

物理学发展与结构图像

WULIXUE FAZHAN YU JIEGOU TUXIANG

税正伟 ◎ 编著

石油工业出版社

物理学发展与结构图像

税正伟 编著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书按照物质描述、物质间相互作用、物质基本运动规律、物理与社会的体系构建物理学发展和结构图像,从微观、宏观及宇观角度描述从经典物理学到近代物理学的主要成就和进展,用简练的文字语言和数学知识讲述物理概念、物理规律含义和物理规律建立过程。本书在介绍物质世界基本规律、分析问题基本思路、解决问题基本方法的同时,让读者理解物理学发展的不断探索、研究、创新过程,最大限度挖掘科学思维方法和物理人文精神,使读者能够得到物理知识和科学素养的双重滋养。

本书可作为科学素质教育类课程的教材和物理教师的教学参考书,也可供对物理学感兴趣的社会读者阅读。

图书在版编目(CIP)数据

物理学发展与结构图像/税正伟编著. —北京:石油工业出版社,2018. 10

ISBN 978-7-5183-2707-2

I. ①物… II. ①税… III. ①物理学史—研究 IV. ①04-09

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 135235 号

出版发行:石油工业出版社

(北京市朝阳区安华里 2 区 1 号楼 100011)

网 址:www. petropub. com

编辑部:(010)64523579 图书营销中心:(010)64523633

经 销:全国新华书店

排 版:北京密东文创科技有限公司

印 刷:北京中石油彩色印刷有限责任公司

2018 年 10 月第 1 版 2018 年 10 月第 1 次印刷

787 毫米×1092 毫米 开本:1/16 印张:10.75

字数:274 千字

定价:49.90 元

(如发现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究



前言

物理学是研究物质的基本结构、基本运动形式、相互作用及其转化规律的一门基础自然科学。古希腊人把所有对自然界的观察和思考,笼统地包含在一门学问里,那就是自然哲学,并将它科学地分化为天文学、力学、物理学、化学、生物学、地质学等。从1687年牛顿出版《自然哲学的数学原理》一书开始,物理学真正成为一门精密的科学。物理学描绘了物质世界的一幅完整的图像,它揭示出各种运动形态的相互联系与相互转化,充分体现了世界的物质性与物质世界的统一性。物理学的发展与人类对自然的认识过程紧密相伴,在人类追求真理、探索未知世界的过程中,物理学展现了一系列科学的世界观和方法论,深刻影响着人类对物质世界的基本认识、人类的思维方式和社会生活,是人类文明发展的基石。

世界上的每一个人都应对我们生存的物质世界有一个正确的认识,这就需要具备一定的物理知识和科学素养,它不仅表现为掌握一定的物理学知识,更重要的是具有一定的通过观察现象、摸索规律、弄清本质的科学方法以及探索研究的意识、能力和水平,具有踏实、严谨、尊重科学、勇于创新的精神,形成正确的世界观、价值观和思想方法。

传统的普通物理书籍,多是针对中学理科生和理工科大学生、物理类专业大学生的物理课程编写,几乎都是按照力学、电磁学、热学、光学、近代物理的框架体系编写。国内外也有不少物理科普书籍,涉及物理与科技、物理与生活、物理学史、物理科幻等方面,但多数书籍侧重于物理学与现代科学技术方面进行介绍。

本书通过物质描述、物质间相互作用、物质基本运动规律、物理与社会四个部分,介绍了从经典物理学到近代物理学的主要成就和进展,讲述物理概念、物理规律含义和物理规律建立过程,从自然现象到物理规律,打破传统的力学、电磁学、热学、光学、近代物理的框架体系,从另一个角度把握物理学的发展过程和结构图像,使读者在得到物理知识科学教育的同时,受到科学精神和踏实、严谨、尊重科学、勇于创新的科学方法教育,提高探索、研究、创新的科学素质。

本书的编著,得到了陈代珣等老师的大力支持和帮助,同时借鉴、参考了国内外的许多书籍,有的并未列入本书参考文献,对于这些书籍的作者,特别致以谢意。

由于编者水平有限,书中难免存在缺点和问题,望读者给予批评和指正。

编者

2018年6月

目 录

第1部分 物质描述

1 物质描述——定性思维到定量描述	1
1.1 物质世界的尺度	1
1.2 物质存在的基本形式与状态	8
1.3 物质间的基本相互作用	12

第2部分 物质间相互作用

2 引力相互作用——苹果落地到恒星命运	16
2.1 万有引力定律	16
2.2 重力	21
2.3 三种宇宙速度	22
2.4 引力坍缩	25
3 电磁相互作用——摩擦生电到电磁场理论	30
3.1 电相互作用	30
3.2 磁相互作用	35
3.3 麦克斯韦电磁场理论	40
3.4 电磁波	46
4 强相互作用与弱相互作用——电子发现到核反应	48
4.1 原子模型	48
4.2 原子核结构	51
4.3 强相互作用	53
4.4 弱相互作用	55
4.5 原子核的聚变和裂变	59

