

核色动力学导论

——量子色动力学及其
对核子和核结构体系的应用

An Introduction to Nuclear Chromodynamics:
Quantum Chromodynamics and Its Applications
to the Systems of Nucleon and Nuclear Structure



何汉新 著

中国科学技术大学出版社

当代科学技术基础理论与前沿问题研究丛书

**中国科学技术大学
校友文库**

核色动力学导论
——量子色动力学及其
对核子和核结构体系的应用

**An Introduction to Nuclear Chromodynamics:
Quantum Chromodynamics and Its Applications
to the Systems of Nucleon and Nuclear Structure**

何汉新 著

中国科学技术大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

核色动力学导论:量子色动力学及其对核子和核结构体系的应用/何汉新著.
中国科学技术大学出版社,2009.3

(当代科学技术基础理论与前沿问题研究丛书:中国科学技术大学校友文库)

“十一五”国家重点图书

ISBN 978-7-312-02237-1

I. 核… II. 何… III. 量子力学—研究 IV. O413.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 192848 号

出版发行 中国科学技术大学出版社

地址 安徽省合肥市金寨路 96 号,邮编:230026

网址 <http://press.ustc.edu.cn>

印 刷 合肥晓星印刷有限责任公司

经 销 全国新华书店

开 本 710mm×1000mm 1/16

印 张 27.25

字 数 474 千

版 次 2009 年 3 月第 1 版

印 次 2009 年 3 月第 1 次印刷

印 数 1—2500 册

定 价 78.00 元

内 容 提 要

核色动力学论述构成强作用物质的基本粒子——夸克和胶子的相互作用理论量子色动力学(QCD)如何驾驭夸克、胶子禁闭成核子(强子)、核子束缚在一起组成原子核及核物质演化成强作用物质新形态的动力学,是粒子和核物理研究最具挑战性的研究领域之一。

本书以量子色动力学为基础,阐述核子的夸克、胶子结构及其随能量标度的演化;阐明核子自旋、质量和张量荷的起源;探究夸克、胶子色禁闭及其形成核子(强子)的动力学机制;探索 QCD 非常规强子态;论述重子-重子相互作用和核多体系统的动力学及核介质中的夸克效应。

第1章介绍量子色动力学基础.第2章讨论规范理论(QED, QCD)中的连续对称性变换.除了通常的纵向变换外,提出了横向对称性变换;论述这些变换导致的纵向和横向 Ward-Takahashi 恒等式和 Slavnov-Taylor 恒等式,及由此得到的 QED 和 QCD 中的完全的相互作用顶角函数。

第3章至第5章描述高能标度下的核子结构和性质、核子-核子相互作用和原子核.包括轻子-核子深度非弹散射与 QCD 部分子模型,推广的部分子模型,部分子求和规则,核子自旋物理、核子质量的 QCD 结构,核子的电磁形状因子,核子-核子碰撞和核的 Drell-Yan 过程,轻子-核子深度非弹散射和核的 EMC 效应。

第6章至第10章论述低能标度下 QCD 理论及其对核子(强子)和核结构体系的应用.包括 QCD 非微扰途径——格点 QCD、Dyson-Schwinger 方程、QCD 求和规则和有效场论途径研究,夸克、胶子色禁闭和手征对称性破缺动力学,低能标度下核子的性质、核子(重子)激发态、非常规强子态,及由 QCD 有效场论途径导出的夸克-介子耦合近似图像应用于重子-重子相互作用和核多体问题的研究。

本书可供大学物理系高年级学生、研究生及相关研究人员参考。

Abstract

This book is an introduction to the quantum chromodynamics and its applications to the systems of nucleon and nuclear structure, which is an attempt to describe systematically the quark-gluon substructure of the nucleon (hadrons) and nuclear system and their evolution picture in different energy scale on the basis of the fundamental theory of strong interaction — the quantum chromodynamics (QCD). The main content of the book is roughly divided into three parts. The first is concerned with the foundations of QCD and gauge symmetry. The second part of the book is mainly concerned with the parton picture in deep inelastic scattering processes and QCD perturbation theory at high-energy scale. The nucleon's spin structure and tensor charge, nucleon's form factors and mass structure, and nuclear EMC effects are investigated. The third part of the book is concerned with nonperturbative QCD and the descriptions for nucleon (hadrons) and nonconventional hadron states, nucleon-nucleon interaction and nuclear many-body problems at low-energy scale. The lattice QCD and the Dyson-Schwinger equations are used to explore the quark color-confinement and dynamic chiral symmetry breaking. The QCD effective theory and model and the QCD sum rules, which may bridge the gap between the quark-gluon picture of QCD and conventional nuclear physics, are used to describe the nucleon-nucleon interactions and nuclear matter and finite nuclei, exploring how the basic QCD interactions can drive the strong interaction dynamics which leads to the nuclear force and nuclear many-body system in a bound state of nucleons.

