

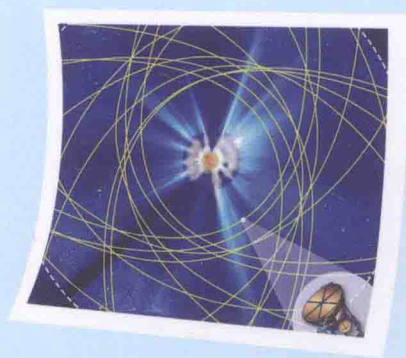


普通高等学校“十二五”规划教材

大学物理教程

下册

籍延坤 朱永政 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

大学物理教程

下 册

籍延坤 朱永政 编著

中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

内 容 简 介

本书是适应当前教学改革的需要,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10章,其中上册内容包括物理学预备知识、质点运动学、质点动力学、静电学、静磁学和电磁感应;下册内容包括热学基础、波动学基础、波动光学、狭义相对论力学基础以及量子物理基础。

本书的特点: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

大学物理教程.下册/籍延坤,朱永政编著. —北京:中国铁道出版社,2014.6
普通高等学校“十二五”规划教材
ISBN 978-7-113-18498-8

I. ①大… II. ①籍… ②朱… 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093910号

书 名:大学物理教程·下册
作 者:籍延坤 朱永政 编著

策 划:李小军 读者热线:400-668-0820
责任编辑:李小军 鲍 闻
封面设计:付 巍
封面制作:白 雪
责任校对:汤淑梅
责任印制:李 佳

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:三河市宏盛印务有限公司

版 次:2014年6月第1版 2014年6月第1次印刷

开 本:720mm×960mm 1/16 印张:15.75 字数:324千

印 数:1~3200册

书 号:ISBN 978-7-113-18498-8

定 价:29.00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) 51873659

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专业的重要基础课。它所阐述的物理基础知识、基本思想、基本规律和基本方法，不仅是学生学习后续专业课的基础，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内容的基本要求，编写了这套《大学物理教程》。

本书立足于高校工科学生的基础，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例题、选择题、填空题和计算题，通过这些基本问题的训练，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过程和个别小结均用星号“*”标明，仅供参考和理解，不要求掌握。

本教材下册由籍延坤、朱永政编著，参与本书下册撰著工作的还有唐元广、姜晓宜和修俊玲。

编著者
2013 年 11 月

目 录

第 6 章 热学基础	1
§ 6.1 气体运动论的基本概念	1
一、准理想气体/1	二、准理想气体平衡态/2
三、描述系统的宏观量/2	四、热运动/4
五、统计方法与统计规律/5	六、准理想气体状态方程和微观模型/6
七、平衡态气体统计假设/7	
§ 6.2 准理想气体压强和温度的统计规律	8
一、压强/8	二、温度/9
§ 6.3 分子热运动速率分布的统计规律	11
一、分子质心运动速率(即平动速率)的分布函数/11	
二、麦克斯韦速率分布律/12	三、三种速率/13
§ 6.4 能量均分定理与准理想气体内能的统计规律	16
一、能量均分定理/16	二、准理想气体内能/19
§ 6.5 平均碰撞频率与平均自由程的统计规律	20
一、平均碰撞频率/20	二、平均自由程/21
§ 6.6 热力学第一定律	23
一、热学过程的基本概念/23	二、热力学第一定律概述/26
§ 6.7 基本热学过程	26
一、等体过程/26	二、等压过程/27
三、等温过程/28	四、绝热过程/29
§ 6.8 热力学第二定律	32
一、循环相关的基本概念/32	二、热力学第二定律概述/39
§ 6.9 热学基本问题	42
一、基本问题/42	二、解题示例/44
习题 6	47
第 7 章 波动学基础	56
§ 7.1 简谐振动	56
一、引例/56	二、简谐振动的定义/60

