



开放人文

# Fundamental Forces of Nature

The Story of Gauge Fields

[美] 黄克孙 著 杨建邺 龙芸 译 杨建军 校

Kerson Huang

## 大自然的基本力

规范场的故事

上海世纪出版集团

# 大自然的基本力

规范场的故事

[美]黄克孙 著

杨建邺 龙芸 译 杨建军 校

样-书

上海辞书出版社

图书在版编目(CIP)数据

大自然的基本力:规范场的故事/(美)黄克孙(Huang, K.)著;杨建邺,龙芸译.  
—上海:上海辞书出版社,2009.8  
(世纪人文系列丛书)  
ISBN 978-7-5326-2827-8

I. 大... II. ①黄... ②杨... ③龙... III. 规范场 IV. O413.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第053582号

---

责任编辑 彭江杰  
特约编辑 姚晨辉  
装帧设计 陆智昌 朱赢椿

---

大自然的基本力——规范场的故事

[美]黄克孙 著  
杨建邺 龙芸 译

出 版 世纪出版集团 上海辞书出版社  
(200040 上海陕西北路457号 www.ewen.cc www.cishu.com.cn)  
发 行 上海世纪出版集团发行中心  
印 刷 上海市江杨印刷厂  
开 本 635×965mm 1/16  
印 张 16.25  
插 页 4  
字 数 195 000  
版 次 2009年8月第1版  
印 次 2009年8月第1次印刷  
ISBN 978-7-5326-2827-8/O·60  
围 字 09-2008-690号  
定 价 32.00元

## 出版说明

自中西文明发生碰撞以来，百余年的中国现代文化建设即无可避免地担负起双重使命。梳理和探究西方文明的根源及脉络，已成为我们理解并提升自身要义的借镜，整理和传承中国文明的传统，更是我们实现并弘扬自身价值的根本。此二者的交汇，乃是塑造现代中国之精神品格的必由进路。世纪出版集团倾力编辑世纪人文系列丛书之宗旨亦在于此。

世纪人文系列丛书包涵“世纪文库”、“世纪前沿”、“袖珍经典”、“大学经典”及“开放人文”五个界面，各成系列，相得益彰。

“厘清西方思想脉络，更新中国学术传统”，为“世纪文库”之编辑指针。文库分为中西两大书系。中学书系由清末民初开始，全面整理中国近现代以来的学术著作，以期为今人反思现代中国的社会和精神处境铺建思考的进阶；西学书系旨在从西方文明的整体进程出发，系统译介自古希腊罗马以降的经典文献，借此展现西方思想传统的生发流变过程，从而为我们返回现代中国之核心问题奠定坚实的文本基础。与之呼应，“世纪前沿”着重关注二战以来全球范围内学术思想的重要论题与最新进展，展示各学科领域的新近成果和当代文化思潮演化的各种向度。“袖珍经典”则以相对简约的形式，收录名家大师们在体裁和风格上独具特色的经典作品，阐幽发微，意趣兼得。

遵循现代人文教育和公民教育的理念，秉承“通达民情，化育人心”的中国传统教育精神，“大学经典”依据中西文明传统的知识谱系及其价值内涵，将人类历史上具有人文内涵的经典作品编辑成为大学教育的基础读本，应时代所需，顺时势所趋，为塑造现代中国人的人文素养、公民意识和国家精神倾力尽心。“开放人文”旨在提供全景式的人文阅读平台，从文学、历史、艺术、科学等多个面向调动读者的阅读愉悦，寓学于乐，寓教于心，为广大读者陶冶心性，培植情操。

“大学之道，在明明德，在新民，在止于至善”（《大学》）。温古知今，止于至善，是人类得以理解生命价值的人文情怀，亦是文明得以传承和发展的精神契机。欲实现中华民族的伟大复兴，必先培育中华民族的文化精神；由此，我们深知现代中国出版人的职责所在，以我之不懈努力，做一代又一代中国人的文化脊梁。

上海世纪出版集团  
世纪人文系列丛书编辑委员会  
2005年1月

# 大自然的基本力

# 中文版序

大自然的秘密终于被现代科学解破了！当这个公开的秘密——物质结构的原理——在过去的几个世纪里被逐步揭开的时候，它带来的科技马上以爆发性的力量，不断地改变地球的面貌、人类的生活——甚至人类的命运。

300年前，牛顿以超时代的眼光，提出“万有引力”的议题。他认为，从树上掉到他头上的苹果和绕着太阳运行的行星，都在同一种引力的支配下运动。300年来，人们通过无数观察、计算，创造和修改，把牛顿“万有引力”的原则惊奇地推广了：宇宙所有的结构，所有的现象，从最小的原子核到最大的星云堆，都支配于同一个物理法则之下。

