

第三篇

热学

(Heat)

第12章
气体动理论

第13章
热力学基础

引言:

研究内容:

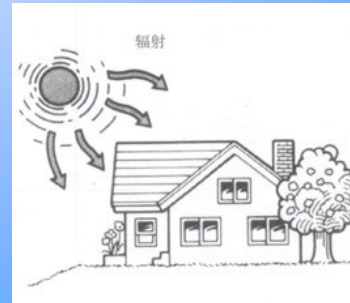
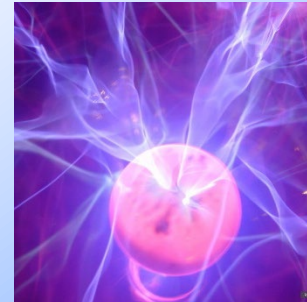
热运动——物体中分子或原子的无规则运动。

热学是研究物体热运动的性质和规律的学科。

研究对象:

由大量**微观**粒子组成的**宏观**物体,

有固体、液体、气体, 等离子体, 辐射场……



研究方法：

宏观理论（热力学）：实验的方法，通过归纳和推理。



微观理论（统计物理）：统计的方法，集体效应。



初级形式称为**气体动理论**

本篇以研究理想气体的热运动为主。

第12章 气体动理论

Kinetic Theory of Gasses

第1节 热力学系统和平衡态

第2节 理想气体状态方程与微观模型

第3节 理想气体的压强和温度 (重点1)

第4节 能均分定理 理想气体的内能 (重点2)

第5节 气体分子的速度分布 (重点3)

第6节 分子的平均碰撞次数 平均自由程

第7节 偏离平衡态

第1节 热力学系统和平衡态

Thermodynamic System & Equilibrium State

一、热力学系统与外界

1. 热力学系统（简称系统）

由大量微观粒子所组成的宏观物体

2. 系统的外界（简称外界）

能够与所研究的系统发生相互作用的其它物体

3. 系统分类

孤立系统——与外界没有任何相互作用

封闭系统——与外界有能量交换但没有物质交换

开放系统——与外界既有能量交换又有物质交换

二、宏观量与微观量

宏观量：反映整个系统宏观性质的物理量

如：体积 V , 压强 p , 温度 T , 热容量 C 等

微观量：表征单个分子特征的物理量

如：分子的大小 d 、位置 r 、速度 v 、质量 m 、能量 ε 等。

关 系：个别分子的运动无规则，大量分子的集体表现一定存在一种统计规律。

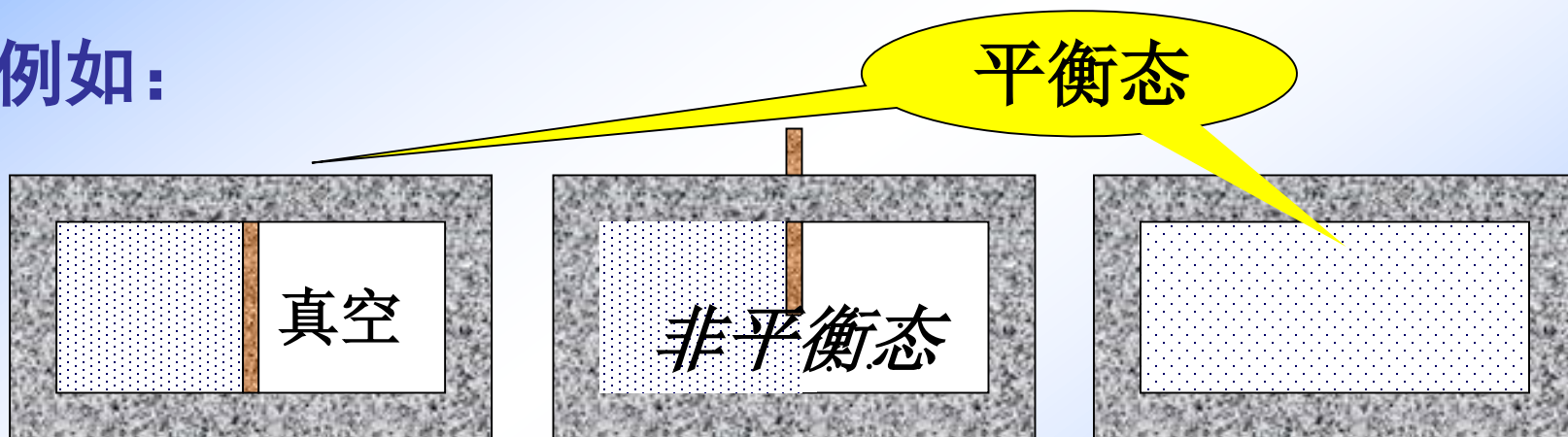
用统计的方法，可以求出大量分子的微观量的统计平均值，并用来解释实验中所测得的宏观性质。

