

§12 气体热现象的微观意义

一、气体分子运动的规律

1. 气体分子热运动可以看作是在惯性支配下的自由运动

(1) 由于气体分子间距离很大，而分子力的作用范围又很小，除分子与分子、分子与器壁相互碰撞的瞬间外，气体分子间相互作用的分子力是极其微小的。

(2) 由于气体分子质量一般很小，因此重力对其作用一般可以忽略。

2. 气体分子间的相互碰撞是非常频繁 (分子数多、速率大)

一秒内一个分子和其它分子大约要碰撞几十亿次 (10^9 次/秒)

3. 气体分子热运动服从统计规律

● 统计平均的方法

系统宏观状态物理量 M $\longrightarrow$ M 测值不同

测量值 M_A 的次数 N_A ; B: M_B 的次数 N_B ...

定义： 物理量 M 的统计平均值：

$$\bar{M} = \frac{N_A M_A + N_B M_B + \cdots}{N}$$

$$N = N_A + N_B + \cdots = \sum_i N_i$$

N_i 是 M 的测量值为 M_i 的次数，实验总次数为 N

$$\bar{M} = \lim_{N \rightarrow \infty} (N_A M_A + N_B M_B + \cdots) / N$$

测量值 M_A 的概率 $W_A = \lim_{N \rightarrow \infty} (N_A / N)$

归一化条件 $\sum_i W_i = 1$

例如：平衡态（无外场）气体分子速度分量的统计平均值

分子总数 N ，按速度分组： $\vec{v}_1: \Delta N_1; \vec{v}_2: \Delta N_2; \dots; \vec{v}_i: \Delta N_i; \dots$

速度分量表示： $\vec{v}_1 \rightarrow (v_{1x}, v_{1y}, v_{1z}); \vec{v}_2 \rightarrow (v_{2x}, v_{2y}, v_{2z}); \dots$

统计平均的概念：

$$\bar{v}_x = \frac{\Delta N_1 v_{1x} + \Delta N_2 v_{2x} + \dots + \Delta N_i v_{ix} + \dots}{\Delta N_1 + \Delta N_2 + \dots + \Delta N_i + \dots} = \frac{\sum_i \Delta N_i v_{ix}}{N}$$

$$\bar{v}_y = \frac{\Delta N_1 v_{1y} + \Delta N_2 v_{2y} + \dots + \Delta N_i v_{iy} + \dots}{\Delta N_1 + \Delta N_2 + \dots + \Delta N_i + \dots} = \frac{\sum_i \Delta N_i v_{iy}}{N}$$

$$\bar{v}_z = \frac{\Delta N_1 v_{1z} + \Delta N_2 v_{2z} + \dots + \Delta N_i v_{iz} + \dots}{\Delta N_1 + \Delta N_2 + \dots + \Delta N_i + \dots} = \frac{\sum_i \Delta N_i v_{iz}}{N}$$

平衡态下，气体分子沿各个方向运动的概率相等

$$\bar{v}_x = \bar{v}_y = \bar{v}_z = 0$$

例如：平衡态下气体分子速度分量平方的统计平均值

分子总数 N ，按速度分组： $\vec{v}_1: \Delta N_1; \vec{v}_2: \Delta N_2; \dots; \vec{v}_i: \Delta N_i; \dots$

速度分量表示： $\vec{v}_1 \rightarrow (v_{1x}, v_{1y}, v_{1z}); \vec{v}_2 \rightarrow (v_{2x}, v_{2y}, v_{2z}); \dots$

由统计平均的概念

$$\begin{aligned}\overline{v^2} &= \frac{\sum_i \Delta N_i v_i^2}{N} = \frac{\sum_i \Delta N_i v_{ix}^2}{N} + \frac{\sum_i \Delta N_i v_{iy}^2}{N} + \frac{\sum_i \Delta N_i v_{iz}^2}{N} \\ &= \overline{v_x^2} + \overline{v_y^2} + \overline{v_z^2}\end{aligned}$$