总 序

侯建国

(中国科学技术大学校长、中国科学院院士、第三世界科学院院士)

大学最重要的功能是向社会输送人才。大学对于一个国家、民族乃至世界的重要性和贡献度,很大程度上是通过毕业生在社会各领域所取得的成就来体现的。

中国科学技术大学建校只有短短的五十年,之所以迅速成为享有较高国际声誉的著名大学之一,主要就是因为她培养出了一大批德才兼备的优秀毕业生。他们志向高远、基础扎实、综合素质高、创新能力强,在国内外科技、经济、教育等领域做出了杰出的贡献,为中国科大赢得了“科技英才的摇篮”的美誉。

2008年9月,胡锦涛总书记为中国科大建校五十周年发来贺信,信中称赞说:半个世纪以来,中国科学技术大学依托中国科学院,按照全院办校、所系结合的方针,弘扬红专并进、理实交融的校风,努力推进教学和科研工作的改革创新,为党和国家培养了一大批科技人才,取得了一系列具有世界先进水平的原创性科技成果,为推动我国科教事业发展和社会主义现代化建设做出了重要贡献。

据统计,中国科大迄今已毕业的5万人中,已有42人当选中国科学院和中国工程院院士,是同期(自1963年以来)毕业生中当选院士数最多的高校之一。其中,本科毕业生中平均每1000人就产生1名院士和七百多名硕士、博士,比例位居全国高校之首。还有众多的中青年才俊成为我国科技、企业、教育等领域的领军人物和骨干。在历年评选的“中国青年五四奖章”获得者中,作为科技界、科技创新型企业界青年才俊代表,科大毕业生已连续多年榜上有名,获奖总人数位居全国高校前列。

鲜为人知的是,有数千名优秀毕业生踏上国防战线,为科技强军做出了重要贡献,涌现出二十多名科技将军和一大批国防科技中坚。

为反映中国科大五十年来人才培养成果,展示毕业生在科学研究中的最新进展,学校决定在建校五十周年之际,编辑出版《中国科学技术大学校友文库》,于2008年9月起陆续出书,校庆年内集中出版50种。该《文库》选题经过多轮严格的评审和论证,入选书稿学术水平高,已列为“十一五”国家重点图书出版规划。

入选作者中,有北京初创时期的毕业生,也有意气风发的少年班毕业生;有“两院”院士,也有IEEE Fellow;有海内外科研院所、大专院校的教授,也有金融、IT行业的英才;有默默奉献、矢志报国的科技将军,也有在国际前沿奋力拼搏的科研将才;有“文革”后留美学者中第一位担任美国大学系主任的青年教授,也有首批获得新中国博士学位的中年学者……在母校五十周年华诞之际,他们通过著书立说的独特方式,向母校献礼,其深情厚意,令人感佩!

近年来,学校组织了一系列关于中国科大办学成就、经验、理念和优良传统的总结与讨论。通过总结与讨论,我们更清醒地认识到,中国科大这所新中国亲手创办的新型理工科大学所肩负的历史使命和责任。我想,中国科大的创办与发展,首要的目标就是围绕国家战略需求,培养造就世界一流科学家和科技领军人才。五十年来,我们一直遵循这一目标定位,有效地探索了科教紧密结合、培养创新人才的成功之路,取得了令人瞩目的成就,也受到社会各界的广泛赞誉。

成绩属于过去,辉煌须待开创。在未来的发展中,我们依然要牢牢把握“育人是大学第一要务”的宗旨,在坚守优良传统的基础上,不断改革创新,提高教育教学质量,早日实现胡锦涛总书记对中国科大的期待:瞄准世界科技前沿,服务国家发展战略,创造性地做好教学和科研工作,努力办成世界一流的研究型大学,培养造就更多更好的创新人才,为夺取全面建设小康社会新胜利、开创中国特色社会主义事业新局面贡献更大力量。

是为序。

2008年9月

前 言

量子色动力学是强相互作用的基本理论,它与电-弱相互作用统一理论组合构成了基本粒子理论的“标准模型”.按照此模型,构成自然界物质的基本组元是夸克、轻子和规范玻色子(胶子、光子、W 和 Z 玻色子)及 Higgs 玻色子,对称性在决定其动力学结构中担任中心角色.其中,构成强相互作用物质如核子、原子核等的基本砖块是夸克和胶子.夸克、胶子间的相互作用由量子色动力学描述,它驾驭着形成核子和原子核体系及其演化的动力学.

