

# 在 CIAE 开展的理论核物理的几个前沿课题

张锡珍

(中国原子能科学研究院 北京 102413)

**摘 要** 本文简要概述了近几年来在 CIAE 开展的理论物理的几个重要工作,包括中高能重离子反应、相对论核多体、高自旋态、原子核的大振幅运动以及与核理论有关的一些边沿学科等工作。

**关键词** 重离子反应, 相对论多体问题, 高自旋态, 原子核的大振幅运动。

## 1 引言

理论核物理的发展趋势是由传统理论核物理转向一些新的前沿课题的研究,如通过中高能重离子反应来研究原子核在高温高密度状态下的性质以及由强子物质到夸克-胶子等离子体的相变;原子核的夸克自由度及以原子核为实验室来研究非微扰 QCD 的性质;原子核在极端条件下(高自旋、超形变和远离  $\beta$  稳定线等)的结构;原子核的大振幅振动及非线性科学;以及核物理与其它学科的结合所形成的一些边沿学科。近年来我室在以上几个方面作了系统的研究工作,取得了一批在国内外有重要影响的研究成果。在国内外杂志上共发表了几百篇论文,有不少工作为国内外同行广为引用。下面就这几方面的研究工作做一简要的概述。

## 2 中高能重离子碰撞的研究

### 2.1 中高能重离子碰撞与相变

热核特性的研究是中高能重离子碰撞中引起广泛兴趣的研究课题之一。我们建立了热核衰变的统计碎裂模型,即热核碎裂可用具有确定激发能(或温度)和冻结体积的微正则(或正则)系综加核结构效应的蒙特卡罗模拟来描述。并用它系统地解释了热核碎裂的质量分布、电荷分布和能谱特性等;发现并阐明了与此有关的新类型核相变,称之为“衰变模式相变”<sup>[1]</sup>。从而使这一模型被公认为世界上描写热核碎裂特性最成功的三大模型之一(此工作的题为“热核破碎与相变现象的相空间蒙特卡罗模拟”,获核工业总公司 1989 年度科技进步一等奖)。

我们用重组聚集模型和阶乘矩分析方法进一步讨论了核碎裂的标度特性和间歇行为,及其与相变的关系。同时,用动力学模拟,仔细研究了重离子碰撞过程的演化图像、能量沉积和核穿透等特性。结果表明,中能重离子反应末态的核系统会达到热平衡;在 AGS 能量下,核系统具有强的阻止性。

重离子碰撞过程中产生的大量新粒子,将提供探测物质新形态的信息。这些新粒子是在特定的核介质中产生和传播的。但迄今国内外在探测信号的研究中,通常略去产生粒子与核子的末态作用。为了研究核介质对产生粒子特性的影响,我们先以  $^{40}\text{Ga}(1\text{GeV}/u) + ^{40}\text{Ga} \rightarrow \text{K}^+ + \text{X}$  为例,在 RVUU 模型内,引进了  $\text{K}^+$  产生增强法,去处理  $\text{K}^+$  在核物质中的末态重散射。计算结果显示,如果计入  $\text{K}^+$  的重散射效应,则在实验室系大角度处的  $\text{K}^+$  产额和表观温度就明显地增大了。这说明,为了合理地评价  $\text{K}^+$  能谱和角分布,  $\text{K}^+$  与核子的末态相互作用是不能忽略的。进一步推广 RVUU,计入产生粒子的所有介质效应,就能很好地描写最近在 GSI 测得的  $^{197}\text{Au}(1\text{GeV}/u) + ^{197}\text{Au} \rightarrow \text{K}^+ + \text{X}$  的实验数据和  $^{28}\text{Si}(2.1\text{GeV}/u) + ^{28}\text{Si} \rightarrow \bar{p} + \text{X}$  的实验结果。如果在 Fritiof 事件产生器的基础上,计入粒子输运过程中  $\pi$  之间和  $\pi$  与核子之间的重散射,则能合理地再现 AGS 和 CERN 能区的  $\text{K}/\pi$  比从  $p+p$  到  $p+A$  和  $A+B$  反应的系统增强特性。上述结果表明,深入研究核介质对产生粒子特性的影响,对于提供真实可靠的探测信号,是非常重要的。

### 2.2 中高能重离子反应动力学和热化过程

中高能重离子碰撞物理研究是获取高温高

密度核物质(HDM)性质的唯一途径. 但有关信息的获取必须借助理论模型的分析. 近年来, 我们对中高能重离子碰撞的基本理论问题进行了比较深入和全面的研究.

