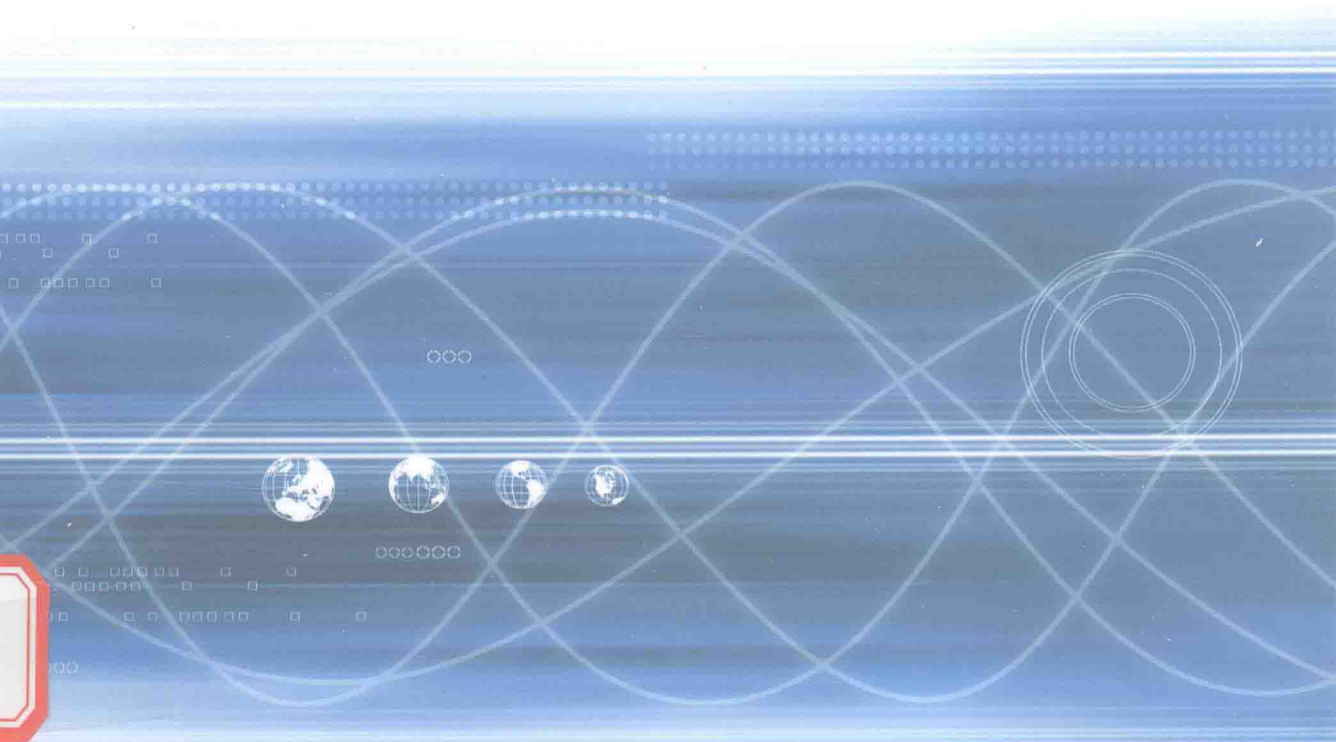


高等学校教材

大学物理学 (下册)

主 编 朱林彦

副主编 蔡冬梅



高等教育出版社

高等学校教材

大学物理学 (下册)

D a x u e W u l i x u e

主 编 朱林彦
副主编 蔡冬梅

高等教育出版社·北京

内容提要

本书系统地阐述了物理学的基本概念、基本规律和基本方法。主要内容包
括：质点运动学，质点动力学，刚体定轴转动；真空中的静电场，静电场
中的导体与电介质，恒定磁场，磁场中的介质和电磁感应；气体分子动理论
和热力学基础；机械振动和波动，波动光学；狭义相对论和量子物理基础，共
18 章。

本书根据《理工科类大学物理课程教学基本要求》(2010 年版)，并考虑
到当前教学的实际情况编写而成。全书物理基本概念的引入清晰、完整，论
述深入浅出，例题丰富、难度适中。本书配有一定的技术应用和理论扩展的
内容，以加强对学生分析问题、解决问题能力的培养，力求简明而不简单，深
入而不深奥。

本书可作为高等学校一般理工类专业的大学物理教材，也可作为各类
工程技术院校相关专业的自主学习教材，亦可供中学物理教师参考。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理学. 下册 / 朱林彦主编. -- 北京：高等
教育出版社，2016.3

ISBN 978-7-04-044791-0

I. ①大… II. ①朱… III. ①物理学-高等学校-教
材 IV. ①O4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 021465 号

策划编辑 张海雁	责任编辑 高聚平	封面设计 赵 阳	版式设计 马敬茹
插图绘制 杜晓丹	责任校对 王 雨	责任印制 刘思涵	

出版发行 高等教育出版社	网 址 http:// www.hep.edu.cn
社 址 北京市西城区德外大街 4 号	http:// www.hep.com.cn
邮政编码 100120	网上订购 http:// www.hepmall.com.cn
印 刷 河北鹏盛贤印刷有限公司	http:// www.hepmall.com
开 本 787 mm×1092 mm 1/16	http:// www.hepmall.cn
印 张 16.75	
字 数 400 千字	版 次 2016 年 3 月第 1 版
购书热线 010-58581118	印 次 2016 年 3 月第 1 次印刷
咨询电话 400-810-0598	定 价 29.40 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题，请到所购图书销售部门联系调换
版权所有 侵权必究
物 料 号 44791-00

