



普通高等教育“十一五”国家级规划教材



高等院校物理系列教材
Textbook Series in Physics for Higher Education

University Fundamental Physics
大学基础物理学 (第2版) 上

张三慧 编著
Zhang Sanhui

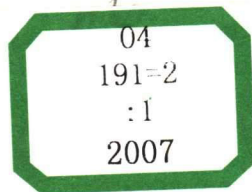


清华大学出版社



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

高等院校物理系列教材
Textbook Series in Physics for Higher Education



University Fundamental Physics

大学基础物理学 (第2版) 上

张三慧 编著

Zhang Sanhui

清华大学出版社

北京

内 容 简 介

《大学基础物理学》(第2版)分上下两册,上册内容包括力学和热学。力学篇讲述经典的质点力学、理想流体的运动规律、刚体转动的基本内容和狭义相对论基础知识等。热学篇着重在分子论的基础上用统计概念说明温度、气体的压强以及麦克斯韦分布率。下册内容包括电磁学、波动与光学、量子物理基础。电磁学篇按传统体系讲述了电场、电势、磁场、电磁感应和电磁波的基本概念和规律,还说明了电场和磁场的相对性。波动与光学篇介绍了振动与波的基本特征和光的干涉、衍射和偏振的基本规律。量子物理基础篇介绍了波粒二象性、概率波、不确定关系和能量量子化等基本概念以及原子和固体中电子的状态和分布的规律,最后还介绍了原子核的结合能、放射性衰变和核反应等基本知识。“今日物理趣闻”栏目介绍了一些现代物理理论发展及其应用的前沿课题。本书还编写了大量来自生活、实用技术以及自然现象等方面的例题和习题。

本书上下册内容涵盖了大学物理学教学的基本要求,可作为高等院校物理课程的教材,也可作为中学物理教师或其他读者的自学参考书。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

图书在版编目(CIP)数据

大学基础物理学.上/张三慧编著.—2版.—北京:清华大学出版社,2007.3
ISBN 978-7-302-14607-0

I. 大… II. 张… III. 物理学—高等学校—教材 IV. O4

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第014509号

责任编辑:朱红莲

责任校对:赵丽敏

责任印制:孟凡玉

出版发行:清华大学出版社

<http://www.tup.com.cn>

c-service@tup.tsinghua.edu.cn

社总机:010-62770175

投稿咨询:010-62772015

地 址:北京清华大学学研大厦A座

邮 编:100084

邮购热线:010-62786544

客户服务:010-62776969

印 刷 者:北京密云胶印厂

装 订 者:北京市密云县京文制本装订厂

经 销:全国新华书店

开 本:185×230 印 张:20.5 字 数:423千字

版 次:2007年3月第2版 印 次:2007年3月第1次印刷

印 数:1~8000

定 价:24.00元

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话:010-62770177 转 3103 产品编号:022817-01

前言

FOREWORD

大学物理课程是大学阶段一门重要的基础课,它将在高中物理的基础上进一步提高学生的现代科学素质。为此,物理课程应提供内容更广泛更深入的系统的现代物理学知识,并在介绍这些知识的同时进一步培养学生的科学思想、方法和态度并引发学生的创新意识和能力。

根据上述对大学物理课程任务的理解,本书在高中物理的基础上系统而又严谨地讲述了基本的物理原理。内容的安排总体上是按传统的力、热、电、光、量子物理的顺序。所以“固守”此传统,是因为到目前为止,物理学的发展并没有达到可能和必要在基础物理教学上改变这一总体系的程度。书中具体内容主要是经典物理基本知识,但同时也包含了许多现代物理,乃至一些物理学前沿的理论和实验以及它们在现代技术中应用的知识。本书还开辟了“今日物理趣闻”专栏,简要地介绍了如基本粒子、宇宙发展、能源与环境、超导、全息等课题,以开阔学生视野,激发其学习兴趣,并启迪其创造性。

本书选编了大量联系实际的例题和习题,从光盘到打印机,从跳水到蹦极,从火箭到对撞机,从人造卫星到行星、星云等等都有涉及。其中还特别注意选用了我国古老文明与现代科技的资料,如王充论力,苏东坡的回文诗,神舟飞船的升空,热核反应的实验等。对这些例题和习题的分析与求解能使学生更实在又深刻地理解物理概念和规律,了解物理基础知识的重要的实际意义,同时也有助于培养学生联系实际的学风,增强民族自信心。为了便于理解,本书取材力求少而精,论述力求简而明。

