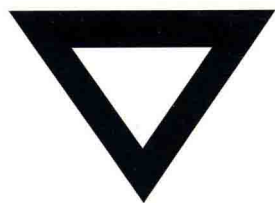


国家科技进步奖获奖丛书

物理改变世界



修订版

物质探微

从电子到夸克

From Electrons to Quarks



科学发展的历史一再证明，人类认识的每一次飞跃总是导致一种新理论的建立，这种新理论将原来认为十分不同的领域统一起来，从而可以概括更多的东西。

陆 埏 罗辽复 著



科学出版社

国家科技进步奖获奖丛书

物理改变世界



修订版

物质探微

从电子到夸克

From Electrons to Quarks

陆 埏 罗辽复 著



科学出版社

北京

图书在版编目 (CIP) 数据

物质探微：从电子到夸克 / 陆埏，罗辽复著.—北京：科学出版社，2016.4

(物理改变世界)

ISBN 978-7-03-047726-2

I. ①物… II. ①陆…②罗… III. ①粒子物理学—普及读物 IV. ①O572.2-49

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 050624 号

责任编辑：姜淑华 侯俊琳 田慧莹 / 责任校对：李 影

责任印制：徐晓晨 / 整体设计：黄华斌

联系电话：010-64035853

E-mail: houjunlin@mail.sciencep.com

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码：100717

<http://www.sciencep.com>

北京京华虎彩印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 4 月第 二 版 开本：720×1000 B5

2016 年 4 月第一次印刷 印张：12 1/2 插页：4

字数：161 000

定价：36.00 元

(如有印装质量问题，我社负责调换)

丛书修订版前言

“物理改变世界”丛书由冯端、郝柏林、于渌、陆埏、章立源等著名物理学家精心创作，2005年7月出版后受到社会各界广泛好评，并于2007年一举荣获国家科学技术进步奖，帮助我社首次获此殊荣。丛书还多次重印，在海内外产生了广泛的影响，成为双效益科普图书的典范。

物理学是最重要的基础科学，诸多物理学成就极大地丰富了人们对世界的认知，有力地推动了人类文明的进步和经济社会的发展。丛书将物理学知识与历史、艺术、思想及科学精神融会贯通，受到科技工作者和大众读者的高度评价，近年库存不足后有不少读者通过各种方式表达了对再版的期待。

在各位作者的大力支持下，本次再版对部分内容进行了更新和修订，丛书在内容和形式上都更加完善，也能更好地传承这些物理学大师博学厚德、严谨求真的精神，希望有越来越多的年轻人热爱科学，努力用科学改变世界，创造人类更加美好的未来。

同时，我们也以此纪念和告慰已经离开我们的陆埏院士。

编者

2016年3月

丛 书 序

20 世纪是科技创新的世纪。

世纪上叶，物理界出现了前所未见的观念和思潮，为现代科学的发展打下了坚实的基础。接着，一波又一波的科技突破，全面改造了经济、文化和社会，把世界推进了崭新的时代。进入 21 世纪，科技发展的势头有增无减，无穷尽的新知识正在静候着青年们去追求、发现和运用。

早在 1978 年——我国改革开放起步之际，一些老一辈的物理学家就看到“科教兴国”的必然性。他们深知科技力量的建立必须来自各方各面，不能单靠少数精英。再说，精英本身产生于高素质的温床。群众的知识面要广、教育水平高，才会不断出现拔尖的人才。科普读物的重要性不言而喻。“物理学基础知识丛书”的编辑和出版，是在这种共识下发动的。当时在一群老前辈跟前还是“小伙子”的我，虽然身在美国，但是经常回来与科学院的同事们交往、切磋，感受到老前辈们高尚的风格和无私的热情，也就斗胆参加了他们的队伍。

一瞬间，27 年就这样过去了。这 27 年来，我国出现了惊人的、可喜的变迁，用“天翻地覆”来形容，并不过甚。虽然老一辈的物理学家已经退的退了、走的走了，他们当时的共识却深入人心。科学的地位在很多领域里达到了高峰；科普的重要性更加显著。可是在新的经济形势下，愿意投入心血撰写科普读物的在职教授专家，看来反而少了。或许“物理改变世界”这套修订再版的丛书，能够为青年学子和社会人士——包括政界、工商界、文化界的决策层——