第3部分 物质基本运动规律

5 绝对时空观与相对时空观——牛顿力学到相对论	62
5.1 运动的描述	62
5.2 牛顿运动定律	64
5.3 力学相对性原理	66
5.4 狭义相对论	68
5.5 广义相对论	73

6 守恒定律——守恒到对称	78
6.1 动量守恒定律.....	78
6.2 角动量守恒定律.....	83
6.3 能量守恒定律.....	87
7 热力学定律——永动机到熵增加原理	91
7.1 热力学第一定律.....	91
7.2 热力学第二定律.....	96
7.3 熵增加原理.....	98
8 机械振动与机械波——周期运动到机械波	102
8.1 机械振动	102
8.2 机械波	106
9 光的理论——直线传播到光的波粒二象性	113
9.1 几何光学理论	114
9.2 波动光学理论	116
9.3 光的量子理论	124
10 物质波与量子理论——概率波到量子理论	128
10.1 量子之谜:实物是粒子还是波?	128
10.2 概率波:大自然究竟要做什么?	130
10.3 不确定原理:粒子的可能性疆域!	132
10.4 薛定谔方程:粒子原来是这样运动的!	134
10.5 量子理论.....	136

第4部分 物理与社会

11 复杂现象——物理学到社会学	144
11.1 社会科学的困境与希望.....	145
11.2 混沌学简介.....	147
11.3 分形学简介.....	154
11.4 自组织与耗散结构.....	158
12 物理学与现代科技——物理学到科技与工程	161
12.1 物理学与新技术.....	161
12.2 纳米技术.....	162
参考文献	166

第 1 部分 物质描述

世界是由物质构成的,物质是不依赖于人的意识而又能为人的意识所反映的客观存在。物质为构成宇宙间一切物体的实物和场,运动是物质的根本属性,时间和空间则是运动着的物质的存在形式。物质的种类形态万千,物质的性质多种多样,物质都能够被观测,物质都具有质量和能量。

物理学是研究物质运动最一般规律和物质基本结构的学科。作为自然科学的带头学科,物理学研究大至宇宙,小至基本粒子等一切物质最基本的运动形式和规律,因此成为其他各自然科学学科的研究基础。它的理论结构充分地运用数学作为自己的工作语言,以实验作为检验理论正确性的唯一标准,它是当今最精密的一门自然科学学科。

1 物质描述——定性思维到定量描述

1.1 物质世界的尺度

物理学是一门定量的学科,它既研究人们身边发生的物理现象,也研究宇宙天体的运动及构造,还研究微观领域中物质的运动规律。在研究和学习物理学时,需要常常对各种事物做粗略的数量级估计,留心查看尺度大小的变化所产生的物理效应,因而对各类物理量的数量级的了解是非常必要的。

1.1.1 科学记数法

把一个物理量的数值写成一个小于 10 的数字乘以 10 的幂次,用 10 的正幂次代表大数,

用 10 的负幂次代表小数。这种记数方法叫科学记数法。

在科学记数法中幂指数相差 1,即代表数目大 10 倍或小 10 倍,这叫作一个“数量级”。表 1.1.1 给出国际单位制中表示数量的词头。

表 1.1.1 国际单位制中表示数量的词头

因 数	词 头 名 称		符 号
	英 文	中 文	
10^{24}	yotta	尧[它]	Y
10^{21}	zetta	泽[它]	Z
10^{18}	exa	艾[可萨]	E
10^{15}	peta	拍[它]	P
10^{12}	tera	太[拉]	T
10^9	giga	吉[咖]	G
10^6	mega	兆	M
10^3	kilo	千	k
10^2	hecto	百	h
10^1	deca	十	da
10^{-1}	deci	分	d
10^{-2}	centi	厘	c
10^{-3}	milli	毫	m
10^{-6}	micro	微	μ
10^{-9}	nano	纳[诺]	n
10^{-12}	pico	皮[可]	p
10^{-15}	femto	飞[母托]	f
10^{-18}	atto	阿[托]	a
10^{-21}	zepto	仄[普托]	z
10^{-24}	yocto	幺[科托]	y

1.1.2 空间尺度

人类选择了与自身大小相适应的“米”作为长度的基本单位,用 m 表示。从物理研究对象所涉及的物质世界的空间尺度来看,最大的尺度是宇宙,大约为 10^{26} m (约 150 亿光年);最小的尺度是夸克,大约 10^{-18} m,空间的尺度跨越了 44 个数量级。表 1.1.2 列出了物质世界中部分实物空间尺度的数量级。

表 1.1.2 物质世界的空间尺度

参 数	长度, m	参 数	长度, m
电子和夸克	10^{-18}	地球的半径	10^7
质子的半径	10^{-15}	地球到月球的距离	10^8
电子的康普顿波长	10^{-12}	太阳的半径	10^9
原子的半径	10^{-10}	地球轨道的半径	10^{11}
病毒的半径, 可见光波长	10^{-7}	太阳系的半径	10^{13}
巨型阿米巴的半径	10^{-4}	到最近恒星的距离	10^{16}
昆虫的长度	10^{-2}	银河系的半径	10^{21}
人体的高度	10^0	星系团的半径	10^{23}
红杉树高度	10^2	超星系团的半径	10^{24}
珠穆朗玛峰的高度	10^4	可探测类星体的最远距离	10^{26}