本书是在第1版(清华大学出版社2003)的基础上,参考老师和学生的意见和建议,并融入了笔者对教学内容的亲身体会重新修改而成。

本书分上下两册,共包括五篇:力学、热学、电磁学、波动与光学、量子物理简介。

力学篇完全按传统体系讲述。以牛顿定律为基础和出发点,引入动量、角动量和能量概念,导出动量、角动量和机械能等的守恒定律,最后将它们都推广到普遍的形式。守恒定律在物理思想和方法上讲固然是重要的,但在解决实际问题时经典的动力学概念与规律也常是不可或缺的。本书对后者也作了较详细的讲解。力学篇还强调了参考系的概念,说明了守恒定律的意义,并注意到物理概念和理论的衍生和发展。

热学篇除了对系统——特别是气体——的宏观性质及其变化规律作了清晰的介绍外,大大加强了在分子理论基础上的统计概念和规律的讲解。除了在第7章温度和气体动理论中着重介绍了统计规律外,在其他各章对功、热的实质、热力学第一定律、热力学第二定律以及熵的微观意义和宏观表示式等都结合统计概念作了许多独特而清晰的讲解。

电磁学篇以库仑定律、毕奥-萨伐尔定律和法拉第定律为基础展开,直至麦克斯韦方程组。在讲解了电流的磁场之后,还根据相对论指出了电场和磁场的相对性,使学生对电磁场的性质有更深入的理解。在分析方法上,本篇强调了对称性的分析,如在求电场和磁场的分布时,都应用了空间对称性的概念。

波动与光学篇主要着眼于清晰地讲解波、光的干涉和衍射的基本现象和规律。

量子物理基础篇的重点放在最基本的量子力学概念方面,如波粒二象性、不确定关系等,至于薛定谔方程及其应用、原子中电子运动的规律、固体物理等只作了很简要的陈述。

本书内容概括了大学物理学教学的最基本要求。为了帮助学生掌握各篇内容的体系结构与脉络,每篇开始都编制了该篇内容及基本知识系统图。本书还简述了若干位科学家的生平、品德与贡献,用以提高学生素养,鼓励成才。书末附有物理学常用数据的最新公认取值的“数值表”,便于学生查阅和应用。

诚挚地欢迎各位读者对本书的各种意见和建议。

张三慧

2006年11月于清华园

目 录

CONTENTS

今日物理趣闻 A 基本粒子

A.1 粒子的发现与特征	1
A.2 粒子分类	3
A.3 粒子的转化与守恒定律	4
A.4 夸克	5
A.5 色	6

第 1 篇 力学

第 1 章 质点运动学	11
1.1 匀变速直线运动	11
1.2 参考系	14
1.3 质点的位矢、位移和速度	17
1.4 加速度	20
1.5 匀加速运动	23
1.6 抛体运动	25
1.7 圆周运动	28
1.8 相对运动	32
提要	34
思考题	35
习题	36

科学家简介 伽利略	39
第2章 牛顿运动定律	40
2.1 牛顿运动定律	40
2.2 常见的几种力	44
*2.3 基本的自然力	48
2.4 应用牛顿定律解题	50
2.5 非惯性系与惯性力	55
*2.6 混沌	59
提要	62
思考题	62
习题	64
科学家简介 牛顿	69
第3章 动量与角动量	70
3.1 冲量与动量定理	70
3.2 动量守恒定律	73
3.3 火箭飞行原理	77
3.4 质心	78
3.5 质心运动定理	81
3.6 质点的角动量和角动量定理	84
3.7 角动量守恒定律	87
提要	89
思考题	90
习题	91
科学家简介 开普勒	93
第4章 功和能	94
4.1 功	94
4.2 动能定理	98
4.3 势能	101
4.4 引力势能	103
*4.5 由势能求保守力	105
4.6 机械能守恒定律	107

4.7 守恒定律的意义	112
4.8 碰撞	113
4.9 流体的稳定流动	119
4.10 伯努利方程	120
提要	124
思考题	126
习题	128



日物理趣闻 B 奇妙的对称性

B.1 对称美	132
B.2 对称性种种	134
B.3 物理定律的对称性	136
B.4 宇称守恒与不守恒	136
B.5 自然界的不对称现象	138
B.6 关于时间的对称性	139

