

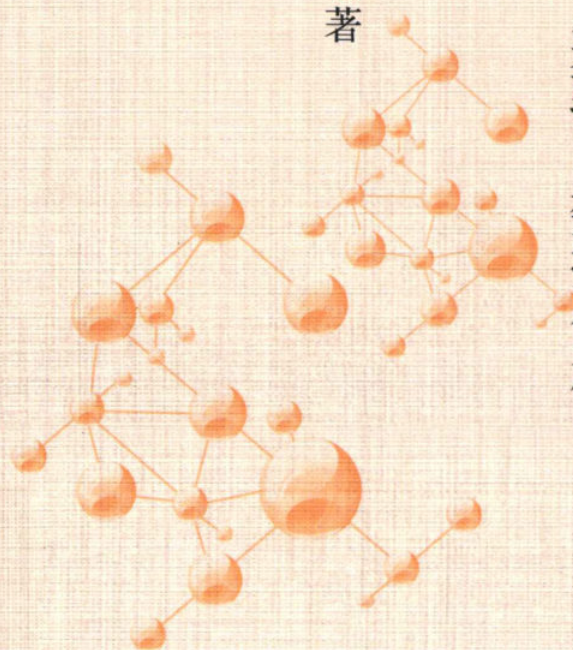


东吴哲学文丛

量子规范场论的解释

理论、实验、数据分析

李继堂◎著



中国社会科学出版社

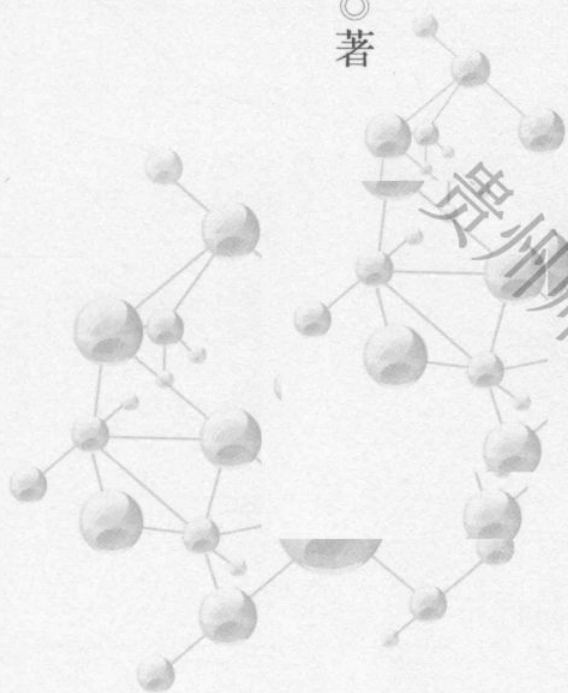


东吴哲学文丛

量子规范场论的解释

理论、实验、数据分析

李继堂◎著



中国社会科学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

量子规范场论的解释：理论、实验、数据分析 / 李继堂著.

—北京：中国社会科学出版社，2019.9

(东吴哲学文丛)

ISBN 978 - 7 - 5203 - 4648 - 1

I. ①量… II. ①李… III. ①科学哲学—研究 IV. ①N02

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 128615 号

出 版 人 赵剑英

责任编辑 朱华彬

责任校对 张 婉

责任印制 张雪娇

出 版 中国社会科学出版社

社 址 北京鼓楼西大街甲 158 号

邮 编 100720

网 址 <http://www.csspw.cn>

发 行 部 010 - 84083685

门 市 部 010 - 84029450

经 销 新华书店及其他书店

印刷装订 北京君升印刷有限公司

版 次 2019 年 9 月第 1 版

印 次 2019 年 9 月第 1 次印刷

开 本 710 × 1000 1/16

印 张 20.5

插 页 2

字 数 336 千字

定 价 118.00 元

凡购买中国社会科学出版社图书，如有质量问题请与本社营销中心联系调换

电话：010 - 84083683

版权所有 侵权必究

《东吴哲学文丛》编委会

主 编 周可真

副主编 吴忠伟

编委会 (按姓氏拼音排序)

