

53.366
198

量 子 場 論

朱 洪 元 著

Handwritten signature

上海科學出版社

內 容 簡 介

本书綜述了作为物理学生长点之一的基本粒子物理的主要理論工具——量子場論。书中全面、扼要地叙述了量子場論的发展过程,各种粒子場的基本性質及处理方法,各种相互作用及用以描述相互作用的数学形式,量子場論的一些具体应用(特別在与解釋新的实验成果相結合的那些現象方面,例如:电子的反常磁矩及氫原子能級的兰姆移动),量子場論的局限性及其所遇到的困难,对消除困难的一些尝试以及发展基本粒子理論的未来展望。

当探討各种問題时,作者在闡明数学形式及数学方法的同时,比較着重地对所涉及問題的現象和本質随时加以一定的物理詮釋。书的内容,除了包含一般量子电动力学所处理的电磁相互作用过程以外,作者还适当地加入了对于弱相互作用現象的一些理論探討与最新成就,諸如李政道和杨振宁的二分量中微子理論(1957年)以及1958年初由費曼(Feynman)和盖尔曼(Gell-Mann)所提出的普适費米型弱相互作用理論。与此同时,在书的末尾,作者对强相互作用理論也作了初步的探討,并对色散关系作了簡略闡述。

本书是基本粒子物理的入門书,可作为高等学校量子場論課程的教材,也可供理論物理研究工作者参考之用。

量 子 場 論

朱 洪 元 著

*

科学出版社出版 (北京朝陽門大街 117 号)

北京市书刊出版业营业許可証出字第 061 号

中国科学院印刷厂印刷 新华书店总經售

*

1960年9月第一版	书号:2285 字数:341,000
1960年9月第一次印刷	开本:787×1092 1/37
(京) 0001—7,000	印张:16

定价:2.00元

序 言

最近十五年来，利用宇宙綫和高能加速器进行的关于基本粒子的研究有了巨大的进展。作为分析和总结基本粒子物理现象的理论工具的量子场论，在 1947 年以来也有显著的发展。基本粒子物理已经成为物理学的重要组成部分。

本书的原材料是作者先前在北京大学讲授量子场论的讲义。因为在工作和教学中感觉到目前存在着对量子场论书籍的需要，在 1959 年夏将材料重新整理，写成本书。

本书的主要部分介绍处理电磁相互作用、弱相互作用和对称性质的理论工具。关于强相互作用的理论近年来虽然进行了大量的研究工作，但是显著的进展仍然不多。因此在这方面本书只限于介绍目前研究强相互作用的基本理论工具：海森堡表象和色散关系的初步理论。

在本书的写作和出版过程中，曾经得到中国科学院数学研究所戴元本同志的许多帮助，谨在此对戴元本同志表示感谢。

作者 謹識

1960 年 6 月

目 錄

序言	i
第一章 引言	1
§ 1,1. 基本粒子物理实验和量子場論的发展	1
§ 1,2. 量子力学和相对論性古典物理理論的局限性	3
§ 1,3. 量子場論的发展过程	5
§ 1,4. 量子場論发展中所遇到的基本困难	8
第二章 場的量子化方法的正則形式	11
§ 2,1. 量子力学的正則形式	11
§ 2,2. 古典場論的拉氏形式	12
§ 2,3. 运动規律的对称性和守恒定律	13
§ 2,4. 第一种规范变换和电荷守恒定律	14
§ 2,5. 坐标移动和能量守恒定律及动量守恒定律	15
§ 2,6. 洛仑兹变换和角动量守恒定律	17
§ 2,7. 古典場論的哈密頓形式	19
§ 2,8. 場的量子化方法的正則形式	21
§ 2,9. 能量和动量算符	24
§ 2,10. 总角动量算符	25
第三章 自旋等于零的粒子的場	28
§ 3,1. 自由粒子及其波动方程	28
§ 3,2. 标量場和假标量場	29
§ 3,3. 荷电粒子場的拉氏函数和守恒量	30
§ 3,4. 荷电粒子場的量子化	31
§ 3,5. 分解为平面波	32
§ 3,6. 量子場的粒子性	34
§ 3,7. $a_{\vec{k}}, a_{\vec{k}}^*, b_{\vec{k}}, b_{\vec{k}}^*, N_{\vec{k}a}$ 和 $N_{\vec{k}b}$ 的显示表式	37
§ 3,8. 分解为球面波	38
§ 3,9. 場的角动量	41

