

北京市精品课程配套教材

大学物理学

(上册)

吴柳 主编



北京交通大学出版社

北京市精品课程配套教材

大学物理学

(上册)

吴柳 主编
刘爱红 副主编

北京交通大学出版社
· 北京 ·

内 容 简 介

本书是 2007 年北京市高等学校精品课程建设项目的成果。编写时充分考虑了教育部最新制订的大学物理课程教学《基本要求》和与现行中学物理教学的衔接。

本书包括绪论、质点运动、动量守恒定律、能量守恒定律、角动量守恒定律、刚体力学、流体力学简介、相对论、静电场、恒定磁场、变化的电磁场,共 11 章,内容涵盖了《基本要求》的基本内容和大部分拓展内容。本书教学内容对应学时大约 64 学时。本书突出物理学的基本思想方法,反映科技发展前沿和物理学基本原理的应用实际,文字简洁,图文并茂,贴近生活,排版新颖,使用方便,可作为理工类专业大学物理基础课程的教材或教学参考书。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理学.上册/吴柳主编. —北京:北京交通大学出版社, 2009.3

ISBN 978-7-81123-512-8

I. 大… II. 吴… III. 物理学-高等学校-教材 IV. O4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 017559 号

责任编辑:谭文芳

出版发行:北京交通大学出版社 邮编:100044 电话:010-51686414 <http://press.bjtu.edu.cn>

印刷者:北京宏伟双华印刷有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:203×273 印张:17 字数:511 千字

版 次:2009 年 3 月第 1 版 2009 年 3 月第 1 次印刷

书 号:ISBN 978-7-81123-512-8/O·60

印 数:1~4000 册 定价:39.00 元

本书如有质量问题,请向北京交通大学出版社质监组反映。对您的意见和批评,我们表示欢迎和感谢。

投诉电话:010-51686043, 51686008; 传真:010-62225406; E-mail: press@bjtu.edu.cn。

本书是 2007 年北京市高等学校精品课程建设项目的成果。

编写本书的基本出发点有两个：一是教育部最新制订的《理工科非物理类专业大学物理课程教学基本要求》，二是充分考虑近年来中学物理执行《普通高中物理课程标准》的教学实际。

中学物理教学最显著的变化，是由原来的《全日制普通高级中学物理教学大纲》变为执行新的《普通高中物理课程标准》。与原《全日制普通高级中学物理教学大纲》对力、热、电、光等比较系统的知识基础要求比较，中学物理课程的必修内容在《普通高中物理课程标准》中明显减少，两个必修模块只涉及牛顿运动定律和机械能等经典力学的部分内容，原来必修的内容，例如动量定理，以及电、光、热等也仅在选修模块中涉及某些方面。另外，高考制度改革中实施的 3+x 模式，物理内容仅仅是作为理科综合的一部分而涉及，还有一些地区的学生甚至可以不选择物理作为高考科目，这些因素导致大学生的中学物理基础有了新的变化，而且知识程度参差不齐。

教育部最新制订的《理工科非物理类专业大学物理课程教学基本要求》，在知识层面与原来的基本要求有不小变化，如增加了流体力学、几何光学等内容。此外还对课程培养学生能力、素质方面做出了规定，对教学方法、手段等也提出了明确要求。

基于以上考虑，本书在编写过程中，在教学内容和体系安排方面都作了考虑，既要与现行中学物理基础衔接，又要满足新的《理工科非物理类专业大学物理课程教学基本要求》并留有余地，以便适应不同师生的需要，同时吸收国外教材的版面设计特点，图文并茂，激发学生主动学习的兴趣。

新的《理工科非物理类专业大学物理课程教学基本要求》包括核心内容和扩展内容两类。本书内容涵盖了所有的核心类内容，对大部分扩展类内容作了介绍并用“*”注明以备选用，忽略这部分内容并不影响后续内容的学习。

全书的内容体系安排，大致分为两个部分（上、下册），每部分对应教学学时大约 64 学时，以便与目前大多数理工科学校两个学期的大学物理教学实际相适应。第一部分（上册）包括绪论、力学、狭义相对论和电磁学，第二部分（下册）包括热学和振动、波、光学、量子物理基础。这样的内容体系安排，不仅考虑到便于学生接受，也试图体现大学物理课程涉及的一些重要思想。例

如,绪论部分可以归结为“物理规律是普遍的”;力学部分从守恒定律出发进行介绍,并体现“相互作用遵从守恒定律”;相对论部分体现“某些物理量是相对的,而物理规律是绝对的”;电磁学部分则反映“场具有动力学性质”;第二部分中,热学强调“能量流是不可逆的”;振动和波、光学、量子物理基础则通过“物质具有波动性”这根主线贯穿起来.当然,这并不是说物理思想就是这些,而是通过这些基本思想可以找到联系各部分知识的一种线索.这种的体系设计最初来自美国 IUPP (Introductory University Physics Project) 的一种模式“Six Ideas That Shaped Physics”.

