

物理学前沿丛书



简单物理 系统的 整体性

——贝里相位及其他

李华钟 著

上海科学技术出版社

物理学前沿丛书

简单物理
系统的整体性

——贝里相位及其他

上海科学技术出版社

A FRONTIER SERIES IN PHYSICS

Global Properties Simple Physical Systems

—Berry's Phase and Others

Li Huazhong

SHANGHAI SCIENTIFIC
& TECHNICAL PUBLISHERS

责任编辑 戴雪文

物理学前沿丛书
简单物理
系统的整体性
——贝里相位及其他
李华钟 著

上海科学技术出版社出版、发行

(上海瑞金二路 450 号)

新华书店上海发行所经销 常熟市第六印刷厂印刷

开本 850×1156 1/32 印张 11.5 插页 4 字数 290 000

1998 年 12 月第 1 版 1998 年 12 月第 1 次印刷

印数 1—1 200

ISBN 7-5323-4637-4/O · 216

定价: 21.50 元

本书如有缺页、错装或坏损等严重质量问题,
请向承印厂联系调换

纪念父母亲

英雄岂易伤愁感，无奈凡夫涕泪多。

昔日成篇真慷慨，一时才气尽销磨。

摧心世历同今古，挥泪重临事已过。

灯下坊桥唯寂寞，萧萧芦荻少时歌。

[注]：忆少年时日寇侵华侵港，举家一迁再迁，母亲常吟唐刘禹锡诗句：

“……今逢四海为家日，故垒萧萧芦荻秋。”

“坊桥”：广州西关恩宁桥。

李华钟

1982年于广州

内 容 提 要

传统的物理学以局域的观点和方法来描述和研究物理现象,但是近 20 年来整体性的研究有了很重要的发展,过去对物理世界整体性的现象和理论的认识,较为零散,或未被重视.本书以现代的理论观点,系统记述物理世界中的整体现象,包括经典力学、电磁学、光学和量子物理现象,着重在简单量子系统(非场论的)的整体性.从 A-B(Aharonov-Bohm)效应,到贝里几何相位,涉及分子、原子、核物理、粒子物理以至凝聚态物理现象和理论.本书强调,整体性现象的实验观测和验证.此外,也有一章涉及与本主题有关的规范场和量子场论,但不包括超弦理论和规范场的数学物理方面.书中有些章节写人作者本人在这一领域的研究.

所谓整体性是指,物理性质由系统的整体拓扑性质决定,它不可以由局域性单纯逐步延拓到全体而完成,系统的时间演化不单由某一时刻去决定下一时的状态,而是依赖它所经历的历史.近 30 年的物理学发展证明整体描述是局域描述不可缺少的补充.

本书有杨振宁和 M. V. 贝里专为本书所写的序言,说明他们对“整体性”的观点.

本书的对象是大学物理系研究生和部分高年级学生;其中部分章节供对本课题有兴趣的博士后和研究人员参考.大学量子力学是必要的基础,书中需要的特殊数学知识,如纤维丛等,以物理学者易于接受的讲法在附录中专门讲述.

《物理学前沿丛书》编辑委员会

主 编 冯 端

常务编委 倪光炯

委 员 (以姓氏笔划为序)

王 迅 甘子钊 闵乃本

李家明 汪克林 张其瑞

周孝谦 侯伯宇 段一士

高崇寿 陶瑞宝 顾世洧

顾秉林 唐孝威 龚昌德

黄祖洽 葛墨林 蒲富恪

戴元本

A FRONTIER SERIES IN PHYSICS

EDITORIAL BOARD

Editor-in-Chief Feng Duan

Executive Editor Ni Guangjiong

Members

Dai Yuanben

Duan Yishi

Gan Zizhao

Gao Chongshou

Ge Molin

Gong Changde

Gu Binglin

Gu Shiwei

Hou Boyu

Huang Zuqia

Li Jiaming

Min Naiben

Pu Fuke

Tang Xiaowei

Tao Ruibao

Wang Kelin

Wang Xun

Zhang Qirui

Zhou Xiaoqian

出版说明

我社在物理学界专家学者的热忱关怀下,历年来出了一些比较好的书,如《晶体生长的物理基础》(闵乃本著)、《原子物理学》(第一版,杨福家著)、《原子核结构理论》(曾谨言、孙洪州编著)、《群表示论的新途径》(陈金全著)、《物理学中的群论》(陶瑞宝著)、《近代物理学》(倪光炯、李洪芳编著),等等.这些书受到国内外物理学界、出版界和读者的欢迎和好评.为进一步出好这方面的著作,我社拟出版《物理学前沿丛书》.其宗旨是:向国内外介绍我国第一流的物理研究成果,扩大我国物理研究成果在国内外的影响,促进学科的发展和交流.《物理学前沿丛书》包括的面:基础物理、应用物理和技术物理的前沿领域.

