



世纪普通高等教育基础课规划教材

大学物理学

下册

赵丽萍 李红艳 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

21 世纪普通高等教育基础课规划教材

大学物理学

下 册

主 编 赵丽萍 李红艳
副主编 蔡传锦 庞岩涛 谭金凤



机械工业出版社

本书是根据教育部最新制定的《理工科类大学物理课程教学基本要求》编写的。本书体系合理、思路清晰、表述精练,循序渐进,继承了国内教材的传统特色。在写作风格和插图设计等方面借鉴了国外优秀物理教材的特点,突出物理思想和物理图像,使教材内容通俗易懂。书中对经典物理内容进行了精简和深化,对近代物理内容进行了精选和普化,适当介绍了现代科学技术的发展与应用。全书分上、下两册,共14章。上册主要内容为力学、相对论基础、电磁学;下册主要内容为热学、振动与波动、光学和量子物理基础等。本书可作为普通高等院校非物理类理科、工科等专业的大学物理课程教材,亦可供其他专业学生和社会读者阅读。

与本教材同步出版的教学辅导书《大学物理全程辅导与思考题、习题详解》对教师备课、授课和学生学习、复习以及巩固本教材的教学效果大有裨益。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理学.下册/赵丽萍,李红艳主编. —北京:机械工业出版社,2010.1

21世纪普通高等教育基础课规划教材

ISBN 978-7-111-28910-4

I. 大… II. ①赵…②李… III. 物理学—高等学校—教材 IV. 04

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第220720号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:张金奎 责任编辑:张金奎 版式设计:张世琴

封面设计:马精明 责任校对:李秋荣 责任印制:乔宇

北京机工印刷厂印刷

2010年1月第1版第1次印刷

170mm×227mm·15.5印张·281千字

标准书号:ISBN 978-7-111-28910-4

定价:22.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010)68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010)88379649

读者服务部:(010)68993821

封面无防伪标均为盗版

前言

本书是由长期从事大学物理教学工作的一线教师，结合多年的教学经验和教学研究成果，依据教育部最新制定的《理工科类大学物理课程教学基本要求》编写的一套实用、现代的大学物理教材。

“大学物理”课程是高等院校理工科各专业的一门重要必修基础课。学习这门课程不仅能使学生对物理学的基本概念、基本理论和基本方法有比较系统的认识和理解，增强他们分析问题和解决问题的能力，而且能使學生树立科学的世界观，培养其探索精神和创新意识，提高他们的科学素养。物理教材是學生与物理学前辈和当代物理学家展开对话的途径之一，本书的编写者集合物理学的精华，博采众长，站在学生的角度上，充分考虑學生学习物理知识的认知规律，采用朴实流畅、通俗易懂的语言阐述物理现象、物理规律，应用基础的数学知识与基础理论来分析、推导物理原理、定理和引入物理定律，构建了合理的知识框架，带领读者由浅入深系统地学习大学物理的基本内容和科学方法。本书所选的例题和习题都是经过精心挑选的，既注意避免应用到较繁、较深的数学理论，又能较好地配合理解核心内容。书中适当增加了例题数量，给教师讲课留有较大的选择余地，給學生拓宽思路、自主学习、更好地理解物理规律建立了一个平台。

在经典内容和近代内容中如何取舍，一直是大学物理课程面临的问题。在本书的编写中，我们从内容上适当地对经典物理学部分进行了压缩，同时又适当加强了近代物理学的比重，并在近代物理学内容的叙述上力求做到通俗、生动，重点突出近代物理思想、物理图像，尽量减少复杂的数学运算，努力使近代物理趋于普物化，使读者在阅读这部分内容时能够产生一些新鲜感。

出版与主教材配套的《大学物理全程辅导与思考题、习题详解》辅导书，其作用一是归纳总结各章内容，指导學生掌握重点、难点；二是精选典型例题，开阔學生思路，训练解题技能和技巧；三是为教师提供习题课教学资料；四是为学生给出所有思考题、习题详解，以方便读者自学和参考。