教学内容注意与中学教学的连接,避免重复.例如高中物理中,动能定理是由牛顿定律导出的,本书则不去重复,而是从守恒定律出发得到动能定理.此外,教学内容也要反映现代物理的认识.例如我们是以守恒定律为中心而不是以力为中心来讲授力学的,对于磁场则作为电相互作用的相对论效应引入,这样有利于加深对磁场物理本质和电磁场的统一性的认识.同时,从物理学作为科学技术基础和为其它学科服务的角度,更要注意反映近代物理学的基础和巨大成就.在这方面,以量子霍尔效应为基础建立的电阻单位欧姆的国际标准就是一个例子.

“兴趣是最好的老师”.本书选取了大量接近生活的物理现象或反映物理学在科技中应用的插图,以期体现物理学是一门“活”的科学,提高对学生的吸引力.本书文字叙述力求简洁,增加亲切感;采用新颖的排版方式,留出标注的空间,方便学生使用.本书在内容叙述中间安排了一些思考题和简单练习题,培养学生读书的同时提出问题和思考问题的习惯.有的问题则需要通过网络等查找资料,目的在于鼓励和引导学生利用互联网等资源进行自主学习.

演示实验是大学物理课程教学的重要组成部分和手段.在课程教学中,鼓励学生通过演示实验学会观察和思考,体会“物理学本质上是一门实验的科学”,利用所学知识解释物理现象,通过定性分析培养学生提出问题、分析问题和解决问题的能力,学习“做物理”而不单是“学物理,做习题”.

教材编写是一项艰苦的工作.参加本书编写的有:刘爱红、唐莹、蔡天芳、杨甦、范玲和吴柳,刘爱红绘制了插图.本书初稿编写过程中,王波波阅读并修改了部分章节,王玉凤、赵红娥、刘岚岚等对部分章节提出了很好的修改建议,章晓丽、赵红敏等也付出过辛勤劳动,07级部分学生在试用中提出了一些好的意见和建议.科学出版社昌盛先生提供了新版《普通高中物理课程标准》.编者感谢北京交通大学出版社的大力支持,特别感谢谭文芳编辑付出的辛勤劳动.编者还十分感谢北京交通大学参与大学物理课程教学的同事们提供的无私帮助.由于时间仓促,本书还存在不少疏漏和谬误,希望各位老师和同学在使用过程中提出宝贵意见,以便进一步修改完善.

吴柳

2009年1月于红果园

国际单位制（SI）中的基本单位				
物理量名称	单位名称		符号	定 义
	中文	英文		
时间	秒	second	s	秒是铯-133 原子基态的两个超精细能级之间跃迁所对应的辐射的 9 192 631 770 个周期的持续时间
长度	米	metre	m	米是光在真空中 1/299 792 458 s 的时间间隔内所经路径的长度
质量	千克	kilogram	kg	千克是质量单位，等于国际千克原器的质量
物质的量	摩尔[尔]	mole	mol	摩尔是一系统的物质的量，该系统中所包含的基本单元的数目等于 0.012 kg 碳-12 的原子数目
电流	安[培]	ampere	A	真空中截面积可忽略的两无限长平行圆直导线内通以等量恒定电流，若两导线相距 1 m 时它们之间的相互作用力在每米长度上等于 2×10^{-7} N，则每根导线内的电流为 1 A
热力学温度	开[尔文]	kelvin	K	热力学温度单位开尔文是水三相点热力学温度的 1/273.16
发光强度	坎[德拉]	candela	cd	坎德拉是一光源在给定方向上的发光强度，该光源发出频率为 540×10^{12} Hz 的单色辐射，且在此方向上的辐射强度为 $(1/683)$ W/sr *sr 是立体角的单位，称为球面度

