

原子核和强相互作用物质的相变

Phase Transitions of Nucleus and Strong Interacting Matter

刘玉鑫/LIU Yu-xin^{1,2,3}, 穆良柱/MU Liang-zhu¹, 常 雷/CHANG Lei¹

1. 北京大学物理系, 北京 100871
2. 北京大学重离子物理教育部重点实验室, 北京 100871
3. 重离子加速器国家实验室理论核物理中心, 兰州 730000

1. Department of Physics, Peking University, Beijing 100871, China
2. The Key Laboratory of Heavy Ion Physics at Peking University, Ministry of Education, Beijing 100871, China
3. Center of Theoretical Nuclear Physics, National Laboratory of Heavy Ion Accelerator, Lanzhou 730000, China

[摘要] 简要回顾了原子核和强相互作用物质的相结构及相变研究的现状。说明原子核和强相互作用物质的相结构和相变的研究是原子核物理、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, 到目前为止已取得重大进展, 但无论是具体实际问题还是研究方法等都需要进一步系统深入研究。

[关键词] 原子核; 强相互作用物质; 相与相变

[文献标识码] A

[中图分类号] O571

[文章编号] 1000-7857(2006)03-0048-04

Abstract: We review the status of the research on the phase structure and phase transitions of nucleus and strong interacting matter briefly. It shows that the related studies are the very active current frontier commonly interested by nuclear physics, particle physics, astrophysics, cosmology, statistical physics and other areas. A lot of significant progress has been made. However, not only concrete problems but also researching approaches need to be studied further.

Key Words: nucleus; strongly interacting matter; phase and phase transition

CLC Number: O571

Document Code: A

Article ID: 1000-7857(2006)03-0048-04

1 引言

100年前, 爱因斯坦通过分析充满空腔的辐射系统的熵与充满空腔的气体系统的熵, 提出电磁辐射由光子组成^[1,2], 从而建立了光子的概念, 吹响了引导人们探索微观世界的冲锋号。进一步的深入研究表明, 组成物质世界的粒子可以分为强子和轻子两类, 粒子间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统称为强相互作用物质(包括强子物质、夸克物质等)及其特殊形式——原子核(由有限个强子组成的系统), 对原子核和强相互作用系统的相结构及相变的研究, 对于认识强相互作用系统的相结构、相变, 了解宇宙的起源和演化至关重要, 并且可能是有限系统的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系统的相变的研究不仅是原子核物理、天体物理、宇宙学及粒子物理等领域研究的重要前沿课题, 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。本文简要介绍了原子核及强相互作用系统的相及相变研究的现状。

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

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, 并建立了壳模型成功地描述原子核的相应性质。实验上对原子核的能谱和电磁跃迁等的研究表明, 原子核还具有整体运动, 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展开来描述原子核的形状, 并将相应的形变称为极形变(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^[3,4], 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^[3,4]。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。

近年来的研究表明, 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, 即出现带终结现象^[5], 这表明发生了由集体运动到单粒子运动的相变。

收稿日期: 2005-12-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(10425521, 10135030), 国家重点基础研究发展规划项目(G2000077400), 教育部优秀青年教师奖励计划项目、教育部博士点专项研究基金项目(20040001010)

作者简介: 刘玉鑫, 男, 北京大学物理系, 教授, 主要研究方向为原子核理论、强相互作用物质理论及 QCD 相变、物理学中的群论方法及计算物理等方面的研究工作; E-mail: liuyx@phy.pku.edu.cn

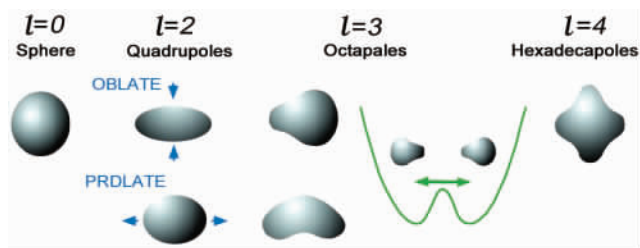


图 1 $l=0, 2, 3, 4$ 时原子核的 2 极形变的形状示意图^[3]

