

现代物理基础丛书

63

粒子物理导论

杜东生 杨茂志 著



科学出版社

现代物理基础丛书 63

粒子物理导论

杜东生 杨茂志 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书着重介绍粒子物理的基础知识,同时尽可能多地介绍相关领域前沿的情况和最新成果。书中从对称性出发,相继详细介绍强子的夸克模型、电磁作用和弱作用、弱电统一理论、强作用的规范理论 QCD。其中在弱作用部分对中性 K 介子、中性 B 介子和中性 D 介子系统的正反粒子混合及 CP 不守恒做了系统介绍,在弱电统一模型部分还给出了 R_ξ 规范的费曼规则,在强作用部分详细讨论了 QCD 的重整化,对粲偶素、例外态、胶球和混杂态、格点规范等也做了简要讨论。书中还介绍了中微子振荡及轻子系统的 CP 破坏。此外,对超出标准模以外的各种新模型,如大统一理论和超对称模型等,作了简要介绍。

本书适合物理专业高年级本科生、研究生、教师和相关科研人员阅读,同时对粒子物理实验和理论研究人员也有参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

粒子物理导论 / 陈生, 杨茂志著. — 北京: 科学出版社, 2014

(现代物理基础丛书; 63)

ISBN 978-7-03-042935-3

I. ①粒… II. ①陈… ②杨… III. ①粒子物理学 IV. ①O572.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 309483 号

责任编辑: 钱 俊 鲁永芳 / 责任校对: 彭 涛
责任印制: 肖 兴 / 封面设计: 陈 敬

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>

北京信信达欣艺术印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015 年 1 月第 一 版 开本: 720 × 1000 1/16

2015 年 1 月第一次印刷 印张: 26 1/4

字数: 509 000

定价: 139.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

《现代物理基础丛书》编委会

主 编 杨国桢

副主编 阎守胜 聂玉昕

编 委 (按姓氏笔画排序)

王 牧 王鼎盛 朱邦芬 刘寄星

杜东生 邹振隆 宋菲君 张元仲

张守著 张海澜 张焕乔 张维岩

侯建国 侯晓远 夏建白 黄 涛

解思深

前 言

粒子物理是研究物质微观结构最前沿的科学. 它的发展不仅影响物理学的各个分支, 如凝聚态和固体物理、宇宙学、天体物理等, 并对整个自然科学各领域甚至其他学科, 如医学、农林等都有深远的影响. 本书的目的是向高年级本科生、研究生和青年科学工作者介绍粒子物理的基础知识, 为他们在这一领域从事理论和实验研究打下基础.

本书的两位作者曾经在中国科学院研究生院讲授粒子物理多年, 本书是在作者的粒子物理讲义的基础上对其加以扩充整理完成的. 由于近年来粒子物理实验和理论的发展都很迅速, 要想在一本书中包括所有新发展是不可能的, 但我们会尽力而为, 并且一旦可能就会加入新的发展和新的实验结果.

由于作者水平及书籍篇幅有限, 书中定有不少内容需要增加和改进, 不妥之处请读者批评指正, 作者不胜感激.

本书是在国家自然科学基金 (编号: 11375088, 11375207) 的部分资助下完成的, 特此致谢.

杜东生

中国科学院高能物理研究所

杨茂志

南开大学

2014 年 7 月

《现代物理基础丛书》已出版书目

(按出版时间排序)

