

# 原子核和强相互作用物质的相结构及相变\*

刘玉鑫<sup>1,2;1)</sup> 穆良柱<sup>1</sup> 常雷<sup>1</sup> 袁玮<sup>1</sup>

1(北京大学物理学院理论物理研究所 北京 100871)  
2(北京大学重粒子物理教育部重点实验室 北京 100871)

**摘要** 简要介绍原子核的单粒子运动相与集体运动相, 讨论并介绍集体运动中的振动、轴对称定轴转动和不定轴转动的相结构以及由核子数和角动量驱动的这些相之间的相变的研究现状, 同时还简单介绍关于原子核的液气相变和强相互作用物质的退禁闭及手征相变的研究现状.

**关键词** 单粒子运动与集体运动 核形状相变 强相互作用物质 退禁闭 手征对称性破缺与恢复

## 1 引言

自然界中的相互作用可以分为引力作用、电磁作用、弱作用和强作用 4 类, 参与强相互作用的粒子或具有强相互作用的系统称为强相互作用系统(包括强子物质、夸克物质等), 原子核是有限个强子组成的特殊形式(束缚态)的强作用系统, 因此关于原子核和强相互作用物质的相结构及相变的研究对于认识强相互作用的性质, 了解宇宙的起源和演化至关重要, 并被认为是有限系统的强作用统计物理的检验平台. 因此, 近年来, 关于原子核和强相互作用物质的相变的研究不仅是原子核物理、粒子物理、天体物理、宇宙学等领域研究共同关注的重要前沿课题, 还引起了有限量子多体系统领域和统计物理学界的极大关注. 本报告简要介绍原子核及强相互作用物质的相结构及相变研究的现状及我们在相关研究中的部分结果.

## 2 原子核的相及相变

### 2.1 原子核的单粒子运动与集体运动及形状

原子核是有限数目的强子组成的束缚系统, 其中的核子(质子和中子)自然具有单粒子运动状态, 并建立了壳模型, 成功地描述了原子核的一些性质<sup>[1, 2]</sup>. 实验上对原子核的能谱和电磁跃迁等性质的研究表明, 原子核还具有集体运动, 并建立了原子核具有形状和

振动、转动等集体运动模式的概念. 人们通常利用将核半径按球谐函数  $Y_{lm}(\theta, \phi)$  展开<sup>[3, 4]</sup>的方法来描述原子核的形状, 并将相应的形变称为  $2^l$  极形变(常见的一些形变如图 1 所示). 已经观测到和已经预言的原子核形状多种多样<sup>[5, 6]</sup>, 比较重要的是四极形变, 实验上已经观测到的最高极形变是 16 极形变<sup>[6]</sup>. 按照壳模型和集体模型的观点, 幻数核多为球形, 而偏离满壳的核则为形变核, 形变核可以细分为长椭球形、扁椭球形、三轴不对称形、梨形、香蕉形、纺锤形等. 同时原子核还可能形状共存现象. 基态形变核普遍存在于各个通常的质量区<sup>[6]</sup>, 超重质量区也存在形变核和形状共存, 而且结构很丰富<sup>[7]</sup>. 而激发态核的形变则更富含物理内容, 如超形变态、回弯现象、同核异能态等都和形变直接相关.

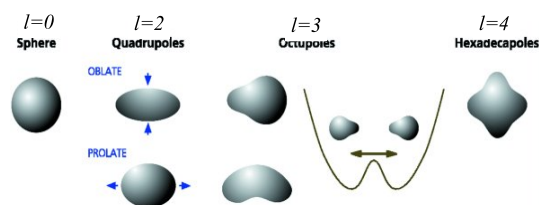


图 1  $l=0, 2, 3, 4$  时对应的  $2^l$  极形变的图示(取自文献 [6])

近年的实验发现, 在较高激发能和较高角动量情况下, 原子核的集体能谱消失, 出现带终结现象<sup>[8]</sup>, 这表明发生了由集体运动到单粒子运动的相变. 一般情况下, 集体运动相和单粒子相是分离的, 并且单粒子

\* 国家自然科学基金(10425521, 10575004), 国家重大基础研究发展规划(G2000077400), 教育部重点科研项目(305001)和教育部博士点专项研究基金(20040001010)资助

1) E-mail: liuyx@phy.pku.edu.cn

相分布在集体运动相之外. 最近, 实验还发现, 囚禁的冷原子系统也存在这种相分离现象<sup>[9, 10]</sup>.

