



普通高等学校“十二五”规划教材

大学物理学 下册

籍延坤 段志欣 编著



中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

普通高等学校“十二五”规划教材

大学物理学

下 册

籍延坤 段志欣 编著

中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

内 容 简 介

本书根据教育部高等学校非物理专业基础课教学指导委员会在 2006 年 12 月上报教育部的“非物理类理工科大学物理课程教学基本要求”，在作者多年来的教学研究、教学实践和教学改革经验的基础上，结合当前高校各专业对物理课内容的要求而编写的教材。

全书分上、下两册，共 13 章，其中上册内容包括物理学导论、质点运动学、质点动力学、静电学、静磁学、电磁感应；下册内容包括气体动理论、热力学基础、振动学基础、波动学基础、波动光学、狭义相对论力学基础、量子物理基础。

本书内容的特点是：层次分明、叙述简练、概念准确、创意新颖和逻辑性强。本书适合作为普通高等院校理工科各专业的教材，尤其适合作为应用型本科工科各专业的教材。

图书在版编目 (CIP) 数据

大学物理学. 下册/籍延坤, 段志欣编著. —北京:
中国铁道出版社, 2012.7

普通高等学校“十二五”规划教材

ISBN 978-7-113-13997-1

I. ①大… II. ①籍… ②段… 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 (2012) 第 080902 号

书 名: 大学物理学 下册
作 者: 籍延坤 段志欣 编著

策划编辑: 李小军
责任编辑: 李小军 徐盼欣
封面设计: 付 巍
封面制作: 刘 颖
责任印制: 李 佳

读者热线: 400-668-0820

出版发行: 中国铁道出版社 (100054, 北京市西城区右安门西街 8 号)
网 址: <http://www.51eds.com>
印 刷: 中国铁道出版社印刷厂
版 次: 2012 年 7 月第 1 版
开 本: 720mm×960mm 1/16
印 数: 1~3 000 册
书 号: ISBN 978-7-113-13997-1
定 价: 34.00 元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版图书, 如有印制质量问题, 请与本社教材图书营销部联系调换。电话: (010) 63550836

打击盗版举报电话: (010) 63549504

前 言

物理学是整个自然科学和工程技术的基础，大学物理是高等学校各个专业的重要基础课。它所阐述的物理学基础知识、基本思想、基本规律、基本方法，不仅是学生后续专业课的基础，也是全面培养和提高学生的科学素质、科学的思维方法和科学研究能力的重要内容。

进入 21 世纪，科学技术的飞速发展对人才培养提出了新的要求，高等教育从“精英教育”走向普及。为适应市场经济对人才普适性的要求，高等教育强化基础课程，实行通才教育，已成为大势所趋。为了适应新形势下高等教育对大学物理改革发展和实际教学的需要，作者在多年教学和教学研究的基础上，根据教育部的“非物理类理工科大学物理课程教学基本要求”，结合当前高校各专业对物理课内容的要求，编写了这套《大学物理学》。

本教材针对高校工科学生基础，侧重于陈述物理学的基本知识、基本概念、基本原理和基本定律，突出物理学知识的完整性、逻辑性和准确性。为了便于学生掌握、理解和阅读，对书中内容进行分层次的叙述，对某些问题进行了方式多样、不拘一格的讨论和说明，每一章节都精选了一些有代表性的例题、选择题、填空题、计算题，通过这些基本问题的训练，以达到多数学生能够学好大学物理的目的。个别定理较为复杂的数学证明和个别小节均用星号“*”标明，仅供参考和理解，不要求掌握。

