

物 理 学

(工 科 用)

物 理 教 研 組

1960.9

沈 阳 农 学 院

目 录

第一編 分子物理学

第一章 气体分子运动論.....	3
§ 1 分子运动論的实验基础.....	3
§ 2 状态参量 气体的实验定律 理想气体状态方程.....	4
§ 3 气体分子运动論的压强公式.....	8
§ 4 气体分子平均平动动能和温度的关系 (能量公式) 玻耳兹曼恒量.....	11
§ 5 气体分子运动的自由度.....	13
§ 6 能量按自由度均分原則 理想气体的內能.....	14
§ 7 气体分子运动速度 麦克斯韦速度分布定律 分子速度的实验測定.....	16
§ 8 分子平均碰撞次数及平均自由程.....	19
§ 9 气体的內迁移現象及其基本定律.....	21
§ 10 迁移系数与压强的关系 分子大小的計算.....	29
第二章 固 体.....	31
§ 1 晶体与非晶体.....	31
§ 2 固体的弹性.....	33
§ 3 固体的热容量 原子热容量.....	35
§ 4 固体的热传导.....	37
第三章 非常温和非常压.....	39
§ 1 获得眞空的現代方法 低压的測定.....	39
§ 2 低温的获得及其測定.....	44
§ 3 高压的获得及其測定 高压下的物質性質.....	50
§ 4 高温的获得 高温下的物質性質.....	56

第二編 电 学

§ 1 电学在現代科学上和技术上的重要性.....	59
§ 2 电学发展簡史.....	60
第一章 靜电学.....	63
§ 1 庫侖定律 电場强度 电感强度.....	63
§ 2 电通量 奥斯特洛格拉斯基-高斯定理.....	67

§ 3 静电力所做的功 电位能 电位	71
§ 4 电位与场强关系	73
§ 5 静电场中的电介质 电极化现象	75
§ 6 变电体 压电现象	77
§ 7 导体的电容	77
§ 8 平行板电容器的电容	80
§ 9 电场的能量 电场能量的体密度	81
第二章 电流与电动势	84
§ 1 基尔霍夫方程系及其应用	84
§ 2 金属导电的经典电子理论	87
§ 3 电子自金属表面逸出所需的功	91
§ 4 接触电位差	92
§ 5 温差电现象及其应用	97
第三章 电流与磁场	99
§ 1 磁场 磁场对电流的作用力 磁感应强度 磁场强度	99
§ 2 匀强磁场对平面载流线圈的作用	102
§ 3 毕奥—沙伐—拉普拉斯定律	103
§ 4 平行电流间的相互作用力 绝对电磁制单位	106
§ 5 运动电荷的磁场	108
§ 6 运动电荷在磁场中所受的力——洛伦兹力	110
§ 7 电子的电量和质量的比值的测定	113
§ 8 离子荷质比的测定 质谱仪	116
§ 9 霍尔效应	117
第四章 电磁感应	121
§ 1 法拉第电磁感应定律	121
§ 2 电磁感应现象和电子理论的关系	123
§ 3 在磁场中转动的线圈中的感应电动势和感应电流	124
§ 4 自感应	125
§ 5 互感应	127
§ 6 磁场的能量	129
§ 7 涡电流 趋肤效应	131
§ 8 磁的本质 顺磁质与抗磁质	132
§ 9 铁磁性物质	134

第一編 分子物理学

物質結構概念發展簡史

物質的分子原子結構理論是分子物理学的基础。为此，我們首先对物質分子原子結構概念的发展史作簡要的叙述。

远在两千多年以前，古代哲学家对于物質世界的結構曾提出各种看法。中国古代学者主张阴阳和五行的学說。古希腊哲学家刘希普斯 (Leucippus) 和德謨克里妥斯 (Democritus) 等曾提出物質原子結構的概念，認為物質的結構不是連續的，而是由許多微粒所組成的。这些微粒被命名为“原子”；按希腊文原意，原子就是不可分割的意思。

此后，经过許多年，由于在封建統治下一切科学长期停滯，物質結構的概念也长期沒有得到发展。

十八世紀以后，資本主义兴起，科学获得发展，在物理学和化学方面，发现許多事实 and 定律，例如物理学上的玻意耳-馬略特 (Boyle-Mariotte) 定律以及化学上的定比定律和倍比定律等，对于物質結構概念的建立提供了科学的基础。

经过罗蒙諾索夫 (Ломоносов)、拉瓦錫 (Lavoisier)、道耳頓 (Dalton)、阿伏伽德罗 (Avogadro) 等先后創議与补充，最后奠定了物質分子原子結構的基本理論。他們認為：(1) 物質是由許多极小的微粒所組成，这些微粒叫作分子，分子是独立存在的最小物質微粒；(2) 分子还可利用化学方法分成更簡單的微粒，叫作原子。

罗蒙諾索夫不但是物質分子結構理論始創者之一，同时他还提出原子和分子作永不停止的热运动的假說。他指出：物体不断产生和不断的破坏，这就非常有力地証明微粒是在运动着的。微粒的运动有三种，即漸进的、旋轉的和振蕩的……。物体的热能是由我們肉眼看不到的質点的运动产生的。罗蒙諾索夫还指出：气体的分子在不可察覺的短時間內和其它邻近的分子相碰撞，……碰撞后又复推开，这样就使分子散布四方，不断的相互排斥，呈現极頻繁相互撞击的状态。