陈进华 吴忠伟 邢冬梅

周可真 朱光磊 庄友刚

《东吴哲学文丛》总序

苏州大学哲学系成立于1999年，迄今正好20周年。此次哲学系推出《东吴哲学文丛》5种，可谓恰逢其时：既是对哲学系建系20周年最好之献礼，又是对东吴哲学一次很好的学术总结反思。真是可喜可贺。

东吴，以地望言之，即古之浙西也。清初史学大师章实斋有言，“世推顾亭林氏为开国儒宗，然自是浙西之学。不知同时有黄梨洲氏，出于浙东”，而“浙东贵专家，浙西尚博雅”。由此可知，相对浙东“言性命者必究于史”之“广义史学”传统，吴地学风重博雅，出博学之考据家与经学家。不宁惟是，吴地自古繁庶风流，尤于明清时期多有工于艺之文人雅士；文士“游于艺”，而不耐于辨名析理，故吴地少有理学家。凡此似则足证，东吴向出文人学者而不出哲人。然或可暂置此一传统之说，更作新诠。依今人严迪昌之言，明清文人虽“游于艺”而不“耽于艺”，乃是要“以艺通道”。若作如是之解，则吴地文人实有高远之理想，其之“以艺通道”不正与戴东原之“以词通道”相映成趣，实并不津津于“艺事”，而有“道”求焉？至于东吴文人“以艺通道”不成而“耽于艺”、终未在明清哲学史上获得其相应地位，此虽是憾事，然并不否定“以艺通道”原则之合法性，而或可归于此一哲学运作模式之因缘条件之未足。

故在中国古典时代后期，东吴哲学“以艺通道”之哲学运思模式虽未能修成正果，而在全面应对现代性开展的新时代，或可迎来其重获开展的契机。故自1900年东吴大学创于古吴苏州，开中国现代私立高等教育之先河，哲学教育与研究之风即已蔚然于东吴之园，洋溢于葑溪两侧。东吴大学老校长杨永清所题之校训“养天地正气，法古今完人”正是哲学理念之贯彻落实于大学“完人”教育之明证。经历了百年沧桑，见证了

数代东吴哲人之精神探索，伴随着苏州大学哲学系的成立，东吴哲学在21世纪进入了一个全新的发展时期，但也面临新的哲学主题带来的挑战。在此技术高度发展、政治格局更为复杂、时空极度压缩的新全球化时代，地球人一方面在对“物”与“身体”的控制与改造技术方面达到了前所未有的程度，另一方面则面临着来自环境、社会、人心的严重失序问题；要解决人类的困境，我们必须整合东西方文明，吸纳全球不同“部族”的智慧，给出多元但同时更具普适性的理性反思形态。故相对近现代主导的偏于“刚性”的哲学理性模式，21世纪哲学理性模式要求平衡人类不同精神维度，在心与物/身、理与情、理性思辨与实证运作等之间有一调停。对此，东吴哲学同仁实可立足吴地，放眼全球，通过“游于艺”进而“以艺通道”之哲学运思，参与到对全球哲学的建设中。自然，对于哲学人来说，21世纪新全球化时代的“艺”已非古典时代狭义“文艺”，而是广义之人文社会科学及艺术，故“游于艺”进而“以艺通道”要求基于自身既有研究领域开展“跨学科”“跨教研室”的“跨界”思维与合作，东吴哲人之使命可谓重矣、大矣。

此次出版的《东吴哲学文丛》所收5种虽非刻意规划，但一定程度上反映了东吴哲学共同体近年来“跨学科”交流、“以艺通道”的初步成果；5种书分别论及了中西哲学美学思想之比较、当代儒学对公共伦理的参与、莱布尼茨的科学观、科学哲学中的量子规范场理论以及西方逻辑思想史五个主题，涉及面非常广泛，处理角度亦独到别致，其精彩之处在此难以详述，有待读者品味体察。特别是，5种书的作者，有的是学养深厚的资深教授，有的是功力颇深的中年学者，另外3位是已在学界崭露头角的青年才俊，他们实为东吴哲学未来希望之所在。黑格尔说，密涅瓦河畔的猫头鹰要到黄昏才起飞。但哲学的未来实在青年，我们将东吴哲学的未来寄予青年一代。

