

# 清华大学物理系原子核物理研究的新进展\*

朱胜江 龙桂鲁 庄鹏飞 阮东

(清华大学物理系高能物理与核物理研究所 北京 100084)

**摘要** 在清华大学物理系成立 80 周年之际,对近年来清华大学物理系原子核物理研究的主要进展情况作一介绍,包括原子核高自旋态的实验研究,原子核结构的理论研究,高能核物理的理论研究.在高自旋态研究方面,内容包括在  $A \sim 100$  丰中子核区核的集体振动转动带结构、新的准粒子带特性、新手征二重带等特性研究;在  $A \sim 140$  丰中子核区核的八极形变及八级关联等特性研究;在  $A \sim 130$  缺中子核区核的形状驱动效应,包括扁椭圆形变带、形状共存等特性研究.在原子核结构理论研究方面,内容包括用相互作用玻色子模型、推转壳模型、投影壳模型以及相对论平均场对原子核特性的研究;对原子核结构或其他量子系统的各种对称性和代数方法的研究,如动力学对称性、超对称性、势代数方法等;与对称性紧密联系的普通李代数和非线性李代数的表示,如普通李代数、李超代数、平方根型非线性李代数、多项式型非线性李代数等.在高能核物理研究方面,内容主要包括量子色动力学(QCD)在高温高密条件下的相变以及在相对论重离子碰撞中相变信号的研究.

**关键词** 原子核结构,高自旋态,相互作用玻色子模型,相对论自洽投影壳模型,动力学对称性和代数方法(非线性、超)李代数表示, QCD 相变,夸克胶子等离子体

## New progress of research on nuclear physics in Department of Physics of Tsinghua University

ZHU Sheng-Jiang LONG Gui-Lu ZHUANG Peng-Fei RUAN Dong

(Institute of High Energy Physics and Nuclear Physics, Department of Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract** In celebrating of the founding of 80 years for the Department of Physics of Tsinghua University, we here make briefly review of the main progress of recent research on nuclear physics in our department. The research subjects involve the experimental study of nuclear high spin states, the theoretical research on nuclear structure and the high energy nuclear physics. In the high spin state study, the contents include the collective vibrational- and rotational-band structures, the new quasiparticle bands, and the new chiral doublet bands etc. in  $A \sim 100$  neutron-rich region, the octupole deformation and correlations in  $A \sim 140$  neutron-rich region, and the nuclear shape driving effects, such as, the prolate deformation, the shape coexistence etc. in  $A \sim 130$  neutron-deficient region. In the theoretical research on nuclear structure, the contents involve the Interacting Bose Model, the Cranked Shell Model, the Projected Shell Model, the research on the nuclear property using the relativistic mean field, the research on the symmetry and algebraic method for the nuclear structure and the other quantum system, such as, the dynamical symmetry, the supersymmetry, the potential algebraic method etc., and the representation of general Lie algebra and non-linear Lie algebra with closely relating to the symmetry, such as, the general Lie algebra, the Lie super-algebra, the square-root non-linear Lie algebra, and the polynomial non-linear Lie algebra etc.. In the high energy nuclear physics study, the contents include the phase transition of the Quantum Color Dynamics (QCD) under the high temperature and high density, and the phase transition signal of the relativistic heavy-ion collision.

**Keywords** nuclear structure, high spin states, Interaction Boson Model, relativistic self-consistent field Projected Shell Model, dynamical symmetry and algebra method, (non-linear and super-) Lie algebra representation, OCD phase transition, quark-gluon plasma