物質的微粒，除不停的运动外，微粒之間还有相互作用的力。这种力称为分子力。对于气、液、固三种不同的聚集态，分子作用力的情况是不同的。

十九世紀的六十年代，麦克斯韦 (Maxwell)、克勞修斯 (Clausius)、玻耳茲曼 (Boltzmann) 等在前人成就的基础上，把物質分子結構理論又发展了一步，創立物質分子运动理論。根据这个理論，对于物質的某些現象或性質，例如压强、溫度、热容量等，不但可以从本質上作定性的說明，同时还可以作定量的处理。其結果，在很大的程度上，都得到实验的驗證。自从1897年电子被发现以后，科学家用实验观测，更証实了分子和

原子的真实性，加上爱因斯坦(Einstein)、斯莫路綽斯基(Smoluchowski)和比林(Perrin)等对布朗运动在理論上和实验上研究的結果，也直接証明了分子热运动的真实性，因此分子运动論就成为无可置疑的理論。但須指出，由于在分子物理中对物質的分子結構模型的假說只是实际的近似，所以分子运动論的理論也只是近似地反映了客观事实。关于分子的内部运动，理論与实验不完全符合，只有用量子理論来作修改和补充。

物質分子原子結構理論的发展，对于辯証唯物主义世界观提供了有力的科学根据，但是唯心論的馬赫派硬不承認分子和原子的客观存在，并提出原子是所謂“感觉的复合”、“經驗的符号”等荒謬論調。列宁对馬赫派作了坚决的斗争，并揭露了馬赫派的反动本質。

第一章 气体分子运动論

§ 1 分子运动論的實驗基础

随着物質結構概念的发展而建立起来的物質分子运动論，主要根据下面三个基本假說。

第一，自然界中的一切物質，都由許多不連續的，彼此間有一定距离的微粒——分子——所組成。物質結構的这种不連續性，可从許多實驗事实來說明。例如物体的体积可經压缩而变小；又如 $50[\text{厘米}]^3$ 的純水和 $50[\text{厘米}]^3$ 的酒精混合后，两者的总体积变为 $97[\text{厘米}]^3$ ；此外，貯在鋼筒中的油，經受了二万〔大气压〕的压强，也将透过鋼筒壁滲出。凡此种种都說明在物質的分子間，有着空隙存在。

第二，分子間有相互作用力存在。当我们去改变固体的形状或者液体的体积时，都要施加一定的外力，而在外力撤去后，它們又会在一定程度上恢复原状。这說明固体或液体分子間是有着相互作用力的。由于气体分子間距离較大，它們的相互作用力，在日常現象中，表現得并不显著。

第三，一切物質的分子都永远不停地运动着。很多事实显示出分子的运动。例如在图 1 所示的两个玻璃瓶中，分別裝以氢及二氧化碳，如果它們的溫度和压强完全相等，在两瓶連通若干時間以后，測得两瓶所含的氢和二氧化碳的成分几乎完全相等。这种相互混合，相互滲透的現象称为扩散，它并不是由于重力等外来原因，而是分子本身运动的結果。又如在一杯清水中滴入墨水，由于分子运动而使全部清水染上墨水的顏色。即使固体也有扩散，把两块性質不同的金屬板紧压在一起，經几年之后，在接触面上刮下一层，經過化驗，就会發現有两种金屬成分。

扩散的快慢，决定于分子运动速度的大小。实验証明，当其它外界条件不改变时，溫度愈高，扩散进行得愈快，这說明分子运动的速度愈大。因此，分子的运动又称为热运动。

分子热运动可从布朗运动实验得到有力的証明。1827年英国植物学家布朗 (Brown) 用著微鏡观察到浮悬在水中的植物顆粒 (例如花粉)，永远在作不規則的无定向的运动。这种运动叫做布朗运动。起初有人怀疑这种运动是由于外界的振动、气流、溫度等影响所引起，后来經過許多次的实验証明，在尽量避免外界一切可能的影响下，布朗运动还是可以看到。实际观察指出，浮悬在空气中的尘埃、烟霧和微小油滴等，也在不停地作相似的运动。布朗运动只有从分子运动的观点才能加以解释。原来浮悬在水中的顆粒，总是被那些处于热运动状

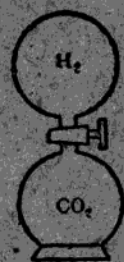


图 1 氢与二氧化碳的扩散

态中的水分子在四面八方包围住。由于水分子数目既多，又不停地作无定向运动，那么浮悬在水中的颗粒就要受到来自各方向的水分子的碰撞。每一个水分子碰撞颗粒时，将给予颗粒以一定的冲量。对体积较大的颗粒，因为在任一瞬间和它碰撞的分子数目较多，来自各方向的冲量，平均地说可以认为相互平衡，因而较大的颗粒不引起运动。对体积较小的颗粒，则在任一瞬间和它碰撞的分子数目较少，可能从某一方向碰撞颗粒的分子数多于其它方向上的分子，于是来自四面八方的冲量，不会相互平衡，因而较小粒子就会沿着所受冲量较大的方向运动。但是，在下一瞬间由于颗粒在另一方向受到较大冲量，颗粒又要沿着另一方向运动，因此颗粒的运动也是毫无规则的。颗粒愈小，碰撞愈难平衡，所以运动也愈为显著。图2表示在显微镜观察下每隔一定时间所记下来的几个颗粒的连续的位置。