本教材下册由籍延坤、段志欣编著，参与本教材下册编著工作的还有姜晓宜、王荣、修俊玲。

编 者
2012 年 2 月

目 录

第 6 章 气体动理论	1
§ 6.1 基本概念	1
一、热力学系统/1	二、描述系统的宏观量/2
三、热运动/6	四、统计方法与统计规律/7
五、准理想气体状态方程/7	
§ 6.2 准理想气体的温度压强和温度的统计规律	9
一、压强/9	二、温度/10
§ 6.3 分子热运动速率分布统计规律	11
一、分子质心运动速率 (即平动速率) 的分布函数/11	
二、玻尔兹曼分布律/18	
§ 6.4 能量均分定理与理想气体内能的统计规律	19
一、能量均分定理的统计规律/19	二、准理想气体内能的统计规律/22
§ 6.5 平均碰撞频率与平均自由程的统计规律	23
一、平均碰撞频率/23	二、平均自由程/25
§ 6.6 气体动理论基本问题	27
一、基本问题/27	二、解题示例/28
习题 6	31
第 7 章 热力学基础	37
§ 7.1 热力学第一定律	37
一、基本概念/37	二、表达式和实质/40
§ 7.2 基本热学过程	40
一、等体过程/40	二、等压过程/41
三、等温过程/42	四、绝热过程/43
五*、多方过程/46	
§ 7.3 热力学第二定律	49
一、基本概念/49	二、两种典型表述/56
三、实质/58	四*、熵/61
五、两点推论/63	
§ 7.4* 热力学温标	64
§ 7.5 热力学基本问题	66

一、基本问题/66	二、解题示例/67	
习题 7		68
第 8 章 振动学基础		76
§ 8.1 简谐振动		76
一、引例/76	二、简谐振动的定义/80	
三、描述谐振动的特征量/80	四、谐振动的力学特征/83	
五、描述简谐振动的方法/84		
§ 8.2 简谐振动的合成		87
一、振动方向平行频率相同/87	二、振动轨迹垂直/90	
§ 8.3 弹簧的串并联		94
一、串联/94	二、并联/95	
§ 8.4* 阻尼振动		96
§ 8.5* 受迫振动		98
§ 8.6 振动学基本问题		100
一、基本问题/100	二、解题示例/101	
习题 8		108
第 9 章 波动学基础		113
§ 9.1 平面简谐波		113
一、引例/113	二、定义/116	
三、特征/116	四、描述波动特征量/119	
五、描述方法/119		
§ 9.2 经典波的波动性		121
一、干涉性/121	二、衍射性/129	
§ 9.3 多普勒效应		130
一、两种频率/130	二、两者之间的关系/130	
三、多普勒效应的定义/130		
§ 9.4 波动学基本问题		131
一、基本问题/131	二、解题示例/132	
习题 9		134
第 10 章 波动光学		142
§ 10.1 基本概念		142
一、光的波动性/142	二、普通光源及发光机理/143	
三、折射率/144	四、光强/144	
五、光程/145	六、光的叠加/147	
§ 10.2 光的偏振		151
一、偏振光/151	二、几种偏振态/151	

三、基本定律/156	
§ 10.3 双折射.....	159
一、双折射现象/159	二、两束光的特点/159
三、波片/160	
§ 10.4 起偏和检偏.....	161
一、起偏/161	二、检偏/163
§ 10.5 光的干涉.....	163
一、等倾薄膜干涉/163	二、薄膜等厚干涉/167
三*、迈克耳孙干涉仪干涉/172	四、杨氏干涉/176
五*、洛艾镜干涉/180	六*、偏振光的干涉/181
§ 10.6 光的衍射.....	183
一、光波的衍射现象/183	二、单缝夫琅和费衍射/184
三、多缝(光栅)衍射/191	四*、小圆孔衍射/198
§ 10.7 波动光学基本问题.....	199
一、基本问题/199	二、解题示例/202
习题 10	210
第 11 章 狭义相对论力学基础	217
§ 11.1 狭义相对论基本假设.....	217
一、经典时空观的困难/217	
二、两个实验中伽利略变换遇到的困难/218	
三、爱因斯坦假设/221	
§ 11.2 狭义相对论时空观.....	221
一、同时性/221	二、时间/222
三、长度/223	
§ 11.3 洛伦兹变换.....	224
一、坐标变换式/224	二*、速度变换式/227
§ 11.4 狭义相对论动力学基本方程	232
§ 11.5 相对论功和能的关系	234
一*、力对空间的累积效应/234	二、功/234
三、功能关系/236	
§ 11.6 相对论冲量和动量的关系	237
一*、力对时间的累积效应/237	二、冲量和动量/237
三、冲量和动量的关系式/238	
§ 11.7 冲量矩与角动量的关系	238
一*、力矩对时间的累积效应/238	二*、冲量矩和角动量/239
三*、二者的关系/239	