Fig. 1 Sketch of the shape of a nucleus in 2^l-pole deformation with (taken from Ref. [3])

2.2 原子核的形状相变

原子核形状的研究一直是原子核结构理论中一个重要的问题，这是因为原子核形状与原子核组成成分及其两种运动形式——集体运动和单粒子运动、中子质子比、角动量、激发态能量和核环境的温度等都密切相关。例如，集体模型中计算单粒子运动时常用的变形平均势就和核形状有关，不同形状原子核的集体运动模式各不相同^[6]；同时原子核的形状由所有核子的空间分布决定，而且随集体运动模式的不同而变化^[7]。另一方面，原子核的形状和一定的动力学对称性相联系^[4]，核形状变化与原子核的动力学对称性的破缺相联系。原子核的形状发生变化表明其状态和性质发生了变化，也就是发生了相变。因此，原子核的形状相结构和相变的研究是原子核结构研究的重要内容。由于形状共存可能是单粒子运动和集体运动较强耦合的结果^[7]，因此形状共存也是核形状研究中关注的焦点^[8]。

早期对于原子核形状相变的研究大多集中在一系列同位素或同中子素的基态^[4,9]，基态核的形状相变普遍存在于各个质量区^[3]，近年来关于临界状态对称性和三相点的研究^[10-16]以及对超重核的形变和形状共存的研究^[17]，极大地丰富了基态和形状相变的研究内容。另一方面，由于实验上 γ -射线探测器阵列技术的进步，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，尤其是高自旋态的核形状进行研究。激发态核的形变则更富含物理内容，如超形变带、回弯现象、同核异能态等都和形变直接相关；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表明，低激发态中可能存在转动（或角动量）驱动的由球形（振动）到长椭球形（定轴转动）的形状相变^[18]。

对于原子核基态形状的研究通常采用的理论模型有集体模型^[6]、相互作用玻色子模型 (IBM)^[4]、Hartree-Fock-Bogoliubov (HFB) 方法^[19]，另外还可以使用热力学统计理论^[20]。而对于原子核激发态的形变的研究则采用 Landau 相变理论^[21]、有限温度推转 HFB^[22]、推转 IBM^[23]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^[24]，又可以由相干态理论建立直观的几何图象^[4]，所以 IBM 理论在原子核的形状相变研究中得到了广泛的应用。

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^[4]。近年来，Iachello 利用几何模型对原子核基态形状相变的研究将 Casten 三角形扩展到四面体^[25]，如图 2 所示。图中 3 个顶点对应 IBM 的 U(5)、SU(3)、O(6) 3 种对称性极限，另一个顶点对应 SU*(3) 对称性（将 SU(3) 的生成元 $\hat{Q}_\mu^{(2)}$ 中的 $-\frac{\sqrt{7}}{2}$ 替换为 $\frac{\sqrt{7}}{2}$ ）。由相干态理论知，U(5)、SU(3)、SU*(3)、O(6) 对称性分别对应球形、轴对称长椭球形变、轴对称扁椭球形变、 γ -不稳定形

变^[4]。并且，沿球形到 γ -不稳定形变的相变为二级相变，临界点附近的核态具有 E(5) 对称性^[10]；从球形到长椭球形变区的相变为一级相变，临界点附近的核态具有 X(5) 对称性^[11]；还存在球形、长椭球形和 γ -不稳定形变三相共存的三相点^[15,16]。此外，长椭球形变与扁椭球形变之间的临界点附近的核态具有 O(6) 对称性^[12]、Y(5) 对称性^[13]，也有人认为长椭球与扁椭球形状相变临界点附近的核态还可能具有 Z(5) 对称性^[14]。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。如 ¹⁵²Sm 可能有形状共存现象^[26]，与 E(5) 对称性对应的原子核有 ¹³⁴Ba^[27]、¹⁰⁸Pd^[28]、¹³⁰Xe^[29]等，与 X(5) 对称性对应的原子核有 ¹⁵²Sm、¹⁵⁴Gd、¹⁵⁶Dy 和其它 N=90 的同中子素链^[30]，与 Y(5) 对称性对应的原子核有 ^{166,168}Er^[31]等，与 Z(5) 对称性相对应的原子核有 ¹⁹⁴Pt 等^[25]。同时，类似 Iachello 四面体的工作很快被推广到区分质子玻色子和中子玻色子的 IBM-2^[32]，同样成功地找到了各种极限对称性之间的相变。