§ 3,10. 对易关系的相对論不变性	44
§ 3,11. 对易关系和時間反演	46
§ 3,12. 正反粒子共軛变換	50
§ 3,13. 自旋为零的中性粒子的理論	51
§ 3,14. 同位旋空間和同位旋守恆	54
§ 3,15. 个别粒子的同位旋	59
第四章 光子·自由电磁場的量子化	63
§ 4,1. 馬克斯威方程的相对論不变形式	63
§ 4,2. 拉氏函数密度、能量、动量和角动量	65
§ 4,3. 自由电磁場的量子化	66
§ 4,4. 洛仑茲条件	69
§ 4,5. 分解为平面波	70
§ 4,6. 光子的自旋	74
§ 4,7. 洛仑茲条件的意义	76
§ 4,8. 洛仑茲条件带来的困难	77
§ 4,9. 应用不定度規的量子化方法	78
§ 4,10. 縱光子和标量光子的意义	83
§ 4,11. 对易关系的洛仑茲不变性	86
第五章 自旋等于 1/2 的粒子的場	88
§ 5,1. 狄拉克波动方程	88
§ 5,2. 狄拉克波动方程和空間反射	94
§ 5,3. 狄拉克波动方程和時間反演	96
§ 5,4. 狄拉克波动方程和正洛仑茲变換	98
§ 5,5. 由波函数組成的协变量	100
§ 5,6. 正反粒子共軛变換	102
§ 5,7. 狄拉克波动方程的量子化	105
§ 5,8. 分解为平面波	108
§ 5,9. 真空情态	112
§ 5,10. u, a^*, b, b^* 的显示形式	114
§ 5,11. 对易关系的相对論不变性	116
§ 5,12. 同位旋	120

§ 5.13. 二分量中微子理論	123
第六章 基本粒子間的相互作用	128
§ 6.1. 相互作用的分类	128
§ 6.2. 輕子与电磁場之間的相互作用	131
§ 6.3. 介子、重子与电磁場之間的相互作用	136
§ 6.4. 强相互作用	142
§ 6.5. 奇异粒子和奇异量子数	147
§ 6.6. 牽涉到奇异粒子的强相互作用	150
§ 6.7. 費米弱相互作用理論	154
§ 6.8. 湯川弱相互作用理論	158
§ 6.9. 描述相互作用的其他数学形式	160
第七章 相互作用表象	163
§ 7.1. 海森堡表象和薛定格表象	163
§ 7.2. 相互作用表象	164
§ 7.3. 核子与 π 介子相互作用	169
§ 7.4. 輕子与电磁場相互作用	172
§ 7.5. 包含有場量微商的相互作用	176
第八章 散射矩陣和微扰論	182
§ 8.1. 散射矩陣	182
§ 8.2. 微扰論	183
§ 8.3. 散射矩陣的簡化	186
§ 8.4. 正規乘积	187
§ 8.5. 維克的二条定理	190
§ 8.6. 用图形表示正規乘积的方法	197
§ 8.7. 正規乘积所代表的物理过程	202
§ 8.8. 函数 $D_f(x)$, $\Delta_f(x)$ 和 $S_f(x)$ 的表式	209
§ 8.9. 动量表象	215
第九章 微扰論的具体应用	221
§ 9.1. 跃迁几率和反应截面	221
§ 9.2. γ 矩陣的一些性質	224
§ 9.3. 康普頓散射	227

§ 9,4. 电子和正电子的湮没	232
§ 9,5. 韧致辐射	235
§ 9,6. μ^+ 介子衰变为正电子、中微子和反中微子	242
第十章 量子场论中的发散困难	249
§ 10,1. 发散困难	249
§ 10,2. 电子的自能	251
§ 10,3. 发散积分	254
§ 10,4. 质量重整化	258
§ 10,5. $\Sigma^{(2)}(p)$ 所包含的其它发散困难	261
§ 10,6. 电子传播函数的二次近似	267
§ 10,7. 电荷重整化和辐射修正	269
§ 10,8. 真空极化	270
§ 10,9. $\Pi_{\mu\mu}(k)$ 的显示表式	276
§ 10,10. 光子传播函数的二次近似	279
§ 10,11. 真空极化导致的电荷重整化	281
§ 10,12. 顶角函数的高次近似	282
§ 10,13. 顶角部分导致的电荷重整化	287
§ 10,14. 小结	288
第十一章 电子反常磁矩和兰姆能级移动	290
§ 11,1. 辐射修正	290
§ 11,2. 电子为外场所散射的 S 矩阵元	291
§ 11,3. 电子的反常磁矩	298
§ 11,4. 能级的兰姆移动	300
§ 11,5. K 与 ρ 的数值之间的关系	306
§ 11,6. 红外发散困难	310
第十二章 重整化的一般理论	316
§ 12,1. 原始发散	316
§ 12,2. 法雷定理	320
§ 12,3. 不可约化的图形及其无穷大	323
§ 12,4. 光子相互散射的 S 矩阵元	329
§ 12,5. 正规图形和非正规图形	330

