



普通高等教育“十五”国家级规划教材配套参考书

基础物理学教程 教学参考书

第二版

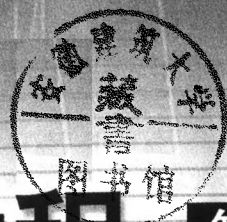
陆 果 陈凯旋



高等教育出版社
Higher Education Press



普通高等教育“十五”国家级规划教



基础物理学教程

教学参考书

第二版

陆 果 陈凯旋



高等教育出版社
Higher Education Press

内容简介

本书是为配合普通高等教育“十五”国家级规划教材和“面向 21 世纪课程教材”《基础物理学教程》(第二版)(陆果, 高等教育出版社, 2006)而编写的教学参考书。《基础物理学教程》(第二版)是依照新的教学基本要求, 从现代科学技术的发展及对人才培养的要求出发进行修订的, 在内容方面充分体现了现代化的特色, 涉及面较广。为了帮助使用《基础物理学教程》(第二版)的教师和学生更深刻地掌握其基本内容并开阔视野, 本书简明扼要地讲述了以下三方面的内容: 物理学和高技术前沿、习题精析提要以及常用的数学结果等。由于在内容上保持了相对的独立性, 对于那些并不采用《基础物理学教程》(第二版)作为教材的读者, 本书也是学习物理学的一本很有用的参考书。

本书可作为高等学校理科非物理类专业的教学参考书, 也可供其他专业选用和社会读者阅读。

图书在版编目(CIP)数据

基础物理学教程(第2版)教学参考书/陆果, 陈凯旋
著. —北京: 高等教育出版社, 2007. 6
ISBN 978-7-04-021800-8

I. 基… II. ①陆…②陈… III. 物理学—高等学校—教
学参考资料 IV. 04

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第075012号

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010-58581118
社 址	北京市西城区德外大街 4 号	免费咨询	800-810-0598
邮政编码	100011	网 址	http://www.hep.edu.cn
总 机	010-58581000		http://www.hep.com.cn
经 销	蓝色畅想图书发行有限公司	网上订购	http://www.landaco.com
印 刷	北京嘉实印刷有限公司		http://www.landaco.com.cn
		畅想教育	http://www.widedu.com
开 本	787×960 1/16	版 次	2007 年 6 月第 1 版
印 张	27.5	印 次	2007 年 6 月第 1 次印刷
字 数	510 000	定 价	34.10 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题, 请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 21800-00

前 言

本书是为配合普通高等教育“十五”国家级规划教材和“面向 21 世纪课程教材”《基础物理学教程》(第二版)(陆果, 高等教育出版社, 2006) 而编写的教学参考书。《基础物理学教程》(第二版) 参照教育部高等学校物理学与天文学教学指导委员会颁发的《非物理类理工学科大学物理课程教学基本要求》, 在确保基本要求的基础上, 强调了量子物理(包括量子统计)的重要性, 进一步增加了从物理前沿进展中提炼出来的部分基础物理内容, 力求使非物理类理工学科的大学生也能有扎实的物理基础来面对飞速发展的现代科学技术的挑战。

自 1999 年 10 月《基础物理学教学参考书》出版以来, 经过七年的教学实践, 感到有必要对全书进行修订。这次修订, 首先, 将书名更改为《基础物理学教程教学参考书》, 纠正了一些错误或不准确的叙述, 增加了关于近年来科学技术新进展的内容。其次, 配合《基础物理学教程》(第二版)的修订, 增删了部分习题。同时, 将习题解答分为以下几种不同的类型: 一些最基本的习题, 只给出答案; 一些内涵较丰富的习题充实了解答的物理内容, 有的还给出了多种解法; 在量子力学和统计物理学部分, 给出了较详尽的推导和说明。

在本书的编写和修订过程中, 我们阅读了国内外许多同类教材以及相关杂志的文章, 受益匪浅。特别是, 中国科学院高能物理研究所黄涛先生对本书第一部分第一章“粒子物理的标准模型”进行了修改, 许多老师和同学给予了热情的帮助, 北京大学薛立新同志、高等教育出版社刘伟、王文颖和陈钧元同志为本书的出版做了大量的工作, 我们在此谨致以衷心的感谢。