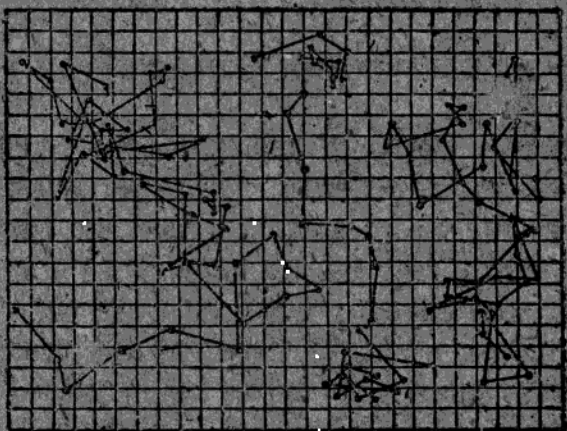


图2 布朗运动

在不同的温度下，观察浮悬颗粒在同一种液体或气体中的布朗运动时，发现温度愈高时颗粒的布朗运动愈激烈，这充分说明了分子的热运动与温度有关。

应该指出，布朗运动是位于大量液体或气体分子中的浮悬颗粒的运动，它只反映液体或气体分子的热运动所产生的结果，决不能认为颗粒的运动就是分子的热运动，因为分子的直接运动是不能用显微镜观察到的。

上面一些实验事例，充分地说明了一切物质都是由许多不连续分子组成，分子间有相互作用力，而且分子总是永远不停地作杂乱无章的热运动，这也就是物质分子运动论的基本出发点。

§2 状态参量 气体的实验定律 理想气体状态方程

由于气体的性质比液体和固体简单些，因此我们研究分子物理学，可以从气体入手。

在分子物理学和热力学里面，我们研究的是大量分子的集体的状态，这个集体的状态常用质量 M 、体积 V 、压强 p 和温度 t (或 T) 四个量来描述它。下面我们先简单地介绍这四个物理量的意义和单位，然后再说明在什么情况下，才可以用这四个量来描述气体的状态。

气体的质量 M 是指容器内所有气体分子的总质量。在厘米克秒制中，它的单位用 [克]。气体体积 V 的意义是气体分子所能达到的空间，实际上由于气体具有充满容器内空间的性质，气体的体积也就是容器的容积。但须注意，气体的体积与气体分子本身体

积的总和是完全不同的。在厘米克秒制中，它的单位用〔厘米〕³及〔升〕。气体的压强 p 是气体分子对容器器壁碰撞的宏观表现，气体分子与器壁碰撞时，对器壁施加垂直于器壁表面的正交压力，而压强就用器壁上每单位面积所受的正交压力来量度。压强的单位很多，物理学中常用的有下列三种：

(1) [巴]：1[巴]的压强就是在1〔厘米〕²的面积上垂直作用1〔达因〕的力。

(2) [厘米汞高]：1〔厘米汞高〕是1〔厘米〕高的汞柱在它的单位底面上的压力，等于 13.6×981 〔达因〕〔厘米〕⁻²，即 1.333×10^4 〔巴〕。

(3) [标准大气压]：简称[大气压]，1〔大气压〕等于76〔厘米汞高〕或 1.013×10^6 〔巴〕。

在工程上，常用[工程大气压]，1〔工程大气压〕等于1〔千克力〕〔厘米〕⁻² $\approx 10^5$ 〔巴〕。

温度的概念比较复杂，它的本质和物质的分子运动有密切关系，以后要作进一步的分析。温度的分度方法——温标，在物理学中常用的有两种：

(1) 摄氏温标 规定在一个大气压下纯水的冰点的温度为零度，沸点的温度为一百度。单位记为 $^{\circ}\text{C}$ 。

(2) 绝对温标 规定摄氏零下273.16度为零度。它的分度法与摄氏温标相同，即绝对温度相差一度时，摄氏温度也相差一度。单位记为 $^{\circ}\text{K}$ 。

绝对温度 T 和摄氏温度 t 的关系是

$$T = t + 273.16 \quad (1)$$

一定质量的气体在一定容器中具有一定的体积 V ，不管气体内各部分原有的温度和压强如何，经过相当时间后，其中各部分将具有同一的温度和压强。如果它与外界没有能量的交换，内部也无任何形式的能量转换，则温度和压强都将长期维持不变，我们就说这气体处于平衡状态之中，换言之，一定质量的气体的平衡状态，完全是由它的 p 、 V 、 T 三个量来表征的。这三个表征气体状态的量称为气体的状态参量。以后所讨论的气体的状态是指平衡状态而言。

当一定质量的气体与外界交换能量时，它的状态就要发生变化。气体从一个状态经过中间状态变化到另一个状态，叫做状态变化的过程。一定质量的气体，在某一个平衡状态时，具有一定数值的状态参量 p 、 V 、 T ，所以一定质量气体的每一个平衡状态可以用一组 (p, V, T) 的数值来确定，也就是在压强图或 $p-V$ 图上可用一点来确定。而气体的每一个过程，则在图上可用一条曲线来表示，如图3所示。

