

原书序言

我们有足够的理由赞美物理学在 20 世纪所得的成就。1900 年到来之际，由 Newton、Maxwell、Helmholtz、Lorentz 以及许多其他人的思想奠基的辉煌的经典物理学大厦似乎已近乎完美；然而经典物理学的这一高度发展状态显现出了某些结构上的瑕疵，结果证明这些瑕疵远非看起来那样肤浅。在世纪转折前后几年的实验和理论发现直接导致了改变物理学家基本观念的革命：原子结构、量子理论和相对论。但是必须强调，此前的经典成就并未被抛弃，它们最终被视为更为一般的概念的特殊情况，因此现代物理学家仍然必须对经典动力学和电磁学保有正确的理解。除去最为先进的高技术之外，把相对论和量子力学掺和到大多数技术应用中毫无必要；除去极少数例外情况，经典物理对日常发生的事件和使用的装置都能做出有效的描述。

尽管如此，朝本质上属于 20 世纪创造的近代物理学的转换极大地扩展了物理科学的范畴。在近代物理学的框架内，不仅原子及原子核的结构乃至原子核的组成部分的结构，而且处于大小尺度的另一端的整个宇宙，均已变得可以观察、讨论并使研究者能做出有根据的想象。量子力学阐明了原子的结构并且在它被建立之后的一两年内即表明，至少在原则上它可以解释化学键的来源。

20 世纪 50 年代，用晶体学方法对几个最简单的蛋白质和 DNA 双螺旋结构的阐明改变了对生物学机理的研究。这当然完全不是说化学和生物学是物理学的分支学科，化学家和生物学家在处理他们那些极为复杂的材料方面有自己独特的方法。物理学家单独处理这些问题时，完全没法与化学家和生物学家相匹敌。但物理学家只要确信其他学科只是运用物理学思想阐明自己的发现，而不是注入迄今未知的自然规律从而毁掉自己领域的研究，他们仍然可以在这个方向上继续自己的探索。

从一开始我们就意识到，我们编辑的这几卷书只是撰写这部历史的第一步。在当前阶段这部历史的撰写不能仅仅留给专业的科学史专家，我们期望的是本书可以激励他们在以后承担这个任务。书写这部历史的第一步，是由物理学家们指出哪些是他们自认为的本领域中最重要的发展，并且尽可能地剥离掉那些不仅在外行人看来而且即使从事物理学研究的同行们看来也非常困难的复杂问题，使得大家都明白物理学是如何发展的。我们希望给学习物理学的学生们（也包括教师们和其他领域的专业人士）讲述一个展现这部历史中某些事件的故事，这个故事将使他们受到鼓舞而不是使他们感到无所适从。即使我们最后离达到这个目标仍有一些距离，我们至少给严肃的科学史专家们提供了一个研究这段近代史的起始点。事实上，对近代

物理学某些领域的历史已有相当深入研究,但这三卷书将清楚地表明,对近代物理学历史的研究还仅仅是开始.我们这样说,绝无低估已有成就之意.

20世纪初还有一些顶尖的物理学家能保持与各个活跃的物理学研究方向接触,现在已没有人能做到这一点了.这不仅仅是因为现在已完成的研究工作比过去多得多,而且因为在不同领域工作的研究者们,除了他们学生时期所学的东西之外,已很少有共同的东西了.基本粒子物理理论和技术近来已很少有能向固体物理转换的内容,而由超导研究的进展曾激发起来对基本粒子物理的重大贡献,也已经过去好几十年.除去要求各位专家们撰写他们所从事领域的内容并希望他们能指出与其他领域的联系之外,我们别无选择.书中以页边旁注方式给出的交叉引用汇集了一些领域间的联系,它们有助于表明某些领域发展的具体思想所涉及的其他领域.

无论如何,这套书仍不可避免地会存在遗漏,我们谨向那些发现他们喜好的观点或他们自己的重要贡献被忽略了的读者致歉.尤其遗憾的是,我们找不到一个作者来讲述电子线路系统如何由无线电通信开始,通过雷达和电子计算机,直到其技术威力支配了实验设计、数学分析及计算的发展史.今天去参观任何一个物理实验室都会使人惊叹,如果没有发明晶体管,还有哪些研究可能进行或值得开展?这仅是技术发展与物理学研究密不可分的一个事例,但也许是最惊人的事例,这段历史完全值得与物理思想发展的历史并行研究.

我们也意识到,我们对物理学的社会作用没有给予足够的注意.例如,物理学发展在战争中的应用以及由军事项目积累起来的对物理学发展的利益(抑或可能的危害)等许多问题需要认真研究.我们还忽略了科学资助政策(特别是“大科学”的资助政策)、研究者之间、实验室之间和国与国之间的科学成果的交流以及其他一些主题.对于科学哲学与物理学的关系我们仅给予了极少注意,其实二者关系极大.我们并非认为这些问题不重要,与此相反,阐述这些论题需要远比这几卷书大得多的篇幅,我们希望这些论题以更为完整的方式得以处理.也许我们的工作可以为这种努力提供有用的背景.

我们在这几卷书里所采取的低调描述,可能会引起一些普通读者以及活跃的物理学家们的惊奇:因为前者已经习惯了新闻记者式的夸张,后者则对诸多研究论文和快讯中常见的对自己结果首创性吹嘘的现象感到无奈.如果任何人有资格使用那种高调语气,一定是那些为自己所撰写的工作付出一生并亲自做出杰出贡献的人.他们是真正懂得何谓杰出的.正如那些与 Einstein 或 Heisenberg 或 Feynman(以及其他物理学的英杰)交谈过的人绝不会不分青红皂白地滥施夸奖一样,我们的科学英杰们都不会做出夸大的宣称.当他们最终突然认识到真理时也许会感到激动不已,一些人在向他人解释自己的发现时甚至会略显炫耀,但他们都知道所有这些早已在那里等待着被发现.他们通常并不是从无到有的革命性的创造者,而是像他们的先辈一样,先在一件纺织品上发现瑕疵,然后找到如何去修补这些瑕疵的方法,

并为这件纺织品重新展现的美丽所陶醉。

谈到整套书的安排组织, 指出以下几点或许是有益的. 第 1 卷主要涵盖了 20 世纪前半期的材料, 该卷的各章大部分由物理学兼物理学史专家撰写, 也就是说, 这些作者以前曾撰写过有关物理学及其历史的著作. 第 2 卷和第 3 卷则含有更强的专业味道, 主要处理 20 世纪后半期的较重要主题. 20 世纪的一些伟大物理学家的照片和传略散见于全书的各章中. 这些物理学家并不是按代表排名前 50 之类的标准去刻意选择的, 而是要求每位作者在自己所撰写的领域内挑选几个做出最突出成就的学者的结果. 通过这种方法, 我们向读者奉献了一个具有多样性的现代物理缔造者们的样本. 近代物理学的历史告诉我们, 这些学者以及难以数计的其他一些人, 尽管并非个个聪明绝顶, 但却都具有天才并献身于他们所从事的、他们认为无比重要的事业. 这是一个值得大书特书的故事, 如果这一套书的讲解能鼓励他人更好地来讲这个故事, 我们的目的就算达到了.