三、热力学平衡态与状态参量

一个系统在不受外界影响的条件下, 若它的宏观性质不再随时间变化, 则此系统处于**热力学平衡态**。

平衡态是系统宏观状态的一种特殊情况

例如:



理想气体绝热自由膨胀

注意

1° 一个孤立系统总是处于平衡态

2° 平衡态实质上只是一种热动平衡

状态参量 —— 确定平衡态的宏观性质的物理量。

常用的状态参量有五类：

几何参量（如：气体体积 V ）

力学参量（如：气体压强 p ）

热学参量（如：气体温度 T ）

化学参量（如：混合气体各化学组分的质量 m_i
和摩尔数 ν_i 等）

电磁参量（如：电场强度和磁场强度，电极化
强度和磁化强度等）

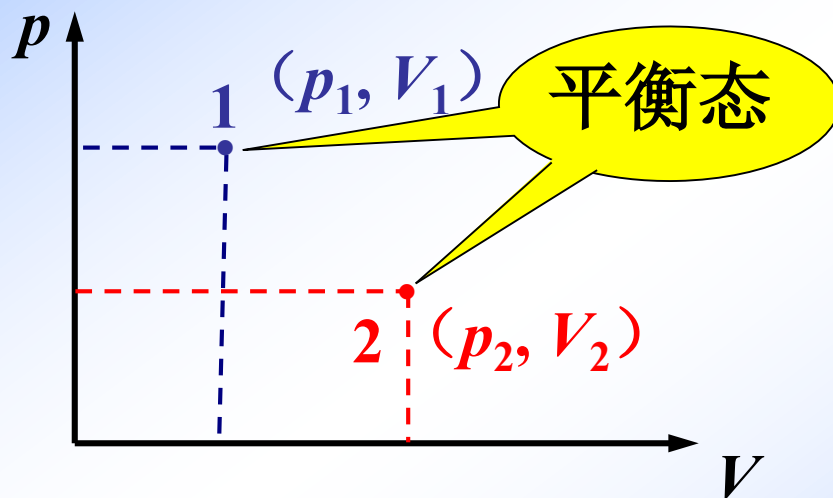
在气体的温度较高、压强较小时，其平衡态只需要两个独立参量来描述，如系统状态方程可表述为：

