

An aerial photograph of a nuclear power plant. Four large, white, conical cooling towers are visible, each emitting a thick plume of white steam that rises into the air. The plant itself is a complex of various structures, including pipes, walkways, and smaller buildings, situated in a green, grassy area. In the background, there are more trees and a body of water. The overall scene is a typical representation of a large-scale industrial facility.

大学物理

热学

THERMOTICS

第二篇 热 学

力学：研究物体机械运动。

研究方法：牛顿力学的确定论。

热学：研究物体热运动。

研究方法：

分子动理论：研究热现象的微观理论，从物质的微观结构出发，运用统计平均的方法揭示热现象的微观本质。

热力学：研究热现象的宏观理论，以观察和实验事实为依据，分析研究物态变化中有关热功转换的关系和条件。

6 气体动理论

6.1 分子热运动与统计规律性

一、气体分子运动理论的基本观点

*** 分子观点：**宏观物体是由大量不连续微粒—分子（或原子）组成的。标准状态1mol气体有 6.02×10^{23} 个分子。

*** 分子运动观点：**气体分子处于永不停息的无规则运动中，空气分子在常温下 $\bar{v} = 500\text{m/s}$.分子不停地碰撞，标准状态下约 5×10^9 次/s。

反映了气体分子热运动的特征：**小、多、快、乱。**

*** 统计观点：**大量分子运动的综合作用决定体系的宏观性质

反映了分子热运动和体系宏观性质的联系。

二、统计规律性：

某一小球落入其中那格是一个偶然事件。

大量小球在空间的分布服从统计规律。

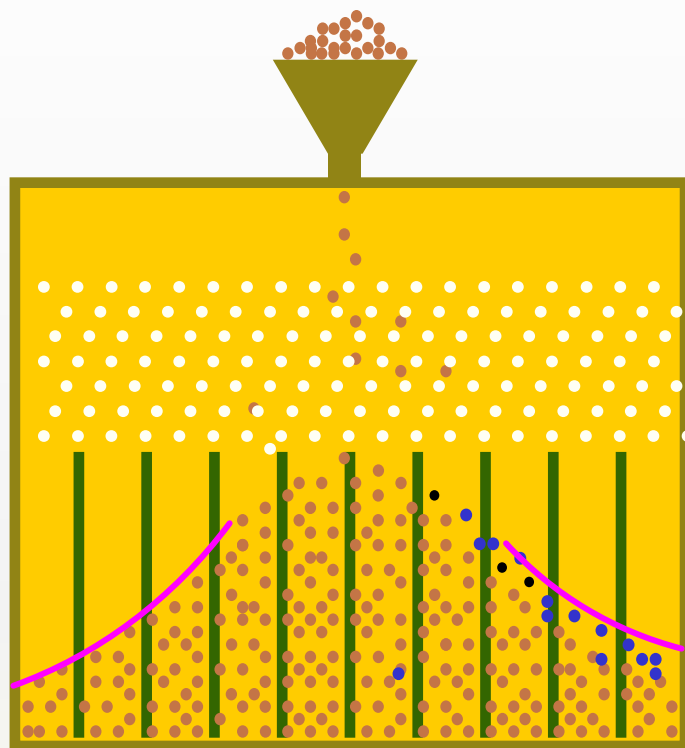
人们把这种支配大量粒子综合性质和集体行为的规律性称为统计规律性。

热运动服从统计规律。

研究对象数量的增加必然引起物理规律的变化。

这就是哲学上的从量变到质变。

伽尔顿板实验



6.2 平衡态 理想气体状态方程

6.2.1 热力学系统

一、热力学系统（简称系统）

由大量微观粒子所组成的宏观客体。

二、系统的外界（简称外界）

能够与所研究的热力学系统发生相互作用的其它物体。

开放系统：系统与外界既有能量传递，又有质量传递。

孤立系统：系统与外界既没能量传递，又没质量传递。

封闭系统：系统与外界只有能量传递，没有质量传递。