提供一些扎实而有趣的参考读物，重燃科普的当年火头。

2005年是“世界物理年”。低头想想，我们这个13亿人口的大国，为现代物理所做的贡献，实在不算很多。归根结底还是群众的科学底子太薄；而经济起飞当前，不少有识之士又过分急功近利。或许在这当儿发行一些高质量的科普读物能够加强公众对物理的认识，从而激励对基础科学的热情。

这一次在“物理改变世界”名下发行的5本书，是编辑们从22种“物理学基础知识丛书”里精选出来的，可以说是代表了“物理学基础知识丛书”作者和编委的心声。于渌、郝柏林、冯端、陆埏等都是当年常见的好朋友。见其文如见其人，我在急促期待中再次阅读了他们的大作，重温了多年来给行政工作淹没几尽的物理知识。

这一批应该只是个开端。但愿“物理改变世界”得到年轻一代的支持、推动和参与，在为国为民为专业的情怀下，书种越出越多，内容越写越好。

吴家玮

香港科技大学创校校长

2005年6月

再版前言

本书 2005 版后的 9 年中粒子物理又有了新的进展，其中包括 2012 年希格斯粒子的实验发现。2008 年和 2013 年两次诺贝尔物理奖分别授予了粒子物理的自发破缺对称性机制和基本粒子质量生成机制的发现，这也是本书必须向读者介绍的标志性事件。趁此再版机会，我们对本书做了一些增补和修改。主要的增补是：第八章“走向统一”中改写了“杨-米尔斯场”并增加了“对称性的自发破缺和质量起源”一节，同时在这章中增加了“希格斯场与上帝粒子”一节。另第四章“镜子里的世界”中增加了一节“生命的左右不对称性”。再版中我们也更新了原书中若干基本粒子（夸克、轻子、规范粒子等）的实验数据。

正当本书作者商讨并着手进行再版修改时，不幸陆埏燾病，短期内不能继续工作，故这次修改只好由我来完成了。

罗辽复

2014 年 11 月

初 版 前 言

本书原是中国物理学会和科学出版社共同主持的，由科学出版社出版的“物理学基础知识丛书”中的一本，初版于1986年，这次2005年再版作了较多修改和增补。

粒子物理是在原子核物理的基础上进一步发展起来的。20世纪三四十年代是它的初创时期，五六十年代蓬勃发展，高潮迭起。粒子物理的理论框架规范场论已经提出，宇称不守恒的发现导致弱作用物理获得突破，大量强子已经发现，粒子分类已初具规模。随后，粒子物理便趋于成熟。本书初版时，粒子物理的发展刚过高峰时期，主要的标志性事件是：

一方面，粒子物理的标准模型已经建立，特别是弱作用和电磁作用的统一已经完成，强作用的理论框架（量子色动力学）已经给出，大批量新粒子的发现浪潮也已趋平稳。在一次宴会即将结束的时候，杨振宁曾说了一句“The party is over”。一般认为这是一句双关语：既表示宴会要闭幕了，又表示粒子物理发展的高潮已过。

另一方面，要进一步发展粒子物理，必须大幅提高加速器的能量。但是，要完成这个任务，几乎已经到了一个国家经济上难以承受的地步。1987年美国总统一里根批准建造的“超导超级对撞机”，在已经花了20亿美元，挖了14英里隧道并进行了多年建造工程之后，1993年美国国会还是决定停建，就是一个标志性的事例。这也给了杨振宁的那句话一个诠释。

在这个大形势下，不少粒子物理学家纷纷改行，转到别的领域。其中不少人转到了天体物理。原因在于，虽然人工获取越来越高粒

子能量的途径（建造超高能加速器）已经难以继续，但在天体条件下却存在着不少适于超高能粒子过程出现的环境。如所周知，在粒子物理发展的初期，人工产生高能粒子的工具（加速器）还没有问世，或者虽已能建造但能量还不够高，这时主要就利用了来自宇宙空间的宇宙射线粒子作为高能粒子源。高能加速器问世后，丰富的人工制造的高能粒子源就取代了稀少的宇宙射线粒子源，为粒子物理的蓬勃发展立下了汗马功劳。但在人工无法得到更高能量粒子的时候，人们再一次向宇宙空间去索取。不过，这一次不仅仅作为粒子源去索取，由于宇宙、天体的演化本身包含有丰富的高能粒子过程，粒子物理的研究可以直接从天体物理和宇宙学的研究中获取信息。