太阳与地球的距离是地球半径的两万多倍, 定义为 1 天文单位 (Au), 精确值为 $1\text{Au} = 1.49597892 \times 10^{11} \text{m}$ 。太阳系的直径约为 80 天文单位, 即 10^{13}m 的数量级。太阳系外的天体距离通常用“光年” (light year) 表示, 即光在一年里所走的距离, 大小为:

$$1 \text{ 光年} = 9.460530 \times 10^{15} \text{m} \approx 10^{16} \text{m}$$

现代天文观测表明, 星系普遍存在光谱红移现象, 说明宇宙处在膨胀过程中, 从宇宙诞生到现在, 宇宙延展了 10^{10} 光年以上, 即 10^{26}m 以上。太阳系是银河系中很小一部分, 银河系的直径约为 7.5×10^4 光年, 离银河系最近的星系 (小麦哲伦云) 的距离约为 1.5×10^5 光年 (即 $1.5 \times 10^{21} \text{m}$)。人类能观测的距离极限——哈勃空间望远镜的观测半径是 10^{26}m 。现在宇宙中存在着 1000 亿个以上的星系, 银河系是其中之一, 我们的太阳是组成银河系的大约 2000 亿颗恒星之一, 太阳系只是宇宙中的沧海一粟。

物质可以小到什么程度, 《庄子·天下篇》中说“一尺之捶 (即木棍), 日取其半, 万世不竭”, 说的是物质世界向小的方向可以无限分割下去。现代物理学告诉我们宏观物体是由各种分子原子组成的, 原子的大小为 10^{-10}m 数量级。原子核由质子和中子组成, 每个质子和中子的大小约为 10^{-15}m , 大概是原子大小的 $1/100000$ 。原子核比质子或中子大的倍数取决于原子核中包含多少个质子和中子。但是, 原子核比 10^{-15}m 仍大不了多少。质子和中子又由更为基本的粒子——夸克 (quark) 组成。目前物理学公认的组成物质的最小单元是夸克和电子。用间接的方法得知, 夸克和电子的大小小于 10^{-18}m 。

物理学按照空间的尺度把物质世界分为“宇观体系”“宏观体系”和“微观体系” (图 1.1.1)。从大尺度探索宇宙的奥秘叫作“宇观体系”, 相应的物理学是“天体物理学”; 将大小在人体尺度上下几个数量级范围内的客体叫作“宏观体系”; 在物理学上把原子尺度和小于原子尺度的客体叫作“微观体系”, 从小尺度探索物质的组成, 相应的物理学是“粒子物理学”。

宏观尺度比微观尺度大七八个数量级, 按体积算, 则要大 $(10^8)^3 = 10^{24}$, 即宏观系统中包含了非常多的微观系统。微观系统与宏观系统最重要的区别是它们服从的物理规律不同, 如低速运动的宏观系统服从牛顿运动定律, 而微观系统则要用量子力学来处理。在现代科技中, 人们已能制作长度在微米 (μm)、线宽在纳米 (nm) 数量级的微电子器件。在这种尺度的样品

中包含的原子数目的数量级为 $10^8 \sim 10^{11}$, 基本属于宏观范围, 但它要表现出微观系统的量子效应, 因此将这种呈现出微观特征的宏观系统, 叫“介观体系”。

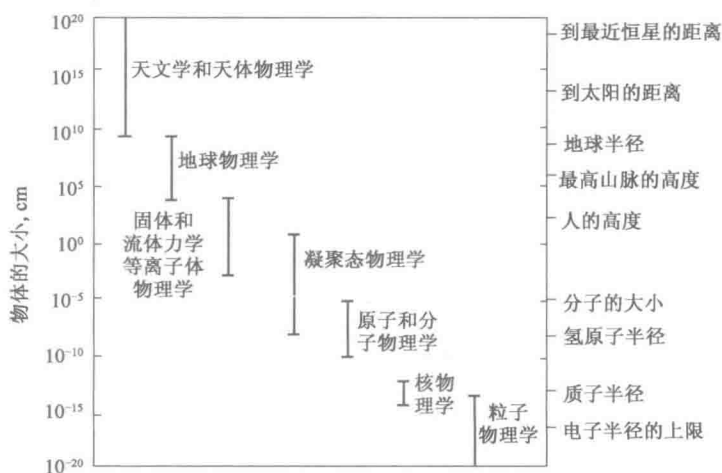


图 1.1.1 空间尺度与物理学体系

1.1.3 时间尺度

时间表征物质运动的持续性, 最长的时间是宇宙的年龄, 约 10^{18} s (即 150 亿年); 最小的时间间隔是硬 γ 射线的周期, 约 10^{-27} s, 时间尺度也跨越约 46 个数量级。人类研究所涉及的物质世界的时间尺度见表 1.1.3。