## 2.2 原子核的形状相变

由于原子核的形状与中子质子比、激发态能量、角动量、集体运动与单粒子运动的竞争、核环境的温度等多种因素有关, 还与一定的动力学对称性相联系<sup>[5]</sup>, 因此, 原子核的形状发生变化说明其状态和性质发生了变化, 于是人们在研究核形状随某个物理量的变化时引入了形状相变的概念, 并把除温度以外的因素引起的形状相变称为量子相变. 通常关于原子核形状相变的研究集中在某个同位素链(或同中子素链)中的原子核的基态<sup>[5, 11, 12]</sup>, 近年来临界状态的对称性和三相点的陆续发现<sup>[12–24]</sup>, 丰富了人们对于基态原子核形状相变的认识. 由于实验上探测技术的进步, 使得我们不仅可以对原子核基态的形状进行研究, 而且可以对激发态、甚至高自旋态的形状进行研究, 2003年观测到的沿Yrast带出现的集体振动模式到定轴转动模式的变化给出了低激发态中可能存在转动(或角动量)驱动的形状相变的实验证据<sup>[25]</sup>. 事实上, 理论上对于自旋和温度引起的原子核形状相变的研究出现的更早, 并且一直没有中断<sup>[26–31]</sup>. 形状共存是另一个核形状研究关注的焦点<sup>[32]</sup>, 因为这可能是单粒子运动和集体运动有较强耦合的结果<sup>[6, 33]</sup>.

对于原子核基态形状相变的研究, 常用的方法有集体模型<sup>[3]</sup>、相互作用玻色子模型<sup>[5, 34–36]</sup>(IBM), Hartree-Fock-Bogoliubov(HFB)理论<sup>[26]</sup>, 另外还可以使用热力学统计理论<sup>[37, 38]</sup>, 组态混合模型<sup>[39]</sup>. 而对于原子核激发态的形状相变的研究则采用Landau相变理论<sup>[27]</sup>、有限温度推转HFB<sup>[28]</sup>、推转IBM<sup>[29, 37, 38]</sup>等. 在这些方法中, 集体模型有比较直观的几何图象, 但是缺乏微观机制; 而微观理论没有直接的几何图象. 由于IBM既有较好的微观基础<sup>[40, 41]</sup>, 又可以由相干态理论建立直观的几何图象<sup>[5, 11, 42–47]</sup>, 所以IBM理论在原子核的形状相变研究中得到了广泛应用.

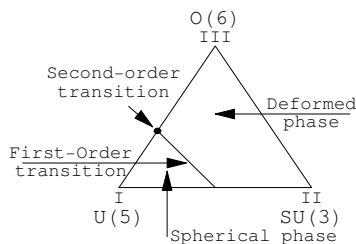


图2 Casten三角形(取自文献[5])

早期利用IBM对原子核基态的形状相变的研

究可以归纳为Casten三角形<sup>[5, 48]</sup>(如图2所示), 图中三个顶点对应IBM的 $U(5)$ ,  $SU(3)$ ,  $O(6)$  3种极限, 它们分别对应球形、轴对称形变、 $\gamma$ -不稳定形变<sup>[5, 11, 42–47]</sup>. 并且, 球形( $U(5)$ 对称)与轴对称形变( $SU(3)$ 对称)之间存在一级相变, 而球形到 $\gamma$ -不稳定形变( $O(6)$ 对称)则经历一个二级相变.

近年来, 对基态原子核相变的研究扩展了Casten三角形, 不但在 $U(5)$ — $SU(3)$ 相变区找到了形状共存<sup>[49]</sup>, 还引入了新的临界点对称性:  $E(5)$ ,  $X(5)$ ,  $Y(5)$ <sup>[14–17]</sup>, 这样扩展的IBM的对称性及其相变的关系可以图示为图3的形式. 图中四面体的顶点表示各种对称性极限, 其中 $U(5)$ ,  $SU(3)$ ,  $O(6)$ 的意义与Casten三角形中的相同,  $SU^*(3)$ ( $SU(3) \otimes \overline{SU(3)}$ ,  $\overline{SU(3)}$ )与 $SU(3)$ 的差别是生成元的四极张量中的结构常数由 $-\sqrt{7}/2$ 换为 $\sqrt{7}/2$ 对应三轴形变,  $E(5)$ ,  $X(5)$ ,  $Y(5)$ 则是相应顶点所示对称性之间相变的临界点. 对 $E(5)$ 对称态的深入研究表明, 这是一个三相共存点(triple point)<sup>[20, 21]</sup>, 即球形、扁椭球、长椭球三种形状共存, 类似于水的气、液、固三相共存<sup>[21]</sup>. 此外, 人们还预言, 在长椭球与扁椭球形状相变临界点附近的原子核还可能具有 $Z(5)$ 对称性<sup>[24]</sup>, 也有人认为长椭球与扁椭球形状之间相变的临界点具有 $O(6)$ 对称性<sup>[19]</sup>.

