

[英] P. 罗曼 著

基本粒子理论

上海科学技术出版社

內 容 簡 介

本書系統而全面地總結了近代物理學中根據對稱性來研究基本粒子及其相互作用的理論成果。書中說理明白易懂，分析問題深入細緻，但對量子場論方法不作深入介紹。內容包括四維正交群、場方程式、場的量子化、不變性與選擇規則及同量異位空間等五章。全書系根據原書第一版（1960年）譯出，譯文完成後又根據第二版（1964年）作了全面的校訂和補充。

本書適合於理論物理、基本粒子物理等專業的大學高年級學生、研究生及從事該方面工作的教師與研究人員閱讀和參考。

THEORY OF ELEMENTARY PARTICLES

P. Roman

North-Holland Publishing Co. 1964

基 本 粒 子 理 論

蔡建華 龔昌德 孫景李 譯

上海科學技術出版社出版（上海瑞金二路450號）

上海市書刊出版業營業許可證出093號

上海新華印刷廠印刷 新華書店上海發行所發行

開本 850×1156 1/32 印張 18 20/32 插頁 4 排版字數 463,000

1966年3月第1版 1966年3月第1次印刷

印數 1—1,600

統一書號 13119·696 定價（科六）3.20元

第一版序

本书起源于我在1957/58学年在曼彻斯特大学物理系所讲授的研究生课程。在把讲稿改写成本书的过程中，我曾经试图纳入至1959年初已发表的一切最主要的新的成果。

除了引言之外，本书具有教科书的性质。作为一般性的评述，书中尝试概括基本粒子研究方面的基础理论工作。作者的主要目的是企图给予想要专攻这一课题的青年理论物理学家们一个引导，但是也希望能有益于想要了解关于基本粒子性质所作研究工作的一般理论基础的经验物理学家们。

在介绍题材时，我几乎完全从教学上的考虑出发，因此事实上本书的任何部分内容都不能被认为是内在一致的整体。

为了能够恰当地理解本书的内容，读者必须熟悉理论物理的一般方法，尤其是要具备质点的初等量子力学和狭义相对论的基础知识。关于比较陌生的数学工具象群论以及比较深入的物理问题象量子场论，在本书中将尽可能设法介绍得透彻一些，使读者能够详细地了解有关主题的各方面的讨论。

然而不能认为本书完全是基础性的。一方面是由于主题本身的性质，另一方面是由于有时我也试图在正文中插入一些有关材料，这些材料在不加重一般读者负担的条件下，能使已经具备专门知识的读者发生兴趣。

本书分为五章。在一般性的引言之后，第一章讨论基本粒子理论的数学和几何基础。这一章从群论和线性代数的简单说明开始，继而讨论四维和三維转动群及洛伦兹群的性质，包括它们的各种表示。因为对于基本粒子及其相互作用的分类，这些群极为重

要，要求讀者努力細致地閱讀這比較困難的一章。獲得這些知識之後，讀者就作好了必要的準備，能夠在我們的引導下漫游迷人的基本粒子世界。

第二章引入場的基本概念，並且集中討論經典場方程式的代數結構。

第三章總結量子場論的主要概念，提出場的協變量子化規則，和引導到將粒子描述成各種場的量子的圖象。

本書以上各章闡述的論題現在可以被認為是已經帶有一些“經典”性了，其餘的部分評述當前普遍感到興趣的問題。第四章首先引入對稱性及與之相聯系的守恒定律的一般處理方法。在應用這些方法考慮了物理學的經典守恒定律之後，繼續說明空間反演，時間反演和粒子-反粒子共軛變換。我們先從初等的觀點來處理這些問題。在宇稱守恒被破壞的“驚人”發現的前幾年中，這種提法可能已經是很徹底的了。但是在 1957 至 1958 年間進行的精巧實驗迫使我們採取更為普遍的觀點，這一點在第 5 節和第 6 節中已經作了討論。這裡討論了現在成為極其重要的弱相互作用的許多普遍的性質。

最後第五章在某種範圍內是上一章的繼續，但完全從事於有關同量異位旋問題的討論。其中大部分論題直接引導我們到目前經常討論的，有時是帶有爭論的中心研究問題，這些問題關係到超子和介子的性質。本書結束時簡短地討論了關於基本粒子理論可能的新的發展趨向。