考虑到物理科学的特点,在大体统一的规格要求下,我们将充分发挥作者的特长,努力使本丛书具有丰富多采的风格.例如:(1)作者可以对一个专门分支学科,按自己的观点作比较全面深入的阐述,其中一部分内容反映作者自己的创造性工作;(2)作者也可以为着重反映自己有特色的、比较成熟的系统性研究,就某一个重要的课题作详细的介绍,但应包括必要的预备知识和有关课题在国际上的发展动态;(3)在某一领域或新课题的研究发展特别迅速的情况下,我们也可把系列学术报告或专门性讲座汇编起来,经过适当加工,再加上一个比较详细的前言介绍,以便尽快出版;(4)在考虑书稿时应充分注意历年来“获奖”项目和国家基金会重点资助的项目.

我们希望,本丛书不仅可以作为高年级大学生和研究生的教材,而且对广大的教师和科研工作者有益,经若干年有了适当的积累之后,能够在一定程度上显示出我国物理学界的风貌.

我们诚恳希望得到物理学界广大专家的大力支持和指导,使这套书的出版达到预期的目的。

上海科学技术出版社

1992年10月

杨振宁教授序

1873 年麦克斯韦在他的名著《电磁学》的序中描述了他研究电磁学的经历. 他十分佩服法拉第, 所以仔细研究了法拉第的《电学实验研究》. 他注意到法拉第不用公式(即不用微积分), 只用了一些几何观念, 如磁力线的运动. 在《电磁学》序文中有下面一段文字:

“当我把我猜想到的法拉第的观念翻译成数学公式后, 发现一般说来, 二者是一回事, 都能解释同一现象, 同一运动规律. 可是法拉第的方法是自整体出发, 经分析达到局部, 而普通的数学方法是建筑在自局部构成整体的原则上.”

换句话说, 麦克斯韦把法拉第的整体几何观念写成了局部的麦克斯韦方程式. 他所用的关键数学观念是斯托克斯定理.[†]

局部与整体的关系通过 20 世纪的拓扑学、李群和微分几何的发展变成了数学中的显学. 近年来物理学中整体观念也在多方面有重要的发展. 李华钟教授在这本书里把这些发展作了深入浅出的介绍, 其中有许多贡献是李教授自己的工作, 是应该受到研究物理学的学生和教师的欢迎的.

杨振宁

一九九七年二月

[†] 这个定理今日已成为微分几何的基石. 关于它的历史请参阅拙文“Reflections on the Development of Theoretical Physics”(刊于 *Proceedings of 4th International Symposium on Foundations of Quantum Mechanics, Tokyo: 1992, JJAP Series 9, 1993, 3-9*).

贝里(Michael Berry)教授序

物理学的许多不同的领域不断地被发现是由异和乐(anholonomy)、相位、浸渐性(adiabaticity)和平行移动(parallel transport)这一些概念相联系起来的. 自从我写出这个课题第一篇论文^[1]13年来, 这些联系的出现使我最感惊奇, 而这些也正是李教授在本书中所致力强调的. 自1984年以来, 几何相位的历史一直向过去伸延到更远更远, 因为含有类似观念的论文一一被发现于眼前, 这种说法决不是错觉. 我已在其他地方写过有关这一相位的普遍的历史预言回溯^[2,3], 我在此代之以选择一些较为局部的历史, 以及叙述我怎样使我写出1984的论文.

70年代后期, 理论物理一个有兴趣而又未被探讨的角落是与量子力学相关联的经典混沌现象. 我们当时认识到关键的角色是量子能级的统计. 当存在有混沌时, 能级彼此排斥, 特别是, 对于通常考虑具有时间反演对称的经典系统, 相邻能级间距为 S 的概率, 随 $S \rightarrow 0$ 而线性地消失. 我随后发现^[4,5]这一行为可以理解为, 把所考虑的系统视为由参数 $x_1, x_2 \dots$ 平滑地表征的一族中的一个成员. 线性能级互斥来源于这族中的那些成员, 它们两个能级重叠. 为了找出这种简并, 如无几何对称性时(但有时间反演对称)就必须改动两个参数, 而不是一个——这就是著名的“无交叉定理”(no-crossing theorem)^[6]. 这类简并(generic degeneracies)有它本身的理由成为有兴趣的事件. 以前几代的物理学家把它们叫做“偶然的”(accidental), 不过正如交通意外事件, 它们是很少机会在你身上发生的(即是说, 对任一特定系统来说). 但是对于一区域人口来说却是不可避免而又是可以预计到的(即是说对一个两参数的族来说), 因此, 我同我的新学生 Michael Wilkinson 着手两参