三、描述简谐振动的特征量/61	四、简谐振动的力学特征/63
五、描述简谐振动的的方法/64	
§ 7.2 平面简谐波	67
一、引例/67	二、平面简谐振动的定义/69
三、平面简谐振动的特征/70	四、描述平面简谐振动的特征量/71
五、描述平面简谐振动的的方法/72	
§ 7.3 波的干涉	74
一、波的叠加原理/74	二、两列平面简谐振动的叠加/74
§ 7.4 波动学基本问题	80
一、基本问题/80	二、解题示例/82
习题 7	91
第 8 章 波动光学	101
§ 8.1 基本概念	101
一、光的波动性/101	二、普通光源及发光机理/102
三、折射率/103	四、光强/103
五、光程/103	六、光的叠加/105
§ 8.2 光的偏振	107
一、偏振光/107	二、几种偏振态/107
三、基本定律/111	
§ 8.3 起偏和检偏	113
一、起偏/113	二、检偏/114
§ 8.4 光的干涉	114
一、等倾薄膜干涉/114	二、薄膜等厚干涉/117
三、* 迈克耳孙干涉仪干涉/123	
§ 8.5 光的衍射	124
一、光波的衍射现象/124	二、单缝夫琅和费衍射/126
三、双缝菲涅尔衍射/131	四、多缝(光栅)衍射/135
§ 8.6 波动光学基本问题	140
一、基本问题/140	二、解题示例/143
习题 8	152
第 9 章 狭义相对论力学基础	160
§ 9.1 力学相对性原理和伽利略变换	160
一、力学相对性原理/160	
二、经典力学时空观(绝对时空观或牛顿力学时空观)/160	

三、伽利略变换/161	
§ 9.2 狭义相对论基本假设.....	162
一、两个实验中伽利略变换遇到的困难/162	
二、爱因斯坦假设/165	
§ 9.3 狭义相对论时空观.....	165
一、同时性/165	二、时间/166
三、长度/167	
§ 9.4 洛伦兹变换	168
§ 9.5 狭义相对论动力学基本物理量.....	172
一、质量/172	二、动量/172
三、力/173	四、能量/175
§ 9.6 狭义相对论力学基本问题.....	179
一、基本问题/179	二、解题示例/180
习题 9	183
第 10 章 量子物理基础	187
§ 10.1 黑体辐射简介.....	187
一、热辐射/187	二、黑体辐射/188
三、普朗克的能量子假设/189	
§ 10.2 光的量子性.....	191
一、光电效应/191	
二*、康普顿 (A. H. Compton) 效应/197	
§ 10.3 光子的波粒二象性.....	202
一、双缝干涉实验结果/202	二、光子的波粒二象性概述/202
三、概率波/204	
§ 10.4 物质波.....	205
一、德布罗意假设/205	二、概率波/208
§ 10.5 薛定谔方程.....	209
一、方程的建立/209	二、波函数所服从的条件/210
§ 10.6 不确定关系.....	214
一、坐标和动量的半定量的关系/214	
二*、能量和时间的半定量的关系/215	
§ 10.7 氢原子理论.....	216
一、氢原子的波尔 (N. Bohr) 理论/216	
二、氢原子的几个量子力学结论/220	

§ 10.8 电子自旋	221
一、施特恩-格拉赫 (O. Stern, W. Gerlach) 实验	221
二、电子自旋概述	223
§ 10.9 原子核外电子组态	224
一、四个量子数	224
二、定义	224
三、组态所服从基本原理	224
§ 10.10 量子物理学基本问题	225
一、基本问题	225
二、解题示例	226
习题 10	229
部分习题参考答案	236
附录 A	241
参考文献	244

第6章 热学基础

热学即热物理学,它的研究对象是由大量分子、原子组成的物体或物体系,在物理学中所研究的系统通常是一个气体系统,简称系统.它的研究内容是有关物质的热运动以及与温度相联系的各种规律和宏观性质.热学可以分成气体运动论和热力学.气体运动论是将气体宏观现象和性质与组成气体系统的微观粒子行为联系起来的初步理论,它是把单个分子作为统计的个体,把宏观量看成相应微观量(如分子的质量、速度和能量等)的统计平均值,通过求统计平均值来推导系统的宏观量及其之间的关系.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,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.热力学是通过实验方法总结出描述系统的宏观量(如系统的压强、体积、温度和质量等)之间的关系.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.

