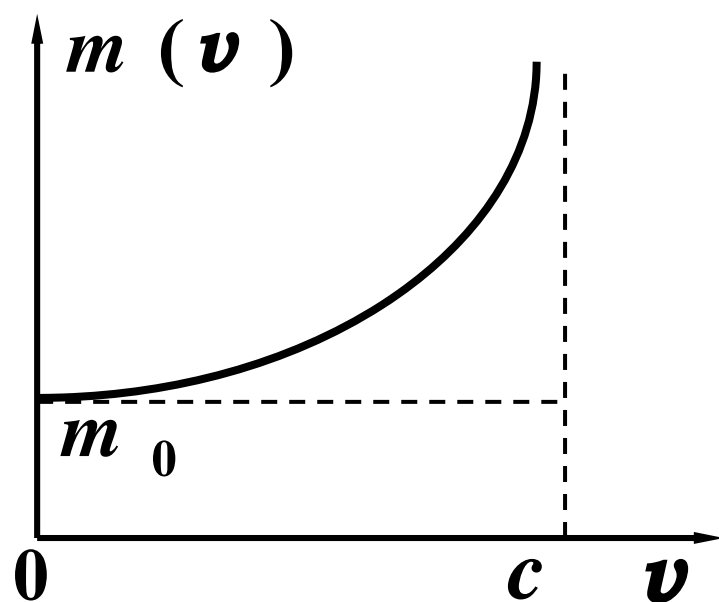


大学物理



$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

电子能量(MeV)	v/c	m/m_0
5	0.995	9.8
25	0.9998	49
2.8×10^3	0.999999998	5490

$v \ll c$ 时, $m = m_0 \rightarrow$ 牛顿力学情形。

$$\begin{aligned}
dE_k &= \mathbf{F} \cdot d\mathbf{r} = \frac{d(m\mathbf{v})}{dt} \cdot d\mathbf{r} \\
&= d(m\mathbf{v}) \cdot \mathbf{v} = (m d\mathbf{v} + \mathbf{v} dm) \cdot \mathbf{v} \\
&= m\mathbf{v} \cdot d\mathbf{v} + v^2 dm = m\mathbf{v} d\mathbf{v} + v^2 dm
\end{aligned}$$

如果质量
不变化：

$$dE_K = m\mathbf{v} d\mathbf{v} + v^2 dm = m\mathbf{v} d\mathbf{v} = d\left(\frac{1}{2}mv^2\right)$$

$$\text{由 } m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad \longrightarrow \quad m^2 c^2 - m^2 v^2 = m_0^2 c^2$$

$$\longrightarrow 2mc^2 dm - 2mv^2 dm - 2m^2 v dv = 0$$

$$\begin{cases} m v dv = c^2 dm - v^2 dm \\ dE_K = m v dv + v^2 dm \end{cases}$$

$$\therefore dE_K = c^2 dm$$

$$E_K = \int_{m_0}^m c^2 dm = mc^2 - m_0 c^2$$

一. 质能关系 (equivalence of mass and energy)

对 $E_k = mc^2 - m_0c^2$

爱因斯坦认为:

$E_0 = m_0c^2$ 为 静止能量 (rest energy) 。

$mc^2 = E_k + m_0c^2$ 为 总能 (total energy) 。

记作: $E = mc^2$ —— 质能关系

相对论统一了质量和能量守恒。

这里的质量是相对论质量, 而非静止质量。

牛顿
力学

低速运动 (s, t, v, a)

动力学 ($F=ma$)

动量 ($p=mv$)

能量 ($E=mv^2/2$)

相对论
力学

高速运动 (s, t, v, a)

动力学 ($F=dp/dt$)

动量 ($p=mv$)

能量 ($E=mc^2$)

热 学

热学是研究与热现象有关的规律的科学。
热现象是物质中大量分子无规则运动的集体表现。
大量分子的无规则运动称为热运动。

二. 热学的研究方法 宏观 + 微观

▲ 热力学 (thermodynamics)

宏观基本实验规律 $\xrightarrow{\text{逻辑推理}}$ 热现象规律

特点：普遍性、可靠性。

▲ 统计力学 (statistical mechanics)

对微观结构提出模型、假设 $\xrightarrow{\text{统计方法}}$ 热现象规律

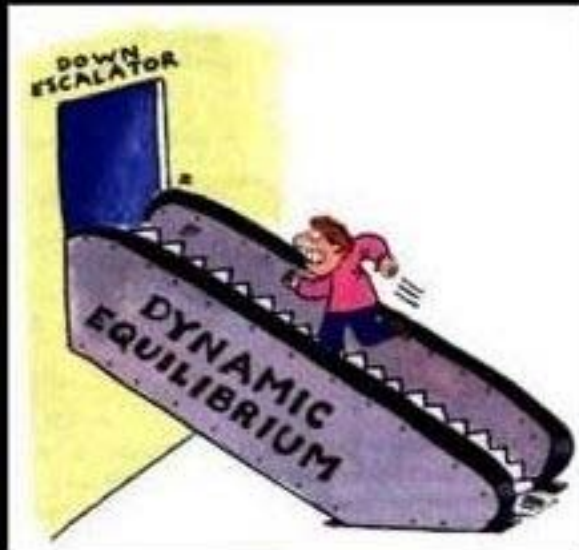
特点：可揭示本质，但受模型局限。

第一部分 温度 (Temperature)

一. 几个概念

1. 平衡态 (equilibrium state) :