$$T = T(p, V) \text{ 或 } p = p(T, V) \text{ 或 } V = V(p, T)$$

状态参量空间

以独立的状态参量为坐标构成一个空间

例如：

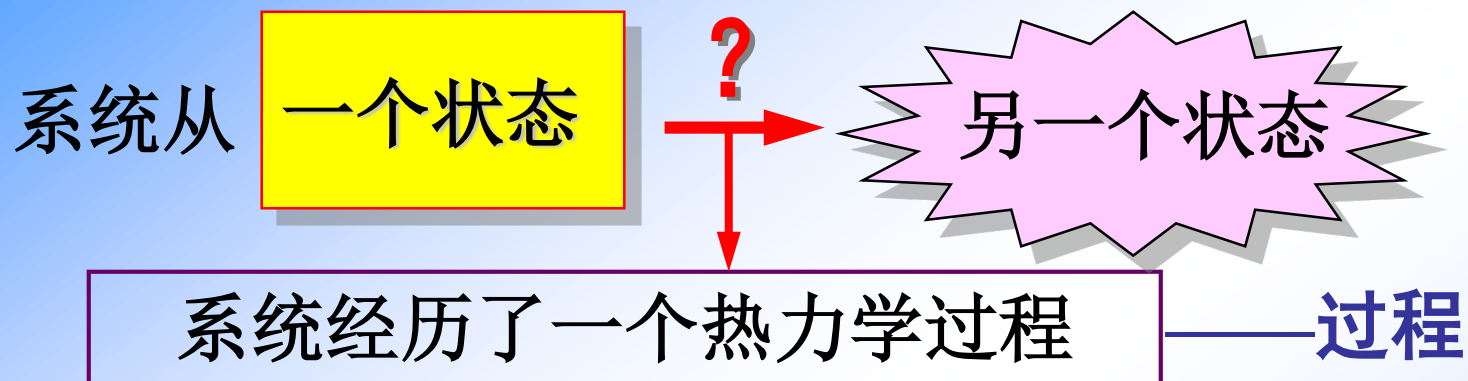


结论

1° 系统的每一个平衡态都与状态参量空间的一个点对应起来

2° 非平衡态不能用状态参量空间的点来描述

四、准静态过程 过程曲线

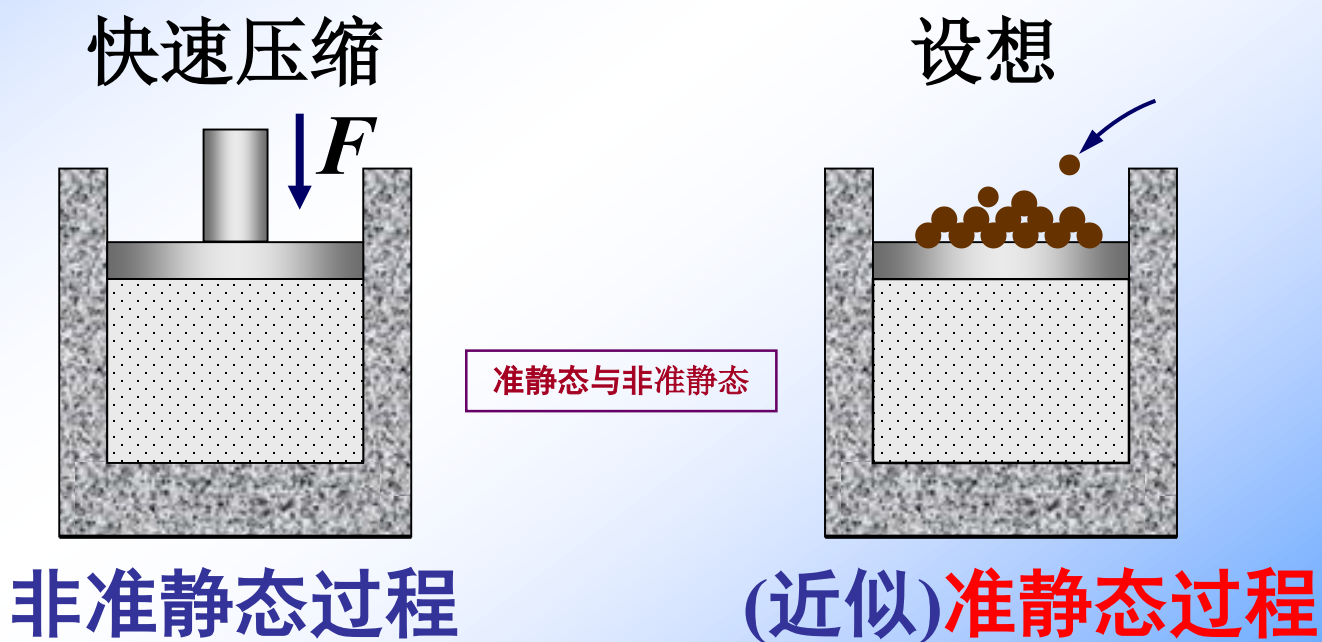


若系统在变化过程中经历的每一状态都无限接近于平衡态，则此过程称为**准静态过程**；否则为**非准静态过程**。

实际的热力学过程中任一状态都不是平衡态

一些极缓慢进行的过程可近似视为**准静态过程**

例如：一实际汽缸的气体作为系统，当活塞运动中气体被压缩，使系统在整个压缩过程中经历了一系列非平衡状态。



状态图与过程曲线

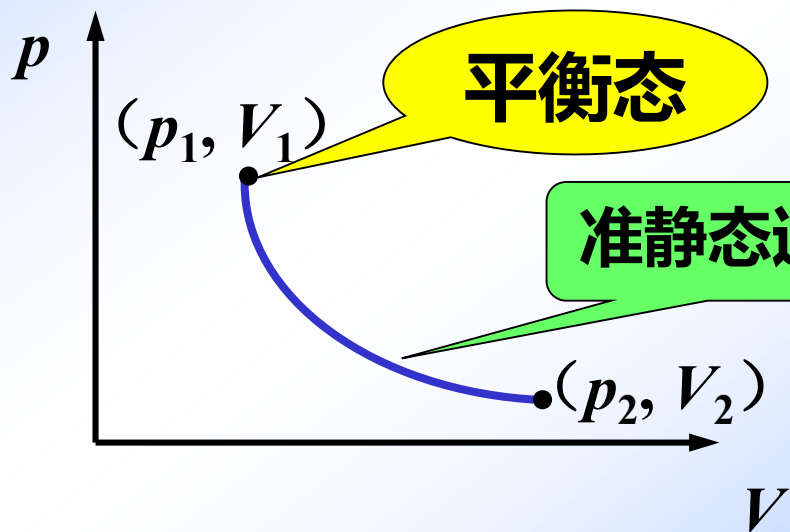
系统处于平衡态时, 其状态参量满足一定的关系

$f(p, V, T) = 0$ —— 状态方程 $\xrightarrow{\text{作图}}$ 状态图

例如: 理想气体的状态方程—— $pV = \frac{m}{M}RT$

常用状态图有 p - V 图, p - T 图, V - T 图.

若系统经历的是准静态过程, 则可将其经历的所有状态在状态图上表示出来, 所连成的曲线叫**过程曲线**.