\* 国家重点基础研究发展规划、国家自然科学基金、国家杰出青年基金、教育部博士点基金等资助项目  
2006-04-17 收到

## 1 引言

自 20 世纪 70 年代以来,随着重离子加速器及探测技术的发展,国际上对于核物理学的基础研究进入了一个新的阶段,其主要研究内容朝极端条件——极高温、极高能量、极高角动量、高同位旋的方向发展.世界上许多国家相继建立代表其科学技术水平的、在国际上具有影响力与显示度的大科学工程——若干重离子加速器与复杂的探测装置.这些大工程的建立为核物理工作者提供了强有力的研究工具,带动其国内以及国际上众多的研究组(其中大学的研究组占大多数)参加研究工作,而原子核高自旋态研究为其中的一个重要方面.在高速旋转(高自旋态即角动量极高)的极端条件下,原子核会出现一系列奇特的特性,如,高自旋态中的“集体回弯”现象,其正常转动带随角动量变大会出现 S 形的变化,高自旋态中令人惊异的超形变、三轴超形变与巨超形变,高自旋态中的反演不对称的八极形变:原子核的形状不再是普通的对称长椭圆形变而是不对称的像梨形或香蕉形的形状,高自旋态中的新的角动量运动特性,磁转动带与手征二重带结构,高自旋态中的形状共存,近球形、长椭圆形、扁椭圆形不同形状存在于同一核态中等等.所有这些新的现象,都包含深刻的物理本质.与此同时,原子核的理论研究方面也取得重要进展,包括推转壳模型,相互作用玻色子模型,投影壳模型,新的对称性研究等.对称性在物理学中有重要的作用,描述它们的数学工具就是群论.一旦描述原子核结构的群或李代数确定,那么就可以用标准的方法得到该系统的某些解析结果,如能谱、波函数、跃迁选择定则和相对强度等.自从 20 世纪 80 年代初为了理解量子系统中各种精确可解模型的共同特性而提出量子群的概念以来,李代数的其他变形或非线性推广就一直引起人们的浓厚兴趣,它们在数学和物理学的许多分支中得到了广泛研究和应用.在物理应用中,由李代数所描述的各种对称性可以自然地推广到由非线性李代数来描述的非线性对称性.通过非线性对称性,我们可以进一步理解原子核结构或其他量子系统所具有的基本性质.而在高能核物理方面,从 20 世纪 80 年代开始以来运行的相对论重离子碰撞提供了在实验室实现 QCD 相变,产生夸克胶子等离子体(QGP)的唯一可能手段.格点 QCD 的计算表明,在温度  $T \sim 170\text{MeV}$  时,会发生色禁闭解除相变,产生一种新的物质形态

——QGP.但是,在有限重子数密度时,格点计算仍存在技术困难,有效模型是讨论 QCD 相变的重要工具.另一方面,即使在相对论重离子碰撞中产生了新物态,它也只是个中间态,如何在末态找到合适的相变信号是一个重要的且没有解决的问题.我们的工作主要集中在用 QCD 有效模型讨论各种相变以及新物态的信号研究.

这里我们作重介绍在三方面的研究进展情况,即原子核的高自旋态实验研究,原子核结构的理论研究,中高能核物理的理论研究.

## 2 研究工作的进展情况

### 2.1 原子核高自旋态的实验研究

通常原子核的高自旋态要通过重离子熔合-蒸发反应与在束  $\gamma$  谱的实验技术来进行研究.实验是在国内重离子加速器国家实验室与通过国际合作在国外重离子加速器实验室进行的.在国内的实验研究中,中国原子科学研究所具有 H-13 串列加速器,中国科学院近代物理研究所(兰州)具有回旋加速器,这两个国内核物理基础研究基地可为高自旋态的实验研究提供很好的实验束流.多年来,在国内的实验组,如中国原子能科学院、兰州近物所、吉林大学、清华大学等的共同努力下,建成了由 14 个反康高纯 Ge 探测器组成的联合在束  $\gamma$  谱探测装置及相应的电子学数据获取系统,能满足国内的实验需求.我们在国内的研究主要是通过熔合-蒸发反应对  $A \sim 130$  区缺中子核进行高自旋态研究.

在国际合作的实验研究中,长期以来,我们与美国范德比尔特大学、密西西比州立大学、橡树岭实验室、阿贡实验室以及劳伦斯伯克利实验室进行合作研究.除了早期对  $A \sim 70$  与  $A \sim 150$  区一些缺中子核的研究外,一个重要的方面是对丰中子核的高自旋态研究.由于在目前条件下,难于用通常的重离子熔合-蒸发反应产生丰中子核的高自旋态.一种很有效的手段是通过测量重核(如  $^{252}\text{Cf}$  或  $^{248}\text{Cm}$  等)的自发裂变产生的瞬发  $\gamma$  谱研究丰中子核的高自旋态<sup>[1,2]</sup>.重核的裂变可产生上百种丰中子核,测量其瞬发  $\gamma$  谱可以得到大量丰中子核的高自旋态信息.此项研究工作不是一次实验就完成的,而是随着探测技术与数据处理技术的不断发展而反复开展实验研究,实验的精度不断提高.早期的研究利用橡树岭实验室的具有 20 个 Ge 探测器的 Spinspectrometer 谱仪进行测量,近期在伯克利与阿贡实

实验室利用由 110 个探测器组成的 Gammaspere 谱仪进行测量。

高自旋态的实验数据需要长时间复杂的分析。数据分析是在校内进行的。我们建立了包括 Vax 工作站、Pc - Linux 系统等多台计算机图像谱分析系统,移植了国外先进的通用程序包,可进行二维  $\gamma - \gamma$  及三维  $\gamma - \gamma - \gamma$  符合分析。

近期的高自旋态研究主要集中在三个区域:  $A \sim 100$  与  $A \sim 140$  丰中子核区以及  $A \sim 130$  缺中子核区。