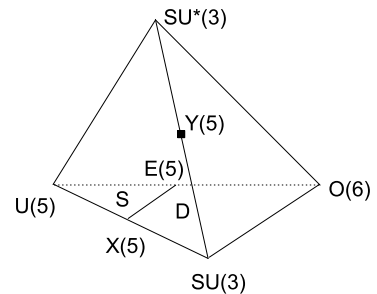


图3 扩展的IBM的对称性间的演化图(取自文献[17])

理论上发现形状共存和各种临界点对称性之后, 很快就在实验上找到了对应的原子核. 例如, 与 $E(5)$ 对应的原子核有 $^{134}\text{Ba}$ <sup>[20, 50]</sup>,  $^{108}\text{Pd}$ <sup>[51]</sup>,  $^{130}\text{Xe}$ <sup>[52]</sup>等, 与 $X(5)$ 对应的原子核有 $^{152}\text{Sm}$ ,  $^{154}\text{Gd}$ ,  $^{156}\text{Dy}$ 和其他 $N=90$ 的同中子素<sup>[53–55]</sup>, 与 $Y(5)$ 对应的原子核有 $^{166, 168}\text{Er}$ <sup>[56]</sup>等, 与 $Z(5)$ 对应的原子核有 $^{194}\text{Pt}$ 等<sup>[24]</sup>. 同时也开始在实验上寻找沿着相变轨迹演化的各种同位素链<sup>[57, 58]</sup>. 并提出了多个标志相变的可观测量<sup>[18, 37, 59–65]</sup>. 类似Iachello四面体的工作很快被推广到IBM-2<sup>[66]</sup>, 并成功地找到了各种对称性之间的相变. 此外, 相应的研究也已推广到奇质量数核<sup>[67]</sup>.

对于角动量变化可能引起的原子核形状相变, 早期的研究主要基于液滴模型<sup>[4, 26]</sup>. 近年来, 人

们开始利用 Landau 相变理论<sup>[27]</sup>、有限温度推转 HFB 理论<sup>[28]</sup>、推转 IBM<sup>[29, 37, 38]</sup> 和推转无规位相近似 (CRPA)<sup>[68]</sup> 进行研究, 并且表明, 即使是核的低激发态也可能存在各种形状之间的相变. 并且在实验上发现了低激发能谱中出现振动到定轴转动的相变<sup>[25]</sup>, 利用 CRPA 对  $^{156}\text{Dy}$ ,  $^{158}\text{Er}$  分析<sup>[68]</sup> 的结果表明, 粒子准粒子的图象不能很好地解释 Yrast 带的转动惯量的突然变化, 而利用  $\gamma$  振动的减弱则可以很好地予以解释. 我们在考虑角动量投影情况下, 利用相干态方法, 在 IBM 中对原子核的 Yrast 态的位能面的分析<sup>[69-71]</sup> 表明, 在特殊的参数选取情况下, 随着角动量增大, 具有 IBM 的  $U(5)$  对称性的 Yrast 态可能发生由振动到轴对称定轴转动的相变, 具有  $O(6)$  对称性的 Yrast 态可能发生由不定轴转动到三轴转动的相变, 所得相图分别如图 4、图 5 所示, 并提出一些新的 Yrast 带中存在角动量驱动的振动到轴对称定轴转动相变的原子核实例<sup>[69, 70]</sup>.

另一方面, 直接从核子层次对原子核形状相变的研究也已取得进展<sup>[72-74]</sup>.

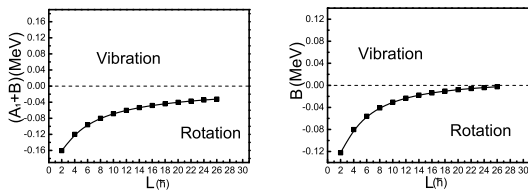


图 4 具有  $U(5)$  对称性的玻色子数为 15 的原子核的 Yrast 态的相图

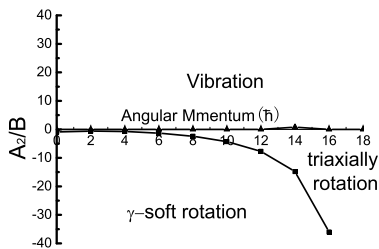


图 5 具有  $O(6)$  对称性的玻色子数为 10 的原子核的 Yrast 态的相图

### 3 原子核的液气相变

早在 20 世纪 30 年代, 根据实验观测到的原子核的性质, 人们就对原子核的结构提出了费米气体模型和液滴模型. 这说明在某些条件下, 原子核呈液相, 或者说其某些性质表现为液相的性质; 而在另一些方面, 原子核表现为气相. 在这一层次上, 所谓的“液相”和“气相”只是作为原子核的不同性质的唯象表述, 根本没有关心这两种相之间的演化. 到 20 世纪 90 年代中