平衡态时，气体分子沿各个方向运动的概率相等

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

$$\overline{v_x^2} = \overline{v_y^2} = \overline{v_z^2} = \frac{1}{3} \overline{v^2}$$

$$\text{速率: } \bar{v} = \frac{\sum_i \Delta N_i v_i}{N}$$

$$\text{速率平方: } \overline{v^2} = \frac{\sum_i \Delta N_i v_i^2}{N}$$

$$\sqrt{\overline{v^2}} \\ \text{方均根速率}$$

二. 理想气体的微观模型

- (1) 不考虑分子的内部结构并忽略其大小；
- (2) 分子力的作用距离很短，可以认为气体分子之间除了碰撞的一瞬间外，其相互作用力可忽略不计；
- (3) 碰撞为完全弹性碰撞；

理想气体分子好像是一个个没有大小并且除碰撞瞬间外没有相互作用的弹性球。

三. 平衡态气体分子的统计性结论

- 1. 每个分子的运动速度各不相同，且通过碰撞不断发生变化

2. 分子按位置均匀分布 (重力不计)

在忽略重力情况下, 分子在各处出现的概率相同, 容器内各处的分子数密度相同

$$n = \frac{\Delta N}{\Delta V} = \frac{N}{V}$$

3. 分子速度按方向的分布均匀

由于碰撞, 分子向各方向运动的概率相同, 所以

$$\bar{v}_x = \bar{v}_y = \bar{v}_z = 0 \quad \overline{v_x^2} = \overline{v_y^2} = \overline{v_z^2} = \frac{1}{3} \overline{v^2}$$