量子色动力学及标准模型的发现和建立是人类认识物质结构及其相互作用力的长期积累的知识和智慧的结晶.现在已知道构成物质的原子、原子核、核子(质子和中子的统称)、夸克层次.从原子到夸克层次的认识伴随探针能量分辨率提高的历程,经历了漫长的岁月.“原子”这个名词早就出现在古希腊的哲学辞典中,不过它是用来反映当时人们分析物质概念时抽象思维的极限.直到 20 世纪,经过科学实验才使物质的原子观点建立起来.放射性的发现和卢瑟福(Rutherford) α -原子大角散射实验结果则开启了认识物质的亚原子结构的大门.卢瑟福的实验是使 α 粒子穿过薄箔而发生散射.他从实验结果得出结论:原子里有一个带正电的核,它的直径大约是整个原子的十万分之一,原子的大部分质量集中在原子核里,电子围绕核运动,就像一个缩小的太阳系.对氢原子,这个核就是质子.这一实验事实为玻尔(N. Bohr)原子结构理论的建立提供了基础.随着中子的发现(Chadwick, 1932),原子核由质子和中子构成的图像逐渐形成.

质子和中子的发现,人们也开始了对这些粒子本身的研究.质子的反常磁矩的发现(Stern, 1932)和第一次进行的电子-核子弹性散射测量质子的电磁形状因子(Hofstadter, 1956)得到质子的电荷半径约 1 fm,表明核子不是类点粒子而有内部结构.同时,实验显示强子可分为不同类超多重态,反映了强子结构的内部对称性.这些都成为 Gell-Mann 和 Zweig 提出强子的

夸克模型(1964)的基础. 轻子-核子非弹散射实验(SLAC, 1969)揭示了质子内存在类点组分, 由此最终发现了物质的新层次——夸克部分子. 部分子模型是 Feynman 根据 SLAC 的非弹实验结果提出的. 按照部分子模型, 强子在高能时可看做为不相干的部分子组合. 流代数对深度非弹截面的分析表明这些部分子为自旋 $1/2$ 的费米子, 由此自然地将部分子与 Gell-Mann 等提出的夸克相等同.

另一方面, 人们对相互作用力及其理论的认识也不断发展. 从 20 世纪初开始相继出现了爱因斯坦(Einstein)的相对论, 海森堡(Heisenberg)、薛定谔(Schrödinger)和狄拉克(Dirac)等创立和发展的量子力学、量子电动力学(QED), 核子力的介子交换模型(Yukawa), 杨振宁和米尔斯建立的 Yang-Mills 非阿贝尔规范场理论(1954). 上述这些实验发现和理论的发展, 为最终建立强相互作用的理论量子色动力学奠定了基础.

量子色动力学(Quantum Chromodynamics — QCD)是描写夸克和胶子自由度的可重整化的非阿贝尔规范场论. 它的拉氏量(见(1.32)式)可由自由粒子的 Dirac 方程满足定域 SU(3)规范变换下的不变性导出. QCD 拉氏量与 QED 拉氏量的最重要的差别来自非阿贝尔 SU(3)群的特殊结构. 在 QED 拉氏量中, 电子的电荷是一单值的数, 光子不携带电荷. 在 QCD 拉氏量中, 夸克处于色三重态, 而胶子为色八重态, 在场强 $F_{\mu\nu}^a$ 中的非线性自相互作用导致 QCD 中出现 3-胶子顶点和 4-胶子顶点. 胶子间的非线性自相互作用导致如下重要结果:

(1) 在高能标度或大动量转移时的渐近自由. 这已在理论上得到证明. 这可以从 QCD 跑动耦合(见式(1.166))直观地理解这一图像: 当 $Q^2 \gg \Lambda_{\text{QCD}}^2$, QCD 耦合 $\alpha_s \ll 1$, 意味着夸克间的相互作用变得很弱.

(2) 色禁闭. 从跑动耦合 $\alpha_s(Q^2)$ 可看到, 当 $Q^2 \approx \Lambda_{\text{QCD}}^2$, $\alpha_s(Q^2) \rightarrow \infty$. 这就是通常说的红外奴役的表现, 它与自然界中未观测到带色的客体相联系. 当然, 这不是色禁闭的证明. 色禁闭意味着所观测到的强相互作用物质如强子态、原子核都是夸克、胶子组成的色单态. 色禁闭机制的研究是当今 QCD 理论中最具挑战性的突出问题.

(3) QCD 强子物质中可以存在与胶子自由度激发引起的胶球和混杂态形式, 是夸克模型中没有的强子物质的新形态, 或说是非常规强子态.

(4) 可以存在极端稠密的由退禁闭的夸克和胶子构成的物质新形态——夸克-胶子等离子体及色超导体.