§ 12,6. 顶角函数中的辐射修正	334
§ 12,7. 可以约化的电子自能部分	336
§ 12,8. 可以约化的真空极化图形	342
§ 12,9. 重整化	347
§ 12,10. 其它量子场中的重整化	354
第十三章 海森堡表象	357
§ 13,1. 海森堡表象与相互作用表象间的连系	357
§ 13,2. 真空的波函数	359
§ 13,3. 波函数和矩阵元	363
§ 13,4. 传播函数	364
§ 13,5. S 矩阵元	366
§ 13,6. 邱和路方程	372
§ 13,7. 邱-路方程的进一步简化	381
§ 13,8. 相移与 S 矩阵元之间的关系	386
§ 13,9. 相移所满足的积分方程	396
第十四章 色散关系	404
§ 14,1. 因果律与色散关系	404
§ 14,2. 散射幅与推迟格林函数	409
§ 14,3. 解析延拓	413
§ 14,4. 色散关系	415
§ 14,5. 展望	418

第一章 引 言

§ 1.1. 基本粒子物理实验和量子场论的发展

古典物理学理论是十九世纪末以前大量实验所累积的事实和所发现的规律的总结。这一理论在低速的、宏观的物理现象的范围内起着普遍的作用。由于实验进入了新的现象领域,物理理论在二十世纪初经历了两个飞跃:由于对微观物理现象的研究而产生了量子论,以后进一步发展成为量子力学;由于对高速物理现象的研究而产生了特殊相对论。量子力学在低速的、微观的物理现象范围内起普遍的作用;相对论性的古典物理理论则在高速的、宏观的物理现象范围内起普遍的作用。其后,随着物理实验的进一步发展,人们开始研究高速微观物理现象,从而在三十年时间内发现了一系列新的前所未有的现象。如果我们仅仅运用量子力学或相对论性古典物理理论,是不可能解释这些新现象的。因此,有必要建立新的理论来概括这些新的现象。

这些新的研究的重要成果之一是形而上学原子概念的破产。永恒不变而彼此孤立的原子概念产生于二千多年以前,以后它曾以各种不同的形式保持了下来,其中包括德谟克利特(Democritus, 公元前460—370)的原子概念,迦生迪(Gassendi, 1592—1655)的原子概念,道尔顿(Dalton, 1766—1844)的原子概念,以及波劳特(Prout, 1785—1850)所提出的氢原子为最原始物质的概念等。在化学的原子结构被发现之后,人们又开始设想,电子和质子是永恒不变的、不可分割的最后物质单位。其后又发现了,在一定的条件下,光子可以转化为一对电子和正电子,电子和正电子也可以倒过来转化成为一对光子;中子可以转化为质子、电子和反中微子,质子也可以倒过来转化为中子、正电子和中微子。这样就证明了,即使电子和质子也并不是永恒不变的。我们不能确定究竟什么是

更基本的物質。既不能說，光子是電子和正電子所組成的，也不能說，電子或正電子是由光子所組成的；既不能說中子是由質子、電子和反中微子組成的，也不能說質子是由中子、正電子和中微子組成的。因此，永恆不變的、不可分割的最后物質單位并不存在。

這些新的研究的另一個重要成果是一系列前所未知的新粒子的發現。我們將這些粒子以及質子、中子、電子、光子等一律稱為基本粒子。到目前為止，已經發現的基本粒子約達三十餘種。它們的名稱和一些基本性質見於表 1。表中有問號者表示實驗數值尚未確定。在這些基本粒子之中，除了質子、反質子、電子、正電子、光子、中微子及反中微子以外，其餘的粒子都是不穩定的。這