關於內容的相互引証，注意下列幾點：每一章包含數節，每一節又分成若干小節。注引如“第三章 § 2c”系指第三章第 2c 節。假如所引的是同一章中的一節（或小節），我們就簡寫成 § 3（或 § 3b），等等。每一節中的公式按次序編號；注引如“(第二章 3.15)”表示第二章第 3 節的公式 15。（在該式的出處有號碼 (3.15)。）當我們引用同一章中的公式時，就略去章序，簡寫成 (2.36) 等等。

在結束时,必須強調指出作者并未要求本书的内容完整无缺。鉴于基本粒子理論包括的内容极为广泛,这种尝试将是十分不切合实际的。其次,也許除了闡述的方法有些不同以外,本书并没有提供什么嶄新的内容。

对于引用原始文献所采取的方式,或者有时未加注明原始文献的出处也許應該致以歉意。因为編写时原来打算使本书成为一本入門性质的教科书,所以要詳尽地注明原文的出处是不实际的。代替这种注引,书末附有“参考文献目录”,作为渴望获得有关基本粒子的进一步知識和希望了解比本书中所涉及的更多論題的讀者們提供一个书目。除了这个目录以外,偶尔也在正文的附注中指出参考文献。

我将十分感謝讀者对本书所提出的任何批評和修正,包括对印刷錯誤(无论是否細小的錯誤)的矯正。

P. 罗 曼

曼彻斯特,英国; 1959 年 3 月

第二版序

在准备新版时，我尽力保持本书原有的结构和特点。主要的变化是在本书末尾，增加了对去年一年内发表的新的和可能是重要的研究成果的简短评述，在正文中插入了若干新的注解，并且为了更加清楚起见，修改了若干定理的证明，此外加入了一张符号表，最后还改正了大量印刷上的和若干较大的错误。我感谢所有提醒我注意到这些错误的忠实读者。特别要感谢(斯德哥尔摩的)麦茨·罗斯博士，他提供了最详尽的勘误表。

本书的某些批评者对书中不提到色散关系方法感到遗憾。经过仔细的考虑后，我决定不去弥补这一缺点。我的理由如下：首先本书的目的是以紧凑的方式来介绍这样一些基本概念和工具，在基本粒子研究中，看来它们是最完善地被建立起来的，并且在今后的任何理论中将会继续起作用。其次，我试图尽可能地避免讨论量子场论的专门问题。在本书中，我从未尝试来实际计算任何跃迁几率或寿命，甚至于不提到 S 矩阵方法这一“经典性”工具。色散关系技术在下列两个方面都是有用的：(1) 当通常的场论方法失效时，用来进行实际计算；(2) 用来检验场论基本假设的正确性。然而我认为，在一本具有如上规定之特征的导引性著作中，无论那一方面都不能占据地位。对这类问题感兴趣的读者可以从现有的一些专门性教科书(例如，博哥留玻夫和希尔柯夫的书)中获得有关场论(包括色散技术)的知识。最后为了支持我之不愿意加入关于色散关系的一章，让我(从本书的一篇评论中)引述邱教授对一类新近发现的色散关系的评语：“也许除了对于质量和耦合常数的某些值之外，它们根本就没有解。”显然，作为教学目的来叙述这样一

个論題將有待于今后更加适当的时期。

P. 罗 曼

波士頓,馬塞諸薩州,美国; 1960 年 10 月

符 号 表

一般符号:

- α^* ——任意量 α 的复共轭,
 $\tilde{A}$ ——有限阶矩阵 A 的转置,
 ψ^T ——希耳伯空间中算符 ψ 的转置,
 $A^\dagger \equiv \tilde{A}^*$ ——有限阶矩阵的伴随矩阵,
 $\psi^* \equiv \psi^{\times T}$ ——希耳伯空间中算符的厄密共轭,
 $\bar{\psi} \equiv \psi^\dagger \gamma_4$ ——狄拉克旋量 ψ 的“狄拉克伴随”.
 (关于以上符号的詳細說明見 122~124 頁.)