在裸夸克质量消失的极限情况, QCD 拉氏量在手征变换下是不变的, 即具有手征对称性. 这时正宇称态和负宇称态是质量退化的, 但在低阶强子

谱中未观察到这一现象. 这表明, 在低能标度时手征对称性是破缺的. 手征对称性的自发破缺由 $\bar{q}q$ 的真空期望值即手征凝聚(或说夸克凝聚) $\langle \bar{q}q \rangle$ 标志, 这是轻夸克 u, d, s 得到组分质量的主要来源. 由此也表明, 在从高能标度到低能标度时核子内的夸克自由度也发生改变.

QCD 拉氏量中由胶子的自作用引起的非线性, 导致 QCD 理论的求解很困难. 只有在高能标度和大动量转移相应的渐近自由情况, 可以用微扰论从 QCD 第一原理出发计算相关的物理过程. 对大多数情况, 现在还无法解析地求解 QCD. 一个可能的 QCD 解是将 QCD 放在格点上作数值计算得到, 这就是格点 QCD 计算. 随着计算机能力的提高和格点计算技术的发展, 从 QCD 第一原理出发对包含少量夸克、胶子自由度体系如核子、介子等强子性质的格点 QCD 计算, 已发展成为有预言能力的理论途径. 但是, 对较为复杂的体系如核子-核子相互作用、核多体系统及有限重子密度(化学势)情况, 目前的格点 QCD 还十分困难或无能为力. 此外, 格点 QCD 计算通常给出的是数字而不是提供直观的理解. 因此, 发展 QCD 的其他非微扰途径十分必要, 这包括 Dyson-Schwinger 方程途径、QCD 求和规则和有效场论途径及由此而导出的模型.

图 I.1 给出了根据格点计算和一些模型计算所推测的 T (温度)- μ (化学势)平面的 QCD 相结构示意图. 这里存在一个以 $T = \mu = 0$ 为中心的扇形弧线, 在扇形内是夸克禁闭和手征对称性破缺相, 弧线外侧是退禁闭和手征对称性恢复相, 而弧线表示发生退禁闭和手征对称性转变的区域. 在小化学势即低重子密度时, 存在从低重子密度强子世界到退禁闭的夸克-胶子等离子体(Quark-gluon plasma — QGP)的迅速跨接(a rapid crossover). 在高

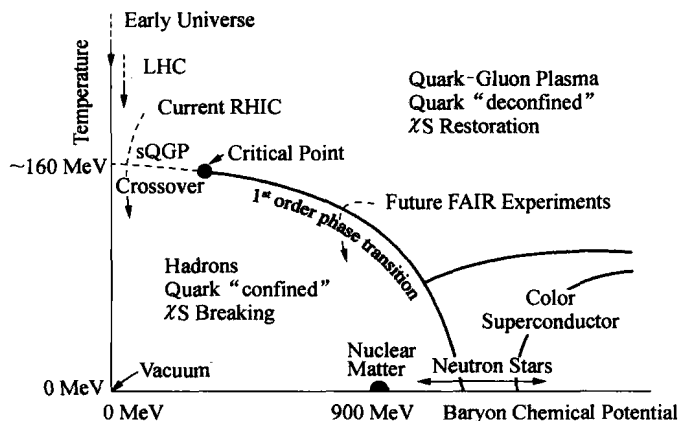


图 I.1 强相互作用的 QCD 相图示意图

对相图的详细分析可见 7.9 节的讨论.

重子密度时,出现一阶相变,但一阶相变点的端点(critical endpoint)的位置在目前还相当不确定。

在重子数密度为零(即 $\mu=0$) 情况的格点 QCD 数值模拟表明, QCD 真空在 $T_c \approx 160 \text{ MeV}$ 左右发生剧烈改变——夸克凝聚和胶子凝聚熔化掉而真空变为一较简单的结构,在 T_c 以上区域轻夸克质量的夸克凝聚贡献消失,与此同时胶子自由度也被释放出来。图 I.2 表示格点 QCD 和 Dyson-Schwinger 方程途径及瞬子模型计算给出的 u(d) 夸克质量随转移动量变化情况。可以看到,随着动量增加至 1 GeV 附近时发生手征对称性恢复的跨接转变,在 $q > 2 \text{ GeV}$ 区域,夸克质量基本上只有流夸克质量的贡献。这意味着电磁探针在 1 GeV 标度以下区域观测到的自由度为组分夸克,而在 $q > 2 \text{ GeV}$ 区域观测到的自由度为流夸克(即 QCD 夸克)。