表 1. 基本粒子的名稱, 自旋, 質量和平均壽命

分類	名 稱	符 號	自旋 (\hbar)	質 量 (兆電子伏)	平均壽命(秒)
光子	光 子	γ	1	0	穩 定
輕子和反輕子	中微子和反中微子	$\nu, \bar{\nu}$	$\frac{1}{2}$	0	穩 定
	電子和正電子	e^-, e^+	$\frac{1}{2}$	0,510976	穩 定
	負 μ 介子和正 μ 介子	μ^-, μ^+	$\frac{1}{2}$	$105,70 \pm 0,06$	$(2,22 \pm 0,02) \times 10^{-6}$
介子	正 π 介子和負 π 介子	π^+, π^-	0	$139,63 \pm 0,06$	$(2,56 \pm 0,05) \times 10^{-8}$
	中性 π 介子	π^0	0	$135,04 \pm 0,16$	$(0,0 < \tau < 0,4) \times 10^{-16}$
	正 K 介子和負 K 介子	K^+, K^-	0	$494,0 \pm 0,20$	$(1,224 \pm 0,013) \times 10^{-8}$
	第一種中性 K 介子	K_1^0	0	493 ± 5	$(0,95 \pm 0,03) \times 10^{-10}$
	第二種中性 K 介子	K_2^0	0	493 ± 5	$(3 < \tau < 100) \times 10^{-8}$
重子和反重子	質子和反質子	P, \bar{P}	$\frac{1}{2}$	$938,213 \pm 0,01$	穩 定
	中子和反中子	N, \bar{N}	$\frac{1}{2}$	$939,506 \pm 0,01$	$(1,04 \pm 0,13) \times 10^3$
	Δ 超子	Δ	$\frac{3}{2}?$	$1115,2 \pm 0,13$	$(2,77 \pm 0,15) \times 10^{-10}$
	正 Σ 超子	Σ^+	$\frac{1}{2}?$	$1189,3 \pm 0,35$	$(0,78 \pm 0,074) \times 10^{-10}$
	負 Σ 超子	Σ^-	$\frac{1}{2}?$	$1196,4 \pm 0,5$	$(1,58 \pm 0,17) \times 10^{-10}$
	中性 Σ 超子	Σ^0	$\frac{1}{2}?$	$1188,8 \pm 0,3$	$(\tau < 0,1) \times 10^{-10}$
	負 Ξ 超子	Ξ^-	?	$1321 \pm 3,5$	$(4,6 < \tau < 200) \times 10^{-10}$
	中性 Ξ 超子	Ξ^0	?	?	?

些不稳定粒子的平均寿命长者不过 10^3 秒, 短者不及 10^{-15} 秒, 即使是质子、反质子, 电子、正电子、光子、中微子和反中微子, 它們在一定的条件下也都会产生和消失。

基本粒子的存在和他們之間的相互轉化是高速微觀現象的主要特点。不論量子力学或相对論性的古典物理理論都未能全面地反映这些特点。

§ 1.2. 量子力学和相对論性古典物理理論的局限性

自从海森堡(Heisenberg)和薛定格(Schrödinger)发现了量子力学以后, 量子力学就一直被用来解决一系列古典物理学理論所无法解决的问题。例如: 原子结构, 分子结构; 固体的结构和性质等等。在这些问题的解决上, 量子力学已取得了重要的成就。但是, 量子力学仍然有其局限性。从哲学观点看来, 这是不难理解的。人們所認識的是相对真理, 它只有在一定的条件下才是正确的。随着实践經驗的日益丰富, 人的認識也必会相应地更加深化。古典物理学理論是如此, 量子力学也并不例外。显然, 海森堡和薛定格所发现的量子力学不能用来处理速度接近光速的物理現象。由描述自由粒子的运动的薛定格方程就可以看出这一点。描述自由粒子的运动的薛定格方程如下:

$$\begin{cases} i \frac{\partial \psi}{\partial t} = H\psi, \\ H = \frac{\vec{p}^2}{2m}, \\ \vec{p} = -i\vec{\nabla}, \end{cases} \quad (1,1)$$