Laurie M Brown

Abraham Pais

Brian Pippard 爵士

全书所含传略目录

Anderson C D	美国人	1905~1991	第 5 章
Bardeen J	美国人	1908~1991	第 11 章
Blackett P M S	英国人	1897~1974	第 5 章
Bloembergen N	荷兰人	1920 年出生	第 18 章
Bogoliubov N N	俄国人	1909 ^① ~1992	第 8 章
Bohr N	丹麦人	1885~1962	第 2 章
Boltzmann L E	奥地利人	1844~1906	第 1 章
Born M	德国人	1892~1970	第 12 章
Bragg W L 爵士	英国人	1890~1971	第 6 章
Brockhouse B N	加拿大人	1918 年出生	第 12 章
Chapman S	英国人	1888~1970	第 26 章
Cottrell A H	英国人	1919~2012	第 19 章
Debye P	荷兰人	1884~1966	第 12 章
Eddington A S	英国人	1882~1944	第 23 章
Einstein A	德国/瑞士/美国人	1879~1955	第 4 章
Fermi E	意大利人	1901~1954	第 15 章
Feynman R P	美国人	1918~1988	第 9 章
Flory P	美国人	1910~1985	第 21 章
Frank C 爵士	英国人	1911~1999	第 21 章
Gabor D	匈牙利人	1900~1979	第 20 章
Gibbs J W	美国人	1839~1903	第 7 章
Glazebrook R T	英国人	1854~1935	第 16 章
Gray L H	英国人	1905~1965	第 25 章
Heisenberg W K	德国人	1901~1976	第 5 章
Herzberg G	德国人	1904~1999	第 13 章
Heycock C T	英国人	1858~1931	第 19 章
Hubble E T	美国人	1889~1953	第 23 章
Kamerlingh Onnes H	荷兰人	1853~1926	第 11 章
久保亮五 (Kubo R)	日本人	1920~1995	第 8 章
Landau L D	俄国人	1908~1968	第 22 章
Lawrence E O	美国人	1901~1958	第 15 章
Lorentz H A	荷兰人	1853~1928	第 1 章
Maiman T H	美国人	1927~2007	第 18 章
Massey H 爵士	澳大利亚人	1908~1983	第 13 章
Mayneord W V	英国人	1902~1988	第 25 章
Meggers W F	美国人	1888~1966	第 13 章

① 原文传主出生年有误。——译者注

Michelson A A	美国人	1852~1931	第 1 章
Minkowski H	德国人	1864~1909	第 4 章
Mott N F	英国人	1905~1996	第 17 章
Nernst W H	德国人	1864~1940	第 7 章
Neville F H	英国人	1847~1915	第 19 章
Onsager L	挪威人	1903~1976	第 7 章
Planck M	德国人	1858~1947	第 3 章
Prandtl L	德国人	1875~1953	第 10 章
Prigogine I	俄国人	1917~2003	第 8 章
Rosenbluth M N	美国人	1927~2003	第 22 章
Rutherford E	新西兰人	1871~1937	第 1 章
Schawlow A L	美国人	1921~1999	第 18 章
Schrödinger E	奥地利人	1887~1961	第 3 章
Seitz F	美国人	1911~2008	第 19 章
Shockley W B	美国人	1910~1990	第 17 章
Stratton S W	美国人	1861~1936	第 16 章
Strutt J W	英国人	1842~1919	第 1 章
(Rayleigh 男爵三世)			
Taylor G I	英国人	1886~1975	第 10 章
Townes C H	美国人	1915 年出生	第 18 章
Uhlenbeck G E	荷兰人	1900~1988	第 8 章
Van Vleck J H	美国人	1899~1980	第 14 章
von Laue M	德国人	1879~1960	第 6 章
Wegener A L	德国人	1880~1930	第 26 章
Weiss P E	法国人	1865~1940	第 14 章
Wilson K G	美国人	1936 年出生	第 7 章
Wilson R R	美国人	1914~2000	第 9 章
汤川秀树 (Yukawa H)	日本人	1907~1981	第 5 章

目 录

编辑及撰稿人名单
译校者名单
原书序言
全书所含传略目录

第 2 卷

第 9 章 20 世纪后半叶的基本粒子物理学	1
9.1 引言	1
9.2 序幕 (1940 年前)	3
9.3 量子电动力学	5
9.3.1 理论中的无穷大量	5
9.3.2 早期的实验发展	6
9.3.3 重整化登场	10
9.3.4 高阶修正和实验验证	11
9.4 迄至 20 世纪 60 年代中期所知的物质新形式	14
9.4.1 20 世纪 30 与 40 年代: μ 子、 π 介子、K 介子	14
9.4.2 π 介子的性质	17
9.4.3 反质子	18
9.4.4 奇异粒子	18
9.4.5 共振态	21
9.4.6 么正对称性	23
9.5 迄至 20 世纪 60 年代中期所知的相互作用	25
9.5.1 弱相互作用和 V-A 理论	25
9.5.2 CP 破坏	32
9.5.3 流代数	35
9.5.4 强相互作用方案	39
9.6 夸克革命	43
9.6.1 夸克模型	43
9.6.2 深度非弹性散射	46
9.6.3 电子-正电子湮没	48