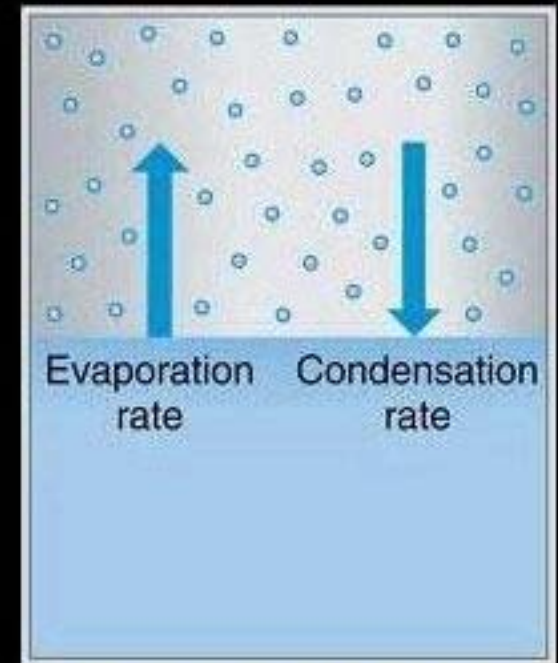
在不受外界影响的条件下（与外界无任何形式的物质与能量交换），系统的**宏观性质**不随时间变化的状态（**动平衡**）。



*Running up =
moving down*



Water in = Water out



*Evaporation =
Condensation*

All are examples of ***dynamic equilibrium***

2. 宏观量 (**macroscopic quantity**) :

表征系统宏观性质的物理量 (可直接测量) 。

宏观量 $\left\{ \begin{array}{l} \text{广延量 (有累加性) : 如 } M, V \dots \\ \text{强度量 (无累加性) : 如 } p, T \dots \end{array} \right.$

3. 微观量 (**microscopic quantity**) :

描写单个微观粒子运动状态的物理量 (一般只能间接测量) 。 如分子的 $m, \bar{v}, d \dots$

4. 态参量 (state parameter) :

描写平衡态的宏观物理量。

如：气体的 p 、 V 、 T

一组态参量 $\xrightleftharpoons[\text{对应}]{\text{描述}}$ 一个平衡态

5. 物态方程 (equation of state) :

态参量之间的函数关系： $f(p, V, T)$

理想气体物态方程：

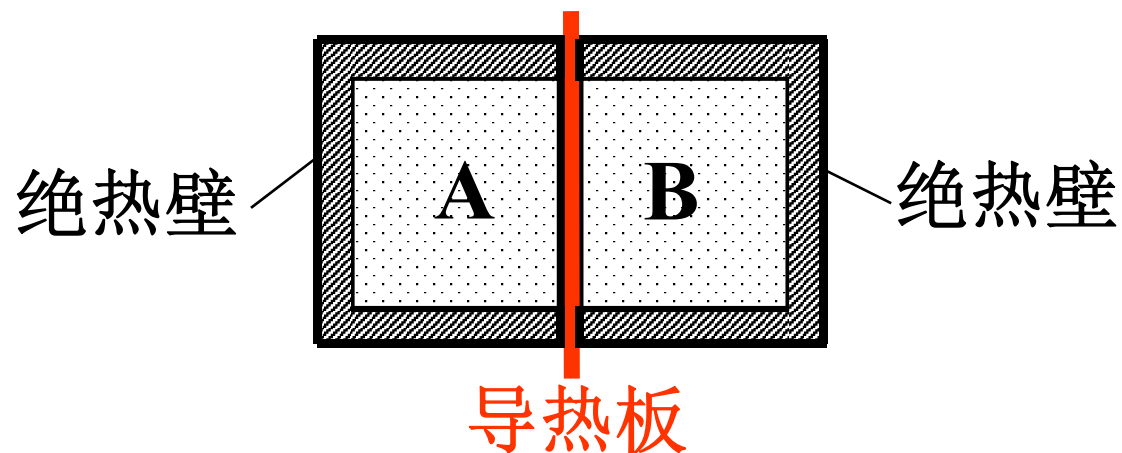
$$pV = \frac{m}{M}RT$$

二. 温度

温度(冷热)? { 找个温度计!
量量 (有一定时间)
读数据

为何能这样做?

热平衡态: 两系统**热接触**下, 相当长时间后达到的**共同平衡态**。



实验表明：

若A与C热平衡
B也与C热平衡 } 则A与B必然热平衡

“分别与第三个系统处于同一热平衡态的两个系统必然也处于热平衡。”

— 热平衡定律（热力学第零定律）

- 1: 一切处于同一热平衡态的系统有相同的温度！
- 2: 处于同一热平衡态下的热力学系统所具有的共同的宏观性质。
- 3: 温度取决于系统内部的热运动（对质心的运动）状态。

三. 温标 (temperature scales)

温标：温度的数值标度。 选择特殊状态！

1. 摄氏温标 t :

冰 \longleftrightarrow 水 \longleftrightarrow 汽

水结冰(0)

水沸腾(100)

100个刻度

不太科学！ 但简单！

2.理想气体温标： 用理想气体做测温物质的 温标，单位： **K (Kelvin)** 。

玻意耳定律：一定质量的气体，在一定温度下，
其压强和体积的乘积是个常量

$$pV=\text{常量（温度不变）}$$

理想气体：在各种压强下都严格遵守玻意耳定律的气体！

$$\begin{aligned} p_1 V_1 &= C_1 \\ (\text{对应温度 } T_1) \\ p_2 V_2 &= C_2 \\ (\text{对应温度 } T_2) \end{aligned}$$