一定质量的气体在状态变化过程中，往往 p 、 V 、 T 三个量同时改变。凡是表示在任何一状态时这些量间的关系的式子，叫做气体状态方程。在研究气体的普遍状态方程

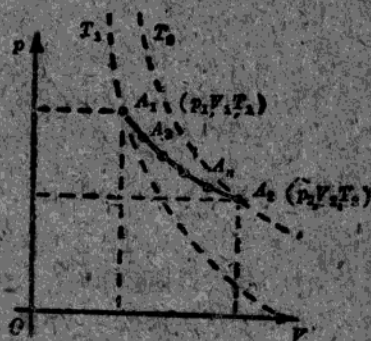


图3 平衡状态和过程的示意图

以前，我們先举出三条比較简单的实验定律。在这三条实验定律中，保持上述三个量中的一个量不变，而观察其它二个量的变化。现将三条定律，分述如下：

(1) **玻意耳—馬略特 (Boyle-Mariotte) 定律** 当一定質量的气体的溫度保持不变时，它的压强与体积的乘积等于恒量：

$$pV = \text{恒量} \quad (M \text{ 与 } T \text{ 不变}) \quad (2)$$

(2) **盖·吕薩克 (Gay-Lussac) 定律** 当一定質量的气体的压强保持不变时，它的体积随着溫度作直綫的变化：

$$V = V_0(1 + \alpha_v t), \quad (M \text{ 与 } p \text{ 不变}) \quad (3)$$

(3) **查理 (Charles) 定律** 当一定質量的气体的体积保持不变时，它的压强随着溫度作直綫的变化：

$$p = p_0(1 + \alpha_p t), \quad (M \text{ 与 } V \text{ 不变}) \quad (4)$$

系数 α_v 叫做体积膨胀系数， α_p 叫做压强溫度系数。对于一切气体，近似地有

$$\alpha_v = \alpha_p = \alpha = \frac{1}{273.16}。$$

因此，用了绝对溫度，(3) 及 (4) 可写成

$$\frac{V}{T} = \frac{V_0}{T_0} = \text{恒量} \quad (5)$$

和

$$\frac{p}{T} = \frac{p_0}{T_0} = \text{恒量}。 \quad (6)$$

在以上討論的气体状态变化的过程中，都是从一个平衡状态，经过无数的中間状态，变到另一个平衡状态。如果这些中間状态都是无限接近于平衡状态，那么这种状态变化的过程就称为平衡过程。溫度保持不变的平衡过程，称为等溫过程；压强保持不变的平衡过程，称为等压过程；容积保持不变的平衡过程，称为等容过程；三者总称为等值过程。

上述三条气体的实验定律，对一般的气体只能在压强不太大（和大气压比較）和溫度不太低（和室溫比較）的实验范围内，反映出气体遵守的客观規律，因此这些定律都有一定的局限性和近似性。凡是能够在任何情況下，都准确的遵守玻意耳—馬略特、盖·吕薩克或查理定律，并且它的 $\alpha_v = \alpha_p = \frac{1}{273.16}$ 的气体，叫做理想气体。实际上，理想气体是不存在的，不过在平常溫度下，当压强較低时，很多真实气体，如氢、氮、氧、氩等，都可以近似地看作理想气体。

表征理想气体状态的三个参量 p, V, T 之間关系的理想气体状态方程，可以从上述的气体实验定律推导出来。

設有一定質量 M 的理想气体，从一个状态 A （参量值为 p_1, V_1, T_1 ），經变化后，过渡到另一状态 B （参量值为 p_2, V_2, T_2 ）。因为現在只是求出理想气体在 A 和 B 两个状态时各参量間的关系，所以中間变化过程可以任意选定。如果按图4讓气体先从状态

$A(p_1, V_1, T_1)$ 通过等压过程 (p_1 保持不变), 过渡到一个中间状态 $M(p_1, V_1', T_2)$, 然后再通过等温过程 (T_2 保持不变), 从中间状态 $M(p_1, V_1', T_2)$ 过渡到状态 $B(p_2, V_2, T_2)$ 。

根据盖·吕萨克定律, 对等压过程 AM , 得

$$\frac{V_1}{V_1'} = \frac{T_1}{T_2}。$$

根据玻意耳-馬略特定律, 对等温过程 MB , 得

$$p_1 V_1' = p_2 V_2。$$

从上二式消去 V_1' , 即得

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}。$$

上式不仅适合于 A 和 B 两个状态, 还可以推广到其它任何状态, 即

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} = \dots = \frac{p_n V_n}{T_n},$$

或

$$\frac{pV}{T} = \text{恒量}。 \quad (7)$$

上式是理想气体状态方程的一种形式。

在标准状态下, 即 $p_0 = 1$ [大气压], $T_0 = 273.16^\circ\text{K}$, 1 [克分子] 任何气体的体积 (克分子体积) 是 $V_0 = 22.4$ [升], 因此公式 (7) 可以写成。

$$\frac{pV}{T} = \frac{p_0 V_0}{T_0}。$$

显然, 在适合于理想气体的条件下, $\frac{p_0 V_0}{T_0}$ 是一个普遍适合的恒量, 与气体的性质无关, 一般用 R 表示它, 称为普适气体恒量。

因此

$$\frac{pV}{T} = R,$$

或

$$pV = RT, \quad (8)$$

注意, 式 (8) 中的 V 是克分子体积, 所以这是一克分子理想气体的状态方程。

对于质量为 M 克, 分子量为 μ 的气体, 则因在一定压强和一定温度下, M 克的气体的体积为 1 [克分子] 气体体积的 $\frac{M}{\mu}$ 倍, 所以式 (8) 可改写为

$$pV = \frac{M}{\mu} RT, \quad (9)$$

上式就是最通用的理想气体状态方程, 又叫做門捷列夫-克拉珀龍 (Менделеев-Клапейрон) 方程。

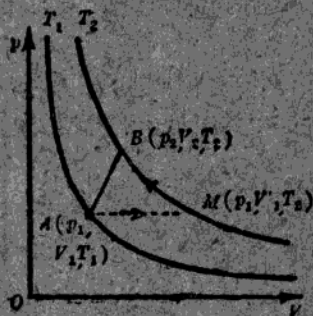


图 4 理想气体状态方程的推导

气体状态方程具有两种涵义：第一，它说明在任一状态时，气体的 M 、 p 、 V 、 T 四个量之间的关系；第二，它说明一定质量的气体，在状态变化过程中任何两个状态的参量之间的关系。

普适气体恒量 $R = \frac{p_0 V_0}{T_0}$ 的数值，随各状态参量所用单位的不同而异。现将常用的三种不同单位制中的 R 的数值，列出如下：

(1) p_0 用[大气压]， V_0 用[升][克分子] $^{-1}$ ，则

$$R = \frac{1 \times 22.4}{273.16} = 0.082 \text{ [升] [大气压] [克分子] }^{-1} \text{ [度] }^{-1}.$$