本书中带“*”号的内容，教师可自行取舍，不影响教材的整体性。

书中小字部分是相关章节的延伸内容，不作要求。

承担本书编写工作的有：赵丽萍、李红艳、蔡传锦、庞岩涛、谭金凤、刘

桂媛、张剑。各章的习题答案由王婕、张宝金编写。全书由赵丽萍、李红艳统稿并定稿。

由于编者水平有限，书中难免会有疏漏和不妥之处，恳请广大教师和读者不吝批评指正，以使我们的教材在使用中不断完善。

编 者

2009 年 10 月

目 录

前言

第 9 章 气体动理论	1
9.1 理想气体的状态方程	2
9.1.1 平衡态	2
9.1.2 气体的状态参量	3
9.1.3 理想气体状态方程	3
9.2 气体动理论的基本概念	4
9.2.1 分子热运动	4
9.2.2 分子热运动的统计规律性	6
9.2.3 理想气体的微观模型及统计假设	7
9.3 理想气体的压强和温度及其统计意义	8
9.3.1 压强公式及其统计意义	8
9.3.2 温度公式及其统计意义	9
9.4 能量均分定理 理想气体的内能	10
9.4.1 自由度	10
9.4.2 能量均分定理	12
9.4.3 理想气体的内能	13
9.5 麦克斯韦速率分布率	14
9.5.1 麦克斯韦速率分布函数	14
9.5.2 三种统计速率	16
9.5.3 气体分子速率分布的测定	18
9.6 玻耳兹曼能量分布率	19
9.6.1 玻耳兹曼能量分布率	19
9.6.2 重力场中的等温气压公式	20
9.7 气体分子的平均碰撞频率和平均自由程	21
思考题	23
习题	24

第 10 章 热力学基础	26
10.1 准静态过程	26
10.1.1 准静态过程概述	26
10.1.2 内能、功和热量	27
10.2 热力学第一定律	29
10.3 理想气体的等值过程 摩尔热容	29
10.3.1 等体过程 定体摩尔热容	30
10.3.2 等压过程 定压摩尔热容	31
10.3.3 等温过程	33
10.4 理想气体的绝热过程	34
10.5 循环过程 卡诺循环	37
10.5.1 循环过程	37
10.5.2 热机和制冷机	38
10.5.3 卡诺循环	40
10.6 热力学第二定律 卡诺定理	42
10.6.1 热力学过程的方向性	42
10.6.2 热力学第二定律	43
10.6.3 卡诺定理	45
* 10.7 熵 熵增加原理	45
10.7.1 热力学第二定律的统计意义	45
10.7.2 玻耳兹曼熵	47
10.7.3 克劳修斯熵 熵增加原理	48
思考题	52
习题	54
第 11 章 振动	58
11.1 简谐运动	58
11.1.1 简谐运动的基本特征	58
11.1.2 描述简谐运动的物理量	59
11.1.3 简谐运动的旋转矢量表示法	65
11.1.4 简谐运动的能量	68
11.2 简谐运动的合成	69
11.2.1 两个同方向同频率简谐运动的合成	69
11.2.2 两个同方向不同频率简谐运动的合成 拍	71

* 11.2.3 相互垂直的简谐运动的合成	73
* 11.3 阻尼振动 受迫振动 共振	74
11.3.1 阻尼振动	74
11.3.2 受迫振动	76
11.3.3 共振	77
11.4 电磁振荡	78
11.4.1 无阻尼自由电磁振荡	78
11.4.2 无阻尼自由电磁振荡的能量	80
思考题	81
习题	82
第 12 章 波动	85
12.1 机械波的产生与传播	85
12.1.1 机械波的形成	85
12.1.2 波动的描述	86
12.2 平面简谐波	88
12.2.1 平面简谐波的波动表达式	88
12.2.2 波动表达式的物理含义	89
12.2.3 波动中各质点振动的速度和加速度	90
* 12.2.4 波动方程	91
12.3 波的能量 波的强度 * 声强	94
12.3.1 波动能量的传播	94
12.3.2 波的强度	96
* 12.3.3 声强 声强级	96
12.4 波的衍射和干涉	97
12.4.1 惠更斯原理 波的衍射	97
12.4.2 波的叠加原理 波的干涉	100
12.5 驻波	104
12.5.1 驻波的形成	104
12.5.2 驻波方程	105
12.5.3 半波损失	107
12.6 多普勒效应	109
12.7 电磁波	112
12.7.1 电磁波的产生与传播	113
12.7.2 平面电磁波	115