表 1.1.3 物质世界的时间尺度

参数	时间间隔, s	参数	时间间隔, s
Z^0 和 $W^\pm$ 粒子的寿命	10^{-25}	自由中子的寿命	10^3
Σ^0 超子的寿命	10^{-19}	地球自转的周期	10^5
π^0 介子的寿命	10^{-16}	地球公转的周期	10^7
可见光辐射的周期	10^{-15}	人类文明史	10^{11}
Λ 超子的寿命	10^{-10}	古人类出现至今	10^{14}
$\pi^\pm$ 介子的寿命	10^{-8}	恐龙灭绝至今	10^{15}
μ 子的寿命	10^{-6}	地球的年龄	10^{17}
最高可听见声音的周期	10^{-4}	宇宙的年龄	10^{18}
钟摆的周期	10^0	质子的寿命	10^{39}

由现代的标准宇宙模型知, 宇宙是在大约 15×10^9 年前由“无”中大爆炸诞生的, 即宇宙的年龄具有 10^{18} s 的数量级。银河系大约在 12×10^9 年前诞生, 现在是一个直径约为 10 万光年的巨型涡旋星系。太阳的年龄约 5×10^9 年, 地球的年龄为 4.6×10^9 年 (即 10^{17} s 数量级)。地球诞生后, 距今 $(7 \sim 8) \times 10^8$ 年 (10^{16} s) 前形成了富氧的大气层; 大约距今 4×10^8 年前出现鱼类和陆生植物; 约 6.7×10^7 年 (10^{15} s) 前恐龙绝灭, 哺乳类出现; 古人类出现在距今 $(2.5 \sim 4) \times 10^6$ 年 (10^{14} s) 前; 人类的文明史只有 5000 年 (10^{11} s); 人的寿命通常不到 100 年 (10^9 s); 地球公转的周期为一年 (约 3×10^7 s), 自转的周期为一天 ($8.64 \times 10^4 \approx 10^5$ s); 百米赛跑的世界纪录具有 10^1 s 的

数量级;钟摆的周期是 $10^0 = 1\text{s}$;市电的周期为 $2 \times 10^{-2}\text{s}$ 。

在微观世界的常见粒子中,光子、质子、中子是稳定的,质子的寿命约为 10^{39}s ,中子的寿命约为 15min (约 10^3s)。 μ 子寿命的数量级为 10^{-6}s ,……按量子力学中的海森堡不确定关系,寿命长于 10^{-20}s 的粒子都算是相当稳定的。

凡已知其运动规律的物理过程,都可以用来作时间的计量。通常采用能够重复的周期现象来计量时间,如地球的公转和自转,月球绕地球的公转,摆的周期运动等。随着人类对微观世界认识的深入,以及微波技术的发展,现已利用某些分子或原子的固有振动频率作为时间的计量基准。1967 年第 13 届国际计量大会决定采用铯原子钟作为新的时间计量基准,定义 1s 的长度等于与铯 133 原子基态的两个超精细能级之间跃迁相对应的辐射周期的 9192631770 倍。铯原子钟测量准确度达 $10^{-11} \sim 10^{-12}\text{s}$ 。

1.1.4 温度

温度 (temperature) 在宏观上反映了物体的冷热程度,在微观上反映了组成物体的分子的无规则运动的剧烈程度。温度只能通过物体随温度变化的某些特性来间接测量,而用来量度物体温度数值的标尺叫温标,它规定了温度的读数起点 (零点) 和测量温度的基本单位。国际单位为热力学温标 (K)。目前国际上用得较多的其他温标有华氏温标 ($^{\circ}\text{F}$)、摄氏温标 ($^{\circ}\text{C}$) 和国际实用温标。

100 多亿年前宇宙在大爆炸中诞生时,它的温度在 10^{39}K 以上;随着宇宙膨胀,它急剧冷却,几分钟后温度降到 10^9K ,宇宙中 ^4He 核出现;几十万年以后温度降到 4000K ,原子出现,宇宙变得透明;今天宇宙的温度已冷却到 2.735K (微波背景辐射的温度)。温度变化如图 1.1.2 所示。

太阳中心的温度是 10^7K ,是热核聚变所需的起码温度。太阳表面的温度是 6000K ,难熔金属的熔点略低于此,但都在 10^3K 数量级。地球表面的平均温度为 15°C ,即 288K 左右。在一个大气压下,氧、氮、氢、氦的液化温度分别为 90K 、 77K 、 20K 、 4K 。当代科学实验室里能产生的最高温度是 10^8K ,最低温度是 $2 \times 10^{-8}\text{K}$,跨越了 16 个数量级。

作为生命之源的液态水,只存在于 $273 \sim 373\text{K}$ 狭窄温区内。人类生活环境的温度在 300K 上下几十度 ($20 \sim 30^{\circ}\text{C}$)。若由于大气中的 CO_2 含量增加而产生的温室效应使平均气温升高 3°C 的话,海平面将上涨 $2 \sim 5\text{m}$,可造成农业减产 25%,将使十亿人背井离乡。在地球发展史上多次出现了冰河期,平均温度仅降至 10°C 左右,就使大批物种灭绝。我们生存的家园——地球生物圈,在温度变化面前是何等的脆弱!