虽然粒子物理发展的高潮已过，但许多理论、概念、发现等等还是在以后的岁月里继续得到检验、证实和完善。因此，在高潮过后的年代里，粒子物理领域依然有 16 人获得了 7 项诺贝尔物理奖，项目包括 μ 中微子的发现（1988，L.M.Lederman，M.Schwartz，J.Steinberger）、电子核子深度非弹性散射的研究（1990，J.I.Friedman，H.W.Kendall，R.E.Taylor）、多丝正比室的发明（1992，G.Charpak）、 τ 轻子和 e 中微子的发现（1995，M.L.Perl，F.Reines）、弱电作用量子结构的阐明（1999，G.t Hooft，M.J.G.Veltman）、太阳中微子和宇宙中微子的观测发现（2002，R.Davis Jr，M.Koshiba）以及强作用理论的渐近自由的发现（2004，D.J.Gross，H.D.Politzer，F.Wilczek）。不过，基本上都是奖励高潮的年代（主要是 20 世纪六七十年代）里所做的工作。当然，在高潮过后的年代里，粒子物理还是有一些重要的工作，比如，顶夸克就是在这期间被发现的。

鉴于这些情况，这次再版，我们主要作了如下一些修改：

将粒子物理的数据全部作了更新；

添加了若干重要的新进展；

添加了有关诺贝尔奖的获奖情况；

增写了关于夸克应用到天体物理中去的新的一章，特别是阐述了奇异夸克星的研究进展。

通常的粒子物理是研究单个粒子之间的相互作用规律的。当许多粒子集合在一起的时候，粒子与粒子之间的作用是否会有新的性质？如所周知，即使在原子核密度时，它所表现的仍是核子之间的作用。按照渐近自由，密度再增高几倍，核物质就会退禁闭而变成夸克物质。因此，不少实验室（比如欧洲核子研究中心（CERN））就用高能重离子加速器来研究重原子核（如铀）之间的对撞，用以造成很高的密度，试图发现夸克物质。与此同时，在天体物理领域，中子星的核心部分可以存在甚至比原子核高一个量级的密度，有存在夸克物质的可能。E.Witten（1984）甚至提出存在完全由夸克物质组成的星体，即夸克星（奇异星）。因此，重离子对撞和奇异星观测就成为两种寻找夸克物质的可行途径。这实际上已经不是单纯的粒子物理，而是涉及夸克的粒子物理、核物理和天体物理的交叉学科。增写新的一章就是想讨论这个交叉学科研究中涉及夸克的一些问题。