由于我们的学识有限, 缺点和错误在所难免, 诚恳地希望读者提出宝贵的意见。

陆 果 陈凯旋

2007 年元月于北京大学

第一版参考书前言

20 世纪初, 物理学家揭开了原子内部结构的奥秘, 建立了相对论和量子力学。1995 年, 顶夸克的发现向人们宣告, 六种夸克及其反粒子和胶子是构成质子和中子等强子的更为基本的粒子。1998 年, “发现号” 航天飞机搭载阿尔法磁谱仪首次升空试验取得了成功, 开始了直接到太空中探测和寻找宇宙中的反物质和暗物质的大型国际合作科学试验。今天, 人们已经建立起了粒子物理的标准模型和宇宙学的标准模型, 并继续探求着浩瀚的未知世界。在研究领域不断取得丰硕成果的同时, 科学与技术迅速地、创造性地融合在一起, 形成了一系列高、新技术部门。

随着科学技术的飞速发展, 学科发展的方向日趋综合, 新型的交叉学科不断出现并迅速发展。同时, 近代物理学的概念、研究方法和实验技术在生物学、化学和地学等学科中已得到了广泛的应用。特别是, 近代化学和生物学的发展已经深入到了微观领域, 近代数学的发展与近代物理学的发展更是密切相关和相互促进的。因此, 物理学, 特别是近代物理学, 已经成为各类人才所必须具备的基础知识。

我们正在培养 21 世纪的人才, 教学和教材内容的更新势在必行。特别是, 对于大学理科非物理类专业, 除了普通物理课程之外, 一般没有物理方面的后继课程。然而, 原来的普通物理课程基本上是参照物理专业的普通物理课程设置的, 近代物理学的内容很少, 更缺少反映当代物理学及其前沿发展的内容。

为此, 从现代科学技术的发展以及理科各个学科人才培养的要求出发, 我们对物理课程的框架作了较大的变动, 编写了《基础物理学》(陆果. 北京: 高等教育出版社, 1997), 其内容分为五个部分: 力学和相对论、电磁学、光学、量子力学、热物理学。在内容上, 不论原来是普通物理的内容还是理论物理的内容, 不论是经典物理的内容还是近代物理的内容, 只要是当今理科大学学生应该掌握的物理基础, 就在精心选择、重新组织和整理之后编写在本套书中。我们希望, 即使是大学低年级的学生, 也能够有限的时间将发展到今天的物理学的基础和精华学到手, 为他们未来的创造性工作打下较好的物理基础。

《基础物理学教程》(陆果. 北京: 高等教育出版社, 1998) 是在面向 21 世纪课程教材《基础物理学》的基础上, 根据近年来的教学实践及读者的意见改写而成的, 删减了部分涉及数学较深或理论性较强的内容, 减少了篇

幅。该教程是教育部“高等教育面向 21 世纪教学内容和课程体系改革计划”的研究成果,希望能够达到如下的目标:不仅牢牢地把握住《基础物理学》的基本要求,保持并发扬《基础物理学》在课程现代化方面的成功之处,而且更适合于各类高等理工院校学生使用。

由于近年来物理学在各个领域都有重大的发展,而且《基础物理学》和《基础物理学教程》涉及面很广,因此无论对于教师还是对于学生,在使用这套教材的过程中都会遇到一定的困难。为了帮助有关师生更深刻地掌握其基本内容并开阔视野,我们编写了本书,简明扼要地讲述了以下三个方面的内容:物理学和高技术前沿(包括粒子物理的标准模型、宇宙学的标准模型、非线性科学的基本概念、生命科学中的物理问题和高技术研究等五章)、习题精析提要以及常用的数学结果,最后还给出了诺贝尔物理学奖获得者的简况表。由于在内容上保持了相对的独立性,因此对于那些并不采用《基础物理学》或《基础物理学教程》作为教材的读者,本书也是学习物理学的一本很有用的参考书。