从分子运动论观点看,温度是物体分子运动平均动能的标志。温度是大量分子热运动的集体表现,含有统计意义。对于个别分子来说,温度是没有意义的。

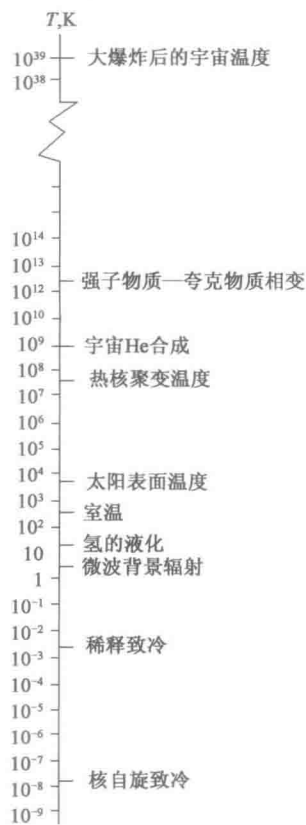


图 1.1.2 温度变化

1.1.5 质量

质量(mass)是物体所具有的一种物理属性,是物质的量的量度,它是一个正的标量。质量是物理学中的基本量纲之一,符号为 m ;在国际单位制中,质量的基本单位是千克(符号为 kg)。实验室中天平是测质量的常用工具。

质量是物理学中的一个基本概念,它的含义和内容随着科学的发展而不断清晰和充实。在现代物理学中质量的概念有两种:惯性质量和引力质量,惯性质量表示的是物体惯性大小的度量,而引力质量表示的是物质引力相互作用的能力的度量。自然界中的任何物质既有惯性质量又有引力质量,无数精确的实验表明,同一物体的这两个质量严格相等,是同一个物理量的不同表征。

生活中所说的质量,是指物体含有物质的多少,是弗兰西斯·培根在1620年出版的《新工具》一书中提出的。牛顿在《自然哲学之数学原理》一书中明确定义为物体的静质量。牛顿同时在该书中引入了惯性质量的概念,根据牛顿第一定律、牛顿第二定律的定义和解释,表面“惯性质量”的定义与“物质的多少”这一关于质量的概念是一致的。

质量是物体惯性大小的量度。在近代物理学中质量的概念有了进一步的发展,狭义相对论揭示了质量与速度、质量与能量的关系,只是在速度甚小于真空中的光速时,运动物体的质量才等于它在静止时的质量。表 1.1.4 给出了部分物质质量的数量级。

表 1.1.4 部分物质质量的数量级

参 数	质量,kg	参 数	质量,kg
电子	10^{-30}	人体	10^2
质子	10^{-27}	土星 5 号火箭	10^6
氨基酸分子	10^{-25}	金字塔	10^{10}
血红蛋白分子	10^{-22}	海洋中的水	10^{21}
流感病毒	10^{-19}	月球	10^{23}
烟草花叶病毒	10^{-13}	地球	10^{25}
巨型阿米巴虫	10^{-8}	太阳	10^{30}
雨滴	10^{-6}	银河系	10^{41}
蚂蚁	10^{-4}	宇宙(现在知道的)	10^{53}

物理学研究的对象就是客观物质世界,因此一切物理量都应该是物质的量。例如,微观粒子的质量、自旋、宇称、电荷、重子数、轻子数等都是物质的量,它们分别表征了粒子的惯性和参与不同相互作用的性质。一种粒子的物质的量可以认为是所有这些物理量的总称,在这个意义上,物质的量同每一种具体的物理量,是一般和个别的关系。而在另一种意义上,还存在一种不反映任何具体的物质属性的纯粹抽象的物质的量,它是一种纯粹的数量,只反映了这种物质对象存在的多少。

现代科学中的物质的量是指以摩尔(mol)为单位表示的粒子数,1mol 的粒子数其测量值为阿伏加德罗常数。用摩尔数来描写是抛开了一切具体的物质属性而只反映其粒子数目,所以,以 kg 为单位的质量与以 mol 为单位的物质的量是两个不同的概念。

1.1.6 物理常数

物理常数可分为两类,一类与物性有关,如电导率、电阻率、折射率、导热系数、比热等,它们表征了物质的固有特性,称为物质(性)常数;另一类与具体的物质特性无关,是普遍适用于大自然的,如真空中的光速、基本电荷量、普朗克常数、引力常数、摩尔气体常数等,常将其称为基本物理常数。

基本物理常数出现在物理学一系列定律和理论中,是物理学的分支框架中不可缺少的关节点,对它们的精确测定是非常重要的。随着科学技术水平的提高,基本物理常数的测定也越来越精确。

