

用量子色动力学描绘现代核物理的蓝图

——评何汉新所著《核色动力学导论》

闫沐霖

(中国科学技术大学近代物理系 合肥 230026)

在 2009 年科技出版物物理学类著作中,中国科学技术大学出版社出版的何汉新教授的《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》(以下简称《核色动力学导论》)以其新颖的题材引人注目.核色动力学讲述的是以构成自然界强相互作用物质的基本砖块——夸克和胶子为基础,用强相互作用的基本理论——量子色动力学 (quantum chromodynamics, QCD) 描述夸克和胶子如何构成核子和核体系,该核子和核体系的性质及其在不同能标的演化,以及演化形成新物质形态.这是一个正在发展中的现代核物理新方向.从书的副标题大致可了解这本书的内容.这本书之所以新颖不仅因为它论述的是现代核物理新方向的前沿研究领域,还在于这本书是国际上第一部较全面、系统地用 QCD 描述核子和核结构体系的现代核物理前沿的专著.

不断探索和深化对物质本原结构和运动规律的认识,是物理学的永恒动力和目标,也是整个人类科学的基础.在涉及物质结构本原的微观研究方面,从原子、分子层次到当今的夸克、胶子层次,人们经历了多次对物质结构认知的观念性革命.今天人们对这种“物质本原”的认识达到了前所未有的高度,准确理解和掌握该领域的知识,是对基础物理研究工作者的基本要求.《核色动力学导论》一书从量子色动力学与核物理方面适应了这一要求.

上世纪 70 年代发现的量子色动力学 (QCD) 是物理学对强相互作用认识的一次革命. QCD 基本的场论数学结构是 1954 年杨振宁和 Mills 提出的非阿贝尔规范场理论; QCD 场论的美妙进步是发现了这种规范场在高能标下的渐近自由性质 (1973); 而电子-质子深度非弹性散射实验 (1968) 则揭示了核子由更基本的粒子构成, 现已知道这基本粒子就是夸克和胶子; QCD 在粒子物理水平上成功地破解了

强相互作用世纪性难题,的确是对物质结构认识的一次飞跃. QCD 自创建以来,在揭示物质的微观世界结构和探索宇宙奥秘方面发挥了重要作用,多位科学家因此而获得了诺贝尔奖.近几十年已有大量关于讲述粒子物理的 QCD 规范场研究的专著和系统综述.然而,尽管有海量关于用 QCD 研究核物理的研究工作,却缺少一本系统论述将量子色动力学应用于核物理的专著.何汉新教授由此说道“我感到现在需要有一本关于量子色动力学应用到核体系的书籍,由此尝试写本书.”(见本书的前言).他花三年时间写成的《核色动力学导论》一书填补了国际上这一空白,成为国际上在这一研究领域第一部以 QCD 为基础的较全面、系统地阐述核子和核结构体系物理学的专著.因此这本书一出版就受到核物理界以至粒子物理工作者的很大兴趣和关注.作为在粒子物理和核物理领域从事多年科研和教学的理论物理工作者,我有幸认真阅读了这本书,受益匪浅,深深为这本书的新颖丰富的内容以及形式和内容上的创新性、前沿性和论述的独到性所吸引.这可从这本书的整体和具体内容来作出评介:

(1) 全书构画出了一幅量子色动力学 (QCD) 如何驾驭夸克和胶子在不同能量标度 (高能标、低能标) 构成核子 (强子)、核子-核子相互作用直至多核子核体系的内容非常丰富而生动、科学性强、基本线索和结构清晰的总体蓝图.这是国际上第一部对现代核物理这一前沿研究领域做出如此总体描绘的著作,这是一个创新工程,具有重要的科学价值.

核色动力学包含的内容非常丰富,知识浩瀚,如何从 QCD 基本理论到它对核子和核结构体系的应用清晰地描绘,这也是一种艺术.全书以 QCD 的基本特性——高能标度的渐近自由和低能标度下的夸克禁闭与动力学手征对称性破缺为基本线索,以对 QCD 基本性质的研究及 QCD 对核子、强子态、

核子-核子相互作用直至核多体问题的应用为基本内容,从 QCD 基本理论到基于 QCD 的模型和等效理论,再到核子和核结构体系的应用,由此组织安排全书内容,蓝图构思清晰。