12.7.3 电磁波的能量	116
12.7.4 电磁波谱	117
思考题	119
习题	121
第 13 章 波动光学	124
13.1 杨氏双缝干涉 光程	124
13.1.1 光的相干性	124
13.1.2 杨氏双缝干涉	125
13.1.3 光程与光程差	128
13.2 薄膜干涉	130
13.2.1 等倾干涉	130
13.2.2 等厚干涉	134
* 13.2.3 迈克尔孙干涉仪	139
13.3 光的衍射	140
13.3.1 光的衍射现象	140
13.3.2 惠更斯-菲涅耳原理	141
13.3.3 夫琅禾费单缝衍射	142
13.3.4 夫琅禾费圆孔衍射 光学仪器的分辨本领	146
13.4 光栅衍射	149
13.4.1 光栅衍射概述	149
13.4.2 光栅衍射规律	150
13.4.3 光栅光谱	151
* 13.4.4 X 射线的衍射	153
13.5 光的偏振	155
13.5.1 自然光 偏振光	155
13.5.2 偏振片 马吕斯定律	156
13.5.3 反射和折射时光的偏振	159
13.6 光的双折射	160
13.6.1 双折射现象 寻常光和非常光	160
13.6.2 晶体的光轴和光线的主平面	161
* 13.6.3 用惠更斯原理解释双折射现象	162
* 13.6.4 $1/4$ 波片和半波片	163
思考题	164
习题	166

第 14 章 量子物理	169
14.1 黑体辐射 普朗克量子假设	169
14.1.1 黑体辐射	169
14.1.2 黑体辐射定律	171
14.1.3 普朗克假设 普朗克黑体辐射公式	173
14.2 光电效应 爱因斯坦光子理论	175
14.2.1 光电效应	175
14.2.2 爱因斯坦光子理论	177
14.2.3 光的波粒二象性	179
14.3 康普顿效应	180
14.3.1 康普顿效应的实验规律	180
14.3.2 康普顿效应的量子解释	181
14.4 氢原子光谱 玻尔理论	183
14.4.1 氢原子光谱	183
14.4.2 玻尔的氢原子理论	185
14.5 粒子的波动性	189
14.5.1 德布罗意波	189
14.5.2 德布罗意波的实验证明	190
14.5.3 德布罗意波的统计解释	191
14.6 不确定关系	192
14.7 量子力学简介	194
14.7.1 波函数 概率密度	195
14.7.2 薛定谔方程	196
14.7.3 定态薛定谔方程的应用	198
14.8 氢原子的量子理论简介	202
14.8.1 氢原子定态	202
14.8.2 氢原子的电子云	204
* 14.9 多电子原子中的电子分布	205
14.9.1 泡利不相容原理	206
14.9.2 能量最小原理	206
* 14.10 激光	207
14.10.1 自发辐射和受激辐射	207
14.10.2 粒子数分布反转	208
14.10.3 激光的特性和应用	209