20 世纪物理学理论革命的标志,是相对论和量子论的诞生,这两个理论各自提出了宇宙间一个不可逾越的基本物理常数。相对论提出,真空中光速 c 是一切物体和信号不可超越的最大速度;量子论提出,普朗克常量 h 是不可分割的最小作用量子。而 e 和 G 是标志电磁力和引力相互作用的基本常数, e 是不可分割的最小电荷电量,是一个电子(或质子)所具有电量,任何带电体的电量都是 e 的整倍数。阿伏加德罗常数 N_A 是联系物理微观单位和宏观单位的重要换算系数,它表示 1mol 的任何物质所含分子数。若要问基本物理常数为什么具有这样的数值,特别是数量级,现在还法确切回答。可能随着人们对宇宙、对自己生存的大自然的认识的深入,将进一步揭开这些谜! 表 1.1.5 给出了部分重要的基本常数推荐值。

表 1.1.5 部分重要基本常数推荐值

物 理 量	符 号	推荐值
真空中光速	c	299792458m/s
真空中磁导率	μ_0	$12.566370614 \times 10^{-7} \text{N/A}^2$ $4\pi \times 10^{-7} \text{N/A}^2$
真空电容率[真空介电常数 $1/(\mu_0 c^2)$]	ε_0	$8.854187817 \times 10^{-12} \text{F/m}$
万有引力常量	G	$6.67259 \times 10^{-11} \text{m}^3/(\text{kg} \cdot \text{s}^2)$
普朗克常量	h	$6.6260755 \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}$
	$\hbar$	$1.05457266 \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}$
元电荷	e	$1.60217733 \times 10^{-19} \text{C}$
磁通量子	Φ_0	$2.06783461 \times 10^{-15} \text{Wb}$
玻尔磁子 $\frac{\hbar e}{2m_e}$	μ_B	$9.2740154 \times 10^{-24} \text{J/T}$
核磁子 $\frac{\hbar e}{2m_p}$	μ_N	$5.0507866 \times 10^{-27} \text{J/T}$
里德伯常量 $\frac{m_e c a^2}{2h}$	R_∞	$10973731.534 \text{m}^{-1}$
玻尔半径 $\frac{4\pi\varepsilon_0 \hbar^2}{m_e e^2}$	a_0	$0.529177249 \times 10^{-10} \text{m}$
电子质量	m_e	$9.1093897 \times 10^{-31} \text{kg}$
电子磁矩	μ_e	$9.2847701 \times 10^{-24} \text{J/T}$
质子质量	m_p	$1.6726231 \times 10^{-27} \text{kg}$

续表

物 理 量	符 号	数 值
质子磁矩	μ_p	$1.41060761 \times 10^{-26} \text{ J/T}$
中子质量	m_n	$1.6749286 \times 10^{-27} \text{ kg}$
中子磁矩	μ_n	$0.96623707 \times 10^{-26} \text{ J/T}$
氦核质量	m_d	$3.3435860 \times 10^{-27} \text{ kg}$
μ 子的质量	m_μ	$1.8835327 \times 10^{-28} \text{ kg}$
电子荷质比	$-e/m_e$	$-1.75881962 \times 10^{11} \text{ C/kg}$
阿伏加德罗常数	N_A	$6.0221367 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
摩尔气体常量	R	$8.314510 \text{ J/(mol} \cdot \text{K)}$
玻耳兹曼常量 R/N_A	k	$1.380658 \times 10^{-23} \text{ J/K}$
斯特藩常量	σ	$5.67051 \times 10^{-8} \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K}^4)$
法拉第常数	F	96485.309 C/mol
原子质量常量	m_u	$1 \text{ u} = 1.6605402 \times 10^{-27} \text{ kg}$

1.2 物质存在的基本形式与状态

1.2.1 物质存在的基本形式

物质存在有两种基本形式:场和粒子。

在物理学的发展过程中,最初人们认为微粒是物质存在的基本形式,微粒的空间占有一定的有限体积。为了描述微粒之间的相互作用,人们引进了“场”(field)的概念,例如电磁场和引力场等。随着科学技术的发展,人们逐渐发现,场与微粒一样具有能量和动量,也具有不连续的微观结构。因此,人们就把微粒和场看成物质存在的两种基本形式。现在,量子场论则明确指出:物质存在的两种基本形式中,场是更基本的。

量子场论所给出的新的基本物理图像是:与每种粒子 (particle) 相对应存在一种场,场具有可入性,充满全空间,不同粒子的场在空间中互相重叠地充满全空间。例如,与光子相对应存在电磁场,与电子相对应存在电子场,等等,它们同时存在于全空间。

场具有不同的能量状态,能量最低态称为基态,除此之外称为激发态。当一种场处于基态时,这种场就不会通过状态的变化释放能量而输出信号,从而不会显现出直接的物理效应,这时表现为看不到对应粒子的存在。按照这种观点,当所有的场都处于基态时,任何一个场都不可能给出信号显现出粒子,这时就是物理上的真空。因此,真空并不是真的空无一物。真空态时,全空间仍充满各种场,只是所有的场都处于能量基态而不可能表现出任何释放能量的物理效应。

