第 27 次课_理想气体_压强微观解释_平均自由程_气体分子速率分布_2007.12.12

上节课：

热 平衡态
状态量
温度

热力学第零定律 → 理想气体温标、绝对温标、热力学温标、开氏温标

绝对温度 → 没有最高温度（系统）
但有最低 绝对零度
$T = 0$

Temperature heat

温度 —— 热量

历史上长期混淆不清

物体 A 温度高 $\xrightarrow{\text{被认为}}$ 热质多

热质流动

物体 B 温度低 → 热质少

热质的多少来表征物体温度的高低 ×

热接触 → 温度趋于一致 → 物体 A 的热质流入到物体 B

热质说 ⟷ 热的运动说

A 温度高 → 热质多

接触 热质流动 → 趋于平衡

B 温度低 → 热质少

摩擦生热 → 热质为何增加 $(T\uparrow)$

大炮的故事

英国物理学家 B.汤普孙(1798)在向皇家学会提交的一个报告："论摩擦激起的热源"中提到他在监督大炮镗孔时，发现大炮本身和切削下来的金属片温度升高很多，必须用水加以冷却。用热质说无法解释：本来系统＝大炮＋刀具（同一温度），但温度不断上升 ⟶ 热质可以无穷无尽的产生？？

他认为： 热 ⟶ 除了运动之外，不可能是其它任何东西！

热 ⟷ 运动 ⟶ 物质的原子本性

Chapter 22 Molecular Properties of Gases

物质的原子属性 ⟶ 物质由原子组成

↑

古希腊以来没有直接的实验

↓

1828 年 布朗运动 ⟶ 原子论直接实验证据

↑

爱因斯坦"预言"这种效应 1905

理查德·费曼："如果所有的科学知识都要被摧毁，那么我希望关于原子存在的知识可以幸免遇难。" ？？为什么费曼这样说？！

理想气体 ⟶ 热力学系统 ⟶ $pV = nRT$ 物态方程

特性

1. 粒子组成，遵循牛顿定律但无规运动

   矛盾否？

2. 分子数目巨大

3. 气体分子本身所占体积<< 整个气体的体积

4. 除了受器壁或其它分子的碰撞，分子不受外力作用

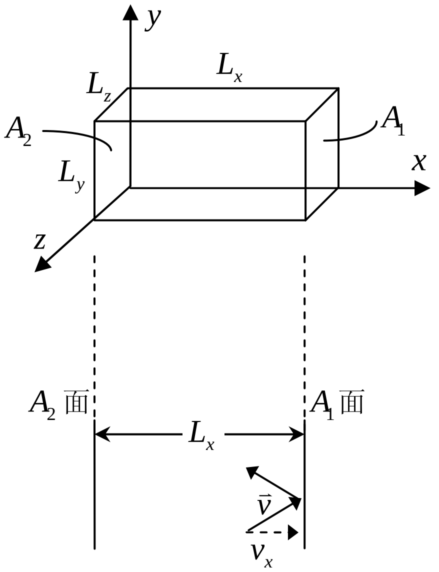
5. 碰撞：1) 弹性

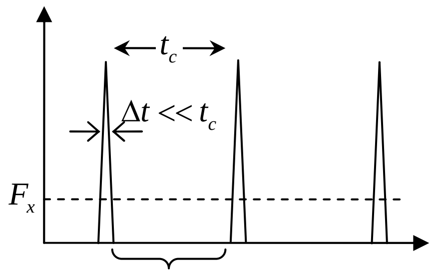
   2) 瞬时完成

压强的微观解释

↓

分子与器壁的碰撞





分子两次碰撞 A_1 面的时间间隔

$$t_c = \frac{S}{v_x} = \frac{2L_x}{v_x}$$

弹性碰撞：每次碰撞转移给器壁的动量 $2mv_x$

动量—冲量定理：$F_x t_c = 2mv_x$

一个分子对器壁施加平均力 $F_x = \frac{2mv_x}{t_c} = \frac{mv_x^2}{L_x}$

系统有 N 分子，总的力 $F_x = \sum_{i=1}^{N} \frac{mv_{ix}^2}{L_x}$

压强：$p = \frac{F_x}{A_1} = \frac{F_x}{L_y L_z} = \sum_{i=1}^{N} \frac{mv_{ix}^2}{L_x L_y L_z} = \frac{Nm}{V} \sum_{i=1}^{N} \frac{v_{ix}^2}{N}$

$$= \rho \left(v_x^2\right)_{av} = \frac{1}{3}\rho \underbrace{\left(v^2\right)_{av}}_{\text{分子速率平方的平均值}}$$