本章主要研究准理想气体系统处于准平衡态以及经历准平衡过程时所服从的理论.

§ 6.1 气体运动论的基本概念

一、准理想气体

(一)理想气体

假想某种气体分子大小趋近于零,这势必会导致分子质量、气体压强和分子力都趋近于零,分子有效活动空间趋近于盛装气体的容器的容积.

我们把这种分子大小趋近于零的气体称为**理想气体**.显然它是一个理想概念,实际问题中不存在理想气体.

(二)准理想气体

实际问题中,当分子之间的平均距离远远大于其分子直径时,即分子分布较疏,分子数密度较小时,相对于某一实验精度而言,气体分子大小可以忽略不计,这样的气体称为**准理想气体**或近似称其为**理想气体**.例如,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.

二、准理想气体平衡态

(一) 定义

在力学中,若在任意相等时间内,质点位移相等,则质点作匀速运动,即质点处于力学平衡状态,同理,在热学中,若在热力学系统内,在任意相等的体积内,分子质量密度和分子的无规则运动的平均动能均相同,则称系统处于热平衡状态。

(二) 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:一是系统与外界无能量和物质交换;二是系统的宏观性质不随时间变化。

说明:

(1) 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,由于分子做无规则运动,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,平衡态是一种热动平衡的状态。

(2) 平衡态也是个理想概念,因为描述准理想气体系统宏观性质的宏观物理量不可能绝对不变,系统与外界也不可能绝对无能量和物质交换,但是,当宏观物理量变化量的绝对值远远小于物理量自身大小以及系统与外界交换的能量和物质远远小于系统的内能和物质质量时,可以认为描述系统的宏观物理量是不变的,系统与外界无能量和物质交换,这时系统所处的状态称为准平衡态,也可以近似称为平衡态。

三、描述系统的宏观量

(一) 体积

体积是指气体分子有效的活动空间,对于准理想气体而言,它近似等于盛装气体容器的容积(实际气体的体积小于盛装气体容器的容积),即用字母 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

设准理想气体系统或其子系统处于平衡态,在其有效的活动空间内,任意一点置于一任意形状的面元 dS (因为体积较小,故不影响原来气体的体积),设气体对 dS 一侧压力大小为 dF ,则气体压强 p 为作用在单位面元侧面上的压力的大小,即

$$p = \frac{dF}{dS}$$

它是大量气体分子频繁碰撞 dS 侧面产生的平均冲力的宏观表现。在国际单位制中,压

强的单位是帕(斯卡),用符号 Pa 表示。

说明:

(1)理想气体内部压强与边界处压强相等,实际气体内部压强大于边界处压强。

(2)若包含面元 dS 的子系统处于非平衡态,因为 dS 取向不同 dF 也不同,所以压强 p 是不确定的。

(三)温度

1. 定性定义

温度是表征分子无规则运动剧烈程度大小的宏观物理量。

2. 定量定义

温度定量定义即温度数值表示法称为温标,即确定温度高低的标准。为了定量描述物体温度的高低,首先,来定量定义简单系统(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)的温度。

因为参量 p, V 可以完全确定一个简单系统所有可能的状态,所以简单系统温度定量定义为描述简单系统状态参量 p, V 的一个函数,即

$$\theta = f(p_1, V_1) = f(p_2, V_2) = f(p, V)$$

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,对于该式的函数形式不同,建立的温标也不同。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

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

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

根据热平衡的定义可知,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,所以可以选择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。