§ 11.8 相对论基本问题	242
一、基本问题/242	
二、解题示例/243	
习题 11	246
第 12 章 量子物理基础	250
§ 12.1 黑体辐射简介	250
一、热辐射/250	
二、黑体辐射/251	
三、普朗克的能量子假设/252	
§ 12.2 光的量子性	254
一、光电效应/254	
二、康普顿 (A. H. Compton) 效应/259	
§ 12.3 光子的波粒二象性	264
一、双缝干涉实验结果/264	
二、光子的波粒二象性概述/264	
三、概率波/265	
§ 12.4 物质波	267
一、德布罗意假设/267	
二、概率波/269	
§ 12.5 薛定谔方程	270
一、方程的建立/270	
二、波函数所服从的条件/271	
§ 12.6 不确定关系	275
一、坐标和动量的半定量的关系/275	
二、能量和时间的半定量的关系/276	
§ 12.7 氢原子理论	277
一、氢原子的玻尔 (N. Bohr) 理论/277	
二、氢原子的几个量子力学结论/281	
§ 12.8 电子自旋	282
一、施特恩—格拉核 (O. Stern, W. Gerlach) 实验/282	
二、电子自旋/283	
§ 12.9 原子核外电子组态	284
一、四个量子数/284	
二、定义/285	
三、组态所服从基本原理/285	
§ 12.10 量子物理学基本问题	286
一、基本公式/286	
二、解题示例/287	
习题 12	290
部分习题参考答案	297
参考文献	303

第 6 章

气体动理论

热学研究物质与温度有关的宏观性质. 热学研究的对象称为热力学系统, 简称系统. 描述系统宏观性质的物理量称为宏观量, 例如系统的体积、压强、温度等. 宏观量一般可以直接测量. 通过实验总结出系统宏观量之间关系的研究方法称为热力学. 热力学理论具有可靠性和普遍性, 但不能反映热现象的微观本质.

热现象的本质是组成物质的大量微观粒子(统称分子)无规则热运动的结果. 描述分子状态的物理量称为微观量, 例如分子的质量、位矢、速度、能量等. 由于热运动, 分子的微观量瞬息万变, 一般不能直接测量. 统计物理学把宏观量看成相应微观量的统计平均值, 并从物质的微观结构出发, 通过求统计平均值来推导系统的宏观量及微观量与宏观量之间的关系. 它不追求个别分子的运动细节, 而是研究大量分子集体行为的规律——统计规律. 统计物理学虽然能揭示热现象的微观本质, 但所得到的结果往往与实际情况不完全一致. 在热学研究中, 热力学与统计物理学互为补充, 相辅相成.

气体动理论是统计物理的初级理论, 它把单个分子作为统计的个体, 直接对微观量求统计平均值得到相应的宏观量. 这种统计方法只适用于分子之间的相互作用力十分微弱、分子的运动几乎是彼此独立的系统.

本章以理想气体为例介绍气体动理论.

§ 6.1 基本概念

一、热力学系统

(一) 定义

大量分子、原子组成的物体或物体系称为热力学系统. 在大学物理中所研究的系统通常是一个气体系统.

(二) 分类

1. 孤立系统

孤立系统是与外界既无能量交换又无物质交换的热力学系统.

说明:热力学系统是理想概念,系统与其所处的外部环境即系统的外界相互作用十分微弱,其相互作用过程中与外界交换的能量远远小于系统本身的能量,在讨论的过程中可以忽略不计.如对系统进行观测时,要求外界对系统施加作用,并从系统获得反馈信息,这就破坏了系统的孤立性.

2. 封闭系统

封闭系统是与外界有能量交换而无物质交换的热力学系统.