2019年不仅是苏州大学哲学系成立20周年，也是作为中国现代思想启蒙的五四运动开启的100周年，我们以本套丛书的出版作为对本系成立20周年的庆祝，也以之作为对五四运动最高的礼敬。

周可真 吴忠伟

前 言

当代物理学基础理论（包括量子电动力学、量子规范场论、量子引力，甚至弦论），都是相对论和量子力学从不同角度在不同程度上的结合，其中量子规范场论最成功。简单讲，外尔推广相对论大胆提出了规范不变性原理，杨振宁和米尔斯复活了局域规范不变性原理，提出杨—米尔斯理论。在此基础上形成量子规范场论，应用“重整化”方法发展出粒子物理标准模型，包括希格斯机制。事实上，构成我们这个物质世界的基本粒子之间的基本相互作用力只有强作用力、弱作用力、电磁力和引力。而描述粒子之间电磁作用的是量子电动力学（电磁理论是人类最早知道的规范场论，量子化后成为量子电动力学），描述粒子之间的强作用力的是量子色动力学，描述电磁作用和弱作用所统一成的弱电作用的是弱电统一理论。弱电统一理论和量子色动力学的核心是杨—米尔斯理论，量子电动力学属于杨—米尔斯理论的特殊情况，它们都是可以量子的，都属于量子规范场论。只有描述引力的广义相对论还不是量子规范场论，但也可以看成是一种规范理论。相比之下，单纯量子电动力学只能处理电磁场；“量子引力”无论在理论上还是实验上都没有成功；弦论还完全没有实验内容。

越是成功的基础理论，其中的哲学问题越是重要。量子规范场论已经成为粒子和场的最基础理论，在其基础上的粒子物理标准模型，不仅能够精确解释和预测人类目前观察和实验得到的所有高能物理实验，而且推动了超出标准模型就超出人类实验能力范围的局面（比如超弦理论）的出现。加上量子场论跟量子力学、狭义相对论、固体物理甚至统计物理结合在一起，使得量子场论的解释变得模糊不清。所以，量子场论的

哲学问题最重要的还是对量子场论的解释，而且也是相当困难的一个问题。甚至最新发现的引力波，不仅加深了人们对引力场的认识，而且新增加了量子力学和广义相对论的不统一问题的重要性。毕竟量子场论中的量子规范场论相当成功，而量子引力始终没有成功，量子引力理论希望从量子场论得到启发，反而显得量子场论解释问题的重要性更加突出。因此，对量子规范场论的整体性解释越来越重要。

花费 20 年耗资 54.6 亿美元打造的大型强子对撞机 (Large Hadron Collider, 简称 LHC), 2008 年 9 月 10 日在著名的欧洲核子中心 CERN 正式启动, 2009 年 11 月 23 日实现首次对撞。这个有 85 个国家和地区近 1 万名科学家和工程师参加的人类有史以来最大的基础科学方面的科研项目, 首要任务就是为了证明出粒子物理的标准模型中被喻为“上帝的粒子”的“希格斯玻色子”。粒子物理的标准模型是统一描述所有基本粒子及其相互之间的强相互作用力、弱相互作用力和电磁力的理论, 包括电弱统一理论和量子色动力学, 是人类有史以来最成功的理论。标准模型所预言的 62 种基本粒子中的 48 种费米子、13 种玻色子全部为实验所证实 (除了引力子因质量太弱没有观察到外), (修建 LHC 时) 只剩下 1 种使这些基本粒子产生质量的希格斯玻色子未被证实, 也正是在此意义上可以说希格斯玻色子是标准模型的拱心石。2012 年 7 月 4 日, 在 LHC 的 ATLAS 和 CMS 两个实验小组都宣布观察到新玻色子的质量范围在 125GeV—126GeV, 新粒子跟长期寻找的希格斯玻色子一致。两个小组宣布观察到相对于背景 5 个标准偏差 (σ) 的结果, 达到了高能物理发现的黄金标准。2013 年 10 月 8 日瑞典皇家科学院发布如下消息: “2013 年度诺贝尔奖授予恩格勒和希格斯, ‘为其有助于我们理解亚原子粒子质量来源机制的理论发现, 该机制最近在 CERN 大型强子对撞机的 ATLAS 和 CMS 实验上, 通过其所预言的基本粒子的发现所证实’。”这不仅是对希格斯等人 1964 年就提出的希格斯机制的肯定, 也是对粒子物理标准模型和量子规范场论的再次肯定, 同时也是对大型强子对撞机 LHC 的肯定。