在我们所知物质的最深层，这法则就是杨振宁与米尔斯1954年提出的“规范场论”。他们把经典电磁场特有的“规范对称”做了跃进性的推广，与量子力学结合，让理论达到奇妙的升腾。在这本书里，我们要讲的就是规范场的故事。这故事要从牛顿说起，因为物理的发展是一脉相连、从没中断的。我们也要谈实验的工具，因

为物理的基础在于测量。这里陈述的故事，实际上是整个理论物理的故事。

在最后一章，我们探讨一个最令人迷惑的问题：为什么正确的理论不但真，而且美？读者要是耐心熬到最后，可以从“重正化”的角度去看它而得到新的领悟。

对中文版读者，我特别有几句话说。在1957年，杨振宁和李政道大胆地提出自然违反左右对称的建议。同年，吴健雄的实验证明了这理论，杨振宁和李政道因此作为中国人第一次获得诺贝尔奖。这些创举，可以说是打开粒子神奇境界的第一炮。从这开端，经过近20年沸沸腾腾的发展，包括1975年丁肇中和里克特关于夸克的发现，物理界终于认可杨振宁和米尔斯早在1954年创造的规范场论。中国人在这个领域上的贡献是令人自豪的，特别在民族百年衰落之后。杨振宁自己就说过，他一生最大的成就，是在于消除中国人自觉不如人的心态。

但是，中国人这些成就的意义是更深刻的。

中华文化能持续5000年，原因是它能以一种包容的心胸吸收外来民族和文化。历史上最重要的例子是五胡和佛教。在过去的150年间，为了生存，中国人不得不全力吸收西方文化，特别是科学。我们可以看到，科学现在已经成为中华文化的一部分。因为这样，科学正是中华民族重新崛起的重要动力。

最后，我要感谢新加坡世界科技出版公司潘国驹教授出版本书英文版，中国科学院理论物理研究所何祚庥院士向出版社推荐出版中文译本，感谢杨建邺先生仔细翻译的苦功和上海辞书出版社总编辑潘涛博士的支持。

黄克孙

2008年中秋节

北京清华园



# 序

在本书里，我想讲的是规范场的故事。规范场是在基本粒子之间传递信号的信使(messengers)，使基本粒子之间发生相互作用。它们在我们当前能够达到的物质结构最深层——夸克的量子范围里发生作用。

这个层次的基本相互作用，向上经过一系列机制，最后渗入到我们日常生活的领域里。

在这种渗入过程中，相互作用以不同的姿态出现——核相互作用，原子相互作用，和统治我们日常生活的经典电磁相互作用。但是所有这些相互作用都基于同样的基本相互作用。

“规范”(gauge)的思想最早出现在电磁学里。但是，在本书所及的水平上，规范与“量子相位”(quantum phase)密切相关，正是它使得微观和宏观有了区别，而且附带地使得 21 世纪有了新的技术，如原子激光和量子计算等。

规范场的故事，是我们探寻物理世界基本定律的故事，是理论物理学的故事，这个故事从牛顿利用他的运动定律来定义力的意义开

始。要讲这个故事我们得从这儿开始，这样线索就会连续而不断。

但是，本书写的不是关于规范理论的历史。我们主要的目的是介绍规范理论后面的思想。我们将涉及与规范理论有关的人物和事件；但是叙述的顺序是按照思想发展的顺序，而不是跟随历史。

理论物理学使我们对物理世界有一个真正的了解。为了量化它的成就，我们只需注意到电子磁矩最近的测量，理论计算与实验相符的程度到达  $10^{-12}$  的精度。

我们一直感到最惊讶的事实是，我们的理论不仅仅是真实的，而且是美丽的。理论物理学真正值得庆幸的是，我们在得到真的时候，同时得到了美。在本书结束时，我们根据我们已有的知识画了一个图，为这种惊人的真与美的结合提供一个可能的解释。

黄克孙

2007年1月

## 目录

1 中文版序

3 序

---

1 导言

3 1. 什么使得世界运作不息？

3 1.1 运动

4 1.2 引力

6 1.3 力场

6 1.4 等效原理

7 1.5 能量

8 1.6 动量

9 1.7 最小作用量

10 1.8 牛顿定律正则化

11 1.9 机械的宇宙

13	2. 电磁理论
13	2.1 电场
14	2.2 力线
15	2.3 多极子
15	2.4 标势
16	2.5 电流
17	2.6 磁场
18	2.7 矢势
19	2.8 电磁感应
19	2.9 麦克斯韦方程组
21	2.10 辐射
23	3. 真空是媒质
23	3.1 以太
24	3.2 参考系
26	3.3 光锥
26	3.4 洛伦兹变换
27	3.5 空间和时间的相对性
28	3.6 四维矢量
29	3.7 $E = mc^2$
31	3.8 比光还快?
31	3.9 麦克斯韦方程组的真实形式
32	3.10 规范场
33	3.11 谁写下这些符号?
34	3.12 洛伦兹和爱因斯坦
36	4. 要有光
36	4.1 局域规范不变性

