



第二篇

热 学 (Thermotics)

第7章 温度和气体动理论

第8章 热力学第一定律

第9章 热力学第二定律

• **热学 (thermology)**：是研究**热现象**、**热运动**规律以及热运动同其他运动形式之间相互转化规律的一门学科。

➤ **研究对象**

热现象：一切与温度有关的物理性质的变化。

热运动：构成宏观物体的大量微观粒子的永不休止的无规则运动。 —— **热现象的本质**

热现象是物质中大量分子**热运动**的**宏观表现**。

➤ **研究方法**

热学与其他学科（如力学、电磁学等）比较，有一鲜明的特点：它的研究方法同时运用**宏观的方法**和**微观的方法**。

	宏观理论 (热力学)	微观理论 (统计物理学)
研究对象	热现象	热运动
物 理 量	宏观量	微观量
出 发 点	观察和实验	微观粒子
方 法	总结归纳 逻辑推理	统计平均方法 力学规律
优 点	普遍，可靠	揭露本质
缺 点	不深刻	无法自我验证
二者关系	热力学验证统计物理学， 统计物理学揭示热力学本质	

第7章第1讲 温度等概念 (Temperature)



【本 讲 内 容】

§ 7.1 平衡态

§ 7.2 温度的概念

§ 7.3 理想气体温标

§ 7.4 理想气体状态方程

【学习目的】

- 1、理解系统、外界、平衡态等基本概念。
- 2、理解温度、温标等概念。
- 3、掌握理想气体状态方程。

§ 7.1 平衡态

一、热力学系统与外界

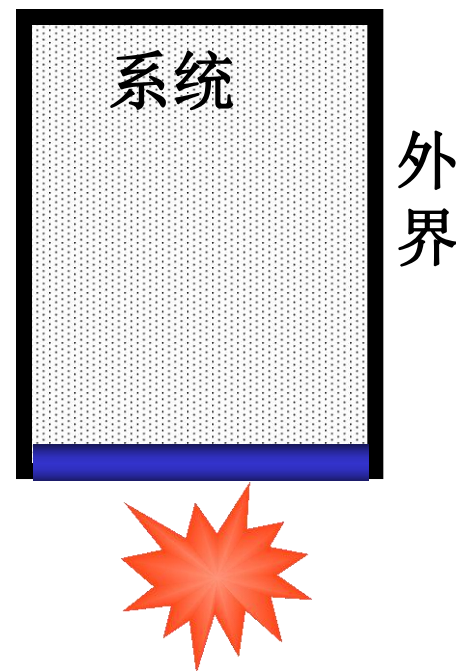
➤ 热力学系统（系统）——热力学研究对象。

➤ 外界：系统以外的物质。

● 系统与外界可以有相互作用

例如：热传递、质量交换等

➤ 系统的分类：



根据系统与外界之间的相互作用以及能量、质量交换的情况，可以把系统分为：

孤立系统—— 与外界既无能量交换又无质量交换的系统。

封闭系统—— 与外界有能量交换但没有质量交换的系统。

开放系统—— 与外界既可交换能量又可交换质量的系统。

绝热系统—— 与外界没有热量交换的系统。

二、宏观量与微观量

- **宏观描述：**从整体上描述一个系统的状态。

相应的物理量为**宏观量**（可由实验观测的、能表征系统**整体性质**的物理量）。

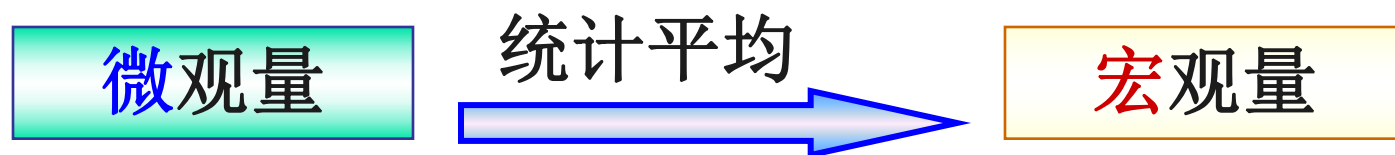
如 M 、 V 、 E 、 P 、 T 等

- **微观描述：**通过对微观粒子运动状态的说明而对系统的状态加以描述。

描述构成系统的每一个微观粒子运动状态的物理量为**微观量**。

如分子的质量 m 、直径 d 、速度 v 、动量 p 、能量 ε 等。

•宏观量与微观量的联系:



三、平衡态

1、定义：在不受外界影响的条件下，对一个孤立系统，经过足够长的时间后，系统达到一个宏观性质不随时间变化的状态。

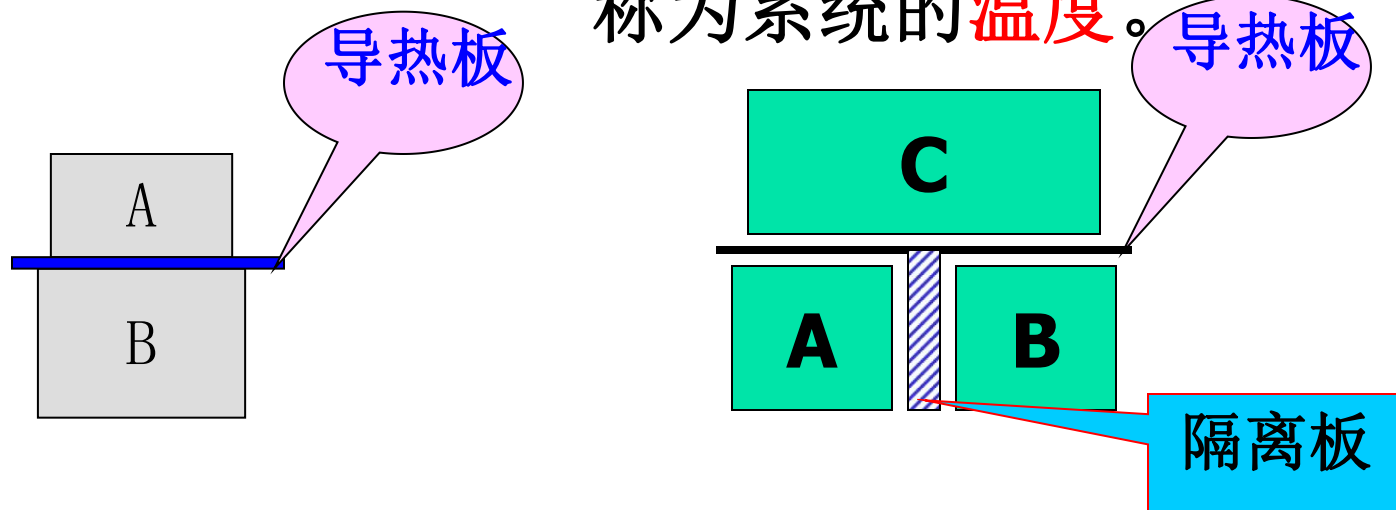
•系统处于平衡态的两个重要依据是：

①系统不受外界影响

②系统的所有宏观性质不随时间变化

§ 7.2 温度的概念

- **宏观:**处于热平衡的系统所具有的共同的宏观性质, 称为系统的**温度**。



- **微观:** 温度是分子热运动剧烈程度的标志。

一、热力学第零定律

内容: 如果两个热力学系统中的每一个都与第三个热力学系统处于热平衡, 则它们彼此也必定处于热平衡。

二、温标

- 温度的数值表示法叫做**温标**。

- **摄氏温标** ($^{\circ}\text{C}$) : t

- **热力学温标** (绝对温标)