找到希格斯粒子, 不仅意味着物理学真正进入 LHC 物理时代, 更重要的是促使我们认识到, 量子规范场论、粒子物理标准模型和希格斯机制是基础科学研究中大科学的典型代表, 以大型强子对撞机为代表的高能物理实验是大科学工程的主战场, 海量数据的获得和分析是当代大数

据分析的典范，而寻找希格斯粒子的大型强子对撞机 LHC 物理则是当代大科学研究活动的典型案例。或者说，量子规范场论突出了大科学理论的性质，大型强子对撞机 LHC 突显了大科学装置的特征，寻找“希格斯粒子”体现出大科学工程的特点，尤其是其中对海量数据的处理成为问题的关键。本书认为科学方法论和研究范式主要考察理论和实验之间的关系问题，通过考察量子规范场论的理论结构、粒子物理标准模型的实验研究、希格斯粒子的发现，认为大科学、大数据、大工程是当代基础科学的特征，特别是数据分析在理论与实验之间起了关键作用。在理论与实验的关系问题上，认为数据分析成为两者的中介，相当于卡尔纳普（Carnap）的连接理论与观察之间的对应规则。不过数据分析不像对应规则那样是站在理论优位立场来讲的，并且数据分析也不会被认为只是实验的一部分，甚至也没有被等同于跟理论物理和实验物理鼎立的计算物理。其实质就在于数据分析是内置于背景理论（量子规范场论）、理论模型（标准模型）和唯象模型（希格斯机制）不同层次的理论，并且探测器设计、模拟样本和信号预测、对希格斯粒子不同衰变道的数据分析统计、误差分析、结果报告、分析结果、得出结论等每一个环节都围绕“便于数据分析”在展开，数据分析同时“随附”在理论和实验之中。

本书的篇章结构和大致内容如下：

本书是对量子规范场论的整体性解释，针对量子场论的解释困难，从科学哲学中理论与实验（观察）的关系问题出发，系统考察量子规范场论的理论结构、粒子物理标准模型的实验研究、寻找希格斯粒子的数据分析，认为“数据分析”已渗透到理论的各个层次和实验的各个环节，可以替代逻辑经验主义连接理论与观察之间的“对应规则”。第一篇针对量子场论的解释困难，从科学哲学中理论与实验（观察）的关系问题出发；第二篇从科学理论结构观的角度分析数学结构和物理结构的关系，澄清了局域规范对称性原理的规范论证；第三篇详细解读了粒子物理标准模型发展过程中不同层面的理论和各种实验的关系问题；第四篇通过大型强子对撞机 LHC 发现希格斯粒子的过程，认识到数据分析是连接理论和实验的关键和桥梁；第五篇总结当代基础科学研究范式的大科学理论、大数据分析、大科学工程的特征。

第一篇量子场论的解释困难与理论和实验（观察）的关系问题（包

括第一至四章)：

第一章量子场论的哲学研究，介绍量子场论的粒子解释、场解释，以及规范理论解释的困难。第二章量子规范场论的整体性解释问题，介绍代数量子场论和传统量子场论，分析量子规范场论解释的进路，得出一种协调代数量子场论和传统量子场论的科学方法论策略。第三章科学方法论及其核心问题，讲述科学思想史中近代科学革命以及相对论和量子力学相结合的量子场论都以伽利略 (Galileo Galilei) 开创的数学跟实验相结合的方法论为特征，这跟科学哲学中以理论和实验 (观察) 之间的关系问题为核心是一致的。第四章理论与实验 (观察) 的关系问题，回顾逻辑经验主义、历史主义以及科学实在论和反实在论，甚至社会建构论中的理论跟实验之间的关系问题，认为寻找希格斯粒子的案例有望给出此问题的新解。