期, 随着中高能核碰撞研究的深入, 人们发现<sup>[75]</sup>, 在较低和较高单核子激发能区域, 核碰撞形成的系统的温度与单核子激发能之间近似呈线性关系; 而在其间, 系统温度基本不随核子激发能变化. 这一关系显然与通常物质处于液相、气相及其间相变时温度与单粒子平均能量间的关系大致相同, 从而大胆提出核碰撞形成的系统中发生了液气相变. 由于相变通常由热力学函数和状态方程出发进行研究, 原子核的液气相变自然成为研究核物质状态方程、进而研究核天体状态及其演化的突破口. 于是, 美国 Brookhaven 国家实验室、Lawrence 国家实验室、Michigan 州立大学、德州农机学院、俄罗斯的 Dubna、德国的 GSI、法国的 GANIL 和 LNS Saclay、意大利的 delSud 国家实验室等国际大型实验室的核物理学家<sup>[76, 77]</sup> 和我国的核物理学家们<sup>[78]</sup> 系统研究了中高能核碰撞形成的系统的温度与单核子激发能的关系、热容、碎裂多重度、集体膨胀、有限尺寸及标度规律等, 理论上发展了核玻尔兹曼方程、有限系统费米子-分子动力学、全反对称分子动力学等方法, 并利用渗流理论对这些系统进行研究, 结果都表明, 在一定的条件下, 中高能核碰撞形成的系统都可能出现液气相变, 并说明该相变的机制是失稳分解. 事实上, 这些研究还有待深化, 尤其是相变的序参量、同位旋依赖性、相变的临界温度、对核天体的结构和演化的影响等都是目前研究关注的重要问题.

### 4 强相互作用物质的相结构和相变

强相互作用物质是由强子 (包括重子和介子) 组成的强子物质和由夸克、胶子组成的夸克物质的统称. 我们已经知道, 强子由夸克和胶子组成, 并且可以形象地将之比喻为束缚有夸克和胶子的口袋, 口袋内的夸克、胶子的相互作用与强相互作用真空内的作用之间的差异提供的袋常数被用来描述束缚的强度. 随着强子物质系统温度升高, 强子无规则运动的能量和其内部夸克、胶子无规则运动的能量都会升高, 压强会增大; 系统密度的增大也会引起压强增大, 当系统的真空压不能平衡强子内部的压强时 (袋常数非正定), 强子将消失, 原强子内的夸克和胶子将成为夸克物质, 也就是发生退禁闭相变. 退禁闭形成的夸克物质可能以等离子体状态存在, 从而形成夸克胶子等离子体 (QGP) 或强关联夸克胶子等离子体 (sQGP). 另一方面, 描述强相互作用的理论是量子色动力学 (QCD), QCD 具有渐近自由的性质 (上述退禁闭相变正是渐近

自由的结果和表现), 并且零质量的费米子(夸克等)具有左旋和右旋的等价性, 这种等价性称为手征对称性. 然而, 现实的强子世界处于低能区域, 夸克是禁闭的、有质量的, 并且不具有手征对称性. 但当退禁闭相变发生以后, 手征对称性可能恢复, 从而发生手征恢复相变. 再者, 我们知道, 由于电声作用的相互影响, 声子可以为电子之间提供一个较弱的吸引力, 从而形成电子库珀对, 出现超导现象; 由于夸克之间的特殊的相互作用道本来就是吸引的, 因此夸克之间也可以形成夸克库珀对, 由于夸克具有3种颜色, 3种色混合或一种色与其反色混合形成无色的强子, 但两个夸克形成的对却带有颜色, 因此由夸克库珀对形成的凝聚状态称为色超导态<sup>[79, 80]</sup>. 根据色超导态的夸克库珀对的色味结构及不同味夸克的化学势是否相同, 色超导态具有两味色超导、色味锁定色超导等多种相(有时简单地统称之为色超导相). 目前的研究表明, 强相互作用物质的相图如图6所示.