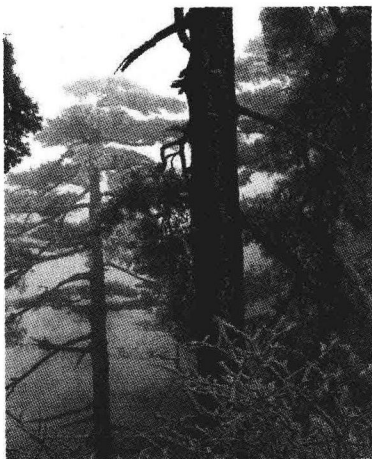
* 14.11 半导体	210
14.11.1 固体的能带结构	210
14.11.2 本征半导体和杂质半导体	212
14.11.3 pn 结和其他半导体器件	213
* 14.12 超导电性	215
14.12.1 超导体的转变温度	215
14.12.2 超导体的主要特性	215
14.12.3 超导电性的 BCS 理论	217
14.12.4 超导的应用前景	217
* 14.13 纳米材料	218
14.13.1 纳米材料简介	218
14.13.2 纳米效应	219
14.13.3 准一维纳米材料	220
思考题	224
习题	226
习题参考答案	229
参考文献	235

第9章 气体动理论

热学是研究热现象的理论。热现象是人类生活中最早接触到的现象之一，在有史以前人类已能钻木取火，在古代人们还用火制造出陶器、铜器和铁器。由于火的广泛应用，人们逐渐认识了许多热现象，但是在古代，社会生产力很低，热学还不能作为一门系统的科学建立起来。18世纪到19世纪，出现了蒸汽机，促使人们开始了对热现象进行比较广泛的研究。系统的计量学和量热学的建立，使热现象的研究走上了实验科学的道路。焦耳（J. P. Joule）进行了许多次实验，测定了热功当量，焦耳的实验最后确定了能量守恒与转化定律——热力学第一定律。克劳修斯（Rudolf Clausius, 1822—1888）和开尔文（Kelvin, 1824—1907）独立地发现了能量传递方向的定律——热力学第二定律。热力学的两个基本定律都是从研究热机和机械功的相互转化问题中总结出来的。热力学找到了热现象的一般规律，同时使人们对于热的本质的认识也不断完善。克劳修斯第一次清楚地说明统计的概念，正确地导出了玻意耳定律，并首先引进自由程的概念。麦克斯韦（James Clerk Maxwell, 1831—1879）是首先认识到分子的速度各不相同而得到速度分布率的。玻耳兹曼（Ludwing Boltzman, 1844—1906）最初在速度分布率中引进重力场。这样，气体动理论就从一些定性的论据发展成一个系统定量的理论。

研究热现象有微观的统计物理学和宏观的热力学两种方法。微观的统计物理学是从物质的微观结构出发，即从分子、原子的运动和它们之间的相互作用出发，去研究热现象的规律，本章要介绍的气体动理论属于微观的统计物理学。宏观的热力学是从能量观点出发，以大量的实验观测为基础，来研究物质热现象的宏观规律及其应用，我们将在下一章讨论。研究热现象的两种方法，既有联系又有区别，它们是相辅相成不可分割的。

气体动理论有两个基本的观点：一是气体是由大量的不停地作无规则热运动的分子或原子组成的；二是大量的分子或原子的热运动满足统计规律。从这两个基本观点出发，可以导出描述气体状态的宏观量和描述气体分子运动的微观量之间的关系，从而揭示宏观热现象的微观本质。



当大气中因悬浮的水汽凝结, 能见度低于 1km 时, 气象学称这种天气现象为雾. 由于气温降低, 多余的水汽会凝结出来, 空气中的水汽超过饱和量, 凝结成水滴.



气球里的空气被加热后, 由于分子的剧烈运动, 密度小于周围的空气, 使得周围对其产生强烈的升力, 所以热气球就升空了, 就好像水里放个密度比水小的东西就会上浮一样.

9.1 理想气体的状态方程

9.1.1 平衡态

气体在不受外界影响的条件下, 宏观性质不随时间改变的状态称为气体的平衡态 (equilibrium state). 设有一封闭容器, 用隔板分成 A、B 两部分, 使 A 部充满气体, B 部为真空, 如图 9-1 所示. 现把隔板抽去, A 部的气体迅速向 B 部膨胀, 经过足够长的时间, 气体将均匀分布在整個容器中. 如果以后容器不受到外界的影响, 则容器内的气体将保持这一状态, 不再发生宏观变化, 此时气体处于平衡态.