9.6.4	寻找自由夸克	50
9.7	弱电统一	50
9.7.1	轻子理论	50
9.7.2	中性流的实验证实	54
9.7.3	扩展到强子和粲夸克假设	56
9.7.4	粲夸克的实验证实	57
9.7.5	W 和 Z	62
9.8	量子色动力学	66
9.8.1	色三重性的早期建议	66
9.8.2	一个强相互作用规范理论的要求	67
9.8.3	渐近自由和红外奴役	68
9.8.4	深度非弹性散射中的标度破坏	69
9.8.5	喷注和其他一些大横动量 (p^\perp) 现象	70
9.8.6	其他应用	71
9.9	三代夸克和轻子	73
9.9.1	τ 轻子	73
9.9.2	第五种夸克	74
9.9.3	Cabibbo-小林-益川 (CKM) 矩阵	77
9.9.4	寻找顶夸克; 观测	79
9.10	加速器	80
9.10.1	静电起电器	80
9.10.2	回旋加速器	82
9.10.3	相位稳定性和同步回旋加速器	83
9.10.4	电子同步加速器	84
9.10.5	电子感应加速器	84
9.10.6	质子同步加速器	84
9.10.7	强聚焦	85
9.10.8	直线加速器	87
9.10.9	对撞束	89
9.10.10	强子对撞机	93
9.11	探测器: 从 Rutherford 到 Charpak	94
9.11.1	电离探测器	95
9.11.2	闪烁计数器和 Cherenkov 计数器	98
9.11.3	可视技术	100
9.12	与其他学科的交叉	103

9.12.1	核物理	103
9.12.2	原子物理学	104
9.12.3	凝聚态物质	104
9.12.4	天文学、天体物理学、引力和宇宙学	105
9.13	尚未解决的问题和对未来的希望	109
9.13.1	弱电理论: 对称性破缺部分	109
9.13.2	中微子质量	110
9.13.3	大统一理论	111
9.13.4	弦理论	113
9.13.5	未来的设备	114
9.14	结语	115
9.14.1	附加文献	116
	参考文献	117
第 10 章	流体力学	149
10.1	20 世纪物理学的又一伟大成就	149
10.1.1	流体力学上并行的革命	149
10.1.2	奇异摄动的一个极简单的例子	152
10.1.3	d'Alembert 悖论如何变为 d'Alembert 定理	155
10.1.4	激波的物理本质	158
10.2	边界层和尾流, 不稳定性和湍流, 传热和传质	162
10.2.1	最活跃的无量纲参数	162
10.2.2	涡度的新作用	165
10.2.3	转捩的类型, 湍流的类型: (1)1940 年前的奋斗	171
10.2.4	转捩的类型, 湍流的类型: (2) 新的分类学	177
10.2.5	标量的扩散-对流平衡	184
10.3	波产生和传播的非线性效应	188
10.3.1	隐含能量损失的波	188
10.3.2	来自流动的声音	191
10.3.3	色散和非线性的竞争	195
10.3.4	海洋的表面	198
10.3.5	能量沿波峰传播	201
10.4	航空和海洋工程对人类生活环境的改变	205
10.4.1	研究提高飞行效率的流体力学	205
10.4.2	航空激波	209
10.4.3	快速船只和安全的海洋平台	215

10.5 地球流体包层的动力学及其在预报方面的应用	220
10.5.1 波状流动模式	220
10.5.2 天气和气候	229
参考文献	237
第 11 章 超流体和超导体	243
11.1 引言	243
11.1.1 液氦: 早期	243
11.1.2 1933 年以前的超导电性	244
11.1.3 1945 年以前 Meissner 效应及超导性研究的其他实验进展	246
11.1.4 液氦: 实验革命	249
11.1.5 理论发展, 1933~1945 年	250
11.2 1945~1970 年时期	255
11.2.1 液氦	255
11.2.2 超导电性-实验和唯象学, 1945~1956 年	257
11.2.3 BCS 之前的微观理论	259
11.2.4 BCS 及其后的进展	261
11.2.5 Josephson 效应	263
11.2.6 超导性与超流性的现代统一图像	264
11.3 新发展	269
11.3.1 ^3He 的超流相	269
11.3.2 各种各样的新进展	273
11.3.3 高温超导性	275
11.3.4 进一步的阅读	280
参考文献	281
第 12 章 晶体中的振动与自旋波	282
12.1 晶格动力学的开端	282
12.1.1 比热	282
12.1.2 零点运动	286
12.1.3 热膨胀	288
12.1.4 热导率	289
12.1.5 比热的晶格理论	293
12.2 新的实验技术	299
12.2.1 中子散射	299
12.2.2 Raman 散射	302
12.3 晶格动力学的发展	303

12.3.1	离子晶体	303
12.3.2	金属	304
12.3.3	半导体	307
12.3.4	非谐效应	307
12.3.5	玻璃和含缺陷晶体中的声子	309
12.4	结构相变	310
12.5	自旋波	313
12.6	磁性相变	316
	参考文献	318
第 13 章	原子分子物理	324
13.1	引言	324
13.2	20 世纪中期的原子分子物理学	326
13.2.1	原子尺度和结构	326
13.2.2	辐射	328
13.2.3	原子光谱	330
13.2.4	碰撞	335
13.2.5	分子键和行为	338
13.3	辐射作用光谱学的完成	344
13.3.1	从紫外到 X 射线 —— 同步辐射光	344
13.3.2	从近红外到微波区域	348
13.3.3	辐射作用谱	350
13.3.4	电离阈值处谱的连接 —— 求和规则	351
13.4	激发通道和共振效应	352
13.4.1	典型现象	353
13.4.2	量子力学参数	355
13.4.3	多通道的表述 —— 共振	359
13.5	原子间或离子间的碰撞	364
13.5.1	比原子的电子快的入射粒子	365
13.5.2	比原子的电子慢的入射粒子	365
13.5.3	与电子速度可比的碰撞速度	368
13.5.4	高剥离离子	369
13.6	分子物理学	369
13.6.1	实验的新途径	369
13.6.2	分子光谱学	372
13.6.3	量子化学, 理论和计算	374

13.6.4	反应碰撞	374
13.7	内壳层现象	375
13.7.1	X 射线研究	376
13.7.2	Auger 发射	376
13.7.3	屏蔽与反屏蔽	377
13.8	原子和分子的谱指纹	378
13.9	原子在计量学和仪器中扮演的角色	379
13.10	原子系统的光学操纵和利用原子变换光	382
13.10.1	光泵浦	382
13.10.2	原子的冷却、操控和囚禁	383
13.10.3	多光子过程	383
13.10.4	利用原子转换光	384
13.11	当前情况概述	385
13.11.1	一个全面的现象学	385
13.11.2	超球面方法中的复合体演化的动力学	386
	参考文献	389
第 14 章	磁学	393
14.1	引言	393
14.1.1	20 世纪之前的磁学	393
14.2	1900~1925 年期间	395
14.2.1	抗磁性	395
14.2.2	量子概念	396
14.2.3	顺磁性绝缘体	396
14.2.4	铁磁性	399
14.3	1925~1950 年时期	401
14.3.1	离子的量子理论	401
14.4	顺磁性	403
14.4.1	绝热退磁	403
14.4.2	晶体场理论	403
14.4.3	反铁磁性	406
14.4.4	弛豫	407
14.5	导体	408
14.5.1	正常金属	408
14.5.2	铁磁性	409
14.6	1950 年以后	411