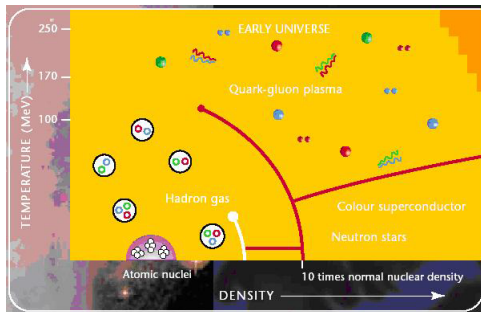


图6 强相互作用物质相图(取自<http://www.pparc.ac.uk>)

由于QCD具有渐近自由的性质, 因此, 对于高能区的场和粒子, 可以利用微扰QCD进行研究, 并得到了很好的结果. 但对于低能区域, QCD的求解问题尚未解决, 于是人们发展了QCD因子化和重求和(硬热圈展开和硬密圈展开)方法<sup>[81]</sup>, 并利用QCD的非微扰有效场论方法和唯象模型方法(Dyson-Schwinger方

程、瞬子模型、整体色对称模型、手征模型、孤立子模型、夸克介子耦合模型、夸克平均场模型、NJL模型、袋模型)<sup>[82-90]</sup>等对强相互作用物质及其相结构和相变进行理论研究. 近年来, 利用格点QCD对强相互作用物质的相结构和相变的研究也有重大进展<sup>[91]</sup>. 近来的研究还表明, 强相互作用物质的相结构和相变除依赖于温度密度外, 还依赖于系统的尺度(表面等效效应)<sup>[92]</sup>以及夸克间相互作用的跑动耦合强度以及流夸克质量等内禀因素<sup>[93, 94]</sup>.

实验上, 人们利用高能核碰撞对强相互作用物质及其相变进行研究. 目前, 美国Brookhaven国家实验室的AGS和RHIC、欧洲核子中心的SPS等大型高能核碰撞装置都已为强相互作用物质的研究作出了重大贡献(有人称, 已发现了sQGP), 即将开始运行的欧洲核子中心的LHC和即将兴建的德国GSI的SIS将为强相互作用物质的研究揭开新的一页, 我国在兰州兴建的CSR装置也将为强相互作用物质的研究谱写新的篇章.

尽管对强相互作用物质的相结构和相变的研究已取得丰硕成果, 但仍有手征对称性破缺和恢复的机制及过程和准确信号、手征对称性破缺与宇宙起源和演化以及天体演化的确切关系、费米子质量的起源、QGP的准确信号和鉴别、强子物质和夸克物质的状态方程、等等一系列重大基本问题需要研究.

## 5 小结

综上所述, 原子核和强相互作用物质的相结构和相变的研究是目前原子核物理、粒子物理、天体物理、宇宙学和统计物理等领域共同关心的重要前沿领域, 已经取得了重大进展, 但无论是实际问题还是研究方法都需要系统深入的研究.

## 参考文献(References)

- 1 Mayer M G, Jensen J H D. Elementary Theory of Nuclear Structure. New York: John Wiley, 1955
- 2 Lawson R D. Theory of the Nuclear Shell Model. Oxford: Oxford University Press, 1980
- 3 Bohr A, Mottelson B R. Nuclear Structure Benjamin W A. Massachusetts. Inc., 1975 Vol. II
- 4 HU J M, YANG B J, ZHENG C K. Nuclear Theory. Vol.1. 2nd Edition. Beijing: Atomic Energy Press, 1993 (in Chinese)  
(胡济民, 杨伯君, 郑春开. 原子核理论, 第1卷. 第2版. 北京: 原子能出版社, 1993)

- 5 Iachello F, Arima A, The Interacting Boson Model. Cambridge: Cambridge University Press, 1987
- 6 Lucas R, Europhysics News, 2001, **31**
- 7 Ćwiok S, Heenen P-H, Nazarewicz W. Nature, 2005, **433**: 705
- 8 Afanasjev A V, Fossan D B, Lane G J, Ragnarsson I. Phys. Rept., 1999, **89**: 1
- 9 Zwierlein M W et al. Science, 2006, **311**: 492; Shin Y et al. Phys. Rev. Lett., 2006, **97**: 030401
- 10 Partridge G B et al. Science, 2006, **311**: 503
- 11 Gillmore R. J. Math. Phys., 1979, **20**: 891
- 12 Frank A. Phys. Rev., 1989, **C39**: 652
- 13 Casten R F et al. Phys. Rev. Lett., 1999, **82**: 5000