目 录

第三篇 气体分子动理论和热力学

第十章 气体分子动理论	3	第十一章 热力学基础	31
10.1 平衡状态与理想气体物态 方程	3	11.1 准静态过程 功和内能	31
10.2 物质的微观模型 统计 平均值	5	11.2 热力学第一定律	33
10.3 压强与温度的微观解释	8	11.3 热容	34
10.4 能量按自由度均分定理 理想 气体的内能	12	11.4 热力学第一定律对理想气体 的应用	35
10.5 重力场中气体密度随高度的 变化	17	11.5 循环过程 卡诺循环	43
10.6 麦克斯韦速率分布	18	11.6 热力学第二定律	48
* 10.7 分子碰撞与平均自由程	22	11.7 可逆过程与不可逆过程	50
* 10.8 迁移现象	23	11.8 卡诺定理	51
习题	27	11.9 热力学第二定律的统计 意义	53
中外物理学家简介(十) 玻耳兹曼	29	习题	58
		中外物理学家简介(十一) 焦耳	62

第四篇 振动与波动

第十二章 机械振动	65	13.2 机械波的波函数	92
12.1 简谐振动	65	13.3 波的能量 能流密度 波的 吸收	98
* 12.2 阻尼振动 受迫振动 共振	73	13.4 惠更斯原理 波的衍射	101
12.3 简谐振动的合成	79	13.5 波的干涉 驻波	102
习题	84	13.6 声波	112
中外物理学家简介(十二) 茅以升	86	* 13.7 多普勒效应	115
第十三章 波动学基础	87	习题	116
13.1 机械波在弹性介质中的 传播	87	中外物理学家简介(十三) 钱学森	119

第五篇 波动光学

第十四章 光的干涉	123	仪器的分辨率	163
14.1 光源的发光特性	123	15.4 光栅衍射	166
14.2 波的独立性、叠加性与 相干性	127	15.5 晶体对 X 射线的衍射	176
14.3 由单色光波叠加所形成的 干涉图样	129	习题	179
14.4 获得相干光源的方法—— 分波阵面法	131	中外物理学家简介(十五) 夫琅禾费	181
14.5 获得相干光源的方法—— 分振幅法	139	第十六章 光的偏振	182
14.6 干涉现象的应用	142	16.1 自然光与偏振光	182
习题	150	16.2 起偏与检偏 马吕斯定律	185
中外物理学家简介(十四) 托马斯·杨	153	16.3 反射与折射时光的偏振 布儒斯特定律	187
第十五章 光的衍射	154	16.4 双折射现象	189
15.1 惠更斯-菲涅耳原理	154	16.5 偏振光的干涉 人工双折射 现象	190
15.2 单缝的夫琅禾费衍射	156	16.6 旋光现象	194
15.3 夫琅禾费圆孔衍射 光学		习题	194
		中外物理学家简介(十六) 布儒斯特	196

第六篇 量子物理基础

第十七章 从经典物理到量子物理	199	18.1 对应原理	225
17.1 经典物理中的量子化	199	18.2 波粒二象性	226
17.2 黑体辐射 普朗克量子 假设	199	18.3 波函数及其物理意义	230
17.3 光电效应	203	18.4 不确定关系	234
17.4 光散射 康普顿效应 光量 子理论的应用	208	18.5 薛定谔方程	238
17.5 原子光谱与原子结构 玻尔 的量子理论	212	18.6 求解定态问题	242
习题	221	18.7 氢原子	250
中外物理学家简介(十七) 玻尔 吴有训	223	18.8 电子自旋与泡利不相容 原理	253
第十八章 量子物理简介	225	18.9 原子的壳层结构	255
		习题	257
		中外物理学家简介(十八) 德布罗意 薛定谔	259
参考文献	261		

3

第三篇 气体分子动理论和热力学

热力学是研究物质运动中有关热现象的一门学科.根据研究方法的不同,热力学分为两大部分:统计物理学和热力学.

分析物理现象时,我们通常把注意力集中于物质的某一部分,想象这部分物质与其他部分相隔离,并称这部分物质为系统.物质世界的任何一部分都可以看作一个系统,而系统外与系统的行为直接有关的一切叫做外界或环境.例如,一个球是一个系统,而打球的人和空气是它的外界;气缸内的气体是一个系统,而气缸活塞是外界.系统与外界之间具有相互作用,它们可以通过界面交换物质,也可以传热或做功(交换能量).如果一个系统与外界之间既不交换物质,也不交换能量,该系统称为**孤立系统**;如果一个系统与外界之间不交换物质,但可以交换能量,该系统称为**封闭系统**;如果一个系统与外界之间既可以交换物质,也可以交换能量,该系统称为**开放系统**.我们必须选择某些可观测的、适当的物理量来描述系统的行为.可由实验操作所确定的、反映系统整体性质的物理量叫做宏观量.将有关的某些宏观量联系起来的

一些定律组成了热力学这门学科的基础。

所有的实物都是由分子、原子等粒子所组成,场也可以用量子的方法来研究。在物质运动中,组成物质的所有粒子都在不停地运动,将它们的情况综合起来就得到了物质整体运动的规律。所以我们不仅可以从宏观角度,也可以从微观角度来研究物质的运动规律,这就是物理学的另一分支——统计物理学。普通物理课程中,我们只学习一些基础知识——气体分子动理论和热力学基础,其余的要留待同学们在工程热力学中学习。

第十章 气体分子动理论

10.1 平衡状态与理想气体物态方程

10.1.1 平衡态

热力学主要研究热力学系统的宏观状态及其变化规律.宏观状态中,一种较重要的情况就是平衡态.

