

# 大学物理（一）

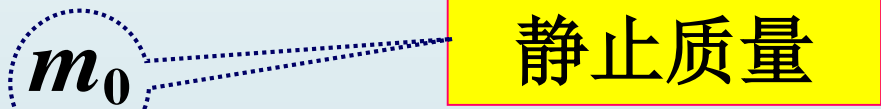
任课老师：蔡林  
cailin@hust.edu.cn

### 三、相对论质量、动量、能量

#### 1.相对论质量

相对论认为：质量是一个与参考系有关的物理量，在不同的惯性系所测得的同一物体的质量是不同的。

理论分析和实验事实表明：

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{u}{c}\right)^2}}$$


静止质量

- $m$ : 当物体相对于观察者以速度  $u$  运动时的质量;
- $m_0$ : 当物体相对于观察者静止 ( $u=0$ ) 时的质量(静止质量)。

**注**

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{u}{c}\right)^2}}$$

——质速关系式

1) 同一物体速度  $u$  不同, 则质量不同。

2)  $u \ll c$  则  $m = m_0$  —— 牛顿力学

例:  $v = 10^4 \text{ m/s}$   $\frac{m - m_0}{m_0} \approx \frac{1}{2} \left(\frac{v}{c}\right)^2 \approx 10^{-10}$

但是: 当电子  $v = 0.98c$  时,  $m = 5.03m_0$  **例**

3)  $u = 0$   $m = m_0$

$u = c$   $m \rightarrow \infty$  则必有  $m_0 = 0$ 。

速度为光速的物体, 其静止质量  $m_0$  只能是零。  
如: 光子、中微子等。

$u > c$   $m$  为虚数 —— 无意义

## 2. 相对论动量和动力学方程

动量: 
$$\vec{P} = m\vec{v} = \frac{m_0}{\sqrt{1 - (\frac{v}{c})^2}} \vec{v}$$

动力学方程:

$$\vec{F} = \frac{d\vec{P}}{dt} = m \frac{d\vec{v}}{dt} + \vec{v} \frac{dm}{dt} = \frac{d}{dt} \left( \frac{m_0}{\sqrt{1 - (\frac{v}{c})^2}} \vec{v} \right)$$

可以证明, 上式对洛仑兹变换是不变的, 对任何惯性系都适用。当  $v \ll c$  时, 回到经典力学。

### 3. 相对论动能

动能定理:  $\Delta E_K = \int \vec{F} \cdot d\vec{r}$

若物体从静止

$$\begin{aligned}\vec{v} \cdot d\vec{v} &= (v_x \vec{i} + v_y \vec{j} + v_z \vec{k}) \cdot (dv_x \vec{i} + dv_y \vec{j} + dv_z \vec{k}) \\ &= v_x dv_x + v_y dv_y + v_z dv_z = \frac{1}{2}(dv_x^2 + dv_y^2 + dv_z^2)\end{aligned}$$

$$E_K = \int_0^v \vec{F} \cdot d\vec{r} = \frac{1}{2} d(v_x^2 + v_y^2 + v_z^2) = \frac{1}{2} dv^2$$

$$= \int_0^v \vec{v} \cdot (\vec{v} dm + m d\vec{v}) = \int_0^v (v^2 dm + m \vec{v} \cdot d\vec{v})$$

$$= \int_0^v (v^2 dm + \frac{1}{2} m dv^2)$$

$$= \int_0^v c^2 dm = mc^2 - m_0 c^2$$

$$E_K = mc^2 - m_0 c^2$$

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

$$\Rightarrow m^2 c^2 = m^2 v^2 + m_0^2 c^2$$

$$\begin{aligned}c^2 dm &= v^2 dm + m v dv \\ &= v^2 dm + \frac{1}{2} m dv^2\end{aligned}$$



相对论动能:  $E_K = mc^2 - m_0^2 c^2$

## 讨论

1) 若  $v \ll c$   $m = m_0 \frac{1}{\sqrt{1 - (\frac{v}{c})^2}}$

$$[1 - (\frac{v}{c})^2]^{-\frac{1}{2}} = 1 + \frac{1}{2}(\frac{v}{c})^2 + \dots$$

$$E_K = mc^2 - m_0 c^2 = m_0 c^2 \left[ \frac{1}{\sqrt{1 - (\frac{v}{c})^2}} - 1 \right] = m_0 c^2 \cdot \frac{1}{2} (\frac{v}{c})^2$$

即:  $E_K = \frac{1}{2} m_0 v^2$

2) 从  $E_K = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - (\frac{v}{c})^2}} - m_0 c^2$  可得:  $v^2 = c^2 \left\{ 1 - \frac{1}{(1 + \frac{E_K}{mc^2})^2} \right\}$