- 14 Iachello F. Phys. Rev. Lett., 2000, **85**: 3580
- 15 Iachello F. Phys. Rev. Lett., 2001, **87**: 052502
- 16 Leviatan A, Ginocchio J N. Phys. Rev. Lett., 2003, **90**: 212501
- 17 Iachello F. Phys. Rev. Lett., 2003, **91**: 132502
- 18 Iachello F et al. Phys. Rev. Lett., 2004, **92**: 212501
- 19 Jolie J et al. Phys. Rev. Lett., 2001, **87**: 162501
- 20 Jolie J et al. Phys. Rev. Lett., 2002, **89**: 182502
- 21 Warner D. Nature, 2002, **420**: 614
- 22 Zamfir N V et al. Phys. Rev., 2002, **C66**: 021304R
- 23 Bonatsos D et al. Phys. Lett., 2004, **B584**: 40
- 24 Bonatsos D et al. Phys. Lett., 2004, **B588**: 172
- 25 Regan P H et al. Phys. Rev. Lett., 2003, **90**: 152502
- 26 Ring P, Schuck P. The Nuclear Many-Body Problem. New York: Springer-Verlag, 1980
- 27 Alhassid Y et al. Phys. Rev. Lett., 1986, **57**: 539; Nucl. Phys., 1987, **A469**: 205
- 28 Goodman A L, Phys. Rev., 1987, **C35**: 2338; Phys. Rev., 1988, **C37**: 2162; Phys. Rev., 1988, **C38**: 977; Phys. Rev., 1988, **C38**: 1092; Phys. Rev., 1989, **C39**: 2008; Phys. Rev., 1993, **C48**: 2679; Phys. Rev. Lett., 1994, **73**: 416; Nucl. Phys., 1995, **A591**: 182
- 29 Cejnar P. Phys. Rev., 2002, **C65**: 044312
- 30 Cejnar P. Phys. Rev. Lett., 2003, **90**: 112501.
- 31 Cejnar P, Jolie J. Phys. Rev., 2004, **C69**: 011301R
- 32 Heyde K et al. Phys. Rev., 2004, **C69**: 054304
- 33 Greiner W, Maruhn J A. Nuclear Models. Berlin: Springer-Verlag, 1996
- 34 ZENG J Y, SUN H Z. Nuclear Structure Theory. Shanghai: Shanghai Science and Technolodge Press, 1987. Chapter 5 (in Chinese)  
(曾谨言, 孙洪洲. 原子核结构理论. 上海: 上海科学技术出版社, 1987. 第5章)
- 35 Casten R F, Warner D D. Rev. Mod. Phys., 1988, **60**: 389
- 36 Pfeifer W. An Introduction to the Interacting Boson Model of the Atomic Nucleus (<http://www.walterpfeifer.ch>, 1998)
- 37 Cejnar P et al. Phys. Rev., 2003, **C68**: 034326
- 38 Cejnar P et al. Phys. Rev., 2005, **C71**: 011304
- 39 Frank A et al. Phys. Rev., 2006, **C73**: 061301(R)
- 40 Dobeš J, Navrátil P. Boson Mapping and Microscopy of the Interacting Boson Model, in Perspectives for the Interacting Boson Model. Singapore: World Scientific, 1994
- 41 YANG L M et al. Nucl. Phys., 1984, **A421**: 229c; YANG Z S et al. Nucl. Phys., 1984, **A21**: 297c
- 42 Dieperink A E L et al. Phys. Rev. Lett., 1980, **44**: 1747
- 43 Ginocchio J N et al. Phys. Rev. Lett., 1980, **44**: 1744
- 44 Bohr A, Mottelson B R. Phys. Scr., 1980, **22**: 468
- 45 Van Isacker P, CHEN J Q. Phys. Rev., 1981, **C24**: 684
- 46 Dobeš J. Phys. Lett., 1985, **B158**: 96; Phys. Rev., 1990, **C42**: 2023
- 47 ZHANG W M. Rev. Mod. Phys., 1990, **62**: 867
- 48 ZHANG J Y et al. Phys. Lett., 1997, **B407**: 201
- 49 Iachello F et al. Phys. Rev. Lett., 1998, **81**: 1191
- 50 Casten R F et al. Phys. Rev. Lett., 2000, **85**: 3584
- 51 ZHANG D L, LIU Y X. Phys. Rev., 2002, **C65**: 057301
- 52 ZHANG D L, LIU Y X. Chin. Phys. Lett., 2003, **20**: 1028