3. 开放系统

开放系统是与外界既有能量交换又有物质交换的热力学系统.

(三)平衡态系统

1. 定义

一个不受外界影响的系统,不论其初态如何,最终将处于宏观性质不随时间变化的稳定状态,这样的稳定状态称为**热平衡态**,简称**平衡态**,或者说是孤立系统所达到的稳定态.

说明:

(1)所谓“不受外界影响”或“孤立系统”是指外界对系统既不做功也不传热.完全不受影响而使宏观性质保持不变的系统并不存在,变是绝对的,不变是相对的,当物理量的改变量远远小于物理量自身大小时,则可以认为物理量是不变的.

(2)若系统受到外界影响,如把一根金属棒的一端置于沸水中,另一端放入冰水中,在这样的两个恒定热源之间,经过长时间后,金属棒也达到一个稳定的状态,称为**稳定态**,但这不是平衡态,因为在外界影响下,不断地有热量从金属棒的高温端传递到低温端.

(3)宏观性质的变化是指系统对外表现出的实验可测的变化.

(4)平衡态是个宏观概念,表现为系统的宏观性质,如密度、压强等物理量有确切的数值,而且处处均匀,不随时间变化.从微观上看,由于分子作无规则运动,分子的微观量(即描述单个分子运动状态的物理量,如分子的位置、速度、动量和能量等)仍会不断发生变化,但分子热运动的平均效果不随时间变化.所以,平衡态是一种热运动平衡的状态.

2. 平衡态满足的条件

系统处于平衡态,必须同时满足两个条件:一是系统与外界在宏观上无能量和物质交换;二是系统的宏观性质不随时间变化.换言之,系统处于平衡态时,系统内任一体元处于力学平衡(压强处处相同)、热平衡(温度处处相同)、相平衡(无物质变化)和化学平衡(无单方向化学反应)之中.

二、描述系统的宏观量

(一)体积

体积是指盛装气体容器的容积,用字母 V 表示.在国际单位制中,体积的单位是立

方米,用符号 m^3 表示.

(二) 压强

压强是气体对容器壁单位面积上产生的垂直压力,是大量气体分子频繁碰撞容器壁产生的平均冲力的宏观表现,用 p 表示. 在国际单位制中,压强的单位是帕(斯卡),用符号 Pa 表示.

(三) 温度和温标

1. 温度

1) 热力学第零定律

将盛有开水的普通金属茶杯在茶几上放一会儿,发现茶几会变热;若将金属茶杯换成保温杯,发现茶几的冷热程度在不是太长的时间内几乎不变. 则称金属杯是导热的,而保温杯几乎是绝热的. 几乎所有的金属都是导热的,而陶瓷、石棉等材料可看成是绝热的.

两个物体经过导热材料相互接触称为相互热接触. 实验发现,相互热接触的两个物体,将它们孤立起来,经过足够长的时间后,它们的宏观性质不随时间变化,称这两个物体达到热平衡.

设有三个物体 A、B 和 C 两两可以达到热平衡. 实验发现,若 A 和 B 达到热平衡,同时 A 和 C 达到热平衡,则 B 和 C 一定也达到热平衡,这一规律称为热力学第零定律.

热力学第零定律告诉我们,热平衡具有可传递性,这种传递性反映出处在热平衡的两个物体具有唯一的共同属性. 例如,若定义所有爱好弹琴的人为“朋友”,则“朋友”这一关系具有可传递性,这种传递关系所包含的共同属性是“爱好弹琴”. 相反,若规定爱好弹琴或爱好下棋的人为“朋友”,由于所包含的属性不是唯一的,因此“朋友”这一关系不具有可传递性.

