影响给以特别关注, 然后给出了重核裂变过程中单粒子谱统计性与裂变动力学及静力学行为的关系, 最后对最近发现的在²⁵²Cf 自发裂变碎片中的巨超形变碎片给予解释.

众所周知, 双中心壳模型特别适合于描

* 1998 - 05 - 20 收稿.

* 国家自然科学基金(项目号 19775066)和核工业科学基金资助.

述原子核的大变形构型，尤其是断点构型。双中心壳模型的位是(相对 z 轴轴对称)^[5]

$$V(\rho, z) = \begin{cases} \frac{1}{2}m_0\omega_{z_1}^2 z'^2 + \frac{1}{2}m_0\omega_{\rho_1}^2 \rho^2, & z < z_1 \\ \frac{f_0}{2}m_0\omega_{z_1}^2 z'^2(1 + c_1 z' + d_1 z'^2) + \frac{1}{2}m_0\omega_{\rho_1}^2(1 + g_1 z'^2)\rho^2, & z_1 < z < 0 \\ \frac{f_0}{2}m_0\omega_{z_2}^2 z'^2(1 + c_2 z' + d_2 z'^2) + \frac{1}{2}m_0\omega_{\rho_2}^2(1 + g_2 z'^2)\rho^2, & 0 < z < z_2 \\ \frac{1}{2}m_0\omega_{z_2}^2 z'^2 + \frac{1}{2}m_0\omega_{\rho_2}^2 \rho^2, & z > z_2 \end{cases}$$

其中，

$$z' = \begin{cases} z - z_1, & z < 0 \\ z - z_2, & z > 0 \end{cases}$$

在此， z_1 和 z_2 分别表示两碎片的中心，并且 $z_1 \leq 0 \leq z_2$ 。在以上公式中出现的所有参数都可以用以下 5 个变形参数表示：(1)2 个中心的分离距离，即核的拉长 Δz ；(2)描述颈部变化参数 ϵ ($\epsilon=0$ 相应于椭球形状， $\epsilon=1$ 相应于明显颈部形成的形状)；(3)质量不对称参数 $X_i = \frac{A_1 - A_2}{A_1 + A_2}$ ，其中 A_1 和 A_2 是两部分碎片的质量；(4)和(5)两碎片的变形 β_1 和 β_2 。以这个真实模型为基础，我们计算单粒子谱的最邻近能级间距分布。图 1 给出在长椭球加质量不对称形变下，核的单粒子能级随颈部参数变化的情况。从图可见，当颈部参数很小时(即没有颈形成时)，能级间距分布趋于典型的泊松分布，预期有稳定长椭球变形存在，这一结论与文献[4]的结论相同。