### 2.2.1 自洽的相对论 BUU 理论框架的建立及介质内核子-核子(N-N)弹性、非弹性散射截面的计算

我们从有效拉氏量出发, 用闭合时间回路格林函数方法推导了自洽的相对论动力学方程. 其平均场部分及介质内两体碰撞弹性及非弹性散射截面的具体表达式被同时自洽地得到. 从而建立了自洽的 RBUU 理论. 在此基础上计算了自由及介质内 N-N 弹性及非弹性截面, 并研究了矢量和标量介子场耦合常数的动量、密度相关性<sup>[1]</sup>.

### 2.2.2 高能重离子碰撞趋平衡过程的研究

我们用 RBUU 模型对 1GeV/u 能区重离子碰撞的全局和局域趋平衡过程进行了系统地研究. 分别计算了动力学流张量  $T^{ij}(t)$  以及局域量: 平均横向动量和平均纵向动量之比及平均随机动能和平均集体动能之比随时间的演化. 研究表明, 在几个 GeV/u 能区系统未能达到完全平衡; 在反应中心区大约几个 fm/c 时间范围内约能达到 80% 的平衡程度, 在外围区则很低; 系统越重达到平衡程度越局部; 平均场对反应动力学过程的影响仍应考虑.

### 2.2.3 中高能重离子碰撞集体流分析

我们在 Phys. Lett. B 318 (1993) 19 及 Comnc. on Theor. Phys. 19(1993)199 中系统地研究了有效质量、压缩系数对集体流的多个观察量: 横向流、方位角分布及两粒子方位角关联函数的影响, 寻找相应的能观察量. 在此基础上, 从高能重离子反应的实验结果获取了核态方程和核内 N-N 碰撞截面. 对中高能重离子碰撞的流消失现象进行了分析, 发现流消失能量仅对两体碰撞截面敏感, 从实验结果分析得到该能区介质内两体碰撞截面的估计值.

### 2.2.4 量子分子动力学(QMD)模型的推广(详见 Phys. Rev. C 44(1991)824)

中能重离子反应的一个非常重要的现象是

随反应能的升高反应机制从熔合裂变向多块碎裂的演化. 我们首先改进了 QMD 模型使之适用于 10MeV/u 能区, 在此基础上对这一现象及其机制进行了研究. 我们还将改进的 QMD 模型应用于中能质子与核的反应, 对中子产额和角分布的计算比原有模型有很大改进, 对中能核参数理论计算有较大应用价值, 核参数中心已开展此项研究工作.

## 3 相对论核多体和远离 $\beta$ 稳定线性性质的研究

基于核子-介子场论采用相对论 Hartree-Fork (RHF) 近似引进符合核物质饱和性质的有效拉氏量(Walecka 模型), 推导了相对论微观光学势(RMOP)的实部和最低能级贡献的虚部, 研究 300MeV 以下不同靶核的 RMOP, 并能很好地符合散射微分截面和自旋可观察量, 系统地研究和分析了 RMOP 对量子强子动力学 QHD-I 和 II 的各种因素以及点粒子近似的适用范围, 对推广应用到核-核碰撞研究有一定的指导意义, 此项工作获得核工业总公司科技进步二等奖.

为了研究 Walecka 模型给出的 RMOP 在中能的适用范围, 采用了一套普适的中能质子相对论光学势来研究和分析. 在 RHF 近似下得到的核子自能不能给出合理的能量和密度依赖, 我们进一步采用更基本的相对论 Brueckner-Hartree-Fork (RBHF) 方法, 从自由 NN 势出发考虑核子的短程关联, 解 RBHF 方程得到的相对论  $G$  矩阵具有合理的能量和密度依赖, 计算得到的光学势可以很好地描述 1GeV 以下中能核子散射截面和自旋观察量. 为了简化计算采用 RHF, 同时包含 RBHF 的  $G$  矩阵的合理的能量和密度依赖, 即相对论有效相互作用方法, 很好地描述了散射问题.