在外力做功增大时,  $v$  增大, 无论  $E_K$  增到多大  $v < c$ 。

**$c$  是物体速率的极限**

## 4. 相对论能量



$$\text{相对论动能: } E_K = mc^2 - m_0c^2$$

相对论意义上的总能量:  $E = mc^2 = E_K + m_0c^2$

$$E_0 = m_0c^2 \quad \text{—— 静止能量}$$

**结论:**

$$E = mc^2 \quad \text{—— 相对论质能关系}$$

- 1) 质量的大小同时标志能量的大小。
- 2)  $n$ 个粒子系统, 若无外力影响系统的能量守恒。

$$\text{即: } \sum_i^n E_i = \sum_i^n m_i c^2 = \text{常量}$$

$$c = \text{常量, 则: } \sum_i^n m_i = \text{常量} \rightarrow \text{质量守恒}$$

注: 静止质量不一定守恒。例: 电子对的湮灭。

$$3) \text{ 由 } E = mc^2 \text{ 可得: } \Delta E = \Delta m c^2$$

**例：**在一种核聚变反应中（放出中子）： ${}_1^2\text{H}+{}_1^3\text{H}\rightarrow{}_2^4\text{He}+{}_0^1\text{n}$   
已知各原子核的静止质量： $m_D=3.3437\times10^{-27}\text{kg}$ ,

$$m_T=5.00\times10^{-27}\text{kg}, m_{He}=6.64\times10^{-27}\text{kg},$$

$$m_n=1.67\times10^{-27}\text{kg}。求这一反应释放的能量。$$

**解：**反应前后质量的改变为

$$\Delta m_0=(m_D+m_T)-(m_{He}+m_n)=0.0311\times10^{-27}\text{kg}$$

相应释放的能量：

$$\Delta E = \Delta m_0 c^2 = 0.0311\times10^{-27} \times 9\times10^{16} = 2.799\times10^{-12}\text{J}$$

1kg这种核燃料所释放的能量为：

$$\frac{\Delta E}{m_D+m_T} = \frac{2.799\times10^{-12}}{8.3486\times10^{-27}} = 3.35\times10^{14}\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$$

相当于每公斤  
汽油燃烧时所  
放出的热量

$$4.6\times10^7\text{J/kg}$$

的728万倍 8

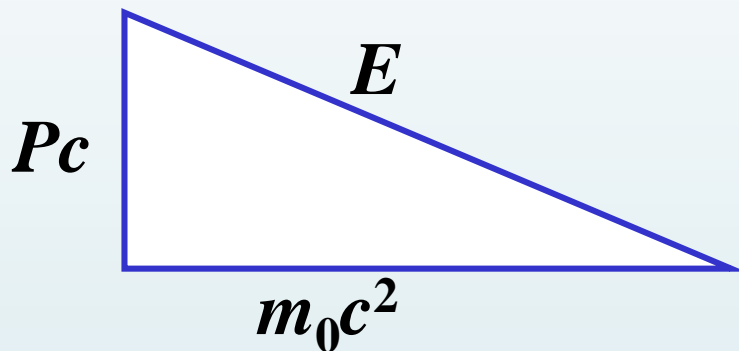


## 5. 相对论中能量与动量的关系

从  $E=mc^2$ ,  $P=mv$  及  $m=\frac{m_0}{\sqrt{1-(\frac{v}{c})^2}}$

可得:  $E^2=P^2c^2+m_0^2c^4$

$E^2=P^2c^2+m_0^2c^4$  的意义:



(1) 对光子:  $E^2=p^2c^2$

光的粒子性  $\left\{ \begin{array}{l} P=\frac{E}{c} \\ m=\frac{E}{c^2} \end{array} \right.$

光是粒子, 可用  
 $m$ 、 $E$ 、 $P$  来描述。

相对论揭示了光的物质性。

(2)  $E=\pm\sqrt{P^2c^2+m_0^2c^4}$ , 负号表示自由粒子有负能量状态 (反粒子、反物质)。

	经典物理	相对论
长度	绝对的，与参考系无关	相对的，长度测量与参考系有关
时间	绝对的，与参考系无关	相对的，时间测量与参考系有关
质量	绝对的，与运动速度无关	与速度有关 $m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - (\frac{v}{c})^2}}$
动量	与速度成正比 $\vec{P} = m\vec{v}$	与速度的关系较复杂 $\vec{P} = \frac{m_0}{\sqrt{1 - (\frac{v}{c})^2}} \vec{v}$
动能	与速度的平方成正比 $E_k = \frac{1}{2}mv^2$	动能与速度的关系较复杂 $E_k = E - E_0$ $= m_0c^2(\frac{1}{\sqrt{1 - (\frac{v}{c})^2}} - 1)$