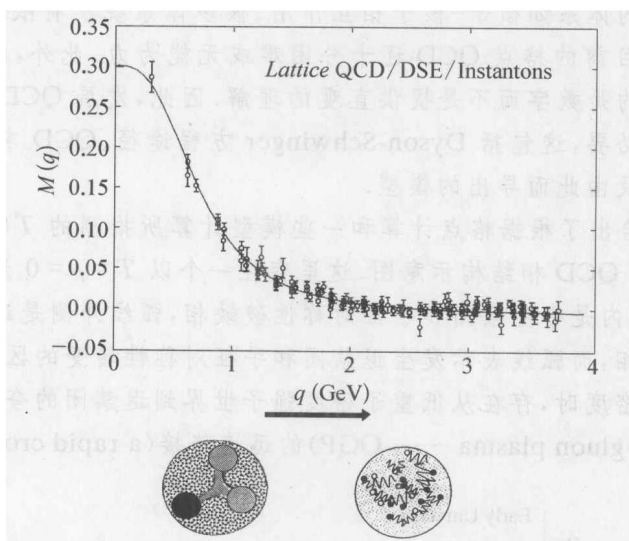


图 I.2 电磁探针的分辨能力与观测到的核子内部组分自由度随动量(距离)标度的变化

图 I.1 中也标出了原子核及各种重离子碰撞实验点在相图中的位置示意图。图 I.1 所示的 QCD 相图大致可分为三个区域:

(1) 色禁闭和手征对称性破缺($\langle \bar{q}q \rangle \neq 0$)区。这里存在由禁闭的夸克和胶子构成的强子物质包括原子核。

(2) 退禁闭和手征对称性恢复($\langle \bar{q}q \rangle \simeq 0$)区。这里存在夸克-胶子等离子体(QGP)物质。RHIC 已通过极端相对论核-核碰撞形成 CSC 态(色玻璃凝聚态)然后生成强相互作用的夸克-胶子等离子体(sQGP)。宇宙早期演化也经过 QGP 物质形态。

(3) $\langle \bar{q}q \rangle \neq 0$ 的低温高密之色超导物质区. 理论上推测中子星内部可存在色超导相物质.

量子色动力学是描写构成强作用物质的基本粒子——夸克和胶子相互作用的理论, 它的最终目标是期望能描写上述所有这些强作用物质的结构和形成的强作用动力学. 然而, 在目前 QCD 拉氏量所提供的知识和数学上的复杂性不足以从第一原理出发对这么广泛的密度和温度范围的强作用物质给出自洽、定量的描述, 因为从基本的夸克和胶子自由度如何构成如此丰富形式的强作用物质的精确机制并没有完全知道. 因此, 我们不妨将量子色动力学对这三个不同强作用物质形态区域的应用大致分为三个相对独立又互相联系的领域进行研究. 第(2)、(3)区域的强作用物质与第(1)区域中原子核物质演化的不同形态相联系. 在这里, 我将量子色动力学应用于原子核物质体系及其演化为不同强作用物质形态的研究称为核色动力学, 它包括三个相对独立又相互联系的研究领域, 每个领域都包含着极其丰富的理论和实验研究内容.

在核色动力学第一个研究领域里, QCD 理论面对的基本问题是: 核子等强子的结构和性质及夸克和胶子是如何形成束缚之色单态的? 色禁闭的机制是什么? QCD 强子物质中是否存在非常规的强子态? 核力的机制是什么? 核子是如何束缚成一个集团组成原子核的? 虽然可以相信 QCD 是一个严谨和完整的夸克和胶子的动力学理论, 但在目前这些知识还不足以从第一原理出发对一个核子完成真实的、定量的自洽计算, 因为一个核子如何由夸克和胶子自由度形成的精确机制并未完全知道, 对其可作定量描述的知识远非令人满意. 此外, 多数的相互作用过程(如轻子-核子散射)同时包含低能和高能方面, 必须将不能用微扰方法计算的低能部分与高能部分分离, 将不能计算的低能部分参数化. 为此, 我们不得不借助于从实验测量获取的线索引入一些可通过实验测量确定的唯象函数以理解 QCD 如何工作, 并用以解决“低能”、“低动量”或“长距离”的非微扰问题. 常采用的唯象函数有部分子(parton)分布、推广的部分子分布(Generalized parton distribution —— GPD)、形状因子、密度矩阵等. 我们还必须发展 QCD 非微扰途径如格点 QCD、Dyson-Schwinger 方程途径、QCD 求和规则和有效场论途径等, 在 QCD 理论与直观的物理图像间及 QCD 与核子-核子相互作用和核多体系统间架起连接的桥梁. 这也是本书设定的讨论范围.

现在文献中已有多部详细论述规范理论和量子色动力学的场论专著及量子色动力学应用于粒子物理的著作. 我感到现在需要有一部关于量子色动力学应用到核体系的书籍, 由此尝试撰写本书.