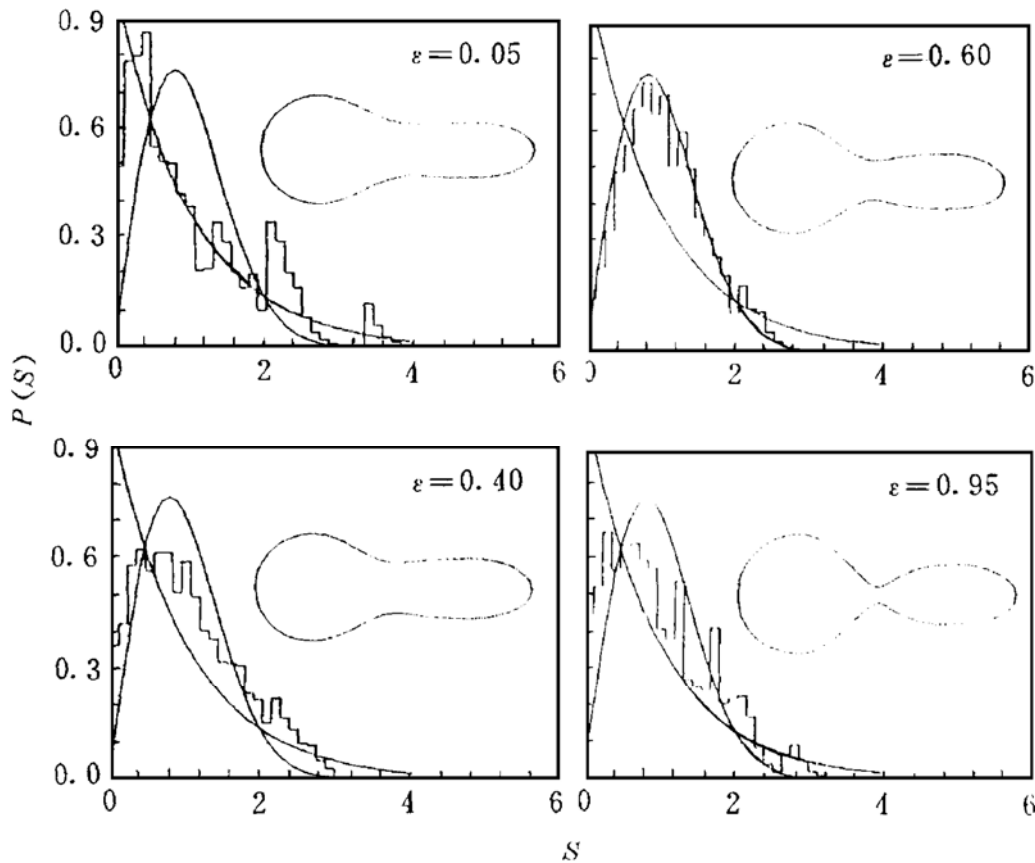


图 1 不同颈参数下的单粒子谱最邻近能级间距分布

核的其它变形参数： $\Delta Z=8.0$ ， $\beta_1=0.3$ ， $\beta_2=3.0$ 和 $X_1=0.3$ ；
 实践表示维格纳分布和泊松分布，而直方图是作者的计算结果。

然而随颈部参数的增加，能级间距分布开始偏离泊松分布，逐渐趋于维格纳分布。当颈部参数变得相当大之后，即有较细的颈形成，

这时谱的量子统计给出典型维格纳分布，表明长椭球相对于混沌的稳定性由于颈的形成而被破坏。假如颈再继续变细接近断点时，

能级间距分布又回到泊松分布, 此时单粒子运动相对混沌的稳定性恢复了. 联系到裂变变动力学研究^[6,7], 无论通过解经典方程, 还是解量子方程, 都发现, 当颈部半径约为 2~3 fm 时, 颈的断裂是非常迅速的, 这一结论与我们上面观察到的质量不对称长椭球变形下核随颈部增加出现的不稳定性相一致. 因此,

得出的结论是: 长椭球变形核体系相对混沌的稳定性不仅与四极变形和八极变形有关, 而且与颈部形成有密切关系. 这就理解了为什么在研究裂变和巨超形变问题时, 必须引入颈部坐标的原因.