一些常用常量的计算用值					
真空中的光速 c		$299\,792\,458\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	基本电荷 e		$1.602\,176\,487(40)\times 10^{-19}\text{ C}$
普朗克常量 h		$6.626\,068\,96(33)\times 10^{-34}\text{ J}\cdot\text{s}$	电子质量 m_e		$9.109\,382\,15(45)\times 10^{-31}\text{ kg}$
$\hbar\ (h/2\pi)$		$1.054\,571\,628(53)\times 10^{-34}\text{ J}\cdot\text{s}$	阿伏伽德罗常量 N_A		$6.022\,141\,79(30)\times 10^{23}\text{ mol}^{-1}$
牛顿引力常量 G		$6.674\,28(67)\times 10^{-11}\text{ m}^3\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{s}^{-2}$	玻耳兹曼常量 k		$1.380\,650\,4(24)\times 10^{-23}\text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$
*上表数值是 2006 年 CODATA 最新推荐值(http://physics.nist.gov/constants)，计算时一般可取 3 位有效数字					
真空磁导率	μ_0	$4\pi\times 10^{-7}\text{ N}\cdot\text{A}^{-2}$	地球表面重力加速度	g	$9.8\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$
真空电容率 $1/(\mu_0c^2)$	ϵ_0	$8.85\times 10^{-12}\text{ C}^2\cdot\text{N}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$	太阳质量	M_S	$1.989\times 10^{30}\text{ kg}$
静止质子/中子质量	m_p	$1840m_e=1.67\times 10^{-27}\text{ kg}$	太阳半径	R_S	$6.96\times 10^8\text{ m}$
α 粒子质量	m_α	$6.64\times 10^{-27}\text{ kg}$	太阳总辐射功率	P_S	$4\times 10^{26}\text{ W}$
玻尔磁子	μ_B	$9.27\times 10^{-24}\text{ J}\cdot\text{T}^{-1}$	地球质量	M_E	$5.976\times 10^{24}\text{ kg}$
电子磁矩	μ_e	$-9.28\times 10^{-24}\text{ J}\cdot\text{T}^{-1}$	地球赤道半径	R_E	$6.378\times 10^6\text{ m}$
核磁子	μ_N	$5.05\times 10^{-27}\text{ J}\cdot\text{T}^{-1}$	日地平均轨道半径	AU	$1.496\times 10^{11}\text{ m}$
质子磁矩	μ_p	$1.41\times 10^{-26}\text{ J}\cdot\text{T}^{-1}$	月球质量	M_M	$0.0123M_E=7.35\times 10^{22}\text{ kg}$
中子磁矩	μ_n	$-0.966\times 10^{-26}\text{ J}\cdot\text{T}^{-1}$	月球半径	R_E	$1.74\times 10^6\text{ m}$
玻尔半径	a_0	$0.529\times 10^{-10}\text{ m}$	月地平均轨道半径		$3.84\times 10^8\text{ m}$
经典电子半径	r_e	$2.82\times 10^{-15}\text{ m}$	哈勃常量	H	$2.5\times 10^{-18}\text{ s}^{-1}$
磁通量子 $h/(2e)$	Φ_0	$2.068\times 10^{-15}\text{ Wb}$	摩尔气体常量	R	$8.31\text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
电导量子 $2e^2/h$	G_0	$7.748\times 10^{-5}\text{ S}$	理想气体摩尔体积(273.15K,101 325Pa)	V_m	$22.4\times 10^{-3}\text{ m}^3\cdot\text{mol}^{-1}$
von Klitzing 常量 h/e^2	R_K	$25.812\,807\ \Omega$			
精细结构常量的倒数 $2\epsilon_0cR_K$	α^{-1}	137	电子伏特	eV	$1.602\times 10^{-19}\text{ J}$
里德堡常量 $\alpha^2m_ec/(2h)$	R_∞	$1.10\times 10^7\text{ m}^{-1}$	原子质量单位	u	$1.66\times 10^{-27}\text{ kg}$
康普顿波长 $h/(m_ec)$	λ_C	$2.43\times 10^{-12}\text{ m}$			$=931.5\text{ MeV}/c^2$
斯特藩-玻耳兹曼常量	σ	$5.67\times 10^{-8}\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$	标准大气压	atm	101 325 Pa
维恩位移定理常量	b	$2.898\times 10^{-3}\text{ m}\cdot\text{K}$			



第 1 章 绪论	1
1-1 物质世界	1
1-1-1 物质	2
1-1-2 数量级的概念	2
1-1-3 空间尺度	3
1-1-4 时间尺度	4
1-1-5 质量范围	5
1-1-6 时间空间与物质运动	5
1-2 物理学	6
1-2-1 物理学的对象和方法	6
1-2-2 物理学与对称性	7
1-2-3 物理量与国际单位制	7
1-2-4 量纲与量纲分析	9
1-3 物理学与科学技术	10
1-3-1 物理规律的普适性	10
1-3-2 自然科学的基础	11
1-3-3 技术革命的源泉	11
1-3-4 物理学与社会和社会科学	12
习题	14
第 2 章 质点运动	15
2-1 直角坐标系中质点运动的描述	15
2-1-1 质点模型	15
2-1-2 参考系与坐标系	16
2-1-3 位置矢量与运动方程	16
2-1-4 位移与路程	17
2-1-5 速度	18
2-1-6 加速度	19
2-2 自然坐标系中质点运动的描述	23
2-2-1 切向加速度与法向加速度	23