本书的第二部分第一章到第十四章以及第三部分由陈凯旋编写,其余由陆果编写。全书的计算机排版工作由北京大学薛立新同志完成,高等教育出版社胡凯飞同志为本书的出版做了大量的工作。通过立项,我们得到了教育部和北京市教育局的资助。许多专家和学者对我们的工作给予了热情的支持和帮助。《基础物理学》、《基础物理学教程》以及本书的第二部分(习题精析提要)在北京大学多年使用的过程中,广大教师和学生提出了许多宝贵的意见和建议。对于所有这些帮助,我们在此谨致以衷心的感谢。

由于我们的学识有限,缺点和错误在所难免,诚恳地希望读者提出宝贵的意见。

陆 果 陈凯旋

1999 年 6 月于北京大学

目 录

第一部分 物理学和高新技术前沿

第一章 粒子物理的标准模型	1
§ 1-1 粒子物理的发展	1
一 第一阶段	1
二 第二阶段	2
三 第三阶段	3
§ 1-2 粒子的内禀属性和守恒定律	6
一 质量、质量宽度和寿命	7
二 电荷	9
三 自旋	10
四 同位旋	10
五 重子数和轻子数	11
六 奇异数、粲数、底数和顶数	11
七 宇称和 CPT 定理	12
§ 1-3 粒子物理的标准模型	13
一 粒子的分类和基本性质	13
二 粒子之间的基本相互作用	15
三 粒子世界探秘	16
参考文献	19
第二章 宇宙学的标准模型	20
§ 2-1 宇宙和宇宙学	20
一 亮星、银河和星系世界	20
二 宇宙大尺度特征的观测事实	21
§ 2-2 宇宙学的标准模型	30
一 爱因斯坦宇宙和弗里德曼宇宙	30
二 宇宙膨胀的规律和宇宙物质状态的描述	34
三 热大爆炸的观念	36
四 宇宙演化的过程	37
五 宇宙学标准模型的成功和困难	43

参考文献	48
第三章 非线性科学的基本概念	49
§ 3-1 非线性科学的研究对象	49
§ 3-2 混沌	51
一 混沌现象	51
二 非线性映射的宏观特性	51
三 洛伦茨方程和奇怪吸引子	56
§ 3-3 分形	59
一 分形理论的创立	59
二 分形维数	60
三 分维的计算	61
四 分维的测定	64
§ 3-4 非线性科学的一些研究方法	65
一 重正化群方法.....	66
二 实验数学方法.....	68
三 元胞自动机	68
参考文献	69
第四章 生命科学中的物理问题	70
§ 4-1 生命科学与物理学	70
一 近代生命科学的发展	70
二 生命科学与物理学的交叉	71
§ 4-2 细胞	73
一 细胞的大小	73
二 细胞的化学组成.....	74
三 细胞膜	75
四 细胞质和光合作用	77
五 细胞核和遗传基因	80
六 细胞的全能性和克隆	80
§ 4-3 蛋白质和核酸	82
一 蛋白质	82
二 核酸、遗传和分子生物学的中心法则	85
三 生物大分子中的相互作用	93
四 生物大分子中的电子	94

五	生物大分子的手征性	95
六	结构生物学的形成和发展	96
七	系统生物学的形成和发展	98
§ 4-4	生命信息的遗传和表达	100
一	遗传密码	100
二	基因工程	101
§ 4-5	生命过程中的自组织现象	102
一	生命过程的热力学	102
二	生命起源的自组织问题	105
参考文献		107
第五章	高新技术研究	108
§ 5-1	概述	108
§ 5-2	信息技术	109
一	计算机技术	109
二	人机交互与智能处理技术	110
三	软件技术	111
四	通信技术	111
五	生物信息与脑科学	112
六	微电子、光电子与微系统技术	112
七	信息存储与显示技术	113
八	信息获取与传感技术	113
九	网络技术	114
十	信息安全技术	114
十一	广播电视技术	114
§ 5-3	现代通信的新兴领域	115
一	卫星通信	115
二	新型光纤通信	119
三	移动通信	120
§ 5-4	生物技术	120
一	生物平台技术	121
二	生物检测与仿生技术	121
三	生物催化与生物转化技术	122
四	农业与环境生物技术	122
五	疾病预防和治疗	122