- | | | |
|--------------------------|-------------|---------|
| 1. 现代声学理论基础 | 马大猷 著 | 2004.03 |
| 2. 物理学家用微分几何(第二版) | 侯伯元, 侯伯宇 著 | 2004.08 |
| 3. 数学物理方程及其近似方法 | 程建春 编著 | 2004.08 |
| 4. 计算物理学 | 马文淦 编著 | 2005.05 |
| 5. 相互作用的规范理论(第二版) | 戴元本 著 | 2005.07 |
| 6. 理论力学 | 张建树, 等 编著 | 2005.08 |
| 7. 微分几何入门与广义相对论(上册·第二版) | 梁灿彬, 周彬 著 | 2006.01 |
| 8. 物理学中的群论(第二版) | 马中骥 著 | 2006.02 |
| 9. 辐射和光场的量子统计 | 曹昌祺 著 | 2006.03 |
| 10. 实验物理中的概率和统计(第二版) | 朱永生 著 | 2006.04 |
| 11. 声学理论与工程应用 | 朱海潮, 等 编著 | 2006.05 |
| 12. 高等原子分子物理学(第二版) | 徐克尊 著 | 2006.08 |
| 13. 大气声学(第二版) | 杨训仁, 陈宇 著 | 2007.06 |
| 14. 输运理论(第二版) | 黄祖洽 著 | 2008.01 |
| 15. 量子统计力学(第二版) | 张先蔚 编著 | 2008.02 |
| 16. 凝聚态物理的格林函数理论 | 王怀玉 著 | 2008.05 |
| 17. 激光光散射谱学 | 张明生 著 | 2008.05 |
| 18. 量子非阿贝尔规范场论 | 曹昌祺 著 | 2008.07 |
| 19. 狭义相对论(第二版) | 刘 辽, 等 编著 | 2008.07 |
| 20. 经典黑洞与量子黑洞 | 王永久 著 | 2008.08 |
| 21. 路径积分与量子物理导引 | 侯伯元, 等 著 | 2008.09 |
| 22. 量子光学导论 | 谭维翰 著 | 2009.01 |
| 23. 全息干涉计量——原理和方法 | 熊秉衡, 李俊昌 编著 | 2009.01 |
| 24. 实验数据多元统计分析 | 朱永生 编著 | 2009.02 |
| 25. 微分几何入门与广义相对论(中册·第二版) | 梁灿彬, 周彬 著 | 2009.03 |

- | | | |
|----------------------------------|------------------------------------|---------|
| 26. 中子引发轻核反应的统计理论 | 张竞上 著 | 2009.03 |
| 27. 工程电磁理论 | 张善杰 著 | 2009.08 |
| 28. 微分几何入门与广义相对论(下册·第二版) | 梁灿彬, 周彬 著 | 2009.08 |
| 29. 经典电动力学 | 曹昌祺 著 | 2009.08 |
| 30. 经典宇宙和量子宇宙 | 王永久 著 | 2010.04 |
| 31. 高等结构动力学(第二版) | 李东旭 著 | 2010.09 |
| 32. 粉末衍射法测定晶体结构(第二版·上、下册) | 梁敬魁 编著 | 2011.03 |
| 33. 量子计算与量子信息原理
——第一卷: 基本概念 | Giuliano Benenti 等 著
王文阁, 李保文 译 | 2011.03 |
| 34. 近代晶体学(第二版) | 张克从 著 | 2011.05 |
| 35. 引力理论(上、下册) | 王永久 著 | 2011.06 |
| 36. 低温等离子体
——等离子体的产生、工艺、问题及前景 | B. M. 弗尔曼, H. M. 扎什京 编著
邱励俭 译 | 2011.06 |
| 37. 量子物理新进展 | 梁九卿, 韦联福 著 | 2011.08 |
| 38. 电磁波理论 | 葛德彪, 魏兵 著 | 2011.08 |
| 39. 激光光谱学
——第1卷: 基础理论 | W. 戴姆特瑞德 著
姬扬 译 | 2012.02 |
| 40. 激光光谱学
——第2卷: 实验技术 | W. 戴姆特瑞德 著
姬扬 译 | 2012.03 |
| 41. 量子光学导论(第二版) | 谭维翰 著 | 2012.05 |
| 42. 中子衍射技术及其应用 | 姜传海, 杨传铮 编著 | 2012.06 |
| 43. 凝聚态、电磁学和引力中的多值场论 | H. 克莱纳特 著
姜颖 译 | 2012.06 |
| 44. 反常统计动力学导论 | 包景东 著 | 2012.06 |
| 45. 实验数据分析(上册) | 朱永生 著 | 2012.06 |
| 46. 实验数据分析(下册) | 朱永生 著 | 2012.06 |
| 47. 有机固体物理 | 解士杰, 等 著 | 2012.09 |
| 48. 磁性物理 | 金汉民 著 | 2013.01 |
| 49. 自旋电子学 | 翟宏如, 等 编著 | 2013.01 |