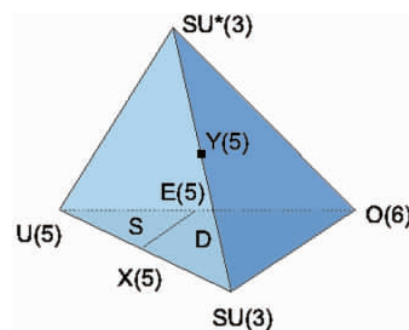


图 2 扩展的 IBM 的对称性间的演化图^[25]

Fig. 2 Extended sketch of the symmetries and their evolution in the IBM^[25]

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^[19]。近年来，人们开始利用 Landau 相变理论^[21]、有限温度推转 HFB 理论^[22]、推转 IBM^[23]、推转无规位相近似^[33]以及 IBM 框架下考虑角动量投影的相干态方法^[34,35]进行研究，结果表明，即使是核的低激发态也可能存在各种形状之间的相变，并说明低激发能谱中出现振动到定轴转动的相变的机制可能是随着角动量升高，振动逐渐减弱，转动逐渐加强，临界点以后成为很好的定轴转动。

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^[36]。

3 强相互作用物质的相变

3.1 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，人们研究了核碰撞形成的系统的温度与其中核子的激发能之间的关系，最早的由德国 GSI 报告的结果^[37]如图 3 所示，这一关系显然与通常物质处于液相、气相及其间相变中温度与单粒子平均能量间的关系相同，从而说明发生了液气相变。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、德州农学院、俄罗斯的 Dubna、德国的 GSI、法国的 GANIL 和 LNS Saclay、意大利的 del Sud 国家实验室等国际大型实验室的核物理学家系统研究了中高能核核形成的系统的温度与单粒子激发能的关系、热容、高碎裂多重度、集体膨胀、有限尺寸及 Fisher 定律标度等^[38-41],理论上发展了核玻尔兹曼方程^[42]、有限系统费米子-分子动力学^[43]、全反对称分子动力学^[44]等方法,并利用渗流理论^[45]对这些系统进行研究。结果都表明,在一定的条件下,中高能核核碰撞形成的系统中都会出现液气相变,并说明该相变的机制是失稳分解。事实上,这些研究还都有待深化,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。

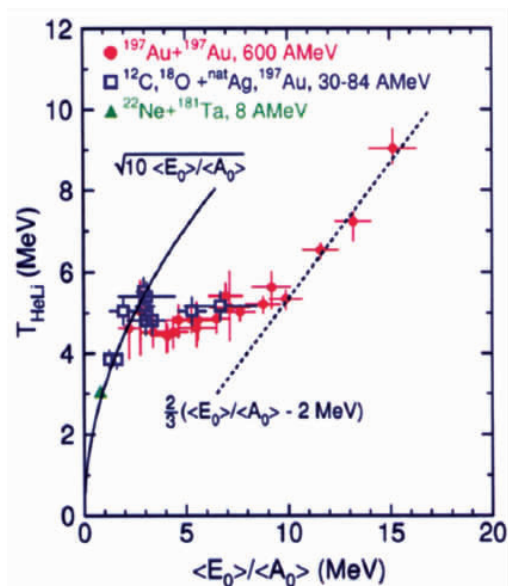


图3 核核碰撞形成的系统的温度与单核子能量的关系^[37]

Fig. 3 Relation between the temperature and the energy of single nucleon of the system formed in nucleus-nucleus collision^[37]

3.2 强相互作用物质的相变

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。因此,对强相互作用物质的组分、性质、相结构及相变的研究是当代原子核物理、粒子物理、天体物理和宇宙学等领域共同关注的重大课题。