群的符号:

- O_4 ——四維正交群,
 O_3 ——三維正交群,
 N_{4p} ——正四維实轉动群,
 N_3 ——实三維轉动群,
 N_{3p} ——正三維实轉动群,
 L ——齐次洛倫茲群,
 $\mathcal{L}$ ——非齐次洛倫茲群,
 L_0 ——正齐次洛倫茲群,
 C_2 ——二維单位模群,
 U_2 ——二維么正单位模群.

希耳伯空間中的算符:

- $\mathcal{P}$ ——空間反射算符,
 $\mathcal{C}$ ——粒子-反粒子共轭算符,
 $\mathcal{T}$ ——時間反演算符,
 T_k ——三維同量异位算符,
 $\mathcal{J}_k^+, \mathcal{J}_k^-$ ——四維同量异位算符.

目 录

引言 关于基本粒子知識的发展历史和目前状况	1
-----------------------------	---

第一章 四維正交群

1. 数学准备	8
1a. 群論的基本概念	8
1b. 綫性空間与算符	11
1c. 群的表示	24
1d. 环和代数	31
2. 四維正交变换	34
2a. 定义及其群性质;子群	34
2b. 无穷小变换与正子群	39
2c. 拓扑結構与非正群	44
2d. 非齐次洛倫茲群	48
3. 四維正交群及其子群的表示	51
3a. 正群的張量表示	51
3b. 正群的因子分解	57
3c. U_2 的表示	62
3d. C_3 的表示	65
3e. N_{3p} 的表示	68
3f. L_p 的表示	71
3g. 旋量分析	76
3h. N_{4p} 的表示	81
3j. 非正群的表示	82
3k. 自旋与轉动群	90

第二章 場 方 程 式

1. 張量場	98
1a. 克萊因-戈登(Klein-Gordon)方程	98
1b. 普洛卡(Proca)場和麦克斯威場	99
2. 旋量場	102
2a. 伐耶(Weyl)方程	102

2b. 狄拉克方程的旋量形式和慣用形式	105
2c. 狄拉克环的代数学	109
2d. 狄拉克环的特殊矩陣	114
2e. 狄拉克矩陣的一些特殊表示	118
2f. 狄拉克方程协变性的显示証明	124
2g. 伴随場与狄拉克协变式	128
2h. 狄拉克方程的非相对論极限	132
2j. 連續方程	136
3. 在任意自旋情形中場方程式的推广	137
3a. 狄拉克-費尔茲-泡里(Dirac-Fierz-Pauli)方程	137
3b. 凱麦(Kemmer)方程	141
3c. 在任意自旋情形下普遍的一阶矩陣微分方程	152
4. 相互作用場	157
4a. 自由場的哈密頓原理与拉格朗日量	157
4b. 相互作用拉格朗日量与耦合場的場方程式	161

第三章 場的量子化

1. 場的协变对易規則	177
1a. 对易关系的一般形式	177
1b. 特殊場的对易規則	186
2. 粒子数表象	190
2a. 場的傅里叶分解	190
2b. 傅里叶空間中的对易規則	193
2c. 粒子数, 产生与湮灭算符	194
2d. 用产生与湮灭算符表示的場的相互作用	200
3. 自旋与統計性	203
3a. 准备知識	203
3b. 一些物理可观察量的不确定性	204
3c. 对易式与反对易式之間的判定	208