# 质能方程

浮世叁千问 

# 第三篇

## 热学

### *(Thermology)*



**热学**：研究物质**热现象**的规律及其应用的学科。

**热现象**：物质与**温度**有关的物理性质的变化。

**热现象**是物体中**大量分子或原子无规则运动**（**热运动**）的集体表现。

## 一、热现象的普遍性

### 1. 日常生活

恒定的体温，烧开水，烤土豆，从游泳池出来。。。

冰箱、空调、暖气、热水瓶。。。

### 2. 科学方面

基础物理、化学、生命科学等学科中独立的一部分。

应用：机械工程、低温、真空、材料性质等。

## 二、热学的发展

### 1. 17世纪末到19世纪中叶

**实验和观察事实的积累；热的本性的研究和争论。**

### 2. 19世纪中叶到19世纪70年代末

**唯象热力学和气体动理论的发展。**

### 3. 19世纪70年代末至20世纪初

**统计热力学**

### 4. 20世纪30年代起

**量子统计物理和非平衡态理论**

## 研究对象：

由大量微观粒子组成的宏观物体，  
如：固体、液体、**气体**、等离子体 .....

## 研究内容：

研究物体**热运动**的性质和规律。

热运动 —— 大量分子的**无规则**运动。

## 研究方法：

{ 宏观理论：实验的方法（热力学）

{ 微观理论：统计的方法（统计物理）

统计物理的初级形式称为**气体动理论**。

**Kinetic Theory of Gases**

**本篇以研究理想气体的热运动为主。**



# 第9章 气体动理论

几个基本概念

## **a.** 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。

## **b.** 系统分类

（与外界没有任何相互作用）

**孤立系统**——与外界既无能量交换又无物质交换

**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

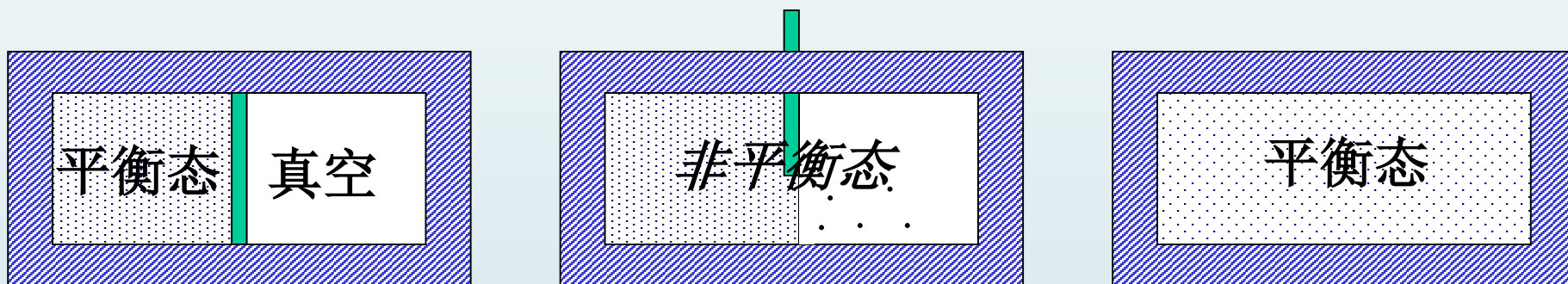




## c. 热力学平衡态 —— 理想状态

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

**例：平衡态与非平衡态**(气体自由膨胀过程的初态、末态及中间状态)。



**注意：**平衡态实质上是一种热动平衡。

是宏观上的寂静状态，组成系统的微观粒子仍处于不停的无规运动之中，只是它们的统计平均效果不随时间变化，因此热力学平衡态是一种动态平衡，称之为**热动平衡**。



## d. 准静态过程

系统： 状态A