$\left(v^2\right)_{av}$ 的平方根：$\overset{\text{方均根}}{v_{rms}} = \sqrt{\left(v^2\right)_{av}} = \sqrt{\frac{3p}{\rho}}$

压强 p 与微观量平均值 $\left(v^2\right)_{av}$ 或 v_{rms} 联系起来

m/s	
1920	H_2
1370	He
517	N_2
483	O_2

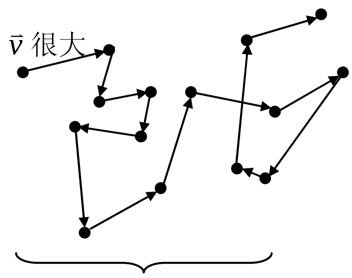
方均根速率＞声速，为什么气味的传播很慢

↓

气体分子传播运动

↓

平均自由程



由于碰撞气体分子 → 曲折轨迹

无规行走

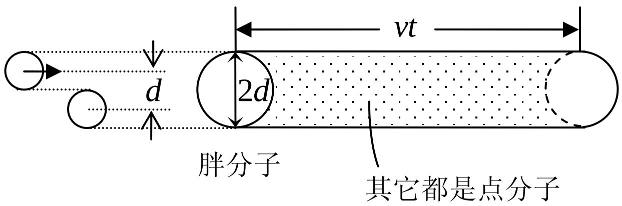
↓

下一次碰撞折向随机

所有相邻两次碰撞分子走过的距离的平均值

↓

平 均 自 由 程



t 时间内：胖分子扫过的体积 $V_{cyl} = \pi d^2 \cdot vt$

↓

该体积内的分子数 $N_{cyl} = V_{cyl} \cdot \rho = \frac{N}{V} \cdot \pi d^2 \cdot vt$

↓

碰撞的次数

平均自由程：$\lambda = \frac{L_{cyl}}{N_{cyl}} = \frac{V}{N\pi d^2} \xrightarrow[\text{状态方程}]{\text{理想气体}\ \frac{V}{N} = \frac{kT}{p}} \frac{kT}{\pi d^2 p}$

考虑相对速率：$\lambda = \frac{kT}{\sqrt{2}\pi d^2 p}$

例题 22-4　$300K$　$p = 1atm$　$\lambda \approx 0.1\mu m = 10^{-7} m$

碰撞频率：$\frac{v_{av}}{\lambda} \approx 5 \times 10^9 / s$　50亿次

λ，d　微观量　～　p，T　宏观量联系起来

$p, \rho \sim \left(v^2\right)_{av}$

$p, T \sim \lambda, d$

$$p = \frac{1}{3}\rho\left(v^2\right)_{av} = \frac{1}{3}\frac{N \cdot m}{V}\left(v^2\right)_{av} = \frac{2}{3}\frac{N}{V}\left(\frac{1}{2}mv^2\right)_{av} = \frac{2}{3}\frac{N}{V}K_{av}$$

$$pV = \underbrace{N\frac{2}{3}K_{av} = NkT}$$

$$K_{av} = \frac{3}{2}kT$$

分子平均动能 $= \frac{3}{2}kT$

微观量 $\sim T$

$T\uparrow \quad K_{av}\uparrow \quad \left(v^2\right)_{av}\uparrow$ 分子运动剧烈程度

温度统计平均意义：它是大量粒子的集体行为的统计平均结果

大量粒子

问题：对于单个粒子，它具有温度吗？

分子速率分布：

分子集体中分子的方均根速率 v_{rms}，但是不可能每个分子都以这个速率运动，分子相对这一速率是怎样分布的？这一问题由麦克斯韦解决了

$$N(v) = 4\pi N\left(\frac{m}{2\pi kT}\right)^{3/2} v^2 e^{-\frac{mv^2}{2kT}}$$

具体推导参见一些其它参考书.