



普通高等教育“十二五”规划教材
21世纪高等学校物理学精品教材

大学物理学教程

DAXUE WULIXUE JIAOCHENG

下册

李 钰 李 新 主编



科学出版社

普通高等教育“十二五”规划教材
21世纪高等学校物理学精品教材

大学物理学教程(下)

李 钰 李 新 主编

科 学 出 版 社

北 京

版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229;010-64034315;13501151303

内 容 简 介

本书根据教育部高等学校物理学与天文学教学指导委员会制订的“理工科类大学物理课程教学基本要求”,在编者总结长期教学经验和教学改革实践的基础上,结合当前国内外优秀教学研究成果编写而成的。本书力图在加强学生基础理论的同时,重点培养学生分析问题、解决问题的和独立思考的能力。

教材内容参照优秀工科物理教材的体系,分为上、下两册。上册分为力学、电磁学两篇,下册分为热学、振动与波、光学、近代物理基础和分子与固体、核物理与粒子物理、天体物理与宇宙学、现在科学与高新技术的物理基础专题。

本书可以作为高等学校工科、理科各专业的大学物理课程教材,也可供相关科技工作者参考和其他读者自学。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理学教程(下)/李钰,李新主编.—北京:科学出版社,2015.1
普通高等教育“十二五”规划教材 21世纪高等学校物理学精品教材
ISBN 978-7-03-042465-5

I.①大… II.①李… ②李… III.①物理学-高等学校-教材 IV.①04

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 263070 号

责任编辑:王雨舸/责任校对:董艳辉

责任印制:高 嵘/封面设计:苏 波

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>

武汉市新华印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

开本:16开 787×1092 1/16

2015年1月第一版 印张:18 1/4

2015年1月第一次印刷 字数:452 800

定价:42.80元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

物理学研究物质世界的基本结构、相互作用以及最普遍的运动规律,是所有自然科学和工程技术的基础。而以物理学为基础的大学物理课程,是高等学校理工科各专业学生的一门重要的必修课。该门课程所讲授的基本概念、理论和方法既是构成学生科学素养的重要组成部分,也是每个科学工作者和工程技术人员所应具备的。

物理学是一门基础学科,从古代物理学发展到经典物理学,再到近代物理学,物理学的每一次发展都对人类的文明和科技进步起到了非常巨大的作用。因此,物理学是科技人才素质教育的基础。为了让物理学更加走近大众,让世界了解物理学,联合国第 58 次会议通过了 2005 年为“国际物理年”的决议,这是目前唯一一个以学科命名的年份,表明物理学对社会的发展起着巨大的推动作用,得到了国际社会的普遍认可。

本书是根据教育部最新制订的“理工科非物理类专业大学物理课程教学基本要求”,在编者多年教学实践经验的基础上进行总结编写的。它涵盖了“理工科非物理类专业大学物理课程教学基本要求”中的所有 A 类内容;B 类内容中有的以带“*”号的形式出现,有的写成了专题形式,可供广大读者参考和自学。

本书编写的初衷,是为高等学校理工科各专业的学生提供一套难度合适、内容充实的教材。在这一指导思想框架下,作者结合多年来的教学实践经验和教育理念,充分借鉴国内外教材改革的成果,力求博采众长,使教材不仅便于教师讲授,也便于学生阅读和自学,更加适应当前大学物理课程的教学要求。教材主要有以下特色:

- (1) 强调物理思想和物理图像,简约推导过程,能够用物理图像解释清楚的问题,尽量不用复杂的数学来推证;
- (2) 注重物理学知识与自然现象相结合、与生活相结合、与科学技术相结合,以增强物理学的生动感和真实感;
- (3) 注重科学思维和科学方法的培养,把物理学方法论中涉及的基本原理介绍给读者;
- (4) 近代物理学的内容叙述上力求生动、通俗易懂;
- (5) 开设专题阅读,介绍物理学前沿和现代物理技术应用,以激发读者对物理的学习兴趣;
- (6) 与国际物理教育相接轨,书中首次出现的物理概念和定律注明了其英文名称。

本书分为上、下两册。上册包括力学、电磁学等内容;下册包括热学、振动与波、光学、近代物理基础和分子与固体、核物理与粒子物理、天体物理与宇宙学、现在科学与高新技术的物理基础专题等。在保证大学物理课程教学体系的整体性和系统性的基础上,章节的具体编排上适当的考虑了教学上的方便。例如,狭义相对论和量子物理同属于近代物理的内容,两部分知识之间有较强的联系,因此本书把它们排在经典物理学内容的后面,共同属于近代物理基础篇。