50. 同步辐射光源及其应用(上册)	麦振洪, 等 著	2013.03
51. 同步辐射光源及其应用(下册)	麦振洪, 等 著	2013.03
52. 高等量子力学	汪克林 著	2013.03
53. 量子多体理论与运动模式动力学	王顺金 著	2013.03
54. 薄膜生长(第二版)	吴自勤, 等 著	2013.03
55. 物理学中的数学物理方法	王怀玉 著	2013.03
56. 物理学前沿——问题与基础	王顺金 著	2013.06
57. 弯曲时空量子场论与量子宇宙学	刘 辽, 黄超光 著	2013.10
58. 经典电动力学	张锡珍, 张焕乔 著	2013.10
59. 内应力衍射分析	姜传海, 杨传铮 编著	2013.11
60. 宇宙学基本原理	龚云贵 著	2013.11
61. B 介子物理学	肖振军 著	2013.11
62. 量子场论与重整化导论	石康杰, 等 编著	2014.06
63. 粒子物理导论	杜东生, 杨茂志 著	2015.01

目 录

前言

第 1 章 概论	1
参考文献	5
第 2 章 对称性和守恒定律	7
2.1 总论	7
2.2 作用量、运动方程和守恒量	7
2.3 宇称变换	11
2.4 电荷共轭变换	14
2.5 应用: 法雷定理, 自旋为 1 的粒子不能衰变到 2γ	17
2.6 时间反演	20
2.7 CPT 定理	26
参考文献	27
第 3 章 粒子的分类及性质: 轻子和强子	28
3.1 四种相互作用	28
3.2 轻子 轻子数守恒	30
3.2.1 电子和 μ 子及中微子	30
3.2.2 τ 子及其中微子 ν_τ	32
3.2.3 中微子的螺旋性	33
3.2.4 轻子数守恒	34
3.3 强子 重子数守恒	35
3.3.1 π 介子	36
3.3.2 核子与反核子及重子数守恒	39
3.3.3 奇异粒子	39
3.3.4 共振态	42
3.4 散射截面、粒子寿命和衰变宽度	47
3.4.1 散射截面	47
3.4.2 粒子寿命和衰变宽度	50
3.5 粒子衰变的运动学	51

3.5.1	两体衰变	51
3.5.2	三体衰变、Dalitz 图	52
	参考文献	55
第 4 章	同位旋和 G 宇称	56
4.1	同位旋	56
4.1.1	同位旋概念的提出	56
4.1.2	同位旋变换	58
4.1.3	强相互作用下的同位旋守恒定律	62
4.1.4	介子和重子的同位旋	63
4.1.5	物理过程的同位旋分析一例	66
4.2	交换对称性——广义全同性原理	68
4.3	同位旋破坏	69
4.4	G 宇称	70
	参考文献	73
第 5 章	强子的夸克模型	74
5.1	数学准备	75
5.1.1	$SU(n)$ 群表示乘积分解、杨图	75
5.1.2	$SU(3)$ 群的张量分析	78
5.1.3	$SU(3)$ 群的生成元和 Casimir 算子	80
5.2	$SU(3)$ 夸克模型、介子和重子的 $SU(3)$ 味波函数	81
5.2.1	赝标介子八重态和单态味波函数	83
5.2.2	矢量介子八重态和单态味波函数	85
5.2.3	重子八重态和十重态味波函数	87
5.3	颜色自由度	93
5.3.1	重子自旋统计关系	93
5.3.2	$\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$	94
5.3.3	e^+e^- 湮灭过程 R 值的测量	94
5.4	强子的质量公式	97
5.5	介子单态和八重态的混合	99
5.6	OZI 规则	103
5.7	$SU(6)$ 对称	104
5.8	轨道激发态和径向激发态、多夸克态和例外态	105
5.8.1	轨道和径向激发态	106
5.8.2	多夸克态和例外态	107
5.9	c, b, t 夸克的发现	107