### 2.1.1 $A \sim 100$ 丰中子核区核的高自旋态研究

这部分核包括从  $Z = 38 - 48$  的 Sr - Cd 等核链的众多的丰中子核。Sr 和 Zr 核链位于丰中子核的  $Z = 40, N = 56$  的亚球壳区与  $Z = 38, N = 60$  的大形变区,而其他核则处于从  $Z = 38, 40$  的大形变,经由三轴形变向  $Z = 50$  的球形壳层的过渡区,其核结构特性丰富而复杂。我们与国外合作者一起,已发表结果的核有:  $^{95, 97, 98} \text{Sr}$ ,  $^{99-101} \text{Y}$ ,  $^{101-105} \text{Nb}$ ,  $^{104} \text{Mo}$ ,  $^{106} \text{Mo}$ ,  $^{105-109} \text{Tc}$ ,  $^{107, 108, 109, 110, 111, 112, 113} \text{Ru}$ ,  $^{110-113} \text{Rh}$ ,  $^{112-117} \text{Pd}$ ,  $^{116, 118, 120} \text{Cd}$  等,还有多个核正在研究。研究的重要结果为 (1) 晕带结构大为扩展,观测到几个偶 - 偶核中重要的集体回弯现象,如  $^{108, 110, 112} \text{Ru}^{[3-6]}$ , 并通过推转壳模型的计算,对其三轴形变特性,集体回弯的机制作出解释。(2) 系统的  $\gamma$  振动 - 转动带的观测: 除扩展了在  $^{104, 106} \text{Mo}^{[7-9]}$  中的一声子与两声子  $\gamma$  振动 - 转动带外,观测到在  $^{108, 110, 112} \text{Ru}^{[3-6]}$  中的一声子  $\gamma$  振动 - 转动带。对于两声子  $\gamma$  振动 - 转动带的观测,在核结构的研究中是很重要,也很困难的,尤其是在奇  $A$  核中更为少见。我们正在对  $^{105} \text{Mo}$  进行研究,首次在此核区奇  $A$  核中观测到了重要的两声子  $\gamma$  振动 - 转动带。(3) 在  $^{106} \text{Mo}$  中观测到一对重要的集体带——软手征振动带结构<sup>[9]</sup>。原子核手征对称性破裂引起的手征二重带的结构的研究是当前核物理研究的热点问题之一,而这种软手征振动带结构的发现还是第一次,其特性仍有待于深入研究。研究表明,在  $^{110} \text{Ru}$  也可能存在这种重要的结构。(4) 偶 - 偶核中两准粒子激发带的研究。系统的观测到多个由一对核子破对激发形成的新的准粒子带,这种带的准动惯量几乎为常数,如在  $^{104, 106} \text{Mo}^{[8, 9]}$ ,  $^{108, 109, 110} \text{Ru}^{[4-6]}$  等核中。并且在  $^{98} \text{Sr}^{[10]}$  中,观测到一对两准粒子带,其带头的组态相同而耦合方式分别由  $|\Omega_1 + \Omega_2|$  与  $|\Omega_1 - \Omega_2|$  所组成。(5) 在对奇  $A$  核的研究中,新建了多个核的集体转动带,如建立了新的  $^{107} \text{Ru}^{[11]}$  的能级纲图,否定了国外研究组刚发表的错误的实验结