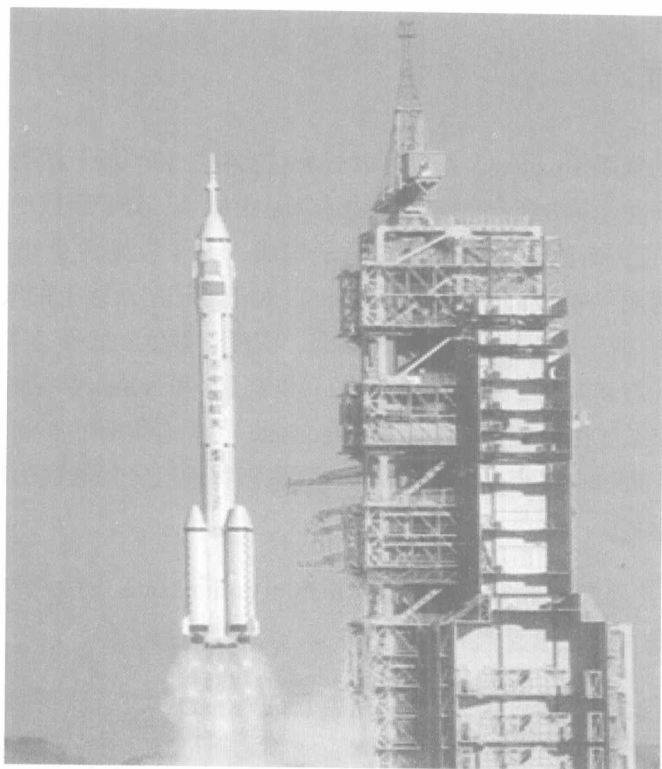
2-2-2 圆周运动及其角量描述	24
2-3 伽利略变换	27
2-3-1 运动的相对性	27
2-3-2 伽里略变换	27
2-3-3 加速平动参考系间的变换关系	29
*2-3-4 科里奥利加速度	30
习题	31
第 3 章 动量守恒定律	36
3-1 动量及动量守恒定律	37
3-1-1 惯性定律和惯性参考系	37
3-1-2 动量和动量守恒定律	37
3-1-3 力和牛顿第三定律	39
3-1-4 质点系动量守恒的条件	41
3-2 动量定理	43
3-2-1 冲量 动量定理	43
3-2-2 变质量系统	46
3-3 牛顿定律	48
3-3-1 牛顿第二定律	48
3-3-2 非惯性系 惯性力	51
3-3-3 质心运动定理	53
习题	55
第 4 章 能量守恒定律	58
4-1 [*] 动能定理	58
4-1-1 能量守恒定律	58
4-1-2 质点的动能定理	60
4-1-3 功和功率	61
4-1-4 质点系的动能定理	63
4-1-5 一对力的功	63
4-2 机械能守恒定律	64
4-2-1 保守力与势能	64
4-2-2 功能原理	67
4-2-3 机械能守恒定律及其应用	68
*4-2-4 质心系中动能定理和功能原理	71
*4-2-5 经典力学中的内在随机性与混沌	73
习题	75
第 5 章 角动量守恒定律	78
5-1 角动量守恒定律	78
5-1-1 角动量	78
5-1-2 角动量守恒定律	80
5-2 角动量定理	81

5-2-1 质点的角动量定理	81
5-2-2 质点在有心力作用下的运动	84
5-2-3 质点系的角动量定理	85
5-2-4 质点系角动量守恒的条件	86
*5-2-5 质心系中的角动量定理	87
*5-3 对称性与守恒定律	88
5-3-1 基本粒子与相互作用	88
5-3-2 相互作用遵从守恒定律的约束	90
5-3-3 对称性	91
5-3-4 对称性与守恒定律	92
5-3-5 对称的自发破缺	94
习题	94
第 6 章 刚体力学	97
6-1 刚体运动学	97
6-1-1 刚体模型	97
6-1-2 刚体的平动和转动	98
6-1-3 角速度 角加速度	98
6-1-4 定轴转动 定点转动	99
6-2 刚体动力学	100
6-2-1 刚体对定轴的角动量和转动惯量	100
6-2-2 刚体定轴转动的角动量定理	102
6-2-3 刚体定轴转动的动能定理	105
*6-2-4 刚体的定点运动 旋进	107
*6-2-5 刚体的平面平行运动	108
习题	109
第 7 章 流体力学简介	113
7-1 流体静力学	113
7-1-1 静止流体中的压强	113
7-1-2 表面张力与毛细现象	116
7-2 理想流体的流动	118
7-2-1 理想流体	118
7-2-2 流量 流体的连续性原理	118
7-2-3 伯努利方程	120
*7-3 粘滞流体	122
7-3-1 流体的粘性	122
7-3-2 泊肃叶公式和斯托克斯公式	122
7-3-3 湍流	124
习题	124
第 8 章 相对论	127
8-1 狭义相对论时空变换	127