这本书的基本目的,是以强相互作用的基本理论量子色动力学为基础,比较系统和详细地阐述核子的夸克、胶子结构及其随不同能量标度的演化图像和实验观测,理解核子自旋、质量、张量荷等基本物理量的起源即它们的 QCD 结构;探究 QCD 的色禁闭和手征对称性破缺的动力学机制,以理解 QCD 的非阿贝尔作用是如何将夸克和胶子禁闭而形成束缚的核子;寻找“失踪”的核子(重子)激发态和 QCD 强子物质中新奇的非常规强子态;探讨 QCD 的基本相互作用是如何驾驭核子-核相互作用和使核子束缚在一起形成核物质和原子核的动力学.在目前,还不可能从 QCD 第一原理出发对核子(强子)的结构、核子(重子)-核子(重子)相互作用和核多体进行完全自治的系统推导.我希望,以 QCD 理论为基础对这一领域的较系统的综述能洞察 QCD 从高能标度至低能标度对核子(强子)到核多体如何工作.

全书以上述基本目的为基本架构,以量子色动力学的基本特性——高能标度下的渐近自由和低能标度下的夸克、胶子色禁闭及手征对称性的动力学破缺为基本线索,以量子色动力学对核子、核子(重子)激发态和 QCD 的非常规强子态、核子(重子)-核子(重子)相互作用和核多体系统的应用为基本内容,由此组织安排.书中只包含少量的形式理论.对述及诸如 QCD 的正规化、重整化、深度非弹过程的因子化等只是从应用的角度作讨论而没有论述其证明.同时,全书的讨论范围基本上限定在 u, d, s 轻夸克和胶子组成的体系.

第 1 章论述量子色动力学(QCD)和标准模型基础,包括它们的拉氏量形式、QCD 量子化、QCD 微扰论基础.概括地介绍 QCD 拉氏量的定域与整体对称性及守恒量,并给出后面章节中讨论要用到的能量-动量张量和角动量的表达式.简要讨论了 QCD 的基本特性——渐近自由、夸克色禁闭和手征对称性的自发(即动力学)破缺.

对称性在规范理论的研究中担任重要的角色,在决定规范理论的动力学结构中更是担任中心角色.规范理论的规范不变性通过(连续)对称性变换描述,它导致格林函数间的严格关系即 Ward-Takahashi(WT)恒等式和非阿贝尔规范理论中的 Slavnov-Taylor(ST)恒等式.它们在规范理论的重整化中担任关键性角色,也在规范理论的非微扰研究中起重要作用.但通常的对称性变换只是沿纵向的变换,因而导致的 WT 或 ST 恒等式只约束顶角的纵向分量,横向分量仍是任意的.包含横向分量的完全的 QCD 顶角函数描写非阿贝尔 QCD 相互作用;对 QCD 非微扰研究特别是夸克、胶子色禁闭和动力学手征对称性破缺研究有重要作用.本书作者提出的规范理论

中的横向对称性变换解决了这一问题.这是至今所有的场论书中未曾讨论的问题.因此,在本书的第2章,我比较系统地阐述规范理论(QED、QCD)中通常的(纵向)对称性变换和横向对称性变换,及如何由这些变换导出完全的顶角函数特别是QCD中完全的夸克-胶子顶角函数,为第7章中用Dyson-Schwinger方程途径研究夸克色禁闭问题提供基础.

第3章至第5章利用QCD的渐近自由特性研究高能标度下的核子结构、核子-核子相互作用和原子核.第3章用于讨论轻子-核子深度非弹散射与QCD部分子模型,论述描写核子结构的夸克分布函数的分类特别是领头阶分布函数——自旋平均的分布 $f_1(x)$ 、夸克螺旋性分布 $g_1(x)$ 和夸克横向性分布 $h_1(x)$ 的定义和含义,讨论QCD部分子分布函数的微扰演化的GLAP(Gribov-Lipatov-Altarelli-Parisi)方程及深度非弹过程中将短距离碰撞标度与长距离强子标度物理分开的因子化定理.

核子(质子和中子的统称)自发现以来在强子结构的实验和理论研究中一直担任特别重要的角色.可以说对它的研究是催生夸克模型和量子色动力学的温床,而后又成为检验和发展QCD的基本实验室之一.质子是质量为 $938.3 \text{ MeV}/c^2$ 、磁矩 $\mu_p \simeq 2.793$ 和自旋为 $1/2$ 的费米子.揭示质子基本物理量的来源和它的新特性,是QCD研究核子结构的基本任务.1988年发表的极化轻子-核子深度非弹实验结果发现夸克仅携带核子自旋的很小一部分,与夸克模型预言核子自旋来自构成核子的3个夸克的自旋矢量和明显不符.这就是当时著名的涉及质子自旋起源的所谓“质子自旋危机”问题.经过随后十年左右的实验测量,表明夸克自旋贡献核子自旋的30%左右且核子内有明显的极化的奇异(海)夸克的贡献.核子自旋是哪里来的?这是理论和实验要回答的问题.虽然自1969年至1988年深度非弹实验测量了不少关于核子内夸克和胶子部分子分布的知识,但可以说正是极化EMC实验真正将核子性质的结构研究推向了QCD的夸克、胶子自由度的深层次.