陆埏 罗辽复

2005年5月



目 录

丛书修订版前言 / i

丛书序 / iii

再版前言 / v

初版前言 / vii

第一章 建造物质大厦的砖石 / 1

分子·原子·粒子 / 1

人类发现的第一个基本粒子——电子 / 3

人类发现的第二个基本粒子——光子 / 6

又是波、又是粒子 / 9

放射性现象 / 11

原子模型 / 12

角动量也是量子化的 / 16

不相容原理 / 18

原子核是基本粒子吗？ / 18

建造物质大厦的砖石 / 22

第二章 粒子物理学的降生 / 25

有负质量粒子吗？ / 25

粒子世界的半边天 / 26

β 衰变的能量失窃案 / 31

中微子的归案 / 34

理论预言了 π 介子 / 37

寻找 π 介子 / 39

神秘的 μ 子 / 39

π 介子真的找到了 / 42

第二类中微子—— $\nu_\mu \neq \nu_e$ / 44

粒子物理学成为一门独立的学科 / 45

世界上总共只有四种力 / 46

粒子有四大类 / 47

粒子过程的形象化表示——费曼图 / 49

第三章 一批不速之客——奇异粒子 / 52

一批不速之客 / 52

不速之客的标记——奇异数 / 54

奇中奇——中性 K 介子 / 58

第四章 镜子里的世界 / 61

对称与守恒 / 61

镜像与宇称 / 64

弱作用中宇称守恒吗？ / 67

吴健雄的实验 / 69

空间真的左右不对称吗？ / 71

反粒子才是粒子在镜子里的像？ / 73

左旋中微子 / 75

CP 仍有点不守恒 / 76

时间反演也有点不对称 / 78

有磁荷吗？ / 79

生命的左右不对称性 / 79

第五章 短命粒子——共振子 / 81

这么短的寿命怎么测量？ / 81

最早观测到的共振子 / 82

共振子的大量涌现 / 83

共振子的电磁衰变 / 87

第六章 到粒子内部去 / 89

强子结构的最初探索 / 89

坂田模型 / 90

八重态与十重态 / 91

粒子中的“冥王星” / 92

夸克——一个奇怪的名字 / 96

强子由夸克组成 / 99

夸克有“色”又有“味” / 102

色是强作用的根源 / 103

从夸克角度看粒子过程 / 105

再做“油滴”实验 / 107

卢瑟福实验的翻版 / 108

喷注——部分子的影子 / 110

通力合作 / 112

第七章 J/Ψ 揭开了新的序幕 / 114

J/Ψ 的轰动 / 114

J/Ψ 究竟是什么粒子? / 117

两类实验 / 120

粲“原子” / 122

带粲数的强子 / 123

“美丽”和“真理” / 126

“真理”终于被发现 / 127

轻子家族也添了新成员 / 128

轻子和夸克的三个世代 / 130

第八章 走向统一 / 131

统一理论的历史回顾 / 131

- 四种作用的比较 / 132
- 杨-米尔斯场 / 133
- 对称性的自发破缺和质量起源 / 136
- 究竟有没有传递弱作用的粒子? / 140
- 弱矢量流守恒 / 141
- 奇异数守恒与奇异数不守恒弱作用的统一描述 / 143
- 中微子质量与中微子振荡 / 145
- 弱作用和电磁作用的统一 / 146
- 希格斯场与上帝粒子 / 150
- 强作用的渐近自由和夸克禁闭 / 152
- 弱、电、强三者的大统一 / 154
- 粒子世界，知也无涯 / 158

第九章 天上的夸克 / 160

- 巨大的“原子核”与巨大的“原子” / 160
- 怎样发现中子星? / 163
- 存在夸克物质组成的恒星吗? / 165
- 奇异物质的动力学性质 / 166
- 奇异星的自转可以比中子星更快 / 168
- 一个错误的“发现”促进了奇异星物理的发展 / 168
- 奇异星比中子星更密、更小? / 169
- 中子星如何向奇异星转变? / 171
- 裸奇异星 / 172
- 带壳的奇异星 / 173
- 奇异星与奇异矮星 / 174
- 奇异星的热效应 / 175
- 相变与爆发过程 / 176
- 宇宙演化中的夸克 / 178