数族量子系统数字研究. 我们选择三角台球, 因为三角形的空间是二维的(例如 x_1 及 x_2 可以是三个角中之两个), 并计算了作为 x_1, x_2 函数的头 13 个能级. 这时出现了许多简并, 但我们面临的问题是: 我们怎样能确认两个能级真正是重合的, 而不只是十分靠近然后又分开, 好像是一个参数的规避的交叉(avoiding crossing)那样?

答案在一条定理^[7,8]中, 它是我在几年前重新发现的: 沿环境在 $[x_1, x_2]$ 空间的一简并的路径, 两简并态的每一个的波函数(实数的), 当平滑地延拓, 都改变符号. 我当时认识到数学上这就是当费米子转了 2π 时, 波函数改变符号一样^[9,10]. 检测到这一符号的改变就是发生简并的肯定的信号. 我们把这些应用到解释我们所得的数字结果^[11].

1983 年 3 月, 我在佐治亚理工学院讲学时讲到这一工作. 当描述无交叉定理时, 我提到更一般的情形, 即当全无对称性时——甚至无时间反演对称, 例如在桌球台有磁场, 而在其上运动之粒子是带电的, 这时要有三个参数, 而不是两个, 才能找到一处简并. 这情形下, Wilkinson 和我所发现的非对称三角台桌球的简并会被破坏掉.

在报告结尾时, 物理系主任 Ron Fox 教授问了一个浅显的问题: “当磁场破坏了一处简并, 而波函数沿先前包围简并处的路径延拓时, 波函数的符号改变会怎样?” 我当时未能即时回答这一问题, 因为我没有想过这一问题. 在那次访问剩下的时间里, 以及回到 Bristol 后的几个星期, 还有我和我的同事 John Hannay 博士多次讨论, 我领悟到这符号改变推广到无时间反演对称系统是有兴趣的, 而且可能有深度的. 因为它表明虽然量子态必须是它的变量(例如位置)的单值函数, 但它不必是哈密顿量中的参数延拓下的单值函数, 同时伴随这一延拓而来的几何相位因子不必仅仅是一个符号.

1983 年 5 月, 我写完了关于几何相位的论文之后, 但在送出去发表之前, 在 Warwick 的一次会议后, 我搭载 Eric Heller 教授

去 Bristol 我家. 在驾驶途中, 我激动地讲及几何相位, 他的反应是使我去注意 C. Alden Mead 关于“分子 Aharonov - Bohm 效应”的最近的工作^[12]. 阅读此文后, 我认识到 Mead 清楚地了解在分子渊源关系上的相位主要思想, 但我的论文具有足够的较大的普遍性, 仍然值得发表. 因此我加入 Mead 一文作参考文献后, 把论文送去, 它在 1983 年 6 月 13 日送达皇家学会(Royal Society).

我切盼着审稿者的意见, 但却没有收到, 那一年的 8 月我访问澳大利亚, 在堪培拉(Canberra)我碰到 Barry Simon 教授, 我告诉他关于这一相位, 他立刻领悟到它和纤维丛理论中的陈类(Chern class)的关系. 回到美国后他写了关于他叫做贝里相位(Berry's phase)的几何意义的论文, 发表在 1983 年 12 月的物理评论快报(Physical Review Letter)^[13]上. 当时我还没有收到皇家学会审稿者意见. 我催问皇家学会关于我的论文后, 他们发现审稿者(我迄今不知道他是谁)丢失了送给他的印本, 于是又再寄另一份去. 这一次回应很快而且是肯定的, 于是我的论文发表于 1984 年 2 月.