本书由武汉科技大学理学院应用物理系大学物理教研室的教师们共同编写完成。上册编写人员:侯阳来、衡伯军、李新、李钰、魏然。下册编写人员:侯廷平、徐麦容、李俊、闵永泉、戴厚

梅、卢建夺、李云宝。

本书(下册)由李钰、李新主编,李俊、卢建夺、闵永泉、徐麦容任副主编。熊祖钊教授对本套教材的编写提出了一些建议,周怡等老师对本套教材的编写给予了许多帮助和支持,在此一并表示由衷的谢意。

由于编写时间有限,书中难免会有不足之处,欢迎广大读者提出宝贵意见和建议,我们将在今后的再版中予以纠正,使我们的教材不断完善和提高。

编者

2014年9月

目 录

第 12 章 气体动理论	1
12.1 气体分子运动的基本概念	1
12.2 气体动理论的基本思想	5
12.3 统计规律性 等概率假设	6
12.4 理想气体的压强与温度	8
12.5 麦克斯韦速率分布律	12
12.6 理想气体内能	16
12.7 气体分子的平均碰撞频率和平均自由程	19
思考题与习题	21
第 13 章 热力学基础	25
13.1 热力学第一定律	25
13.2 热力学第一定律在典型热力学过程中的应用	31
13.3 循环过程 卡诺循环	38
13.4 热力学第二定律	43
13.5 熵与熵增加原理	48
思考题与习题	52
第 14 章 机械振动	59
14.1 简谐振动的特征及描述	59
14.2 简谐振动的能量	68
14.3 阻尼振动、受迫振动、共振	71
14.4 简谐振动的合成 拍	75
思考题与习题	80
第 15 章 机械波	84
15.1 机械波的基本特征	84
15.2 平面简谐波的波函数	89
15.3 波的能量	93
15.4 惠更斯原理、波的干涉	97
15.5 驻波	104
15.6 多普勒效应	108
思考题与习题	110
第 16 章 光的干涉	113
16.1 光的波动性	113
16.2 获得相干光的方法	115

16.3	分波面干涉、双缝干涉	117
16.4	分振幅干涉 薄膜干涉	121
16.5	迈克耳孙干涉仪	127
	思考题与习题	128
第 17 章	光的衍射	131
17.1	惠更斯-菲涅耳原理	131
17.2	单缝衍射	133
17.3	圆孔衍射及其应用	136
17.4	光栅衍射 光栅光谱	139
17.5	X 射线衍射	143
	思考题与习题	145
第 18 章	光的偏振	147
18.1	自然光、偏振光	147
18.2	偏振片的起偏与检偏	148
18.3	马吕斯定律	149
18.4	布儒斯特定律、反射和折射产生的偏振	150
18.5	双折射现象	152
18.6	偏振光的干涉	156
18.6	旋光现象	160
	思考与练习题	160
第 19 章	狭义相对论	165
19.1	伽利略变换式、牛顿的绝对时空观	165
19.2	迈克耳孙-莫雷实验	167
19.3	狭义相对论的基本原理	169
19.4	狭义相对论的时空观	172
19.5	光的多普勒效应	176
19.6	狭义相对论动力学基础	177
	思考与练习题	182
第 20 章	量子物理基础	184
20.1	黑体辐射、普朗克能量子假说	184
20.2	光电效应 爱因斯坦光子假说	188
20.3	康普顿效应	192
20.4	氢原子光谱 玻尔氢原子理论	194
20.5	德布罗意的物质波	202
20.6	波函数及其统计解释	207
20.7	不确定关系	210
20.8	薛定谔方程	212

20.9 一维无限深势阱	214
思考与练习题	218
第 21 章 原子、分子与固体	221
21.1 原子	221
21.2 分子	231
21.3 固体的能带	236
21.4 导体、绝缘体和半导体	239
21.5 pn 结、半导体器件	240
思考与练习题	246
第 22 章 核物理与粒子物理	249
22.1 原子核的基本性质	249
22.2 原子核的裂变与聚变	254
22.3 粒子及其分类	256
22.4 基本相互作用与标准模型	261
思考与练习题	263
第 23 章 天体物理与宇宙学	264
23.1 广义相对论基础	264
23.2 恒星的演化过程	269
23.3 宇宙膨胀和大爆炸	270
思考与练习题	272
前沿选讲 激光	273
习题答案	278

第 12 章 气体动理论

我国古代传说,燧人氏钻木取火,奉为千古圣皇。古希腊神话中,普罗米修斯盗天火开罪而泽惠天下,崇为世间英雄。在古代各民族的语言里,“火”与“热”几乎是同义语。热学这一门科学起源于人类对于热与冷现象本质的追求。由于史前人类已经能使用火,我们可以想象,追求热与冷现象本质的企图可能是人类最初对自然界法则的追求之一。热学的研究对象是一些由大量分子、原子组成的宏观物体或宏观物体系。因此对热现象进行研究有两条基本途径:一是宏观理论;二是微观理论。本章从宏观、微观两条途径分别介绍气体分子所遵循的规律。