2) 温度的定义

两个热力学系统处于热平衡时所具有的相同的状态特征或属性称为温度. 由于参量 p 、 V 可以完全确定一个简单系统(仅由两个参量 p 、 V 可以完全确定其状态的系统,不是由多个参量,故称简单系统)所有可能的状态,所以温度也可以定义为描述简单系统状态参量 p 、 V 的一个函数,即

$$\theta = f(p_1, V_1) = f(p_2, V_2) = f(p, V) \quad (6-1)$$

式中, θ 是表示处于热平衡系统的状态特征,故定义其为系统的温度. 式(6-1)的函数形式不同,建立的温标(所谓温标就是温度高低的标准)也不同,若其中一个参量不变且温度是另一个参量的线性函数,即

$$\begin{cases} \theta = a + bp \\ \theta = c + dV \end{cases}$$

或

$$\begin{cases} p = a' + b'\theta \\ V = c' + d'\theta \end{cases}$$

则这样定义的温标称为经验温标. 如果选测 $a = a' = c = c' = 0$, 则这样定义的温标称为绝对温标.

处于热平衡的多个物体一定具有相同的温度, 这是温度计测量温度的依据. 可以将适当的物体作为温度计, 只要温度计和待测物体处于热平衡, 则温度计与待测物体具有相同温度.

2. 温标

1) 摄氏温标

温度高低必须用数值表示, 所以温度的数值表示法称为温标. 建立温标需要三个基本要素: 一是选择温标的固定点 (如零点等); 二是选择测温物质和测温属性; 三是规定测温属性与温度的关系. 对于摄氏 (Celsius) 温标而言, 历史上规定: 在一个标准大气压下, 纯水和纯冰达到平衡时的温度规定为 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (冰点温度), 纯水和纯水蒸气达到平衡时的温度规定为 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ (沸点), 测温物质可选择酒精, 测温属性是酒精的体积随温度线性变化, 即

$$\frac{t}{100} = \frac{V - V_0}{V_{100} - V_0}$$

解得摄氏温标为

$$t = \frac{V - V_0}{V_{100} - V_0} \times 100 (^{\circ}\text{C})$$

这就是酒精温度计测量摄氏温度的测量原理.

2) 理想气体温标

(1) 理想气体摄氏温标. 理想气体是实际气体在无限稀薄时的极限, 或者说是当压强趋近于零的气体, 它是一个理想模型, 实际上并不存在这种气体. 对于实际气体, 如分子数密度足够小, 分子间距离足够大, 即分子之间的平均距离远远大于其分子直径, 以至于分子之间的相互作用可以忽略时, 这样的气体可以用理想气体模型来处理, 通常也把这样的气体称为准理想气体或近似称其为理想气体. 如氢气、氧气、氮气和空气等不易液化的实际气体, 在常温下都可以看成理想气体.

理想气体摄氏温标的建立基础是波义耳定律, $pV = \phi(t)$, 规定 $p = c$ (常量), $\phi(t) = at$, V_0 为一个大气压 ($1.013 \times 10^5\text{ Pa}$) 冰点时测温物质 (理想气体) 的体积, V_{100} 为水的沸点时测温物质 (理想气体) 的体积, 并把 V_0 和 V_{100} 之间分成 100 等分, 则

$$\frac{t}{100} = \frac{V - V_0}{V_{100} - V_0}$$

解得摄氏温标为

$$t = \frac{V - V_0}{V_{100} - V_0} \times 100 (^{\circ}\text{C})$$

(2)理想气体绝对温标. 理想气体绝对温标的建立基础是查理(J. A. C. Charles)定律,即在体积 V 不变的情况下,一定量的气体的压强 p 随摄氏温度作线性变化

$$p = p_0(1 + \alpha_p t) \quad (6-2)$$

式中,下标 0 表示有关物理量取 0°C 时的值, α_p 为气体压强系数.

因为
$$p = p_0(1 + \alpha_p t) = \alpha_p p_0 \left(\frac{1}{\alpha_p} + t \right)$$