QCD理论可以描述核子的自旋结构,给出实验测量和核子自旋起源的满意回答.按照QCD理论,核子的自旋为QCD角动量算符在核子态的期望值,它表示为流夸克(即QCD夸克)自旋和轨道角动量及胶子角动量之和.第4章将详细地阐明核子自旋的QCD结构,包括它的明显表达式,自旋各分量随能量标度的QCD演化,如何从不同能量标度下的实验数据得到夸克自旋贡献的世界平均测量值,介绍对其他自旋分量的实验和理论研究;讨论核子自旋物理中的另一物理量——夸克横向性分布联系的核子的“新”的重要物理量张量荷及其实验测量问题.

第4章还将论述如何从QCD哈密顿量在核子态的期望值给出核子质量的QCD结构,理解核子质量的来源;讨论推广的部分子分布函数及其对核子自旋和核子形状因子的描述,及应用微扰QCD分析、QCD格点计算和光锥QCD求和规则计算讨论核子的电磁形状因子,从核子内的电荷和流的分布来理解核子的结构。

第5章将通过极化和非极化的Drell-Yan过程讨论高能标度下核子(强子)-核子(强子)相互作用机制,通过轻子-核的深度非弹测量的EMC效应和核的Drell-Yan过程来分析原子核内的夸克-胶子分布和核环境中核子的夸克结构效应。

本书的第6章至第10章论述低能标度下QCD理论及其对核子和核结构体系的应用,包括QCD非微扰途径研究、QCD非微扰作用与夸克、胶子色禁闭和动力学手征对称性破缺问题、低能标度下核子及其激发态、非常规强子态、重子-重子相互作用和核多体问题。

格点QCD提供了QCD的非微扰正规化,是基于QCD第一原理的非微扰QCD基本途径,它的计算近似是可掌控的。格点QCD正成长为具有预言能力的理论途径,得到越来越广泛的应用。第6章简要介绍格点QCD的基本方法及对核子结构研究的一些应用,包括计算核子的轴荷(其中味单态轴荷表示夸克自旋对核子自旋的贡献)、张量荷及核子内的反夸克成分,格点模拟夸克禁闭、动力学手征对称性破缺及其在高温下手征对称性恢复和退禁闭试验。格点QCD用于核子形状因子、非常规强子态(胶球、四夸克态和五夸克态)的计算则在相关章节中进行讨论。

Dyson-Schwinger方程提供了非微扰QCD研究的连续场论途径。与格点模拟的数值计算相比,它可以给出比较直观的物理图像。在一些情况如动量趋于零的红外极限,目前的格点计算存在无限体积问题带来的不确定性等困难,连续场论途径正是对格点计算的补充。第7章首先将较详细地描述QED特别是QCD中Dyson-Schwinger方程的结构,表明由3点顶角表示的QED或QCD非微扰作用如何与所求解的传播子函数相联系,由此理解非微扰作用与动力学手征对称性破缺和QCD色禁闭的联系。然后,将讨论用Dyson-Schwinger方程分别研究QED和QCD中的动力学手征对称性破缺及QCD的色禁闭问题。

第7章的重点议题是连续场论途径对夸克和胶子色禁闭的研究。格点QCD对两个定态夸克间分离势能的模拟得到线性型禁闭势,而当夸克间分离至足够大到伸张力超过弦张力时,弦发生破裂而产生一对夸克-反夸克。在这格点模拟中,QCD非微扰作用与禁闭势间联系的图像不明显。而

Dyson-Schwinger 方程途径可以直观地描写 QCD 非微扰作用与色禁闭信号间的联系. 因此, 第 7 章将用较多的篇幅先概括当前研究色禁闭机制的基本途径、一些禁闭方案和禁闭判据, 然后论述夸克、胶子色禁闭的动力学. 退禁闭研究对理解禁闭机制及形成新的强作用物质形态都很有意义. 因此这一章中也讨论用 Dyson-Schwinger 方程途径研究有限温度和有限密度情况的退禁闭与手征对称性恢复问题. 综合格点 QCD、Dyson-Schwinger 方程和一些模型计算, 可以推测 QCD 结构的相图, 本章也用一节对 QCD 相图作分析. 我希望通过第 6 章的格点 QCD 途径和第 7 章的连续场论途径研究, 能对 QCD 的手征对称性动力学破缺尤其是夸克、胶子色禁闭的研究状况提供较全面的展示, 或许能从中为进一步研究夸克禁闭问题得到启迪.