本章的主要内容包括气体动理论的基本概念,气体的状态参量,理想气体的压强和温度等宏观量的物理本质,能量均分定理,理想气体的内能,麦克斯韦气体速率分布律,气体平均自由程,平均碰撞次数等概念。重点在于介绍统计物理学中处理问题的统计方法,同时揭示气体的一些宏观性质的微观实质。

12.1 气体分子运动的基本概念

温度是热力学中非常重要的一个物理量,人们最初是从直觉引入这个概念,即物体的冷热程度。这主要依赖于人的主观感觉没有一个客观上的描述。直到热力学第一和第二定律建立 80 年后,即 20 世纪 30 年代才由英国物理学家 R.H.Fowler 正式提出热力学第零定律,从而解决温度定义的难题。本节侧重介绍温度的概念及其与压强、体积等宏观参量之间的关系。

12.1.1 温度 热力学第零定律

温度(temperature)是个十分抽象的概念,它是表示物体冷热程度的物理量,微观上来讲反映了物体分子热运动的剧烈程度。温度的科学概念是建立在热力学第零定律(zeroth law of thermodynamics)基础上的。

1. 热力学第零定律

如果两个热力学系统中的每一个都与第三个热力学系统处于热平衡(温度相同),则它们彼此也必定处于热平衡。这一结论称为“热力学第零定律”。热力学第零定律用来作为进行体系测量的基本依据,其重要性在于它说明了温度的定义和温度的测量方法。表述如下:

(1) 可以通过使两个体系相接触,并观察这两个体系的性质是否发生变化而判断这两个体系是否已经达到平衡。

(2) 当外界条件不发生变化时,已经达成热平衡状态的体系,其内部温度是均匀分布的,并具有确定不变的温度值。

一切互为热平衡的体系具有相同的温度,所以,一个体系的温度可以通过另一个与之平衡的体系的温度来表达;或者也可以通过第三个体系的温度来表达。换言之,温度就是决定体系

是否能够达到热平衡的一种宏观性质。

2. 温度 温标

温度的数值表示法叫温标,就像测量物体的长度要用长度标尺——“长标”一样,是一种人为的规定,或者称为一种单位制。经验温标包括三个要素:测温物质、测温属性和固定点的选取。规定温标是比较复杂的,不能像确定长标那样,在温度计上随便定出刻度间隔。首先要确定选择什么样的物质(是水银,还是氢气或是电偶),这些物质的冷热状态必须能够明显地反映客观物体(欲测物体)的温度变化,而且这种变化有复现性(这一步叫选择“测温质”)。其次,确定该测温质变化物理量,要知道该测温质的哪些物理量随着温度的改变将产生某种预期的改变(这一步叫确定“测温特性”)。例如,水银温度计是用水银做测温质,水银的体积随温度作线性变化,这就是水银这种测温质的测温特性。最后,要选定该物理量的两个确定的数值作为参考点(也叫基准点),进而规定划分温度间隔的方法。经验温标有华氏温标、热力学温标、摄氏温标等。下面简要介绍华氏温标(fahrenheit temperature scale)、摄氏温标(celsius temperature scale)及热力学温标(thermodynamic temperature scale)等。

1724年,德国人华伦海特(Daniel Gabriel Fahrenheit)制定了华氏温标,他把一定浓度的盐水凝固时的温度定为 0°F ,把纯水的冰点(ice point)温度定为 32°F ,把标准大气压下水的沸点(boiling point)温度定为 212°F ,中间分为180等份,每一等份代表1华氏度,单位为“ $^{\circ}\text{F}$ ”。华氏温度的符号为 t_{F} 。

摄氏温标是目前世界使用比较广泛的一种温标,用符号 t 表示,单位为“ $^{\circ}\text{C}$ ”。它是18世纪瑞典天文学家安德斯·摄尔修斯(Anders Celsius,1701~1744)提出来的。在1标准大气压下,纯净的冰水混合物的温度为 0°C ,水的沸点为 100°C ,其间平均分为100份,每一等分为1度,记为 1°C 。

摄氏温度和华氏温度之间在数值上存在如下关系

$$\frac{t_{\text{F}}}{^{\circ}\text{F}} = \frac{9}{5} \frac{t}{^{\circ}\text{C}} + 32$$