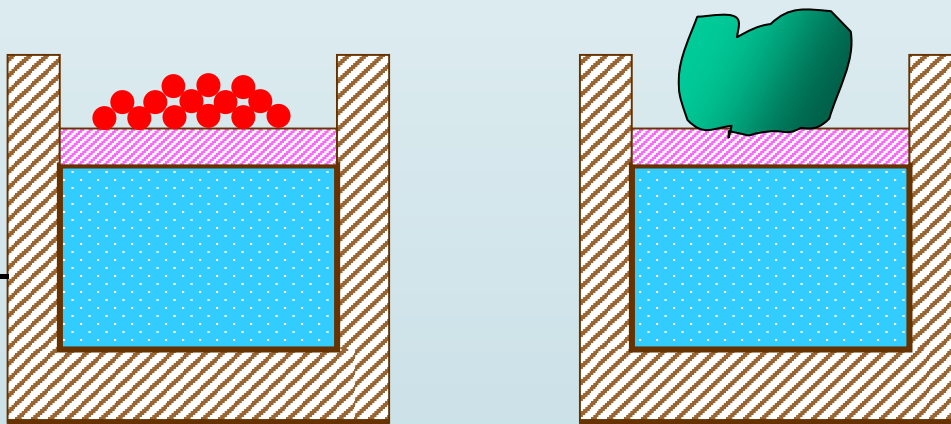
（系统经历了一个热力学过程（简称过程）

状态B

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。

例：考虑汽缸中气体的压缩过程。当活塞运动压缩气体时，系统在整个压缩过程中经历了一系列的非平衡状态。

准静态过程



当然，实际的热力学过程中任一状态都不是严格意义上的平衡态。

## ***e.* 状态参量、状态图 —— 平衡态的描述**

**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 $m$  和摩尔数 $\mu$ 等）

**电磁参量**（如：电场和磁场强度等）

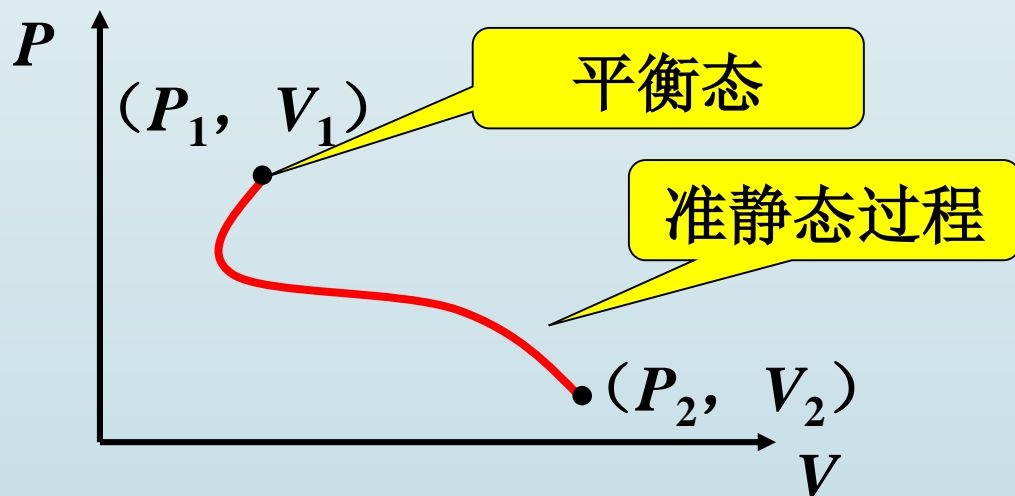
## 状态图:

当系统处在平衡态时，其状态参量满足一定的关系，  
状态参量满足的关系式称为状态方程。

例如：理想气体的状态方程为  $PV = \nu RT$

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。

常用状态图有  $P$ — $V$ 图， $P$ — $T$ 图， $V$ — $T$ 图。



▲ 非平衡态不能用前述的状态参量描述，不能用状态图上的点表示。 ➡

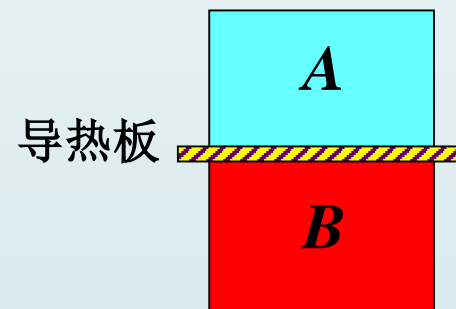
▲ 非准静态过程不能用过程曲线描述。

## *f*. 温度与热力学第零定律

**热接触**：有热量交换的两个系统间的相互作用。

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)

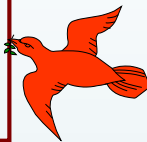
**标志：两系统之间的热交换停止**



**实验指出：**

如果两个热学系统中的每一个都与第三个系统的某一平衡态处于热平衡，则此两系统必定也处于热平衡，这个结论称为**热力学第零定律**。

**热力学第零定律：** 如果两个热学系统中的每一个都与第三个系统的某一平衡态处于热平衡，则此两系统必定也处于热平衡。



↓  
处于热平衡的两系统具有共同的宏观状态参量



温度( $T$ )

一切互为热平衡的系统，都具有相同的温度。

A、B两系统发生热接触时：

$$\left\{ \begin{array}{ll} T_A > T_B & \text{热量由A传给B} \\ T_A < T_B & \text{热量由B传给A} \\ T_A = T_B & \text{无热量传递 (热平衡)} \end{array} \right.$$