设有一封闭容器,用隔板分成 A 和 B 两部分,A 部分中贮有气体,B 部分是真空.当把挡板抽去时,A 部分的分子就向 B 部分运动.在这个过程中,各部分状况是不一样的.随着时间的延续,气体各部分不断变化,一直到容器内各处气体达到均匀一致为止.之后,如果没有外界影响,则容器内的气体一直保持这一状态,而不再发生变化(压强处处相等,力学平衡状态).

又如两个冷热不同的物体,互相接触时,它们之间发生热交换.热的物体变冷,冷的物体变热,直到两个物体达到各处冷热程度均匀一致为止.如果没有外界影响,则两物体将一直保持这一状态不再发生变化(温度处处相等,热学平衡状态).

在无外界影响下,系统中各部分化学组分处处相等——化学平衡条件.

类似的现象可以举出很多.从这类现象可以总结出一个结论:即一个处在没有外界影响下的热力学系统,经过一定时间后,将达到一个确定的状态,而不再有任何宏观变化.这种在不受外界影响的条件下,系统宏观性质不随时间变化的状态叫平衡态.这里所谓不受外界影响,是指与外界没有物质交换,也没有能量(做功或传热)交换,即该系统是一个孤立系统.

实际生活中,没有不与外界作用的孤立系统,平衡态只是一个理想概念.如果系统状态的变化相对于要研究的问题可以忽略,就可以认为系统处于平衡态.

上述平衡态是指系统的宏观性质不随时间变化.从微观来看,即使在平衡态下,组成系统的分子仍在不停地运动,只是运动的平均效果不随时间变化.所以系统的宏观性质只是分子运动的平均效果,热力学中的平衡是动态平衡.我们把这种平衡叫热动平衡(热力学动态平衡).

10.1.2 温度

为了表征系统的冷热程度,需要引入一个新的物理量——温度.设把两个冷热程度不一样的系统放在一起,使它们相互作用.一般来说,这两个系统的状态都会发生改变.经过一段时间后,它们的状态不再变化,说明它们达到了一个共同的平衡态.由于这种平衡是在两个系统之间可以传热的条件下达到的,所以叫作热平衡.

如果把两个处于热平衡的系统分开一段时间后再让它们接触,这时它们的状态仍不发生变

化.这说明,在它们分开的一段时间内,它们仍处于热平衡状态.

现在取 A、B、C 三个热力学系统.将 B 与 C 隔绝,但使它们同时与 A 接触,经过一段时间后, A 与 B、A 与 C 之间都达到了热平衡.这时如果让 B、C 互相接触,则可发现 B、C 的状态都不发生变化.这说明, B、C 之间也达到了热平衡.由此得出结论:如果两个热力学系统中的每一个都与第三个热力学系统达到热平衡,则它们之间也必定处于热平衡.这就是热力学第零定律.

由热力学第零定律得出,处于同一热平衡状态的所有热力学系统都具有某种共同的宏观性质——它们的冷、热程度都相等.定义这个宏观性质为温度.温度是决定一个系统是否与其他热力学系统处于平衡的宏观特性.所有互为热平衡的系统都具有相同的温度.

温度的数学表达方法称为温标.热力学温度是国际单位制(SI)的 7 个基本量之一,符号为 T ,单位为“开尔文”,单位符号为“K”.绝对零度(0 K)为最低温度,水的三相点的温度为 273.16 K.

在工程和日常生活中,常用摄氏温度,符号为 t ,单位符号为 $^{\circ}\text{C}$.热力学温度 T 与摄氏温度 t 的关系为

$$T/\text{K} = 273.16 + t/^{\circ}\text{C} \quad (10-1)$$

10.1.3 状态参量

系统处于平衡态时,其物理特性可以用一些确定的物理量来表征.这些物理量叫做状态参量.为了表征一个系统是否与其他系统达到热平衡,需要用到它的温度.那么,温度反映了处于平衡态的热力学系统的某一宏观特性,它就是系统的一个状态参量.

一个封闭的容器,通过一个可以自由移动的活塞,将其分成 A、B 两部分.如果 A、B 部分都与外界没有热交换,它们之间也不交换热量,则当活塞处于某一位置时,活塞位置不再变化, A、B 部分均达到了平衡态.在这个平衡态中, A、B 两部分气体有一个共同的宏观性质,即它们对活塞作用的力是相等的.由于力所作用的面积相等,所以 A、B 两部分气体的压强是相等的.可见,压强也表示了系统处于平衡态的一个宏观特性,也是系统的一个状态参量.

总的来说,对一个系统,要表示它的宏观特性或宏观状态,除了温度外,还需要用到几何参量(体积)、力学参量(压强)、化学参量(化学组分)、电磁参量(电磁场强度)等.究竟需要用到哪几个参量,由系统本身的性质和所研究的问题共同决定.