14.7 电子顺磁共振	411
14.7.1 铁族离子	411
14.7.2 3d 离子: 自旋 Hamilton 量和顺磁共振	413
14.7.3 4f 离子: 稀土族	414
14.7.4 交换相互作用	415
14.7.5 关于晶体场理论的问题	416
14.7.6 弛豫过程	417
14.7.7 声学顺磁共振	417
14.7.8 磁性绝缘体中的合作现象 —— 反铁磁性	418
14.7.9 Heisenberg-Dirac 模型和自旋波	419
14.8 铁磁性和亚铁磁性	422
14.8.1 铁磁共振	422
14.8.2 磁畴	423
14.8.3 亚铁磁性和铁磁性	424
14.8.4 晶体结构	424
14.8.5 磁记录	426
14.8.6 泡状磁畴	427
14.8.7 稀土金属及其合金	429
14.9 变化着的格局	431
14.9.1 近藤 (Kondo) 效应	433
14.9.2 中间价态和重 Fermi 子	433
14.9.3 非晶态磁性和薄膜	434
14.10 核磁性	435
14.10.1 核磁共振 (NMR)	435
14.10.2 核退磁	438
14.11 结论	438
参考文献	440
第 15 章 原子核动力学	446
15.1 背景	446
15.1.1 核质量与液滴模型	448
15.2 作为多体问题的核动力学	452
15.3 第二次世界大战的影响	456
15.4 技术进步	459

15.4.1	1930 年的技术	459
15.4.2	加速器	461
15.4.3	中子源	464
15.4.4	测量装置和探测器	465
15.5	原子核的壳层结构	466
15.6	原子核中的集体运动	470
15.6.1	巨共振	470
15.6.2	低能集体模式	471
15.6.3	相互作用玻色子模型	474
15.7	核散射与核反应	474
15.7.1	复合核	474
15.7.2	直接反应理论	475
15.7.3	电子散射	476
15.8	新同位素和新元素	477
15.8.1	超铀元素	477
15.9	元素的产生	480
	参考文献	482
第 16 章	单位、标准和常量	489
16.1	引言	489
16.2	单位和标准	491
16.2.1	质量	491
16.2.2	长度	493
16.2.3	时间和频率	496
16.2.4	温度	501
16.2.5	光度学	503
16.2.6	电学单位和标准	503
16.3	物理常量	510
16.3.1	常量的类型	510
16.3.2	光速	512
16.3.3	引力常量	514
16.3.4	常量的链接集合	516
16.3.5	链接测定的若干例子	517
16.4	应用	520
	参考文献	521
	本卷图片来源确认与致谢	528

第 1 卷

- 第 1 章 1900 年的物理学
- 第 2 章 引进原子和原子核
- 第 3 章 量子和量子力学
- 第 4 章 相对论的历史
- 第 5 章 核力、介子和同位旋对称性
- 第 6 章 固体结构分析
- 第 7 章 热力学与平衡统计力学
- 第 8 章 非平衡统计力学: 变幻莫测的时间演化

第 3 卷

- 第 17 章 固体中的电子
- 第 18 章 20 世纪的光学及光电子学物理
- 第 19 章 材料物理学
- 第 20 章 电子束仪器
- 第 21 章 软物质: 概念的诞生与成长
- 第 22 章 20 世纪的等离子体物理学
- 第 23 章 天体物理学与宇宙学
- 第 24 章 计算机产生的物理学
- 第 25 章 医学物理学
- 第 26 章 地球物理学
- 第 27 章 对 20 世纪物理学的省思: 散文三篇

第 9 章 20 世纪后半叶的基本粒子物理学

Val L Fitch
Jonathan L Rosner

9.1 引 言

过去 50 年的基本粒子物理学见证了数据量的大爆炸和紧随其后在分类和坚实的理论基础上带来的简化. 试图从更统一的观点描写基本相互作用的努力, 在一个以自作用量子场为基础的弱相互作用和电磁相互作用组合理论以及一个有相似基础的强相互作用理论中, 已经取得了丰硕成果.

理解元素周期表的过程和粒子物理的故事有着某些相似性. 先是数据的最初系统化, 紧接着是坚实的理论努力, 这种努力终于使得量子力学得以创建. 种类繁多的原子及其同位素都可以借助于基本的质子、中子、电子通过 (有清楚了解的) 电磁力及 (尚未充分了解的) 强力的相互作用的来理解.

在 20 世纪 60 年代, 对强相互作用粒子的一个基于 $SU(3)$ 群的分类方案, 使人们能够开始理解迅速增长的强子谱. 到最后, 对 $SU(3)$ 以及相关对称性成功的追根溯源而发现了几个基本组分 —— 夸克的存在. 现在, 我们面临着夸克和轻子 (电子、 μ 子、 τ 子以及各自的中微子) 的激增, 对此仍缺少更深刻的解释. 这些粒子列于表 9.1 中.

表 9.1 到 1994 年为止的夸克和轻子

轻子			夸克		
符号	名称	电荷	符号	名称	电荷
ν_e	电子中微子	0	u	上	2/3
e^-	电子	-1	d	下	-1/3
ν_μ	μ 子中微子	0	c	粲	2/3
μ^-	μ 子	-1	s	奇异	-1/3
ν_τ	τ 子中微子 ^①	0	t	顶	2/3
τ^-	τ 子	-1	b	底	-1/3

① 尚未直接观测到

随着越来越多的物质基本组元被发现, 描述基本作用力的方法也取得了进展. 力的统一有着悠久的历史传统, 它始于 Newton 对地球引力和天体引力的综合以及

Maxwell 对电和磁的综合. 在 20 世纪中, 它包括了对弱相互作用及其破坏镜像对称的详尽理解, 以 Glashow, Weinberg 和 Salam 的弱相互作用与电磁相互作用的统一理论及其所预言的弱力传递者 W 粒子和 Z 粒子的发现, 达到了高峰. 仍需在最深层次上理解的是 1964 年发现的电荷反转与镜反射联合对称性的破坏.