四. 理想气体的压强公式

1. 从气体分子运动看气体压强的形成

气体的压强是由大量分子在和器壁碰撞中不断给器壁以力的作用所引起的。 **例: 雨点对伞的持续作用**

2. 理想气体的压强公式

平衡态的理想气体

分子质量 μ

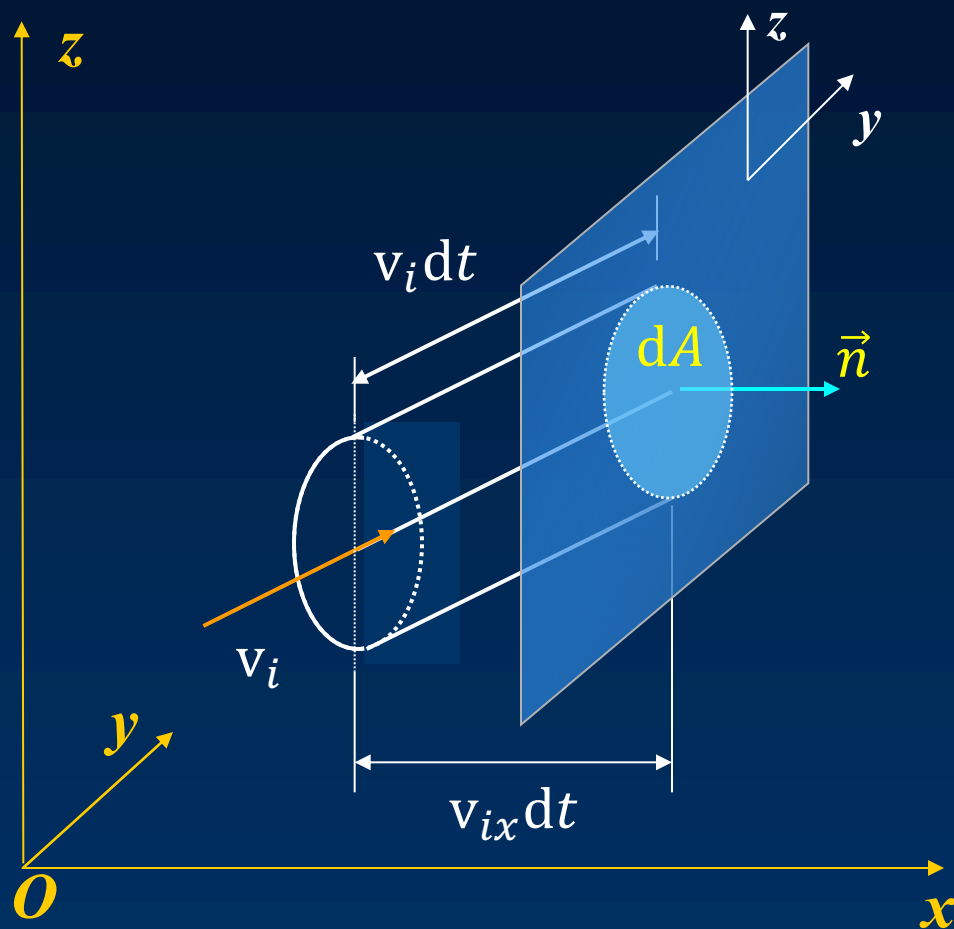
容器体积为 V

假设速度为 $\vec{v}_i$ 的

分子数 ΔN_i

碰撞前后的动量

$$\mu v_{ix} \quad -\mu v_{ix} \quad -2\mu v_{ix}$$



- 在 dt 时间内, 速度为 v_i 的分子与面元 dA 碰撞的分子数

$$\frac{\Delta N_i}{V} v_{ix} dt dA \quad (v_{ix} > 0)$$

弹性碰撞，分子动量 (**x** 方向) 改变: $-2 \frac{\Delta N_i}{V} \mu v_{ix}^2 dt dA$

- 在 **dt** 时间内，与面元 **dA** 碰撞的所有分子所受的冲量 **dI** 为

$$-2 \sum_{v_{ix} > 0} \frac{\Delta N_i}{V} \mu v_{ix}^2 dt dA = -\frac{1}{2} \sum_i 2 \frac{\Delta N_i}{V} \mu v_{ix}^2 dt dA = - \sum_i \frac{\Delta N_i}{V} \mu v_{ix}^2 dt dA$$

- 容器壁的压强为

$$p = - \frac{dI}{dA dt} = \sum_i \frac{\Delta N_i \mu v_{ix}^2}{V} = n \mu \overline{v_x^2} = n \mu \left(\frac{1}{3} \overline{v^2} \right) = \frac{2}{3} n \bar{\epsilon}$$

分子数密度 n

分子总数 N

$$p = \frac{2}{3} n \bar{\epsilon}$$

平均平动动能

★ 说明

(1) 压强 p 是一个统计平均量，它反映的是宏观量 p 和微观量 $\bar{\epsilon}$ 的关系；对大量分子，压强才有意义。

(2) 压强公式无法用实验直接验证

思考：膨胀过程中绝热的压强下降的比等温快的原因

3. 阿伏伽德罗定律

$$pV = \nu RT \quad \longrightarrow \quad p = \frac{1}{V} \nu RT = \frac{1}{V} \cdot \frac{N}{N_0} \cdot RT$$

$$\boxed{p = nkT} \quad = \frac{N}{V} \cdot \frac{R}{N_0} \cdot T = nkT$$

$$\frac{R}{N_0} = k = 1.38 \times 10^{-23} \text{J} \cdot \text{K}^{-1} \quad \text{玻尔兹曼常数}$$

相同的温度和压强下，任何气体的分子数密度必然相等

室内生起炉子后，温度从 15°C 上升到 27°C ，设升温过程中，室内的气压保持不变，问升温后室内分子数减少了百分之几

A 0

B 40

C 4

D 0.4

讨论：(1)理想气体状态方程； (2)为何分子数减少？

五. 理想气体温度与分子平均平动动能的关系

平衡态下，压强为

$$p = \frac{2}{3} n \bar{\varepsilon} = nkT \qquad \bar{\varepsilon} = \frac{3}{2} kT$$

分子平均平动动能只与温度有关，与气体的种类无关

★ 说明

- (1) 温度是大量分子热运动平均平动动能的度量，反映了宏观量 T 与微观量 ε 的统计平均值之间的关系。
- (2) 温度是统计的概念，是大量分子热运动的集体表现。对于单个或少数分子，温度就失去了意义

道尔顿分压定律

设几种气体贮于一密闭容器中，处于平衡态，分子数密度分别为 n_1 、 n_2 、 $n_3 \dots$ ，

混合气体的压强

$$p = \frac{2}{3} n \bar{\varepsilon} = \frac{2}{3} n_1 \bar{\varepsilon}_1 + \frac{2}{3} n_2 \bar{\varepsilon}_2 + \dots = p_1 + p_2 + \dots$$