热力学温标用符号 T 表示,单位为开(K),热力学温度是国际单位制(SI)的7个基本量之一。早在1787年法国物理学家查理(J.Charles)就发现,在压力一定时,温度每升高 1°C ,一定量气体的体积的增加量(膨胀率)是一个定值,体积膨胀率与温度呈线性关系。

热力学温度在科学技术上有广泛的应用,它与摄氏温度数值上的关系为

$$\frac{T}{\text{K}} = \frac{t}{^{\circ}\text{C}} + 273.15$$

国际实用温标是以国际上所通过的一系列纯物质的固定点(如平衡氢三相点、平衡氢沸点、氧三相点、水三相点、锡凝固点等)作为基准用于标定规定的基准温度计(如铂电阻温度计和铂-10%铑/铂热电偶等)并给出相应的内插公式用于测定温度。

表12.1给出了一些实际的温度值,目前实验室内已获得的最低温度为 $2.4 \times 10^{-11}\text{K}$,这已经非常接近 0K 了,但永远不能达到 0K 。实际上,要获得越低的温度越困难。热力学理论已给出:热力学零度(也称绝对零度)是不能达到的!此为热力学第三定律。

表 12.1 一些物质的温度

宇宙大爆炸后的 10~45 s	10^{32} K	水的三相点	273.16 K
氢弹爆炸中心	10^8 K	地球上出现的最低温度(南极)	185 K
太阳中心	1.5×10^7 K	氮的沸点(1 atm)	4.2 K
地球中心	4×10^3 K	星际空间	2.7 K
乙炔焰	2.9×10^3 K	实验室内以获得的最低温度:核自选冷却法	2×10^{-10} K
月亮向阳面	4×10^2 K	激光冷却法	2.4×10^{-11} K
吐鲁番盆地最高温度	323 K		

12.1.2 理想气体物态方程

1. 平衡态

热力学平衡是指气体达到热平衡(与周围温度相同且温度均匀)、力学平衡(处于均匀的压强下)、化学平衡(气体化学成分处处均匀)之中,它的状态参量(即 P, V, T)不随时间而变化,但是此时气体中的热运动依然存在,即微观特性,包括气体分子的速度、能量等却是千变万化的。平衡态是一种理想状态,是一定条件下对实际情况的概括和抽象。描述气体平衡态的物理量(又称态参量),主要有压强、体积、温度等。

平衡态是一种热动平衡。平衡态指系统的宏观性质不随时间变化,从微观看,分子仍在不停地、无规则热运动。非平衡态是指系统的宏观状态参量随时间变化的状态。

(1) 压强是表示物体单位面积上所受力的大小的物理量。在国际单位制中,压强的单位为帕(Pa)。通常情况下,表示气体压强的常用单位有帕斯卡、毫米水银柱(毫米汞柱)、厘米水银柱(厘米汞柱)、标准大气压,它们的符号分别是 Pa, mmHg, cmHg, atm。其中, $1 \text{ atm} = 1.1013 \times 10^5 \text{ Pa}$ 。

(2) 物体所占空间的大小称为物体的体积。在国际单位制中,体积的单位为立方米(m^3)。一件固体物件的体积是一个数值,用以形容该物件在三维空间所占有的空间。气体分子体积是指气体分子所能达到的几何空间,并非指气体分子本身的体积的总和。

2. 理想气体

理想气体是一种理想化的模型,实际并不存在。实际气体中,凡是本身不易被液化的气体,它们的性质很近似理想气体,其中最接近理想气体的是氢气和氦气。一般气体在压强不太大、温度不太低的条件下,它们的性质也非常接近理想气体。因此常常把实际气体视为理想气体来处理。这样对研究热学问题,尤其是计算方面可以大大简化。

理想气体的微观性质如下:

(1) 分子本身的大小与分子之间的平均距离相比较,可以忽略不计,即分子可看成质点,且单个分子的运动遵循经典力学规律。

(2) 分子间的平均距离很大,除碰撞瞬间有作用力外,分子之间的相互作用力可忽略不计,因此,在两次碰撞之间,分子的运动可当成匀速直线运动。

(3) 分子之间的碰撞,以及分子与容器壁之间的碰撞可看成完全弹性碰撞。分子碰撞只改变分子运动的方向,而不改变速度的大小,气体分子的动能不会因为碰撞而有任何改变。

(4) 除需特殊考虑外,不计分子所受的重力。

总之,根据以上几条基本假设建立起来的理想气体的微观模型可以归纳为:理想气体是大量不停地无规则运动着的无相互作用的弹性质点组成的质点系。

3. 理想气体的物态方程

状态参量之间的函数关系称为状态方程,当质量一定的气体处于平衡态时,3个状态参量 P, V, T 并不相互独立,当其中任意一个参量发生变化,其他两个参量一般也将随之改变,它们之间存在一定的关系。一定量的气体处于平衡态时气体的状态参量所满足的关系称为气体的状态方程,一般可表示为: $f(P, V, T) = 0$, 这个方程的形式是很复杂的,它与气体的性质有关。我们这里只研究理想气体的状态方程。