注意

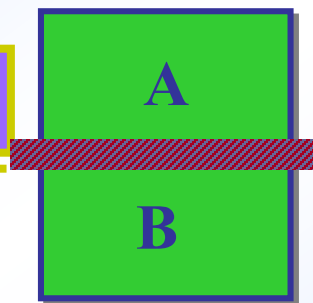
1° 非平衡态不能用状态参量描述

2° 非准静态过程不能用过程曲线描述

五、温度与热力学第零定律

将两个分别处于平衡态的系统A和B
用一刚性隔板分隔开

绝热板

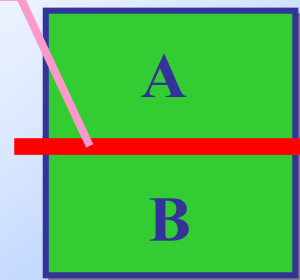


若隔板为“绝热板”

则A和B两系统的状态可
独立地变化而互不影响

若隔板为“导热板”

导热板



则A, B两系统状态不能独立地改变, 一个系统状态的变化会引起另一系统状态的变化.

比如: {

- 热量由A传给B $\longrightarrow T_A > T_B$
- 热量由B传给A $\longrightarrow T_A < T_B$
- 无热量传递(热平衡) $\longrightarrow T_A = T_B$

有热量交换的两个系统间的相互作用叫**热接触**

系统**A**和**B**处在各自的平衡态 $\xrightarrow{\text{热接触}}$ 状态都变化

$\xrightarrow[\text{最终}]{\text{热交换}}$ **热平衡**(都到达新的平衡态, 且不再变化)

标志: 两系统之间的热交换停止

如果两个热学系统中的每一个系统都与保持在某一平衡态的第三个热学系统处于热平衡, 则此两热学系统必定也处于热平衡, 这个结论称为**热力学第零定律**.