我们推广了有限核的 RMT 研究远离  $\beta$  稳定线核的性质, 研究了  $\rho$  介子张量耦合力滴线核性质的影响, 考虑同位旋的依赖性必须引进  $\pi$  介子, 包含变换项的贡献. 有限核的 RHF 计算

十分复杂, 我们已经建立了程序并开展了初步研究.

电子-核准弹性散射纵向响应函数理论与实验的偏离是当前国际上普遍关注的问题. 我们采用自己发展的准粒子模型, 用参数化的核子有效质量引进包含 HF 以及多体关联的准粒子的有效哈密顿量, 得到有限核准粒子束缚态波函数, 准粒子连续态波函数采用单粒子的 Green 函数方法严格计算, 由此来研究电子-核准弹性散射, 计算得到的横向响应函数与实验符合较好, 纵向响应函数与单粒子模型相比有较大的压低. 进一步考虑核子在核介质中电磁形状因子的修正, 可以得到与实验较好的符合.

电子-核散射交换中性波色子  $Z^0$  的弱作用给出宇称不守恒过程. 宇称破坏不对称的测量可以研究核子中奇异夸克成分, 我们用费米气体模型研究电子准弹性散射宇称守恒和宇称破坏过程的纵向和横向响应函数, 讨论多体效应.

#### 4 高自旋态及超形变的研究

我们对原子核的轴对称性破缺进行了系统研究. 这些工作的一个基本特点是强调了高  $j$  准粒子轨道的形变驱动效应在核形状对称性破缺中的重要作用. 提出了转动顺排高  $j$  轨道几何形状的图像, 较早地对典型的三轴形变核区  $A \sim 130$  进行了系统学理论计算研究, 对实验工作起了较好的推动作用. 基于多准粒子激发诱导的三轴形变运动的图像, 对 Signature 劈裂、电四极矩和形状相变的新实验数据进行了统一解释. 指出了“C”轨道的负向  $\gamma$  形变驱动力, 并解释了边带集体性增强的现象. 最近的理论研究预言, 在奇异同位旋条件下, 由于中子和质子准粒子的强烈负向  $\gamma$  形变驱动力的同时作用, 原子核将有异常稳定的椭球集体转动.

在原子核超形变研究方面, 我们提出的最可几超形变核定性判据所给出的超形变核分布同国际上的大规模数值计算结果和迄今的实验数据相一致. 对建立在超形变态上的巨偶极共振进行了相当系统的研究, 指出了观察它们的

几个判据.

我们对  $A = 80 \sim 90$  区进行了系统的理论研究. 结果表明该核区存在一个形状相变临界中子数, 即  $N_c \geq 47$  时为球形核. 这一结论为迄今的所有实验数据所证实, 它推翻了前人的  $N_c \geq 43, 44$  的结论. 我们还指出, 该核区存在同中子素核结构的惊人相似性和同位素核结构的剧烈变化性, 提出了质子体系的量子效应同核液滴效应深度抵消的物理机制, 并同时解释了这两种物理现象.

对 Ru 区的奇  $A$  核作了反射不对称粒子转子模型的系统研究, 引入了宇称耦合, 并同转动耦合进行统一处理.

对高自旋态电磁性质的系统研究包括从  $A = 80$  到铀系的主要核区. 我们指出高自旋态  $g$  因子的丰富结构, 并用中子和质子顺排竞争来统一解释. 建立了推广的磁耦极跃迁推转模型理论, 为极高自旋和有限温度核态间的 M1 跃迁的微观描述建立了理论框架. 在晕态谱等的电磁性质的研究基础上, 对连续  $\gamma$  谱等中的磁偶极跃迁进行了深入研究, 建立了几率谱理论, 预言了连续  $\gamma$  谱中高能偶极跃迁宽峰的存在, 后被几家实验所证实(这项工作获吴有训物理奖).