可以定义新的
温标使得

$$pV \propto T$$

理想气体温标

一定质量的理想气体有规律： $\frac{T}{T_3} = \frac{pV}{p_3V_3}$

T_3 为水的三相点(triple point)，水、冰和水汽共存达到平衡态的温度，此时水汽的压强为609Pa

规定 $T_3 = 273.16\text{K}$

于是有

$$T = 273.16 \frac{pV}{p_3V_3}$$

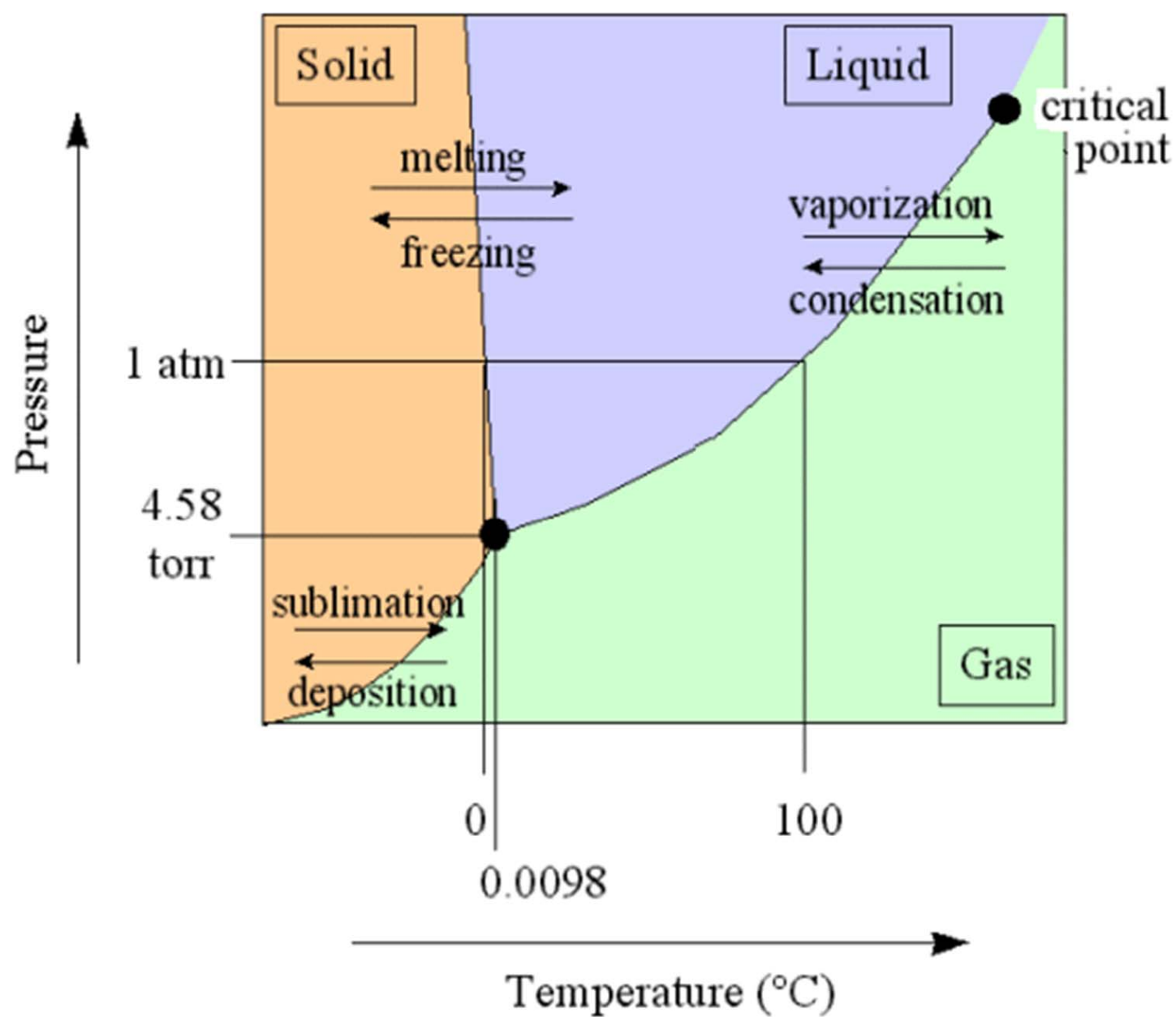
{

$$T = 273.16 \frac{p}{p_3}$$

$$T = 273.16 \frac{V}{V_3}$$

局限：

在 $> 0.5\text{K}$ 的范围适用（低压 ^3He 气），
不适用与液体。



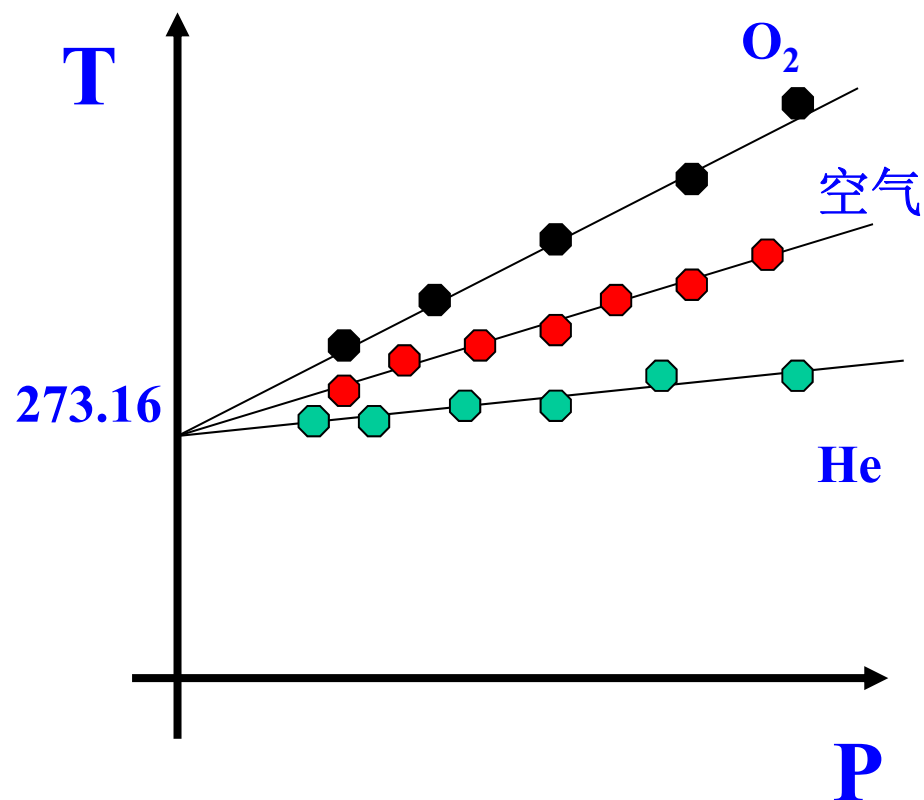
3.热力学温标 T :