令
$$T = \frac{1}{\alpha_p} + t$$

有
$$p = \alpha_p p_0 T$$

根据绝对温标的定义,温标 T 是绝对温标. 其中压强系数 α_p 可以通过实验测得. 如图 6-1 所示, t 在 $0 \sim 100^\circ\text{C}$ 之间变化得到的 $p-t$ 图像为线性关系,斜率为 $\alpha_p p_0$,其延长线横轴上的截距为 $-1/\alpha_p$ ($p=0$),图像在纵轴上的截距为 p_0 . 图 6-1 中,三条线段分别代表不同分子数密度的同种气体,随着分子数密度 n 减少, $p_0 \downarrow$,不同分子数密度 n ,横轴上的截距也略有不同,我们把在 $p_0 \rightarrow 0$ 的极限值称为 $-1/\alpha_p = -T_0$,或者说,气体压强系数具有如下极限值

$$\lim_{p_0 \rightarrow 0} \alpha_p = \alpha = \frac{1}{T_0}$$

大量的实验表明,这个极限值对所有的气体都一样.

根据 1900—1937 年间的实验数据,用取平均值的办法,20 世纪 40 年代求得的最好结果为 $\alpha = 0.003\,660\,8/^\circ\text{C}$, $T_0 = 273.165^\circ\text{C} \pm 0.015^\circ\text{C}$.

1954 年经重新核算,并为第十届国际计量大会所采纳的正式规定数值为

$$\frac{1}{\alpha} = T_0 = 273.15^\circ\text{C}$$

所以
$$T = \frac{1}{\alpha_p} + t = 273.15 + t$$

由 $p = \alpha_p p_0 T$ 可得理想气体的绝对温标为

$$T = \frac{p}{p_{tr}} T_{tr} \quad (6-3)$$

式中, T_{tr} 是水的三相点的理想气体温标,取水的三相点作参考温度点是因为它具有唯一性即重复性,也便于复制. 因为实验测得水的三相点的摄氏温度为 0.01°C ,所以 $T_{tr} = 273.16\text{ K}$; p_{tr} 是理想气体在该温度的压强,为 611.73 Pa ,于是有

$$T = 273.16 \frac{p}{p_{tr}}$$

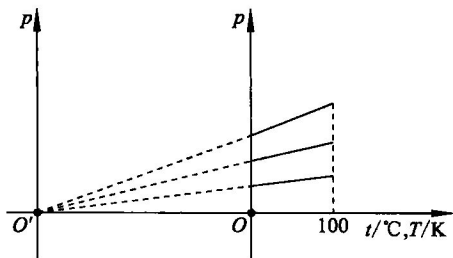


图 6-1

、这就是定容理想气体温度计的测温原理,而且理想气体温标与理想气体的种类无关.

气体温度计的测温范围非常有限,在实验室可以获得 10^{-6} K 的低温,而宇宙在大爆炸 10^{-12} s 后温度高达 10^{16} K,显然用一种温度计无法完成如此大范围的温度测量.实际情况是在不同温度范围使用不同类型的温度计,如在 10 K 以下时,使用超声温度计或磁温度计;在 10^2 K 以下时使用铈(或锆、碳)电阻温度计、电容温度计;在高温时(如 10^3 K 以上)时要使用辐射温度计等.

注意:两种温标分度相同,分度值分别为 1 K(1 开)和 1°C (1 摄氏度).

三、热运动

(一)定义

热运动是指大量分子的无规则运动.

(二)分子热运动的基本观点

1. 阿伏伽得罗常量

宏观物体由大量粒子(分子、原子等)组成,分子之间存在一定的空隙.1 mol 任何物质都含有相同个数的分子或原子,即为阿伏伽得罗常量

$$N_A = 6.02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$$

2. 分子相互间作用力

分子相互间作用力由吸引和排斥两部分组成.吸引与排斥形成的分子力曲线如图 6-2 所示.

当 $r=r_0$ 时,合力 $f=0$. 称 r_0 (约 10^{-10} m) 为平衡距离.

当 $r>10^{-9}$ m, $f\approx 0$ 时,分子可视为自由运动.

当 $r>r_0$ 时,合力 $f<0$,此时引力起主要作用.随距离的增加引力快速减小,一般超过 10^{-9} m 时引力可忽略不计.此时的分子可视为自由运动.当 $r<r_0$, $\left|\frac{df}{dr}\right| \gg 1$,合力 $f>0$ 时,斥力起主要作用,随距离的减小斥力迅速增大,当 r 减小到某距离 d 时,强大的斥力将阻止分子进一步相互靠近.