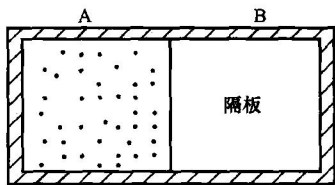


图 9-1 气体的平衡态

平衡态是一个动态的平衡. 气体处于平衡态时, 虽然宏观性质不随时间改变, 但气体分子仍然不停地运动, 只是分子运动的总的平均效果不随时间改变.

平衡态是一个理想概念. 我们所说的不受外界影响, 是指外界对系统既不

做功又不传热. 容器中的气体不可能不受到外界的影响, 总要与外界发生不同程度的能量和物质的交换, 宏观性质严格地不随时间变化是不可能的, 理想化的平衡态是不存在的. 实际当中, 只要气体状态的变化很微小, 可以忽略不计, 就可以把气体的状态近似看成是平衡态. 本章讨论的气体的状态无特别说明时都是平衡态.

9.1.2 气体的状态参量

气体是由大量的作无规则热运动的分子或原子组成的. 描述气体分子中单个分子特征的物理量, 如分子的速度、质量、动量和能量等, 称作**微观量** (microscopic quantity). 我们通常是不可能对微观量进行直接观察和测量的. 气体处于平衡态时, 对于整个气体的宏观状态, 我们用体积 V 、压强 p 和热力学温度 T 来描述, 把这三个物理量叫做气体的**状态参量** (state parameter), 它们都是**宏观量** (macroscopic quantity). 只有气体处于平衡态时, 它的宏观性质不随时间发生改变, 状态参量 p 、 V 、 T 才有确定的值, 才能描述气体的状态. 气体动理论就是要揭示气体宏观量的微观本质, 即建立宏观量与微观量统计平均值之间的关系.

气体的体积是指气体分子热运动所能到达的空间, 气体有充满容器的性质, 所以气体的体积就是容器的体积. 在国际单位制中, 体积的单位为立方米 (m^3), 有时可以用升 (L) 即立方分米 (dm^3) 作单位, 换算关系为 $1\text{m}^3 = 10^3\text{L} = 10^3\text{dm}^3$.

气体的压强是指气体作用在容器器壁单位面积上的正压力. 在国际单位制中, 压强的单位为帕斯卡 (Pa), $1\text{Pa} = 1\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$. 也常用标准大气压 (atm) 作压强单位, 换算关系为 $1\text{atm} = 1.013 \times 10^5\text{Pa}$.

温度是物体冷热程度的表示. 温度的数值标定方法叫做温标. 日常生活中常用的一种温标是摄氏温标, 用 t 表示, 其单位为摄氏度 ($^{\circ}\text{C}$); 工程上常用的温标是热力学温标, 也叫开尔文温标, 用 T 表示, 它的国际单位制单位为开尔文 (K). 两种温标的关系为

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

9.1.3 理想气体状态方程

对于一定量处于平衡态的气体, 其状态参量 p 、 V 、 T 满足一定的函数关系

$$f(p, V, T) = 0$$

我们把这个表达式称为**气体的状态方程**. 一般气体的状态方程十分复杂, 我们

只讨论理想气体的状态方程.

实验表明,一定质量的气体,在温度不太低、压强不太大的情况下,一般遵守玻意耳定律 (T 不变, $pV = \text{恒量}$)、盖·吕萨克定律 (p 不变, $V/T = \text{恒量}$)、查理定律 (V 不变, $p/T = \text{恒量}$). 任何情况下都严格遵守上述三条实验定律的气体称为理想气体 (ideal gas). 理想气体是一种理想模型,真实气体在温度不太低,压强不太大时,可以近似看做理想气体.

当质量为 m , 摩尔质量为 M 的理想气体处于平衡态时, 其状态参量 p 、 V 、 T 之间满足方程

$$pV = \frac{m}{M}RT \quad (9-1)$$

式中, R 称为摩尔气体常数, 国际单位制中 $R = 8.31 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. 式 (9-1) 称为理想气体的状态方程 (equation of state of ideal gas).