不依赖测温物质及其
测温属性的温标,

$$T = \lim_{p_3 \rightarrow 0} \left(\frac{p}{p_3} \right) = 273.16$$

在理想气体温标有效范围内与理想气
体温标一致,

单位: K 。



***4. 华氏温标 t_F :**

$$t_F = (32 + \frac{9}{5}t)^\circ \text{F} \quad \begin{cases} \text{水的冰点 } t_F = 32^\circ \text{F} \\ \text{水的沸点 } t_F = 212^\circ \text{F} \end{cases}$$

$$t_F = 100^\circ \text{F} \rightarrow t = 37.8^\circ \text{C}$$

气体的实验定律 理想气体

1、玻意耳定律：一定质量的气体，在温度 T 保持不变时，其压强 P 与体积 V 的乘积是个常量。

$$PV=\text{常量} \quad (m \text{ 与 } T \text{ 不变})$$

2、盖—吕萨克定律：一定质量的气体，在压强 P 保持不变时，其体积 V 与热力学温度 T 成正比。

$$V/T=\text{常量} \quad (m \text{ 与 } P \text{ 不变})$$

3、查理定律：一定质量的气体，在体积 V 保持不变时，其压强 P 与热力学温度 T 成正比。

$$P/T=\text{常量} \quad (m \text{ 与 } V \text{ 不变})$$

理想气体：根据上述实验事实，我们把在任何情况下都能严格遵守上述实验定律的气体称为理想气体

实验表明：无论何种气体，在压强不太大，温度不太低时，都能较好的遵守上述三条定律。

表示理想气体在任一平衡态下各宏观状态参量之间的关系式——理想气体状态方程

四. 理想气体的物态方程

一定质量的理想气体有规律： $\frac{T}{T_3} = \frac{pV}{p_3V_3}$

$$\begin{aligned} pV &= \nu \frac{p_0 V_0}{T_0} T \\ R &= \frac{p_0 V_0}{T_0} \end{aligned} \quad \longrightarrow \quad \begin{cases} pV = \nu RT \\ pV = \frac{m}{M} RT \end{cases}$$

$$R = 8.31 \quad (\text{J}/(\text{mol} \bullet \text{K}))$$

— 普适气体常数

(m — 气体质量, M — 气体摩尔质量, ν — 摩尔数, N_A — 阿伏伽德罗常量,)

各种实际气体，在通常的压强和不太低的温度的情况下，都近似的遵守这个状态方程，

系统内有 N 个分子

1mol任何气体分子中
都有 N_A 个分子

$$N_A = 6.023 \times 10^{23} / \text{mol}$$

$$\gamma = N / N_A$$

玻耳兹曼常数

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

$$PV = \gamma RT$$

$$PV = NkT$$

$$P = \frac{N}{V} kT = nkT$$

$$P = nkT$$

常用形式

理想气体状态方程

$$P = nkT$$

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

$$R = 8.31 \text{ J/K.mol}$$

$$N_A = 6.023 \times 10^{23} / \text{mol}$$

$$k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$$

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

分子数密度

$$k = \frac{R}{N_A}$$

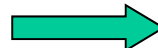
玻耳兹曼常数

四. 理想气体的物态方程

$$\begin{cases} pV = \nu RT \\ pV = \frac{m}{M} RT \end{cases}$$

$$R = 8.31 \quad (\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K}))$$

— 普适气体常数


$$\begin{cases} pV = NkT \\ p = nkT \end{cases}$$

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

— 玻尔兹曼常量

(Boltzmann Constant)

(m — 气体质量, M — 气体摩尔质量, ν — 摩尔数, N_A — 阿伏伽德罗常量, N — 气体分子总数, n — 气体分子数密度)

1) 标况下，空气分子数密度

$$T = 273K \quad P = 1 \text{ atm} = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$$

$$n = \frac{P}{kT} = \frac{1.013 \times 10^5}{1.38 \times 10^{-23} \times 273}$$

$$= 2.69 \times 10^{25} / \text{m}^3 \quad \text{十亿亿亿}$$

$$= 2.69 \times 10^{19} / \text{cm}^3$$

2) 高真空 $P = 10^{-13} \text{ mmHg}$ $T = 273 \text{ K}$

$$n = \frac{P}{kT} = \frac{10^{-13} \times 1.013 \times 10^5}{760 \times 1.38 \times 10^{-23} \times 273}$$
$$= 3.54 \times 10^9 / \text{m}^3 \quad \text{十亿}$$

对象的特征：大量无规运动的粒子组成
以阿佛加德罗常数 $N_A=6 \times 10^{23}$ 计。

与宇宙同时出生 (150亿年前)