(2) p_0 用[巴]， V_0 用[厘米] 3 [克分子] $^{-1}$ ，则

$$R = \frac{1.013 \times 10^6 \times 22400}{273.16} = 8.31 \times 10^7 \text{ [尔格] [克分子] }^{-1} \text{ [度] }^{-1} \\ = 8.31 \text{ [焦耳] [克分子] }^{-1} \text{ [度] }^{-1}.$$

(3) 因为 1 [焦耳] = 0.239 [卡]，所以 R 还可以用热量单位来表示：

$$R = 8.31 \times 0.239 = 1.986 \text{ [卡] [克分子] }^{-1} \text{ [度] }^{-1} \\ \approx 2 \text{ [卡] [克分子] }^{-1} \text{ [度] }^{-1}.$$

【例题】一容器内装有氧气 100 [克]，压强为 10 [大气压]，温度为 47°C。因容器漏气，经若干时后，压强降到原来的 $\frac{5}{8}$ ，温度降到 27°C。问 (1) 容器的容积是多大？(2) 漏去了多少氧气？(假设氧气可视为理想气体)

【解】(1) 根据理想气体状态方程， $pV = \frac{M}{\mu} RT$ ，求得容器的容积 V 为：

$$V = \frac{MRT}{\mu p} = \frac{100 \times 0.082 \times (273 + 47)}{32 \times 10} = 8.2 \text{ 升}.$$

(2) 设容器漏气之后，压强减小到 p' ，温度降到 T' 。如果用 M' 表示容器中剩下的氧气的质量，则 M' 也可从状态方程求得：

$$M' = \frac{\mu p' V}{RT'} = \frac{32 \times \frac{5}{8} \times 10 \times 8.2}{0.082 \times (273 + 27)} = 66.7 \text{ (克)},$$

则漏去的氧气的质量：

$$\Delta M = M - M' = 100 - 66.7 = 33.3 \text{ (克)}.$$

§3 气体分子运动论的压强公式

气体分子运动论是在物质分子运动论的基础上建立起来的，它可以从本质上研究气体的宏观性质及其规律，但在研究具体问题时，除了物质分子运动论的三个基本假设之外，对气体分子的性质，还需要补充某些假定以简化问题。这里，我们要研究因气体分子与容器器壁的碰撞，而对器壁所施加的压力，我们提出了下面的假定：

(1) 同种类气体分子的性质相同，质量相等。

(2) 气体分子的大小，与气体分子间的平均距离比较，可以忽略不计。在碰撞时，

每个分子当作很小的完全弹性球。

(3) 气体分子間的平均距离相当大，因此除碰撞时外，分子間的相互作用力可以忽略不計，重力影响也可略去。

(4) 由于容器中气体的密度到处均匀等事实，在气体处于平衡状态时，对大量分子來說，我們可以假定分子沿各个方向运动的机会是均等的，沒有任何一个方向气体分子的运动比其它方向更为显著。这个統計性的假定具体地說，可以認為沿各个方向运动的分子数目相等，分子速度在各个方向的分量的各种平均值也相等。

这样的气体模型，即自由地无規則地运动着的弹性分子球的集合，看起来非常简单，但是，这个模型可以說明气体的基本性質。以后我們即将看到，必須用什么方法来发展这个模型，使它能更准确地說明真实气体的性質。

容器中气体对器壁所产生的宏观压强，是大量气体分子对器壁不断碰撞的結果。气体分子数目愈多，气体分子运动愈快，压强也就愈大。現在要根据上面的假定，从数量上来推导压强的基本公式。

假設有一种气体封閉在一个边长各为 x, y, z 的长方形容器內（任何形状的容器都可以，这不过为計算方便而已，因为压强是气体分子碰撞器壁时作用在单位面积上的垂直压力，与容器的形状无关的），器內共有 N 个同类分子在作不規則的运动，每一个分子的质量是 m （假定 1）。

由于在平衡状态下，气体內各处的压强都完全相同，也就是容器中各个器壁上所受的压强都一样，因此我們只要計算容器中任何一个器壁所受的压强就可以了。現在来計算与 x 軸垂直的器壁 A_1 面所受的压强（图 5）。

先研究一个运动分子对器壁的作用。如果有一个分子 a ，它的速度为 v ，那么它在 x, y, z 三个方向上的速度分量为 v_x, v_y, v_z ，而 $v^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2$ 。

当它与器壁发生碰撞时，则因碰撞是完全弹性的（假定 2），而且只有在碰撞时，分子与器壁間才有力的作用（假定 3），所以分子 a 与 A_1 面碰撞的情况，就和自由的弹性小球碰撞器壁一样，将受到器壁对分子在垂直于 A_1 面方向（即沿 $+x$ 方向）的作用力，而使它的 x 方向的分速度 v_x 发生改变。就 x 方向的分运动来看，分子 a 是以 v_x 碰撞 A_1 面，然后以速度 $-v_x$ 弹回。这样，它与 A_1 面撞一次，它的动量的改变等于 $(-mv_x) - mv_x = -2mv_x$ 。这个动量的改变，根据动量原理，等于碰撞时在 x 方向器壁 A_1 作用于分子的力的冲量，力的方向是从右向左，或为 $-x$ 的方向。由牛頓第三运动定律，这时分子 a 对 A_1 面必施予相等相反的反作用力，其方向从左向右，或为 $+x$ 的方向。分子 a 对器壁碰撞的力，是間歇的而不是連續的，它从 A_1 面弹回，飞向 A_2 面，碰撞 A_2 面后，再回到 A_1 面来作碰撞。在与 A_1 面作連續两次碰撞之間，由于分子 a 在 x 方向的分速度 v_x 的大小沒有改变，而在 x 方向所經過的