8-1-1 伽利略时空变换的基础	127
8-1-2 电磁波理论与狭义相对论的创立	129
8-1-3 爱因斯坦的两个基本假设	130
8-1-4 洛伦兹变换	131
8-1-5 相对论的速度变换	133
8-2 狭义相对论时空观	135
8-2-1 同时的相对性	135
8-2-2 时间延缓	136
8-2-3 长度收缩	138
*8-2-4 间隔不变性与因果律	141
8-3 相对论动力学基础	142
8-3-1 相对论质量和动量	143
8-3-2 相对论能量	144
8-3-3 动量定理和动能定理	146
8-3-4 对应原理	147
*8-4 广义相对论简介	148
8-4-1 广义相对论基本原理	148
8-4-2 光线的引力偏折和时空弯曲	150
8-4-3 引力红移和引力时间延缓	152
8-4-4 宇宙 黑洞	153
习题	154
第9章 静电场	157
9-1 电相互作用 电场强度	158
9-1-1 电荷的基本性质	158
9-1-2 库仑定律	159
9-1-3 电场强度	160
9-1-4 场的叠加原理和电场强度的计算	161
9-1-5 电场中电荷的受力	164
9-2 静电场的高斯定理	164
9-2-1 电场线与电通量	164
9-2-2 高斯定理	165
9-2-3 高斯定理的应用举例	168
9-3 静电场环路定理 电势	170
9-3-1 静电场的环路定理	170
9-3-2 电势能 电势	171
9-3-3 电势的计算	173
9-3-4 电场强度与电势的关系 等势面	174
9-3-5 带电粒子的静电能	176
9-4 静电场中的导体	177
9-4-1 导体的静电平衡条件	177

9-4-2 静电平衡时导体上的电荷分布	178
9-4-3 空腔导体与静电屏蔽	179
9-5 静电场中的电介质	181
9-5-1 电介质的极化	181
9-5-2 极化强度和极化电荷	183
9-5-3 有电介质时的静电场 环路定理和高斯定理	184
9-5-4 压电效应 铁电体 驻极体	186
9-6 电容	186
9-6-1 电容器的电容	186
9-6-2 电容器的连接	189
9-6-3 电容器的储能	189
9-6-4 电场的能量	190
习题	192
第 10 章 恒定磁场	196
10-1 运动电荷的电场和磁场	196
10-1-1 运动电荷间的相互作用力	196
*10-1-2 运动电荷的电场 (相对论情况)	199
*10-1-3 运动电荷的磁场 (相对论情况)	200
10-1-4 磁场的基本性质	202
*10-1-5 磁矢势 A	203
10-2 恒定电流	205
10-2-1 电流密度	205
10-2-2 电源电动势	207
*10-2-3 欧姆定律和焦耳定律的微分形式	207
*10-2-4 基尔霍夫电路方程	209
10-3 恒定电流的磁场	210
10-3-1 毕奥—萨伐尔定律	210
10-3-2 恒定电流磁场的安培环路定理	214
10-4 恒定磁场中带电粒子的运动	217
10-4-1 磁场对带电粒子的作用力	217
10-4-2 霍耳效应	219
10-4-3 载流导线在磁场中所受的力	220
10-4-4 磁场对载流线圈的力矩	222
*10-4-5 磁力的功	223
习题	224
第 11 章 变化的电磁场	228
11-1 电磁感应	228
11-1-1 法拉第电磁感应定律	228
11-1-2 感生电动势 涡旋电场	231
11-1-3 感生电动势	234

*11-1-4 两种电动势的相对论实质	237
11-2 物质的磁性	237
11-2-1 磁场中介质的磁化	237
11-2-2 有磁介质时磁场的安培环路定理	239
11-2-3 铁磁质	241
11-3 自感与互感	243
11-3-1 自感	243
11-3-2 互感	245
11-3-3 自感磁能	247
11-3-4 磁场的能量	248
11-4 麦克斯韦方程组	249
11-4-1 位移电流	250
11-4-2 麦克斯韦方程组	251
*11-4-3 麦克斯韦方程组与狭义相对论的协调一致	253
11-5 电磁波	254
11-5-1 平面电磁波的性质	254
11-5-2 电磁波的能量 动量	255
11-5-3 加速电荷发射的电磁波	256
习题	257



图为我国首次载人航天飞船“神州”5号由“长征2号F”火箭发射升空。这里从火箭发射、飞船通信、导航和轨道定位控制到微重力环境、地球磁场和宇宙射线，等等，都离不开物理学。