第四章 不变性与选择規則

1. 对称变换及其相应的守恒定律	213
1a. 諾忒(Noether)定理	213
1b. 量子化場的守恒定律	216
1c. 能量与动量守恒定律	221

1d. 角动量守恒定律	226
1e. 电荷守恒定律	229
1f. 费米子数守恒定律	235
2. 空间反演与宇称	243
2a. 内禀宇称	243
2b. 空间宇称及其守恒性	245
2c. 玻色子衰变; π 介子的自旋和宇称	250
2d. 费米子的内禀宇称	255
2e. 关于反演不变性的一般性评论	258
3. 时间反演	260
3a. 有电磁相互作用的系统的时间反演	261
3b. 狄拉克双线性在时间反演下的性质	265
3c. 狄拉克场与赝标量场相互作用系统的时间反演	266
3d. 超选择规则	267
4. 电荷共轭变换与荷称	274
4a. 标量或赝标量场的电荷共轭变换	275
4b. 狄拉克场的电荷共轭变换	278
4c. 狄拉克协变量在电荷共轭变换下的性质	282
4d. 空间宇称和电荷共轭变换	285
4e. 荷称及其守恒性	286
4f. 应用: 傅雷(Furry)定理; 氘(Positronium); 氮	294
4g. 中微子的马约拉纳(Majorana)理论	302
5. $\mathcal{P}$, $\mathcal{C}$, $\mathcal{T}$ 变换的一般处理	308
5a. 空间反演	312
5b. 电荷共轭变换	316
5c. 时间反演	318
5d. 关于 $\mathcal{P}$, $\mathcal{C}$, $\mathcal{T}$ 变换的补充说明	323
5e. 吕德斯(Lüders)定理	327
5f. 吕德斯定理的应用: 一般性讨论; 反粒子的质量与寿命	335
6. 弱相互作用中“宇称守恒的破坏”	343
6a. θ - τ 疑难与宇称二重态理论	349
6b. 显示宇称不守恒的实验	354
6c. 在原子核 β 衰变中 $\mathcal{P}$ 不变性的破坏	360
6d. $\mathcal{C}$ 不变性的破坏; 联合 $\mathcal{PC}$ 不变性	368
6e. 中微子的二分量理论	375

6f. 广义规范变换	389
6g. 普适费米型相互作用	397

第五章 同量异位空間

1. 同量异位旋	414
1a. 唯象地引入核子的同量异位旋	414
1b. 核力的电荷无关性	419
1c. 場論中对同量异位旋的确定	424
1d. 核子-介子系統的同量异位旋及其守恒性	430
1e. 电荷对称及联合荷称	438
1f. 由同量异位旋守恒所得出的截面之間的关系	443
2. 同量异位空間表述的推广	449
2a. 奇异粒子的疑难	450
2b. 盖尔曼 (Gell-Mann) 和西島方案	452
2c. 盖尔曼方案的結論; 奇异性	460
2d. 电磁相互作用和弱相互作用	467
2e. $ \Delta t = \frac{1}{2}$ 規則	474
2f. K^0 介子理論	482
3. 同量异位空間的泊朗脫基-德斯伯納 (Prentki-d'Espagnat) 理論	494
3a. 同量异位宇称	495
3b. 粒子的分类	500
3c. 强相互作用	505
3d. 甚强和次强相互作用; 質譜	512
3e. 同量异位空間和相互作用的性质的总结; 补述	517
3f. 与同量异位反射变换有关的守恒規則	520
4. 四維同量异位空間	524
4a. 轉动算符及两种同量异位旋	524
4b. 粒子的分类	533
4c. 相互作用的分类, M 空間	538
5. 其他基本粒子理論	554
5a. 复合粒子模型	554
5b. 海森堡的非綫性理論	558
5c. 规范不变的强相互作用理論	558
参考文献	563
索引	568

引 言

关于基本粒子知識的发展历史和目前状况

关于所謂“基本粒子”的問題現在無疑地是实验和理論物理学家普遍感到兴趣与研究的中心。对这些“最后的”或“根本的”、“基本的”物质組成部分的性质的探索 and 了解自然地成为我們构成自然界物理图象的基础。可以說研究基本粒子的历史过程說明了每一个时代都反映出当时我們关于外界世界的全部物理概念。

“經典的”基本粒子，即不可分割的原子，就是經典力学的质点。这些“粒子”的性质为大家熟知的牛頓力学的法則和定律所描述，由此所获得的成果是极为可观的。但是对电磁現象的研究开創了一个新的世紀。首先明确了原子不是不可分割而是有它的内部結構，其次显然除了质点之外物理的場也是物质的一种表現形式。在那时(20世紀初)基本粒子的典范就是电子。粒子与場的二重性已經出現在物理学中。为了恢复物理学的統一性，曾經试图从电磁場来推导出电子的性质，但事实表明在当时作这种尝试是过早的。