由中学物理知识可知,玻意耳(R.Boyle, 1627~1691)定律、盖吕萨克(Gay-Lussac, 1778~1850)和查理(J.A.C. Charles, 1746~1823)定律是在温度不太低、压强不太高的实验条件下总结出来的。一定量的理想气体的状态参量满足: $PV = \frac{m}{M}RT$, 其中, m 为宏观气体质量; M 为气体分子的摩尔质量; $R = 8.31 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, 称为普适气体常量。它是理想气体各物态参量相互关联的表征。由上式可知,理想气体的3个态参量仅两个是独立的,只要其中的两个确定,第三个参量就随之确定了。

例 12.1 容积为 100 m^3 的房间,白天的温度为 27°C ,大气压强为 $9.8 \times 10^4 \text{ Pa}$,晚上气温降到 12°C ,而大气压强升为 $1.1 \times 10^5 \text{ Pa}$ 。窗户是开着的,从白天到晚上通过窗户流通的空气质量是多少? 已知空气(视为理想气体)的摩尔质量为 $2.9 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{mol}$ 。

解 已知:白天 $P_d = 9.8 \times 10^4 \text{ Pa}$, $T_d = 300 \text{ K}$,晚上 $P_n = 1.1 \times 10^5 \text{ Pa}$, $T_n = 285 \text{ K}$; $V_d = V_n = V = 200 \text{ m}^3$ 。以 m_d, m_n 分别代表白天和晚上房间内的空气质量,则所求流通的空气质量为 $m_d - m_n$ 。

由理想气体的状态方程:

$$\text{白天 } P_d V_d = \frac{m_d}{M} R T_d, \quad \text{晚上 } P_n V_n = \frac{m_n}{M} R T_n$$

流通的空气质量

$$m = m_d - m_n$$

联立以上三式

$$\begin{aligned} m &= \frac{MV}{R} \left(\frac{P_d}{T_d} - \frac{P_n}{T_n} \right) = \frac{2.9 \times 10^3 \times 100}{8.31} \times \left(\frac{9.8 \times 10^4}{300} - \frac{1.1 \times 10^5}{285} \right) \\ &= -2.059 \times 10^6 \text{ kg} \end{aligned}$$

负号表示,实际上从白天到晚上有 $2.059 \times 10^6 \text{ kg}$ 的空间流进了房间。

理想气体的物态方程的另一种描述形式为: $P = nkT$, 式中 n 为单位体积内的分子数,即分子数密度, $k = R/N_A$ 称为玻尔兹曼常量。设一个分子的质量为 m' , 质量为 m 的理想气体的分子数为 N , 1 摩尔气体的质量为 M , 则 $M = Nm'$, $m = N_A m'$ 。

代入理想气体的物态方程

$$\begin{aligned} PV &= \frac{m}{M} RT = \frac{m'N}{m'N_A} RT = \frac{N}{N_A} RT \\ P &= \frac{N}{V} \frac{R}{N_A} T \end{aligned}$$

定义 $n = N/V$ 为单位体积内的分子数,即分子数密度。

玻尔兹曼常量 $k = R/N_A = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$, 则

$$P = nkT$$

上式为理想气体的物态方程的微观表达式。说明理想气体的压强与温度及分子数密度成正比。

例 12.2 理想气体体积为 V , 压强为 P , 温度为 T , 一个分子的质量为 m , k 为玻尔兹曼常量, R 为摩尔气体常量, 则该理想气体的分子数为()。

- A. $\frac{pV}{m}$ B. $\frac{pV}{kT}$ C. $\frac{pV}{RT}$ D. $\frac{pV}{mT}$

解 $p = nkT, N = nV = pV/kT$, 答案为 B。

12.2 气体动理论的基本思想

由于气体的性质最为简单,因此统计物理学往往从研究气体开始。本节从分子运动的微观模型出发,给出某些简化的假定,结合概率和统计力学的知识,提出了气体分子动理论(kinetic theory of gases),其主要内容如下:

(1) 气体是由分子组成的,分子是很小的粒子,彼此间的距离比分子的直径大的多,分子体积与气体体积相比可以略而不计。

(2) 气体分子以不同的速度在各个方向上处于永恒的无规则运动之中。典型事例是扩散现象、布朗运动等。

布朗(R. Brown, 1773~1858, 英国植物学家)在 1827 年发现,悬浮在液体中的花粉粒子要不停地做无规则运动;后来发现,不单是悬浮在液体中的颗粒,就连静止气体中的尘粒也不停地做无规则运动。人们把这种悬浮在流体中的颗粒所作的不停的无规则运动,统称为布朗运动。它是由大量分子不对称碰撞悬浮在流体中的颗粒而引起的。所以,布朗运动是分子无规则热运动的一种间接表现形式。