气体的体积是指气体分子所能达到的空间.在国际单位制(SI)中,体积的单位为立方米(m^3),常用单位还有立方分米(dm^3 , 又称作升,符号为 L, 即 $1\text{ L} = 1\text{ dm}^3$).

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,压强的单位是帕斯卡(Pa), $1\text{ Pa} = 1\text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$.

10.1.4 理想气体物态方程

实验证明,表征气体的平衡态,只要用到三个状态参量 p 、 T 、 V 就已足够.这三个参量之间需要满足一定的条件,叫作气体的物态方程.其具体形式需由实验确定.

$$F(p, V, T) = 0 \quad (10-2)$$

对气体的状态参量进行测量时,发现在压强不太高,温度不太低的情况下,所有气体都近似地遵守以下三个实验规律.压强越低,温度越高,近似程度越好.这说明,一切气体在体积、压强、温度的变化关系上都具有共同的特性.不同的气体表现出共同的特性不是偶然的,而是反映了它

们的内在规律性.为了概括并研究气体的这一规律,我们提出了理想气体这一概念.凡是严格遵守下述三个定律的气体都是理想气体.其状态参量都可由以下三个实验定律得到.

1. 玻意耳-马略特定律

一定量的理想气体,在温度不变时,其压强和体积的乘积为常量.

$$p_1 V_1 = p_2 V_2 \quad (T \text{ 不变时}) \quad (10-3)$$

2. 盖·吕萨克定律

一定量的理想气体,在压强不变时,其体积与温度成正比.

$$V = KT \quad (p \text{ 不变时}) \quad (10-4)$$

3. 查理定律

一定量的理想气体,在体积不变时,其压强与温度成正比.

$$p = K'T \quad (V \text{ 不变时}) \quad (10-5)$$

对一定质量 m' 的理想气体,综合以上三个实验方程,得到理想气体物态方程为

$$pV = \frac{m'}{M} RT = \nu RT \quad (10-6)$$

式中, M 为气体的摩尔质量, $R = 8.31 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, 称为摩尔气体常量, ν 为气体的物质的量.

10.2 物质的微观模型 统计平均值

10.2.1 物质的微观模型

1. 物质由大量微粒——分子所组成,分子之间有间隙存在

分子动理论从物质的微观结构来说明热现象的基本规律.我们知道,物质通常都是由分子所组成的,分子又由原子组成,原子由带正电的原子核与绕核高速转动的电子组成.任何宏观物体,都含有大量的分子和原子,这些分子和原子又叫作微观粒子.

在组成物质的分子与原子之间,都有着一定的空隙.从微观上来说,物质是不连续的.如空气很容易被压缩,水和酒精混合后的体积小于它们原来的体积之和.有人曾给钢筒内的油加上 20 000 个大气压的压力,结果发现油通过筒壁渗出.这些都说明分子之间是不连续的.

2. 分子处于不断的无规则运动之中

组成物质的分子是在不断地运动着的.在清水中滴上几滴蓝墨水,经过一段时间,清水会变为蓝色;从食堂附近经过,老远就能闻到炒菜的香味,这些都是分子不断运动的结果.在地球表面,由于分子不断地运动才使大气成分趋于平衡;将两块不同的金属块紧压在一起,经过较长时间,在每块金属的接触面上,都会发现另一种金属的成分.这些也说明分子在不断地运动着.

实验指出,若盛有气体的容器其外界条件均匀且不变,则容器内气体分子密度处处均匀,且气体的其他性质也是均匀的.所以,若有气体分子从 A 点往 B 点运动,则必然有等量的分子从 B 点向 A 点运动.并且由于空间的对称性(平移对称性和旋转对称性),各个地方、各个方向上分子的运动情况完全一样.但对于某个特定分子而言,它究竟如何运动,则是完全随机的.

英国人布朗(Brown)曾发现在水面上漂浮的花粉颗粒,在不停地作着不规则的运动.这种无

规运动的剧烈程度与温度有关.温度越高,运动越剧烈.如图 10-1 所示,这种运动叫作布朗运动,它可以用分子的无规运动来解释.

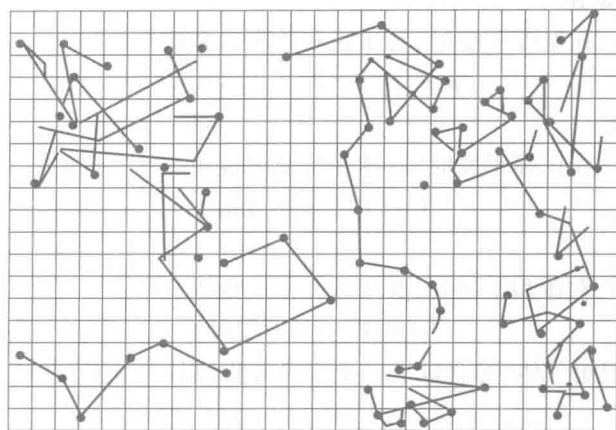


图 10-1 花粉粒子的布朗运动

既然容器中分子的位置和运动是随意的,它们就可能互相碰撞.任意两个分子碰撞后,其速度的大小和方向都会发生变化.当花粉颗粒足够小时,在任一瞬间,水分子从四面八方对花粉颗粒的冲击作用可能不平衡,这时花粉颗粒沿着冲击作用较强的那个方向运动.在下一个时刻,分子对花粉颗粒的冲击作用在另一个方向较强,则花粉颗粒的运动方向也就改变了.温度越高,颗粒越小,这种冲击作用就越不平衡,花粉颗粒的运动就越剧烈.布朗运动的无规则性,完全反映了分子运动的无规则性.