其中 ψ 代表波函数, H 代表哈密頓量, \vec{p} 是动量算符, m 是粒子的靜質量。在本书中将选取蒲朗克(Planck)常数的 2π 分之一 ($=\hbar$) 和光速 c 为单位, 亦即取 $\hbar = c = 1$ 。(1,1) 中的第二式是从非相对論性古典力学承繼而来的, 它是动能的表式。假使粒子的速度接近光速, 这一表式便不准确。在相对論中, 包括靜能量在內的粒子

的能量 E 和他的动量之間應有下列关系：

$$E^2 = \vec{p}^2 + m^2. \quad (1,2)$$

因此不难理解，海森堡和薛定格所发现的量子力学是非相对論性的，不能用来处理相对論性的問題。

例如：基本粒子的产生，消失和相互轉化是高速微观物理現象的根本特征之一。在粒子速度接近光速的現象中，粒子的动能可能远远超过它的靜能。因此，在这类粒子的相互作用过程中，能量轉換可能极大，因而有可能在滿足质量和能量相互联系的定律之下导致粒子的产生和消失。宇宙綫現象中的电子簇射和介子簇射就是这类例子。然而，海森堡和薛定格的量子力学却无法处理这类問題。描述多体运动的薛定格方程具有如下的形式：

$$i \frac{\partial \psi}{\partial t} = \left\{ \sum_{j=1}^N \left(-\frac{\nabla_j^2}{2m_j} \right) + \sum_{k < i} V_{jk} \right\} \psi, \quad (1,3)$$

其中 N 代表粒子数， i 标志着第 i 个粒子， V_{jk} 标志着第 j 个粒子和第 k 个粒子之間的相互作用。在方程 (1,3) 中粒子的数目 N 已經給定。不論波函数 ψ 怎样随時間而变化，它只能描述 N 个粒子的情态。这一波函数不能反映更多粒子的运动，也不能反映更少粒子的运动。因此，方程 (1,3) 既不能用以处理粒子的产生問題和消失問題，也不能用以处理粒子間的相互轉化問題。

和量子力学相似，相对論性古典物理理論也有其局限性。在特殊相对論的規律被发现以后，牛頓力学被修改以滿足相对論的要求。馬克斯威 (Maxwell) 的古典电磁場理論本来相对于洛仑茲 (Lorentz) 变換就是不变的。相对論性的古典物理理論成功地反映了高速宏观現象，但是对于微观現象的处理則无能为力。微观世界的根本特点之一是微观客体的粒子-波动二重性。古典物理理論不能反映这种二重性。即使将古典物理理論加以修改，使之滿足特殊相对論的要求，也仍然不能使理論超出这一局限性。相对論性的质点力学能够反映客体的粒子性，但是不能反映客体的波动性。相对論性的流体力学和馬克斯威的古典电磁場理論能够

反映客体的波动性,但是不能反映客体的粒子性。

因此,由于物理实验的研究进入了高速微观现象的领域,物理理论也不得不向前推进。必须建立新的物理理论,使之一方面能反映微观现象中的粒子-波动二重性,另一方面又具有能反映高速现象特点的洛仑兹不变性。向这一方向迈进的第一步就是量子场论的建立。

§ 1.3. 量子场论的发展过程

最先人们研究的高速微观现象是关于光子的现象。光子是电磁场的量子,是静质量等于零的粒子,只能以光速运动。因此有关光子的现象实质上是相对论性的现象。由于光子的静质量等于零,即使在很小能量转化的过程中光子也能产生和消失。因此,即使在日常生活中,光子的产生和消失也是经常见到的现象。马克斯威的电磁场理论本来就满足特殊相对论的要求。我们有理由期望,假使将这一理论量子化,就有可能得到一个既能反映高速现象特点,又能反映微观现象特点的理论;就有可能解释光子的存在、产生和消失,因此,建立量子电磁场理论作为发展高速微观物理现象的理论的开始就是很自然的事。

我们可以将电磁场当作一个统一的客观整体,具有无穷多的自由度,正如我们可以将由极大数量分子组成的具有极多自由度的固体当作一个统一的客体看一样。固体的内部运动可以分解为一系列基本的、简单的振动。固体的各种不同的基本振动方式代表固体的各个自由度,在量子化以后的简单振动系统的能量 E 只能是一系列不连续的数值:

$$E = \left(n + \frac{1}{2} \right) \omega, \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (1.4)$$