果。第一次识别了极端丰中子核  $^{113} \text{Ru}^{[12]}$  的集体带结构等。

### 2.1.2 $A \sim 140$ 丰中子核区核的八级形变的研究

原子核的八极形变反映在内禀坐标系中,空间反演的不对称性。对于其特性的研究,一直为核物理界关注的课题。理论计算表明,当一对质子与中子所处的单粒子轨道同时具有的轨道量子数之差为  $\Delta N = 1, \Delta l = 3, \Delta j = 3$  且互相靠近时,将产生强的八极相互作用矩阵元,这样的核有可能在较低的激发态下产生稳定的八极形变。稳定的八极形变有可能在两个区域内产生:其一为围绕  $Z = 88, N = 132$  的铀系区,其二为围绕  $Z = 56, N = 88$  的丰中子核区。八极形变集体带可用“simplex”量子数  $s$  来表征。对于偶偶核,存在  $s = \pm 1$  的八级形变带;对于奇  $A$  核,则存在  $s = \pm i$  的八级形变带。实验上所观测到的八极形变带最显著的特征是类似于“准分子”转动带的结构:由一对具有  $\Delta I = 2$  的宇称相反的 E2 级跃迁跃集体带构成,两带之间由强的  $\Delta I = 1$  的 E1 交叉跃迁相连接。我们对围绕  $Z = 56, N = 88$  的  $A \sim 140$  区域的丰中子核的高自旋态进行了广泛的研究,所发表的结果有:  $^{139} \text{Xe}$ ,  $^{140, 141, 143, 144, 145, 146} \text{Ba}$ ,  $^{142, 144, 145, 146, 147, 152} \text{Ce}$ ,  $^{145, 146, 147} \text{La}$ ,  $^{152-156} \text{Nd}$ ,  $^{147, 149, 151} \text{Pr}$ ,  $^{152, 154, 156} \text{Nd}$ ,  $^{160} \text{Sm}$  等核,正在研究的有  $^{148, 150} \text{Ce}$  等核。主要物理结果为 (1) 第一次识别了一些极端丰中子核的集体带结构,包括完全新建的能级纲图,如  $^{152} \text{Nd}^{[13]}$ ,  $^{160} \text{Sm}^{[14]}$ ,  $^{145, 147} \text{Ce}^{[15]}$  等。(2) 新识别了多个核的八级形变带,包括  $^{139} \text{Xe}^{[16, 17]}$ ,  $^{140, 141, 143, 145} \text{Ba}^{[16-19]}$ ,  $^{144} \text{Ce}^{[18]}$  等。其中,  $^{143} \text{Ba}$  是我们最早在此核区内发现的奇  $A$  核的八级形变带结构。而  $^{145} \text{Ba}$  则为理论上预言最有可能存在八极形变带,而实验上一直在加以研究的核,其八极形变带也首先被我们发现<sup>[19]</sup>。(2) 我们在这个区域发现了四个奇  $A$  核中的双八级形变带(同时在一个核核中观测到  $s = +i$  与  $s = -i$  的八级形变带结构),即在奇  $N$  核  $^{143} \text{Ba}$  与  $^{145} \text{Ba}$  中<sup>[19]</sup>, 以及奇  $Z$  核  $^{145} \text{La}$ ,  $^{147} \text{La}$  中<sup>[20]</sup>。这是迄今为止在此区内发表的仅有的四个双八级形变带结构。与此同时,我们正在偶 - 偶核中寻找同时存在的  $s = +1$  与  $s = -1$  的双八级带结构,因为迄今为止,在此核区内尚没有此类重要的结构的报道,我们有望在  $^{148} \text{Ce}$  中得到结果。(3) 对于偶 - 偶核  $^{144, 146} \text{Ba}$ ,  $^{146} \text{Ce}$  等的八级形变带结构作了扩展,对其跃迁特性、八级形变的稳定性等问题等作了仔细研究<sup>[18]</sup>。(4) 在理论上,用反射不对称的壳模型对此区的  $^{142, 145} \text{Ba}$  核的八级形变特性进行计算,也得到满意的结果<sup>[21]</sup>。

### 2.1.3 $A \sim 130$ 缺中子核区核的形状驱动效应研究

$A = 130$  缺中子核区核的高自旋态结构具有重要的结构特性,此核区内的大部分核相应于  $\gamma$  形变比较软,属于所谓“ $\gamma$  软形变”核.形变壳模型的计算指出,核内质子的费米面位于  $h_{11/2}$  亚壳层的底部,而中子的费米面则位于  $h_{11/2}$  亚壳层的顶部,在高自旋态下,位于  $h_{11/2}$  亚壳层下部的一对粒子的顺排将驱动核的形状向长椭圆形变( $\gamma \sim 0^\circ$ )方向变化,而位于  $h_{11/2}$  亚壳层上部的一对粒子的顺排将驱动核的形状向扁椭圆形变( $\gamma \sim -60^\circ$ )方向变化.这样,对于在高自旋态下由多准粒子组态形成的转动带或能态,由于不同粒子的形状驱动效应,可使核形成不同的形状,即所谓形状共存.在这个区域的核结构信息非常丰富,包括长椭圆形变、扁椭圆形变、三轴形变、手征带结构等等.我们在这个区域研究过的或正在研究的核包括<sup>134, 136, 137, 138</sup>Ce, <sup>122</sup>Cs, <sup>122</sup>Ba, <sup>136, 137</sup>La, <sup>138</sup>Pr 等.主要结果为:(1)扁椭圆形变带的研究:首次在<sup>137</sup>Ce<sup>[22]</sup>, <sup>138</sup>Ce<sup>[23]</sup>中观测到重要的扁椭圆形变带,并且在<sup>136</sup>La<sup>[24]</sup>中也扩展了这种带结构.正在研究的核<sup>137</sup>La, <sup>138</sup>Pr 中也观测到多条扁椭圆形变带,并对其起因进行了研究.(2)在<sup>134</sup>Ce<sup>[25]</sup>核中,发现了三种不同  $\gamma$  形变的形状共存结构:在基带以上的带交叉处的  $10^+$  态起源于两个  $h_{11/2}$  准中子的组态,为  $\gamma \sim -60^\circ$  的扁椭圆形变;晕带  $10^+$  同质异能态及其结构也起源于两个  $h_{11/2}$  准中子的组态,为  $\gamma \sim -120^\circ$  的长椭圆形变;而基于  $7^-$  态的强耦合带则起源于两个准质子  $h_{11/2}$  与  $g_{7/2}$  组态,为  $\gamma \sim 0^\circ$  的长椭圆形变.(3)其他核结构特性研究:在<sup>136</sup>La、<sup>138</sup>Pr 中对旋称反转的研究,在<sup>122</sup>Ba<sup>[26]</sup>中对于八级关联的研究等.