弱电理论的成功特别令人鼓舞, 因为它置身于量子场论, 而先前人们认为, 只有在描写电磁过程时量子场论才是有用的. 同样依赖于量子场论的一个并行的进展, 是强相互作用理论的创立, 它现在被称为量子色动力学(QCD). 这个理论描写夸克为什么与轻子不同 (夸克带有一种新的荷, 称为颜色, 而轻子是无色的), 并定量地预言了夸克之间通过交换称为胶子的量子而发生的相互作用. 通过这种相互作用强度对距离的依赖, 阐明了为什么谈论夸克完全是有意义的, 尽管它们似乎永远相互束缚在一起.

表 9.2 列出了强力和弱电力的传递者. 粒子物理的这幅图像, 由通过交换光子、胶子、W Bose 子和 Z Bose 子而相互作用的夸克和轻子组成, 被称为“标准模型”.

表 9.2 强力和电弱力的传递者

符号	名称	传递的力	质量 (GeV/c^2)
γ	光子	电磁	0
g	胶子	强	0
W^\pm	W Bose 子	弱 (带电)	80.3 ± 0.2
Z^0	Z Bose 子	弱 (中性)	90.189 ± 0.004

一个专题讨论会专门研讨过标准模型的涌现^[1], 而且有一部内容广泛的书^[2]论述了我们所关心的整个那段时期. 在 20 世纪 30 年代至 50 年代^[3]和 1947~1964 年期间^[4], 粒子物理那些特色鲜明的篇章, 也是许多卓越的历史评述的主题. 在本章中, 我们所涉及的是这一硕果累累的领域在过去的 50 年中所取得进步的一些最值得回忆的部分. 我们的希望是, 回味一下它已经走了多远和我们可能预期它将来会把我们带到何处.

我们不希望给人这样一种印象, 即基本粒子物理学中的进步是比其他领域的进步更为有条不紊的过程. 由于篇幅的缘故, 我们的论述略去了许多无结果的努力和错误的实验. 我们选择了讲述一些具有持久价值的发现和观点. 同时, 我们不可能断言我们的处理包罗万象. 对于包括进来的题目做一些挑选是必要的, 对此, 我们负有全部责任.

在 9.2 节, 我们以 20 世纪早期的粒子物理的几个关键要点作为开端, 为我们后来的讨论搭建平台. 关于这个时期, 文献 [5] 中有更广泛的介绍, 其引文可供参阅. 随后, 在 9.3 节我们阐述在量子电动力学 (QED) 方面取得的进展, 直到弱电统一和 QCD 的建立为止, 量子电动力学是我们唯一的一个与量子场论密切相关的成功的

例子. 除了处理 QED 之外, 在进一步的阐述之前, 我们把自己的讨论暂停在 20 世纪 60 年代中期, 转而来介绍物质 (9.4 节) 和力 (9.5 节) 的特性.

用夸克 (9.6 节) 的想法来描写强相互作用粒子, 或强子, 标志着 20 世纪后半叶粒子物理的转折点. 认真地接受夸克, 便为弱电统一 (9.7 节) 从原始的轻子范围扩展到整个基本粒子铺平了道路. 再者, QCD(9.8 节) 发展的途径现在已经确立. 新形式的物质, 以夸克和轻子第三代 (9.9 节) 的形式, 可以没有什么太大的困难而容纳于新的框架之中.

过去 50 年粒子物理的几乎所有结果, 都决定性地依赖于加速器 (9.10 节) 和探测器 (9.11 节) 的持续不断的进步. 基本粒子物理学极大地得益于它同其他领域的交叉 (9.12 节). 我们在 9.13 节提到一些疑难和希望, 并在 9.14 节给出我们的结论.

9.2 序幕 (1940 年前)

第一个被确定为“基本粒子”的是电子, 它的荷质比首先由 J J Thomson 在 1897 年测定. 电荷本身的分立性由 Millikan 在早些时候证明.

Rutherford 在 20 世纪早期所做的实验表明, α 粒子会以比人们所预期的大得多的角度从物质散射. 当时, 一种流行的原子模型设想物质均匀地分布于原子之中, 而 Rutherford 散射实验则指出, 绝大部分物质高度密集在比原子线性尺寸的万分之一 (10^{-4}) 还要小得多的范围内. Niels Bohr, 1911~1912 年期间曼彻斯特 Rutherford 实验室的一位年轻的访问学者, 受 Rutherford 实验的启发, 试图构建一个基于一些带负电荷的电子绕一个带正电的原子核旋转的原子模型. 为了防止电子的轨道因发出辐射而导致半径不断减小, 他不得不引入新的物理, 它成为量子力学的先兆. 开始, 他的动机并非来自氢原子发射光谱的实验数据, 但当他得知 Balmer 线状光谱以后, 整个问题对他来讲变得豁然开朗, 一月之内便给出了他的解决方案.

Bohr 的原子用到了与先前已知的一些观念的类比, 例如轨道. 对于以前理论的突破发生于 20 世纪 20 年代中期, 当时由 Heisenberg、Schrödinger、Born 以及其他的一些人使量子力学飞速地发展起来. 量子力学的一个关键之点是由 Planck 常数 h 所设立的标度, 它具有 (能量) \times (时间) 或 (动量) \times (长度) 的量纲; 而另一点是由 de Broglie 确立的粒子和波之间的关系: (波长) = $h/(\text{动量})$, 它由 Davisson 和 Germer 利用电子从实验上证实. 类似地, 尽管从 Maxwell 时代开始人们就已经习惯于以波的观点看待电磁辐射, 1905 年 Einstein 对光电效应的解释表明, 光也可被认为由具有 (能量) = h (频率) 的量子亦即不连续单元组成. 这个观点由 Compton 效应的发现所证实, 这是一种电磁量子 (光子) 在电子上的散射伴随波长改变的效应.

20 世纪 20 年代中期发展起来的量子力学的形式, 仅适用于速度比光速小的粒子. 为寻找一个不受这个限制的粒子的运动方程, Dirac 引进了新的自由度. 他的方程适用于一个总共具有四个分量的量. 它的一个二重性 (twofold multiplicity) 可以用来描写像电子那样具有两个可能自旋方向的粒子, 而另一个二重性是狄拉克方程在狭义相对论变换下不变性的必然结果. Dirac 把这个附加的二重性解释为暗指反粒子的存在, 它具有与粒子相反的电荷和相同的质量. 所以, 应该存在一个电子的带正电的变种. 这个粒子, 即**正电子**, 由 Anderson 于 1932 年在宇宙射线中发现了.

对各种原子核的电荷及质量之间的比较, 以及它们自旋的详细研究, 清楚地表明不能只用质子构建原子核, 用质子和电子也不行. 还需要一种新的组元, 其质量与质子相似但是电中性的. 这个粒子, 即**中子**, 由 Chadwick 在 1932 年发现. 它的存在使原子核的图像变得一目了然. 电荷数 (Z) 即质子数, 而质量数 (A) 等于质子和中子的总数. 原子核的质量比各个质子和中子 (**核子**) 质量的总和略小, 这是由于结合能的效应.