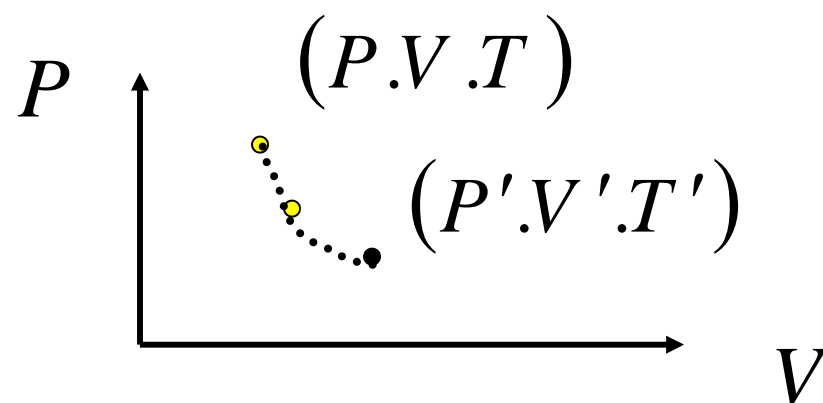
每秒数10个分子

数到现在才数了 10^{-7} mol

地球上全部大气约有 10^{44} 个分子

一个人每次呼吸气体大约是 10^{22} 个分子

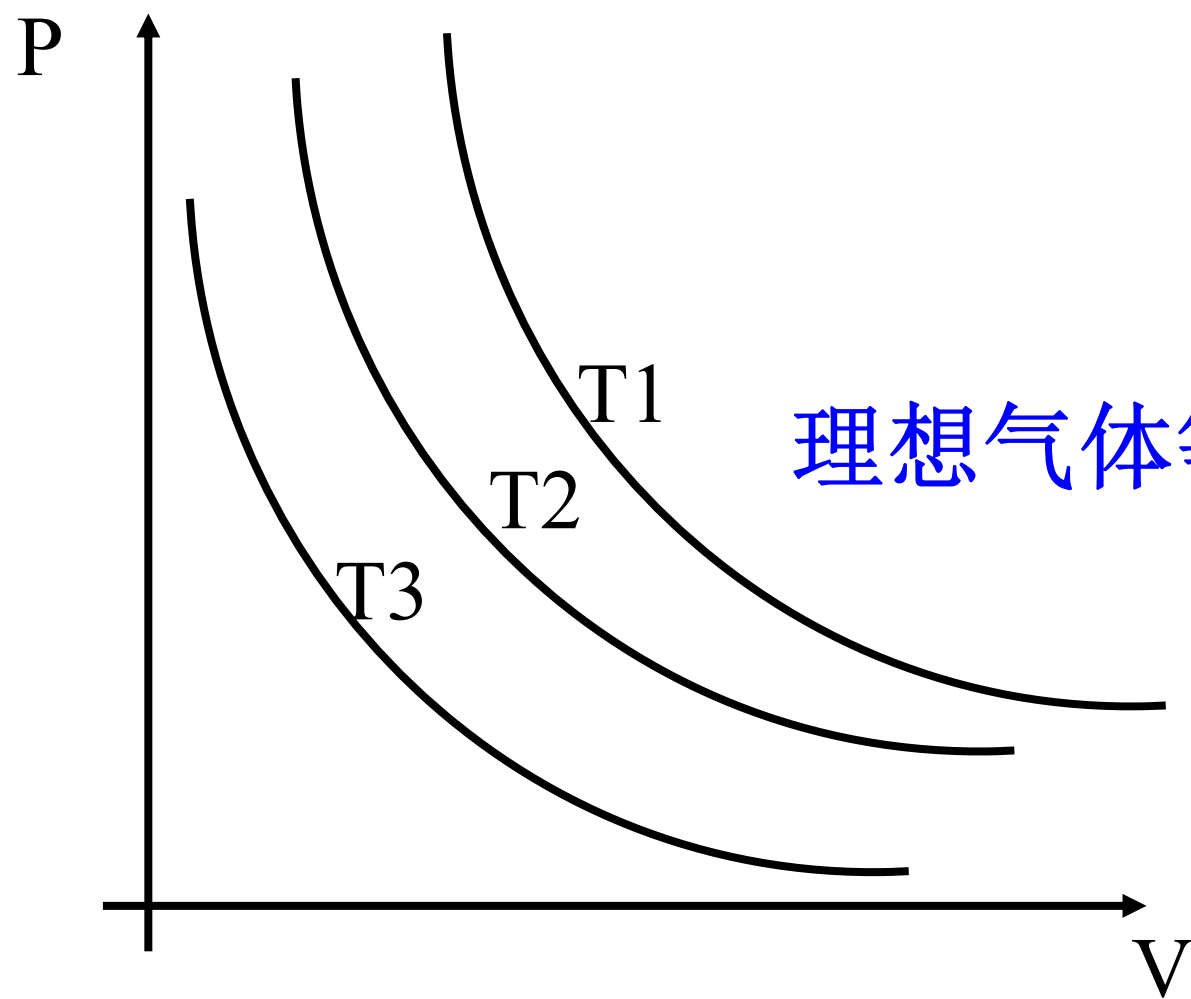
3.状态图：（ P - V 图）



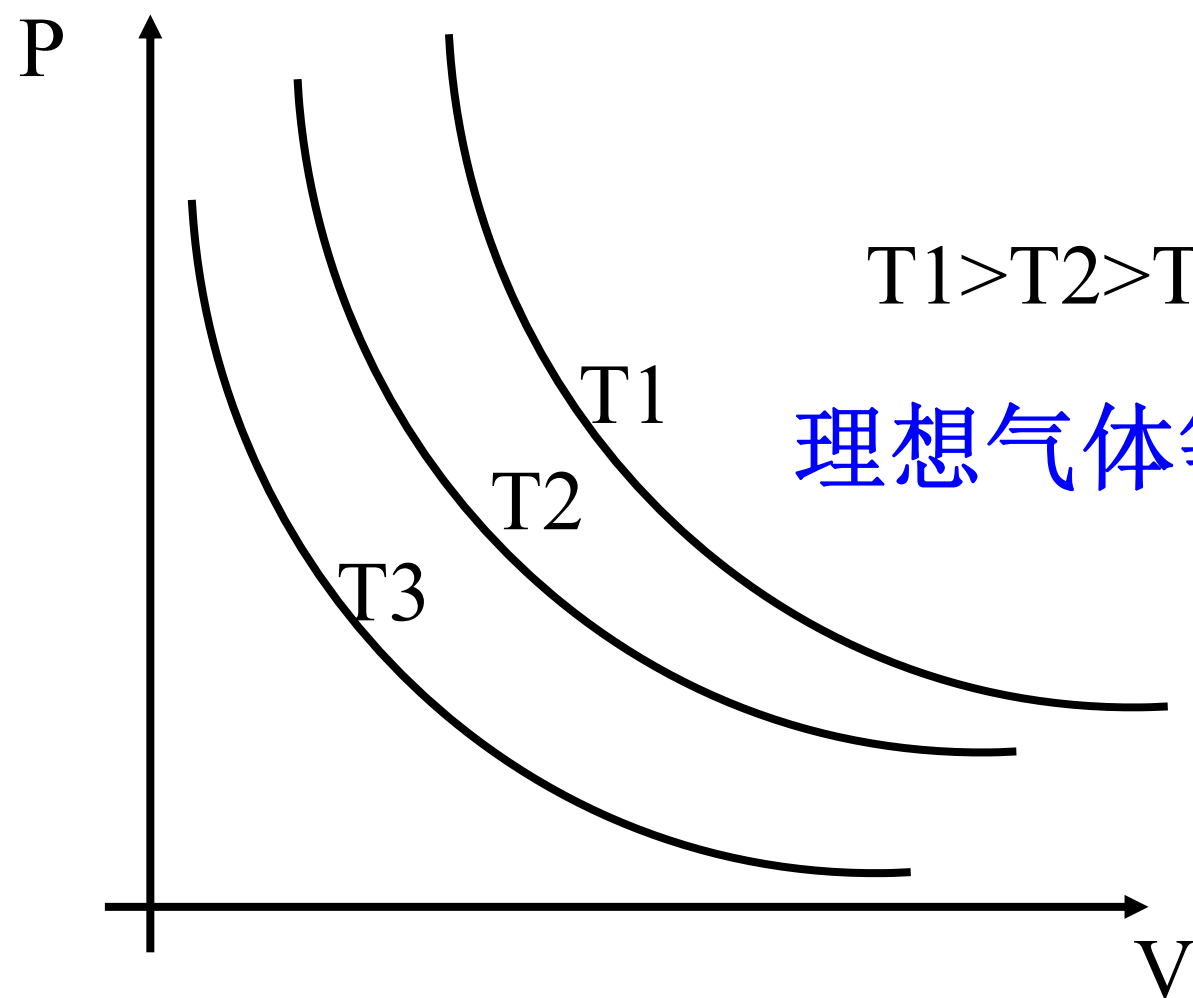
P V 图上一个点代表一个平衡态

一条线代表一个准静态过程

通常还画 P - T 、 T - V 、图



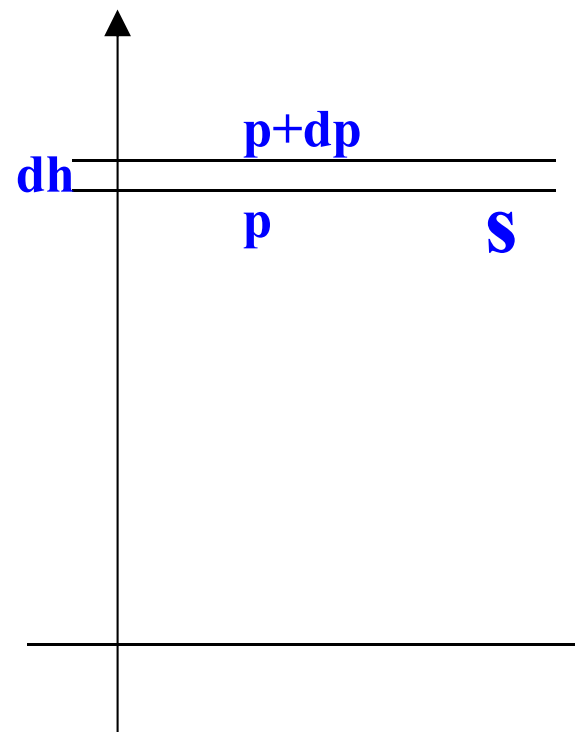
$$pV = \text{const.}$$



$T_1 > T_2 > T_3$
理想气体等温线