## 2.2 原子核结构理论及对称性与代数方法研究

### 2.2.1 原子核结构的理论研究

原子核是个复杂的多体量子体系.多体问题本身在数学上就具有无法精确求解的困难.几十到一两百个核子通过复杂的相互作用结合在一起,其中涉及到以强相互作用为主的多种相互作用.在原子核结构中有多种原子核结构的模型.原子核相互作用玻色子模型(IBM),考虑原子核的动力学对称性,成功地描述了原子核的各种集体运动.我们近几年发展和完善了包括同位旋的 IBM3 模型,对多个轻核同位旋链进行了研究.发现在轻核区,由于同位旋的存在,原子核的集体运动中同位旋激发和混合对称性激发是交织在一起的,使得某些轻核的低激发能谱复杂了,将同位旋考虑进去,可以很好地解释轻

核的集体运动<sup>[27]</sup>.利用投影壳模型对超形变的<sup>36</sup>Ar 核的能谱进行计算,研究表明 2 准粒子和 4 准粒子激发是在一起发生的,计算不但解释了能谱,而且预言了它的电磁跃迁性质<sup>[28]</sup>.这些预言被以后的实验所证实<sup>[29]</sup>.我们过去推导了相当多的含有 pf 玻色子的描写八极形变原子核的电磁跃迁公式,近几年随着实验的发展,得到了应用<sup>[30]</sup>.利用投影壳模型,计算了在核能利用方面有潜在价值的<sup>178</sup>Hf 原子核的结构,特别是对其长寿命的同质异能态的性质<sup>[31]</sup>.解决了在相互作用玻色子模型中对转动核的跃迁描述不好的难题,指出这是由于跃迁算符与相互作用算符不同造成的<sup>[32]</sup>.

我们建立了一种新的模型——相对论自洽角动量投影壳模型(ReCAPS).在远离 Beta 稳定线的原子核区,现有的核结构模型缺乏预言能力.ReCAPS 从投影壳模型和相对论平均场的基本思想出发,很好结合了二者的共同优点.具有自洽性好,预言能力强,计算所需的组态空间小等多种优点.该模型能够自动给出原子核的形变量,结合能等基态信息,并通过角动量投影获得原子核激发态的信息,包括能谱和 E2, M1 跃迁等.实际计算表明,ReCAPS 能很好描述和预言原子核的基态和低激发态的各种信息.并且由于它的特性,它应该是研究远离  $\beta$  稳定线核素以及超重核素的一个有力的工具<sup>[33, 34]</sup>.

### 2.2.2 对称性与代数表示

寻找原子核结构(和其他量子系统)所具有的各种对称性一直是一个重要的研究课题.它不仅为我们提供了一种有效的研究手段,而且也有助于我们加深对原子核结构基本性质的理解.在对称性以及与之紧密联系的代数表示方面,我们做了一系列的研究工作,主要成果包括:

#### (1) 各种对称性和代数方法

我们给出了任意维空间  $N = 2$  超对称量子力学的一般结构,它包括了一般的标量势和矢量势<sup>[35]</sup>.具有  $N = 4$  超对称性的体系是一个复杂体系,十多年来进展缓慢.我们利用 Clifford 代数与李超代数的关系,首先给出了  $SS(4)$  的一般微分实现<sup>[36]</sup>.在此基础上,成功得到了  $N = 4$  超对称量子力学的一般结构.进一步研究了两个具有  $N = 4$  超共形对称性的量子力学系统的可解性问题,构造出刻画这两个量子系统的超共形代数<sup>[36, 37]</sup>,为它在物理上的应用打下了基础.与形状不变方法不同,我们具体研究了广义 Morse 势的  $N = 4$  超对称性<sup>[38]</sup>,证明了描述  $N = 4$  超对称 Morse 振子的哈密顿量的谱生成代数是

李超代数  $osp(1, 2)$  或  $B(0, 1)$ . 在相对论量子力学范围内, 我们研究了自由和具有任意标量势的 Dirac 方程的  $N=4$  超对称性.

研究了具有非线性动力学对称性的二维弯曲空间的氢原子系统、谐振子系统和二维平直空间的谐振子系统的基本性质<sup>[39]</sup>. 发现描述这些非线性动力学对称性都是多项式角动量代数, 而且前两个系统与它们在二维平直空间的情形有本质的差别. 实现了在任意维空间的包含自旋的半酉变换, 揭示同谱哈密顿量和半酉变换算符一起构成无穷幂次多项式角动量代数<sup>[40]</sup>.