3. 分子之间有力的作用存在

既然物体的分子在不停地作无规则热运动,那么为什么固体和液体分子不会散开呢?这是因为分子之间有吸引力作用的缘故.我们知道分子内部有电子、原子核存在.当分子相隔较远时,电子和原子核之间互相作用,呈现的是吸引力,这个吸引力把分子束缚在各自的平衡位置附近.另一方面,分子又有无规则运动,此运动使分子趋向于互相分离.在温度较低时,热运动不够剧烈,分子在相互作用力的作用下束缚在各自的平衡位置附近振动,这就是固体.随着温度的上升,无规则运动加剧,分子可能脱离自己的平衡位置,但还不能分散远离,这时表现为液体状态.当温度足够高时,无规则运动更加剧烈,不但分子平衡位置没有了,分子之间也不再保持一定的距离,互相分散远离,这时就表现为气体状态.可见,物质以什么状态存在完全取决于分子力和热运动的相互强弱关系.

10.2.2 概率 统计平均值

根据阿伏伽德罗定律,1 mol 的任何气体都包含着 6.022×10^{23} 个分子.我们的研究对象包含如此之多的分子数,就无法像牛顿力学一样列出每个分子的运动方程,再由每个分子的初始条件去求解其运动.事实上,测定每个分子的初始条件是不可能的,而追踪每个分子的运动轨迹也是不可想象的.由于分子无时无刻都在碰撞,运动状态不断发生变化,即使求出某一时刻气体的状态,由于气体分子的状态早已变化无穷,求出的解也早已过时.所以,使用传统方法求解各个分子

的运动毫无意义,既不可能,也无必要。

实践中,我们更关心气体整体的宏观特性,并不关注个别分子的运动状态.这样,如同第三章中处理问题的方法,可用质点系的方法来考虑,只研究系统的整体特性.由于我们的研究对象具有大量性的特征,需要使用一种新的方法——统计方法来处理问题。

1. 概率

概率的意思,就是在所有可能发生的事件中,某类事件发生的可能性.这种可能性可以用事件发生的频率、次数来表示,也可以用这些次数占总次数的百分比来表示。

例如研究把一枚硬币朝上抛出后,国徽向上的概率有多大.我们发现,只抛一次,可能国徽朝上,也可能数字朝上,到底哪一个朝上无法预言.但是如果在同样的条件下抛出很多次,则国徽朝上的次数占总次数的比例接近二分之一.抛出的次数越多,这一比例越接近二分之一.所以,在抛掷硬币中,国徽向上的概率为二分之一.也就是说,在一次抛掷中,国徽有一半的可能性向上。

2. 统计规律性

当所有可能发生的事件的数目很大时,某类事件发生的可能性(概率)将趋于某个确定的数值,各类事件的发生表现出某种规律性,即各类事件发生的概率趋于一个确定的分布.这就是统计规律性。

再如对我们学校及省内高校的学生身高进行测量,其结果如下:

样本数	30		120		500		20 000		5.0×10^5	
身高/cm	人数	百分比/%	人数	百分比/%	人数	百分比/%	人数	百分比/%	人数	百分比/%
<150	1	3.3	1	0.8	2	0.4	43	0.2	865	0.2
150~155	2	6.7	3	2.5	10	2.0	712	3.6	16 917	3.4
155~160	3	10	16	13.3	52	10.4	2 022	10.1	51 060	10.2
160~165	4	13.3	24	20.0	96	19.2	3 258	16.3	84 325	16.9
165~170	9	30	27	22.5	115	23.0	5 237	26.2	130 643	26.1
170~175	7	23.4	32	26.7	126	25.2	5 184	25.9	128 832	25.8
175~180	4	13.3	15	12.5	81	16.2	3 406	17.0	83 175	16.6
>180	0	0	2	1.7	5	1.0	138	0.7	4 183	0.8

可见,同学们的身高也有一定的规律性,这就是一般所说的统计规律性.它是从大量的事件中总结出来的.当事件数目较少时,统计规律性表现不出来。

3. 统计平均值与涨落

在大量事件中,某一物理量表现出来的平均值,称为统计平均值.比如说同学们的身高,每个人的身高都不一样,而全体同学的平均身高就是统计平均值(身高对全体人员的平均值).其实,即使是一个确定的人,他的身高也不是常数.据科学测定,人在睡觉时,身体的各个关节都会放松,刚起床时的身高比他临睡时的身高要高1~2厘米.而起床以后,在活动中身体中各个关节受到挤压,身高又会逐渐降低.这样,我们说某个人的身高,也只是一个统计平均值(身高对时间的平均)。

既然统计平均值是大量事件的平均结果,那么在单个事件中,某物理量的表现一般来说并不等于其统计平均值,而是与统计平均值有着一定的差距.这种在单个事件中,物理量的表现值与

统计平均值的差值称作涨落.一般,物理量的涨落有着一定的范围.例如,一个人在一天内身高的涨落不会超过 2 厘米,某个学生的身高相对于全体同学平均身高的涨落不会超过 1 米等.当有大量事件时,由于每个单独事件的涨落都不一样,我们要描述它们的涨落就需要使用统计的概念.即它们的实际值与平均值的偏差以多大的概率落在什么范围.这一点与测量值及其误差的概念很相似.