第二篇量子规范场论的理论结构 (第五至八章)：

第五章规范场论的科学方法论意义，试图说明科学理论结构观这个科学方法论的核心问题，有望在最能体现本义上的自然科学的规范理论那里得到启示，规范科学理论结构观最好是直接分析科学理论的数学结构跟物理结构之间的关系。第六章规范理论及其数学化形式体系，以经典电磁理论为例介绍了什么是规范理论，然后重点介绍规范理论的哈密顿形式体系，以及规范场论的核心——杨—米尔斯理论的量子化方法。第七章规范理论中的数学结构跟物理结构之间的关系问题，通过爱因斯坦相对论发展到外尔规范不变性原理过程中，对数学结构跟物理结构之间关系问题的考察，突显出规范不变性原理的数学剩余结构特征。第八章规范理论中的发现语境和辩护语境，由于数学结构跟物理结构的不对称，导致物理学家从发现角度强调规范不变性原理的数学结构的启发性，而哲学家从逻辑辩护角度强调数学剩余结构的不严谨，形成物理学哲学家试图否认规范论证，实则是规范不变性原理在发挥重要作用。

第三篇粒子物理标准模型的实验 (第九至第十一章)：

第九章新实验主义的实验观，这一章开始从“实验优位”的角度出发，把科学哲学中理论与实验之间的关系问题演变为重点把科学研究看作一种实践活动，首先考察各种新实验主义的观点，强调实验的各种作用，通过弗朗克林 (Benjamin Franklin) 对弱相互作用 $V-A$ 理论的案例

分析,进一步考察理论跟实验之间的相互关系问题.第十章理论物理跟实验物理之间关系问题,卡拉加(Caraga)在新近的实验哲学研究基础上,把物理学理论分成三个层次、物理实验分成两种之后,进一步区分强、弱不同的理论—负载意义,特别是用在强相互作用的物理学的案例分析上.第十一章粒子物理标准模型和希格斯粒子,不是在背景理论层次讲规范场论,也不是在理论模型层次讲标准模型,而是在唯像模型层次讲标准模型包含的基本粒子,特别是希格斯机制,包括对希格斯机制的哲学反思以及实验结果的意义.

第四篇发现希格斯粒子(第十二至十四章):

第十二章大型强子对撞机 LHC 物理,研究粒子物理标准模型的建立、检验以及可能发展新物理这个大科学工程的总体特征,具体包括:作为理论物理和实验物理相结合典范的粒子物理标准模型、LHC 物理的基本问题、LHC 物理总体上的新特征及其基本哲学问题.第十三章大型强子对撞机的 ATLAS 探测器,介绍大型强子对撞机的 ATLAS 探测器,特别是 ATLAS 探测器的各个部分,以及其中的数据传输、储存和分析,包括电子、缪子等微观粒子的重建和本底,特别是寻找希格斯粒子的衰变道分支比,为第十四章做铺垫.第十四章发现希格斯玻色子,介绍欧洲核子物理中心宣布发现新粒子,弗朗克林对 CMS 发现希格斯粒子的考察,以及我们对 ATLAS 小组发现希格斯粒子的考察.

第五篇当代基础科学的研究范式(第十五章):

第十五章当代基础科学的大科学、大数据和大工程研究范式,总结粒子物理学中粒子规范场论为代表的大科学特征、数据分析的大数据特征以及大科学实验和大科学工程的特征.最终说明了为什么要对量子场论进行整体性解释.