我们已经知道,强子由夸克和胶子组成,并且可以形象地将其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常被用来描述束缚的强度。随着强子物质系统温度的升高,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,强子将消失,夸克和胶子将成为夸克物质,也就是可以发生退禁闭相变。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)。另一方面,描述强相互作用的基本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 2 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^[46]。根据色超导态的夸克库珀对的色味结构,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体相)。目前的研究表明,强相互作用物质的相图如图 4 所示。

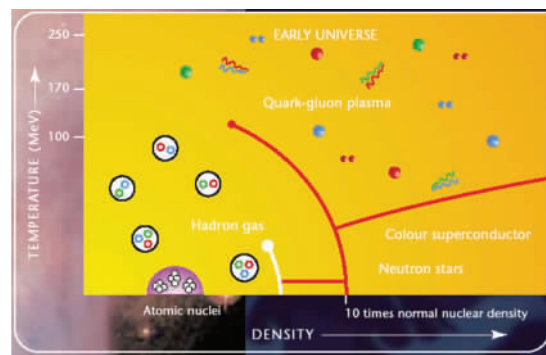


图4 强相互作用物质相图(取自 <http://www.pparc.ac.uk>)

Fig. 4 Phase diagram of strong interaction matter (taken from <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性质,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 的求解问题尚没有解决,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^[47],并利用 QCD 的非微扰有效场论模型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、NJL 模型、袋模型)^[48-54]等对强相互作用物质进行理论研究。近年来,随着对基本原理的扩展和计算方法的发展,利用格点 QCD 对强相互作用物质的研究已有重大进展^[55]。实验上,人们利用高能核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,即将开始运行的欧洲核子中心的 LHC 和正在兴建的德国 GSI 的 SIS 将为强相互作用物质的研究揭开新的一页,我国在兰州兴建并即将运行的 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,但仍有很多重大基本问题(例如手征对称性破缺和恢复的机制、过程和准确信号、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)需要研究。

4 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,尽管已取得重大进展,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] EINSTEIN A. Ann. Phys[J]. 1905 (17): 132-148; G. N. Lewis, Nature [J]. 1926 (118): 874.