10.3 压强与温度的微观解释

10.3.1 理想气体的微观模型

从分子动理论的观点来看,理想气体与一定的微观物质结构模型相对应.气体很容易被压缩,而液体则很难被压缩.所以我们可以假设,在液体中分子之间是互相紧密地排列着的.在常温常压下,气体的密度大约是液体密度的千分之一.所以就数量级来说,气体中分子之间的平均间距大约是分子大小的 10 倍.即气体可以看作是平均间距很大的分子集合.

由于在气体中,分子分布是很稀疏的,分子与分子之间的作用力,除了在碰撞的瞬间外,其余时间可以看作为零.气体越稀薄,就越接近于理想气体,所以假设理想气体的微观模型是:

- (1) 与气体所占体积相比,分子本身的大小可以忽略,因而可把分子视为质点.
- (2) 所有气体分子都处于不规则的热运动之中,且遵从牛顿运动定律.
- (3) 除碰撞瞬间外,分子之间及分子与器壁之间无相互作用;重力的影响可以忽略不计.

(4) 碰撞是完全弹性的.即把每个分子看成完全弹性的小球,它们之间或与容器壁间的碰撞,遵守能量守恒和动量守恒定律,碰撞时间可以忽略.

(5) 空间是各向同性的,且具有平移对称性.即没有任何位置和方向比其他位置和方向特殊.分子朝各个方向和在各个位置的运动情况都是一样的.它包含以下几点:

- ① 容器中任一位置处,单位体积内分子数的平均值是一样的;
- ② 沿空间各个方向运动的分子数目是相等的;
- ③ 分子速度在各个方向上的分量的平均值是相等的.

依据上述前 4 条假设,气体可看成自由的、无规则运动着的弹性分子的集合——理想气体的分子模型.而第 5 条假设是对分子运动所作的统计假设.

10.3.2 理想气体压强公式的推导

根据上述理想气体的微观模型,下面计算理想气体的压强公式.基本思想是:容器中气体在客观上施于器壁上的压强,是大量气体分子对器壁不断碰撞的结果.就某一个无规则运动的分子来说,它对器壁的碰撞是断续的,且它每次给器壁多大的冲量,作用在器壁的哪一个地方,都是偶然的.但是对大量的分子整体来说,任一瞬间都有许多分子与器壁相撞,这就在宏观上表现为持续的压力.这和雨点打到雨伞上相似.一个个雨点打到雨伞上,施加的压力是断续的,而大量密集的雨点打在雨伞上就使我们感到一个持续向下的压力.

如图 10-2 所示,设在任意形状的容器中储存有一定量的理想气体,体积为 V ,共有 N 个分

子,则单位体积内的分子数为 $n=N/V$, 每个分子的质量为 m , 分子可能具有各种可能的速度. 设想气体按速度分为许多组, 每组内分子具有大小相等、方向一致的速度 $\boldsymbol{v}_i$, 在单位体积内各组的分子数为

$$n_1, n_2, n_3, \dots, n_i, \dots$$

且有

$$n = \sum n_i$$

在平衡态情况下, 器壁上各处压强相等. 取直角坐标系 (x, y, z) , 在垂直于 x 轴的器壁上任取一小面元 dS , 来计算它受到的压力.

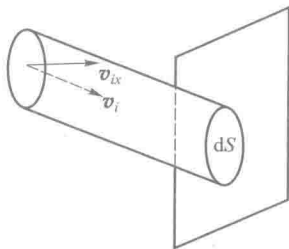


图 10-2 气体压强的推导

设某一分子速度为 $\boldsymbol{v}_i$, 与 dS 发生碰撞. 由于碰撞是完全弹性的, 碰撞前后分子速度沿 y, z 方向上的分量不变, 在 x 方向, 速度分量由碰撞前的 v_{ix} 变为 $-v_{ix}$, 即大小不变, 方向相反. 这样, 在碰撞中, 分子的动量改变即所受冲量为

$$-mv_{ix} - (mv_{ix}) = -2mv_{ix} \quad (10-7)$$

而器壁所受冲量为 $2mv_{ix}$.

在 dt 时间内, 能够与 dS 相碰撞的速度为 $\boldsymbol{v}_i$ 的分子, 只有以 dS 为底、 $v_{ix}dt$ 长度、 $\boldsymbol{v}_i$ 的方向为轴线的斜形柱体内的那一部分. 所以在时间 dt 内, 能与器壁碰撞的速度为 $\boldsymbol{v}_i$ 的分子数共有 $n_i v_{ix} dt dS$ 个, 它们在 dt 时间内施予器壁的冲量为 $2mn_i v_{ix}^2 dt dS$.