推论

1° 处于热平衡的两系统具有共同的宏观性质 \rightarrow **温度**

2° 一切互为热平衡的系统, 都具有相同的温度

说明

1° 温度是热学中特有的物理量，它决定一系统是否与其它系统处于热平衡。

2° 温度的概念与人们日常对温度的理解（温度——冷热程度）是一致的。

热力学第零定律还是制造温度计的依据

温标 —— 温度的数字表示法

常用的两种温标

摄氏温标：水的三相点 $t = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$

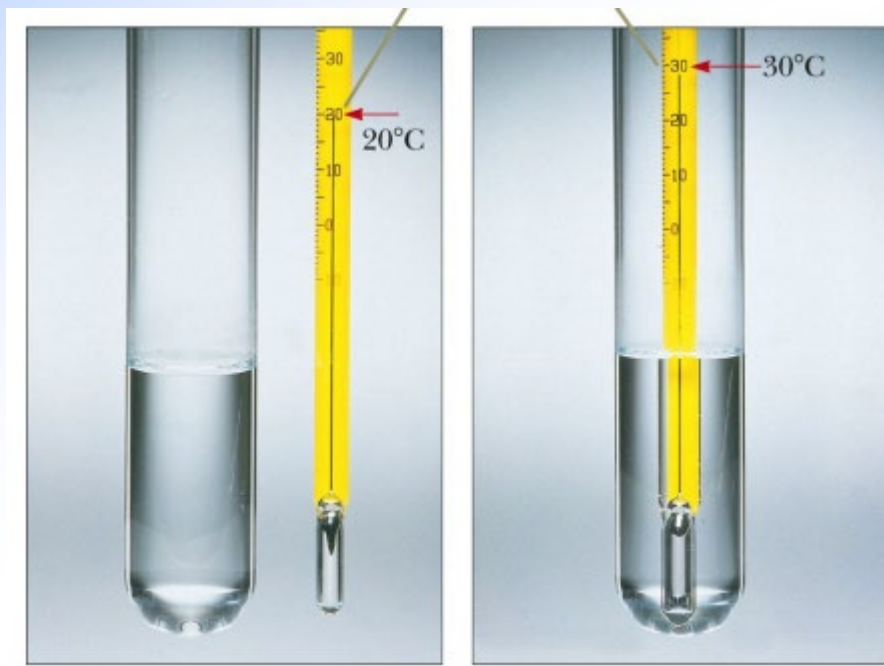
热力学温标：与任何物质的性质无关

$$T = t + 273.15\text{ K}$$

SI单位制

常见温度测量方法

- 膨胀测温法（体积、长度）
玻璃液体温度计、双金属温度计等
- 电学测温法
热电偶温度计、电阻温度计等
- 磁学、声学等测温法



科普： 常见温度的范围

水的沸点：----- 100 ----- 373

水凝固点：----- 0 ----- 273

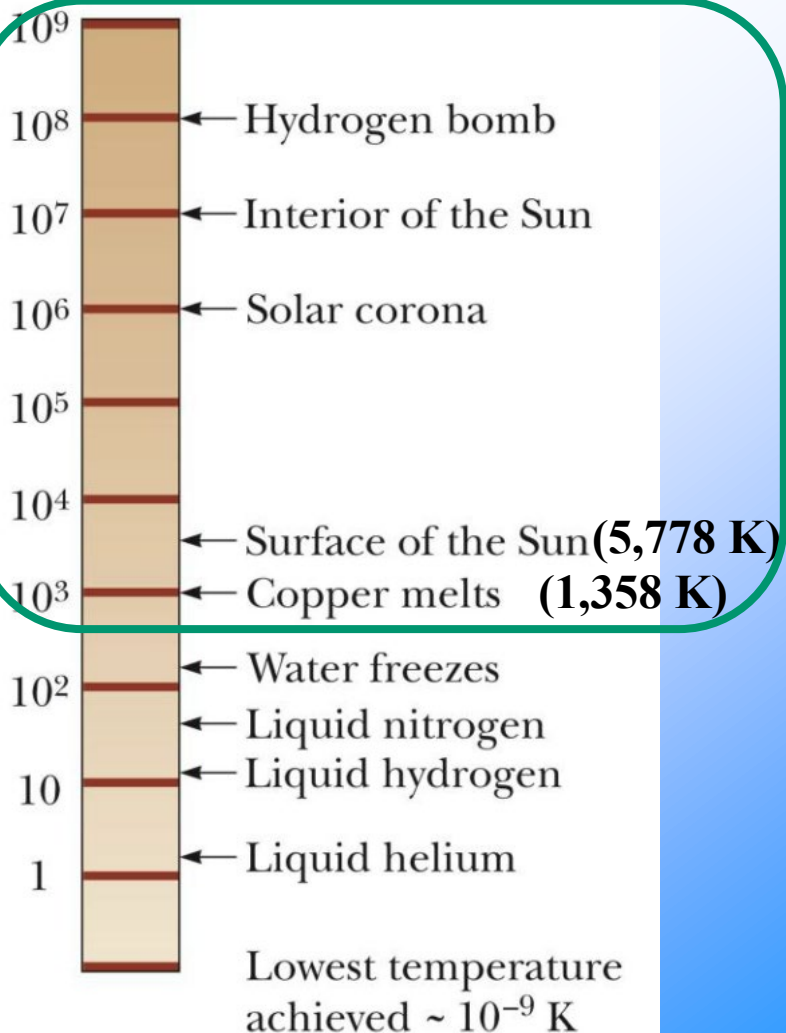
二氧化碳
凝固点：----- -78 ----- 195

液氮沸点：----- -196 ----- 77

绝对零度：----- -273 ----- 0

Note that the scale is logarithmic.

Temperature (K)



科普:

Latest Weather at Gale Crater

Curiosity is taking daily weather measurements at Gale Crater in the southern hemisphere of Mars, near the equator. At this location, it's currently late summer.

Sol 3641

November 3, 2022

High: -18° F | C

Low: -68° F | C

Sol 3635

Oct. 28

High: -11°C

Low: -68°C

Sol 3636

Oct. 29

High: -7°C

Low: -68°C

Sol 3637

Oct. 30

High: -7°C

Low: -69°C

Sol 3638

Oct. 31

High: -9°C

Low: -69°C

Sol 3639

Nov. 1

High: -14°C

Low: -70°C

Sol 3640

Nov. 2

High: -17°C

Low: -70°C

Sol 3641

Nov. 3

High: -18°C

Low: -68°C

地球

表面温度	最低	平均	最高
<u>绝对温标</u>	184 K	288 K	330 K
<u>摄氏温标</u>	-89.2° C	15 ° C	56.7 ° C

火星

表面温度	最低	平均	最高
<u>绝对温标</u>	130 K	210 K	308 K