6.2.2 系统状态的描述

一、宏观量（状态参量）

压强（ P ）、体积（ V ）、温度（ T ）（可直接测量）

二、微观量

分子的位置、速度、...（不可直接测量）

宏观量 $\xleftrightarrow{\text{统计方法}}$ 微观量

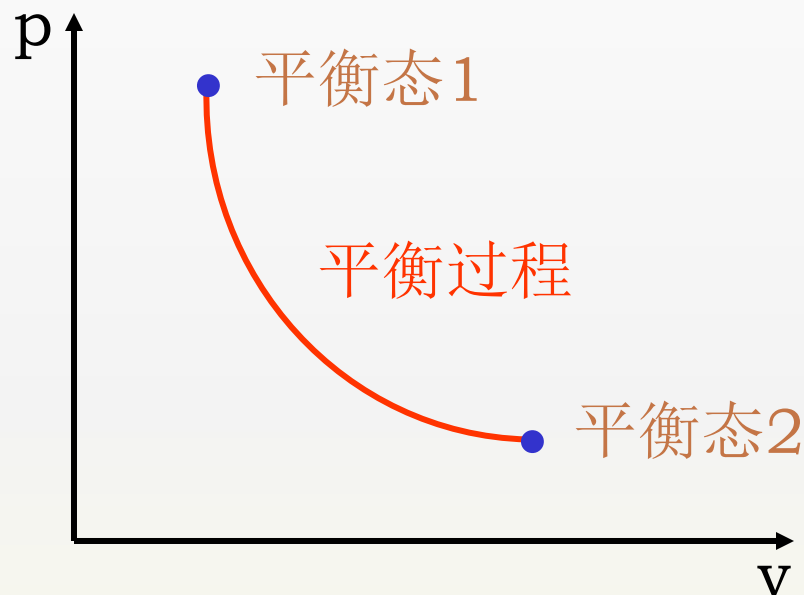
6.2.3 平衡态和平衡过程

一、平衡态：孤立的热学系统经过很长时间后宏观量（压强、温度、分子数密度）达到不随时间改变的稳定状态（热动平衡状态）。

平衡态在PV 图上用一点来表示。

二、平衡过程:系统从一个平衡态变化到另一平衡态,所经历的一系列中间状态都无限接近平衡态的过程。

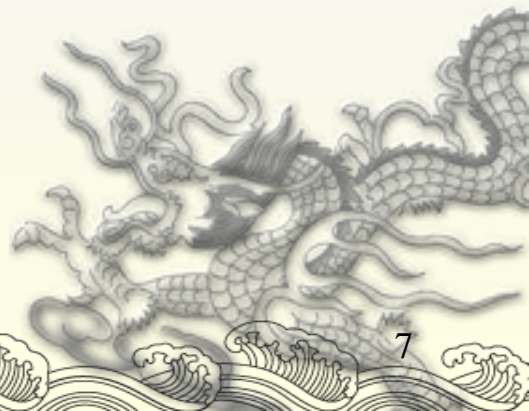
平衡过程在 pV 图上用一条曲线表示。



6.2.4 理想气体的状态方程

一、气体的状态方程:

反映平衡态下 P 、 V 、 T 间的关系。



二、理想气体：绝对遵循克拉伯珑方程的气体。

$$PV = \frac{m}{M} RT \text{ —— 理想气体的状态方程}$$

$$\text{摩尔气体常量: } R = \frac{P_0 V_0}{T_0} = 8.31 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$$

理想气体的状态方程的另一种表达式

$$P = \frac{m}{M} \frac{RT}{V} = \frac{N\mu}{N_0\mu} \frac{RT}{V} = \frac{N}{V} \left(\frac{R}{N_0} \right) T = nkT$$

$$\text{分子数密度: } n = \frac{N}{V}$$

$$\text{玻尔兹曼常量: } k = \frac{R}{N_0} = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J}/\text{K}$$

【例题6-1】 容积 $V=30\text{L}$ 的高压钢瓶内装有 $P=130\text{atm}$ 的氧气，做实验每天需用 $P_1=1\text{atm}$ 和 $V_1=400\text{L}$ 的氧气，规定氧气压强不能降到 $P_2=10\text{atm}$ 以下，以免开启阀门时混进空气。试计算这瓶氧气使用几天后就需要重新充气。

解： 设瓶内原装氧气的质量为 m ，重新充气时瓶内剩余氧气的质量为 m_2 ，每天用氧的质量为 m_1 ，则按理想气体的状态方程有：

$$\text{可用天数: } \frac{m - m_2}{m_1} = \frac{(P - P_2)V}{P_1 V_1} = 9(\text{天})$$

$$m = \frac{PVM}{RT}, \quad m_2 = \frac{P_2 VM}{RT}, \quad m_1 = \frac{P_1 V_1 M}{RT},$$