理想气体的状态方程还可以写成其他形式. 设一定量的理想气体的分子质量为 m_0 , 总分子数为 N . 用 N_A 表示阿伏加德罗常数 ($N_A = 6.02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$), 则 $m = N m_0$, $M = N_A m_0$, 因此

$$pV = \frac{m}{M}RT = \frac{Nm_0}{N_A m_0}RT = \frac{N}{N_A}RT$$

令 $k = R/N_A = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$, k 称为玻耳兹曼常数. 再令 $n = N/V$, n 是单位体积内的分子数, 称为气体的分子数密度. 理想气体状态方程又可写为

$$p = nkT \quad (9-2)$$

一定量的理想气体的每一个平衡态可用一组状态参量 (p 、 V 、 T) 来表示, 由于 p 、 V 、 T 之间存在式 (9-1) 所示的关系, 所以通常把气体的平衡态用 p - V 图上的一个点来表示, 如图 9-2 所示. 图中点 A 和点 B 分别表示气体处于两个不同的平衡态, 而 A 、 B 间的连线表示一个由平衡态组成的变化过程, 曲线上的箭头表示过程进行的方向, 不同曲线代表不同过程.

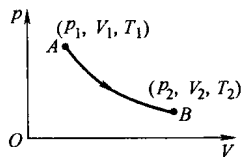


图 9-2 气体平衡态示意图

9.2 气体动理论的基本概念

9.2.1 分子热运动

物质是由大量分子或原子组成的. 分子是保持物质化学性质的最小粒子,

而原子是化学变化中的最小粒子. 分子结构不同, 其尺度不一样, 分子线度的数量级为 10^{-10}m . 1mol 任何物质中所含有的分子 (或原子, 离子) 数都是相同的, 其量值即为阿伏加德罗常数.

分子不停地作无规则的热运动. 扩散现象是分子无规则热运动的有力证明. 气体、液体和固体都会发生扩散, 物体温度越高, 无规则热运动越剧烈, 扩散现象越明显. 1827 年, 英国植物学家布朗 (R. Brown, 1773—1858) 发现了花粉颗粒在液体中不停地作无规则的运动, 这种运动称为**布朗运动 (Brown motion)**. 布朗运动是由于微粒受到周围分子碰撞的不平衡而引起的起伏运动. 图 9-3 是 1908 法国物理学家佩兰实验记录下来的布朗运动, 图中的点是在显微镜的观察下每隔 30s 所记录下来的几个布朗粒子的位置, 这些折线并不是粒子运动的轨迹, 而是布朗粒子经过流体分子约 1016 次碰撞后的平均位移. 布朗运动反映了构成物质的分子处于永恒的、杂乱无章的运动之中.

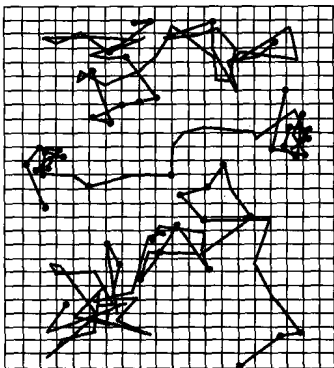


图 9-3 布朗运动

分子之间存在着一定的距离. 以氧气为例, 在标准状态下, 氧气分子的直径约为 $3 \times 10^{-10}\text{m}$, 而氧气分子之间的距离约为分子本身线度的 10 倍左右, 换句话说, 平均每个氧气分子所占有的体积是氧分子本身体积的 1 000 倍. 因此, 在标准状态下气体分子自身的体积可以忽略, 从而被看做质点来处理.