- [2] ZEILINGER A, WEIHS G, JENNEWEIN T, et al. Nature [J]. 2005 (433): 230.
- [3] LUCAS R. Europhysics News[J]. 2001(31).
- [4] IACHELLO F, Arima A. The interacting boson model[M].Cambridge: Cambridge University Press, 1987.
- [5] AFANASJEV A V, FOSSAN D B, LANE G J, et al. Phys. Rept[J]. 1999(322): 1.
- [6] BOHR A, MOTTELSON B R. Nuclear structure [M]. (Inc.Massachusetts :W. A. Benjamin, 1975.
- [7] GREINER W, MARUHN J. A. Nuclear Models [M] Berlin:Springer, 1996.
- [8] HEYDE K, JOLIE J, FOSSION R, BAERDEMACKER S De, et al. Phys Rev[J]. 2004(C 69): 054 304.
- [9] CASTEN R. F, KUSNEZOV D, ZAMFIR N V. Phys Rev Lett[J]. 1999(82): 5000.
- [10] IACHELLO F. Phys. Rev. Lett [J]. 2000 (85):3580;Leviatan A, Ginocchio J N. Phys Rev Lett[J]. 2003 (90): 212 501.
- [11] IACHELLO F. Phys. Rev. Lett[J]. 2001 (87): 052 502.
- [12] JOLIE J, CASTEN R F, BRENTANO P VON, et al. Phys Rev Lett [J]. 2001(87): 162 501.
- [13] IACHELLO F., Phys. Rev. Lett[J]. 2003 (91): 132502.
- [14] BONATSOS D, LENIS D, PETRELLIS D, et al. Phys Lett[J]. 2004 (B 588): 172.
- [15] JOLIE J, CEJNAR P, CASTEN R F, et al. Phys. Rev. Lett[J]. 2002 (89): 182 502.
- [16] WARNER D. Nature [J]. 2002 (420): 614.
- [17] CWIOK S, HEENEN P. H, NAZAREWICZ W. Nature [J] .2005 (433): 705.
- [18] REGAN P H, et al. Phys Rev Lett[J]. 2003(90): 152 502.
- [19] RING P SCHUCK P., The nuclear many-body problem[M]. New York: Springer-Verlag, 1980.
- [20] CEJNAR P, HEINZE S, JOLIE J. Phys Rev [J]. 2003 (68): 034326; CEJNAR P, HEINZE S, DOBEŠ J. Phys. Rev [J]. 2005 (C 71): 011 304.
- [21] ALHASSID Y, LEVIT S, ZINGMAN J. Phys Rev Lett [J]. 1986 (57) 539; ALHASSID Y, ZINGMAN J, LEVIT S.Nucl Phys [J]. 1987 (A 469): 205.
- [22] GOODMAN A. L Phys Rev [J]. 1987 (C 35):2338; Phys Rev[J]. 1988 (C 37): 2 162; Phys Rev[J]. 1988(C 38):977; Phys Rev[J]. 1988(C 38): 1 092; Phys Rev[J]. 1989(C 39):2 008; Phys Rev[J]. 1993(C 48): 2 679; Phys Rev Lett[J]. 1994(73): 416; Nucl Phys[J]. 1995(A 591): 182.
- [23] CEJNAR P. Phys. Rev [J]. 2002 (C 65): 044 312; Phys Rev Lett [J]. 2003 (90): 112501; CEJNAR P, JOLIE J. Phys Rev [J]. 2004 (C 69):011 301R.
- [24] OTSUKA T, ARIMA A, IACHELLO F. Nucl. Phys [J]. 1978 (A 309): 1; YANG L M, LU D H, ZHOU Z N. Nucl. Phys [J]. 1984 (A 421): 229c; YANG Z S, LIN Y, QIH. Nucl Phys [J]. 1984 (A 421): 297c.
- [25] IACHELLO F. Phys. Rev Lett[J]. 2003 (91): 132 502.
- [26] ZAMFIR N V, et al Phys Rev[J]. 1999 (C 60):054 312; JOLIE J, CEJNAR P, DOBŮS J. Phys Rev [J]. 1999 (C 60): 061 303; ZHANG J Y, CAPRIO M A, ZAMFIR N V, et al. Phys. Rev[J]. 1999 (C 60): 061 304; ZAMFIR N V, et al., Phys Rev [J]. 2002 (C 65): 067 305; IACHELLO F, ZAMFIR N V. Phys Rev Lett[J]. 2004 (92): 212 501.
- [27] CASTEN R F, ZAMFIR N V. Phys Rev Lett[J]. 2000 (85):3 584.
- [28] ZHANG D L, LIU Y X. Phys Rev[J]. 2002 (C 65):057 301.
- [29] ZHANG D L, LIU Y X. Chin Phys Lett[J]. 2003 (20):1 028.