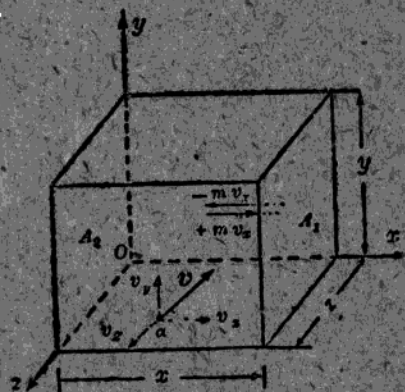


图 5 气体分子运动論压强公式的推导

距离是 $2x$ ，因此所需时间为 $\frac{2x}{v_x}$ ，而在单位时间内，分子 a 就要与 A_i 面作不连续的碰撞

共 $\frac{v_x}{2x}$ 次。

但是，实际上容器内大量分子对 A_i 面都在碰撞，使器壁受到一个连续的、均匀的压强。这样，在单位时间内， A_i 面受到的力可以看作是连续的、均匀的平均力，正如密集的雨点打到雨伞上时，我们感受到一个均匀的压力一样。这个平均力 F 的大小应该等于单位时间内全部分子与 A_i 面碰撞所引起的动量改变的总和：

$$F = \sum_{i=1}^{i=N} \left(2mv_{ix} \cdot \frac{v_{ix}}{2x} \right) = \sum_{i=1}^{i=N} \frac{mv_{ix}^2}{x} = \frac{m}{x} \sum_{i=1}^{i=N} v_{ix}^2,$$

式中 v_{ix} 是 N 个分子中各个分子的速度在 x 方向的分量。因此， A_i 面所受到的压强为：

$$\begin{aligned} p = \frac{\bar{F}}{yz} &= \frac{m}{xyz} \sum_{i=1}^{i=N} v_{ix}^2 = \frac{m}{xyz} (v_{1x}^2 + v_{2x}^2 + \cdots + v_{Nx}^2) \\ &= \frac{Nm}{xyz} \left(\frac{v_{1x}^2 + v_{2x}^2 + \cdots + v_{Nx}^2}{N} \right). \end{aligned}$$

上式中括弧内的物理量，表示容器内 N 个分子沿 x 方向速度分量的平方的平均值，用 $\overline{v_x^2}$ 表示之。又因气体的体积为 xyz ，单位体积内的分子数 $n = \frac{N}{xyz}$ ，则上式可写为

$$p = nm\overline{v_x^2}. \quad (10)$$

根据统计性的假定（假定4）

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

又因

$$v_i^2 = v_{ix}^2 + v_{iy}^2 + v_{iz}^2$$

故

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

上式中 $\overline{v^2} = \frac{v_1^2 + v_2^2 + \cdots + v_N^2}{N}$ ，表示 N 个分子的速度的平方的平均值， $\overline{v_x^2}$ 、 $\overline{v_y^2}$ 、 $\overline{v_z^2}$ 分别表示沿 x 、 y 、 z 三个方向上速度分量的平方的平均值。所以， $\overline{v_x^2} = \overline{v_y^2} = \overline{v_z^2} = \frac{1}{3}\overline{v^2}$ 。代入式(10)，

则得压强的公式：

$$p = \frac{1}{3} nm\overline{v^2}, \quad (11a)$$

或

$$p = \frac{2}{3} n \left(\frac{1}{2} m\overline{v^2} \right). \quad (11b)$$

所以气体施于器壁的压强，决定于单位体积内的分子数 n 和分子的平均平动动能 $(\frac{1}{2}m\overline{v^2})$ 。公式(11b)表示宏观量 p 和微观量的平均值 $(\frac{1}{2}m\overline{v^2})$ 之间的关系，它是含有统计意义的。由于分子的碰撞不是连续的，分子的动量的改变的数值起伏不定，因此压强 p 是一个统计平均值；同时，由于单位体积内的分子数也起伏不定， n 也是一个统计平

均值。因此公式 (11b) 是表征三个統計平均值 p 、 n 和 $(\frac{1}{2}mv^2)$ 的相互联系的一个統計規律，而不是純粹用力学所能推得的力学規律。

压强 p 可以直接从实验量度，但 $(\frac{1}{2}mv^2)$ 不能直接量度，故公式 (11b) 无法直接用实验来验证。但是从这个公式出发，以后就将看到，可以滿意地解释或推証許多已經验证过的实验規律，所以这公式在一定程度上能够正确地反映客观实际。

§ 4 气体分子平均平动动能和温度的关系 (能量公式) 玻耳兹曼恒量

根据上节气体的压强公式 (11b) 及門捷列夫—克拉珀龍方程，可以得出气体的温度和它的分子平均能量之間的重要关系。

按理想气体状态方程

$$pV = \frac{M}{\mu} RT.$$

設一个分子的质量是 m ，1〔克分子〕气体的分子数是 N_0 (N_0 是阿伏伽德罗数，其值等于 6.025×10^{23} 〔克分子〕 $^{-1}$)，则 M 和 μ 分别等于 $M = Nm$ ， $\mu = N_0 m$ 。代入上式，并消去 m ，得

$$p = \frac{N}{V} \cdot \frac{R}{N_0} T,$$

式中 $\frac{N}{V} = n$ 是单位体积中的分子数， R 与 N_0 都是恒量，两者的比值可用另一恒量 k 来表示， k 叫作玻耳兹曼恒量，其值为

$$k = \frac{R}{N_0} = \frac{8.31 \times 10^7}{6.025 \times 10^{23}} = 1.38 \times 10^{-16} \text{〔尔格〕〔度〕}^{-1}.$$