第 5 章 刚体的定轴转动	141
5.1 刚体转动的描述	141
5.2 转动定律	143
5.3 转动惯量的计算	146
5.4 刚体的角动量和角动量守恒	148
5.5 转动中的功和能	152
提要	156
思考题	157
习题	158

第 6 章 相对论	162
6.1 牛顿相对性原理和伽利略坐标变换	162
6.2 爱因斯坦相对性原理和光速不变	165
6.3 同时性的相对性和时间延缓	167
6.4 长度收缩	172
6.5 洛伦兹坐标变换	174
6.6 相对论速度变换	178

6.7 相对论质量	181
6.8 相对论动能	184
6.9 相对论能量	186
6.10 动量和能量的关系	189
6.11 广义相对论简介	190
提要	193
思考题	194
习题	194
科学家简介 爱因斯坦	197


第 2 篇 热学

第 7 章 温度和气体动理论	202
7.1 平衡态	202
7.2 温度的概念	203
7.3 理想气体温标	204
7.4 理想气体状态方程	206
7.5 气体分子的无规则运动	208
7.6 理想气体的压强	211
7.7 温度的微观意义	214
7.8 能量均分定理	216
7.9 麦克斯韦速率分布律	218
7.10 麦克斯韦速率分布律的实验验证	222
7.11 实际气体等温线	224
提要	227
思考题	229
习题	230



日物理趣闻 C 大爆炸和宇宙膨胀

C.1 现时的宇宙	233
C.2 宇宙膨胀和大爆炸	235

C.3 从大爆炸到今天.....	237
C.4 宇宙的未来.....	240
C.5 至大和至小的理论结合起来了.....	242
第8章 热力学第一定律	244
8.1 功 热量 热力学第一定律	244
8.2 准静态过程	246
8.3 热容	250
8.4 绝热过程	254
8.5 循环过程	257
8.6 卡诺循环	260
8.7 致冷循环	262
提要	264
思考题	265
习题	266
科学家简介 焦耳	269
 日物理趣闻 D 能源与环境	
D.1 各式能源的利用	270
D.2 人类环境问题	271
第9章 热力学第二定律	276
9.1 自然过程的方向	276
9.2 不可逆性的相互依存	278
9.3 热力学第二定律及其微观意义	280
9.4 热力学概率与自然过程的方向	282
9.5 玻耳兹曼熵公式与熵增加原理	285
9.6 可逆过程	287
9.7 克劳修斯熵公式	289
*9.8 熵和能量退降	292
提要	294
思考题	295

习题	295
科学家简介 玻耳兹曼	297
数值表	298
习题答案	300
索引	307

基本粒子

物理学是研究自然界的物质结构,大到宇宙的结构,小到最微小的粒子的结构,以及物质运动的最普遍最基本的规律的自然科学。自伽利略-牛顿时代(17世纪中叶)以来,特别是19世纪中叶以来,物理学已有了长足的发展。今天的物理学已揭示了大自然的许多奇特的奥秘,在各方面提供了许多有趣又有用的知识。我们将在本书的适当地方向同学们介绍一些这样的知识。作为本书的开篇,下面就来简要介绍现代物理学在物质的基本结构——粒子——的研究中所取得的认识。

A.1 粒子的发现与特征

物质是由一些基本微粒组成的,这种思想可以追溯到古代希腊。当时德谟克利特(公元前460—前370年)就认为物质都是由“原子”(古希腊语本意是“不可分”)组成的。中国古代也有认为自然界是由金木水火土5种元素组成的说法。但是物质是由原子组成的这一概念成为科学认识是迟至19世纪才确定的,当时认识到原子是化学反应所涉及的物质的最小基本单元。1897年,汤姆逊发现了电子(e),它带有负电,电量与一个氢离子所带的电量相等。它的质量大约是氢原子质量的 $1/1800$,它存在于各种物质的原子中,这是人类发现的第一个更为基本的粒子。其后1911年卢瑟福通过实验证实原子是由电子和原子核组成的。1932年又确认了原子核是由带正电的质子(p ,即氢原子核)和不带电的中子(n ,它和质子的质量差不多相等)组成的。这种中子和质子也成了“基本粒子”。1932年还发现了正电子(e^+),其质量和电子相同但带有等量的正电荷。由于很难说它是由电子、质子或中子构成的,于是正电子也加入了“基本粒子”的行列。之后,人们制造了大能量的加速器来加速电子或质子,企图用这些高能量的粒子作为炮弹轰开中子或质子来了解其内部结构,从而确认它们是否是“真正的基本粒子”。但是,令人惊奇的是在高能粒子轰击下,中子或质子不但不破碎成更小的碎片,而且在剧烈的碰撞过程中还产生了许