第1章

绪论

物理学是研究物质、能量和它们的相互作用的学科。

——第23届国际纯粹物理与应用物理联合会（IUPAP）大会决议

物理学是我们认识世界的基础，……是其他科学和绝大部分技术发展的直接的或不可缺少的基础，物理学曾经是、现在是、将来也是全球技术和经济发展的主要驱动力。

——第三次世界物理学会大会决议

1-1 物质世界

自然界是由物质构成的。物质状态的变化叫作运动。一切物质都处于运动之中。物质和运动有各种各样的形式和层次，从电子跃迁、核的裂变聚变到星系演变、日月经天，乃至沧海桑田、生物进化，无一不是物质运动的结果，无一不是由运动着的物质组成的。

1-1-1 物质

物理学所研究的物质 (matter) 大致可以分为“实物”和“场”两类。

我们知道, 物质世界是分层次的. 各种物体都是由原子、分子组成的, 分子也是由原子构成的, 而原子由原子核和电子构成, 原子核则由更小的粒子——质子和中子构成. 它们都属于实物 (object). 对于原子层次以上的实物, 人们习惯于按照其物理特性 (形状、结构、强度、密度、颜色、表面, 等等) 分为固态、液态、气态和等离子态. 图 1-1 中, 冰雪、水和云是水常见的固、液和气态. 固态和液态统称为凝聚态 (condensed state). 固态里有晶态和非晶态之分, 液态里有液晶和非晶液态之分. 今天, 凝聚态物理已经发展成为现代物理学最大的分支学科.



图 1-1 冰雪、水和云是水常见的固、液和气态

练习题: 玻色-爱因斯坦聚集质 (Bose-Einstein condensate) 是一种什么样的物质形态? 请通过互联网查找有关它的知识.

实物之间的相互作用是通过场 (field) 来实现的. 人们习惯于按照相互作用的类型来划分场, 如电磁场、引力场, 等等. 实物之间可以存在多种相互作用场. 场作为物质的存在形式, 具有质量、动量和能量. 场和实物的最大区别在于, 实物具有空间排斥性, 即实物只能占据“空”的空间, 而不能进入已经被其他实物占据的空间; 与之不同, 场具有空间可叠加性, 不同的场可以在同一空间内共存. 如图 1-2 所示, 手机作为实物, 其他实物不可能进入手机所在空间, 但手机接收的电磁波是一种电磁场, 同时手机还受到引力场作用, 电磁场和引力场却可以同时处于手机所在空间.



图 1-2 电磁场和引力场都作用在手机上; 说明场与实物的空间排斥性不同, 场可以共处同一空间

应当指出, 按照现代物理学的观点, 组成原子的各种微观粒子本身都是“场”的特殊形态. 所谓“粒子”不过是在描述场的某些状态、组合、运动形式或相互联系时更方便直观的物理图象而已. 在现代物理学中, 更进一步把电子、光子等各种微观粒子直接用场描述, 从而有电子场、光子场等. 对粒子和场的本质的认识, 属于量子场论等现代物理的任务, 本书不做深入讨论.

物理学家认为, 丰富多彩的自然界是一个内部存在普遍规律的统一体, 他们的理想就是为整个物质世界找出统一自洽的基本规律. 与其他学科 (如化学、生物学, 等等) 不同, 物理学没有为自己的研究领域规定时空限制. 随着人类认识物质世界的能力向时间和空间极限的不断逼近, 物理学家对物质世界的层次和尺度有了日益广泛和深刻的理解.

1-1-2 数量级的概念

为了便于描述物质世界的不同层次, 常引入数量级的概念.

通常把 10 的幂指数称为数量级, 简称量级. 比如真空中的光速为 $c=2.997\,924\,58\times 10^8\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 其数量级是 8; 人的平均身高为 1.7 m 左右, 数量级为 0; 原子的半径 (约 10^{-10}m) 比人的身高小 10 个数量级; 等等. 有了数量

级的概念,就便于定性或半定量地描述和讨论不同层次的物理图象,避免拘泥于冗繁的数字计算。

为了方便,人们还规定了一些词头,将基本单位(如米、秒等)和这些词头结合起来反映数量级的变化。在国际单位制里,人们在 10^{-24} 到 10^{24} 这 48 个量级之间规定了 20 个词冠,并赋予特定的名称和符号,参见表 1-1。其中一些词头和物理量的基本单位组合在一起,已经成为物理学名词的一部分,比如纳米科学、飞秒光谱,等等。

表 1-1 国际单位制所用的词头

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

练习题: 什么叫太赫兹技术? 请通过互联网查找有关它的知识。

1-1-3 空间尺度

“四方上下曰宇,古往今来曰宙”。时间和空间本身就是物质世界的组成部分。世间万物的存在、演化、变迁都需要相应的时空。对宇宙及世间万物的认识构成了人们的世界观。

空间(space)是表征物质及其运动的广延性及物质彼此间的排列顺序的物理量。在日常生活中,人们感觉到的空间是平直均匀的三维空间,符合欧几里得(Euclid)几何假设。空间的大小归结为各维度的长度,可以选择某个物体的尺度(例如人的臂长)作为标准来测量。长度的基本单位为米,用 m 表示。它定义为光在真空中 $1/299\,792\,458$ 秒的时间间隔内行进的距离。