分子间存在相互作用的引力和斥力. 分子之间的引力使固体和液体的分子聚集在一起而不分散开. 分子之间的斥力使液体和固体就很难被压缩. 分子之间的相互作用力的大小和分子距离之间的关系如图 9-4 所示, 横坐标 r 为分子间距, 纵坐标 f 为分子之间的作用力. 由图可知, 分子间距为 $r = r_0$ (约为 10^{-10}m) 时, $f = 0$, 分子间引力和斥力平衡;

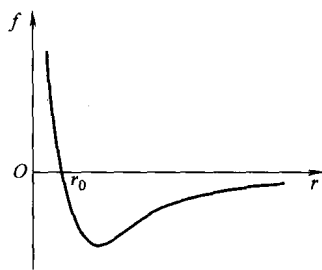


图 9-4 分子力与分子间距的关系

当 $r < r_0$ 时, $f > 0$, 分子之间的作用表现为斥力, 随着间距变小, 斥力急剧增大; 当分子之间的距离 $r > r_0$ 时, $f < 0$, 分子之间的作用表现为引力; 当 $r > 10r_0$ (约为 10^{-9}m) 时, 分子之间的作用力可以忽略不计. 在标准状态下, 气体分子间距约为 10^{-9}m , 分子之间的作用力可以忽略不计.

物质是由大量分子组成的, 分子不停地作无规则的运动, 分子之间存在着

一定的距离，分子间有分子力的作用。这就是分子热运动的基本观点。

气体分子热运动的基本图像是：气体由大量分子组成，分子的碰撞十分频繁，平均每秒钟碰撞 10^{10} 次，分子分布相当稀疏，分子与分子之间的作用力除了在碰撞的瞬间外可以忽略不计，分子两次碰撞之间可以认为作匀速运动，平均速率 $500\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。分子间的频繁碰撞，使能量在气体的各部分均匀分布，达到平衡状态。

9.2.2 分子热运动的统计规律性

组成物质的大量的分子，处于频繁的碰撞中，对于单个分子来说，位置、速度、动量和能量都在不停地变化，确定所有分子的无规则运动是十分困难的，也是没有必要的。事实上我们关心的是整个气体的宏观性质，即大量分子整体的行为。虽然单个分子的运动毫无规律可言，但是就大量分子的整体表现来看，却呈现出一种必然的规律性，这就是统计规律 (statistical regularity)。

如图 9-5 所示，在一块竖直固定的木板上部钉有许多排列整齐的铁钉，木板的下部用等长的木条竖直地隔成许多等宽的狭槽，板的前面盖一玻璃板，使小球能存留在槽内，这种装置通常叫做伽尔顿板。如果从板顶漏斗形入口处放下一个小球，小球碰到上边第一排中某一铁钉后偏向一方又落到第二排中某一铁钉上，又向左（或右）偏移，接着再落到下排某一铁钉上，这样顺序落下去，最后小球落入某一槽中。如此进行几次实验，可以发现小球每次落入哪个狭槽是不完全相同的，这表明在一次实验中，小球落入哪个狭槽中是偶然的。如果同时投入足够多的小球，落在各槽里的小球数目各不相同。落在中间槽中的小球最多，距离中间槽越远的槽，小球落入的越少。可以用彩笔在玻璃板上画一条连续的曲线来表示小球分布的情况。多次重复地做下去，结果每次实验所得的分布曲线彼此近似地重合。这表明，尽管一个小球落入哪个槽中是偶然的，但大量小球的分布规律则是确定的，即遵从统计分布规律。

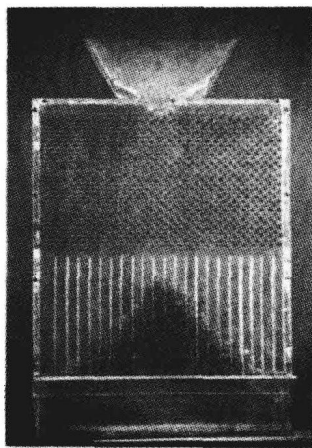


图 9-5 伽尔顿板中小球的分布

大量气体分子热运动和伽尔顿板中的小球的运动是类似的。气体是由大量分子组成的，每个分子都受到频繁的碰撞，因此，描述单个分子运动状态的微观量具有偶然性。另一方面，宏观热现象是大量分子热运动的集体表现，表现