多新的粒子,有些粒子的质量比质子的质量还要大,因而情况显得更为复杂。后来通过类似的实验(以及从宇宙射线中)又发现了几百种不同的粒子。它们的质量不同、性质互异,且能相互转化,这就很难说哪种粒子更基本。所以现在就把“基本”二字取消,统称它们为**粒子**。本部分的题目仍用“基本粒子”,只具有习惯上的意义。

在粒子的研究中,发现描述粒子特征所需的物理量随着人们对粒子性质的认识逐步深入而增多。常见的这种物理量可以举出以下几个。

1. 质量

粒子的质量是指它静止时的质量,在粒子物理学中常用 MeV/c^2 作质量的单位。 MeV 是能量的单位, $1 \text{ MeV} = 1.602 \times 10^{-13} \text{ J}$ 。由爱因斯坦质能公式 $E = mc^2$ (见本书 6.9 节)可以求得, $1 \text{ MeV}/c^2$ 的质量为

$$1.602 \times 10^{-13} / (3 \times 10^8)^2 = 1.78 \times 10^{-30} \text{ (kg)}$$

2. 电荷

有的粒子带正电,有的带负电,有的不带电。带电粒子所带电荷都是量子化的,即电荷的数值都是元电荷 e (即一个质子的电荷)的整数倍。因而粒子的电荷就用元电荷 e 的倍数来度量,而

$$1 e = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$$

3. 自旋

每个粒子都有自旋运动,好像永不停息地旋转着的陀螺那样。它们的自旋角动量(简称自旋)(见本书 5.4 节)也是量子化的,通常用 \hbar 的倍数来度量,而

$$1 \hbar = 1.05 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

有的粒子的自旋是 \hbar 的整数倍或零,有的则是 \hbar 的半整数倍(如 $\frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \frac{5}{2}$ 倍)。

4. 寿命

在已发现的数百种粒子中,除电子、质子和中微子以外,实验确认它们都是不稳定的。它们都要在或长或短的时间内衰变为其他粒子。粒子在衰变前平均存在的时间叫做粒子的寿命。例如一个自由中子的寿命约 12 min,有的粒子的寿命为 10^{-10} s 或 10^{-14} s ,很多粒子的寿命仅为 10^{-23} s ,甚至 10^{-25} s 。

对各种粒子的研究比较发现,它们都是**配成对的**。配成对的粒子称为正、反粒子。正、反粒子的一部分性质完全相同,另一部分性质完全相反。例如,电子和正电子就是一对正、反粒子,它们的质量和自旋完全相同,但它们的电荷和磁矩完全相反。又例如,中子和反中子也是一对正、反粒子,它们的质量、自旋、寿命完全相同,但它们的磁矩完全相反。有些正、反粒子的所有性质完全相同,因此就是同一种粒子。光子和 π^0 介子就是两种这

样的粒子。

A.2 粒子分类

粒子间的相互作用,按现代粒子理论的标准模型划分,有4种基本的形式,即万有引力、电磁力、强相互作用力和弱相互作用力(见本书2.3节)。按现代理论,各种相互作用都分别由不同的粒子作为传递的媒介。光子是传递电磁作用的媒介,中间玻色子是传递弱相互作用的媒介,胶子是传递强相互作用的媒介。这些都已成为实验所证实。对于引力,现在还只能假定,它是由一种“引力子”作为媒介的。由于这些粒子都是现代标准模型的“规范理论”中预言的粒子,所以这些粒子统称为规范粒子。由于胶子共有8种,连同引力子、光子、3种中间玻色子,规范粒子总共有13种。它们的已被实验证实的特征物理量如表A.1所示。

表 A.1 规范粒子

粒子种类	自旋/ \hbar	质量/(MeV/c ²)	电荷/e
引力子	2		0
光子	γ	0	0
中间玻色子	W ⁺	8.1×10^4	1
	W ⁻	8.1×10^4	-1
	Z ⁰	9.4×10^4	0
胶子	g	0	0

除规范粒子外,所有在实验中已发现的粒子可以按照其是否参与强相互作用而分为两大类:一类不参与强相互作用的称为轻子,另一类参与强相互作用的称为强子。

现在已发现的轻子有电子(e)、μ子(μ)、τ子(τ)及相应的中微子(ν_e, ν_μ, ν_τ),它们的特征物理量如表A.2所示。在目前实验误差范围内,3种中微子的质量为零。但是中微子的质量是否真等于零,还有待于更精确的实验证实。