读者在这本书中可以看到,作者在对 QCD 第一原理工作领域作了独到论述的同时,以大量篇幅介绍了微扰 QCD 和非微扰 QCD 的 Lattice-QCD,以及各种 QCD 等效理论和基于 QCD 的模型,诸如: Dyson-Schwinger 方程、QCD 求和规则、Large-N_c 展开、QCD 低能等效理论、Skyrme 模型、夸克-介子耦合相互作用、组分夸克模型等的介绍和描述。它们架起了联结 QCD 理论与核子和核结构体系的桥梁。在此基础上,对核子和核结构体系作了清晰的描绘,包括论述前沿课题,如质子自旋起源、原子核 EMC 效应、非常规核子态等等。对如此丰富的强相互作用物理和如此浩瀚艰深的研究工作,作者一以贯之地用 QCD 做出系统和深入浅出的讲解,这是非常难能可贵的。尽管就其中一个或几个具体课题有专著论述,但笔者认为在此领域作如此系统论述之著作,至今还仅此一书,值得高度推荐。

(2) 本书内容的科学深入性、创新性和前沿性也非常值得肯定。比如,在这本书的第 2 章阐述基本 QCD 理论的格林函数之间的严格关系 Ward-Takahashi(WT)等式(也称为 Slavnov-Taylor 等式)中,作者提出了规范理论中的横向对称性变换,由此在国际上首次导出了 QCD 理论中约束顶角横向分量的横向 Ward-Takahashi 恒等式,并导出了 QCD 中完全的夸克-胶子顶角结构函数。这一工作解决了在国际上存在多年的难题,对研究夸克色禁闭等 QCD 非微扰问题有重要科学意义,对此作者在本书第 7 章研究夸克色禁闭问题时进行了深入讨论。要指出的是,作者的这创新性工作在国际上是第一时间出现在本书中,比他的这一成果在 Phys. Rev. D (2009, 80: 016004)上发表的时间早了 4 个月。笔者在这里还要特别指出的是,在本书中,作者关于基本 QCD 理论中格林函数之间的 Ward-Takahashi 等式的讲述是独到的,甚至由于作者的贡献——提出了规范理论中的横向对称性变换和首次并系统导出了 QED 与 QCD 理论中的横向 Ward-Takahashi 恒等式,笔者认为该重要恒等式可称为 Ward-Takahashi-He(WTH)等式。

再比如作者对强作用支配下的束缚态疑难和前沿问题所作的多方面的讨论:夸克-胶子的色禁闭问题、核子自旋物理、核子内的奇异成分和形状因子、核子如何束缚成原子核问题、核内的夸克结构效应、Dyson-Schwinger 方程、QCD-求和规则、手征拓扑孤立子模型以及非常规强子态等,几乎涉及核子物理和现代核物理所关心的最新前沿问题。对这些前沿领域问题的讨论,作者在论述其基本理论和物理图像同时,结合实验研究,也概述了最新前沿研究进展,所引用的文献直至 2008 年中期本书稿完成前夕。

(3) 对我国学者工作及我国大科学工程的关注。在本书中,作者还注意了我国学者的工作,书中介绍和引用了国内 20 多位专家在 QCD 基本理论、非微扰 QCD 方法和应用、核子自旋物理、核子(重子)激发态、非常规强子态、核子-核子相互作用和核多体问题方面的研究工作,这是非常值得肯定的。这样做不仅展示了我国在该领域的研究工作水平,而且有助于国内的学术交流和研究生培养,有助于形成学术团队,推动高水准研究。同时,本著作在介绍非常规强子态时,作者特别提及了我国大科学工程——北京正负电子对撞机-北京谱仪(BEPC/BES)的科学发现。作者介绍和关注了 BEPC/BES 关于强子态的突出实验成果和理论工作,也提及了兰州冷却储存环(CSR)工程,这对实现这两个国家大科学工程的科学目标也是有助益的。

就原子核物理而言,基于 Yukawa 点核子-介子强作用理论的传统核物理(和粒子物理相区分的“老核物理”)经历了数十年的发展,已出现了多部经典核物理著作。而基于强相互作用基本理论量子色动力学的现代核物理(和粒子物理相贯通的“新核物理”)正在发展中,《核色动力学导论》一书正是从当代高度来叙述“新核物理”的有价值尝试,可以说,本书是一个创举,国际上还没有与之相比的同类专著。本书的出版,为核物理工作者及相关的粒子物理工作者(特别是青年物理工作者)了解这一现代核物理方向的发展概况、基本问题和研究前沿课题,从而较快地进入前沿研究领域,提供了很有价值的参考书和很好的教材。

由此,笔者向从事核物理、粒子物理以及量子场论研究工作的科研人员、高校教师和研究生郑重推荐这部有独创性的优秀著作。