-----不依赖任何物质的特性的温标

摄氏温度 t 与热力学温度 T 的关系

$$t = T - 273.15 \text{ } ^{\circ}\text{C}$$

- 热力学零度是不能达到的！ —— **热力学第三定律**

§ 7.4 理想气体状态方程

1、理想气体

(1)宏观模型：严格遵守气体三个实验定律（玻意耳定律、盖吕萨克定律和查理定律）的气体。

(2) 理想气体的微观模型：

- 1) 分子可视为质点；
 - 2) 除碰撞瞬间，分子间无相互作用力；
 - 3) 分子之间的碰撞均为完全弹性碰撞；
 - 4) 单个分子的运动遵从经典力学的规律。
- (3) 实际气体：压强较低，温度较高。

3、理想气体状态方程

理想气体
状态方程

$$pV = \frac{m}{M} RT$$

-----也称克拉珀珑方程

普适气体常量 $R = 8.31 \text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

对质量为 m 的理想气体 $\nu = m / M$

$$pV = \nu RT$$



克拉珀珑肖像

设分子数密度 (n) : 单位体积内的分子数目.

$$n = N/V$$

$$p = nkT$$

其中 k 为玻尔兹曼常数

$$k = \frac{R}{N_A} = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$$

注意

- 1) 方程中有三个变量 P 、 V 、 T , 其中只有两个变量是**独立**的;
- 2) 方程只适用于**理想气体**处于**平衡态**。
- 3) 当实际气体在**高温、低压**时, 可近似看做是理想气体。

应用理想气体状态方程处理问题的思路是：

首先，根据问题的性质和计算方便，确定研究对象。

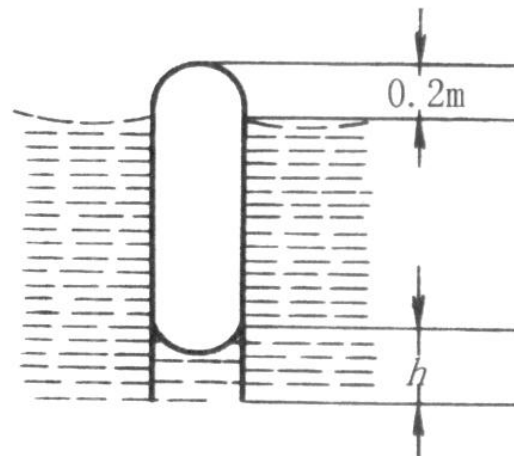
其次，描写研究对象所处的平衡态，

即确定 P 、 V 、 T 的值，并根据过程特征，列出方程。

最后，求解方程，注意统一单位。

【例】 设有一端封闭的玻璃管长1m，将它从空气中倒立竖直压入水中直至管的上端露出水面0.2m为止。求水进入管口内的深度 h （如图）。

已知大气压强为 $1.01325 \times 10^5 \text{Pa}$ ，气温为 27°C 。



解：把玻璃管内的气体作为研究对象，

并视为理想气体。当玻璃管在空气中时，管内气体的

压强 $P_1 = 1.01325 \times 10^5 \text{ Pa} = 10.33 \text{ m H}_2\text{O}$ （水柱高），

体积 $V_1 = 1s \text{ m}^3$ ，（ s 为玻璃管的横截面积），

温度 $T_1 = 27^\circ\text{C} = 300\text{K}$ 。

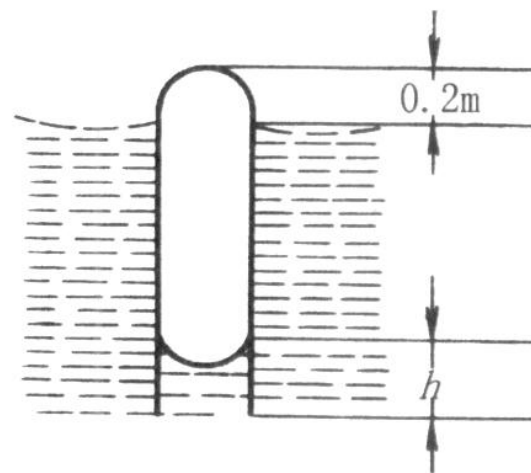
当水进入玻璃管内的深度为 h 时，

管内气体的

压强 $P_2 = 10.33 + (0.8 - h) \text{ m H}_2\text{O}$ ，

体积 $V_2 = (1 - h)s \text{ m}^3$ ，

温度 $T_2 = 300\text{K}$ 。（将水温视为与气温相等）





即由状态方程得

$$P_1 V_1 / T_1 = P_2 V_2 / T_2$$

代入数据，考虑到 $T_1 = T_2$ ，上式变为

$$10.33 \times 1 \text{ s} = (10.33 + 0.8 - h) (1 - h) \text{ s}$$

解得

$h \approx 0.07\text{m}$ ，而 $h \approx 11.34\text{m}$ 不符合题意，舍去。

故水进入管口内的深度 $h = 0.07\text{m}$ 。

第7章第2讲 气体动理论

(Gas dynamic theory)



——从物质的微观结构出发来阐明热现象的规律

本
讲
内
容

§ 7.5 气体分子的无规则运动

§ 7.6 理想气体的压强

§ 7.7 温度的微观意义

§ 7.8 能量均分定理

§ 7.9 麦克斯韦速率分布律

§ 7.10 麦克斯韦速率分布律的实验验证

§ 7.11 实际气体等温线

【学习目的】

- 1、理解气体分子的平均自由程、平均碰撞频率的意义及其相关计算。
- 2、掌握气体压强公式，及温度的微观意义。
- 3、掌握自由度的概念和能量均分定理。
- 4、理解麦克斯韦速率分布律及三种统计速率。

【教学重点】

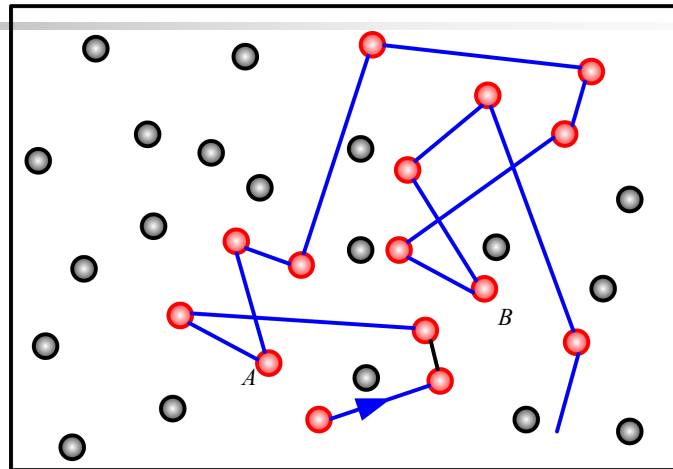
理想气体的压强公式和能量公式， 能量按自由度均分原理、麦克斯韦速率分布律。

【教学难点】

平衡态的概念 麦克斯韦速率分布律

原因

分子间**频繁**碰撞，分子的实际运动路径是曲折无规则的。



§ 7.5 气体分子的无规则运动

一、气体分子的有效直径

把分子看做具有一定体积的刚球，把分子间相互作用的过程看做刚球的弹性碰撞过程，两个分子质心间最小距离的平均值就被认为是刚球的直径，叫做分子的有效直径（effective diameter），用 d 表示。