Michael Berry

1997 年 4 月

(李华钟译)

参 考 文 献

- [1] Berry M V. Proc Roy Soc, Lond, 1984, A392, 45-57
- [2] Berry M V. Physics Today, 1990, 43(12): 34-40
- [3] Berry M V. Bristol Anholonomy Calendar. In: Chambers R G, et al, ed. Sir Charles Frank OBE FRS, an eightieth birthday tribute. Bristol: Adam Hilger, 1991. 207-219
- [4] Berry M V. Ann N Y Acad Sci, 1980, 357: 183-202
- [5] Berry M V. Ann Phys, 1981, 131: 163-216
- [6] Von Neumann J, Wigner E. Phys Z, 1929, 30: 467-470
- [7] Longuet-Higgins H C, et al. Proc Roy Soc Lond, 1959, A244: 1-16
- [8] Arnold V I. Mathematical Methods of Classical Mechanics. New York: Springer, 1978

- [9] Aharonov Y, Susskind L. Phys Rev, 1967, 158: 1237—1238
- [10] Silverman M. Eur J Phys, 1980, 1: 116—123
- [11] Berry M V, Wilkinson M. Proc Roy Soc Lond, 1984, A392: 15—43
- [12] Mead C A, Truhlar D G. J Chem Phys, 1979, 70: 2284—2296
- [13] Simon B. Phys Rev Lett, 1983, 51: 2167—2170

自序

“简单物理系统的整体性”这一名称需要一点说明,所谓“简单”,我所指的是现代实验条件下能实现和测量的物理系统,包括经典的和量子的.曾经一度成为理论物理和数学物理热门的弦理论(string theory)规范场的形式理论,拓扑分析等都不在要讨论的范围.“整体性”又称“大范围性质”或“全局性”.在现时许多物理文献中,几何性、拓扑性或整体性三个词往往不加区别地混用,我们在讨论中也是如此.事实上,这三者在数学上有不同的含义,在物理上是否也应该有区分地对应于不尽相同的物理实际,这一问题在此以前似乎还未有提出过,也许这是一个多余的问题.不管怎样,在我们的讨论中,除了在个别地方提出区别之外,也都混着使用.在本人看来,“几何”相对于“动力”,“拓扑”相对于“量化”,“整体”相对于“局域”,它们在物理上是会对应于不同的实际情况的.

本书的内容,材料来源有几部分.一是本人的研究论文,当然也包含了合作者共同的研究成果,或是阐述本人经过研究的一些新的问题、观点和思路.它们见之于如下章节.

第四章 磁单极

§ 4.6 磁单极的整体表述: 对偶荷 $SO(3)$

§ 4.7 $SO(3)$ 非阿贝尔磁单极

第九章 贝里相位的几何性和规范结构

§ 9.3 波函数的相位和几何

第十一章 几何相位的普遍表述

§ 11.2 非循回过程的相位

第十四章 量子场论的几何相位

§ 14.3 真空几何相位诱导规范场与诱导费米子数

§ 14.4 真空几何相位诱导规范场与 Chern-Simons 场

第十五章 粒子物理的整体性现象

§ 15.3 μ 子自旋共振(μ SR)探测几何相位

§ 15.4 粒子自旋

第十六章 凝聚态物理的整体性现象

§ 16.2 介观尺度现象

附录 I 关于贝里相位一些问题的评注

附录 III 诱导规范场:磁单极场及其物理效应

附录 IV 物理系统的整体性——一种观点和个人的研究

二是引述重要文献的主要内容,对于这一些文献和章节,都保持原来的演绎,除了本人认为必要加以诠释使读者易于接受外,都不加以改动,并注明出处,以便读者进一步探索,也更接近原著.这些文献是经选择而纳入本书体系的,希望对读者了解这前沿领域,能起路标的作用.本书的主要对象是理论物理专业的博士研究生,其中部分章节也适用于大学高年级学生,另有些部分则供博士后研究者参考.它并不纯粹是教学用的参考教材,而是用研究者的观点、思路和长期探索编织成的这个领域的图画和概览.为了阐明成书的立足点,在附录 III 中收入一篇本人未发表的论述,它说明本书写作的动机和思想.在附录 IV 中收入一篇曾用英文发表的文章的中译文,它阐述了写本书的前驱研究工作和背景.

感谢我的合作者们,与他们共同工作和同理论物理学界同行们富有教益的讨论是本人长期研究不可缺少的支持.特别感谢我在青年时代的老师杨立铭先生和胡宁先生.感谢卢文、陆启铿、戴元本、何作麻、冼鼎昌、葛墨林、郭汉英、吴咏时、朱重远、倪光炯、徐躬耦、王凡等许多教授的支持和帮助.

感谢香港中山大学高等学术研究中心基金会,中山大学高等学术研究中心的同事们,他们的帮助是本书得以完成的有力支持.

感谢 10 多年来杨振宁教授的支持和鼓励,贝里教授的通信鼓励和两次短暂的讨论,使本人深受教益.特别是,他们热心为本书写了前言,他们都强调对物理现象整体性的认识是近 20 年物理学