现代科学研究涉及的空间尺度从小到 10^{-17} m 的亚原子粒子到大至 10^{26} m 的宇宙半径,跨越了大约 43 个数量级。参见表 1-2。在物理上,把大小接近或小于原子尺度数量级的研究客体叫作微观系统(microscopic system),与之对应,大的一端涉及星系尺度的称为宇观系统(cosmological system)。而把大小在人体尺寸上下几个数量级范围内的客体称为宏观系统(macroscopic system)。近年来,随着纳米科学的发展,人们把由十几个到数百个原子组成的团簇及同量级大小的客体称为介观系统(mesoscopic system)。一般而言,宏观系统和微观系统服从的规

表 1-2 空间尺度举例(单位: m)

已观测到的宇宙范围	10^{26}
极限	
超星系团	10^{24}
银河系半径	7.6×10^{22}
光一年内走的距离(1 光年)	10^{16}
日地距离	1.5×10^{11}
太阳半径	7×10^8
地球半径	6×10^6
无线电中波波长	10^3
核动力航空母舰长度	3×10^2
成人身高	~ 1.7
灰尘线度	10^{-3}
人类红血球细胞直径	10^{-6}
细菌线度	10^{-9}
原子线度	10^{-10}
原子核线度	10^{-15}
基本粒子线度	10^{-17}
普朗克长度(理论极限值)	10^{-35}

律是不同的,而介观系统虽然从空间范围上更接近宏观系统,它们却常常表现出微观系统的特征和效应。

前面所说空间尺度包含的43个量级,只是目前认识能力所能达到的界限.从大的一端说,宇宙是否是无限大的、为什么空间是三维的至今还没有定论.空间有限和无限的问题实际上和空间的维数有关.举例来说,一个球面上的蚂蚁,无论它怎样爬行都不会受到限制,自然“认为”它的世界(二维球面)是无界的;但对观察它的人来说,这个球面是有限的,换句话说,蚂蚁的“宇宙”是有限无界的.现实的宇宙是否也是有限无界的呢?这需要得到证实或证伪才行.

从小的一端说,物质是否无限可分?古人说“一尺之棰,日取其半,万世不竭”,哲学上也有“物质无限可分”的命题,但或许物理学更需要回答“怎么分?”“分成了什么?”“何时不可分?”这样一些问题.虽然 atom (原子)按希腊文 $\alpha\tau\omicron\mu\omicron\varsigma$ 的原意是“不可分割的”,但后来的事实证明原子是有结构的,它由原子核和核外电子组成.再深入下去,就会发现并不这么简单.粒子物理的实验结果表明,组成质子、中子、介子等微观粒子的“夸克”,被“禁闭”在一个很小的区域内,各个夸克之间的相互作用随距离的增加而增加,要“分”出夸克似乎是不可能的——当用于“分割”的能量达到足够大时,又会产生出新的粒子!事实上,至今也没有直接观察到单独存在的自由夸克.因此,现在只能说这些粒子是有内部结构的复合粒子,“可分”的说法似乎失去了原意.可见,物质结构有层次与物质不可分是两回事.

上述大与小两个极限方向的研究属于当代物理学的前沿,但在二者之间的整个空间范围,一直也是物理学研究极为重要和活跃的领域.

1-1-4 时间尺度

没有物质的存在就没有空间,而没有物质的运动就没有时间.时间(time)是平行于空间的另一个基本概念,它是表征物质存在的持续性、物质运动变化的持续性和顺序性的物理量.与空间是三维的不同,时间是一维的,而且沿着从过去到未来单向均匀地流逝.时间的计量可以选择物质运动的某个周期性的变化过程(例如地球绕太阳运动的周期)作为标准来进行.时间的基本单位为秒,用 s 表示.它定义为铯-133 原子基态两个超精细能级之间跃迁所对应辐射周期的 9 192 631 770 倍的持续时间.

现代科学研究涉及的时间尺度从寿命约为 10^{-25}s 的 Z^0 粒子到宇宙年龄(约 10^{18}s)跨越了大约 43 个数量级.参见表 1-3. 对于宇宙的年龄,理论和实验观测的推算值还比较粗糙.按照宇宙大爆炸模型,宇宙是从“大爆炸”中诞生的,时间的起点从爆炸开始时算起,由此可以推算出宇宙的年龄大约在 150 亿年左右.由哈勃望远镜的最新观测数据推算的结果也在这个数量级范围.