- 53 Casten R F et al. Phys. Rev. Lett., 2001, **87**: 052503
- 54 Caprio M A et al. Phys. Rev., 2002, **C66**: 054310
- 55 Tonev D et al. Phys. Rev., 2004, **C69**: 034334
- 56 García-Ramos J E et al. Phys. Rev., 2000, **C61**: 047305
- 57 García-Ramos J E et al. Phys. Rev., 2003, **C68**: 024307
- 58 McCutchan E A et al. Phys. Rev., 2004, **C69**: 064306
- 59 Werner V et al. Phys. Rev., 2000, **C61**: 021301
- 60 Werner V et al. Phys. Lett., 2002, **B527**: 55
- 61 Rowe D J. Phys. Rev. Lett., 2004, **93**: 122502
- 62 PAN F, ZHANG Y, Draayer J P. J. Phys., 2005, **G31**: 1039
- 63 ZHANG Y, HOU ZF, LIU Y X. HEP & NP, 2006, **30**(Suppl. II): 90 (in Chinese)  
(张宇, 侯占峰, 刘玉鑫. 高能物理与核物理, 2006, **30**(增刊 II): 90)
- 64 PAN F, Draayer J P et al. Phys. Lett., 2003, **B576**: 297
- 65 Rowe D J. Nucl. Phys., 2004, **A745**: 47; Rowe D J, Turner P S, Rosensteel G. Phys. Rev. Lett., 2004, **93**: 232502; Turner P S, Rowe D J. Nucl. Phys., 2005, **A756**: 333; Rosensteel G, Rowe D J. Nucl. Phys., 2005, **A759**: 92; Rowe D J, Thiamova G. Nucl. Phys., 2005, **A760**: 59
- 66 Caprio M A, Iachello F. Phys. Rev. Lett., 2004, **93**: 242502
- 67 Iachello F. Phys. Rev. Lett., 2005, **95**: 052503; Fetea M S et al. Phys. Rev., 2006, **C73**: 051301(R)
- 68 Kvasil J, Nazmitdinov R G. Phys. Rev., 2004, **C69**, 031304R; Puente A, Serra LI, Nazmitdinov R G. Phys. Rev., 2004, **B69**: 125315; Kvasil J, Nazmitdinov R G, Sitdikov A S. Phys. At. Nucl., 2004, **67**: 1650; Kvasil J, Nazmitdinov R G. Phys. Rev., 2006, **C73**: 014312
- 69 LIU Y X, MU L Z, WEI H Q. Phys. Lett., 2006, **B633**: 49
- 70 ZHAO Y, LIU Y, MU L Z et al. to be published
- 71 LIU Y, ZHAO Y, MU L Z et al. to be published
- 72 Ginocchio J N, Phys. Rev., 2005, **C 71**: 064325
- 73 LUO Y A, PAN F, et al. Phys. Rev., 2006, **C73**: 044323
- 74 HOU Z F, ZHANG Y, LIU Y X. HEP & NP, 2006, **30**(Suppl. II): 48 (in Chinese)  
(侯占峰, 张宇, 刘玉鑫. 高能物理与核物理, 2006, **30**(增刊 II): 48)
- 75 Pochodzalla J et al. Phys. Rev. Lett., 1995, **75**: 1040
- 76 Chomaz P, Colonna M, Randrup J. Phys. Rept., 2004, **389**: 263
- 77 Baran V, Colonna M, Greco V et al. Phys. Rept., 2005, **410**: 335
- 78 ZHANG Y L, SU R K, SONG H Q et al. Phys. Rev., 1996, **54**: 1137; QIAN W L, SU R K, WANG P. Phys. Lett., 2000, **B491**: 90; QIAN W L, SU R K. J. Phys., 2003, **G29**: 1023; YANG L, QIAN W L, SU R K et al. Phys. Rev., 2004, **C70**: 045207; YANG L, YIN S Y, QIAN W L et al. Phys. Rev., 2006, **C73**: 025203; MA Y G. Phys. Rev. Lett., 1999, **83**: 3617; Nucl. Phys., 2001, **A681**: 476; MA Y G et al. Phys. Rev., 2004, **C69**: 031604; Phys. Rev., 2005, **C71**: 064606; SA B H, ZHENG Y M, WANG H, ZHANG X Z. Phys. Rev., 1998, **C58**: 1101; ZHANG Y X, WU X Z, LI Z X. High Energy Phys. & Nucl. Phys., 2002, **26**: 1065; XING Y Z, LIU J Y, GUO W J. High Energy Phys. & Nucl. Phys., 2004, **28**: 607; ZUO W, LI Z H, LI A et al. Phys. Rev., 2004, **C69**: 064001