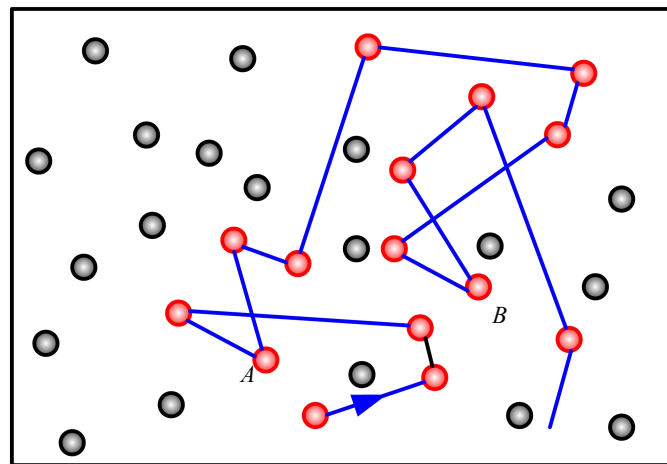
二、分子的平均碰撞频率和平均自由程

1、分子的**平均碰撞频率**：单位时间内一个分子和其它分子碰撞的平均次数，用 \bar{z} 表示。

2、分子的**平均自由程**：分子在连续两次碰撞之间，所经过自由路程的平均值，用 $\bar{\lambda}$ 表示。

平均自由程与平均碰撞频率之间的关系为：

$$\bar{\lambda} = \frac{\bar{v}t}{\bar{z}t} = \frac{\bar{v}}{\bar{z}}$$



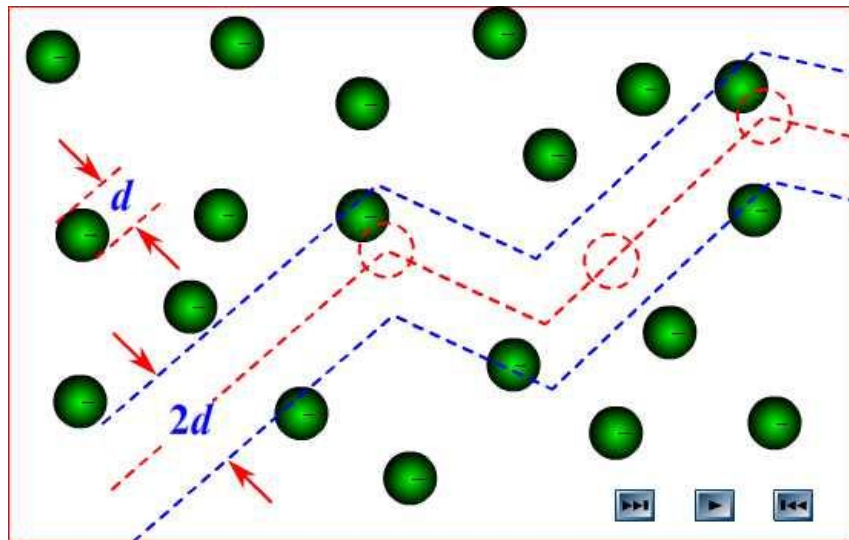
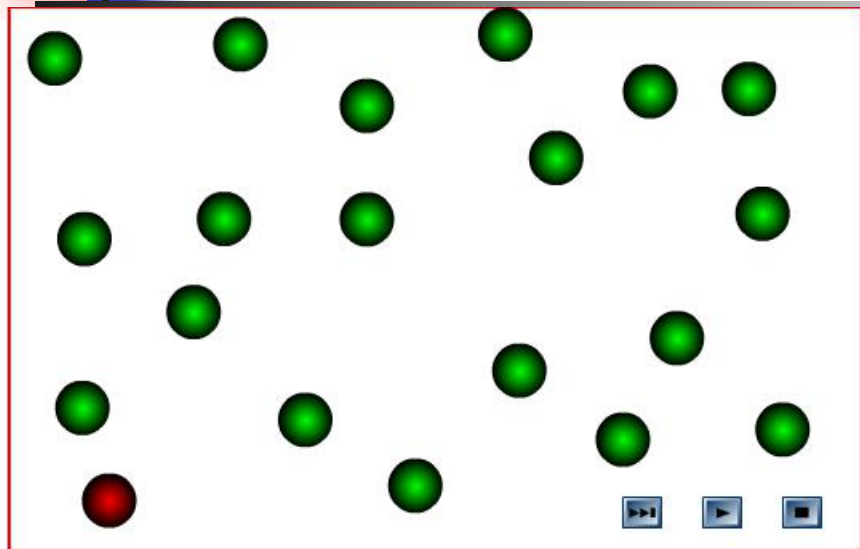


3、平均碰撞频率和平均自由程公式

(1) 平均碰撞频率公式

简化模型

- 1) 分子视为刚性小球 。
- 2) 假设分子所走的路程是折线，分子间的碰撞只改变分子运动的方向，不改变分子每秒钟所走的路程。
- 3) 其它分子皆静止，某一分子以平均相对速率 \bar{u} 相对其他分子运动 。（ $\bar{u} = \sqrt{2} \bar{v}$ ）



凡是球心离开折线的距离小于 d 的其他分子，都将和运动分子相碰，也就是说，**凡在以 d 为半径的圆柱体内的分子都将和运动分子相碰。**在单位时间内，这一体积为： $\pi d^2 \bar{u}$

在这一体积内的分子数为： $n \pi d^2 \bar{u}$

单位时间内运动分子和
其他分子相碰的平均次数为：

$$\bar{Z} = n \pi d^2 \bar{u}$$

考虑其他分子的运动

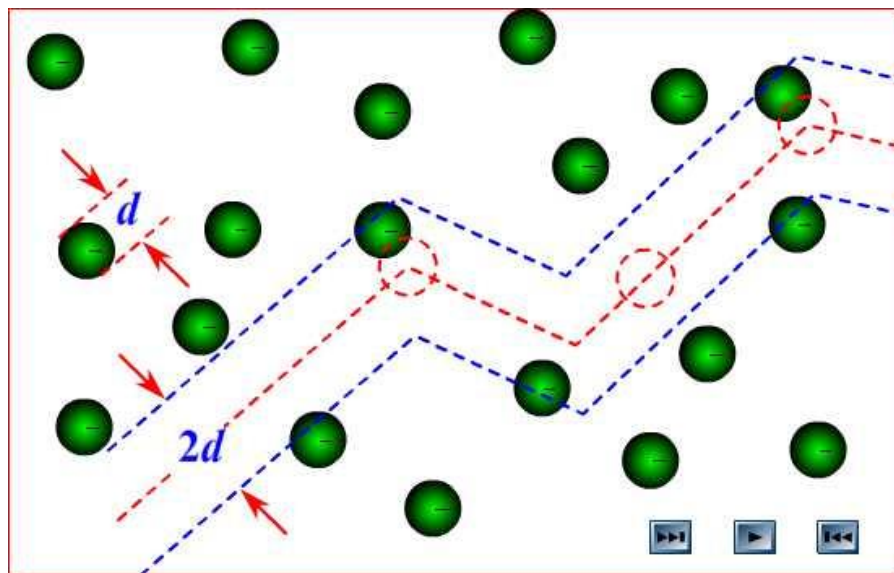
$$\bar{u} = \sqrt{2} \bar{v}$$

分子平均碰撞次数

$$\bar{Z} = \sqrt{2} \pi d^2 \bar{v} n$$

◆ 分子平均碰撞频率

$$\bar{Z} = \sqrt{2} \pi d^2 \bar{v} n$$





(2) 平均自由程公式

$$\bar{\lambda} = \frac{\bar{v}}{\bar{z}} = \frac{1}{\sqrt{2\pi} d^2 n}$$

$$\because p = nkT \quad \rightarrow$$

$$\bar{\lambda} = \frac{kT}{\sqrt{2\pi} d^2 p}$$

$$T \text{ 一定时: } \bar{\lambda} \propto \frac{1}{p}, \quad p \text{ 一定时: } \bar{\lambda} \propto T$$