#### 5 原子核的大振幅运动及非线性科学

基于大振幅运动核体系是目前在实验和理论两方面都进行研究和观察的唯一量子体系(核裂变是大振幅运动的典型例证), 因此对它的理论研究具有独特的意义. 我们拟从宏观和微观两个方面进行深入探讨. (1) 建立和发展自己的核裂变非平衡输运理论, 深入分析裂变过程的瞬态现象, 从理论上解释中子多重性增强问题; 系统计算核裂变动能分布、质量分布等可观察量; 并通过深入研究 Overshooting 现象, 从理论上预言重离子诱发裂变体系可能存在中子多重性增强随系统激发能增加而下降甚至消失的现象. 这些研究和预言不仅受到国内外理论同行的重视, 也引起实验物理学家的兴趣. 因此我们除了和日本理论同行开展国际合作之外,

瑞典 Uppsala 大学实验物理学家也主动提出和我们进行合作(这个研究项目获 1990 年部级科技进步一等奖)。(2)量子输运理论的研究. 研究目的是从微观上揭示有阻尼的量子体系的性质,为此发展了稳态及非稳态的量子输运理论. 运用路径积分、路径积分蒙特卡罗等技术研究具有 Obmic 摩擦的两个子系统之间的耦合,分析量子涨落和马尔柯夫效应,推导包括量子效应的广义 Kramer 公式,并将量子布朗运动的概念和方法推广到研究核裂变,建立裂变的量子布朗运动模型<sup>[6]</sup>。(3)动力学响应函数和关联函数的研究. 为了揭示有阻尼的大振幅运动的微观动力学,在自洽集体坐标方法和耦合系统主方程理论的基础上,我们提出了动力学响应函数和动力学关联函数的概念,建立了计算动力学响应函数的一般方法,并以可解哈密顿量为例,首次研究了动力学响应函数的性质,揭示了在阻尼运动中,与时间有关的周期性结构问题,在混沌运动中动力学响应函数趋向平稳态下线性响应函数行为问题,还研究了动力学响应函数与相空间结构的关系等,从而揭示了大振幅运动体系如何从规则运动向混沌运动过渡的问题.

## 6 与理论核物理有关的边沿学科的研究

### 6.1 生命科学

从我们近年来研究原子核的大振幅运动发展起来的非平衡态输运理论出发,探讨了 DNA 分子的热变性过程及实质,在考虑更全面的

DNA 分子性质的基础上给出了更为真实的 DNA 分子的一维和高维模型. 此项研究对理解诸多生命现象的基本问题有着重要意义.

### 6.2 金属原子集团的壳效应

壳效应在认识原子核的基本性质时起着决定作用. 近年来实验上的一个重要发现是由几个到几百个金属原子(如钠,钾原子)可形成稳定的金属集团,而在金属原子数为 8, 20, 40, ..., 544 等时,金属原子集团最稳定(幻数). 在这种金属原子集团中,由于“导电电子”的平均自由程大大的大于集团的尺寸,所以对“导电电子”的运动平均场近似可用. 我们用无限深球形势阱中的单粒子运动较好地解释了金属原子集团的幻数,预言了在壳之间的金属原子集团的形变(八极起主导作用,见 Z. Phys. D 21(1991) 161),并为新的实验所初步证实.

## 参 考 文 献

- 1 Zhang Xizhen, et al. N. P., 1993, A559 : 603; Z. P. 1994, A345
- 2 Sa Benhao, et al. Inter. Jour. of Modern Phys., 1990, A5 : 843
- 3 Li Zhuxia, et al. Talk at NATO Advanced Study Institute "Hot and Dence Nuclear Matter" (1993, Bodrum)
- 4 Ma Zhongyu, Chen Baoqin. J. Phys. G : Nucl. Part. Phys., 1992, 18 : 1543
- 5 Chen Y S. Phys. Rev., 1991, C43 : 173
- 6 Wu Xizhen, et al. J. of Phys., G : N. P. 1988, 14 : 1049; Phys. Rev., 1993, C48 : 1183

## Some Recent Topics on Theoretical Nuclear Physics in CIAE

Zhang Xizhen

(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413)

**Abstract** The work done in recent years in CIAE, including high and intermediate energy heavy ion reaction, relativistic nuclear many body problems, high spin state, large amplitudes motion of nuclei and some frontier subjects related to nuclear physics, are briefly reviewed.

**Key Words** heavy ion reaction, relativistic many body problem, high spin state, large amplitudes motion of nuclei.