参考文献	108
第 6 章 电磁相互作用	110
6.1 QED 及其费曼规则	111
6.2 Møller 散射	114
6.3 Bhabha 散射	118
6.4 核子的电磁形状因子	120
6.4.1 假设质子为点粒子时电子-质子弹性散射	120
6.4.2 电子-质子弹性散射	121
6.5 电子-质子非弹性散射	127
6.5.1 非弹性散射的结构函数	127
6.5.2 结构函数应用于弹性散射的情况	129
6.6 核子的部分子模型	130
6.7 部分子模型与夸克模型的统一	133
参考文献	135
第 7 章 弱相互作用	137
7.1 历史的回顾	137
7.2 弱相互作用的分类	139
7.3 原子核的 β 衰变	140
7.4 宇称不守恒的发现	142
7.4.1 τ - θ 之谜	142
7.4.2 钴 60 原子核 β 衰变中的宇称破坏	142
7.5 弱相互作用的 V-A 理论	143
7.5.1 纯轻子衰变	144
7.5.2 半轻子衰变	145
7.6 Cabibbo 理论和 GIM 机制	147
7.7 Kobayashi-Maskawa 模型	149
7.8 四费米子点相互作用的局限性和中间玻色子	151
7.9 矢量流守恒	152
7.10 手征对称破缺和 PCAC	154
7.11 中性介子的混合及 CP 不守恒	158
7.11.1 量子力学描述	159
7.11.2 $K^0 - \bar{K}^0$ 混合及 CP 破坏	164
7.11.3 $B^0 - \bar{B}^0$ 混合和 CP 破坏	174
7.11.4 $D^0 - \bar{D}^0$ 混合和 CP 破坏	185
参考文献	189

第 8 章 弱电统一的规范理论 —— 粒子物理的标准模型	192
8.1 Higgs 机制	192
8.2 Yang-Mills 理论	197
8.3 格拉肖-温伯格-萨拉姆弱电统一模型	201
8.4 真空自发对称性破缺: Higgs 机制	208
8.5 费米子质量的获得: Yukawa 耦合	216
8.6 费米子与规范场相互作用 II	221
8.7 纯规范场相互作用	223
8.8 重整化规范 (R_ξ 规范) 中的费曼规则	227
8.9 Higgs 粒子的发现	242
参考文献	244
第 9 章 强相互作用的理论 QCD	246
9.1 颜色的 SU(3) 规范对称性	247
9.2 规范场和费米子场的量子化	250
9.2.1 路径积分量子化	250
9.2.2 约化公式	256
9.2.3 规范场的量子化	258
9.3 QCD 的有效拉氏量和微扰论	265
9.3.1 QCD 的有效拉氏量	265
9.3.2 微扰展开	267
9.4 圈图修正的发散和正规化	277
9.5 发散的重整化	286
9.5.1 表观发散度	286
9.5.2 相互作用的可重整性	288
9.5.3 QCD 的重整化	292
9.5.4 重整化常数的单圈计算结果	299
9.6 BRST 对称性和推广的 Ward-Takahashi 恒等式	303
9.6.1 BRST 对称性	303
9.6.2 推广的 Ward-Takahashi 恒等式 (Slavnov-Taylor 恒等式)	306
9.7 重整化群方程及其解	310
9.7.1 重整化群	310
9.7.2 重整化群方程	316
9.7.3 重整群方程的解	320
9.8 渐近自由	322
9.9 结构函数、部分子分布函数及其在微扰 QCD 中的应用	328

9.9.1	深度非弹性散射过程的结构函数	328
9.9.2	QCD 对结构函数随 Q^2 变化的预言	331
9.9.3	应用举例	333
9.10	QCD 中部分束缚态简介	335
9.10.1	e^+e^- 对撞、粲偶素和底偶素	335
9.10.2	胶球和混杂态	336
9.11	非微扰 QCD 和格点规范理论	338
	参考文献	340
第 10 章	中微子振荡	343
10.1	中微子振荡的实验证据	344
10.1.1	大气中微子振荡	344
10.1.2	加速器中微子振荡	346
10.1.3	太阳中微子振荡	347
10.1.4	反应堆中微子振荡	349
10.2	中微子振荡的理论描述	350
10.2.1	真空中的中微子振荡	350
10.2.2	物质中的中微子振荡	353
10.3	Dirac 中微子和 Majorana 中微子	357
10.3.1	Dirac 中微子	357
10.3.2	Majorana 中微子	358
10.4	中微子质量和跷跷板机制	360
10.5	中微子混合矩阵的参数化形式	364
10.6	中微子振荡中的 CP 破坏	364
10.7	中微子质量等级问题	365
10.8	未来的发展	367
	参考文献	368
第 11 章	标准模型的扩充	370
11.1	强、弱、电三种相互作用的大统一理论	371
11.1.1	$SU(5)$ 大统一模型	371
11.1.2	$SO(2N)$ 大统一模型	386
11.1.3	味统一	387
11.2	超对称模型	387
11.2.1	超空间和超场	390
11.2.2	整体超对称和定域超对称 (超引力)	391
11.2.3	整体超对称理论和最小超对称标准模型	391

第1章 概 论

粒子物理是研究基本粒子之间相互作用、相互转化规律的科学. 其主要目的是要找到一种既简单又普遍的物理原理来统一解释基本粒子之间五花八门的相互作用、相互转换现象. 例如, 麦克斯韦方程可统一解释所有电磁现象, 弱电统一理论可统一解释弱作用与电磁作用的各种现象等.