3. 分子永远做无规则运动

分子之间由于频繁碰撞,致使每个分子的运动速度大小和方向都是随机变化的,即分子运动不像宏观质点那样在一般时间内满足一定规则运动,分子的运动是无规则的.

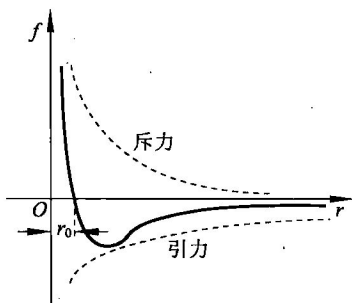


图 6-2

四、统计方法与统计规律

(一) 统计方法

统计方法指对大量随机事件求平均值的方法。

如一次掷 6 枚色子, 数字 1 朝上的有几枚? 每枚色子侧面上的数字出现朝上的概率是相等的, 它们都是随机事件. 出现数字 1 朝上的枚数为 1~6 枚均有可能. 若将 6 枚色子掷 12 000 次(大量的随机事件), 数字 1 朝上的枚数的平均值为 2 000 枚, 这是个统计平均值, 它与实际统计结果可能有偏差, 但统计偏差数 ΔN 远远小于理论值 2 000 枚, 故可以认为实际枚数与理论值相等。

(二) 统计规律

统计规律指微观统计物理量(其值用统计方法测得)与宏观物理量(实验直接可测)之间的函数式。

五、准理想气体状态方程

(一) 气体状态方程

(1) 定义: 描述气体的宏观状态量(p, V, T)所服从的函数式称为**气体状态方程**。

(2) 方程式 $F(p, V, T) = 0$. 对于不同系统, 函数的形式可能不同, 具体形式由实验确定。

(二) 准理想气体状态方程

1660 年波义耳(Robert Boyle)在实验上发现: 对于一定的准理想气体在温度不变时, 它的压强和体积的乘积是一个常量, 即

$$pV = C (\text{常量}) \quad (6-4)$$

该规律称为**波义耳定律**。

讨论: 可否通过波义耳定律来定义理想气体, 即服从波义耳定律的气体定义为理想气体。

不妥, 原因之一, 理想气体是实际不存在的气体, 即不是真实气体, 而是某种真实气体压强趋近零的极限; 原因之二, 波义耳定律是一个实验定律, 服从与否是相对于一定的实验仪器精度而言的, 对于实验仪器精度低的仪器定律可能成立, 而对于实验精度高的仪器定律可能不成立, 由此可以推得所有的真实气体都可以称其为理想气体。

按照理想气体温标的定义, 当气体的体积不变时, 压强与绝对温度成正比, 即

$$p \propto T \quad (6-5)$$

结合式(6-4)和式(6-5), 可以推断, 气体体积不变时, 常量 C 应该正比于温度 T , 设为 $C = DT$, 或

$$pV = DT$$

若将准理想气体维持在标准状况下,则有

$$p_0 V_0 = D T_0$$

$$D = \frac{p_0 V_0}{T_0} = \nu R$$

式中, $p_0 = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$; $T_0 = 273.15 \text{ K}$; ν 为气体的物质的量(即气体摩尔数); V_0 为气体在标准状况下的摩尔体积.

按照阿伏伽德罗(Avogadro)定律,在标准状况下,1 mol 任何气体所占的体积为 $V_0 = 22.4 \text{ L} = 22.4 \times 10^{-3} \text{ m}^3$, 可得

$$R = \frac{p_0 V_0}{T_0} = 8.31 \text{ J/(mol} \cdot \text{K)}$$

将其称为**摩尔气体常量**. 综合上述分析可得

$$pV = \nu RT \quad (6-6)$$

若气体的质量为 M , 摩尔质量为 M_{mol} , 则准理想气体状态方程为

$$pV = \frac{M}{M_{\text{mol}}} RT \quad (6-7)$$

引入波耳兹曼常量

$$k = \frac{R}{N_A} = \frac{8.31}{6.022 \times 10^{23}} = 1.38 \times 10^{-23} \text{ (J/K)}$$

设分子质量为 m , 则

$$p = \frac{M}{V \cdot M_{\text{mol}}} RT = \frac{Nm}{VN_A m} RT = nkT$$

即

$$p = nkT \quad (6-8)$$

式中, n 是单位体积内的分子数, 称为**气体分子的数密度**.