【例题6-2】

容积为 $11.2 \times 10^{-3} m^3$ 的真空系统在 $t_1 = 27^\circ C$ 时 $P_1 = 1.0 \times 10^{-5}$ 托，为提高真空度，将系统放在 $t_2 = 300^\circ C$ 的烘箱内烘烤，使吸附在器壁上的分子释放出来，若烘烤后压强增为 $P_2 = 1.0 \times 10^{-2}$ 托。问：升温后释放出多少个分子。

$$\left[\begin{array}{l} 1 \text{ 大气压 (atm)} = 760 \text{ mmHg} = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa} \\ 1 \text{ 托} = 1 \text{ mmHg} = 1.33 \times 10^2 \text{ Pa} \end{array} \right]$$

解： $\Delta N = (n_2 - n_1)V$

$$P_1 = n_1 k T_1 \Rightarrow n_1 = \frac{P_1}{k T_1}$$

$$P_2 = n_2 k T_2 \Rightarrow n_2 = \frac{P_2}{k T_2}$$

$$\Delta N = \left(\frac{P_2}{T_2} - \frac{P_1}{T_1} \right) \frac{V}{k} = 1.89 \times 10^{18} \text{ (个)}$$

【例题6—3】

试求 (1) 气体分子间的平均距离 \bar{l} 与压强 P 、温度 T 的关系。
(2) 求压强为 $1atm$ ，温度为 $0^{\circ}C$ 的情况下气体分子间的平均距离 \bar{l} 。

解：① $P = nkT$

$$\left. n = \frac{N}{V} \Rightarrow \frac{1}{n} = \frac{V}{N} = \bar{l}^3 \right\} \bar{l} = \left(\frac{kT}{P} \right)^{1/3}$$

$$(2) \quad \bar{l} = \left(\frac{kT}{P} \right)^{1/3} = \left(\frac{1.38 \times 10^{-23} \times 273}{1.013 \times 10^5} \right)^{1/3}$$
$$= 3.34 \times 10^{-9} m \quad (\text{约为分子直径的10倍})$$

6.3 压强和温度的微观解释

6.3.1 理想气体压强公式

一、基本假设

* 理想气体分子微观模型假设：

- 分子当作质点，不占体积；
- 除碰撞外不计分子之间，分子和器壁之间的相互作用；除需特别考虑外不计分子的重力；
- 弹性碰撞（能量守恒、动量守恒）；
- 分子运动服从牛顿力学。

理想气体分子像一个个极小的彼此间无相互作用的
遵守牛顿力学规律的弹性质点

* 统计假设:

- 若忽略重力影响，达到平衡态时分子按位置的分布是均匀的，即分子数密度到处一样。
- 平衡态时，分子速度沿各方向分量的各种平均值相等。

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

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

二、压强公式的推导

容器中有N个质量均为 μ 的分子

i分子与器壁A碰撞一次

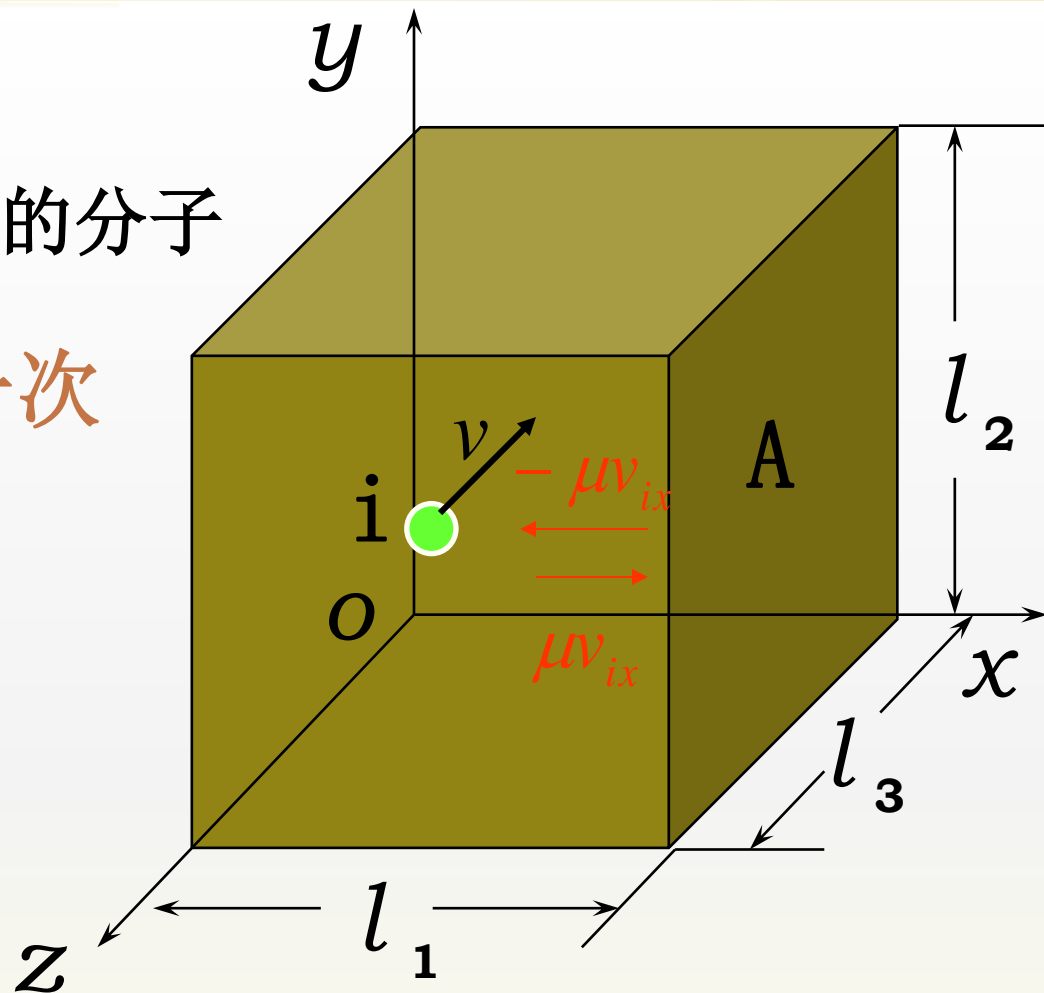
获得的动量增量:

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

给予器壁的冲量:

$$2\mu v_{ix}$$

1秒钟内i分子与器壁A的碰撞次数: $\frac{v_{ix}}{2l_1}$



$$\therefore \bar{F} = \frac{I}{\Delta t}$$

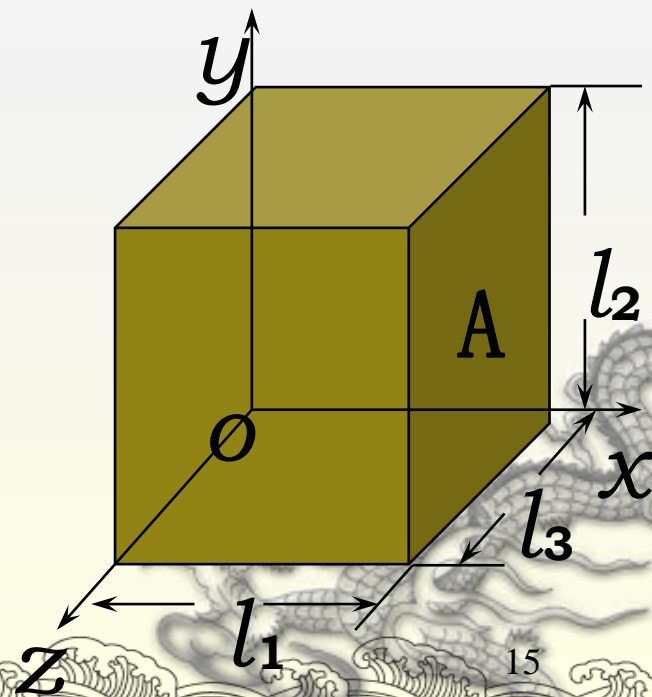
1秒钟给予器壁的冲量= i 分子给器壁的平均冲力

则i 分子给器壁的平均冲力: $\frac{v_{ix}}{2l_1} \cdot 2\mu v_{ix} = \frac{\mu v_{ix}^2}{l_1}$

N 个分子的平均冲力: $\bar{F} = \sum_{i=1}^N \frac{\mu v_{ix}^2}{l_1}$

N 个分子给予器壁的压强:

$$P = \frac{\bar{F}}{S} = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{\mu v_{ix}^2}{l_1}}{l_2 l_3} = \frac{N\mu}{l_1 l_2 l_3} \sum_{i=1}^N \frac{v_{ix}^2}{N} = n\mu \overline{v_x^2}$$