将上述结果对所有速度的分子求和, 就得到所有分子在时间 dt 内施予面元 dS 的总冲量 dI . 由于 $v_{ix} < 0$ 时, 分子不会与 dS 相碰, 故求和需保持 $v_{ix} > 0$.

$$dI = \sum_{i(v_{ix} > 0)} 2n_i m v_{ix}^2 dt dS \quad (10-8a)$$

容器中的气体整体来说并不运动, 所以 $v_{ix} > 0$ 的分子数与 $v_{ix} < 0$ 的分子数相等. 如在求和中不受 $v_{ix} > 0$ 的限制, 则应在上式中除以 2.

$$dI = \sum_i mn_i v_{ix}^2 dt dS \quad (10-8b)$$

所以面元 dS 所受的宏观压力为 dI/dt , 而压强为

$$p = \frac{dI}{dt dS} = \sum_i mn_i v_{ix}^2 = m \sum_i n_i v_{ix}^2 \quad (10-9)$$

以 $\overline{v_{ix}^2}$ 表示所有分子的 v_{ix}^2 的平均值, 则

$$\overline{v_{ix}^2} = \frac{n_1 v_{1x}^2 + n_2 v_{2x}^2 + n_3 v_{3x}^2 + \dots}{n_1 + n_2 + n_3 + \dots} = \frac{1}{n} \sum_i n_i v_{ix}^2 \quad (10-10)$$

所以

$$p = nm \overline{v_{ix}^2} \quad (10-11)$$

在平衡状态下, 气体的性质与方向无关, 分子向各个方向运动的概率相等. 所以对大量分子来说, 三个速度分量平方的平均值必然相等. 即

$$\overline{v_x^2} = \overline{v_y^2} = \overline{v_z^2} \quad (10-12)$$

而 $v_i^2 = v_{ix}^2 + v_{iy}^2 + v_{iz}^2$, 或 $\overline{v^2} = \overline{v_x^2} + \overline{v_y^2} + \overline{v_z^2}$, 所以

$$\overline{v_x^2} = \overline{v_y^2} = \overline{v_z^2} = \overline{v^2}/3$$

得

$$p = \frac{1}{3} n m \overline{v^2}$$

或

$$p = \frac{2}{3} n \left(\frac{1}{2} m \overline{v^2} \right) = \frac{2}{3} n \overline{\varepsilon_1} \quad (10-13)$$

式中 $\overline{\varepsilon_1} = \frac{1}{2} m \overline{v^2}$ 表示气体分子的平均平动动能. 上式说明, 理想气体的压强 p 决定于单位体积内的分子数 n 和分子的平均平动动能 $\overline{\varepsilon_1}$. n 和 $\overline{\varepsilon_1}$ 越大, 压强 p 就越大.

在上面的推导中, 只考虑了气体分子与器壁的碰撞, 而未考虑分子之间的碰撞. 事实上, 当速度为 $\mathbf{v}_i$ 的分子在趋向于器壁的过程中, 由于分子之间的碰撞, 速度的大小和方向都会发生变化. 这是否会影响推导的结果呢? 显然, 在平衡态下, 当速度为 $\mathbf{v}_i$ 的分子因碰撞而速度发生变化时, 必相应地有其他速度的分子因碰撞而具有 $\mathbf{v}_i$ 这样的速度. 对大量分子的统计效果而言, 对结果并无影响.

10.3.3 压强是气体分子碰撞的统计效应

上述压强公式的推导过程, 大量使用了统计平均方法:

- (1) 速度为 $\mathbf{v}_i$ 的某个分子与器壁相碰, 给予器壁一个冲量 $2m\mathbf{v}_{ix}$. 我们未考虑: ① 器壁不光滑; ② 有能量交换 (不一定是完全弹性碰撞) 的影响. 因为从统计的意义上来说, 结果不受影响;
- (2) 单位体积中速度为 $\mathbf{v}_i$ 的一组分子与器壁相碰, 给予器壁冲量 $2mn_i v_{ix}^2 dt dS$;
- (3) 气体无整体运动, 则 $v_{ix} > 0$ 的分子数与 $v_{ix} < 0$ 的分子数相等;
- (4) 气体分子与器壁的碰撞是断续的, 但从微观上看, 只要 dt 与 dS 足够大, 压强 p 就具有统计意义;

$$(5) \text{ 统计平均值: } \overline{v_{ix}^2} = \frac{1}{n} \sum_i n_i v_{ix}^2;$$

$$(6) \text{ 分子向各个方向运动的概率相等: } \overline{v_x^2} = \overline{v_y^2} = \overline{v_z^2} = \frac{\overline{v^2}}{3}.$$

10.3.4 玻耳兹曼常量

把气体压强公式与实验得到的理想气体物态方程进行比较, 得到气体温度与分子平均平动能之间的关系. 由气体分子动理论, 有

$$p = \frac{2}{3} n \overline{\varepsilon_1} = \frac{2}{3} \frac{N}{V} \overline{\varepsilon_1}$$

而由理想气体物态方程: $pV = \frac{m'}{M} RT = \frac{N}{N_A} RT$, 得

$$p = \frac{N}{V} \frac{R}{N_A} T = nkT \quad (10-14)$$

式中 $k=R/N_A=1.38\times 10^{-23}\text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$, 称为玻耳兹曼常量. 比较得到

$$\overline{\varepsilon_i}=\frac{3}{2}kT \quad (10-15)$$

这说明气体分子的平均平动动能只与温度有关, 并与热力学温度成正比.