(3) 除了在相互碰撞时,气体分子间相互作用是很微弱的,甚至是可以忽略的。

(4) 气体分子相互碰撞或对器壁的碰撞都是弹性碰撞。

(5) 分子的平均动能与热力学温度成正比。

(6) 分子之间存在的吸引或排斥的相互作用力,即分子力(图 12.1)。引力和斥力都随分子间距离的增大而减小(分子间距离越大,引力和斥力都越小;分子间距离越小,引力和斥力都越大)。但斥力的变化比引力快,实际表现出来的是引力和斥力的合力。合力在 $0 \sim r_0$ 时表现为斥力,在大于 r_0 时表现为引力(r_0 为引力等于斥力的临界点)

分子力是造成固体、液体和封闭气体等许多物理性质的原因。例如描述气体的压强、体积和温度之间的相互关系,必须考虑分子间引力和斥力效应。在足够低的温度下增加压强,分子之间的引力将使气体液化,分子间的斥力将阻止分子的进一步接近,致使液体具有不可压缩性。近邻和远邻

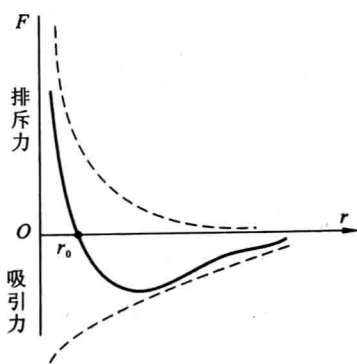


图 12.1 分子力示意图

分子之间的分子力,决定晶体中的分子的排列顺序,是造成固体弹性的原因。分子间彼此趋近到分子的直径 d 时,分子将在强大的斥力作用下被排斥开,类似小球间“弹性碰撞”过程。 d 的平均值称为分子有效直径,数量级为 10^{-10} m。

这些观点就是气体动理论的基本出发点,已经被近代科学完全证实。从上述物质分子运动论的基本观点出发,研究和说明宏观物体的各种现象和性质是统计物理学的任务。

12.3 统计规律性 等概率假设

12.3.1 统计规律

1. 统计规律

每个分子的运动遵守牛顿运动定律,但是由于分子之间及其频繁的碰撞,使得分子在某一时刻位于什么位置和具有什么样的速度完全是偶然的。但是大量分子的整体行为却有一定的规律性,如平衡态时,气体的温度、密度、压强等都是均匀分布的。这表明,在大量的偶然、无序的分子运动中,包含着一种规律性,这种规律是对大量分子整体而言的,故称为统计规律性(statistical regularity)。

所谓统计规律,是指大量偶然事件整体所遵循的规律。但是,总体上却存在着确定的规律性。人们把这种支配大量粒子综合性质和集体行为的规律性称为统计规律性。

一般来说,对一定的统计范围,统计平均值与实际数值是有偏差的,参与统计的事件越多,其偏差就越小。因此统计平均值也越接近于实际值。所以统计规律仅对大量事件才有意义。

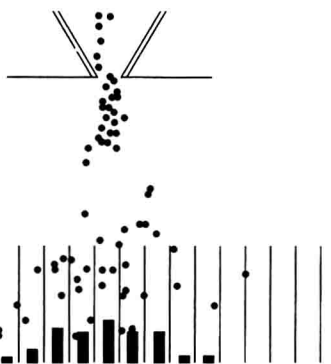


图 12.2 大量小球落入槽内的分布演示过程

2. 示例

实验装置:在一块竖直木板的上部规则地钉上铁钉(图 12.2),木板的下部用竖直隔板隔成等宽的狭槽,从顶部中央的入口处可以投入小球,板前覆盖玻璃使小球不致落到槽外。

在演示过程中,可以一次投入大量小球,或多次投入单个小球。观察落入某个槽中的小球数(红色柱线的高度)。

结果表明:单个小球落入某个槽内是偶然事件,大量小球落入槽内的分布遵循确定的规律。

本章将要研究的理想气体的压强公式和温度公式、能量均分定律、麦克斯韦速率分布律等都是统计规律性。

3. 统计平均值

描述统计规律的方法是计算统计平均值。如果在某一量 x 的测量过程中, x_1 出现 N_1 次, x_2 出现 N_2 次, \dots , x_n 出现 N_n 次,则各次测量的 x 值总和 $\sum x_i N_i$ 除以总次数 N 即为 x 的统计平均值,记为 \bar{x} 。

$$\bar{x} = \frac{x_1 N_1 + x_2 N_2 + \cdots + x_n N_n}{N_1 + N_2 + \cdots + N_n} = \frac{\sum x_i N_i}{N} = \sum x_i p_i \quad (12-1)$$