3. 两种温标

(1)准理想气体摄氏温标

仿照引入试验电荷定义电场强度,引入一个“试验准理想气体系统”,它与被测系统相互作用时,不影响被测系统的性质。它与被测系统接触时,规定“试验准理想气体系统”压强 $p = C$ (常量), $V = c' + d'\theta$, 设 $\theta = t$, V_0 为一个大气压 ($= 1.013 \times 10^5$ Pa) 冰点时“试验准理想气体系统”的体积, V_{100} 为水的沸点时“试验准理想气体系统”的体积,并把 V_0 和 V_{100} 之间分成 100 等分,则有

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

解得摄氏温标为

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

(2) 准理想气体绝对温标(简称绝对温标)

规定“试验准理想气体系统”的体积 $V=C$ (常量), 压强 p 与摄氏温标 t 满足关系

$$p = p_0 + b't = p_0(1 + \alpha_p t)$$

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

因为

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

令

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

则有

$$p = \alpha_p p_0 T$$

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 可以通过实验作出 $p-t$ 直线斜率测得, 进而可以测得 $1/\alpha_p$ 的值. 其结果为

$$\frac{1}{\alpha_p} = T_0 = 273.15(^{\circ}\text{C})$$

所以

$$T = \frac{1}{\alpha_p} + t = 273.15 + t \quad (6-1)$$

由 $p = \alpha_p p_0 T$ 可得准理想气体的绝对温标为

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

式中, T_{tr} 是水的三相点的准理想气体绝对温标. 之所以取水的三相点作为参考温度点, 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} 是测温准理想气体在该温度的压强, 准理想气体的稀薄不同, 该值也不同, 于是有

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

这就是定容准理想气体温度计的测温原理, 而且准理想气体绝对温标与准理想气体的种类无关.

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).

讨论: 系统处于平衡态时, 系统内任一体元是否处于力学平衡(压强处处相同)? 系统是否处于热平衡(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)?

四、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. 分子间有空隙

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

这种作用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 6-1 所示.

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

当 $r > 10^{-9} \text{ m}$, $f \approx 0$ 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 $r < r_0$ 时, $\left| \frac{df}{dr} \right| \gg 1$,合力 $f > 0$,此时斥力起主要作用,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.

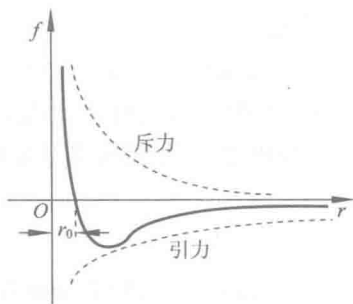


图 6-1

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段时间内满足一定规则运动,分子的运动是无规则的.

五、统计方法与统计规律

(一) 统计方法

统计方法是指对大量随机事件求平均的方法.

例如,一次掷六枚色子,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等概率的,它们都是随机事件,出现数字“1”朝上的枚数为 1~6 均有可能. 但是,若将 12 000 枚色子掷多次(大量的随机事件),数字“1”朝上的枚数的平均值为 2 000,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,故可以认为实际枚数与理论值相等.

(二) 统计规律

统计规律是指微观统计物理量(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.

六、准理想气体状态方程和微观模型

(一) 方程

1660年,波义耳(Robert Boyle)在实验时发现: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

$$pV=C(\text{常量})$$

将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,即将服从波义耳定律的气体定义为理想气体?

不妥,原因之一,顾名思义,理想气体是个理想概念,实际问题中是不存在的,而实验上能验证的波义耳定律成立的气体是真实存在的,即为准理想气体。

原因之二,根据波义耳定律可得

$$p=\frac{C}{V}$$

令 $y=p, x=\frac{1}{V}$, 实验上是相对一定实验精度,某些确定温度下,若 $y-x$ 函数图像是通过原点的直线,则该气体就是理想气体,否则,就不是理想气体,而某些确定温度又要靠理想气体温度计来确定,这就好像定义牛顿第二定律成立的参考系为惯性系,而反过来又说牛顿定律只适用于惯性系一样,属于循环论证。波义耳定律仅仅说明对于准理想气体而言其体积和压强所服从的关系,而准理想气体和测温的准理想气体温度计是事先已经定义好的概念。