来自外空间的辐射在 20 世纪早期就已经由 V Hess 和其他一些人所发现. 到 20 世纪 30 年代中期, 宇宙射线成为了一些实验感兴趣的课题, 人们认识到, 它提供了有用的高度加速的粒子源, 就像放射性衰变的那些产物一样. 然而, 不久许多用于人工加速粒子而发明的装置加入到这些粒子源中来, 这些被加速的粒子借助于电场和/或磁场聚焦. 这些装置包括高压倍加器 (Cockcroft-Walton 起电机)、van de Graaff 起电机以及回旋加速器. 回旋加速器由 Ernest O Lawrence 首创, 并广泛用于粒子物理研究, 直到 20 世纪 50 年代中期为止. 当时, 有各种形式的同步加速器投入了使用.

诸如电子的场能 (自作用能) 等量为无限大量的预言, 意味着直到 20 世纪 30 年代一个自洽的辐射与物质相互作用的量子力学描述尚未建立起来. 尽管在这一时期, 可以采用对相互作用强度最低阶适用的近似去计算许多过程, 但仍然缺乏对所有阶都适用的一种自洽的描述.

β 衰变所释放的电子或正电子能谱的连续特性, 以及初态与末态粒子之间的平衡, 暗示着一种看不见的粒子带走了衰变中的部分动量和角动量. 这个被称为**中微子**的粒子, 总是与 β 衰变中的电子相伴随而产生. 基本过程为 $n \rightarrow p e^- \bar{\nu}_e$, 其中 n 为电子, p 为质子, e^- 为电子, $\bar{\nu}_e$ 为反中微子. 在一个具有大量多余质子的重核中, 过程 $p \rightarrow n e^+ \nu_e$ 也可能发生, 尽管对于自由质子和中子, 这个过程被能量守恒所禁戒. 这两个过程都能用 Fermi 所建议的一种相互作用来描写, 它近似正确但并非完全正确. 它没有对 20 世纪 50 年代发现的 β 衰变相互作用中镜像对称的破坏 (**宇称破坏**) 做出任何预先的准备. Fermi 理论对于电子-中微子对产生的描述是量子场论的最早应用之一, 量子场论提供了粒子的产生和湮灭.

核力具有极短的力程导致汤川 (Yukawa) 假设存在一种新的粒子, 即介子, 它的交换产生短程相互作用. 1937 年, 在宇宙线中观测到了一种新类型的粒子. 它带电, 并且质量与汤川的预言很接近, 一开始人们把这个粒子 (μ 子) 看成是汤川的介子. 然而, 如果 μ 子真的是强核力的传递者, 它应该与物质发生很强的相互作用. 这种现象一直没有见到, 导致人们逐渐认识到 μ 子不是汤川的介子. 正如我们将在 9.4 节看到的, 汤川预言的粒子那时还有待发现.

到 1940 年为止, 基本粒子物理的图像相当简单和自洽. 原子是由一些质子和中子构成的原子核通过电磁力与电子束缚在一起组成的. 中微子是 β 衰变发射出的假想粒子. “自然界的四种力” 已经各就各位: 强力 (使原子核结合在一起)、电磁力、弱力 (与 β 衰变有关) 和引力. 元素周期表中直到铀为止的元素, 差不多都被观测到了, 而且比铀重的元素也开始被发现. 几乎没有什么迹象暗示粒子的丰富多样或者对作用力理解的不断进步会成为下一个 50 年的特征.

9.3 量子电动力学

描写基本粒子物理的理论早期取得的成功, 是在纯电磁相互作用领域. 这个领域, 即量子电动力学或 QED, 通过实验与理论的相互促进而得到发展. 多年来, 与弱相互作用和强相互作用更加唯象的描写截然不同, QED 的成功被视为一个例外. 作为事后诸葛亮, 我们现在看到弱相互作用和强相互作用理论遵循了一条与 QED 所开创的路线密切相关的途径. 确实, 弱相互作用现在已经与 QED 统一成了一个弱电理论, 而强相互作用由一个将来很可能与弱电相互作用统一的理论描写. 然而, 为了尊重历史, 恰当的做法是按其原貌回溯 QED 的发展. 甚至在今天, 计算方面仍需持续不断地取得进展, 但一些有趣的疑难仍然困扰着百折不挠的实验家和理论家.

我们将首先讨论不受弱相互作用或强相互作用物理不确定性影响的纯电磁过程, 主要举一些光子与电子或 μ 子相互作用的例子. 我们要描述的计算将按精细结构常数 $\alpha = e^2/\hbar c \approx 1/137$ 升幂的级数组织.

9.3.1 理论中的无穷大量

尽管光子与电子的相互作用在 α 的最低阶上能成功地描写诸如光子-电子散射或在强外场中一个光子产生正-负电子对, 但很早人们就认识到含 α 高阶幂的项会导致困难, 这一点在一系列给出无穷大答案的计算中清楚地显示出来.

人们可以发现, 经典电磁理论正是在计算点电子周围的场能时受到无穷大量困扰的. 能量按 $1/r_0$ 发散, 其中 r_0 是对能量密度求积分时所取的到电子的最短距离. 适当的相对论量子力学处理能解决这个问题吗?

以与狭义相对论相容的方式描写电子还必然包括正电子的存在. 在 W Furry 的帮助下, Weisskopf 证明^[8], 在电子自能计算中包括正电子的贡献会把发散程度降低至 $\ln(1/r_0)$, 其中 r_0 仍表示最短截断距离. 所以正电子只是提供了部分的、而不是足够的帮助.

量子电动力学另一个无穷大量是以一个光子产生的虚的正-负电子对的结果出现的. 像电子自能一样, 这种真空极化发散依赖于一个截断参量的对数. 尽管真空极化有无穷大的特性, 比如在氢原子中, 还是有可能通过比较长距离与短距离时的相互作用, 计算它对库仑相互作用的影响的. 其结果^[9] 是预言氢原子的 $2P_{1/2}$ 能级应该高出 $2S_{1/2}$ 能级 27MHz, 而 Dirac 理论预言它们是简并的.