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  $t = 0^{\circ}$

热力学温标: 与任何物质的性质无关

$$T = t + 273.15 K$$

SI  
单位制

# 气体动理论

研究对象：理想气体

## 1. 理想气体状态方程

$$pV = \frac{m}{M} RT = \underline{\nu RT} = \underline{NkT} \quad \text{或: } p = nkT$$

$m$ : 气体质量;       $M$ : 气体摩尔质量; 分子量 $\times 10^{-3}$  kg/mol

$R = 8.31 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$  : 普适气体常数。

$\nu = \frac{m}{M}$ : 气体的摩尔数;       $\nu = \frac{N}{N_A}$

$N$ : 气体分子总数;       $N_A$ : 阿伏伽德罗常数;

$k = \frac{R}{N_A} = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$  : 玻耳兹曼常量;

$$\nu R = Nk$$

$n$ : 单位体积内的分子数。

由实验规律总结而来。



## 2. 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

### 3. 宏观描述与微观描述

**宏观：** 对系统的状态从整体上加以描述。

反映整个系统宏观性质的物理量——**宏观量**

**如： 体积 $V$ 、压强 $P$ 、温度 $T$ 、热容量 $C$  等**

**微观：** 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。

表征单个分子特征的物理量——**微观量**

**如： 分子的大小 $d$ 、位矢 $\vec{r}$ 、速度 $\vec{v}$ 、能量 $E$ 等**

宏观、微观描述是描述同一物理对象的两种不同方法。

宏观描述  $\xleftrightarrow{\text{统计规律}}$  微观描述

本章的主要任务：

用统计的方法，求大量分子的微观量的统计平均值来解释实验中所测得的宏观性质。

## 4. 统计规律及其特点

### 1) 是对大量偶然事件的整体起作用的规律

**单个事件无规可循,具有极大的偶然性,但就大量事件的整体来看,却存在着一定的规律。**

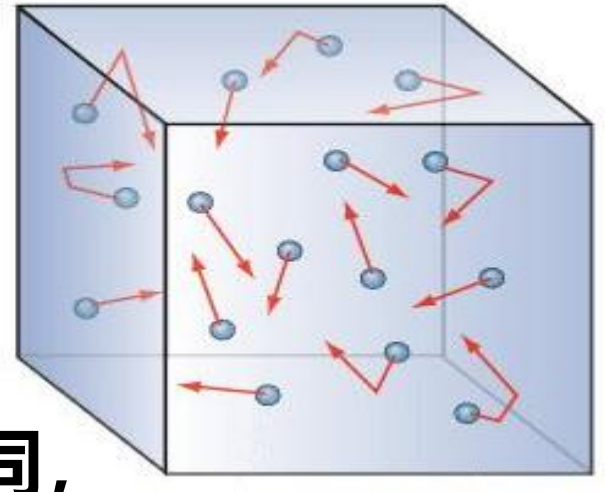
### 2) 统计规律永远伴随着涨落现象

## 5. 理想气体的压强

设长方体 $V$ 中有 $N$ 个理想气体分子，

单位体积有  $n = N/V$  个分子

每个分子质量为  $m$ ，



**每个分子速度的大小、方向各不相同，  
热平衡下，分子与6个壁都要碰撞，各个  
面所受的压强相等。**

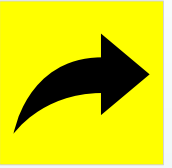
将所有分子分成若干组，每组内分子的速度大小和方向都相同：

第  $i$  组的分子数密度：  $n_i$ ，总分子数密度：  $n = \sum_i n_i$

第  $i$  组的分子速度：  $\vec{v}_i$ ，  $\vec{v}_i = (v_{ix}, v_{iy}, v_{iz})$

任取面积为 $dA$ ,垂直 $X$ 轴处的器壁(光滑), 计算 $dA$ 上的压强:

### 1) 速度为 $\vec{v}_i$ 的单个分子在一次碰撞中对器壁的作用

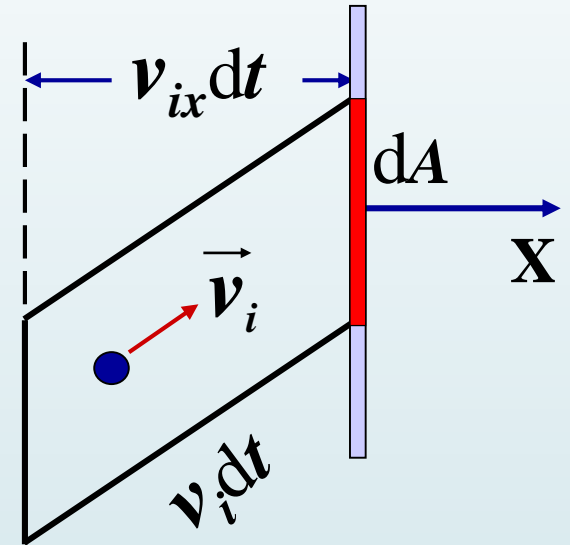


碰撞前速度:  $(v_{ix}, v_{iy}, v_{iz})$

碰撞后速度:  $(-v_{ix}, v_{iy}, v_{iz})$

碰撞前后动量改变:  $\Delta P_i = -2mv_{ix}$

分子施于 $dA$ 的冲量:  $\Delta I_i = 2mv_{ix}$



### 2) $dt$ 时间内第 $i$ 组分子施于 $dA$ 的冲量

取 $v_i dt$  为斜高、 $dA$ 为底的斜柱体

体积为:  $v_{ix} dt dA$ ; 分子数为:  $n_i v_{ix} dt dA$

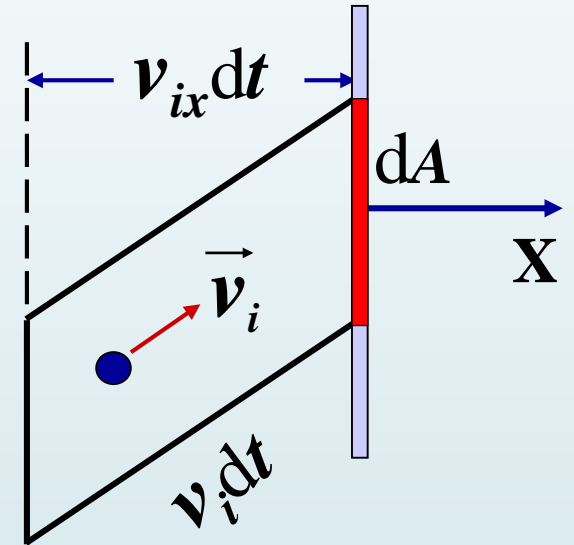
$dt$ 内第  $i$  组分子施于 $dA$  的冲量:

$$dI_i = 2mv_{ix} n_i v_{ix} dt dA = 2mn_i v_{ix}^2 dt dA$$

任取面积为 $dA$ ,垂直 $X$ 轴处的器壁(光滑), 计算 $dA$ 上的压强:

所有分子施于 $dA$ 的冲量:

$$\begin{aligned} dI &= \sum_i dI_i \\ &= \sum_i 2mn_i v_{ix}^2 dt dA \end{aligned}$$



2)  $dt$  时间内第  $i$  组分子施于 $dA$  的冲量

取 $v_{ix}dt$  为斜高、 $dA$ 为底的斜柱体

体积为:  $v_{ix}dt dA$ ;      分子数为:  $n_i v_{ix}dt dA$

$dt$ 内第  $i$  组分子施于 $dA$  的冲量:

$$dI_i = 2m v_{ix} n_i v_{ix} dt dA = 2m n_i v_{ix}^2 dt dA$$

任取面积为 $dA$ ,垂直 $X$ 轴处的器壁(光滑), 计算 $dA$ 上的压强:

所有分子施于 $dA$ 的冲量:

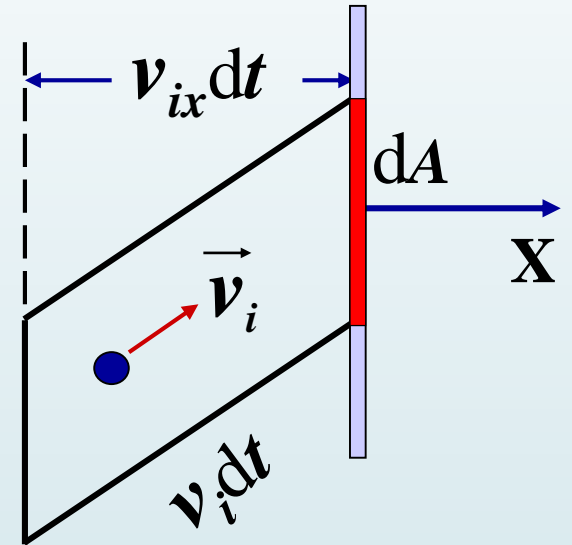
$$\begin{aligned} dI &= \sum_i dI_i \\ &= \sum_i 2mn_i v_{ix}^2 dt dA \end{aligned}$$

上式中对 $i$ 求和应理解为:

$$dI = \sum_{v_{ix} > 0} 2mn_i v_{ix}^2 dt dA$$

按几率分布  $v_{ix} > 0$ ,  $v_{ix} < 0$  的分子数各占一半, 故

$$dI = \frac{1}{2} \sum_i 2mn_i v_{ix}^2 dt dA = \sum_i mn_i v_{ix}^2 dt dA$$



任取面积为 $dA$ ,垂直 $X$ 轴处的器壁(光滑), 计算 $dA$ 上的压强:

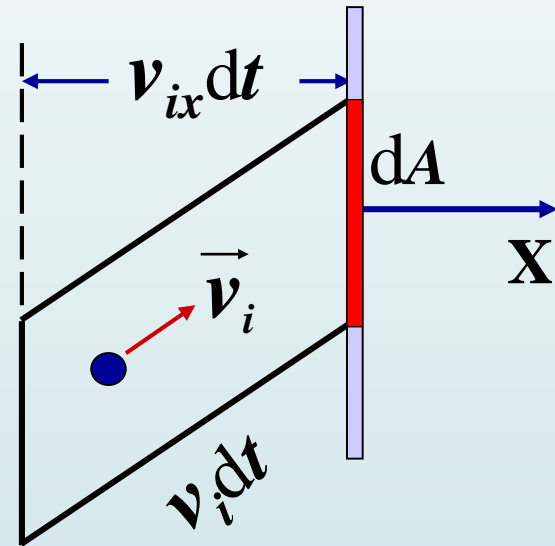
根据冲量的定义:  $dI = F dt \quad \therefore F = \frac{dI}{dt}$   $dA$ 上的压强:  $P = \frac{F}{dA}$

$$\therefore P = \frac{dI}{dt dA} = \sum_i m n_i v_{ix}^2 = m \left[ \sum_i n_i v_{ix}^2 \right] \cdot \frac{nV}{nV}$$

$$= \frac{nm \sum_i n_i V v_{ix}^2}{nV}$$

$$\therefore P = nm \overline{v_x^2}$$

$$\overline{v_x^2} = \frac{\sum_i n_i V v_{ix}^2}{nV}$$



按几率分布  $v_{ix} > 0$ ,  $v_{ix} < 0$  的分子数各占一半, 故

$$dI = \frac{1}{2} \sum_i 2 m n_i v_{ix}^2 dt dA = \sum_i m n_i v_{ix}^2 dt dA$$



任取面积为 $dA$ ,垂直 $X$ 轴处的器壁(光滑), 计算 $dA$ 上的压强:

$x$ 方向特殊吗?

同理可得:

否!

$$P = nm \overline{v_y^2}$$

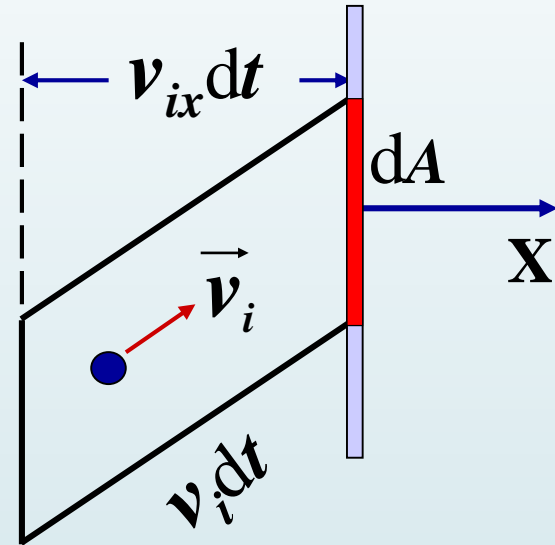
$$\therefore P = nm \overline{v_z^2}$$

以上三式相加可得:

$$3P = nm(\overline{v_x^2} + \overline{v_y^2} + \overline{v_z^2})$$

$$= nm(\overline{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}) = nm \overline{v^2}$$

故:  $P = \frac{1}{3} nm \overline{v^2}$



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

(分子的平均平动动能)

$$P = \frac{2}{3}n\overline{\varepsilon_t}$$

宏观量

微观量

- (1) 压强公式把宏观量 $P$ 与微观量 $n$ 、 $\varepsilon_t$  联系起来了，揭示了宏观量和微观量的关系。
- (2)  $P$ 的意义：大量分子与器壁不断碰撞的结果，是统计平均值，对单个分子谈压强没有意义。

$$3P = nm(\overline{v_x^2} + \overline{v_y^2} + \overline{v_z^2})$$

$$= nm\overline{(v_x^2 + v_y^2 + v_z^2)} = nm\overline{v^2} \quad \text{故: } P = \frac{1}{3}nm\overline{v^2}$$

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

(分子的平均平动动能)

$$P = \frac{2}{3}n\overline{\varepsilon_t}$$

宏观量

微观量

- (1) 压强公式把宏观量 $P$ 与微观量 $n$ 、 $\varepsilon_t$ 联系起来了，揭示了宏观量和微观量的关系。
- (2)  $P$ 的意义：大量分子与器壁不断碰撞的结果，是统计平均值，对单个分子谈压强没有意义。