当然, 时至今日, 我们还没有找到一个基本理论可以统一描写所有粒子的各种现象. 虽然超弦理论 (10 维空间) 和膜理论 (11 维空间) 可以把四种力都统一起来, 但这两种理论在紧致到 4 维 ($3 + 1$ 维) 现实时空时都遇到了严重困难. 这个问题还需进一步研究.

粒子物理又称作“基本粒子物理”或“高能物理”, 后两种叫法是历史上延续下来的.

基本粒子是质子、中子、介子、超子、电子、光子、中微子等的总称. “基本”之意即不可分也! 历史上人们认为上述粒子是构成物质世界的最小单元, 不能再分割了. 研究这些基本粒子相互作用及相互转化规律的学科就称作“基本粒子物理”. “高能物理”的命名来源于研究基本粒子性质所需付出的能量比研究原子物理、原子核物理都要高, 故起名高能物理. 实际上要打碎原子或者说要把一个电子从原子中打出来大约需要花费 10 eV 的能量. 但是要把一个核子 (质子或中子) 从原子核中打出来则需要花费 10MeV 的能量, 比打碎原子花的能量高 100 万倍. 打碎质子、中子等“基本粒子”要花多少能量呢? 至少要几百兆电子伏特以上, 即比打碎原子核花费的能量还要高几十倍、几百倍以上. 从这里可以看出, 高能、低能的分法并没有绝对的标准, 因此用“高能物理”和“低能物理”命名不够确切. 而今天我们已经知道“基本粒子”并不基本, 仍然可以再分. 所以从现代观念来说, “基本粒子物理”的叫法也不科学, 所以“粒子物理”的叫法是比较贴切的.

当然要给粒子物理下一个严格定义是困难的. 不管哪一种定义, 实际上其核心是想说明“粒子物理”这一门学科要研究的是物质微观结构及自然界基本相互作用的本质. 由此可见, 粒子物理是研究物质微观结构及其规律的最前沿学科.

1957 年国际纯粹与应用物理学会 (IUPAP) 给粒子物理的定义是“研究物质基本组分的性质及其相互作用的科学”. 但这个定义今天看来需要增加新的内容了. 为什么呢? 因为近年来宇宙学和天体物理有了重大发展, 这些新发展和新发现把粒子物理与宇宙学及天体物理联系起来. 天文学家的观测发现, 超新星爆发时发出的光线的红移比起用已有的距离和红移关系的经验公式推算出的要大. 这表明超新

星在加速地远离我们而去, 即宇宙在加速膨胀. 这需要负压强. 一种可能的选择是宇宙空间充满暗能量, 约占宇宙中总能量密度的 73%, 另外 23% 是暗物质, 4% 是重子, 其中只有 1% 是可见物质 (星系、尘埃等). 暗能量会提供宇宙加速膨胀的负压强. 暗能量到底是什么? 是某种标量场还是爱因斯坦宇宙常数? 至今没有定论. 当前, 暗物质、暗能量都是粒子物理研究的前沿课题. 此外, 大爆炸后宇宙早期的发展演化和重子-反重子不对称的形成, 以及宇宙从无到有、原子核形成和星系形成的过程都要靠粒子物理去解释. 所以当今形成了两门新兴交叉学科即“粒子宇宙学”和“粒子天体物理学”. 此外, 中微子物理的发展与天体物理结合又形成了“中微子天文学”的新兴交叉学科. 鉴于以上近年来的发展, 美国国家高能物理 21 世纪长远规划顾问组 (High Energy Physics Advisory Panel, HEPAP)^[1] 给粒子物理下的定义为“高能物理是相互作用的科学”(High energy physics is the science of interactions). “相互作用又是物质、空间和时间的科学”(Interactions, the science of matter, space and time). 考虑到至今我们对宇宙中暗能量的本质仍不清楚, 我们可以给粒子物理 (或高能物理) 下个新定义, 即“粒子物理 (高能物理) 是研究物质、能量、空间和时间的科学”(Particle physics (high energy physics) is the science of matter, energy, space and time). 这个新定义更确切、更包容, 更具时代特色. 本书的内容完全反映了新定义的深刻的内涵.