普通量子力学的发展(1915~1928)迈进了一个新的时期。最初是部分地删除了連續性的理論；一方面电子仍由质点代表，同时它的运动却不是經典的而是由量子力学的規律来描述。最后量子場論(約在1928~1938)解决了物质的二象性問題，即基本粒子不是別的而是相应的場的“量子”。

这是大約在20~25年以前的情况。那时只知道有三种基本粒子：电子、质子和中子。所有这些都是正常的、稳定的(或“亚稳”

的)粒子,在任何場合下,它們是物质的通常組成部分.此外还有光子——电磁相互作用的傳遞者.然而不久,这一幅良好的匀称的图象就被推翻了.我們越来越快地发现了中微子, μ 介子和 π 介子,重 K 介子和各种超子以及正电子,反质子,反中子等.經驗知識的这些巨大进展是由于实验技术的重大发展:如改良过的云室,盖革-謬勒計数管,閃爍計数器,电子装备,精巧的照相乳胶和以后发展起来的气泡室,建立在高山上的观察站的广泛使用以及气球与火箭飞行等等而引起的.現在能够产生能量达到10千兆电子伏($=10^{10}$ 电子伏)甚至25千兆电子伏粒子的巨型粒子加速器的建造也大大地促进了这方面的发展.这些加速器使研究重点逐渐从观察宇宙射綫轉移到更加易于控制的人工产生的粒子方面去.

現在我們能够列出大約20种基本粒子和它們的质量以及其他属性.然而其中大多数是难以被称为“基本的”,因为它們是不稳定的;相反,具有大小相差悬殊的寿命的相互轉变現象正是这些粒子的最显著的特色.表I列出它們的主要性质[†].我們只列入了实验中观察到的粒子;因此沒有列入反超子.(其他已知的反粒子和相应的粒子标在同一栏中.)

虽然粒子的种类是如此地繁多,我們还是可以看出在它們之間存在着一些类别.首先我們看到两大群:有整数自旋的粒子(γ , π , K)和有半整数自旋的粒子(ν , e , μ , p , n , Λ , Σ , Ξ).根据在第三章中說明的理由,它們分別被称为玻色子和費米子:由同一种粒子組成的系統分別滿足玻色-爱因斯坦和費米-狄拉克統計.費米子又分成不同的兩組:质量小的粒子(ν , e , μ)称为輕子和质量大的粒子(n , p , Λ , Σ , Ξ)称为重子.除光子以外,玻色子也分为兩組:較輕的 π 介子和較重的 K 介子.(后者的几乎相等的质量和

[†] 这些数据是从1958和1959年初的許多資料中搜集来的.它們只是用来表明概況,并不一定代表“最佳”数值.

寿命指明事实上我們遇到的是有几种衰变方式的同一种粒子。表中注明了各种衰变方式的分支放射比。) 这样, 我們的推测性的分类方案是:

光子——輕子—— π 介子—— K 介子——重子。

对于表中基本粒子之間的相互作用也进行了一些詳細的研究。各种粒子之間相互作用的强度由所謂耦合常数(用 G 表示) 表征。它的确切含义以后自明。粗略地說, 我們可以按下列方式来定义耦合常数。在低能极限, 二相互作用粒子間的散射截面等于一个常数与依赖于粒子动量和其他性质(如自旋)的某个表示式的乘积。我們认为这个常数是耦合常数的平方。选择适当的单位后, 現在我們可以比較不同粒子对之間的相互作用强度。

这样, 我們发现光子按同样的方式与一切帶电粒子作用, 而相互作用强度由“精細结构常数” $e^2 = 1/137$ (单位 $\hbar = c = 1$) 表征。从核力的研究和各种散射实验以及其他实验对于 π 介子和重子的相互作用也已有了很好地了解。这些相互作用大約比我們所熟知的电磁相互作用强一千倍; 事实上我們发现相应的强耦合常数为 $G^2 \approx 15$ (单位同前)。 K 介子和重子的相互作用还没有被很好地研究过, 主要只是从散射或吸收现象获得一些了解。很可能这些相互作用与 π 介子-重子相互作用极为相似; 耦合常数为 $G'^2 \approx 3$ 。在自然界中我們还遇見一类极其弱的相互作用。正是由于它們的微弱性质, 只是在少数的已知情形中我們才能够直接研究这些相互作用(例如中微子被核子的吸收)。另一方面, 弱相互作用导致不稳定粒子的衰变。由这些我們知道(在适当的单位中)弱相互作用的强度仅为上述作用的 10^{-12} 左右。以后我們將詳細地討論弱相互作用, 这里仅指出很可能只在四个費米子之間存在基本的弱相互作用, 因此要描述任何衰变过程, 有时仅需将这种所謂普适費米相互作用与前述相互作用之一联合起来。(另一种可能性是假定在