为建立长椭球变形构型的稳定性与量子谱统计性质的普遍关系, 图 2 绘出了²⁵²Cf

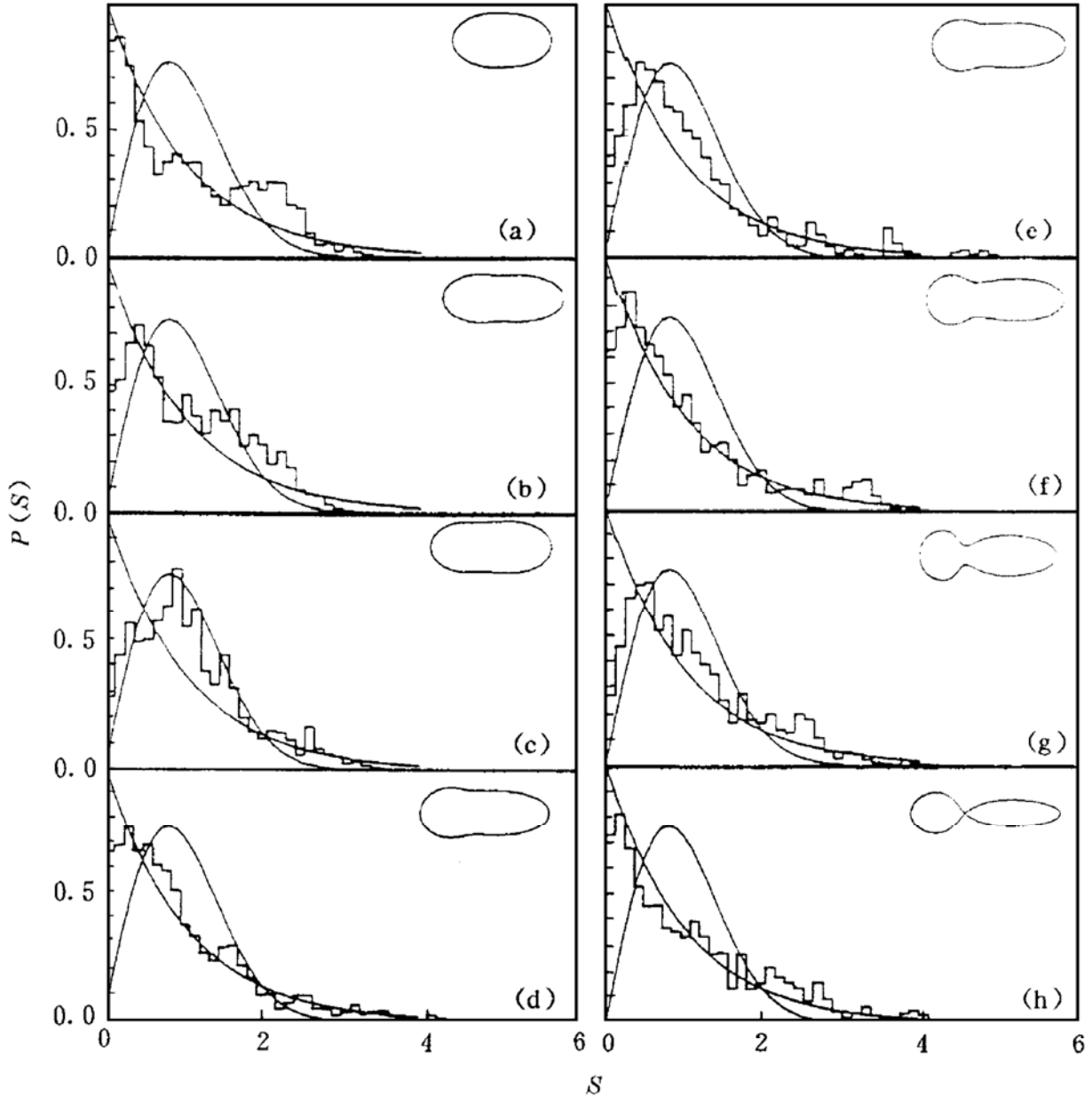


图 2 在裂变过程经历的变形空间中单粒子谱相邻能级间距分布
 (a) 在基态, (b) 基态和第一鞍点, (c) 在第一鞍点上, (d) 在第二位能极小, (e) 在第二鞍点上, (f) 在第三位能极小, (g) 在第三鞍点上, (h) 在断点.

核沿裂变路径的单粒子能级间距分布. 图中的裂变路径是在双中心壳模型基础上, 用宏观微观方法计算获得的. 路径从基态位能极

小开始, 通过第一鞍点、第二极小、第二鞍点, 然后到达具有明显质量不对称和颈部形成的第三极小和第三鞍点, 最后达到断点.