因此，理想气体状态方程可写成

$$p = nkT. \quad (12)$$

将上式和气体压强公式 (2-1-11b) 比較，得

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{3}{2}kT. \quad (13)$$

这公式也是气体分子运动論中的一个基本公式，它指出气体分子运动的平均平动动能，只与温度有关，并与绝对温度成正比。

由此可見，气体的绝对温度就是气体分子平均平动动能的量度。如果两种气体有相等的温度，意思就是两种气体的分子的平均平动动能相等；如果一种气体的温度高些，意思就是这一种气体分子的平均平动动能大些。但是我們要注意，虽然公式 (13) 中当 $T=0$ 时，将得到 $\frac{1}{2}mv^2=0$ ，或者說在温度等于绝对零度时，理想气体分子将停止平动。然而实际上分子运动永远不会停止，绝对零度也永远不可能达到。气体在温度沒有达到绝对零度时已变成液体固体了，公式 (13) 也就不能适用。

公式 (13) 表示宏观量 T 和微观量的平均值 ($\frac{1}{2}m\bar{v}^2$) 之间的关系。温度是大量气体分子运动的集体表现, 也是含有统计意义的; 对于个别分子, 说它有温度, 是没有意义的。

比林 (Perrin) 根据对布朗运动的研究, 从实验证实 浮悬在同一温度的液体中的不同微粒, 不论其质量的大小如何, 它们各自的平均平动动能都相等。气体分子的运动情况和浮悬在液体中的布朗微粒相似。所以比林的实验结果, 也可以作为在同一温度下, 各种不同气体分子的平均平动动能都相等的间接证明。

从压强公式 (11b) 和能量公式 (13) 出发, 可以推证许多已经实验验证过的理想气体定律, 所以这两个公式称为分子运动论的基本公式。现在应用这两个公式来推证一下道耳顿定律。

设有几种不发生化学作用的不同气体, 混合地放在一个容器内, 它们在相同温度 T 下, 单位体积内所含各种气体分子的数目分别为 $n_1, n_2, \dots$ 等, 混合气体在单位体积内的总分子数为 $n = n_1 + n_2 + \dots$ 。因为在相同温度下, 各种气体分子的平均平动动能都相等, 即

$$\frac{1}{2}m_1\bar{v}_1^2 = \frac{1}{2}m_2\bar{v}_2^2 = \dots = \frac{1}{2}m\bar{v}^2,$$

式中 $\frac{1}{2}m_1\bar{v}_1^2, \frac{1}{2}m_2\bar{v}_2^2, \dots$ 分别代表各种气体分子的平均平动动能, $\frac{1}{2}m\bar{v}^2$ 代表混合气体分子的平均平动动能, 故混合气体施于器壁的压强等于

$$\begin{aligned} p &= \frac{2}{3}n \left(\frac{1}{2}m\bar{v}^2 \right) = \frac{2}{3}(n_1 + n_2 + \dots) \left(\frac{1}{2}m\bar{v}^2 \right) \\ &= \frac{2}{3}n_1 \left(\frac{1}{2}m\bar{v}^2 \right) + \frac{2}{3}n_2 \left(\frac{1}{2}m\bar{v}^2 \right) + \dots \end{aligned}$$

或 $p = p_1 + p_2 + p_3 + \dots$,

式中 $p_1, p_2, \dots$ 分别代表各种气体的分压强, 即各种气体单独存在于容器内时的压强。这就是所谓道耳顿定律: 几种不发生化学作用的气体贮于同一容器内时, 分压强之和等于整个混合气体的压强。

〔例题〕一容器内贮有气体, 压强为 0.010 [毫米汞高], 温度为 27°C。问在 1 [厘米]³ 中有多少气体分子? 又这些分子的总平动动能是多少?

〔解〕根据公式 $p = nkT$, 得

$$n = \frac{p}{kT},$$

式中 n 为 1 [厘米]³ 中的气体分子数。

$$\text{已知 } p = 0.010 \text{ [毫米汞高]} = \frac{13.6 \times 980}{10} \times 0.010$$

$$= 13.3 \text{ [巴]},$$

$$k = 1.38 \times 10^{-16} \text{ [尔格] [度]}^{-1},$$

$$T = 273 + 27 = 300^\circ \text{K}.$$

代入上式，得

$$n = \frac{13.3}{1.38 \times 10^{-16} \times 300} = 3.21 \times 10^{14} [\text{厘米}]^{-3}.$$

因为每一个分子的平均平动动能是 $\frac{1}{2} m \overline{v^2} = \frac{3}{2} kT$ ，所以1[厘米]³中的分子的总平动动能是

$$E = n \left(\frac{1}{2} m \overline{v^2} \right) = n \times \frac{3}{2} kT = \frac{3}{2} p = \frac{3}{2} \times 13.3 = 20.0 [\text{尔格}].$$

§5 气体分子运动的自由度

前面我們在研究大量气体分子的无規則运动时，只考虑了每个分子的平动，并且算出了每个分子的平均平动动能。实际上，气体分子不能视为質点，它們有一定的大小和較复杂的結構，因此分子的运动不仅限于平动，还有轉动和同一分子內原子間的振动。为了計算气体分子各种运动的能量，就必须引入自由度这一概念。