六 新药的发现与开发	123
七 干细胞与再生医学	123
八 脑与认知科学	123
§ 5-5 新材料技术	124
一 高分子材料	124
二 金属材料	125
三 无机非金属材料	125
四 功能材料	126
五 光电子材料	126
六 纳米材料	128
§ 5-6 能源技术	129
一 化石能源 研究开发新能源的必要性	129
二 电能	131
三 核能	132
四 氢能	133
五 可再生能源	134
参考文献	136

第二部分 习题精析提要

第一章 质点运动学	137
第二章 动量守恒和质点动力学	144
第三章 机械能守恒	161
第四章 角动量守恒	178
第五章 连续体力学	195
第六章 振动和波	212
第七章 相对论	223
第八章 电相互作用和静电场	237
第九章 静电场中的导体和电介质	244
第十章 电磁相互作用	251
第十一章 恒定磁场和磁介质	267
第十二章 电磁感应	272
第十三章 电路	282

第十四章 电磁场和电磁波	293
第十五章 光的干涉	299
第十六章 光的衍射	306
第十七章 光的偏振	312
第十八章 光的吸收、散射和色散	316
第十九章 从经典物理学到量子力学	319
第二十章 波函数与薛定谔方程	329
第二十一章 力学量与本征态	349
第二十二章 有心力场和电磁场中的粒子	359
第二十三章 自旋和全同粒子	365
第二十五章 热力学基础	371
第二十六章 统计物理学基础	383
第二十七章 热力学第二定律和第三定律	389
第二十八章 均匀物质的统计热力学	394
第二十九章 相变和临界现象	409

第三部分 附 录

附录一 常用的数学结果	413
附录 1.1 偏导数和全微分	413
一 偏导数	413
二 全微分	413
三 复合函数的微分法	414
四 隐函数的微分法	415
附录 1.2 矢量分析和场论	415
一 标量场的梯度 矢量场的散度和旋度	415
二 定理	416
三 常用的运算公式	416
附录 1.3 积分	417
一 高斯积分和 Γ 函数	417
二 其他积分公式	418
附录二 常用的物理常量和数据	419
附录 2.1 基本物理常量(2002 年国际推荐值)	419

附录 2.2 保留单位和标准值	419
附录 2.3 太阳系的基本数据(I).....	420
附录 2.4 太阳系的基本数据(II).....	420
附录三 诺贝尔物理学奖获得者简介	421

第一部分 物理学和高新技术前沿

第一章 粒子物理的标准模型

§ 1-1 粒子物理的发展

粒子物理学(particle physics)又称为**高能物理学**(highenergy physics), 是物理学的一个分支学科. 粒子物理学研究比原子核更深层次的微观世界中物质的结构性质, 以及在很高能量(GeV)下这些物质相互转化的现象和产生这些现象的原因与规律.

人们一直在探索物质世界微观结构和相互作用的基本规律. 在不同的能量尺度上, 人们发现了物质世界不同层次的微观结构, 最终的层次很可能并不存在. 在实验和理论密切结合的发展过程中, 大致经历了以下三个阶段.

一 第一阶段

1897 年, 汤姆孙(J.J.Thomson, 1856—1940)在实验上发现了电子. 1911 年, 卢瑟福(E.Rutherford, 1871—1937)利用 α 粒子大角度弹性散射实验, 证实了原子中原子核的存在并发现了质子. 1932 年, 查德威克(J.Chadwick, 1891—1974)在用 α 粒子轰击原子核的实验中, 发现了中子. 随后, 伊凡宁柯(Д.Д.Иваненко, 1904—1980)和海森伯(W.K.Heisenberg, 1901—1976)独立发表了原子核由质子和中子构成的假说.

1905 年, 爱因斯坦(A.Einstein, 1879—1955)提出电磁场的基本结构单元是光子, 并在 1922 年为康普顿(A.H.Compton, 1892—1962)等人的实验所证实. 1930 年, 泡利(W.E.Pauli, 1900—1958)从理论上提出了 β 衰变时放出中微子的假说, 并在 1956 年为雷恩斯(F.Reines, 1918—)和考恩(C.L.Cowan, 1919—)的实验所证实.