当场处于激发态时,表现为出现相应的粒子(产生一种粒子),如光子是电磁场的激发态。场的不同激发态表现为粒子的数目和运动状态不同。在量子场论中,场和场的激发态都用复数描写,互为复共轭的两种激发状态表现为粒子和反粒子(antiparticle)互换的两种物理状态,粒子之间的相互作用来自场之间的相互作用。所以,物质存在的两种基本形式中,场更基本,粒子只是场的激发态的表现。

当代物理学研究表明,物质的组成结构在尺度上和能量上呈现不同的层次,如图 1.2.1 所示。

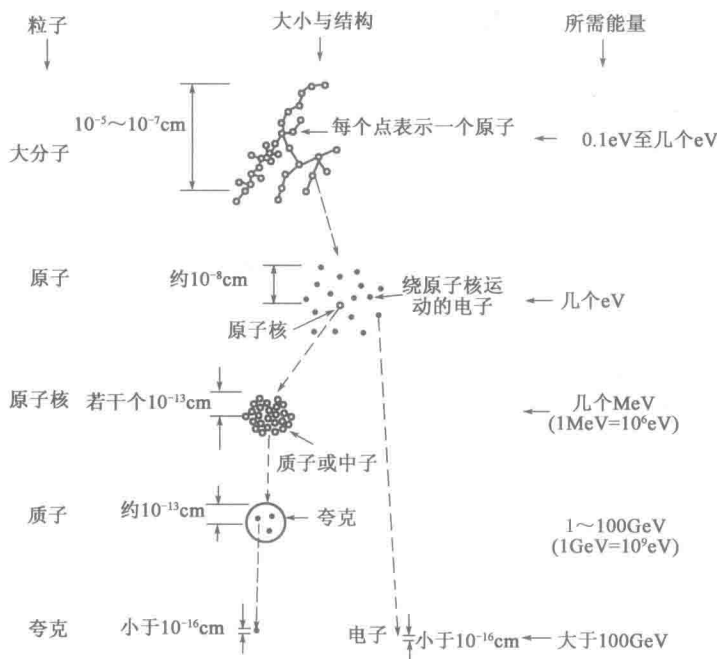


图 1.2.1 物质组成的层次

各种相互作用则存在于场之间,无论是处于基态还是处于激发态的场,都可以与其他的场相互作用。不同的粒子参与不同的相互作用,按它们参与的主要相互作用,可将基本粒子分为三类。

第一类是传递力的粒子。按照量子场论。基本相互作用是通过在相互作用着的粒子之间交换某种粒子来传递的,这些粒子统称为规范玻色子(gauge boson)。光子(photon)是传递电磁相互作用的媒介粒子,静止质量为 0,自旋为 1。1983 年发现的 W^+ 、 W^- 和 Z^0 三种中间玻色子(intermediate boson)是传递弱相互作用的媒介粒子,它们的质量极大,自旋为 1。量子色动力学预言,传递强相互作用的原始媒介粒子是 8 种胶子,它们在复合粒子——强子内部夸克之间所传递的原始相互作用称为色相互作用。实验上已经得到胶子存在的证据(是间接的实验证据)。与光子一样,胶子的静止质量为 0,自旋为 1。但鉴于夸克禁闭,色相互作用的距离不超过强子的尺度。在实验室所观测到的在强子之间的所谓相互作用是色相互作用的剩余相互作用。理论预言,传递引力相互作用的媒介粒子是引力子,其静止质量为 0,自旋为 2。但是,迄今为止在实验上还没有发现引力子。

第二类是轻子。电子、 μ 子、 τ 子及相应的中微子都是轻子。轻子都是费米子。轻子只参与弱相互作用和电磁相互作用,不受强力影响,其中中微子只参与弱相互作用,带电的还参与电磁相互作用;轻子必定以粒子—反粒子对的形式产生和湮灭,总的轻子数(轻子的数目减去反轻子的数目)在一切过程中是保持不变。已知的轻子有六种,它们成对出现,每一对包括一个荷电轻子和一个中性轻子,这个中性轻子称为中微子。每一对称为一代,而且每一代中的中微子质量都比相应的荷电轻子的质量小得多。只有成对的轻子之间才发生相互作用。表 1.2.1 给出了六种轻子的成对排列。

表 1.2.1 已知六种轻子的成对排列

代	粒 子	电 荷	质量, MeV/c ²
1	电子(e)	-1	0.51
	电子中微子(ν_e)	0	$<5 \times 10^{-5}$
2	μ 子(μ)	-1	106
	μ 中微子(ν_μ)	0	<0.5
3	τ 子(τ)	-1	1784
	τ 中微子(ν_τ)	0	<160

第三类基本粒子是强子。一切参与强相互作用的粒子统称强子,它们之间的主要作用是强相互作用(也参与弱相互作用,带电的或中性带磁矩的强子还参与电磁相互作用)。根据粒子的自旋,强子分为重子和介子。重子是强子中的费米子,分为质子、中子和超子(质量超过核子的重子);介子是强子中的玻色子,是传递核力的粒子,包括 π 介子、 K 介子、 D 介子等以及它们的反粒子。