10.3.5 温度的统计解释

(10-15)式表明, 温度仅和气体分子的平均平动动能有关. 分子的平均平动动能越大, 温度越高. 这也可以看作是温度的统计意义. 它从微观方面阐明了温度的实质. 温度表明了物体内部分子无规则运动的剧烈程度. 温度越高, 则物体内部分子运动越剧烈.

由于温度 T 与 $\overline{\varepsilon_i}$ 相联系, 所以, 温度是大量分子热运动的集中表现, 也具有统计意义. 对于单个或少量分子来说, 温度是没有意义的.

例 10-1 计算 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时空气分子的平均平动能.

解
$$\overline{\varepsilon_i}=\frac{3}{2}kT=\frac{3}{2}\times 1.38\times 10^{-23}\times 273\text{ J}=5.65\times 10^{-21}\text{ J}$$

与气体种类无关.

例 10-2 计算 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时氢气和空气分子的方均根速率.

解 由于 $\frac{1}{2}m\overline{v^2}=\frac{3}{2}kT$, 所以

$$\sqrt{\overline{v^2}}=\sqrt{\frac{3kT}{m}}=\sqrt{\frac{3RT}{M}}$$

对氢气
$$\sqrt{\overline{v^2}}=\sqrt{\frac{3RT}{M_{\text{氢}}}}=\sqrt{\frac{3\times 8.31\times 273}{2.02\times 10^{-3}}}\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}=1\,835\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$$

对空气
$$\sqrt{\overline{v^2}}=\sqrt{\frac{3RT}{M_{\text{空气}}}}=\sqrt{\frac{3\times 8.31\times 273}{29\times 10^{-3}}}\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}=484\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$$

可见, 氢气的方均根速率远大于空气的方均根速率. 所以, 氢气很容易向外部空间扩散, 空气中氢气的含量很少. 表 10-1 为常见气体分子的方均根速率.

分子速度的分布实际上是近似连续的. 我们只能说速度分布在某一区间内的分子数为多少, 而不能说处于某一速度的分子数有多少. 所以, 前面的求和号严格来说应该是积分号.

表 10-1 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时气体分子的方均根速率

气体种类	均方根速率/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	摩尔质量/ $(10^{-3}\text{ kg}\cdot\text{mol}^{-1})$
O_2	4.61×10^2	32.0
N_2	4.93×10^2	28.0
H_2	1.84×10^3	2.02
CO_2	3.93×10^2	44.0
H_2O	6.15×10^2	18.0

与温度和压强有关的是相对于气体质心的平均平动动能, 而与气体作定向运动的平动动能无关. 我们提出理想气体微观模型时, 曾提出一个假设: 分子处于不断地无规则热运动之中, 而在

推导压强公式时,由此假设得到了 $\overline{v^2} = 3\overline{v_x^2}$.所以,我们必须采用气体质心在其中静止的参考系.对于其他参考系而言,气体分子质心在其中有一速度 u ,即气体分子的运动是在不规则的热运动上叠加了一个定向运动.这样我们就发现,第三个假设不成立,在不同的参考系里得到不同的 $\overline{v^2}$.然而,我们把装有气体的容器放在火车上时其温度并不升高.

例 10-3 在真空容器中有一束分子垂直地射到一块平板上.设在分子束中分子的定向速度为 v ,单位容积的分子数为 n ,分子的质量为 m ,求:

- (1) 分子与平板碰撞产生的压强;
- (2) 若该平板匀速与分子相向运动,求分子与平板碰撞产生的压强.

解 (1) 每个分子与平板碰撞一次动量增量为 $mv - (-mv) = 2mv$,平板所受冲量大小为 $\Delta I = 2mv$.

单位时间与板碰撞的分子数为

$$N = nSv$$

产生的压强为

$$p = \frac{F}{S} = \frac{N\Delta I}{S} = \frac{nSv2mv}{S} = 2nmv^2$$

- (2) 若板以速率 u 与分子相向运动,则分子相对平板以速度 $u+v$ 运动,则压强为

$$p = \frac{F}{S} = \frac{N\Delta I}{S} = \frac{nS(v+u)2m(u+v)}{S} = 2nm(u+v)^2$$

例 10-4 某种气体分子方均根速率 $\sqrt{\overline{v^2}} = 450 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,压强 $p = 7 \times 10^4 \text{ Pa}$,求其密度 ρ .

解 由 $p = nkT = \frac{1}{3}nm\overline{v^2}$ 得

$$\rho = nm = \frac{3p}{\overline{v^2}} = \frac{3 \times 7 \times 10^4}{450^2} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} = 1.04 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

提问:

- (1) 气体处于平衡态时,其分子的方均根速率有多大? 平均速度有多大? 平均动量有多大?
- (2) 在一定温度下,氧气与氢气可化合为水.如保持温度不变,氧气与氢气的平均平动动能相等吗? 水蒸气的平均平动动能呢?
- (3) 两瓶不同种类的气体,温度、压强均相同,但体积不同,问:
 - ① 单位体积内的分子数是否相等?
 - ② 单位体积内的分子质量是否相等?
 - ③ 单位体积内气体的总平动动能是否相等?

10.4 能量按自由度均分定理 理想气体的内能

前面的讨论是把分子当作质点看待的,忽略了分子的内部结构.但是,分子内部有原子,原子内有电子与原子核,原子核内还有更复杂的内部结构.讨论分子的运动,原则上应该考虑到分子