- 79 Rajagopal K, Wilczek F. arXiv: hep-ph/0011333; Alford M G. Annu. Rev. Nucl. Part. Sci., 2001, **51**: 131; Rischke D H. Prog. Part. Nucl. Phys., 2004, **52**: 197; Nishida Y, Fukushima K, Hatsuda T. Phys. Rept., 2004, **398**: 281; Shovkovy I A. Found. Phys., 2005, **35**: 1309
- 80 HUANG M, ZHUANG P F, CHAO W Q. Phys. Rev., 2002, **D65**: 076012; Phys. Rev., 2003, **D67**: 065015; LIAO J F, ZHUAN P F. Phys. Rev., 2003, **D68**: 114016; HUANG M, Shovkovy I A. Nucl. Phys., 2003, **729**: 835; WANG Q, Rischke D H. Phys. Rev., 2002, **D65**: 054005; WANG Q, WANG Z G, WU J. Phys. Rev., 2006, **D74**: 014021
- 81 LUO M, QIU J W, Stermann G. Phys. Rev., 1994, **D50**: 1951; Gyulassy M, WANG X N. Nucl. Phys., 1994, **B420**: 583; Gyulassy M, Vitev I, WANG X N. Phys. Rev. Lett., 2001, **86**: 2537; WANG E K, WANG X N. Phys. Rev. Lett., 2001, **87**: 142301; Phys. Rev. Lett., 2002, **89**: 162301; ZHANG B W, WANG E K, WANG X N. Phys. Rev. Lett., 2004, **93**: 071301
- 82 Roberts C D, Williams A G. Prog. Part. Nucl. Phys., 1994, **33**: 477; Roberts C D, Schmidt S M. Prog. Part. Nucl. Phys., 1994, **45**: S1; Alkofer R, von Smekal L. Phys. Rept., 2001, **353**: 281
- 83 Tandy P C. Prog. Part. Nucl. Phys., 1997, **39**: 117
- 84 Schäfer T, Shuryak E V. Rev. Mod. Phys., 1998, **70**: 323
- 85 Brown G E, Rho M. Phys. Rept., 2002, **363**: 85
- 86 Drukarev E G et al. Prog. Part. Nucl. Phys., 2001, **47**: 73; Drukarev E G. Prog. Part. Nucl. Phys., 2003, **50**: 659
- 87 LIU Y X, GAO D F, GUO H. Nucl. Phys., 2001, **A695**: 353; Phys. Rev., 2003, **C68**: 035204; LIU Y X, GAO D F, ZHOU J H et al. Nucl. Phys., 2003, **A725**: 127; CHANG L, LIU Y X, GUO H. Nucl. Phys., 2005, **A750**: 324; Phys. Rev., 2005, **D72**: 094023
- 88 Guichon P A M. Phys. Lett., 1998, **B200**: 235
- 89 Toki H et al. Phys. Rev., 1998, **C58**: 3749
- 90 Buballa M. Phys. Rept., 2005, **407**: 205
- 91 Fodor Z et al. Phys. Lett., 2002, **B534**: 87; Allton C R et al. Phys. Rev., 2002, **D66**: 074507; de Forcrand P et al. Nucl. Phys., 2002, **B642**: 290; Nucl. Phys., 2003, **B673**: 170; D'Elia M et al. Phys. Rev., 2003, **D67**, 014505; Gavai R V et al. Phys. Rev., 2003, **D68**, 034506; Vettorazzo M et al. Phys. Lett., 2004, **B604**: 82; Ejiri S. Phys. Rev., 2004, **D69**: 094506; Alexandru A et al. Phys. Rev., 2005, **D72**: 114513; Azcoiti V et al. Nucl. Phys., 2005, **B723**: 77; de Forcrand P et al. Nucl. Phys., 2006, **B153**(Proc. Suppl.): 62
- 92 SHAO G Y, CHANG L, LIU Y X et al. Phys. Rev., 2006, **D73**: 076003
- 93 YUAN W, CHEN H, LIU Y X. Phys. Lett., 2006, **B637**: 69
- 94 CHANG L, LIU Y X, Bhagwat M S, Roberts C D, Wright S V. arXiv:nucl-th/0605058, to be published in Phys. Rev., C

## Phase Structure and Phase Transition of Nucleus and Strong Interacting Matter<sup>\*</sup>

LIU Yu-Xin<sup>1,2;1)</sup> MU Liang-Zhu<sup>1</sup> CHANG Lei<sup>1</sup> YUAN Wei<sup>1</sup>

<sup>1</sup>(Department of Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

<sup>2</sup>(The Key Laboratory of Heavy Ion Physics, Ministry of Education, Beijing 100871, China)

**Abstract** We discuss briefly the phases of nuclear single particle motion and collective motion. Meanwhile we review the status of the research on the phase structure of the vibration, axially symmetric rotation and  $\gamma$ -soft rotation of the collective motion and the shape phase transition induced by nucleon number and angular momentum. In addition we depict simply the nuclear liquid gas phase transition as well as the deconfinement and chiral phase transition of strong interacting matter.

**Key words** single particle motion and collective motion, nuclear shape phase transition, strong interacting matter, deconfinement, chiral symmetry breaking and restoration

---

<sup>\*</sup> Supported by National Natural Science Foundation of China (10425521, 10575004), Major State Basic Research Development Program (G2000077400), Key Grant Project of Chinese Ministry of Education (305001) and Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (20040001010)

1) E-mail: liuyx@phy.pku.edu.cn