其中 ω 代表振动频率。如众所周知,振动能量取(1.4)中的数值对于解释固体的比热为什么随着温度而降低起着决定性的作用。在温度低的情况下,频率高的振动的自由度难于激发,因而它冻结起

来,于是对于比热就不再作出贡献。

电磁场的运动也可以分解为一系列基本的、简单的振动。电磁场振动就形成电磁波。电磁场的各种基本振动方式代表电磁场的各个自由度。可以将电磁场的量子化还原为电磁场的各个基本振动的量子化。任何一种基本电磁振动在量子化以后,它的能量也只取如(1,4)中所给出的一系列不连续的数值。这样就解释了电磁场的不连续性,亦即电磁场的粒子性,解释了光子的存在。某一振动自由度被激发至 $n = 1$ 的受激态就相应于产生了一个频率等于 ω 的光子。当某一振动自由度处在 $n = 5$ 的受激态时在物理意义上就相应于存在着五个频率等于 ω 的光子。振动激发的消失相应于光子的消失。因此,量子电磁场论不仅解释了光子的存在,同时也为处理光子的产生和消失问题开辟了道路。

狄拉克 [Dirac, 1927] 首先提出用这样的方法将电磁场量子化。显然,接着的问题是如何处理速度接近光速的电子的问题。从数学形式的对称性出发,狄拉克 [1928] 发现了描述单个电子的相对论性波动方程。为了处理电子的产生和消失问题,人们参照了如何处理光子的产生和消失问题的方法,从而引进了“电子场”的概念,并将电子场量子化。按照这一想法,量子电子场的激发代表电子的产生,电子场激发的消失代表电子的消失。处在不同受激态的电子场代表处在不同情态下的不同的电子系统。首先提出将电子场量子化的方法的是约旦和维格纳 [Jordan and Wigner, 1928]。进一步的发展是研究电子场和电磁场之间的相互作用问题,亦即建立电子和电磁场之间的相互作用的量子化理论。这一理论叫做量子电动力学。量子电动力学已被应用于光子和电子相互作用的许多问题中,并已得到了显著的成就。例如:曾经应用量子电动力学来处理光的吸收和发射,康普顿 (Compton) 散射,电子和正电子偶的产生和湮没,轳致轳射等等现象,都得到了和实验结果很符合的结果。

这样,就在物理学中引进了一个重要的新概念:“量子场”。

这一概念是反映高速微观现象的有力概念。量子场是物质存在的形式之一。可以用不同的量子场来描述不同种类的基本粒子。量子场的各种受激态代表处在各种情态下的基本粒子系统。量子场的激发代表粒子的产生，量子场激发的消失代表粒子的消失。在上述工作的基础上，海森堡和泡里 [Heisenberg and Pauli, 1929] 建立了量子场论的比較普遍的数学形式。在各种新的基本粒子被发现以后，这一比較普遍的数学形式便被用来处理这些新的基本粒子现象。首先，相应于各种不同的基本粒子引进了各种不同的量子场概念；各种不同的基本粒子是相应的各种不同的量子场的激发。例如，和中微子、 μ 介子、 π 介子、 K 介子、质子、中子、 Λ 超子、 Σ 超子以及 Ξ 超子相应，引入了中微子场、 μ 介子场、 π 介子场、 K 介子场、质子场、中子场、 Λ 超子场、 Σ 超子场和 Ξ 超子场的概念。其后又引进了各种量子场之间的相互作用来处理各种基本粒子之间的相互作用和相互转化问题。用这种方法处理基本粒子现象取得了比較重要成就的，到目前为止，除了量子电动力学现象以外，还有 β 衰变的现象。这首先是因为，到目前为止，在所有的基本粒子现象中，只有量子电动力学现象和 β 衰变现象已经累积了大量的和精确的实验数据。至于其他基本粒子现象，如涉及介子和超子的现象，实验所累积的数据还很少而且不够精确。例如：到现在为止还不能肯定各种超子的自旋等于多大，他们之间的相对宇称是什么。因此可以说，量子场论目前还处在初創的阶段，还远不是一个完备的理论。这一理论的成长还有待于高能物理实验研究的逐步扩大和深入。

当然，应用上面所叙述的方法能不能建立反映基本粒子现象的理论是值得讨论的。基本粒子各具有不同的性质，这说明了各种基本粒子之间有区别。但各种基本粒子的能够相互转化也说明了他们之间的统一性。因此就产生了这样的问题：这些基本粒子是不是都是“基本”的？有没有必要相应于每一种基本粒子都得分别引入一个量子场来描述？在科学发展的历史上，曾经将九十二种