表 I

名 称	符 号	静 质 量	自 旋	衰 变 成	寿 命 (秒)
光 子	γ	0	1	—	∞
中 微 子	$\nu, \bar{\nu}$	0	1/2	—	∞
电 子	$e^{\pm}$	1	1/2	—	∞
μ 介 子	$\mu^{\pm}$	206.85 ± 0.12	1/2	$e^{\pm}\nu\bar{\nu}$	$(2.22 \pm 0.02) \times 10^{-6}$
带电 π 介子	$\pi^{\pm}$	273.25 ± 0.12	0	$\mu^{\pm}\nu$ $e^{\pm}\nu$	$(2.65 \pm 0.05) \times 10^{-8}$
中性 π 介子	π^0	264.27 ± 0.31	0	$\gamma\gamma$ γe^+e^-	$< 4 \times 10^{-16}$
介	$\tau^{\pm}$	966.32 ± 0.43	0	$\pi^{\pm}\pi^+\pi^-$ (5.6%)	$12.7^{+1.3}_{-2.0} \times 10^{-9}$
	$\tau^{\pm}/$	同 上	0	$\pi^{\pm}\pi^0\pi^0$ (1.7%)	同 上
	$K^{\pm}_2$	965.3 ± 1.9	0	$\mu^+\nu$ (58.8%)	$11.8^{+0.8}_{-0.7} \times 10^{-9}$
	$K^{\pm}_3$	$\approx \tau$	0	$\mu^+\nu\pi^0$ (3.9%)	$\approx \tau$
		96.9 ± 0.3			平均値: $(1.224 \pm 0.013) 10^{-10}$
K 介 子					

子	子	K _短	同 上	0	e^+e^- (5.1%)	同 上
		$K_{\pm 2}^0$ 或 $\theta^{\pm}$	966.0 $\pm$ 1.5	0	$\pi^+\pi^0$ (25.6%)	12.1 $^{+1.1}_{-1.0}$ $\times 10^{-9}$
核	中性K介子	K_1^0 或 θ_1^0	976.1 $\pm$ 2.5	0	$\pi^+\pi^-$ (39%) } 49%	0.90 $^{+0.08}_{-0.08}$ $\times 10^{-10}$
		K_2^0 或 θ_2^0	同 上	0	$\pi^+\pi^+\nu; \pi^+\pi^-\nu; \pi^+\pi^-\pi^0$	9.0 $^{+2.5}_{-2.3}$ $\times 10^{-8}$
		p, $\bar{p}$	1836.03 $\pm$ 0.02	1/2	—	∞
		n, $\bar{n}$	1838.56 $\pm$ 0.02	1/2	p $e^- \bar{\nu}$	702 $\pm$ 18
重	A 粒 子	$\Lambda, (\bar{\Lambda})$	2182.39 $\pm$ 0.25	1/2	p π^- n π^0 (63%)	2.60 $^{+0.19}_{-0.14}$ $\times 10^{-10}$
		Σ^+	2327.4 $\pm$ 0.69	1/2	p π^0 n π^+ (46%)	(0.79 $\pm$ 0.08) $\times 10^{-10}$
		Σ^-	2341.3 $\pm$ 1	1/2	n π^-	1.72 $^{+0.17}_{-0.10}$ $\times 10^{-10}$
		Σ^0	2329 $^{+1.6}_{-1.4}$	1/2	$\Lambda \gamma$	$\ll 10^{-11}$
子	B 粒 子	B^-	2585 $\pm$ 6.9	1/2	$\Lambda \pi^-$	$\approx 10^{-10}$
		B^0	$\approx 2595 \pm 39$	1/2	$\Lambda \pi^0$	$\approx 1.5 \times 10^{-10}$