### (2) 李代数和非线性李代数的表示

我们从移动算子技术方法中抽象出一个新的非线性李代数结构, 称之为平方根型李代数  $\mathfrak{R}^\mu$ <sup>[41-44]</sup>. 揭示出经典李代数都可以诱导出这种非线性结构. 详细讨论了  $\mathfrak{R}^1$  的各种表示问题, 得到  $\mathfrak{R}^\mu$  的玻色子实现. 从数学角度看, 与其他非线性李代数不同,  $\mathfrak{R}^\mu$  没有把普通李代数作为其极限情况, 诱导出  $\mathfrak{R}^\mu$  所采用的“不可约张量分解”是一种新的非线性化方法; 从物理应用角度看, 一类量子系统可纳入平方根型李代数的框架, 从而为精确可解问题提供了新的、系统的研究手段.

对多项式型非线性李代数——任意幂次多项式角动量代数及其著名的特例 Higgs 代数<sup>[45-49]</sup>, 我们系统地研究了它们的不可分表示、诱导表示、单玻色子实现、双玻色子实现以及非齐次玻色子实现的酉实现等. 构造了 Higgs 代数的非线性相算符, 它是角动量相算符的非线性放大. 我们还进一步研究  $O(4)$  的多项式型非线性推广.

采用不可约张量基方法, 深入地研究了  $O(N)$  的不可约表示问题, 首次得到了  $O(N) \supset O(N-1)$  的张量型约化因子<sup>[50, 51]</sup>, 对称表示的旋量型约化因子<sup>[52]</sup>和  $O(N)$  群的三参数 Racah 系数的解析表达式<sup>[53, 54]</sup>. 近期我们计算了  $O(5)$ 、 $O(6)$  和  $O(7)$  的旋量约化因子, 它们表现出相当好的规律性, 有望得到  $O(N)$  的旋量型约化因子的一般结果. 利用  $O(7)$  的结果可以研究基于群链  $O(7) \supset G_2 \supset O(3)$  的原子核的相互作用波色子模型<sup>[55]</sup>. 给出群链  $SU(2N) \supset (SU(N) \supset O(N) \supset O(3)) \times SU(2)$  的(代数递推)约化规则及李群  $SU(N)$  和  $O(N)$  的最高全态. 揭示了一个重要性质: 一定奇数目的费米子系统与另一一定偶数目的费米子系统具有相同的总轨道角动量(不同的总自旋)<sup>[56]</sup>.

## 2.3 高能核物理的理论研究

### 2.3.1 有约束夸克体系的手征恢复与色超导

强相互作用理论 QCD 在有限重子数密度时会发生手征对称性恢复相变和色超导相变, 有限同位旋密度时会产生  $\pi$  超流. 流行的方法是在夸克质量很小时用微扰展开. 我们在色、味和粒子反粒子的 Nambu-Gorkov 空间建立了适用于任意夸克质量的手征相变和色超导相变热力学, 在夸克平均场近似和介子与双夸克 RPA 近似下, 自治地得到了对称性自发破缺所要求的 Goldstone 模式. 讨论了两个相变的关联. 考虑到色超导中电中性条件的约束, 不同费米面上夸克的配对使得夸克凝聚减弱. 我们发现, 粒子数守恒约束条件下, 夸克凝聚的温度密度依赖性, 与一般 BCS 机制有很大不同, 温度与化学势平面上的相变线呈葫芦状. 我们还在一般的  $U(1)$  对称性情形, 讨论了费米液体、BCS 态、无能隙态, 和 LOFF 态的热力学稳定性和动力学稳定性.

我们的工作导致了色超导的一个新相——无能隙色超导的产生<sup>[37]</sup>. 论文被国际同行大量引用.

### 2.3.2 夸克胶子等离子体信号—— $J/\psi$ 压低的横动量依赖性

许多人认为, 在 CERN/SPS 形成了夸克胶子等离子体(QGP)这一新物质形态的可能信号之一是  $J/\psi$  粒子的反常压低. 我们在横向相空间建立  $J/\psi$  粒子的输运方程, 计算了高能重离子碰撞中  $J/\psi$  粒子的横动量分布. 发现, 若  $J/\psi$  反常压低是由夸克胶子等离子体形成引起的, 则夸克胶子等离子体的持续时间必须大于 3—4 fm/c, 而这与 SPS 的典型持续时间不符. 故在 CERN/SPS 形成了夸克胶子等离子体的可能性不大. 而在 RHIC 能量, 由于 C 夸克数量的增加, 对于  $J/\psi$ , 既有被 QGP 吃掉的效应, 也有在 QGP 中重新产生的效应. 我们用  $J/\psi$  在 QGP 中的输运方程统一描述压低与重产生, 用相对论流体力学描述 QGP 的演化, 而压低与重产生几率用微扰 QCD 计算, 并满足细致平衡条件. 我们计算了  $J/\psi$  的压低、横动量分布和集体流.