最早发现的“基本粒子”是电子^[2] (1897 年, J. J. Thomson 在阴极射线中首次测得带负电粒子的荷质比 e/m , 1899 年他又测得电荷). 光子 γ 作为粒子被首次提出是 1905 年的事^[3] (Einstein 解释光电效应). 但这个看法 20 多年后才为物理学界所公认 (Einstein 因光电效应而获诺贝尔奖). E. Rutherford 用 α 粒子轰击氮而发现质子^[4] (1919 年). 1932 年, J. Chadwick 仔细做了居里夫妇在 1931 年做的实验 (α 轰击铍靶) 首次证实中子的存在^[5]. 同年 (1932 年) C. D. Anderson 用云室观测宇宙线的实验中发现了正电子^[6] (当时 Anderson 也不知道 Dirac 理论早已预言了正电子). 我国科学家赵忠尧在此之前发现了湮灭辐射 (实际上是 $e^+e^- \rightarrow 2\gamma$), 已走到了发现正电子的边缘. 此后, 宇宙线实验中发现了一系列的粒子: μ 子^[7], π 介子^[8], K 介子^[9]. 到了 20 世纪 50 年代由于人工加速器的出现, 一大批粒子及共振态被发现, 如 Λ , Σ , Ξ , Δ_{33} , \bar{p} , \bar{n} 等. 从此基本粒子性质的研究改变了“靠天吃饭”的局面, 而可按照人的意愿制造各种加速器来实现. 此后几年内“基本粒子”的数目增至上百种. 与化学元素的门捷列夫周期表相比, 人们自然想到, 这上百种基本粒子不可能都是“基本”的, 一定存在着内部结构的规律. 上百种粒子和共振态的存在为夸克模型的建立打下了基础.

为了给“基本粒子”分类, 我们先回到自然界基本的相互作用上来. 我们知道自然界存在四种基本的相互作用: 引力、弱作用力、电磁力、强作用力 (核力), 其作用强度可用无量纲的耦合常数标识如下:

引力: $\frac{G_N m_N^2}{\hbar c} \sim 0.6 \times 10^{-38}$, 力程为 ∞

弱作用: $G_F m_N^2 \frac{c}{\hbar^3} \sim 10^{-5}$, 力程为 10^{-16}cm

电磁作用: $\frac{e^2}{4\pi\hbar c} \sim 10^{-2}$, 力程为 ∞

强作用: $\frac{g_s^2}{4\pi} \geq 1$, 力程为 10^{-13}cm

上述常数是在能标为 $m_N \sim 1 \text{GeV}$ 的值, 实际上耦合常数的值与能量标度有关. 如电磁作用在 1GeV 时, $\alpha = \frac{e^2}{4\pi\hbar c} \sim \frac{1}{137}$, 在能标为 100GeV 时变大至 $\alpha \cong \frac{1}{128}$. 而强作用 $\alpha_s = \frac{g_s^2}{4\pi}$ 在能标 $\rightarrow \infty$ 时, 而渐渐趋于零 (渐近自由).

引力在基本粒子之间的作用极其微弱, 在绝大多数我们所做的观测中不起重要作用, 一般忽略不计.

搞清楚自然界四种力的强度我们就可以给基本粒子分类了.

凡是参与强相互作用的粒子 (当然同时可参与其他相互作用) 统称为“强子” (hadron). 强子包括介子和重子. 介子有 π, K, ρ, K^* 等. 重子包括质子和中子及 Λ, Σ, Δ 等自旋 $1/2, 3/2$ 的粒子. 它们之所以称为重子是因为它们的质量比介子重. 不受强作用影响的粒子并且比介子轻的费米子称为“轻子”. 但有一个例外即重轻子 τ . 它的质量约为质子的两倍. 但其物理性质与 e 和 μ 完全一样, 所以叫重轻子. 总起来说, $p, n, \pi, \Lambda, \Sigma, \Delta$ 等为强子, $e, \mu, \tau, \nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$ 等为轻子.