若 x 连续分布, 则 $\bar{x} = \int x f(x) dx$ 。

12.3.2 概率 等概率假设

1. 概率

定义 所有可能发生的事件中, 某一事件发生的可能性。下面从离散事件和连续事件两个角度分别定义概率(probability)。

在 N (N 很大) 次试验中, 某事件 x 出现了 N_i 次, 则 x 事件出现的概率

$$P_i(x) = \frac{N_i}{N} \quad (\text{离散事件})$$

归一化条件

$$\frac{N_1}{N} + \frac{N_2}{N} + \cdots + \frac{N_n}{N} = \frac{\sum N_i}{N} = 1 \quad (12-2)$$

如果事件连续分布, 且 $f(x)$ 表示单位间隔中出现的概率(亦称概率密度或分布函数), 则出现在 Δx 间隔中的概率

$$\Delta p(x) = f(x) \Delta x$$

若 Δx 趋近于 0, 则上式变为

$$dp(x) = f(x) dx \quad (12-3)$$

归一化条件

$$\int_0^{\infty} f(x) dx = 1$$

2. 等概率假设

根据气体动理论, 当气体处于平衡态时, 虽然其宏观态可以确定, 但是其微观态却不能确定, 因为一切分子都处于永不停息的无规则运动中。因此找不到任何理由来说明, 某些微观态比另一些微观态优越。基于这样的事实, 1871 年, 玻尔兹曼提出了著名的等概率假设(postulate of equal probability): 当系统处于平衡态时, 其各个可能的微观态出现的概率相等。对于气体而言, 等概率假设也可以这样表述: 当气体处于平衡态时, 其分子向各个方向运动的概率相等。

根据上述假设还可以进一步得到如下一些结论:

(1) 分子沿各个方向运动的速度分量的各种平均值应该相等。

例如沿 x, y, z 三个方向速度分量的方均值应该相等。某方向的速度分量的方均值, 定义为分子在该方向上的速度分量的平方的平均值, 即把所有分子在该方向上的速度分量平方后加起来再除以分子总数

$$\overline{v_x^2} = \frac{\sum_{i=1}^N v_{ix}^2}{N}, \quad \overline{v_y^2} = \frac{\sum_{i=1}^N v_{iy}^2}{N}, \quad \overline{v_z^2} = \frac{\sum_{i=1}^N v_{iz}^2}{N}$$

按照统计性假设, 分子群体在 x, y, z 三个方向的运动应该是相同的, 所以应该有 $\overline{v_x^2} = \overline{v_y^2} =$

$\overline{v_z^2}$ 。方均速率,即分子速度的平方的平均值为

$$\overline{v^2} = \overline{v_x^2} + \overline{v_y^2} + \overline{v_z^2}$$

故

$$\overline{v_x^2} = \overline{v_y^2} = \overline{v_z^2} = \frac{\overline{v^2}}{3} \quad (12-4)$$

即速度分量的方均值等于方均速率的 1/3。这个结论在下面证明压强公式时要用到。

(2) 速度和它的各个分量的平均值为零。

平衡态理想气体中各个分子朝各个方向运动的概率相等。因此,分子速度的平均值为零,各种方向的速度矢量相加会相互抵消。类似地,分子速度的各个分量的平均值也为零。

等概率假设是平衡态统计理论的基础,其正确性虽然不能直接由实验来验证,但有它所得到的许多推论都与客观事实相符,因而便间接地证明了等概率假设是正确的。

12.4 理想气体的压强与温度

12.4.1 理想气体的微观模型

宏观上理想气体是一种在任何情况下都遵守玻意耳定律、盖-吕萨克定律和查理定律的气体。但从微观上看什么样的分子组成的气体才具有这种宏观特性呢? 气体分子的运动是肉眼看不见的,所以理想气体的微观模型是通过分析对宏观实验结果的综合提出的一个假说。通过这个假说得到的结论与宏观实验结果进行比较来判断模型的正确性。通过前人多年的努力,我们现在知道理想气体的微观模型具有以下特征:

(1) 分子与容器壁和分子与分子之间只有在碰撞的瞬间才有相互作用,其他时候的相互作用可以忽略不计。

(2) 分子本身的体积可以忽略不计,即对分子可采用质点模型。

(3) 而分子与容器壁以及分子与分子之间的碰撞属于牛顿力学中的完全弹性碰撞。

实验证明,实际气体中分子本身占的体积约只占气体体积的千分之一,在气体中分子之间的平均距离远大于分子的几何尺寸,所以将分子看成质点是完全合理的。从另一个方面看,对已达到平衡态的气体如果没有外界影响,其温度、压强等状态参量都不会因分子与容器壁以及分子与分子之间的碰撞而发生改变,气体分子的速度分布也保持不变,因而分子与容器壁以及分子与分子之间的碰撞是完全弹性碰撞也是理所当然的。

综上所述,经过抽象与简化,理想气体可以看成是一群彼此间无相互作用的无规运动的弹性质点的集合,这就是理想气体的微观模型。

12.4.2 理想气体压强公式推导

压强是热力学中描述平衡态下气体状态的一个重要力学参量。从理想气体的微观模型出发,分析理想气体压强的产生原因,采用合理的统计方法,推导出理想气体的压强公式。在推导的过程中,加强对统计概念及理想气体压强实质的认识。

最早利用气体分子运动的概念导出气体压强公式的方法是由伯努利(见本章阅读材料)提

出的,后来经过克劳修斯、麦克斯韦等人的发展导出的方法越来越科学、合理。

1. 压强的产生

单个分子碰撞器壁的作用力是不连续的,即在什么时间碰撞器壁是偶然的,在何处碰撞器壁也是偶然的。但是分子数量极大,每时每刻都有众多分子碰撞器壁,从总的效果上来看,就有一个持续的平均作用力作用在器壁之上。犹如大量密集的雨滴落在伞面上,撑伞的人会感到持续稳定的压力作用在伞面上一样。因此,宏观上,气体压强是容器壁上单位面积受到的压力。

2. 气体压强公式的简单推导

(1) 单个分子的运动遵循牛顿力学的运动规律。

假设有一个边长为 x, y, z 的长方形容器,其中含有 N 个同类气体分子,每个分子质量均为 m 。在平衡时,长方形容器各个面的压强应当是相等的。

现在我们来推导与 x 轴垂直的面 A_1 的压强。考虑第 i 个分子,速度

$$\mathbf{v}_i = v_{ix}\mathbf{i} + v_{iy}\mathbf{j} + v_{iz}\mathbf{k}$$

它与器壁碰撞受到器壁的作用力。在此力的作用下, i 分子在 x 轴上的动量由 mv_{ix} 变为 $-mv_{ix}$, x 轴上的动量的增量为

$$-mv_{ix} - mv_{ix} = -2mv_{ix}$$

i 分子对器壁的碰撞是间歇的,它从 A_1 面弹回,飞向 A_2 面与 A_2 面碰撞,又回到 A_1 面再作碰撞(图 12.3)。 i 分子与 A_1 面碰撞两次,在 x 轴上运动的距离为 $2x$,所需的时间为 $\Delta t = 2x/v_{ix}$ 。单位时间内 A_1 对 i 分子的平均作用力为

$$F_i = \frac{\Delta P_{ix}}{\Delta t} = \frac{-2mv_{ix}}{2x/v_{ix}} = -\frac{mv_{ix}^2}{x}$$

由牛顿第三定律可知,分子对 A_1 的作用力为 $\frac{mv_{ix}^2}{x}$ 。

(2) 大量分子(N 个)对器壁碰撞使器壁受到的力(F),为上述单个分子对器壁的冲力的总和,即

$$F = \sum m \frac{v_{ix}^2}{x}$$

虽然单个分子给予器壁冲力的大小是各不相同的,但因气体分子的数量十分巨大,所以在平衡态下,容器壁所受的总作用力,即等效平均力可看成是确定的。

由同类气体分子的质量相等并与其运动速率无关的假设,根据压强的定义,有

$$P = \frac{F}{yz} = \frac{m}{xyz} \sum v_{ix}^2$$

作变换

$$P = m \frac{N}{xyz} \frac{\sum v_{ix}^2}{N} = m \frac{N}{V} \frac{\sum v_{ix}^2}{N} = mn \frac{\sum v_{ix}^2}{N}$$

其中 $n = N/V$ 为单位体积内的分子数,即为分子数密度。

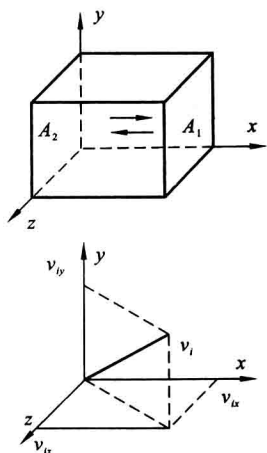


图 12.3 分子碰撞前后动量变化