9.3.2 早期的实验发展

1. Lamb 位移

氢原子光谱 Balmer 线系的精细结构首先由 Michelson 和 Morley 于 1887 年在光谱线 $H_\alpha(n=3 \rightarrow 2)$ 中观测到. 到 20 世纪 20 年代后期 Dirac 方程建立之后, 有了 15 个以上的光谱测量数据可以用来与理论比较. 这时, 马上遇到了一个困难. 观测到的光谱线强度之比不是所预期的值; 更为重要的是, 谱线的劈裂与所预言的值不同. 早在 1933 年, 《物理评论》就已经发表了一篇处理这个偏离的快报^[10]. 其标题为“关于 Coulomb 定律在氢原子上的失败”. 随后的十年里, Houston 和 Williams^[11] 关于谱线 D_α 的测量, 使得第三条光谱线 (氘原子显示较小的 Doppler 展宽) 上观测的偏差更为尖锐. 这项工作激励 Pasternack 注意到, 倘若把 $2S$ 能级上移 0.03cm^{-1} (用后来使用的单位是 900MHz), 则观测的结果或许就可以解释. 真空极化单独给出的修正太小, 而且是在错误的方向上, 解释不了这一偏差. 这种情况一直延续到第二次世界大战以后.

在战时的美国, 许多物理学家或是在致力于雷达研发的多个辐射实验室之一工作, 或是参与同核武器有关的曼哈顿工程. 哥伦比亚大学的 Willis Lamb 最初由于通不过必须的忠诚审查而被拒绝在哥伦比亚辐射实验室 (CRL) 工作, 因他的夫人不是美国公民. 他只好给美国海军学生讲授物理学, 包括原子物理学, 从而熟悉了上面讨论的关于 H_α 和 D_α 光谱的问题. 他最后获准到 CRL 参加高频磁控管方面的工作, 并以这一身份亲手制作了最早的连续波长磁控管之中的一个, 虽然他在名义上是一名理论物理学家. 它制作的磁控管运行波长为 2.7cm, 绝非巧合, 这恰好是氢原子精细结构劈裂的频率. 战争一结束, 他与一名叫 R C Retherford 的研究生 (此人在战争期间掌握了高真空和微电流测量的专门技巧) 一起, 立即着手准备一个实验, 用来明确回答氢原子精细结构所提出的问题. 他利用了许多在战争年代发展的新技术和仪器. 这是一个辉煌的成就, 实验取得的成功超越了 Lamb 所有的梦想.

氢原子 $2P$ 和 $2S$ 能级之间的精细结构分裂, 处于 Lamb 的 3 厘米的磁控管范围之内. 名义上, $2S$ 能级是个亚稳态, 它的寿命长得足够使原子穿越仪器所需的长度后, 这个能级依然存在. 然而, 任何小的杂散电场都将使 $2S$ 和 $2P$ 能级混合并缩短 $2S$ 能级的寿命, 也许缩短到这样的程度, 使得没有任何开始处于 $2S$ 能级的原子能够存活到顺利穿过仪器. 针对这些以及其他一些问题, 仪器由五个不同单元组成. 第一, 源是一个封装有热钨表面的炉子, 这种表面把氢分子离解为氢原子. 氢原子从炉中射出后, 通过准直而形成氢原子束. 第二, 将一个电子束安放得能与氢原子束交叉, 至少激发一些氢原子到 $2S$ 态. 这个过程效率极低; 只有大约一亿分之一的原子能被这样激发, 但这就足够了. 第三, 原子束通过一个射频场, 诱发从 $2S$ 到各个 $2P$ 能级的跃迁. 处于 P 态的原子衰变到基态的速率极快, 它们在消失到亚稳原子束中之前只能传播小于千分之一厘米 (10^{-3}cm) 的距离. 第四, 一个均匀磁场包围整个仪器, 以消除通过 Zeeman 效应而产生的 $2S$ 与 $2P$ 能级的 (可能的) 接近简并, 从而使杂散电场缩短原子束寿命的危险降到最低. 最后, 原子束最终进入一个特殊设计的探测器, 它只能选择性地感知 $2S$ 态的氢原子, 而对所有其他原子全不敏感. 继续 Massey 和 Oliphant 的工作, Lamb 和 Cobas 先前已经计算出, 撞击钨板的亚稳态氢原子会退激发, 同时钨板会放出电子从而形成电流. 利用这个事实, 探测器由一个钨的平板组成, 连接于当时可得到的最灵敏的电流计, 一个 FP54 静电计.

实验测量包括设定射频的频率和改变磁场, 直到探测电流发生一个急剧的下降. 这相应于从 $2S$ 到 $2P$ 态之一的射频 (RF) 诱导跃迁. 通过外推到零磁场, Lamb 和 Retherford 发现, 跃迁出现于比理论预言值小 1000MHz 的频率上, 恰与若把 $2S_{1/2}$ 能级上移这么大频率所预期的结果一致. 他们还报告说, 直接看到了在这个频率下 $2S_{1/2}$ 能级和 $2P_{1/2}$ 能级间的跃迁. 而在 Dirac 理论中, 这两个能级具有严格相同的能量. 从这个最早的实验于 1947 年 4 月 16 日得到的结果^[13] 示于图 9.1 中. 在这个漂亮的测量中, Pasternack 的推测被证明是正确的, 但其影响远远超出这一推测的领域, 因此立即得到了应有的最认真的关注.

第二次世界大战之前, 有相当多的理论努力投向了电子自能问题的研究. 然而, 因为战争, 这方面的兴趣处于休眠状态. 现在, 受 Lamb 和 Retherford 结果的激励, 潜在的兴趣发展为理论物理学家的主要进攻方向, 而且在几年的时间里这一问题就被解决了, 几乎每个人都很满意. (然而, 直到垂暮之年, Dirac 始终坚持任何包括删除无穷大量的理论都是丑陋的、不能令人满意的、且肯定是不完备的.)

在 1947 年 6 月 2 日至 4 日于纽约长岛的匹考尼克 (Peconic) 湾避难岛 (Shelter Island) 上举行的一次会议上, Lamb 首先宣布了这些结果, 这是他在仅仅 5 星期之前获得的. 这次会议由美国国家科学院资助, 由 Robert Oppenheimer 组织, 绝大多数那时在美国的领袖级理论巨头都参加了这次会议 (图 9.2, 取自文献 [14] 的第二

篇, 380 页). 这次会议不仅使 Lamb 和 Retherford 的结果公之于众, 并且 R Marshak 还第一次提出了存在两种介子, H Kramers 奠定了用“重整化”重新解释量子场论中的无穷大量的基础.