前面已经提到, 已发现的上百种强子不可能都是不可分的, 一定还有内部结构.

1956 年, Hofstadter 等^[10] (Stanford University), 首先在实验上观测到质子的电荷和磁矩是分布在一个有限的空间内, 中子磁矩也是分布在有限空间范围内, 从而证实了质子和中子都有内部结构.

1964 年, M. Gell-Mann^[11] 提出了夸克模型, 认为所有强子都由 u, d, s 三种夸克及其反夸克构成, 用 $SU(3)$ 、 $SU(6)$ 对称对强子结构分类风靡一时. Gell-Mann 因此荣获了 1969 年度诺贝尔物理学奖.

1967 年后^[12] 在美国斯坦福大学电子直线加速器中心的电子-核子深度非弹性散射实验发现了核子结构函数的无标度 (scaling) 现象, 证明了在高能下入射电子看到了质子内部大量自旋为 $1/2$ 的几乎自由运动的点电荷, 称之为部分子 (parton), 从而催生了部分子模型 (parton model) 的建立^[13], 并确认强相互作用有渐近自由特性 (当能量极高时强作用变弱, 能量趋于无穷, 强作用强度趋于零). 而 1973 年建立的 QCD (量子色动力学) 理论^[14] 则把质子的低能图像 (由 uud 三种价夸克组成) 和高能图像 (由 uud 价夸克和无数正反夸克对儿 $q\bar{q}$ 和胶子组成, 但入射电子看不到质子里的胶子) 统一起来了.

1974 年丁肇中和 Richter^[15] 分别在 BNL(布鲁海文) 和 SLAC(斯坦福直线加速器中心) 发现 J/Ψ 粒子 ($c\bar{c}$ 组成), 从而粲粒子被发现, 证实了第四种“味道”(flavor) 的夸克 c 的存在.

1977 年, L. Lederman^[16] 在费米实验室 400GeV 质子轰击核靶实验中发现了新粒子 $\Upsilon(9.5\text{GeV})$. 这个新粒子实际上是 b 夸克及其反粒子 \bar{b} 的束缚态 ($b\bar{b}$), 从而证实了第五种“味道”夸克 b 的存在.

1994 年费米实验室 CDF 组^[17] 发现了顶夸克 (top, 缩写为 t) 的存在, 其质量约为质子质量的 180 倍.

至此, 我们共发现了 u, d, s, c, b, t 等 6 种不同味的夸克, 每种“味”(flavor) 还有三种不同的“色”(color). 这三种不同色的同味夸克的质量、自旋等都相同, 只是“color”量子数不同. color 量子数的存在已被 $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$ 和 $R = \frac{\sigma(e^+e^- \rightarrow \text{hadrons})}{\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)}$ 的实验测量所证实 (见第 5 章强子的夸克模型).

日内瓦大型 e^+e^- 对撞机 LEP 上 $Z^0 \rightarrow \nu\bar{\nu}$ 的实验证实, 质量小于 $m_Z/2 \sim 45.5\text{GeV}$ 的中微子只有三种, 即 ν_e, ν_μ, ν_τ . 现在物理学界普遍认为, 夸克和轻子只有三代 (或三个家族), 即

$$\begin{array}{ccc}
 \text{第一代} & \text{第二代} & \text{第三代} \\
 \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix} \\
 \begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau \end{pmatrix}
 \end{array}$$

至于为什么只有三代还有待实验和理论的进一步研究.

从粒子理论的发展看, 历史上经历了几次重大突破.

1905 年, A. Einstein^[18] 提出了狭义相对论, 使人类对自然界的认识从牛顿力学上升到了相对论力学.

1923 年, L. de Broglie^[19] 提出物质波的概念, 并且在 1926 年由 E. Schrödinger^[20] 在物质波概念基础上建立波动力学 (非相对论量子力学), 使人类对微观世界的规律的认识有了革命性的突破.

1927 年, P. A. M. Dirac^[21] 首先将电磁场量子化.

1928 年, Dirac 把非相对论量子力学与狭义相对论结合提出了 Dirac 方程^[22], 反粒子的概念问世, 使人类对微观世界的认识又前进了一大步.

1929 年, Heisenberg 和 Pauli^[23] 建立了量子场论的普遍形式.

1943~1949 年, 建立了协变场论^[24].