按照准理想气温标的定义,当气体的体积不变时,压强与准理想气体绝对温标成正比,即

$$p \propto T$$

结合上两式可以推断,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 为气体摩尔数即气体的物质的量; V_0 为气体在标准状况下的摩尔体积。

按照阿伏伽得罗定律,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

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

将其称为摩尔气体常量. 综合上述分析可得

$$pV = \nu RT \quad (6-2)$$

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

$$pV = \frac{M}{M_{\text{mol}}} RT \quad (6-3)$$

引入玻尔兹曼常量

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

设分子质量为 m , 则

$$p = \frac{M}{VM_{\text{mol}}} RT = \frac{Nm}{VN_A m} RT = nkT$$

$$p = nkT \quad (6-4)$$

式中, n 是单位体积内的分子数, 称为气体分子的数密度.

(二) 准理想气体微观模型

(1) 分子线度 ($1 \text{ \AA}$, 1 埃) $\ll$ 分子间距 ($10 \text{ \AA} = 10^{-9} \text{ m}$), 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), 不计分子所受的重力.

(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, 气体分子的动能不因碰撞而损失, 即分子间的碰撞是完全弹性的.

(4) 因为分子速率 ($\sim 10^2 \text{ m/s}$) $\ll$ 光速, 所以服从经典力学规律.

七、平衡态气体统计假设

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

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

(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平均值和速度分量方均平均值均相等, 即

$$\overline{v_x} = \overline{v_y} = \overline{v_z} = 0, \quad \overline{v_x^2} = \overline{v_y^2} = \overline{v_z^2} \quad (6-5)$$

注意: $v_x \neq v_y \neq v_z, v_x^2 \neq v_y^2 \neq v_z^2$.

(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 准理想气体压强和温度的统计规律

一、压强

作如图 6-2 所示柱体, 面元 dS 为其一个底面, 柱体内有 dN 个分子, 选择坐标系使 $\vec{i} \perp dS$, 考虑到分子动量和速度可以写成 $\vec{p} = m \vec{v} = mv_x \vec{i} + mv_y \vec{j} + mv_z \vec{k}$, 所以, 一个分子的动量可以视为三个质量均为 m , 动量分别为 $p_x = mv_x$, $p_y = mv_y$, $p_z = mv_z$ 的三个等效分子, 柱体内等效分子总数为 $3dN$ 个, 所有这些等效分子速度可以分成 $v_x > 0$, $v_x < 0$, $v_y > 0$, $v_y < 0$, $v_z > 0$, $v_z < 0$ 六组, 每组分子数为

$$dN_{+x} = dN_{-x} = dN_{+y} = dN_{-y} = dN_{+z} = dN_{-z} = \frac{1}{6} \times 3dN = \frac{1}{2} dN$$

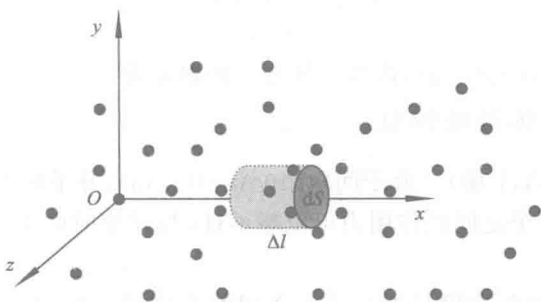


图 6-2

每一组分子按速度有可以分成 dN' 群分子, 只有 $v_x > 0$ 的一组对 dS 面碰撞, 即产生压强, 其值计算如下:

气体达到平衡态时, 实验所测得的瞬时压强时时相等, 它等于 $v_x > 0$ 的各群分子对 dS 产生瞬时分压强的叠加, 而 $v_{jx} = C_j$ (常标量) > 0 的第 j 群分子所产生的瞬时分压强等于该速度的分子连续作用于 dS 面一段时间 Δt_j 内的平均压强 $\bar{p}_j$, 考虑到 $\bar{p}_j$ 与作用时间 Δt_j 长短无关, 故用图 6-2 柱体内 $v_{jx} = C_j$ (常标量) > 0 的第 j 群分子全部与 dS 侧面发生碰撞所用的时间 $\Delta t_j = \frac{\Delta l}{v_{jx}}$ 来计算, 而且认为碰撞完 dS 的分子立即散开, 不再与 $v_{jx} = C_j$ (常标量) > 0 的分子发生碰撞. 设该群分子数密度为 dn_j , 它对 dS 侧面施加的平均力为 $d\bar{F}_{jx}$, 则根据动量定理可得

$$d\bar{F}_{jx} \cdot \Delta t_j = dp_{jx} = dn_j \Delta l \cdot \Delta t_j \cdot dS \cdot 2mv_{jx}^2$$

即

$$d\bar{F}_{jx} = dn_j dS \cdot 2mv_{jx}^2$$

压强为

$$p_j = \bar{p}_j = \frac{d\bar{F}_{jx}}{dS} = dn_j \cdot 2mv_{jx}^2$$

dN' 群分子施加的总压强为

$$\begin{aligned} p &= \sum_{j=1}^{dN'} p_j = \sum_{j=1}^{dN'} dn_j \cdot 2mv_{jx}^2 = 2m \sum_{j=1}^{dN'} \frac{dN_j v_{jx}^2}{dV} \\ &= \frac{2m}{dV} \sum_{j=1}^{dN'} dN_j v_{jx}^2 = \frac{2m}{dV} dN_{+x} \overline{v_x^2} \end{aligned}$$

因为

$$\overline{v_x^2} = \frac{1}{3} \overline{v^2}, \quad dN_{+x} = \frac{1}{2} dN$$

所以

$$p = \frac{1}{3} mn \overline{v^2} = \frac{2}{3} n \overline{W_{kt}} \quad (6-6)$$

说明:

(1) 推导中采用了准理想气体的微观模型并利用了统计平均的方法, 故式(6-6) 仅适用于准理想气体的平衡态, 若准理想气体系统处于非平衡态, 但其内部某一区域内的气体处于平衡态, 式(6-6) 对该子系统仍然成立, 不过这里的 $n, \overline{v^2}, \overline{W_k}$ 分别表示子系统内的分子数密度、分子的方均速率和平均平动动能。

(2) 宏观量压强的微观实质是大量气体分子由于热运动而不断地、无规则地碰撞面元 dS 侧面, 单位时间内给予面元 dS 单位侧面上的平均冲力。只有在一定的温度下的大量分子, 压强才有稳定的数值, 对少量分子谈压强是没有意义的, 所以说压强具有统计意义。

(3) 压强是一个统计平均量, 是大量的分子对时间或对空间的统计平均, 即对于面元 dS 而言, 压强为大量的分子对时间的平均值, 亦即

$$\overline{p} = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} p dt$$

而对于面 S 而言, 压强也等于分子对空间(面积)的平均值, 亦即

$$\overline{p} = \frac{1}{S} \iint_S p dS$$

同时 n 和 $\overline{W_k}$ 也是统计平均值, 所以说压强公式是个统计规律, 由此也指出了宏观量是与分子的微观量的统计平均值相联系的。

二、温度

根据式(6-4)和式(6-6)可得

$$\begin{aligned} p &= nkT = \frac{2}{3} n \overline{W_{kt}} \\ \frac{1}{2} m \overline{v^2} &= \frac{3}{2} kT \end{aligned} \quad (6-7)$$

说明:

(1) $T \uparrow \Rightarrow \overline{v^2} \uparrow \Rightarrow$ 温度是表示分子运动剧烈程度的物理量, 故分子的无规则运动称