在基态, 观察到谱的类泊松分布, 如图(a)所示. 当系统离开基态趋向第一鞍点时, 谱的统计性质便偏离了泊松分布[见图(b)], 它相当于处在基态和第一鞍点中间的构型. 在第一鞍点上, 谱的相邻间距显示了维格纳分布[见图(c)], 在第二鞍点[图(e)]和第三鞍点[图(g)]上, 能级间距的分布也显示同样的维格纳分布, 而在第二极小[图(d)], 第三极小[图(f)]以及在断点处[图(h)], 能级间距分布则表现了泊松分布. 因此可以总结为: 在鞍点上, 相邻单粒子谱的能级间距分布呈现维格纳型. 这表明在这些构型下, 单粒子运动相对混沌是不稳定的, 而在裂变位能极小附近, 观察到类泊松型的单粒子谱能级间距分布, 它表明单粒子运动是规则的. 从这个研究中, 我们初步建立了核变形的稳定性与量子谱统计性质的一般关系. 在此基础上, 对裂变静力学的进一步认识, 就是在裂变位能极小和鞍点处除了能量不同之外, 单粒子运动相对混沌的稳定性也不同. 同时, 我们还进一步理解了核结构的某些重要问题. 例如, 在重核中第二极小是对超变形的产生负责的, 而第三极小和断点则对巨超变形的产生负责. 此外, 上述研究还为重原子核中粘滞性与核形变的依赖关系提供了信息. 因为按照文献[8]的结论, 核的粘滞性可从规则运动到混沌运动的观点来理解, 即假如单粒子运动是规则的, 那么粘滞性速率会急剧下降. 根据这个结论, 结合对量子谱的统计性质与核变形的依赖关系的研究, 我们可以清楚地理解到在鞍点上的粘滞性要比位能极小处的粘滞性大. 这一结论也得到裂变动力学计算的支持.

在关于由核裂变所揭示的大变形空间中, 对单粒子谱统计性质研究的基础上, 可以进一步理解 ^{252}Cf 自发裂变中发现的巨超变形碎片的重要实验. 在裂变过程中, ^{252}Cf 系统从基态演化到鞍点, 最后到达断点. 在这一过程中, 系统的单粒子能级将分裂成两套, 一套为相应于正常变形碎片 Mo, 另一套为

相应于巨超变形碎片 Ba. 这个行为不仅定性地反映在作为变形函数的能级图上, 也定量地反映在相邻单粒子能级间距分布上. 图 3(a)给出了断点构型下 ^{252}Cf 单粒子能级间距分布, 它接近于体现单粒子规则运动的泊松分布, 这标志着由正常变形 Mo 和巨超变形 Ba 所组成碎片对的新壳的出现, 以及会促使系统的短暂稳定性. 这个行为也体现在如图 3(b)所示的 Poincare 截面的周期性封闭轨道上. 在做 Poincare 图时, 取 $\rho=0$ 和 $P_\rho>0$, 其中 ρ 是柱坐标极轴坐标, P_ρ 是相应的动量, z 是对称轴坐标.

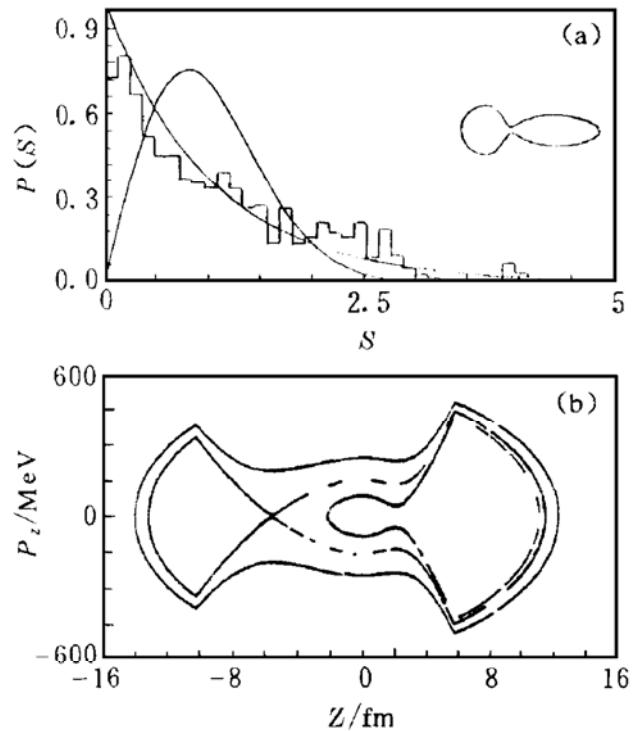


图 3 ^{252}Cf 断点构形的单粒子能级间距和相应的 Poincare 图

(a) 在 ^{252}Cf 断点由正常形变 Mo 核和巨超形变 Ba 核所组成系统的单粒子能级间距分布; (b) 在与(a)相同的系统中, 在 z - P_z 平面上的 Poincare 截面图.