37	4.2 创生
39	4.3 规范原理
40	4.4 赫尔曼·外尔
41	4.5 就有了光
42	<b>5. 英雄的年代：为量子理论奋斗</b>
42	5.1 外星人信号
44	5.2 玻尔原子
46	5.3 纯虚数
48	5.4 量子力学
49	5.5 波函数
50	5.6 量子理论和相对论
51	5.7 愚蠢的问题
52	<b>6. 量子实在</b>
52	6.1 不确定性关系
53	6.2 物质的波动本性
54	6.3 纠缠
56	6.4 所有的虚拟实在
59	6.5 量子世纪
59	6.6 荒废了的演讲
61	<b>7. 电荷是什么？</b>
61	7.1 量子规范
62	7.2 协变导数
63	7.3 阿哈罗诺夫-玻姆实验
64	7.4 $U(1)$
65	7.5 量子规范原理

66	7.6 整体规范不变性和局域规范不变性的比较
68	8. 转动的群
68	8.1 转动不对易
69	8.2 哈密顿灵感突现
71	8.3 转动之生成元
71	8.4 群
73	8.5 $SU(2)$ : 基本表示
74	8.6 伴随表示
75	9. 杨-米尔斯场: 非对易电荷
75	9.1 规范 $SU(2)$
77	9.2 图示局域规范不变性
78	9.3 麦克斯韦方程的推广
80	9.4 规范光子
80	9.5 磁荷
81	9.6 磁单极子: 规范刺猬
82	9.7 深入冷冻层
84	10. 真实光子和虚光子
84	10.1 真实光子
86	10.2 量子跃迁
87	10.3 虚光子
89	11. 产生和湮没
89	11.1 量子场
91	11.2 粒子和反粒子
92	11.3 狄拉克方程

93	11.4	狄拉克海
94	11.5	反转时间
96	11.6	费恩曼图
98	11.7	精细结构常数
99	<b>12. 动力学的真空</b>	
99	12.1	量子电动力学(QED)
100	12.2	相互作用顶点
100	12.3	自能
101	12.4	真空极化
101	12.5	着衣电子
103	12.6	紫外灾难
104	12.7	真空涨落的实在
106	12.8	那个年代, 物理学家是英雄
107	12.9	持久的 QED
110	<b>13. 基本粒子</b>	
110	13.1	开初
114	13.2	玻色子和费米子
116	13.3	自旋和统计
117	13.4	相互作用
119	<b>14. 宇称的坍塌</b>	
119	14.1	后现代时代的黎明
122	14.2	中微子: 左手螺旋
123	14.3	$CP$
124	14.4	没有神圣的东西?

126	<b>15. 粒子爆炸</b>
126	15.1 加速器轰鸣
129	15.2 白昼中的黑暗
131	15.3 本体论的靴袜
133	15.4 极限温度
134	15.5 一个时代的回音
135	<b>16. 夸克</b>
135	16.1 奇异性
136	16.2 八重态和十重态
138	16.3 八正法
139	16.4 “为马斯特·马克高呼三声夸克！”
140	16.5 粲和其他
141	16.6 部分子
142	16.7 粲偶素
144	16.8 色
145	<b>17. 所有的相互作用都是局域的</b>
145	17.1 杨-米尔斯复苏了
146	17.2 电磁相互作用和弱相互作用的统一
148	17.3 产生质量
149	17.4 制造光子
150	17.5 历史的注释
151	17.6 轻子-夸克家族
152	17.7 量子色动力学(QCD)
153	17.8 两个多余的家族：是谁发明了它们？
154	17.9 标准模型



156	<b>18. 破缺的对称</b>
156	18.1 什么是质量?
157	18.2 磁体如何磁化
158	18.3 序参量
159	18.4 戈德斯通模
161	18.5 超导性: 光子获得质量
162	18.6 历史的注释
165	<b>19. 夸克禁闭</b>
165	19.1 磁单极子禁闭
166	19.2 电通量管
168	19.3 量子色动力学弦
170	19.4 渐进自由
172	<b>20. 悬丝</b>
172	20.1 质量
174	20.2 手征性
174	20.3 把 $\pi$ 介子看成戈德斯通玻色子
176	20.4 PCAC(部分守恒轴矢流)
178	20.5 三角形反常
179	20.6 轻子-夸克家族结构
181	20.7 等待定论
183	<b>21. 从一粒沙中看世界</b>
183	21.1 关于尺度
185	21.2 重正化
186	21.3 巡行耦合
189	21.4 不动点: 理论模型