表 A.2 轻子

粒子种类	自旋/ \hbar	质量/(MeV/c ²)	电荷/e	寿命
e	1/2	0.511	-1	稳定
ν_e	1/2	0	0	稳定
μ	1/2	105.7	-1	2.2×10^{-6} s
ν_μ	1/2	0	0	稳定
τ	1/2	1776.9	-1	3.4×10^{-13} s
ν_τ	1/2	0	0	稳定

从表 A.2 中可以看出 τ 子的质量约是电子质量的 3500 倍,差不多是质子质量的两倍。它实际上一点也不轻。这 6 种“轻子”都有自己的反粒子,所以实际上有 12 种轻子。

实验上已发现的成百种粒子绝大部分是强子。强子又可按其自旋的不同分为两大类:一类自旋为半整数,统称为**重子**;另一类自旋为整数或零,统称为**介子**。最早发现的重子是质子,最早发现的介子是 π 介子。 π 介子的质量是电子质量的 270 倍,是质子质量的 $1/7$,介于二者之间。后来实验上又发现了许多介子,其质量大于质子的质量甚至是质子质量的 10 倍以上。例如,丁肇中中发现的 J/ψ 粒子的质量就是质子质量的 3 倍多。这样,早年提出的名词“重子”、“轻子”和“介子”等已经不合适,但由于习惯,仍然一直沿用到今天。表 A.3 列出了一些强子的特征物理量。

表 A.3 一些强子

重子				介子			
粒子种类	自旋/ \hbar	质量/ (MeV/c^2)	电荷/ e	粒子种类	自旋/ \hbar	质量/ (MeV/c^2)	电荷/ e
p	1/2	939	1	π^+	0	140	1
n	1/2	939	0	π^0	0	140	0
Λ^0	3/2	1520	0	π^-	0	140	-1
N	5/2	1680	1	K^+	0	496	1
Δ^{++}	3/2	1700	2	ω	3	1670	0
Σ^+	3/2	1670	1	h	4	2030	0
Δ^0	3/2	1700	0	J/ψ	1	3100	0
Ω^-	3/2	1672	-1	χ	2	3555	0

A.3 粒子的转化与守恒定律

研究各种粒子的行为时,发现的另一个重要事实是:没有一种粒子是不生不灭、永恒不变的,在一定的条件下都能产生和消灭,都能**相互转化**,毫无例外。例如,电子遇上正电子,就会双双消失而转化为光子。反过来高能光子在原子核的电场中又能转化为一对电子和正电子(图 A.1)。在缺中子同位素中,质子会转化为中子而放出一个正电子和一个中微子。质子遇上反质子就会相互消灭而转化为许多介子。 π 介子和原子核相互碰撞,只要能量足够高,就能转化为一对质子和反质子。前面所提到的粒子衰变也是一种粒子转化的方式。因此,产生和消灭是粒子相互作用过程中非常普遍的现象。

实验证明,在粒子的产生和消灭的各种反应过程中,有一些物理量是保持不变的。这

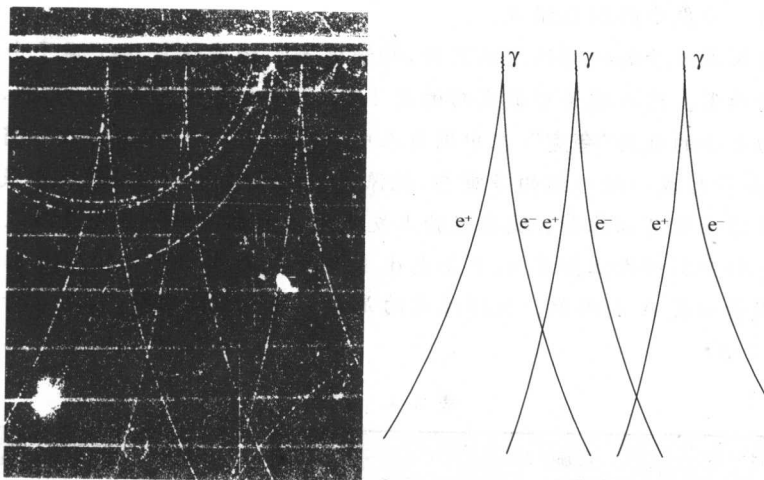
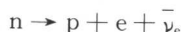