利用理想气体状态方程  $P = nkT$

还可讨论理想气体的温度与微观量的关系。

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

(分子的平均平动动能)

$$P = \frac{2}{3}n\overline{\varepsilon_t}$$

宏观量

微观量

6. 理想气体的温度 **最直接反映热运动的剧烈程度的是平均速率。**

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

理想气体的温度  
只与分子的平均  
平动动能有关

温度 $T$ 是统计平均值，是大量微观分子热运动的集体表现，谈论一个分子的温度没有意义。

温度的微观实质：

**温度是物体内部分子无规则运动的剧烈程度的标志。**

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

(分子的平均平动动能)

$$P = \frac{2}{3}n\overline{\varepsilon_t}$$

宏观量

微观量

6. 理想气体的温度 **最直接反映热运动的剧烈程度的是平均速率。**

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

理想气体的温度  
只与分子的平均  
平动动能有关

温度 $T$ 是统计平均值，是大量微观分子热运动的集体表现，  
谈论一个分子的温度没有意义。

温度的微观实质：

**温度是物体内部分子无规则运动的剧烈程度的标志。**

$$\overline{\varepsilon_t} = \frac{3}{2}kT$$

$$\overline{\varepsilon_t} = \frac{1}{2}m\overline{v^2}$$

## 7. 方均根速率(分子速率的一种统计平均值)

$$\left. \begin{aligned} \bar{\varepsilon}_t &= \frac{3}{2} kT \\ \bar{\varepsilon}_t &= \frac{1}{2} m_f \overline{v^2} \end{aligned} \right\} \text{得方均根速率:}$$
$$\sqrt{\overline{v^2}} = \sqrt{\frac{3kT}{m_f}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}}$$

$$\boxed{\nu R = Nk} \quad \nu = \frac{m}{M} \quad N = \frac{m}{m_f} \quad \boxed{\frac{k}{m_f} = \frac{R}{M}}$$

**例2.** 求在 $T=273\text{K}$ 时氧分子的平均动能和方均根速率。

**解:**  $\bar{\varepsilon}_t = \frac{3}{2} kT = \frac{3}{2} \times 1.38 \times 10^{-23} \times 273 = 5.65 \times 10^{-21} \text{ J}$

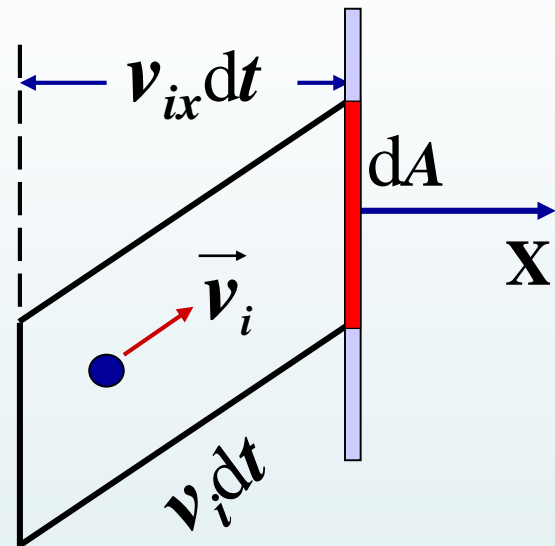
$$\sqrt{\overline{v^2}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}} = \sqrt{\frac{3 \times 8.31 \times 273}{32 \times 10^{-3}}} = 4.61 \times 10^2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

## ● 理想气体的压强、温度

$$P = \frac{2}{3} n \overline{\varepsilon_t}$$

$$\overline{\varepsilon_t} = \frac{3}{2} kT$$

$$\left\{ \begin{array}{l} P = \frac{1}{3} n m \overline{v^2} \\ \overline{\varepsilon_t} = \frac{1}{2} m \overline{v^2} \end{array} \right.$$



问题：若器壁不是平面的，公式是否仍成立呢？（ A ）

A. 成立      B. 不成立      C. 要看具体情况

问题：对单个分子谈压强和温度有没有意义？（ B ）

A. 有意义      B. 无意义      C. 仅对理想气体有意义

$P$ 和 $T$ 是大量分子的统计平均值，对单个分子谈压强、温度没有意义。

动量定理:

冲量等于动量的增量。  $\vec{I} = \Delta \vec{P}$

冲量:  $\vec{I} \equiv \int_{t_1}^{t_2} \vec{F} dt$

$$\int_{t_1}^{t_2} \vec{F} dt = \vec{P}_2 - \vec{P}_1 \quad (\text{积分形式})$$

$$\vec{F} dt = d\vec{P} \quad (\text{微分形式})$$