该工作<sup>[58]</sup>受到 RHIC 的大型实验组 PHENIX 的高度重视, 被多次引用与比较.

## 参 考 文 献

- [ 1 ] Hamilton J H, Ramayya A V, Zhu S J *et al.* Prog. in Part. and Nucl. Phys., 1995, 35: 635
- [ 2 ] 朱胜江. 核物理动态, 1992, 9(2): 8
- [ 3 ] Lu Q H, Butler-Moore K, Zhu S J *et al.* Phys. Rev., 1995, C52: 1348

- [ 4 ] Che X L , Zhu S J , Hamilton J H *et al.* Chin. Phys. Lett. , 2004 , 21 : 1904
- [ 5 ] Jiang Z , Zhu S J , Hamilton J H *et al.* Chin. Phys. Lett. , 2003 , 20 : 350
- [ 6 ] Che X L , Zhu S J , Hamilton J H *et al.* Chin. Phys. Lett. , 2006 , 23 : 328
- [ 7 ] Yang L M , Zhu S J , Li K *et al.* Chin. Phys. Lett. , 2001 , 18 : 24
- [ 8 ] Xu R Q , Zhu S J , Hamilton J H *et al.* Chin. Phys. Lett. , 2002 , 19 : 180
- [ 9 ] Zhu S J , Hamilton J H , Ramayya A V *et al.* Eur. Phys. J. A , 2005 , 25( s01 ) : 459
- [ 10 ] Li M L , Zhu S J , Hamilton J H *et al.* Chin. Phys. Lett. , 2004 , 21 : 2147
- [ 11 ] Zhu S J , Hamilton J H , Ramayya A V *et al.* Phys. Rev. C , 2001 , 65 : 014307
- [ 12 ] Zhang Z , Zhu S J , Hamilton J H. Phys. Rev. C , 2003 , 67 : 064307
- [ 13 ] Zhu S J , Hamilton J H , Ramayya A V *et al.* J. Phys. G , 1995 , 21 : L75
- [ 14 ] Zhu S J , Hamilton J H , Ramayya A V *et al.* J. Phys. G , 1995 , 21 : L57
- [ 15 ] Sakhaee M , Zhu S J , Hamilton J H *et al.* Phys. Rev. C , 1999 , 60 : 067303
- [ 16 ] Zhu S J , Hamilton J H , Ramayya A V *et al.* J. Phys. G , 1997 , 23 : L77
- [ 17 ] Luo Y X , Rasmussen Y X , Hamilton J H *et al.* Phys. Rev. C , 2002 , 66 : 014305
- [ 18 ] Zhu S J , Lu Q H , Hamilton J H *et al.* Phys. Lett. B , 1995 , 357 : 273
- [ 19 ] Zhu S J , Hamilton J H , Ramayya A V *et al.* Phys. Rev. C , 1999 , 60 : 051304
- [ 20 ] Zhu S J , Hamilton J H , Ramayya A V *et al.* Phys. Rev. C , 1999 , 59 : 1316
- [ 21 ] Chen Y J , Chen Y S , Shen C W *et al.* Chin. Phys. Lett. , 2005 , 22 : 1362
- [ 22 ] Zhu S J , Zhu L Y , Li M *et al.* Phys. Rev. C , 2000 , 62 : 044310
- [ 23 ] Zhu S J , Li M , Zhu L Y *et al.* Chin. Phys. Lett. , 1999 , 16 : 635
- [ 24 ] Zhu S J , Xiao S D , Che X L *et al.* Eur. Phys. J. A , 2005 , 24 : 199
- [ 25 ] Zhu S J , Gan C Y , Zhu L Y *et al.* High Energy Phys. and Nucl. Phys. , 2005 , 29 : 138
- [ 26 ] Zhu S J , Sakhaee M , Yang L M *et al.* Chin. Phys. Lett. , 2001 , 18 : 1027
- [ 27 ] Al - Khudair F H , Li Y S , Long G L. J. Phys. G , 2004 , 30 : 1287
- [ 28 ] Long G L , Sun Y. Phys. Rev. C , 2001 , 65 : R0712
- [ 29 ] Swansson C E *et al.* Phys. Rev. C , 2001 , 63 : R061301
- [ 30 ] Long G L , Shen T Y , Ji H Y *et al.* Phys. Rev. C , 1998 , 57 : 2301
- [ 31 ] Sun Y , Zhou X R , Long G L *et al.* Phys. Lett. B 2004 , 589 : 83
- [ 32 ] Long G L , Ji R Y. Phys. Rev. C , 1998 , 57 : 1686
- [ 33 ] Li Y S , Long G L. Commun. Theor. Phys. , 2004 , 41 : 429
- [ 34 ] Li Y S , Long G L. Commun. Theor. Phys. , 2004 , 41 : 579
- [ 35 ] Ruan D , Tu C C , Sun H Z. Commun. Theor. Phys. , 1999 , 32 : 477
- [ 36 ] Ruan D , Huang W C. J. Math. Phys. , 2003 , 44 : 2787
- [ 37 ] Ruan D , Guo H , Sun H Z. Commun. Theor. Phys. , 2002 , 38 : 11
- [ 38 ] Ruan D , Sun H Z. Commun. Theor. Phys. , 2005 , 44 : 499
- [ 39 ] Ruan D , Sun H Z. Commun. Theor. Phys. 2004 , 42 : 379
- [ 40 ] Ruan D *et al.* , Commun. Theor. Phys. 2001 , 36 : 25
- [ 41 ] Ruan D , Ruan W. Phys. Lett. , A , 1999 , 263 : 78
- [ 42 ] Ruan D , Ruan W. Phys. Lett. , A , 2000 , 274 : 1
- [ 43 ] Ruan D , Chen L H , Ruan W. J. Math. Phys. , 2000 , 41 : 7839
- [ 44 ] Ruan D *et al.* Commun. Theor. Phys. , 2001 , 35 : 513
- [ 45 ] Ruan D , Wang F , Tu C , Sun H Z. Commun. Theor. Phys. , 2000 , 34 : 643
- [ 46 ] Ruan D *et al.* J. Math. Phys. 2001 , 42 : 2718
- [ 47 ] Ruan D , Wu C , Sun H Z. Commun. Theor. Phys. , 2003 , 40 : 73
- [ 48 ] Ruan D. Phys. Lett. A , 2003 , 319 : 122.
- [ 49 ] Ruan D. J. Math. Chem. , 2006 , 39 : 417
- [ 50 ] Sun H Z , Ruan D. J. Math. Phys. , 1998 , 39 : 630
- [ 51 ] Sun H Z , Han Q Z , Zhang M *et al.* Commun. Theor. Phys. , 1998 , 30 : 541
- [ 52 ] Ruan D , Sun H Z. Commun. Theor. Phys. , 1999 , 32 : 115
- [ 53 ] Ruan D , Sun H Z. J. Math. Phys. , 1998 , 39 : 6225
- [ 54 ] Ruan D , Sun H Z. Commun. Theor. Phys. , 1999 , 31 : 233
- [ 55 ] Ruan D , Sun H Z. Commun. Theor. Phys. , 2000 , 33 : 221
- [ 56 ] Sun H Z , Ruan D. Commun. Theor. Phys. , 1998 , 29 : 571
- [ 57 ] Huang M , Zhuang P F , Chao W Q. Phys. Rev. D , 2003 , 67 : 065015
- [ 58 ] Zhu X L , Zhuang P F , Xu N. Phys. Lett. B , 2005 , 607 : 107