注意：当压强 p 很低，以致分子平均自由程大于容器线度时，其平均自由程即容器的线度。表明分子很少与其他分子碰撞，不断与器壁碰撞。



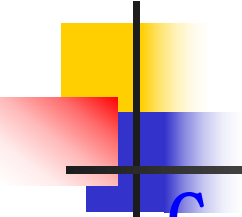
§ 7.6 理想气体的压强

复习 A、气体动理论的研究方法

从物质**微观结构**和分子运动论的基本概念出发，依据**每个粒子**的力学规律，运用**统计**平均方法，揭示**微观运动**和**宏观现象**的内在联系，并确定**宏观量**与**微观量**之间的关系，研究热运动规律。

B、分子运动论的基本概念

宏观物体是由大量分子（或原子）组成；
分子在不停地做无规则热运动；
分子之间有相互作用力。



C、理想气体的宏观模型：

严格遵守气体三个实验定律（玻意耳定律、盖吕萨克定律和查理定律）的气体。

1、单个分子的力学性质假设

- 1) 分子可视为质点；
- 2) 除碰撞瞬间，分子间无相互作用力；
- 3) 分子之间的碰撞均为完全弹性碰撞；
- 4) 单个分子的运动遵从经典力学的规律。



2、大量分子的统计模型

(1) 每个分子的运动速度各不相同，其大小及方向通过碰撞不断发生变化。

(2) 在平衡态下，忽略重力的影响，沿各个坐标方向运动的分子数均相等，设分子总数为 N ，则在 x 、 y 、 z 三个方向运动的分子数为： $N_x = N_y = N_z$

(3) 在平衡态下，各个分子速率按方向的分布是均匀的，则分子速率的每个方向的分量方均值应该相等。即：

$$\overline{v_x^2} = \overline{v_y^2} = \overline{v_z^2} = \frac{1}{3} \overline{v^2} \quad \text{其中:} \quad \overline{v_x^2} = \frac{1}{N} \sum_i v_{ix}^2$$

3、理想气体的压强

1) 计算任一个分子,

如第*i*个分子, 与器壁*A*碰撞一次的过程中施于器壁*A*的冲量。

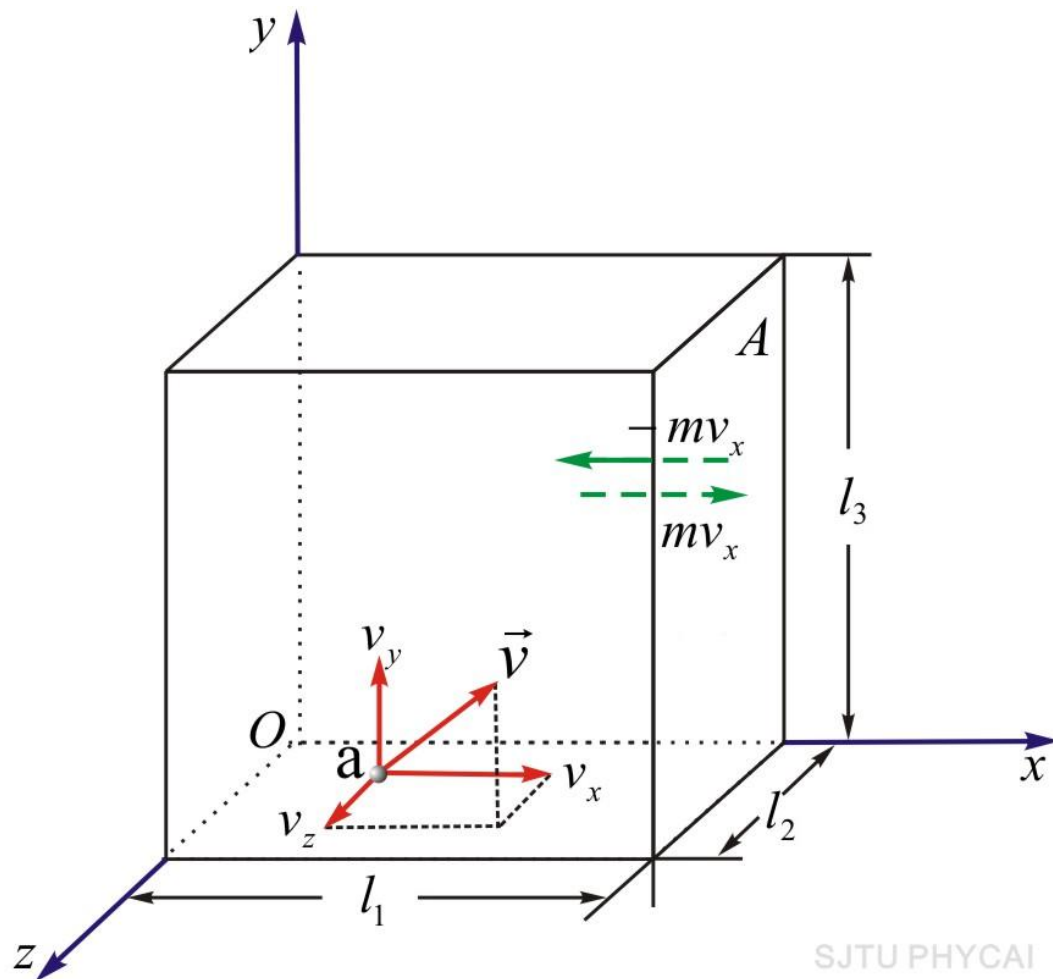
◆ 单个分子

*x*方向动量变化

$$\Delta p_{ix} = -2mv_{ix}$$

分子施于器壁的冲量

$$2mv_{ix}$$



2) 计算单位时间该分子施于器壁A 的平均冲量。

分子与器壁A 两次碰撞间隔时间

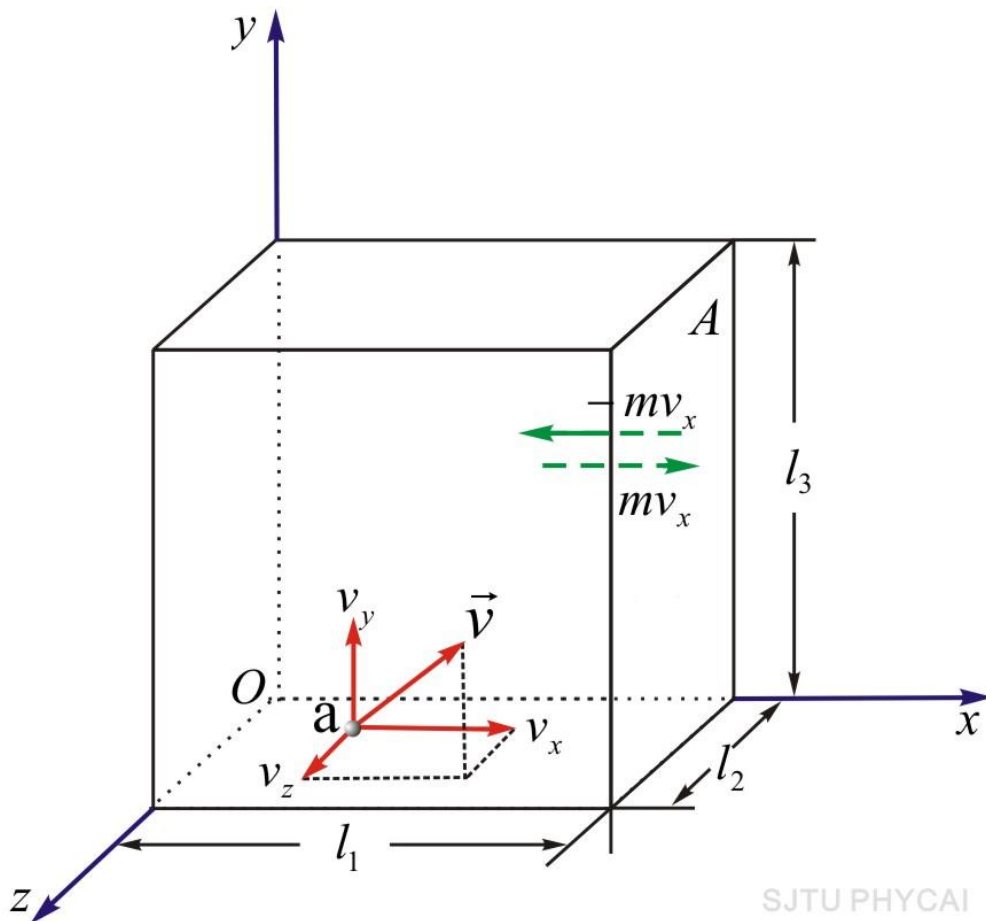
$$2l_1 / v_{ix}$$

单位时间碰撞次数

$$v_{ix} / 2l_1$$

单个分子单位时间内施
于器壁的冲量

$$mv_{ix}^2 / l_1$$



3) 计算所有 N 个分子在单位时间内施于 A 的平均冲量。(即平均冲力)