化学原子都当作永恒不变的、相互孤立的物质的基本单元。周期律的发现指出了他们之间的统一性。结果发现，它们都是统一地由电子和原子核构成的。用它们的电子壳层的波函数就能够统一地反映这些原子的化学性质。可以设想，目前的所谓各种“基本粒子”是统一地由某种更基本的东西组成的。根据这种想法有人建议建立统一量子场论 [Heisenberg, 1953] 来统一地反映基本粒子现象。在这一理论中基本的场只有一种，目前所谓“基本粒子”应该都由这一种基本的场构成。这样的想法具有很大的吸引力，但是根据它来建立具体的理论却遇到了很大的困难，目前还没有得到什么具体的成就。

从认识发展过程的一般规律看，相应于各种基本粒子引进许多不同的量子场，以反映这些基本粒子的性质和相互作用及相互转化的现象，这种方法是可以应用的。可以将这种做法理解为建立基本粒子理论的第一步。人的认识发展过程一般地是从特殊到一般，从现象到本质。因此完全可以先将基本粒子现象一部分一部分地分别加以考察，然后再进行统一的研究；先将基本粒子现象定性地分类加以讨论，然后再探索所有基本粒子现象的共同本质。量子电动力学和 β 衰变理论所取得的一系列成就证明了这样的路是走得通的。我们可以将目前的量子场论当作未来的完整的基本粒子理论的前驱，犹如量子论是量子力学的前驱一样。

§ 1.4. 量子场论发展中所遇到的基本困难

说目前的量子场论是一个前驱性理论的论断，还有一个重要的根据。这就是，目前的量子场论还存在着基本的困难。这一困难在三十年来严重地阻碍着量子场论的发展。

用量子电动力学来计算任何电磁相互作用现象时，第一次近似的计算结果常常和实验数据非常符合。但是，当进一步作高次近似的计算时，得到的结果总是无穷大，毫无意义。其他的量子场理论，如 β 衰变理论，有关介子、核子和超子场的理论等等，也都遇

到了同样的基本困难。曾經有許多入嘗試克服这一基本困难,提出了各式各样的理論,但結果都归于失敗。大約在十年以前,朝永振一郎[Tomonaga, 1946]、許溫格[Schwinger, 1948]和費曼[Feynman, 1949]等曾提出了避免这一困难的方法,成功地解释了某些电磁現象中极为精細的效应。他們的成就无疑地使量子場論向前跨进了一步。但是,他們的方法只能暂时避开上述基本困难,而并没有能彻底克服这一困难。因此,即使在这种改进了的量子場論中,这一基本困难仍然存在,只是以別的形式表現出来。戴逊[Dyson, 1952]、約飞[Июффе, 1954]和朗道等人[Ландау, Абрикосов и Халатников, 1954]、[Landau, 1955]的研究指出了这一基本困难的新形式。可以預計,这一基本困难的克服可能将和物理理論的进一步飞跃联系在一起,犹如黑体輻射困难的被克服和量子論的發現联系在一起一样。

量子場論,在其发展过程中,还遇到了另一个严重的技术上的困难。电磁場的相互作用不强,因而用微扰論方法处理就可以得到相当好的近似結果。导致 β 衰变的相互作用很弱,因此 β 衰变現象完全可以用微扰論来处理。然而,有些場之間的相互作用是很強的,例如: π 介子、 K 介子、核子以及超子之間的相互作用的強度便远远超过电子和电磁場之間的相互作用的強度。因此,用微扰論方法来計算这些強相互作用所导致的物理效应,只能得到很坏的近似,甚至根本不能用微扰論来計算。目前正在探索处理強相互作用的普遍有效方法。但是到現在为止,在这方面得到的成就是很初步的。这一困难若不能克服,也将严重地阻碍量子場論的发展。

因此,当前量子場論的重要工作是:一方面要分析和概括高能物理实验所提供的各方面的事实和規律,建立能在各个局部現象領域內起作用的一系列带有唯象性质的理論;另一方面应该分析目前量子場論基本困难的性质,从新的实验結果中寻觅新的物理思想和概念,以求能克服这种基本困难。进行这些工作的重要前