$$pV = \text{const.}$$

例. 求大气压强 p 随高度 h 变化的规律。设空气的温度不随高度改变



例. 求大气压强 p 随高度 h 变化的规律。设空气的温度不随高度改变

力学平衡条件 $(p + dp)S + gdm = pS$

$$dm = \rho S dh \quad (p + dp)S + g(\rho S dh) = pS$$

$$dp = -\rho g dh$$

理想气体的物态方程 $\rho = \frac{pM}{RT}$

$$\frac{dp}{p} = -\frac{Mg}{RT} dh$$

$$p = p_0 e^{-\frac{Mg}{RT} h}$$

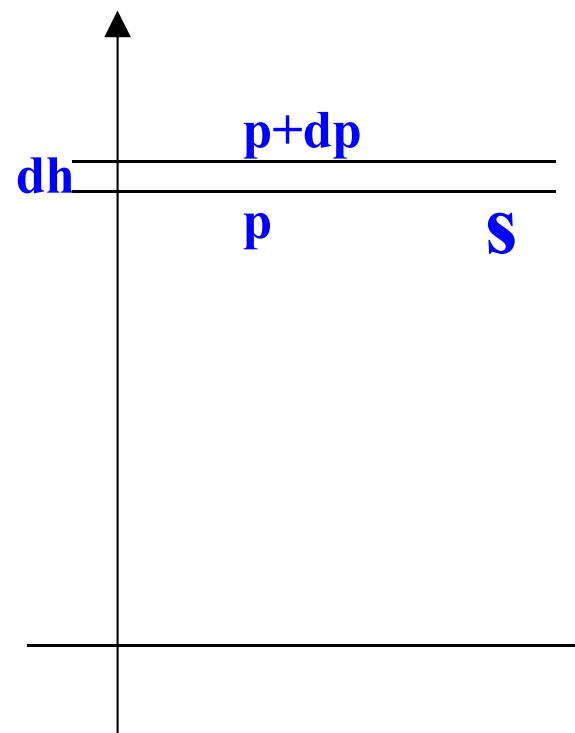
例: $M=29\text{g/mol}$