$$\bar{F} = \sum_{i=1}^N \frac{m v_{ix}^2}{l_1}$$

4) 求压强

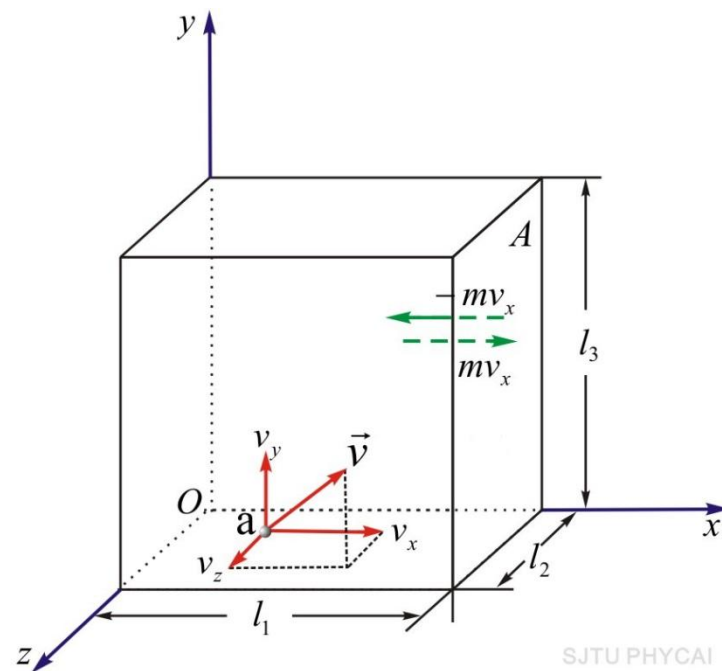
按压强的定义，气体施于器壁 A 的压强为

$$P = \frac{\bar{F}}{l_2 l_3} = \frac{m}{l_1 l_2 l_3} \sum_{i=1}^N v_{ix}^2 = \frac{Nm}{l_1 l_2 l_3} \sum_{i=1}^N \frac{v_{ix}^2}{N}$$

所以上式可写成 $P = nm \overline{v_x^2}$

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

$$\therefore P = \frac{1}{3} nm \overline{v^2} = \frac{2}{3} n \left(\frac{1}{2} m \overline{v^2} \right) = \frac{2}{3} n \overline{\epsilon_t}$$



$$P = \frac{2}{3} n \bar{\varepsilon}_t \quad \text{其中: } \bar{\varepsilon}_t = \frac{1}{2} m \overline{v^2} \text{ 叫分子的平均平动动能}$$

上式说明：理想气体的压强 P 决定于单位体积内的分子数 n 和分子的平均平动动能。

压强的物理意义

统计关系式



$$p = \frac{2}{3} n \bar{\varepsilon}_t$$

宏观可观测量

微观量的统计平均值

说明:

- 1) 压强的微观实质：压强表示所有气体分子在单位时间内施于单位面积器壁的平均冲量。
- 2) 压强公式说明：增大压强 P 方法有二：
一是增大 n ；二是增大 $\overline{\varepsilon_t}$ 。
- 3) $P = \frac{2}{3} n \overline{\varepsilon_t}$ 是 P 、 n 和 $\overline{\varepsilon_t}$ 之间相互联系的一个统计规律。
- 4) 若考虑气体分子间的碰撞后，该压强公式的仍然成立。

理想气体的压强公式只适用于平衡态。

§ 7.7 温度的微观意义

由 $p = \frac{2}{3} n \bar{\varepsilon}_t$ $p = nkT$ 得:

分子平均平动动能

$$\bar{\varepsilon}_t = \frac{1}{2} m \overline{v^2} = \frac{3}{2} kT$$

微观量的统计平均值

宏观可观测量

即：理想气体在平衡态下，其分子的平均平动动能只和温度有关，并且和热力学温度成正比。

说明

- 1) **温度的微观本质**: 温度是分子**平均平动动能**的量度 (反映热运动的剧烈程度);
- 2) 温度是大量分子的集体表现, 个别分子无意义;
- 3) 在同一温度下, **各种气体**分子平均平动动能均等;
- 4) 适用于平衡态下的理想气体;
- 5) 气体分子的**方均根速率**:

$$\sqrt{v^2} = \sqrt{\frac{3kT}{m}} = \sqrt{\frac{3RT}{\mu}}$$

讨论

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，但氦气的压强小于氮气的压强。

解

$$p = nkT = \frac{N}{V}kT = \frac{Nm}{Vm}kT = \rho \frac{k}{m}T$$

$$\because m(\text{N}_2) > m(\text{He}) \quad \therefore p(\text{N}_2) < p(\text{He})$$

例 理想气体体积为 V ，压强为 p ，温度为 T ，一个分子的质量为 m ， k 为玻尔兹曼常量， R 为摩尔气体常量，则该理想气体的分子数为：

(A) pV/m  (B) $pV/(kT)$

(C) $pV/(RT)$ (D) $pV/(mT)$

解 $p = nkT$ $N = nV = \frac{pV}{kT}$

§ 7.8 能量均分定理

一、自由度

1、**概念**：确定一个物体的空间位置所需的独立坐标数，叫该物体的自由度，用符号 i 表示。

2、自由度的确定：

刚性分子的自由度

分子 \ 自由度	t 平动	r 转动	i 总
单原子分子	3	0	3
双原子分子	3	2	5
多原子分子	3	3	6



二、分子的平均动能按自由度均分原则

$$\bar{\varepsilon}_t = \frac{1}{2} m \overline{v^2} = \frac{1}{2} m \overline{v_x^2} + \frac{1}{2} m \overline{v_y^2} + \frac{1}{2} m \overline{v_z^2} = \frac{3}{2} kT$$

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

$$\therefore \frac{1}{2} m \overline{v_x^2} = \frac{1}{2} m \overline{v_y^2} = \frac{1}{2} m \overline{v_z^2} = \frac{1}{2} kT$$

➡ 分子的平均平动动能 $\frac{3}{2} kT$ 是均匀地分配在每个平动自由度上的，每个平动自由度都具有相同的平均动能 $\frac{1}{2} kT$.

二、分子的平均动能按自由度均分原则

在温度为 T 的平衡态下，物质分子的每一个自由度都具有相同的平均动能，其大小都等于 $\frac{1}{2}kT$ 。

说明：

1、能均分定理的适用范围：一是平衡态；二是由大量分子（或原子）组成的系统，不论是气体或液体、固体均成立。

2、分子的平均总动能：
$$\bar{\varepsilon}_k = \frac{i}{2}kT$$

3、分子平均总能量：
$$\bar{\varepsilon} = (t + r + 2s)\frac{1}{2}kT$$

三、理想气体的内能

气体的内能：气体中所有分子的热运动**动能**和分子间相互作用**势能**的总和。

理想气体内能：气体中所有分子的**平均动能**的总和。

质量为 m ，摩尔质量为 M 的理想气体内能：

$$E = \frac{m}{M} \frac{i}{2} RT = \nu \frac{i}{2} RT$$

1mol 理想气体的内能：
(只考虑刚性分子)

$$E = \frac{i}{2} RT$$

例题 两种气体自由度数目不同, 温度相同, 摩尔数相同, 下面哪种叙述正确:

(A) 它们的平均平动动能、平均动能、内能都相同;

(B) 它们的平均平动动能、平均动能、内能都不同.