第 8 章将讨论如何通过 QCD 有效场论途径从 QCD 作用量导出各种近似的图像如整体色对称模型(GCM)、NJL 模型、夸克-介子耦合有效作用量、低能有效手征作用量等. 这些近似模型和作用量可用来描述低能标度下核子(强子)的结构和性质、重子-重子相互作用和核多体问题, 从而为在 QCD 理论与理解低能标度下强子和核体系的结构及动力学间架起了桥梁.

QCD 求和规则是应用广泛的 QCD 非微扰方法. 第 9 章将论述 QCD 求和规则及光锥 QCD 求和规则的基本思想、计算方法, 给出计算核子张量荷、QCD 胶球等实例, 并简要讨论 QCD 求和规则在强子和核物理中的应用.

基于上述 QCD 非微扰途径给出的计算和导出的近似模型与有效作用量, 第 10 章将讨论低能标度下核子等强子态、重子-重子相互作用和核多体问题. 这里包含着十分丰富的内容. 在这里, 我选择如下几个典型的模型和问题进行讨论, 以期能勾画出 QCD 低能近似下从核子到核多体系的概貌:

(1) QCD 大 N_c 极限下的 Skyrme 模型(或说手征孤粒子模型)中的重子态、非常规强子态、重子-重子(反重子)相互作用和轻核.

(2) 低能标度下广泛应用且相当成功的组分夸克(低能标度下 QCD 的一个有效自由度)模型对核子结构和定态性质的描述, 及与 QCD 的联系.

(3) 核子(重子)激发态中的“失踪”的态; 胶球等 QCD 强子物质中的非常规强子态.

(4) 用能够具体描写核子等强子内部夸克、胶子自由度的夸克-介子耦合图像描述重子-重子相互作用和核多体问题. 并讨论夸克-介子耦合模型如何能与低能核物理中十分成功的常规核模型相联系, 解释唯象成功的 Skyrme 多体力的来源, 另一方面夸克-介子耦合模型又可以合理描述核介质中核子的夸克结构效应. 由此可理解如何逐步将核物理与 QCD 理论相衔接.

高能核-核碰撞或说相对论重离子碰撞及由此形成夸克-胶子等离子体

(QGP)物质的机制和 QGP 物质的结构、性质等研究;高重子数密度下核物质如何转变为色超导(CSC)物质和 CSC 物质的结构、性质,及 CSC 物质到 QGP 物质的可能转变等问题的研究,也是当前核物理研究中非常活跃、正在发展和有重大意义的前沿领域.本书中除在 7.9 节讨论 QCD 相图时提及 QGP 和 CSC 物质外,对上述领域问题未作讨论.对核色动力学这两个内容十分丰富研究领域的研究,需要另作专门论述.

量子色动力学应用于描述从高能标度到低能标度的核子(强子)结构和性质、重子-重子相互作用和核多体系统方面.粒子物理和核物理学家们开展了大量的理论和实验研究,付出了艰辛卓著的劳动和智慧,发展了相当多类技术和方法,在洞察这一微观世界领域中创造了浩瀚的知识财富.这本书对如此丰富知识的核色动力学第一领域只能是一个导论,希望提供一个基础和总体的概貌,反映国际上最新的前沿研究成果和进展,并能促进读者对核色动力学有关课题的进一步探究.

同时,本书也包含了我本人近年来的一些研究成果.这些研究工作得到了国家自然科学基金委的多项基金项目资助,其中第 2 章的主要研究工作就是在国家自然科学基金重大研究计划“理论物理学及其交叉学科若干前沿问题”的基金项目支持下进行的.在这里我对国家自然科学基金委的支持表示深切感谢.我也要诚挚感谢多年来与我进行良好合作研究的 F. C. Khanna 教授、Y. Takahashi 教授和季向东(Ji Xiangdong)教授,诚挚感谢吴式枢先生的指导和帮助.我也不会忘记彭桓武先生和杨立铭先生在他们生前给予我的指导和帮助.

我真诚感谢阎沐霖教授、刘玉鑫教授、黄涛教授和其他多位同行在本书写作过程中与我进行许多非常有益有帮助的讨论,并感谢中国科学技术大学出版社提供的帮助和辛勤劳动,使得本书在相当短的时间内就高质量的出版.

我特别要衷心感谢我的夫人史素霞同志,她的理解、支持和奉献使我能全心投入到我从事的科学研究事业中,并顺利完成本书的写作.

本书的写作和出版正值我的母校中国科学技术大学五十华诞之际,乘此机会,我向我的老师们致以崇高的敬意!并衷心祝愿中国科学技术大学在教学、科研和人才培养中取得更加辉煌的成就!

何汉新

2008 年 9 月于北京

中国原子能科学研究院