## · 物理新闻和动态 ·

### 反物质 - 物质结合能否产生分子 ?

当两个原子 , 每个原子由电子和它的反粒子( 即正电子 ) 组成 , 相互碰撞会发生什么变化呢 ? 现在美国加州大学河边分校科学家 Allen Mills 教授研究小组发现这些被称为自然界不稳定正电子素原子( 亦称电子偶素 , 符号为  $P_s$  ) 在相互作用后变成更不稳定 , 正电子素原子相互碰撞湮没 , 产生威力强大的  $\gamma$  辐射 . 实验结果首次推测正电子素分子(  $P_{s_2}$  ) 的存在 , 每个分子由两个电子和两个正电子组成 . 这种物质 - 反物质对至今实验上未被发现和研究 , 将开辟关于反物质性质全新领域的研究 .

一般情况 , 短寿命的正电子将和电子结合而迅速湮没 ; 但是 , 如果将正电子约束和储存在“磁阱”中 , 可大大延长它们的寿命 , 并很快积累数百万个正电子 . 实验中 , Mills 等采用  $^{22}\text{NaCl}$  作为放射源产生正电子 , 然后从磁阱中提取正电子 , 产生目前最高强度的正电子脉冲束 , 并打在纳米多孔硅薄靶表面上 ; 正电子将结合电子自发形成高密度的不稳定正电子素原子 , 新形成的原子迅速占据在硅靶孔洞内并相互碰撞 , 产生  $\gamma$  射线 . 他们首次观察到相互碰撞正电子素原子的聚集 , 如果孔洞内正电子素原子密度足够高 , 相互之间更加接近 , 这种情况比它们单独存在时湮没更快 , 即孔洞内可能形成了正电子素分子 . 进一步他们将使用不同种类的靶材料证实正电子素分子的存在 , 研究正电子素的玻色 - 爱因斯坦凝聚 , 产生正电子素原子激光 , 探索与反物质相关的反引力效应 , 高精度测量正电子素的性质等( 摘自 Physical Review Letters , 95 , 195006( 2005 ) 及相关新闻报道 )

( 武汉大学物理科学与技术学院 吴奕初 )