图 A.1 X 光的光子由上方入射,经过铅板后,产生电子-正电子对的径迹照片与分析图

些守恒量有能量、动量、角动量、电荷,还有轻子数、重子数、同位旋、奇异数、宇称等。例如,对于中子衰变为质子的 β 衰变反应



所涉及的粒子,中子 n 和反中微子 $\bar{\nu}_e$ 的电荷都是零,质子 p 的电荷为 1,电子 e 的电荷为 -1,显然衰变前后电荷(的代数和)是守恒的。此反应中 n 和 p 的重子数都是 1,轻子数都是 0;而 e 和 $\bar{\nu}_e$ 的重子数都是 0,前者的轻子数为 1,后者的轻子数为 -1;也很容易看出这一衰变前后的重子数和轻子数也都是守恒的。同位旋、奇异数和宇称等的概念比较抽象,此处不作介绍。但可以指出,它们有的只在强相互作用引起的反应(这种反应一般较快)中才守恒,而在弱相互作用或电磁相互作用引起的反应(这种反应一般较慢)中不一定守恒。它们不是绝对的守恒量。

A.4 夸克

强子种类这样多,很难想象它们都是“基本的”,它们很可能都有内部结构。前面已讲过,利用高能粒子撞击质子使之破碎的方法考查质子的结构是不成功的,但有些精确的实验还是给出了一些质子结构的信息。1955 年,霍夫斯塔特曾用高能电子束测出了质子和中子的电荷和磁矩分布,这就显示了它们有内部结构。1968 年,在斯坦福直线加速器实验室中用能量很大的电子轰击质子时,发现有时电子发生大角度的散射,这显示质子中有某些硬核的存在。这正像当年卢瑟福在实验中发现原子核的结构一样,显示质子或其他

强子似乎都由一些更小的颗粒组成。

在用实验探求质子的内部结构的同时,物理学家已经尝试提出了强子由一些更基本的粒子组成的模型。这些理论中最成功的是1964年盖尔曼和茨威格提出的,他们认为所有的强子都由更小的称为“夸克”(在中国有人叫做“层子”)的粒子所组成。将强子按其性质分类,发现强子形成一组一组的三重态,就像化学元素可以按照周期表形成一族一族一样。从这种规律性质可以推断:现在实验上发现的强子都是由6种夸克以及相应的反夸克组成的。它们分别叫做上夸克u、下夸克d、粲夸克c、奇异夸克s、顶夸克t、底夸克b,它们的特征物理量如表A.4所示。值得注意的是它们的自旋都是 $1/2$,而电荷量是元电荷 e 的 $-1/3$ 或 $2/3$ 。

表 A.4 夸克

夸克种类	自旋/ \hbar	质量/(MeV/c^2)	电荷/ e
d	$1/2$	9	$-1/3$
u	$1/2$	5	$2/3$
s	$1/2$	1.75×10^2	$-1/3$
c	$1/2$	1.25×10^3	$2/3$
b	$1/2$	4.50×10^3	$-1/3$
t	$1/2$	约 $3 \times 10^4 \sim 5 \times 10^4$	$2/3$

在强子中,重子都由3个夸克组成,而介子则由1个夸克和1个反夸克组成。例如,质子由2个u夸克和1个d夸克组成,中子由2个d夸克和1个u夸克组成, Σ^+ 粒子由2个u夸克和1个奇异夸克组成;而 π^+ 介子由1个u夸克和1个反d夸克组成, K^+ 介子由1个u夸克和1个反s夸克组成, J/ψ 粒子由正、反粲夸克(c, \bar{c})组成,等等。

用能量很大的粒子轰击电子或其他轻子的实验尚未发现轻子有任何内部结构。例如在一些实验中曾用能量非常大的粒子束探测电子,这些粒子曾接近到离电子中心 10^{-18} m以内,也未发现电子有任何内部结构。

关于夸克的大小,现有实验证明它们和轻子一样,其半径估计都小于 10^{-20} m。我们知道核或强子的大小比原子或分子的小5个数量级,即为 10^{-15} m。因此,夸克或轻子的大小比强子的还要小5个数量级。

A.5 色

自从夸克模型提出后,人们就曾用各种实验方法,特别是利用它们具有分数电荷的特征来寻找单个夸克,但至今这类实验都没有成功,好像夸克是被永久囚禁在强子中似的