$T=273$

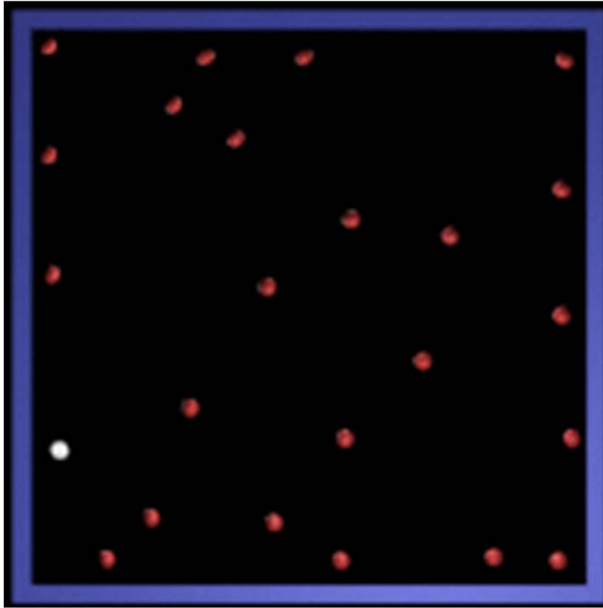
$p_0=1\text{atm}$

$h=8848$

$p=0.33\text{atm}$



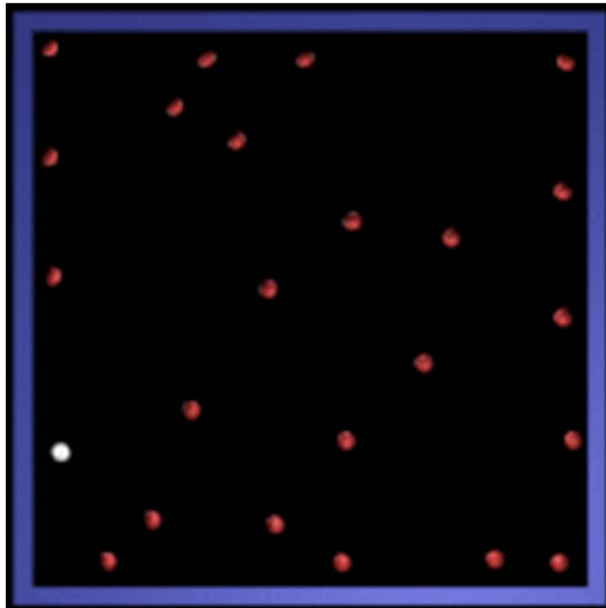
§ 7.5 气体分子的的无规则运动



碰撞在分子运动中是个最活跃的因素，它在气体动理论中占有重要地位：

非平衡 $\xrightarrow{\text{碰撞}}$ 平衡 $\xrightarrow{\text{碰撞}}$ 保持动态平衡

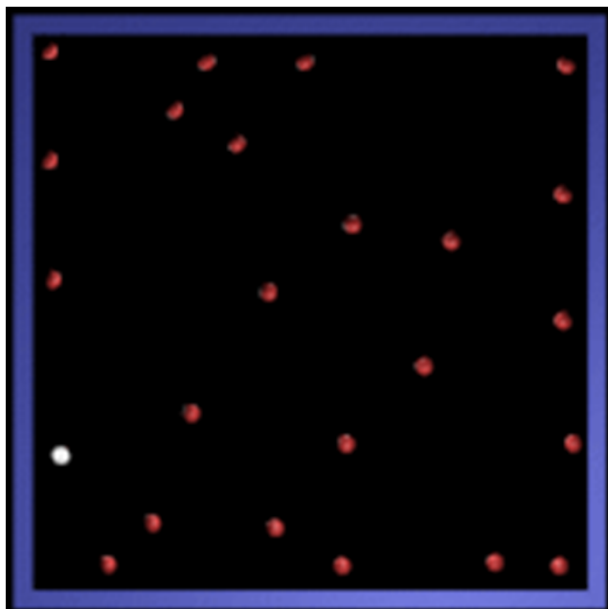
一. 平均碰撞频率与平均自由程的定义



平均碰撞频率(mean
collision frequency)

\bar{z} :