1928 年, 狄拉克(P.A.M.Dirac, 1902—1984)提出了电子的相对论性波动方程, 其能量和动量满足相对论关系式

$$E^2 = p^2 c^2 + m_0^2 c^4. \quad (1.1)$$

若给定电子的动量 p , 则电子可以有正负两个能态, 即

$$E = \pm \sqrt{p^2 c^2 + m_0^2 c^4}. \quad (1.2)$$

在正能范围的最小值 $m_0 c^2$ 和负能范围的最大值 $-m_0 c^2$ 之间, 有一个宽度为

$\Delta = 2m_0c^2$ 的能隙。在经典物理中，一切运动和变化都是连续的，一个原先为正能的物体是不可能通过连续变化而越过如此巨大的能隙变为负能的，因此可以只保留正能解而舍去负能解。然而，量子力学不仅允许这种不连续的变化，而且用狄拉克方程可以算出电子从正能态跃迁到负能态的概率。这意味着正能电子是不稳定的，而且由于负能级没有下限，电子可以无限地跃迁下去。为了克服这个负能困难，狄拉克在 1930 年提出了空穴理论。

狄拉克假设，可以把真空看成是所有负能级都已填满电子的负能电子海。由于泡利不相容原理，正能电子不能跃迁进入负能电子海，从而是稳定的。然而，只要有大于 $2m_0c^2$ 的能量传递给负能电子，就可以把一个负能电子激发到正能态，从而在负能电子海中产生一个空穴(hole)。这个空穴相当于负能电子海中的一个正能粒子，它除了电荷和磁矩与电子相反外，质量、自旋及其他性质都与电子相同，称为正电子(positron)。1932 年，安德森(C.D. Anderson, 1905—)在宇宙线(cosmic ray)中观测到了正电子。

按照狄拉克的空穴理论，一切粒子都有其相应的反粒子(antiparticle)。反粒子最突出的特点是会与其相应的粒子发生湮没(annihilation)，正、反粒子的产生(creation)和湮没是粒子物理中的普遍现象。这个发现所揭示的正、反粒子对称性，是粒子物理最基本的对称性，从此对称性一直是粒子物理研究的基本观念之一。

二 第二阶段

1934 年汤川秀树(H. Yukawa, 1907—1964)提出，强相互作用是由核子(包括质子和中子)之间交换介子(meson)引起的，介子质量是电子质量的 200~300 倍^①。1936 年，安德森和尼德迈耶(S.H. Nedermeyer, 1907—)在宇宙线中发现了 μ 子，尽管它的质量是电子质量的 207 倍，但后来发现它并没有强相互作用。1947 年，鲍威尔(C.F. Powell, 1903—1969)等人用核乳胶技术探测宇宙线，发现了称为 π 介子的粒子，质量是电子质量的 273 倍，这正是汤川秀树所预言的介子。

① 对于两个核子之间通过交换虚介子而发生相互作用的过程，可以把核子能量的不确定度 ΔE 估计为介子的能量 mc^2 ，若介子的传播速率用光速 c 估计，则虚介子从一个核子传播到距离 Δx 的另一个核子处所需要的时间约为 $\Delta t \approx \Delta x/c \approx a/c$ ，其中 a 为强相互作用的力程。若设 $a \approx 2 \text{ fm}$ ，则由不确定关系 $\Delta E \cdot \Delta t \approx \hbar$ 可得介子的能量约为

$$mc^2 \approx \Delta E \approx \hbar / \Delta t \approx \hbar c / a \approx 100 \text{ MeV} \approx 200 m_e c^2.$$

汤川介子场论在核力的长程范围内取得了巨大的成功，但是在核力的短程范围内却遇到了严重的困难。从夸克层次研究核力的本质，是现代核物理学的重要研究方向之一。

为了克服宇宙线流强太弱的限制,人们从 20 世纪 30 年代开始建造能量越来越高、流强越来越大的**粒子加速器**(particle accelerator),并相继发现了新的强有力的探测手段,如**气泡室**(bubble chamber)和**火花室**(spark chamber)等.到 60 年代初,实验上观测到了大量的称为**强子**(hadron)的粒子^①,并证实了所有粒子都有相应的反粒子^②,有的粒子的反粒子就是它自身.这些所谓的“基本粒子”的大量发现,使人们对它们的“基本”性产生了怀疑.