★ (C) 它们的平均平动动能相同, 平均动能、内能都不同;

(D) 它们的内能都相同, 平均平动动能、平均动能都不同;

例题 理想气体系统由氧气组成，压强 $P=1\text{atm}$ ，温度 $T=27^\circ\text{C}$ 。求（1）单位体积内的分子数；（2）分子的平均平动动能和平均转动动能；（3）单位体积中的内能。

解：（1）根据

$$n = \frac{p}{kT} = \frac{1.013 \times 10^5}{1.38 \times 10^{-23} \times 300} = 2.45 \times 10^{25} (\text{m}^{-3})$$

$$\text{(2)} \quad \bar{\varepsilon}_{\text{平}} = \frac{3}{2} kT = 6.21 \times 10^{-21} (\text{J})$$

$$\bar{\varepsilon}_{\text{转}} = \frac{2}{2} kT = kT = 4.14 \times 10^{-21} (\text{J})$$

$$\text{(3)} \quad E = n(\bar{\varepsilon}_{\text{平}} + \bar{\varepsilon}_{\text{转}}) = 2.54 \times 10^5 (\text{J})$$

例题 设有一恒温容器，其内储有某种理想气体，若容器发生缓慢漏气，**问：**

- (1) 气体的压强是否变化？为什么？
- (2) 容器内气体分子的平均平动动能是否变化？为什么？
- (3) 气体的内能是否变化？为什么？

解： (1) $PV = \nu RT$ $\nu \downarrow \Rightarrow P \downarrow$

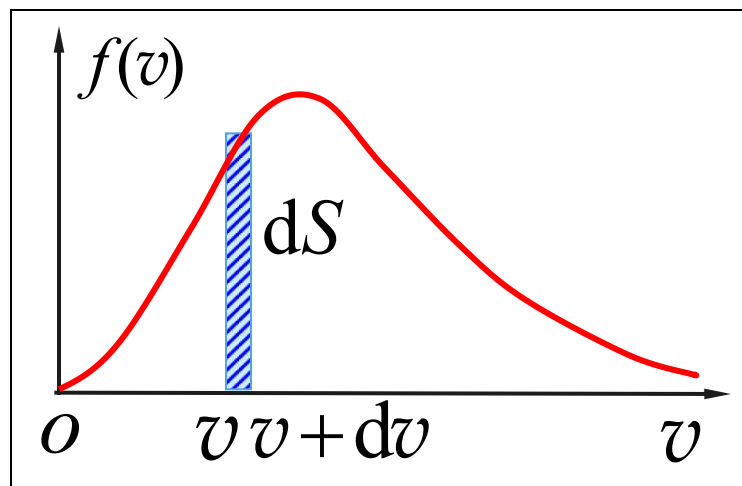
(2) $\because \overline{\omega_t} = \frac{3}{2}kT, \therefore \text{不变}$

(3) $E = \nu \frac{i}{2}RT$ $\nu \downarrow \Rightarrow E \downarrow$

§ 7.9 麦克斯韦速率分布律

1、速率分布函数：

$$f(v) = \frac{1}{N} \frac{dN}{dv}$$



物理意义

表示在温度为 T 的平衡状态下，速率在 v 附近的单位速率区间的分子数占总数的百分比。

$$\frac{dN}{N} = f(v)dv = dS$$

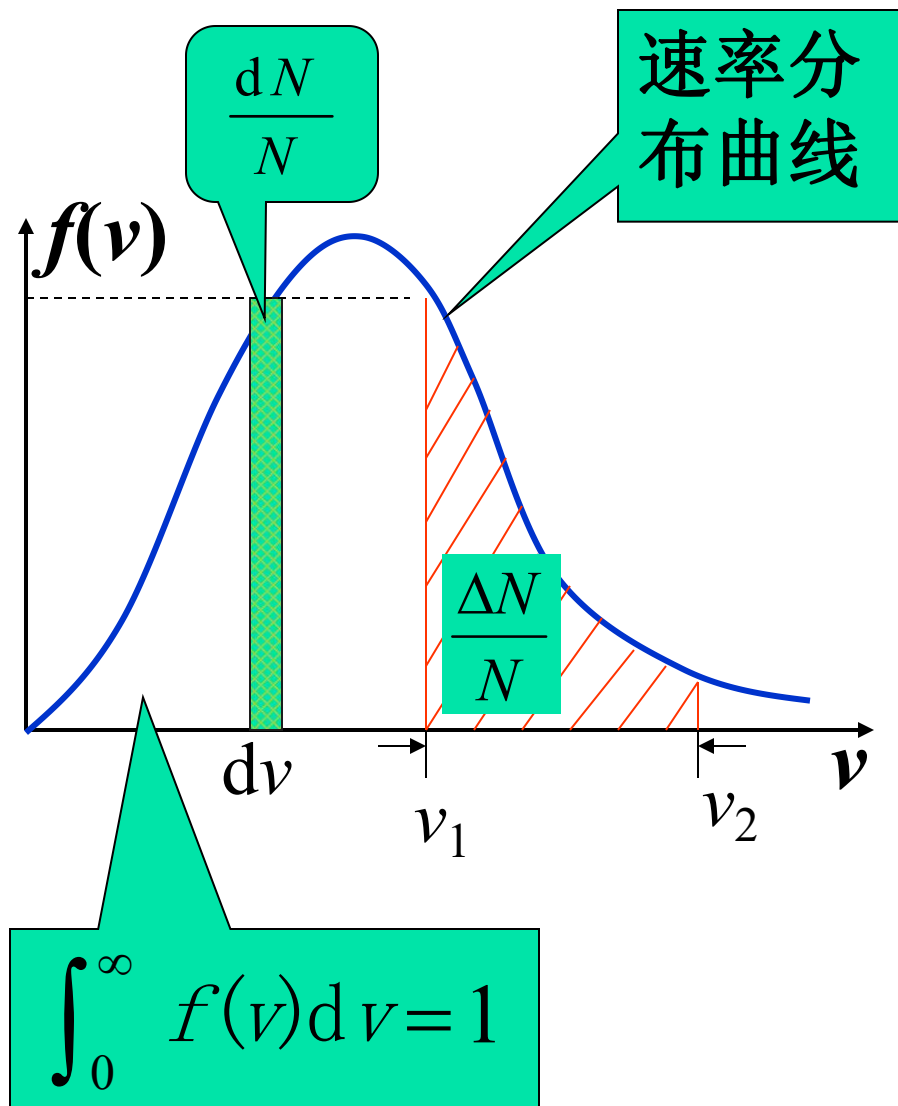
表示速率在 $v \rightarrow v + dv$ 区间的分子数占总分子数的百分比。