单位时间内一个气体
分子与其它分子碰撞
的平均次数。



λ — 自由程

平均自由程 (mean free path) $\bar{\lambda}$:

气体分子在相邻两次碰撞
间飞行的平均路程 —

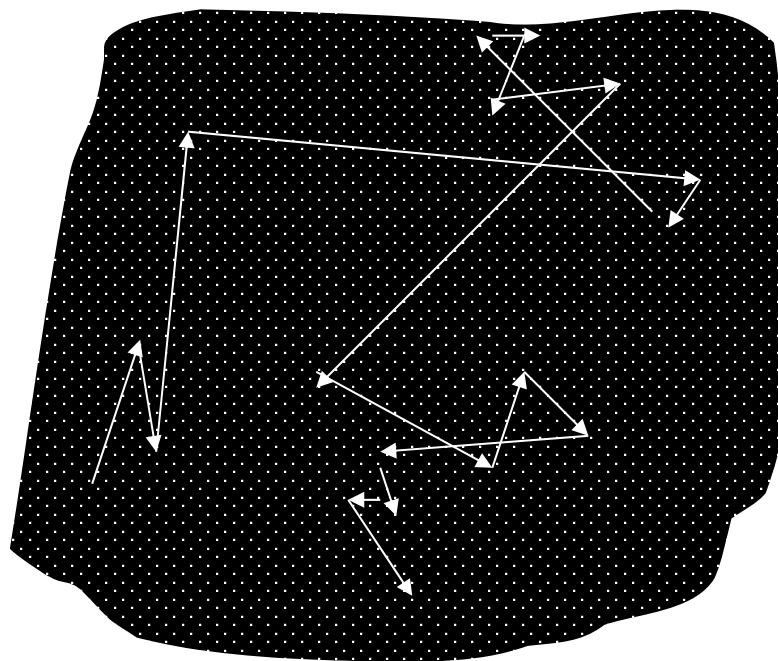
$$\bar{\lambda} = \frac{\bar{v} \Delta t}{\bar{z} \Delta t} = \frac{\bar{v}}{\bar{z}}$$

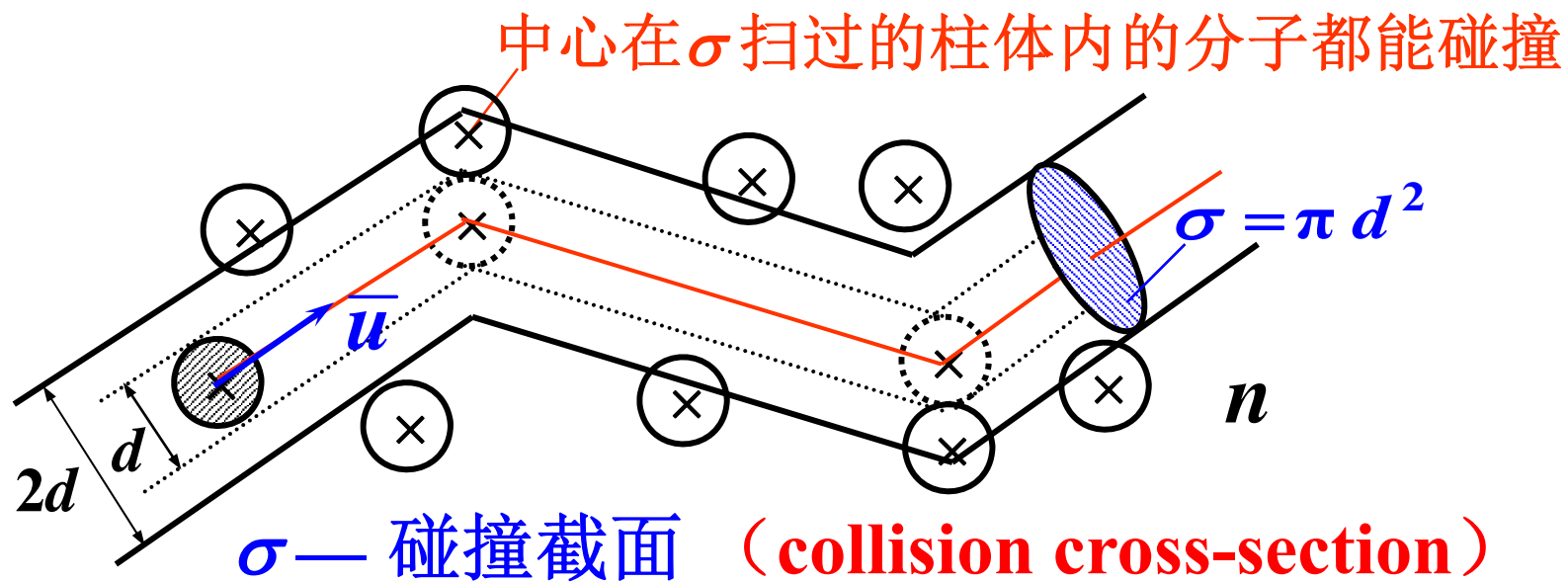
二. 平均碰撞频率与平均速率的关系

理想气体，在平衡态下

并假定：

- (1) 只有一种分子；
- (2) 分子可视作直径为 d 的刚球；
- (3) 被考虑的分子以平均相对速率 \bar{u} 运动，其余的分子静止。





σ 单位时间内扫过的体积 $= \sigma \cdot \bar{u}$

$\therefore \bar{z} = \sigma \bar{u} \cdot n = \pi d^2 n \bar{u}$

碰撞夹角 θ 有各种可能 (0 — 180°)

$\bar{\theta} = 90^\circ \rightarrow \bar{u} = \sqrt{2} \bar{v}$

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

谢谢大家！