决定一个物体在空間的位置所需要的独立坐标的数目，称为这个物体的自由度。

如果一个質点可以在空間自由运动，那么它的位置需要三个独立坐标来决定，例如 x, y, z ，因此質点就有三个自由度。如果一个質点限制于一平面上或一曲面上运动，它的位置只需要两个独立坐标来决定，例如 x, y ，因此質点只有两个自由度。如果一个質点只限制于一条直线上或一条曲线上运动，它的位置只需要一个独立坐标来决定，因此質点只有一个自由度。如将火車、輪船、飞机都视为質点，則火車有一个自由度，輪船有两个自由度，飞机有三个自由度。

由于刚体作一般运动时，平动和轉动兼而有之，因此，刚体的自由度是平动自由度和轉动自由度之和。一个刚体在空間的位置可决定如下：（1）决定刚体的質心的位置，需用三个独立坐标，如图2-1-6中的 $G(x, y, z)$ 。（2）决定经过刚体質心的軸綫 OA 的方位，可用三个方向余弦 $(\cos \alpha, \cos \beta, \cos \gamma)$ ，但其中只有两个是独立的，所以决定方位的自由度只有两个。（3）决定刚体繞軸綫 OA 的轉动，可用轉过的角度 φ 。所以总的說来，刚体有六个自由度，三个平动自由度，三个轉动自由度。但当刚体的轉动受到某种限制时，刚体可以只有一个轉动自由度，象門的轉动；或者只有两个轉动自由度，象自行車轉弯时前輪的轉动和摇头电風扇的轉动等。

气体分子的自由度，随气体的种类而异。按气体分子的結構，气体可分为单原子、双原子、三原子及多原子的气体。单原子气体，由于原子很小，可以看作是一个質点；

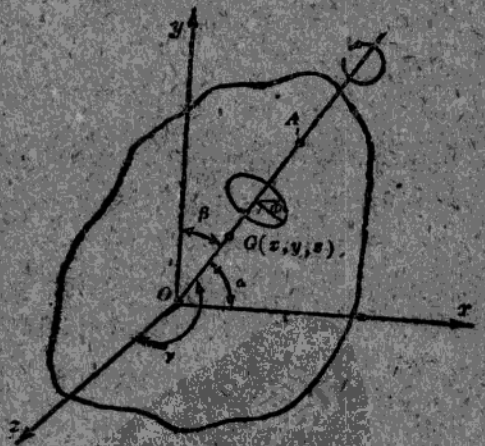


图6 刚体的自由度

又因气体分子不可能限制在一个固定轨道上或在一平面上运动, 因此单原子气体分子只有三个自由度。双原子气体分子中的两个原子, 是由一根键把它们连接起来的。这种分子

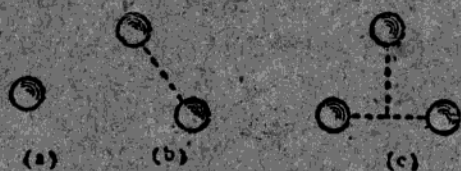


图7 气体分子模型

(a) 单原子 (b) 双原子 (c) 三原子

子可以看作由两个质点组成的一条直线, 由于质心的位置需要三个独立坐标来确定, 联线的方位需要两个独立坐标来决定, 而视为质点的那两个原子绕联线为轴的转动是不存在的, 因此双原子气体分子共有五个自由度。三原子或多原子的气体分子, 如果诸原子在键的连接下保持相互位置不变, 那么可以

看作一个刚体, 因此应有六个自由度, 三个属于平动, 三个属于转动。事实上, 双原子或双原子以上的气体分子不完全是刚性的, 原子间的距离在原子的相互作用下, 要发生变化, 分子内部要发生振动, 因此除平动自由度和转动自由度外, 还有振动自由度。

§6. 能量按自由度均分原则 理想气体的内能

我們已經証明过理想气体分子的平均平动动能是

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

式中 $\overline{v^2} = \overline{v_x^2} + \overline{v_y^2} + \overline{v_z^2}$, 而 $\overline{v_x^2}$, $\overline{v_y^2}$, $\overline{v_z^2}$ 分别表示沿 x, y, z 三方向速度分量的平方的平均值。按本章第一节, 大量气体分子作杂乱无章运动时各方向运动的机会均等的假定, $\overline{v_x^2} = \overline{v_y^2} = \overline{v_z^2} = \frac{1}{3} \overline{v^2}$, 由此可知

$$\frac{1}{2} m \overline{v_x^2} = \frac{1}{2} m \overline{v_y^2} = \frac{1}{2} m \overline{v_z^2} = \frac{1}{3} \left(\frac{1}{2} m \overline{v^2} \right) = \frac{1}{2} kT.$$

也就是說, 气体分子沿 x, y, z 三个方向运动的平均平动动能完全相等。換句話說, 分子的平均平动 $\frac{1}{2}$ 是均匀地分配于每一个平动的自由度上的, 因为分子平动有三个

自由度, 所以相应于每一个平动自由度的能量是 $\frac{1}{2} kT$ 。当我们考虑一般的气体分子时, 除平动外, 还有转动和振动, 则由于气体分子无规则运动的结果, 可以推论(也可以証明, 但这里不能深入讨论), 任何一种运动都不会比另一种运动特别占有优势, 它们的机会是均等的, 而且平均说来, 不论何种运动, 相应于每一个自由度的能量都应相等。能量按照这样分配的原则, 叫做能量按自由度均分原则。根据这个原则, 既然每个平动自由度的能量是 $\frac{1}{2} kT$, 所以气体分子任一个自由度的平均能量都等于 $\frac{1}{2} kT$ 。如果气体分子有 i 个自由度, 则每一个分子的总平均动能是 $\frac{i}{2} kT$ 。

理想气体的内能 实验証明, 由于气体分子間存在着一定的相互作用力, 所以气体