绝大多数微观粒子也是有寿命的,它们经过一定时间后就会衰变成为其他粒子.粒子的寿命是粒子从产生到衰变所存在的平均时间.多数粒子的寿命都

表 1-3 时间尺度举例(单位: s)

宇宙年龄	10^{18}
太阳系年龄	1.4×10^{17}
原始人	10^{13}
最早的文字记录	1.6×10^{11}
人类平均寿命	2.2×10^9
地球公转(一年)	3.2×10^7
地球自转(一天)	8.6×10^4
太阳光到地球的传播时间	5×10^2
人类心脏跳动周期	1
声波的周期	10^{-3}
无线电波的周期	10^{-6}
π^+ 介子的平均寿命	10^{-9}
分子振动周期	10^{-12}
原子振动周期(光波周期)	10^{-15}
光穿越原子的时间	10^{-18}
最短的粒子寿命	10^{-25}
普朗克时间(理论极限值)	10^{-43}

比较短,但电子、质子等粒子的寿命被认为是无限长或接近无限长。

1-1-5 质量范围

在17世纪的牛顿时代,质量曾用于表示“物质之量”。但二者是有区别的。物质之量在今天用于表示原子数目的多少,其单位为摩尔(mole),并在1971年正式确认为国际单位制的7个基本单位之一。而质量(mass)的概念要复杂得多,有引力质量和惯性质量之分。在现代物理学中,物质的质量和它自身的运动状态有关,并与能量相联系。关于质量将分别在有关章节进行讨论。

质量的基本单位为千克,用kg表示。现代物理学所涉及物质质量跨越的范围更大。参见表1-4。按照现代物理学观点,光子和所有以光速运动的粒子具有的静止质量为零。这无疑是质量范围的下限,质量的上限应是宇宙的总质量。目前根据星体发光的光度学理论得到的宇宙总质量比动力学理论的结果要小1~2个数量级,由此人们推测宇宙中还存在所谓暗物质(dark matter)。在现有理论中,暗物质的存在与否具有特别的意义,由此可以给出宇宙是有限还是无限的理论判断。因此,物理学和天文学都极为关心寻找暗物质工作。有

表1-4 质量范围举例(单位: kg)

银河系	2.2×10^{41}
太阳	2.0×10^{30}
地球	6.0×10^{24}
月亮	7.4×10^{22}
地球上的海洋	1.4×10^{21}
远洋轮船	10^8
大象	10^3
人	$\sim 6.0 \times 10^1$
葡萄	10^{-3}
灰尘	10^{-10}
烟草花叶病毒	2.3×10^{-13}
青霉素分子	5.0×10^{-17}
铀原子	4.0×10^{-26}
质子	1.7×10^{-27}
电子	9.1×10^{-31}
中微子	$< 2.0 \times 10^{-35}$

意思的是,暗物质的存在可能与中微子这种极微小的粒子是否有不为零的静止质量有关。也就是说,对尺度极小的微观粒子的研究结果可能决定着大尺度宇宙的图象,而且也许还是关于宇宙有限还是无限的关键性问题!这似乎也说明,整个物质世界是既分层次又属于一个和谐和统一的整体。图1-3形象地说明了这点。

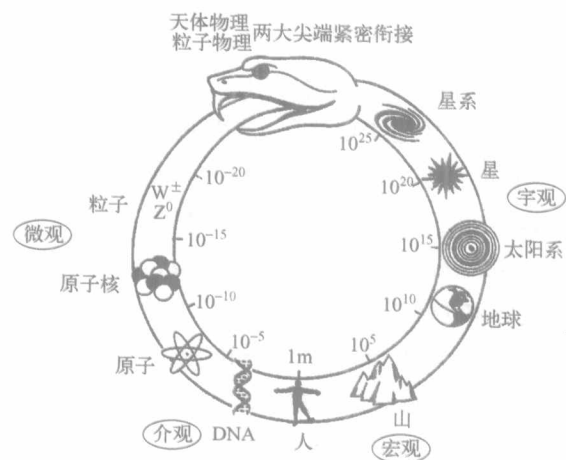


图1-3 宇宙是和谐和统一的(图中数字是空间尺度)

1-1-6 时间空间与物质运动

顺便指出,时间、空间、物质和运动其实是相互联系的。从当代的认识来看,宇宙创生于“无”。伴随着宇宙的创生,才有物质存在和运动,也才有时间和空间。时间和空间本身也是物质的。没有物质存在就没有空间,空间是一种特殊形态的物质。而物质运动具有规律性,即运动过程中各种状态存在因果关系,这种因果序列构成了时间。和时间不同,时间是一维单向的。物质运动的单向性和周期性是认识和计量时间的基础。

时空概念的存在是有条件的。理论上时间和空间分别存在的最小极限值 t_p 和 l_p (参见例题1-1),分别称为普朗克(M. Planck)时间和普朗克长度。