第一章

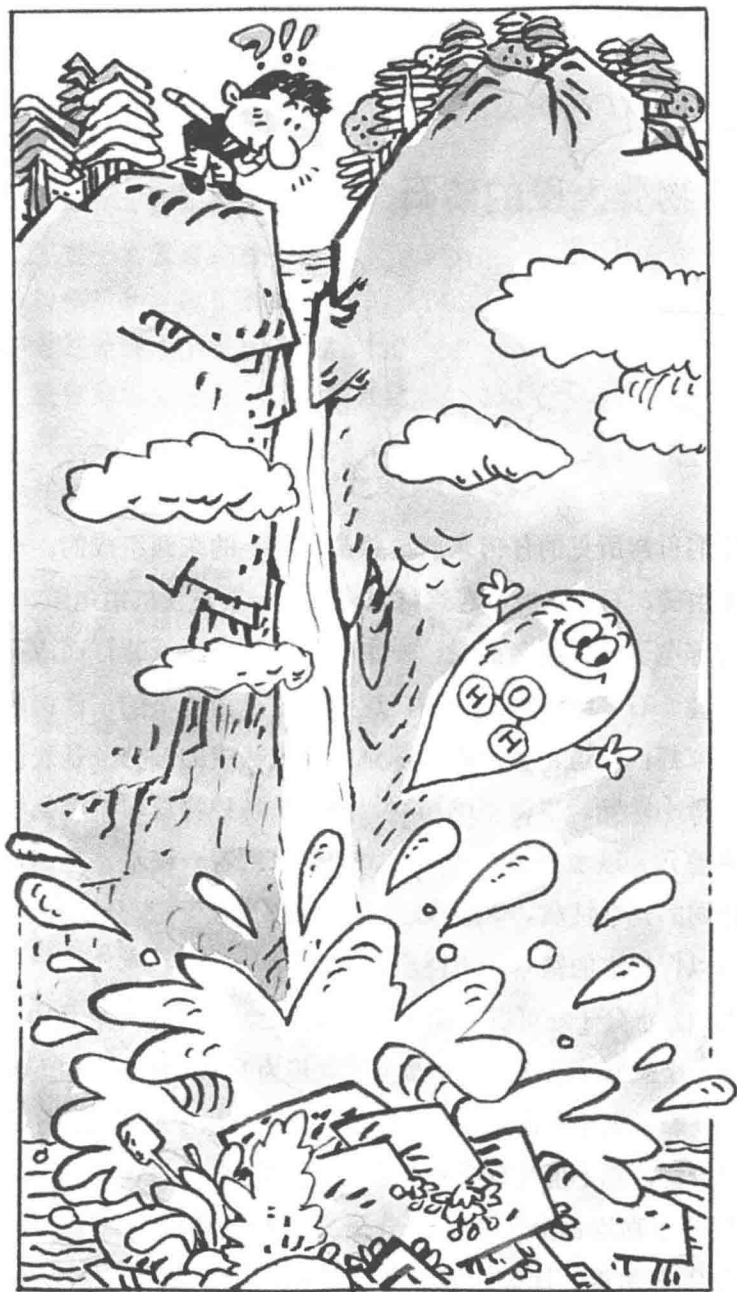
建造物质大厦的砖石

分子·原子·粒子

我们日常所见的任何东西，总是由更小的东西组成的。一幢高楼大厦由砖、石、水泥等建筑材料构成；一架电视机由电阻、电容、晶体管等电子元件组装而成；一本书由一页一页纸装订而成……。但是，砖、石、纸、电阻……，这些仍然是由更小的东西构成的。现在大家都已知道，各种物质都是由分子构成的。分子是表征物质特性的最小单元。说得更确切些，分子是各种物质保持其化学性质的基本单元。以水为例，一桶水、一杯水或者一滴水，它们都具有完全相同的化学性质。一滴水还可以继续分割，一直分割到水分子，仍然可以保持水的基本化学性质不变。

当然，水分子还可以继续分割。事实上，一个水分子是由两个氢原子和一个氧原子组成的，化学上通常记为 H_2O ，H 表示氢元素或氢原子，O 表示氧元素或氧原子。但是，无论氢原子或者氧原子或者它们的混合物，都不再具有任何水的化学性质。

世界万物均由分子构成，分子又由原子构成。每一种原子对应一种化学元素。比如，氢原子对应氢元素，氧原子对应氧元素等。现在，包括人工制造的不稳定元素在内，人们已经知道有一百多种元素了。这些元素都由相应的原子组成。原子是化学元素的最



水

小单元。这些在百余年前已为人们所知道，不过那时原子、分子在人们的脑海里还只有一个模糊的概念，更不用说原子本身又是由什么东西构成的了。

“基本粒子”，按其原意是构成世界万物的不能再分割的最小单元。这其实只是一种历史概念。随着认识的不断深化，这种概念本身也在演变。当初，“原子”这个概念，也是指构成世界万物的最终单元。但是，时至今日，已没有人再认为原子不能再分割了。

“最小单元”这个概念就不得不转移到下一个层次去。“基本粒子”一词也就应运而生。当然，本书所用“基本粒子”一词，并非说它永远不能再分割，而只是指直到现在还未被进一步分割的物质单元，尽管已有种种迹象表明它仍然有其更深的结构。为了叙述的方便，“基本粒子”更常被简称为“粒子”。

人类发现的第一个基本粒子——电子

19 世纪末（1897 年），汤姆逊（J.J.Thomson）发现了电子，这是人类认识的第一个基本粒子，他因此而获得 1906 年度的诺贝尔物理奖。图 1.1 所示是汤姆逊在实验室工作（也见文前彩图）。

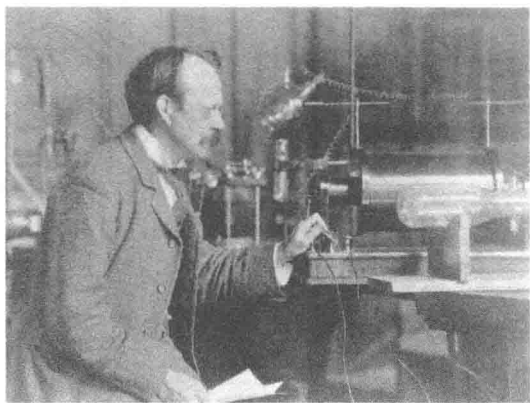


图 1.1 汤姆逊在实验室工作

（取自 Curt Suplee, 《Physics in the 20th Century》一书，1999）