混合气体的压强等于各种气体的分压强之和

混合气体的分子数密度 $n = n_1 + n_2 + \dots$

平衡态下，温度相同 $\bar{\varepsilon}_1 = \bar{\varepsilon}_2 = \dots = \bar{\varepsilon}$

例 一容积为 $V=1.0\text{m}^3$ 的容器内装有 $N_1=1.0\times 10^{24}$ 个氧分子 $N_2=3.0\times 10^{24}$ 个氮分子的混合气体，混合气体的压强 $p=2.58\times 10^4\text{Pa}$ 。

求 (1) 混合气体分子的平均平动动能；
(2) 混合气体的温度

解 (1) 压强公式 $p = \frac{2}{3}n\bar{\varepsilon}$

$$\bar{\varepsilon} = \frac{3p}{2n} = \frac{3}{2} \frac{p}{(N_1 + N_2)/V} = 9.68 \times 10^{-21} \text{J}$$

(2) 理想气体的状态方程 $p = nkT$

$$T = \frac{p}{nk} = \frac{p}{\left(\frac{N_1 + N_2}{V}\right)k} = 467\text{K}$$

一瓶氦气和一瓶氮气密度相同, 分子平均平动动能相同, 而且它们都处于平衡状态, 则它们

- A 温度相同、压强相同.
- B 温度、压强都不同
- C 温度相同, 但氦气的压强大于氮气的压强
- D 温度相同, 但氮气的压强小于氦气的压强

讨论: (1)理想气体的压强与气体分子的哪些微观量有关?

(2)速率与温度的关系? (3)平均平动动能与温度的关系?

在一密闭容器内，储有A、B、C三种处于平衡态的理想气体，A气体的分子数密度为 n_1 ，它产生的压强为 p_1 ，B气体的分子数密度为 $2n_1$ ，C气体的分子数密度为 $3n_1$ ，则混合气体的压强为

A $3p_1$

B $4p_1$

C $5p_1$

D $6p_1$

讨论：(1)道尔顿分压公式

5.用压强公式解释实验三定律

玻意耳定律 $T = \text{常量}$ $pV = C$

- ①当温度 (T) 保持不变时, 则分子的平均平动动能保持不变;
- ②一定质量 (m) 的理想气体, 其分子总数 (N) 是一个定值;
- ③当其体积 (V) 增大几倍时, 则单位体积内的分子数 (n) 变为原来的几分之一, 因此气体的压强也减为原来的几分之一;
- ④反之若体积减小为原来的几分之一, 则压强增大几倍;
- ⑤即压强与体积成反比。这就是玻意耳定律。

$$p = \frac{2}{3} n \bar{\epsilon}$$

查理定律

$V = \text{常量}$

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

- ① 一定质量 (m) 的气体的总分子数 (N) 是一定的;
- ② 体积 (V) 保持不变时, 其单位体积内的分子数 (n) 也保持不变;
- ③ 当温度 (T) 升高时, 其分子平均平动动能增大, 则气体压强 (p) 也增大;
- ④ 反之当温度 (T) 降低时, 气体压强 (p) 也减小。

盖·吕萨克定律

$$p = \text{常量}$$

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

- ①一定质量（m）的理想气体的总分子数（N）是一定的；
- ②要保持压强（p）不变，当温度（T）升高时，全体分子平均平动动能会增加，那么单位体积内的分子数（n）一定要减小（否则压强不可能不变），因此气体体积（V）一定增大；
- ③反之当温度降低时，同理可推出气体体积一定减小。

有两个相同的容器，容积不变. 一个盛有氦气，另一个盛有氢气（看成刚性分子），它们的压强和温度都相等，现将 5 J 的热量传给氢气，使氢气的温度升高，如果使氦气也升高同样的温度，则应向氦气传递的热量是

- ☐ A 6 J
- ☐ B 3 J
- ☐ C 2 J
- ☐ D 1 J

讨论：(1)传递热量的计算方法？