由统计假设: $\overline{v_x^2} = \overline{v_y^2} = \overline{v_z^2}$

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

$$\left. \begin{array}{l} \overline{v_x^2} = \overline{v_y^2} = \overline{v_z^2} \\ \overline{v_x^2} + \overline{v_y^2} + \overline{v_z^2} = \overline{v^2} \end{array} \right\} \overline{v_x^2} = \frac{\overline{v^2}}{3}$$

$$\therefore P = n\mu\overline{v_x^2} = n\mu\frac{\overline{v^2}}{3} = \frac{2}{3}n\left(\frac{1}{2}\mu\overline{v^2}\right)$$

其中: $\overline{\varepsilon_k} = \frac{1}{2}\mu\overline{v^2}$ —— 分子热运动平均平动动能

压强公式 $P = \frac{2}{3}n\overline{\varepsilon_k}$

三、讨论：

* 推导压强公式的依据：

- (1) 体系处于平衡态
- (2) 理想气体的微观模型
- (3) 两个统计假设

* 推导压强公式的思想方法：

对个别分子运用力学定律, 对大量分子整体运用统计规律。

* 压强公式的意义：

反映了宏观量 p 与分子热运动的微观量 $n, \bar{\varepsilon}_k$ 的统计平均值之间的联系说明了压强的微观本质

* 相互间不起反应的混合气体

$$P = P_1 + P_2 + \cdots + P_r \quad \text{--- 道尔顿定律}$$

四、温度的微观解释

理想气体的状态方程 $P = nkT$

压强公式 $P = \frac{2}{3} n \overline{\varepsilon_k}$

$$\left. \begin{array}{l} P = nkT \\ P = \frac{2}{3} n \overline{\varepsilon_k} \end{array} \right\} \overline{\varepsilon_k} = \frac{3}{2} kT$$

温度的统计意义:

温度标志物体内部分子热运动剧烈的程度, 是分子热运动平均平动动能大小的量度, 亦是大量分子热运动的统计平均结果.



古代: “冰炭不同器”

现代科学对温度的认知范围: $10^{38} K \sim 10^{-8} K$

当代科学实验室里所能产生的温度: $10^8 K \sim 2 \times 10^{-8} K_{18}$

温度大观



地球的平均温度为 15°C (288k), 10^9 种生物得以生存

假如大气中 CO_2 含量加倍:

则: 由于温室效应地球的平均温度将升高 3°C

海平面将上涨2~5米, 可使农业减产25%,
迫使10亿人背井离乡.

冰河期: 平均温度仅下降 10°C 左右, 就使大批物种灭绝.

可见, 我们安乐的家园——地球生物圈, 在温度变化面前是何等的脆弱



ᄒᆞᆫᆫᆫᆫᆫᆫ



失控的温室效应造成
高达**460°C**的干热金星

失控的冰川效应造成的
零下几十度的冰冷火星

高悬天际蔚蓝的地球





世界地球日



【例题6—4】由压强公式和温度公式导出道尔顿定律

证： 设有 N 种相互不反应的不同气体，

$$P = \frac{2}{3} n \left(\frac{1}{2} \mu \overline{v^2} \right)$$

数密度分别为 n_1 、 n_2 、 $n_3 \cdots$ ，

则混合气体的数密度 $n = n_1 + n_2 + n_3 \cdots$

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

混合气体的压强为： $P = \frac{2}{3} n \left(\frac{1}{2} \mu \overline{v^2} \right) = \frac{2}{3} (n_1 + n_2 + \cdots) \times \left(\frac{1}{2} \mu \overline{v^2} \right)$

其中： $\frac{1}{2} \mu \overline{v^2}$ —混合气体的平均平动动能

∵混合气体的温度相同，

$$\therefore \frac{1}{2} \mu_1 \overline{v_1^2} = \frac{1}{2} \mu_2 \overline{v_2^2} = \cdots = \frac{1}{2} \mu \overline{v^2} = \frac{3}{2} kT$$

$$\therefore P = \frac{2}{3} n_1 \cdot \frac{1}{2} \mu_1 \overline{v_1^2} + \frac{2}{3} n_2 \cdot \frac{1}{2} \mu_2 \overline{v_2^2} + \cdots = P_1 + P_2 + \cdots$$