目 录

前 言 (1)

第一篇 量子场论的解释困难与 理论和实验(观察)的关系问题

第一章 量子场论的哲学研究 (3)

 第一节 量子场论的本体论问题研究 (3)

 第二节 和乐解释和图表象 (12)

 第三节 解释量子场论的困难 (17)

第二章 量子规范场论的整体性解释问题 (21)

 第一节 代数量子场论 (21)

 第二节 传统量子场论 (28)

 第三节 量子规范场论的解释策略 (34)

第三章 科学方法论及其核心问题 (38)

 第一节 近代科学方法论的伽利略—牛顿风格 (39)

 第二节 当代基础科学的方法论的核心问题 (46)

第四章 理论与实验(观察)的关系问题 (52)

 第一节 理论与观察(实验)的关系问题 (52)

 第二节 科学实在论中理论和观察的关系问题 (59)

第三节 皮克林的社会建构理论	(62)
第四节 理论和实验的新型关系	(66)

第二篇 量子规范场论的理论结构

第五章 规范场论的科学方法论意义	(75)
第一节 科学理论结构观	(76)
第二节 规范场论的科学方法论意义	(83)
第六章 规范理论及其数学形式化体系	(90)
第一节 什么是规范理论	(90)
第二节 规范理论的哈密顿形式体系	(94)
第三节 电磁相互作用的形式化体系	(98)
第四节 杨—米尔斯理论的量子化	(102)
第七章 规范理论中的数学结构和物理结构之间的关系	(106)
第一节 关于数学和物理关系问题	(106)
第二节 爱因斯坦建立相对论的思路	(109)
第三节 外尔规范不变性原理的诞生	(111)
第四节 外尔和爱因斯坦之争所体现的数学和物理关系	(114)
第八章 规范论证中发现的语境和辩护的语境	(121)
第一节 规范理论基础中的规范论证	(121)
第二节 规范论证的语境论的分析	(126)
第三节 规范论证中的发现语境	(132)
第四节 规范论证中的辩护语境	(135)

第三篇 粒子物理标准模型的实验

第九章 新实验主义的实验观	(143)
第一节 弗朗克林的实验认识论	(144)

第二节	弗朗克林对新实验主义者的研究	(147)
第三节	实验的作用	(155)
第四节	弗朗克林对弱相互作用 V-A 理论的案例分析	(160)
第十章	理论物理和实验物理之间的关系	(168)
第一节	科学实验哲学的新近观点	(169)
第二节	卡拉加对高能物理的三重理论划分	(171)
第三节	强相互作用物理学的散射矩阵方法案例	(175)
第四节	夸克模型和强相互作用物理学的 流代数方法案例	(177)
第五节	20 世纪 60 年代强相互作用物理 学中的理论—实验关系	(179)
第六节	卡拉加对实验的探索特性考察	(190)
第十一章	粒子物理标准模型和希格斯粒子	(196)
第一节	粒子物理标准模型	(196)
第二节	希格斯机制	(200)
第三节	希格斯机制的哲学反思	(208)
第四节	希格斯粒子发现后的希格斯机制	(213)

第四篇 发现希格斯粒子

第十二章	大型强子对撞机 LHC 物理	(217)
第一节	作为理论物理和实验物理相结合典范的 粒子物理标准模型	(218)
第二节	作为基础研究中大科学工程的 LHC 物理的基本问题	(221)
第三节	作为基础研究中大科学工程的 LHC 物理的新特征	(223)
第四节	大型强子对撞机 LHC 物理背后的基本哲学问题	(225)

第十三章 大型强子对撞机的探测器 ATLAS	(228)
第一节 探测器 ATLAS 的总体设计	(228)
第二节 ATLAS 探测器的内部结构	(232)
第三节 ATLAS 上的数据传输、储存和分析	(239)
第四节 电子、缪子、喷注等的重建和本底	(243)
第五节 希格斯玻色子衰变的末态分支比	(244)
第十四章 寻找希格斯玻色子	(246)
第一节 发现希格斯玻色子	(246)
第二节 弗朗克林对发现希格斯粒子的考察	(249)
第三节 ATLAS 小组寻找希格斯玻色子的数据分析	(264)

第五篇 当代基础科学的研究范式

第十五章 当代基础科学的大科学、大数据和大工程研究范式	(277)
第一节 大科学	(277)
第二节 大数据	(281)
第三节 大科学实验	(290)
第四节 大科学工程	(297)
第五节 当代基础科学的研究范式	(301)
第六节 结束语:量子场论的整体性解释	(302)
参考文献	(304)
后 记	(312)

第一篇

量子场论的解释困难与 理论和实验（观察）的关系问题

香港学院内部使用