<u>摄氏温标</u>	-143° C	-63° C	35 ° C

第2节 理想气体状态方程与微观模型

State Equation & Microscopic Model of Ideal Gas

一、理想气体

一定质量的气体在温度不变时, 压强与体积的乘积为常量(玻意耳定律):

$$pV = C$$

对于不同的温度, C 的值不同。

各种气体均近似遵守该定律, 且压强越小、温度越高与此定律符合得越好。

严格遵守玻意耳定律的气体称为**理想气体**, 它是实际气体在压强趋于零时的极限情况, 是一种**理想模型**。

二、理想气体的状态方程

根据实验及玻意耳定律

对一定质量的气体系统，当它从 (p_1, V_1, T_1)
 $\rightarrow (p_2, V_2, T_2)$ 时，有

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} = \text{常量}$$

对气体的标准状态 (p_0, V_0, T_0) ，则有

$$\frac{pV}{T} = \frac{p_0 V_0}{T_0} = \nu \frac{p_0 v_0}{T_0}$$

摩尔体积



$$\frac{pV}{T} = \nu \frac{p_0 v_0}{T_0}$$

$$v_0 = 22.41 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{mol}$$

$$R = \frac{p_0 v_0}{T_0} = 8.31 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$$

——普适气体常数

$$\nu = \frac{m}{M}$$

$$pV = \nu RT$$

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

ν ---摩尔数

M 气体分子摩尔质量

理想气体状态方程

状态方程的另一表示

$$pV = \nu RT$$


1mol 任何气体有 N_A 个分子

$N_A = 6.022 \times 10^{23} / \text{mol}$ ——阿伏伽德罗常数

$m_f = M / N_A$ ——每一个气体分子的质量

设 V 中有 N 个气体分子，则

$$\nu = \frac{N}{N_A}, \quad pV = \frac{N}{N_A} RT = N \frac{R}{N_A} T$$

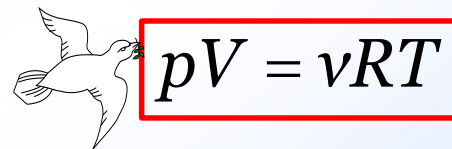
玻耳兹曼常数

$$pV = NkT$$

或 $p = nkT$

$$\left\{ \begin{array}{l} k = \frac{R}{N_A} = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J / K} \\ n = \frac{N}{V} \text{ ——分子数密度} \end{array} \right.$$