自然界中基本相互作用包括四种:**强相互作用**(strong interaction)、**电磁相互作用**(electromagnetic interaction)、**弱相互作用**(weak interaction)和**引力相互作用**(gravitational interaction).已经发现的粒子,除了各种相互作用的媒介粒子称为**规范玻色子**(gauge boson)以外,按它们是否直接参与强相互作用,可以分为**强子**和**轻子**(lepton).

这个阶段理论上的重要进展是**量子场论**(quantum field theory)和**重正化**(renormalization)理论的建立以及关于相互作用中对称性的研究.例如,确立了对称性在弱相互作用中的破坏,提出了强子分类的 SU(3)对称性,确立了**量子电动力学**(quantum electrodynamics,简称 QED)是微观领域电磁相互作用的基本理论.

三 第三阶段

粒子物理学是 20 世纪 40 年代开始从原子核物理学中分出来的,它从一开始就作为研究场和粒子的性质、运动、相互作用和相互转化规律的学科出现.但它作为研究粒子内部结构规律的学科,则是在 60 年代才充分发展起来的.在 60 年代,它取得了两个重大的突破性进展:一个是强子结构的夸克模型的确立,另一个是电弱统一理论的成功.

(1) 强子结构的夸克模型的建立

强子是参与强相互作用的粒子.强子分为介子(自旋为 $\hbar$ 的整数倍)和**重子**(baryon, 自旋为 $\hbar$ 的半奇数倍).

强子并非基本粒子的想法,最早是由费米(E.Fermi, 1901—1954)和杨振宁(1922—)在 1949 年提出来的.1958 年,能量约为 1 GeV 的电子在核子上的散射实验表明,核子不是一个点粒子,而是在半径为 0.8×10^{-15} m 范围内有着确定的电磁分布的物理实体.

① 这包括了大量的**共振态**(resonance state)粒子,通过强相互作用产生和衰变,寿命极短,约 10^{-24} s $\sim$ 10^{-22} s.

② 1996 年 1 月,欧洲核研究中心(CERN)宣布制得了 11 个由正电子和反质子组成的反氢原子.

1961 年, 盖尔曼(M.Gell-Mann, 1929—)和奈曼(Y.Neeman, 1925—)提出了用 SU(3)对称性对上百种强子分类的“八重法”。这种分类很好地说明了强子的自旋、宇称、电荷、奇异数及质量等性质的规律性, 它就是粒子物理中的周期表。在八重法分类中, 不但当时已经发现的粒子都有了自己的位置, 而且还准确地预言了新的粒子。1964 年, 排在重子十重态图(见后, 如图 1-3 所示)最后一个位置上的重子 Ω^- 的发现, 标志着粒子物理 SU(3)对称性理论的确立。

1964 年, 盖尔曼和兹维格(G.Zweig, 1937—)从 SU(3)对称性的三维基础表示的三个基出发, 设想它们是一种数学符号, 称为三种**夸克**, 即上夸克 u、下夸克 d 和**奇异夸克** s。由这三个基的叠加可以构成各种八维表示和十维表示。这种一开始只是数学符号的三种夸克一经提出, 很多物理学家就从物质结构的思想去理解它。20 世纪 60 年代末实验和理论的进展使物理学家认识到, 夸克不再只是一种解释 SU(3)对称性的数学符号, 而是真实存在的实体^①, 所有强子都是由夸克 q 和反夸克 $\bar{q}$ 组成的(见后, 如图 1-2 所示), 这就是强子结构的**夸克模型**(quark model)。夸克模型实质上只涉及强子结构的对称性, 尚未深入到相互作用的动力学性质。

1973 年, 格罗斯(D.J.Gross)、威尔切克(F.Wilczek)和波利泽(H.D.Politzer)等人在色 SU(3)群定域规范不变性的基础上, 建立了**量子色动力学**(quantum chromodynamics, 简称 QCD)。量子色动力学认为, 夸克有内部的色空间自由度, 即每一味夸克有红、绿和蓝三种不同的**色**(color)^②, 夸克间的色相互作用是通过传递**胶子**(gluon)而产生的。由于胶子带有**色荷**(color charge), 其本身也参与色相互作用, 结果起了反屏蔽作用, 使耦合强度随着夸克间距离的增大反而增强, 夸克在近距离下表现为**渐近自由**(asymptotic freedom), 远离时表现为**夸克禁闭**(quark confinement)或**色禁闭**(color confinement)。因此, 我们将看不到带色的自由夸克和胶子, 而只能看到色中性的、由夸克或胶子组成