- [30] CASTEN R F, ZAMFIR N V. Phys Rev Lett [J]. 2001 (87): 052 503; CAPRIO M A,et al. Phys. Rev [J]. 2002 (C 66):054310; TONEV D, et al. Phys Rev [J]. 2004 (C 69): 034 334; BURKE D. G. Phys. Rev [J]. 2002 (C 66):024312; CLARK R M, et al.. Phys. Rev[J]. 2003 (C 67):041 302R; MCCUTCHAN E A,ZAMFIR N V, CASTEN R F. Phys Rev[J]. 2005(C 71):034 309.
- [31] GARCIA-RAMOS J E, et al. Phys Rev[J]. 2000 (C 61):047 305.
- [32] CAPRIO M A,IACHELLO F. Phys Rev Lett [J]. 2004 (93): 242 502.
- [33] KVASIL J, NAZMITDINOV R G. Phys Rev [J]. 2004 (C 69): 031 304R.
- [34] DOBEŠ J. Phys. Lett [J]. 1985 (B158):96; Phys Rev [J]. 1990 (C42):2 023; KUYUCAK S, MORRISON I. Phys. Rev [J]. 1987 (C36):774; Ann. Phys[J]. (N.Y.), 1988 (181):79; Ann. Phys[J]. (N. Y.) 1989 (195):126.
- [35] LIU Y X,MU L Z. Phys Lett(to appear in)[J]. B.
- [36] GINOCCHIO J N. Phys Rev[J]. 2005 (C 71):064 325.
- [37] POCHODZALLA J, et al. Phys. Rev. Lett[J]. 1995 (75):1 040.
- [38] VIOLA V E. Nucl Phys[J]. 2004 (A 734):487.
- [39] BORDERIE B, et al. Nucl Phys[J]. 2004 (A 734) :495.
- [40] D'AGOSTINO M, et al. Nucl. Phys[J]. 2004 (A 734):512
- [41] TRAUTMANN W. Nucl Phys[J]. 2005 (A 752):407.
- [42] BERTSCH G F, GUPTA S D. Phys Rept [J]. 1988 (160):189. BONASERA A, GULMINELLI F, MOLITORIS J. Phys Rept [J]. 1994 (243):1.
- [43] SCHNACK J, FELDMEIER H. Phys Lett[J]. 1997(B 409):6.
- [44] SUGAWA Y, HORIUUCHI H. Phys Rev[J]. 1999(C 60):064 607; FURUTA T, ONO A P. Theor Phys Suppl[J]. 2004(156): 147.
- [45] STAUFFER D, AHARONY A.Introduction to percolation theory (Taylor and Francis, London, 1992).
- [46]. RAJAGOPAL K,WILZECK F. arXiv: hep-ph/0011333.
- [47] LUO M,QIU J W,STERMANN G. Phys Rev [J]. 1994 (D 50): 1 951; GYULASSY M, WANG X N. Nucl Phys [J]. 1994 (B 420): 583; GYULASSY M, VITEV I, WANG X.N. Phys Rev Lett [J]. 2001 (86) :2 537; WANG E K, WANG X N. Phys Rev Lett [J]. 2001 (87):142 301; Phys Rev Lett[J]. 2002 (89):162 301; ZHANG B W, WANG E K, WANG XN. Phys Rev Lett[J]. 2004 (93):071 301.
- [48] ROBERTS C D, WILLIAMS A G. Prog. Part. Nucl. Phys[J]. 1994 (33):477; ROBERTS C D, SCHMIDT S M. Prog. Part. Nucl. Phys [J]. 1994 (45):S1; ALKOFRER R, SMEKAL L. VON. Phys. Rept[J]. 2001 (353):281.
- [49] TANDY P C, Prog Part Nucl. Phys[J]. 1997 (39):117.
- [50] SCHÄFER T, SHURYAK E V. Rev. Mod. Phys[J]. 1998 (70):323.
- [51] BROWN G E,RHO M. Phys Rept[J]. 2002 (363):85.
- [52] DRUKAREV E G, RYSKIN M G, SADOVNIKOVA V A. Prog Part Nucl Phys [J]. 2001 (47):73; DRUKAREV E G. Prog Part Nucl, Phys[J]. 2003 (50): 659.
- [53] LIU Y X, GAO D F, GUO H. Nucl. Phys [J]. 2001 (A 695):353; Phys. Rev[J]. 2003 (C 68):035 204; LIU Y. X, GAO D F, ZHOU J H, et al. Nucl Phys [J]. 2003 (A 725):127; CHANG L, LIU Y X, GUO H. Nucl Phys[J]. 2005 (A 750): 324; Phys Rev[J]. 2005 (D 72):094 023.
- [54] BUBALLA M. Phys Rept[J]. 2005 (407):205.
- [55] LAERMANN E. Acta Phys Polonica B[J]. 2003 (34) 4987; VETTORAZZO M, DE FORCRAND P. Phys. Lett[J]. 2004 (B 604): 82; EJIRI S. Phys Rev [J]. 2004 (D69):94 506; KRATOCHVILA, S, P. DE FORCRAND. arXiv: hep-lat/0509143.

(责任编辑 胡春华)