$$\frac{\Delta N}{N} = \int_{v_1}^{v_2} f(v)dv$$

$$\int_0^{\infty} f(v)dv = 1$$

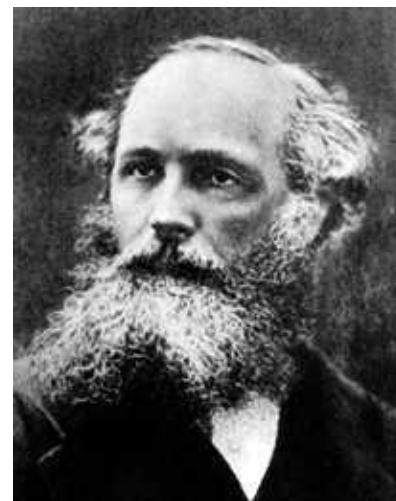
◆速率分布函数的

归一化条件



2、麦克斯韦速率分布函数

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



麦克斯韦

英国的物理家、
数学家

——麦克斯韦速率分布函数

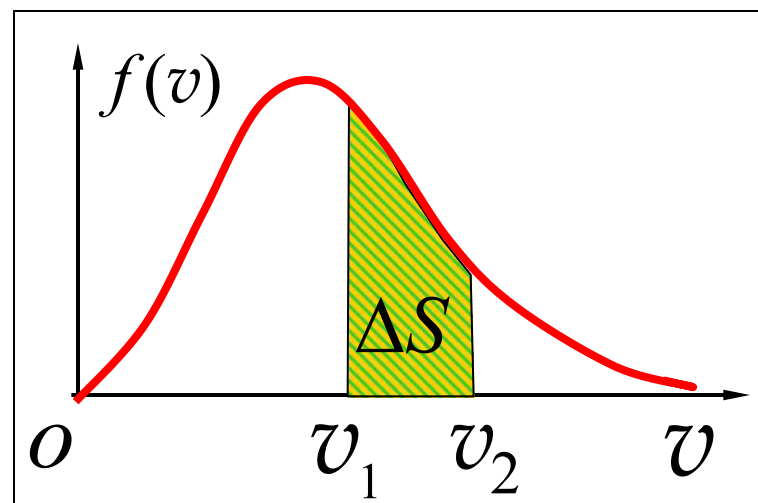
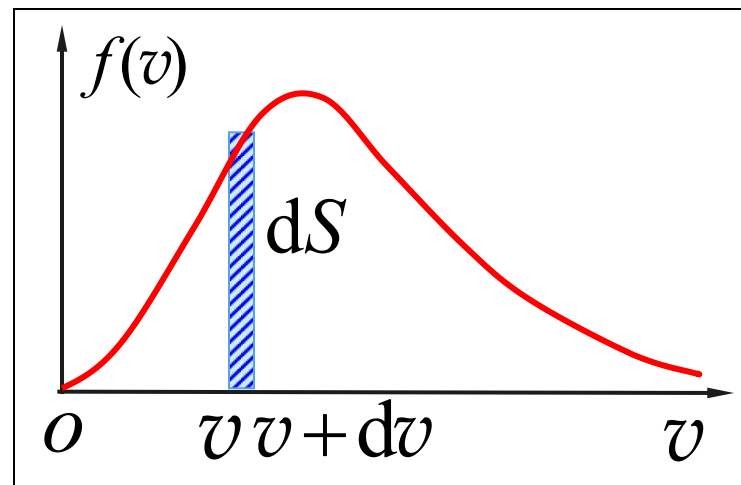
3、麦克斯韦速率分布曲线

$$(1) \quad \frac{dN}{N} = f(v)dv = dS$$

速率位于 $v_1 \rightarrow v_2$ 区间的分子数
占总数的百分比

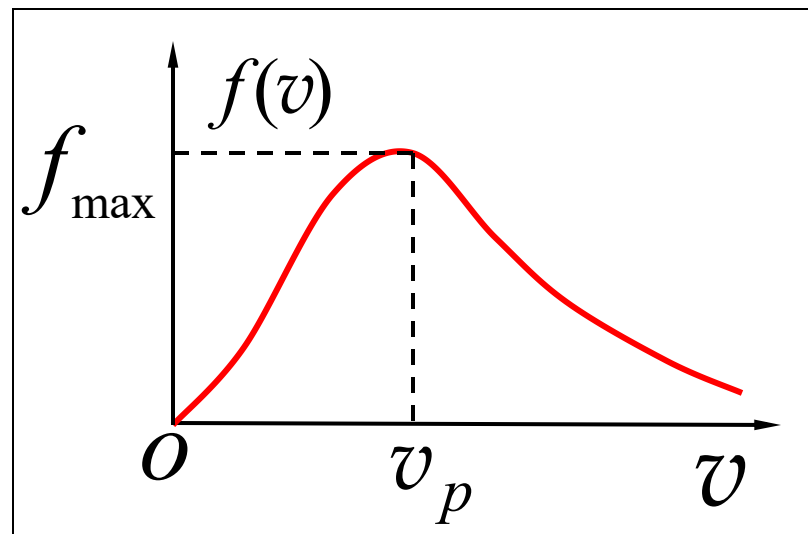
$$\Delta S = \int_{v_1}^{v_2} f(v)dv$$

(2) 速率**很大和很小**的分子
所占的百分比都**很小**，而具有
中等速率的分子所占的百分比**很大**。



(3) 最概然速率 v_p

与速率分布函数最大值相对应的速率，称为最可概速率。

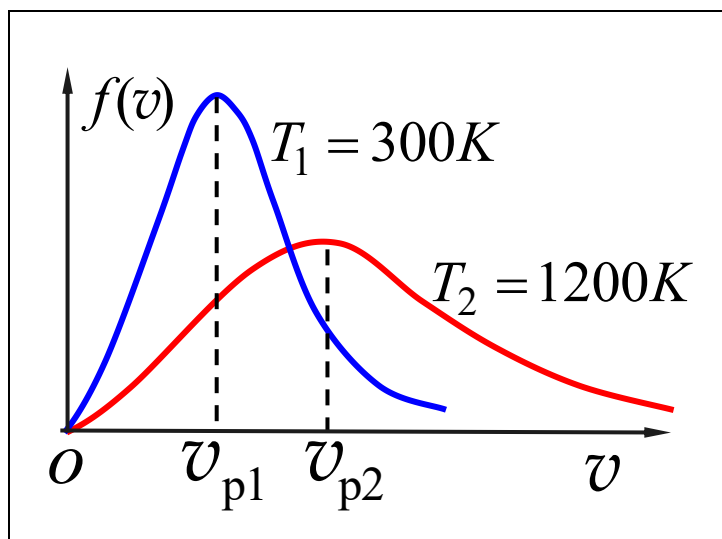


由 $\left. \frac{df(v)}{dv} \right|_{v_p} = 0$ 得：

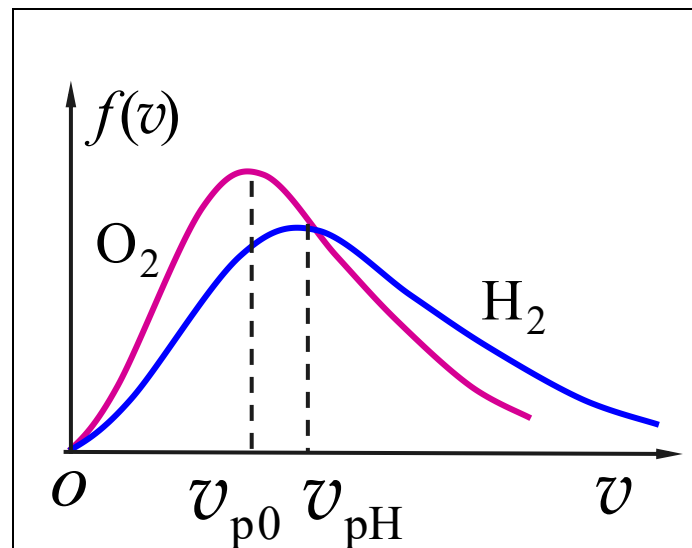
$$\rightarrow v_p = \sqrt{\frac{2kT}{m}} = \sqrt{\frac{2RT}{M}} \approx 1.41 \sqrt{\frac{RT}{M}}$$