① 1968 年, 利用能量高达 20 GeV 的电子作为探针, 在研究质子内部结构的电子深度非弹性散射实验中发现, 大角度散射的截面比原来估计的要大得多, 这意味着质子内部电荷有着点状的结构。另外的一些迹象还表明, 这些点状结构在质子内可以认为是自由的。类似的实验后来也在中子上进行了, 20 世纪 70 年代还进行了用高能中微子作为探针的实验, 都得到了同样的结论。

② 为了解决夸克的自旋统计问题, 必须对夸克引入一个新的量子数——色量子数。例如, 重子 Ω^- 是由三个处在轨道运动为 s 态的奇异夸克 s 构成的, 而按照泡利不相容原理, 不可能有三个相同的费米子(s 夸克)处在相同的运动状态中。引入色量子数之后, 问题迎刃而解。

的束缚态——强子^①。量子色动力学经受了許多实验的检验，确立了它作为强相互作用基本理论的地位。

1974年，丁肇中(1936—)和里希特(B.Richter, 1931—)等人分别发现了一种新的粒子，即 J 或 ψ 粒子。这种粒子有着非常独特的性质，它不能由上述三种夸克及其反夸克构成，而只能解释为它是由一种新的夸克——粲夸克 c 及其反粒子 $\bar{c}$ 构成的。

1977年，莱德曼(L.M.Lederman, 1922—)等人又发现了一种独特的新粒子 Y ，它的性质只能以它是由另一种新的夸克——底夸克 b 及其反粒子 $\bar{b}$ 构成得到解释。

1995年3月2日，美国费米国家实验室正式宣布，该实验室的两个小组各自独立地发现了顶夸克 t 。

总之，从强子层次深入到夸克层次，有六味夸克(上夸克、下夸克、奇异夸克、粲夸克、顶夸克和底夸克)，每一味夸克有红、绿和蓝三种不同的色。重子是三个夸克的束缚态，介子由夸克和反夸克组成。

(2) 电弱统一理论的建立

1961年，格拉肖(S.L.Glashow, 1932—)首先提出了把电磁相互作用和弱相互作用统一起来的对称性模型。1967年，温伯格(S.Weinberg, 1933—)和萨拉姆(A.Salam, 1926—1996)在格拉肖理论的基础上，独立地发展和完善了**电弱统一理论**(electro-weak unified theory)^②。

电弱统一理论认为：电磁相互作用和弱相互作用在能量远高于中间玻色子质量时是统一的，它可以用一种统一的量子规范场来描述，这一规范场与夸克和轻子的相互作用遵从规范不变的内部对称性。统一的**电弱相互作用**(electro-weak interaction)通过传递四种体现这种对称性的规范玻色子(光子和

① 实验上所观测到的强相互作用，是色荷之间的色相互作用的剩余作用，它不能简单地归结为交换一个胶子。在能量不是非常高的情况下，强相互作用的媒介粒子主要是介子。我们知道，中性原子之间的范德瓦耳斯相互作用，实质上是原子内部电磁相互作用的剩余作用。当两个原子离得足够近时将引起电子分布的变化，电子云相互重叠，相当于两个原子之间靠交换电子而把原子结合起来。与此相似，可以认为色中性的强子相距足够近时，由正、反夸克组成的介子云相互重叠，通过交换介子而构成强相互作用。

② 1954年杨振宁和米尔斯(R.L.Mills)提出了非阿贝尔定域规范不变性的量子场论，并将它应用到了强相互作用。杨-米尔斯理论提出，传递电磁相互作用的电磁场是矢量场，其相应的粒子——光子是矢量粒子。由于该理论中的规范场粒子的质量必须为零，而实验上没有发现其他质量为零的矢量粒子，因此该理论遇到了困难。1964年，希格斯(P.W.Higgs)在理论上找到了使规范粒子获得质量的途径，提出了定域规范对称性自发破缺的机理——**希格斯机理**。此后，杨-米尔斯理论成为各种相互作用统一理论的基础。