新的发现证明,强子不是基本粒子,而是亚核粒子。强子还有内部结构,高能物理实验证实它是由几种被称为夸克(国内也叫层子)的更基本的(简单的)粒子所构成。已发现夸克有 6 种,且各有自己的反夸克。6 种夸克的最基本性质见表 1.2.2。

表 1.2.2 6 种夸克的最基本性质

夸克 特性	u	d	s	c	b	t
质量, MeV/c ²	约 4	约 7	约 150	约 1.5×10^3	约 4.7×10^3	约 186×10^3
电荷 Q	$\frac{2}{3}e$	$-\frac{1}{3}e$	$-\frac{1}{3}e$	$\frac{2}{3}e$	$-\frac{1}{3}e$	$\frac{2}{3}e$
自旋 J	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$

由于人们在粒子物理实验中从来没有观察到自由夸克,这就意味着夸克之间的作用必定超乎寻常的强,永远被囚禁。这称为夸克禁闭。

每一种基本粒子都有反粒子,一般来说,反粒子的质量、寿命、自旋三项与粒子是相同的,只有电荷的符号相反。但是,也有几种中性粒子(如中微子 ν_e, ν_μ 和 K^0 介子)和它们的反粒子

不是相同的粒子。 π^0 、 η^0 、 η' 的反粒子就是它们本身,没有区别。在碰撞过程中,粒子和它们的反粒子湮灭成了能量(以光子形式出现)。两个高能粒子相碰撞时,有可能产生新的正反粒子对,这时一部分碰撞能量转换成了正反粒子对的能量。

1.2.2 物质存在的状态

要认识物质存在的状态,首先要了解物质的基本微观结构层次及各层次的粒子运动。

“一尺之棰,月取其半,万世不竭”,实体物质由分子组成,分子由原子组成。到2017年为止,化学上已发现119种元素,数千种同位素。而原子呢,在化学反应里是不能再分的微粒,但在物理学里,却是可分的。原子由带正电的原子核和绕核运转的若干带负电的电子组成。电子做两种运动:绕核公转和自旋运动,电子很小,其线度小于 10^{-18}m ,带一个负电荷,尚未发现有任何结构,是基本粒子。而原子核是由质子和中子组成的,质子和中子统称为核子,核子有结构,由夸克组成。

近代物理告诉我们,处于各个层次的物理微粒,都在一定的范围内运动变化着,对应着一定的能量和相互作用。研究这些层次的科学分别叫固体物理学、分子物理学、原子物理学、核物理学、粒子物理学等,使用的探测仪器有各种计数器、正比室、云雾室、气泡室、质谱仪等,还有现代物理实验必备的加速器和对撞机。

自然界物质的存在状态中,除了常见的固态、液态、气态外,还有以下几种形态:

(1) 等离子态。等离子态就是在一定的条件下,将原子核外的电子全部剥离,成为赤裸裸的核与游离态电子的共存体。例如,在研究受控热核聚变时,氦在 10^8K 时,就成了等离子态。宇宙中的大多数可见物质都处在等离子态。

(2) 超固态。最早发现的超固态是天狼星的伴星,这是恒星演化到后期,中子简并压与引力压平衡,影响核外电子的活动范围从 10^{-8}m 缩小到 10^{-15}m ,原子塌缩到原子核的线度,形成了致密天体,天文学上叫白矮星。这种物质的密度远远超过了固态物质的密度,故叫超固态。

(3) 超密态。1967年天文观察发现一种奇特的新天体,它以极其精确的时间间隔发出极规则而又短促的无线电脉冲信号。最初人们以为是天上有文明的生物向地球发来的电报,所以曾一度把这种信号源叫作“小绿人”。后来经过科学研究才知道,发射这种信号的并不是什么“小绿人”,而是一种星体,天文学上叫它为脉冲星。现在已发现脉冲星的物理特征是质量和太阳相当,体积却很小,直径为20km左右,因此,密度极高,每立方厘米有2亿多吨;它的辐射能极大,是太阳的100万倍。现代科学认为,脉冲星是一种高速自转的中子星,脉冲周期即自旋周期。中子星有固定的亮斑,旋转一周,亮斑发出的光束就传出一个脉冲信号,这就是它呈现脉冲现象的原因。中子星是由质量大于太阳质量的恒星演化到后期,热核反应已经停止,能源接近枯竭,发生猛烈爆发形成的。因为恒星猛烈爆发后的急剧收缩,使恒星内部产生了极大的挤压力,把原子外层的电子“挤到”原子核里去了。整个星体则变成中子星了。这种中子态脉冲星,具有很强的磁场,20世纪30年代最先由苏联的朗道以猜测形式提出,美国的奥本海默曾经做出理论预言,但遭到人们的嘲讽,到70年代,英国的休伊斯发现脉冲星,一时轰动世界。

(4) 场。场是一种物质形态。例如引力场,我们抛出一个物体总会落到地面,因为它受到