这次会议后的几天内, Bethe 就用老式的非相对论方法巧妙地减除掉了无穷大项, 计算出了“Lamb 位移”为 1040MHz. 这个计算导致许多细致的改进, 在三年时间内由 Feynman、Schwinger 和朝永振一郎 (Tomonaga) 以完整地发展成量子电动力学理论而圆满完成.

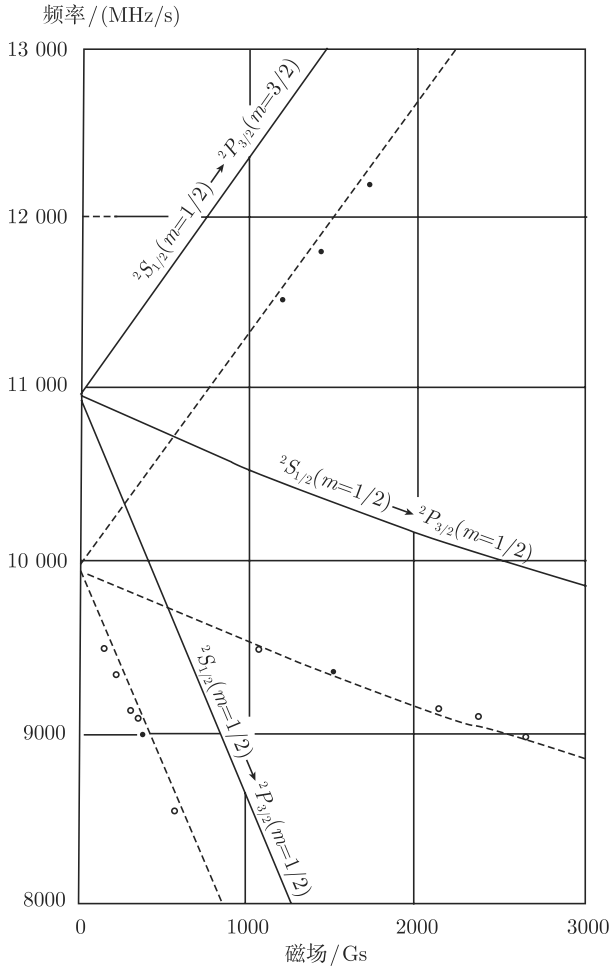


图 9.1 Lamb 位移的证据^[13]

实线是不存在能级移动时能级的劈裂作为磁场函数的三个预期值; 虚线是在存在 1000MHz 能级移动时的预期值



图 9.2 1947 年 6 月 2 日至 4 日第一次避难岛 (Shelter Island) 会议的参加者

(1) I I Rabi; (2) L Pauling; (3) J Van Vleck; (4) W E Lamb Jr; (5) G Breit; (6) D Mac Innes (美国国家科学院); (7) K K Darrow; (8) G E Uhlenbeck; (9) J Schwinger; (10) E Teller; (11) B Rossi; (12) N Nordsieck; (13) J von Neumann; (14) J A Wheeler; (15) H A Bethe; (16) R Serber; (17) R E Marshak; (18) A Pais; (19) J R Oppenheimer; (20) D Bohm; (21) R P Feynman; (22) V F Weisskopf; (23) H Feshbach (照片由 D Mac Innes 提供)

2. 电子磁矩

Dirac 电子理论^[7] 预言, 在自旋 S 与磁矩 μ 的关系式 $\mu = ReS/(2m)$ 中, 因子 g 精确地为 2. 把钠与镓的精细结构与超精细的相互作用相比较, 表明与这个值有偏离^[18]: $g - 2 = 0.00229 \pm 0.00008$. 这个结果曾在 1947 年避难岛会议上宣布过. Schwinger^[19] 计算了电子自能对这个量的影响, 发现 $g - 2 = \alpha/\pi = 0.00232$, 与实验相符. 它搭起了更彻底理解这个效应的一个平台. 怎样能从被无穷大量困扰的理论得出与实验相符的结果呢?

3. 电子偶素

前面我们讨论了一些在战时处于休眠状态而战后迅速发展的思想. 比如, 早在 1945 年 12 月, 战争结束后的几个月, 哈佛大学的 Purcell、Torrey、Pound 以及斯坦福大学的 Bloch 和 Packard 独立地发现了核磁共振现象. 1946 年 Wheeler 发表了一篇关于他在战时发展的一个观点的论文^[20], 其中给出了包括一个或更多电子 (e^-) 和正电子 (e^+) 束缚态的细节. 这种最简单的系统, 即 (e^+e^-) 束缚态, 我们现在称之为电子偶素. 他计算了单态和三重态的湮没速率和来自单态湮没的两个光子的相

对极化. 文章发表于一个不太知名的杂志《纽约科学院年报》(*Annals of the New York Academy of Sciences*) 上, 因为他们当时正在征集最佳论文奖, Wheeler 获得了这个奖. 对这些结果的实验证实则需要发展一些新的工具和仪器. 预言的束缚态最后在 1951 年由 Martin Deutsch 发现.

9.3.3 重整化登场

从量子电动力学里消除无穷大的量, 在文献 [14] 和 [17] 中已有回顾. 这项努力的许多参与者示于图 9.3 中. 早期的领军人物包括 Heisenberg、Dirac、Oppenheimer 和 Stückelberg. 用一些物理量来重新解释无穷大量的手续由 Kramers 于 1947 年在避难岛会议上提出, 并由朝永振一郎 (Sin-Itiro Tomonaga)、Julian Schwinger 和 Richard P Feynman(见插框) 系统地加以发展. 这个方法与微扰论的每一阶都自洽的证明是由 Dyson、Salam 和 Ward 给出的.



图 9.3 1961 年在布鲁塞尔召开的第十二次 Solvay 会议的参加者

前排从左向右: 朝永振一郎; W Heitler; 南部一郎; N Bohr; F Perrin; J R Oppenheimer; W Lawrence Bragg 爵士; C Møller; C J Gorter; 汤川秀树; R F Peierls; H A Bethe. 第二行: I Prigogine; A Pais; A Salam; W Heisenberg; F J Dyson; R F Feynman, L Rosenfeld; P A M Dirac; L Van Hove; O Klein. 后排: A S Wightman(略靠前); S Mandelstam; G Chew; M L Goldberg; G C Wick; M Gell-Mann; G Källén, E P Wigner; G Wentzel; J Schwinger; M Cini

量子电动力学中主要出现三种无穷大. 第一种与电子同其自身电磁场相互作用的无穷大能量相联系, 通过重新定义它的质量为其物理质量, 在微扰论中逐阶进行消除. 第二种可通过要求在空间给定点产生的一个自由电子将在其后某时刻和一