例.一篮球在温度 T_0 为 0°C 时打入空气，知道球内压强 p_0 为 1.5atm
(1)在球赛结束时，篮球的温度升到了 30°C ，这时球内的压强为多少？(2)在球赛过程中，球被刺破了一个小洞而漏气，当比赛结束后，篮球的温度恢复到 0°C 时，漏掉的气体是原有空气的百分之几？



解： (1) 设球体的体积为 V_0 ，则

$$\frac{p_0 V_0}{T_0} = \frac{p V_0}{T_0 + 30} \Rightarrow p = \frac{273 + 30}{273} p_0 = 1.66\text{atm}$$

(2) 当篮球温度恢复时， $p=1\text{atm}$

$$pV = \frac{N}{N_A} RT$$

$$\text{恢复后: } N' = \frac{N_A p V_0}{RT_0} \quad \text{漏气前: } N = \frac{N_A p_0 V_0}{RT_0}$$

$$\frac{N - N'}{N} = \frac{p_0 - p}{p_0} = \frac{1.5 - 1}{1.5} = 33.3\%$$

例1 设想太阳是一个由氢原子组成的密度均匀的理想气体系统,若已知太阳中心的压强为 $p=1.35\times 10^{14}$ Pa, 试估计太阳中心的温度(已知太阳质量为 $m=1.99\times 10^{30}$ kg; 太阳半径为 $R=6.96\times 10^8$ m; 氢原子质量为 $m_H=1.67\times 10^{-27}$ kg)

解: 分子数密度为
$$n = \frac{N}{V} = \frac{m / m_H}{4\pi R^3 / 3} = \frac{3m}{4\pi m_H R^3}$$

$$p = nkT$$

$$\therefore T = \frac{p}{nk} = \frac{4\pi m_H R^3 p}{3mk}$$

$$\begin{aligned} &= \frac{4 \times 3.14 \times 1.67 \times 10^{-27} \text{ kg} \times (6.96 \times 10^8 \text{ m})^3 \times 1.35 \times 10^{14} \text{ Pa}}{3 \times 1.99 \times 10^{30} \text{ kg} \times 1.38 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}} \\ &= 1.16 \times 10^7 \text{ K} \end{aligned}$$

三、理想气体的微观模型

- 1) 分子本身大小忽略不计
- 2) 除碰撞外，分子间相互作用忽略不计
- 3) 分子所受重力忽略不计
- 4) 分子间、分子与器壁间的碰撞是弹性碰撞
- 5) 分子运动遵从经典力学规律

这是由气体的共性抽象出来的一个理想模型

◦ 在什么条件下，此模型与实际情况符合得很好？（ D ）

- A. 压强很大、温度很低
- B. 压强很小、温度很低
- C. 压强很大、温度很高
- D. 压强不太大、温度不太低

对理想气体的统计假设

- (1) 平衡态时, 气体分子在容器中的空间分布是均匀的。因而, 气体分子数密度 n 处处相同。
- (2) 平衡态时, 分子沿各个方向运动的机会是均等的。

由于分子的速度在哪一个方向上都不占优势, 各个方向都是平权的, 故

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

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

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

$$\overline{v_x^2} = \frac{\sum_i N_i v_{ix}^2}{N} = \frac{\sum_i n_i v_{ix}^2}{n}$$

$$\overline{v_y^2} = \frac{\sum_i N_i v_{iy}^2}{N} = \frac{\sum_i n_i v_{iy}^2}{n}$$

$$\overline{v_z^2} = \frac{\sum_i N_i v_{iz}^2}{N} = \frac{\sum_i n_i v_{iz}^2}{n}$$

第3节 理想气体的压强和温度

pressure & Temperature of Ideal Gas

压强是如何产生的

?

气体分子

器壁

大量气体分子对单位面积器壁持续不断的碰撞产生集体效应



密集雨点对雨伞的冲击力