从上面无论是量子的还是经典的处理, 都可以看出对由正常变形 Mo 和巨超变形 Ba 组成的系统存在一个短暂的局域稳定结构, 这就是观察到巨超形变态 Ba 的原因. 为了进一步验证这一结论, 在双中心壳模型基础上, 进行的液滴加壳修正计算, 也发现在 ^{252}Cf 断点附近的位能曲面上, 当核的拉长 $\Delta Z=18.2$

fm 和碎片 Ba 的变形 $\beta_2 \approx 3.1$ 处存在一个浅的局域位能极小. 这一结果与单粒子谱的统计行为是一致的.

综上所述, 本文研究了颈部坐标对大变形核中单粒子运动行为的影响, 从有序 \rightleftharpoons 混沌相变的观点解释了裂变动力学中颈断裂过程, 同时获得了在裂变过程所经历的大变形下单粒子谱统计性质与核稳性关系的信息, 即在鞍点上观察到单粒子运动的混沌行为, 而在位能极小处, 单粒子呈规则运动. 以这个一般性研究为基础, 对实验上发现的 ^{252}Cf 自发裂变中 Ba 碎片的巨超形变现象进行了理论解释. 从以上的初步工作可看出, 我们实际上已开始了关于核构型的稳定性和核谱统计性质关系的研究, 这对于极端条件下(大变形、强颈部形成和质量不对称)的核结构和核动力学研究具有重要意义.

参 考 文 献

1 Bohigas O, Hag R V, Pandey A, Fluctuation Proper-

ties of Nuclear Energy Level and Width: Comparison of Theory with Experiment in Nuclear Data for Science and Technology, ed by Böckhoff K H, D Reidel Publishing Company, Dordrecht; Holland/Boston; U S A/London; England, 1982, 809~813

2 Garrett J D, Robinson J Q, Foglia A J *et al.* Nuclear Level Repulsion and Order vs Chaos. Phys Lett, 1997, B392: 24~29

3 Hackman G, Khoo T L, Carpenter M P. Spins, Parity, Excitations Energies and Octupole Structure of an Excited Superdeformed Band in ^{194}Hg and Implications for Identical Bands. Phys Rev Lett, 1997, 79: 4100~4103

4 Heiss W D, Nazmitdinov R G, Radu S. Chaos in Axially Symmetric Potentials with Octupole Deformation. Phys Rev Lett, 1994, 72: 2351~2354

5 Maruhn J A, Greiner W. The Asymmetric Two Center Shell Model. Z Phys, 1972, 251: 431~457; Wu Xizhen, Maruhn J A, Greiner W. The Rotating Two Center Shell Model. Z Phys, 1989, A334: 207~213

6 Nix J R. Further Studies in the Liquid-Drop Theory of Nuclear Fission. Nucl Phys, 1969, A130: 241~292

7 吴锡真. 质量参数计算和裂变动力学研究. 原子核物理. 1987, 9: 145~153

8 Wilkinson M. Dissipation by Identical Oscillators. J Phys, A: Math Gen, 1990, 23: 3603~3611

Order to Chaos Transition in Nuclei and Stability of a Large Deformed Configuration

Wu Xizhen^{1,2)} Gu Jianzhong³⁾ Zhuo Yizhong^{1~3)} Li Zhuxia^{1~3)}

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

2) (Center of Theoretical Nuclear Physics, National laboratory of Heavy Ion Accelerator of Lanzhou, Lanzhou 730000)

3) (Institute for Theoretical Physics, the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Abstract The Stability of a large deformed configuration of nuclei has been discussed from the point of view of interplay between order and chaos. A further understanding of fission dynamic and some problems on nuclear structure have been obtained.

Key words nearest neighbour level spacing distribution poisson distribution wigner distribution fission hyperdeformation