(三) 准理想气体微观模型

- (1) 分子线度(1Å , 埃, $1\text{Å} = 10^{-10} \text{ m}$) $\ll$ 分子间距, 分子可以视为质点.
- (2) 除碰撞外, 分子之间的作用力可忽略不计(与碰撞时的平均冲力相比很小).
- (3) 因为分子之间的碰撞是靠分子力作用的非接触碰撞, 所以碰撞过程中没有能量损失, 即分子间的碰撞是完全弹性的.

- (4) 服从经典力学规律.

(四) 气体统计假设

- (1) 分子数按方向分布是均匀即平均而言, 沿各个方向运动的分子数相同.

$$N_{-x} = N_{+x}, \quad N_{-y} = N_{+y}, \quad N_{-z} = N_{+z}$$

- (2) 分子数按速度分布是均匀的, 即沿各个方向运动的分子速度分量以及方均速率均相等.

$$\overline{v_x} = \overline{v_y} = \overline{v_z} = 0, \quad \overline{v_x^2} = \overline{v_y^2} = \overline{v_z^2} \quad (6-9)$$

(3) 不因碰撞而丢失具有某一速度的分子。

(4) 分子数按位置分布是均匀的, 即

$$n = \frac{N}{V} = \frac{dN}{dV}$$

§ 6.2 准理想气体的温度压强和温度的统计规律

一、压强

(一) Δt 时间内与 S 面碰撞的第 j 个分子动量的增量

如图 6-3 所示, 第 j 个分子与 S 面碰撞一次动量的增量为 $-2mv_{jx}$, 第 j 个分子连续两次与 S 面碰撞用时为 $\Delta t_0 = 2 \times \frac{l_1}{v_{jx}}$, 在 Δt 时间内第 j 个分子

与 S 面的碰撞次数为 $\frac{\Delta t}{\Delta t_0} = \frac{v_{jx}}{2l_1} \Delta t$, 总动量增量为

$$-\frac{mv_{jx}^2}{l_1} \Delta t.$$

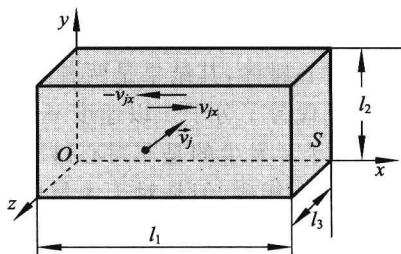


图 6-3

(二) Δt 时间内与 S 面碰撞的所有分子动量的增量

$$-\sum_{j=1}^N \frac{mv_{jx}^2}{l_1} \Delta t = -\frac{m}{l_1} \sum_{j=1}^N v_{jx}^2 \Delta t$$

(三) Δt 时间内 S 面对所有碰撞分子的平均力

$$\bar{F}_x \Delta t = -\frac{m}{l_1} \sum_{j=1}^N v_{jx}^2 \Delta t,$$

$$\bar{F}_x = -\frac{m}{l_1} \sum_{j=1}^N v_{jx}^2$$

因为 $\overline{v_x^2} = \frac{\sum_{j=1}^N v_{jx}^2}{N}$, 所以 $\sum_{j=1}^N v_{jx}^2 = N \overline{v_x^2}$, 根据统计假设

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

得到

$$\bar{F}_x = -\frac{Nm}{3l_1} \overline{v^2}$$

(四) 压强

$$p = \frac{|\bar{F}_x|}{S} = \frac{1}{3} \frac{N}{l_1 l_2 l_3} m \overline{v^2} = \frac{1}{3} mn \overline{v^2} = \frac{2}{3} n \bar{W}_{kT} \quad (6-10)$$