物理意义

若把整个速率范围划分成许多小区间，则分布在 v_p 所在的区间内的分子所占总分子数的百分比最大。。



同种气体在不同温度下的速率分布



同一温度下不同气体的速率分布

(4) 对于 m 一定的气体来说，速率分布曲线的形状随 T 而变化；对于 T 一定的气体来说，速率分布曲线的形状随 m 而变化；

$$v_p = \sqrt{\frac{2kT}{m}} = \sqrt{\frac{2RT}{M}} \approx 1.41 \sqrt{\frac{RT}{M}}$$

4、麦克斯韦速率分布律的应用

1) 平均速率 \bar{v} $\bar{v} = \int_0^{\infty} v f(v) dv = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}}$

$$\bar{v} \approx 1.60 \sqrt{\frac{kT}{m}} = 1.60 \sqrt{\frac{RT}{M}}$$

2) 方均根速率 $\sqrt{v^2}$

$$v^2 = \int_0^{\infty} v^2 f(v) dv = \frac{3kT}{m}$$

$$\sqrt{v^2} = \sqrt{\frac{3kT}{m}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}}$$

$$v_p < \bar{v} < \sqrt{v^2}$$

$$\begin{aligned}\sqrt{v^2} &= \sqrt{\frac{3kT}{m}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}} \\ \bar{v} &\approx 1.60 \sqrt{\frac{kT}{m}} = 1.60 \sqrt{\frac{RT}{M}} \\ v_p &= \sqrt{\frac{2kT}{m}} = \sqrt{\frac{2RT}{M}}\end{aligned}$$

由上述结果可知，三种速率都与 \sqrt{T} 成正比，都与 \sqrt{m} 或 $\sqrt{\mu}$ 成反比。

在讨论分子速率分布时，就要用到**最可概速率**；在讨论分子的碰撞、气体的输运过程时，就要用到**平均速率**；在计算分子的平均平动动能时，就要用到**方均根速率**。

讨论

麦克斯韦速率分布中最概然速率 v_p 的概念

下面哪种表述正确？

(A) v_p 是气体分子中大部分分子所具有的速率.

(B) v_p 是速率最大的速度值.

(C) v_p 是麦克斯韦速率分布函数的最大值.

★ (D) 速率大小与最概然速率相近的气体分子的比率最大.

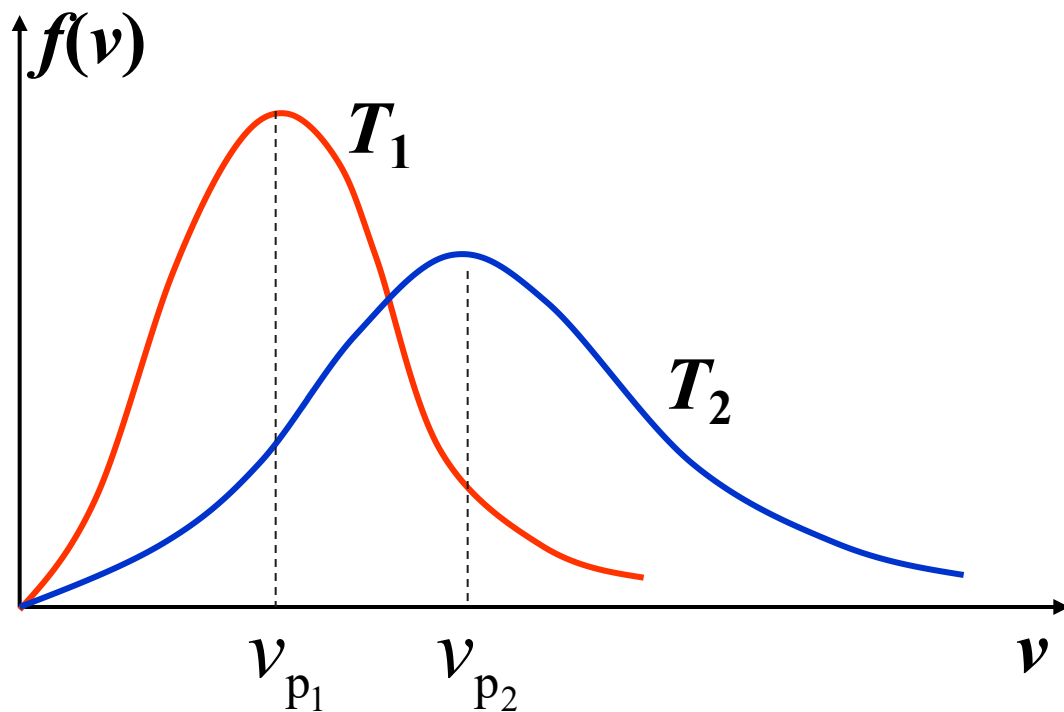
例 图为同一种气体，处于不同温度状态下的速率分布曲线，问：（1）哪一条曲线对应的温度高？（2）如果这两条曲线分别对应的是同一温度下氧气和氢气的分布曲线，问哪条曲线对应的是氧气，哪条对应的是氢气？

解：

$$v_p = \sqrt{\frac{2RT}{M}}$$

(1) $T_1 < T_2$

(2) 红：氧气





说明下列各式的物理意义，式中 $f(v)$ 为麦克斯韦速率分布函数， N 为分子总数， n 为分子数密度。

(1) $f(v)dv$, $Nf(v)dv$;

(2) $\int_{v_1}^{v_2} f(v)dv$, $\int_0^{\infty} f(v)dv$, $\int_0^{v_0} Nf(v)dv$;

(3) $\int_0^{\infty} v^2 f(v)dv$, $\int_{v_1}^{v_2} Nvf(v)dv$

$$\int_0^{\infty} vf(v)dv$$



本章内容提要

一、几个概念和物理量

1. 系统和外界、宏观量和微观量。

2. 平衡态：在不受外界影响的条件下，一个系统的宏观性质不随时间改变的状态。

3. 热力学第零定律：如果系统 A 和系统 B 分别都与系统 C 的同一状态处于热平衡，那么 A 和 B 接触时，它们也必定处于热平衡。

1. 分子数密度 $n = \frac{N}{V}$

2. 分子质量 $m = \frac{M}{N_A}$

3. 质量密度 $\rho = nm$

4. 物质的量 $\nu = m'/M$

二. 三个公式

1. 理想气体状态方程（平衡态）

$$\left\{ \begin{array}{l} pV = \nu RT \\ P = nkT \end{array} \right.$$

2. 理想气体压强的微观公式 $P = \frac{2}{3} n \overline{\varepsilon_k}$

3. 温度的统计意义

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

三、速率分布和麦克斯韦速率分布律

$$f(v) = \frac{1}{N} \frac{dN}{dv} = 4\pi \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} e^{-\frac{mv^2}{2kT}} v^2$$

• 三种统计速率

1. 最概然速率 $v_p = \sqrt{\frac{2kT}{m}} = \sqrt{\frac{2RT}{M}} = 1.41 \sqrt{\frac{RT}{M}}$

2. 平均速率 $\bar{v} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}} = 1.60 \sqrt{\frac{RT}{M}}$

3. 方均根速率 $\sqrt{v^2} = \sqrt{\frac{3kT}{m}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}} = 1.73 \sqrt{\frac{RT}{M}}$

四、能量均分定理

在平衡态下，物质分子的任何一个自由度的平均动能都相等，均为 $kT/2$

刚性分子能量自由度

分子 \ 自由度	t 平动	r 转动	i 总
单原子分子	3	0	3
双原子分子	3	2	5
多原子分子	3	3	6

➤ 理想气体的内能
$$E = \frac{m'}{M} \frac{i}{2} RT = \nu \frac{i}{2} RT$$