

# 第三篇 热学

## 一. 什么是热学

**热 学：**研究物质的热现象和热运动规律的学科。

**热现象：**与温度有关的物理性质的变化。

例如：铁加热：灰→红→橙→白→液体。

气体加热：压强 温度 体积

**热运动：**构成宏观物体的大量微观粒子的永不停息的无规则运动。

**热学研究的方法：**宏观研究和微观研究。

**热学研究的方法：**宏观研究和微观研究。

**宏观量：**描述宏观物体特性的物理量；  
如温度、压强、体积、密度等。

**微观量：**描述微观粒子特征的物理量；  
如质量、速度、能量、动量等。



## 二. 热学的分类

热 力 学	——	宏观理论
统计物理学	——	微观理论

### 1. 热力学 —— 宏观描述

它根据由观察和实验所总结出的基本规律，用逻辑推理的方法，研究物体的宏观性质及宏观过程进行的方向和限度等。

特点

- 1) 具有可靠性及普适性；
- 2) 知其然而不知其所以然。

## 2. 统计物理学 —— 微观描述

它从物质的微观结构和分子热运动的观点出发，按每个微观粒子遵循的力学规律，用统计的方法来研究组成气体的大量分子的热运动规律。

特点

- 1) 揭示宏观现象的本质；
- 2) 无法自我验证。

两种方法的关系：



气体动理论是统计物理最简单最基本的内容。

# 第七章 气体动理论

( § 7. 1– § 7. 3)

## 本课时教学基本要求

- 1、理解热力学系统、平衡态、状态参量、平均平动动能、方均根速率等基本概念。
- 2、理解气体动理论的基本假设。理解理想气体的微观模型。理解压强和温度两个宏观量的微观本质。

## 本章重点:

理想气体处于平衡态下的性质，主要包括:

- 1) 压强公式、温度公式、内能概念;
- 2) 两条统计规律 —— 能均分定理和麦克斯韦速率分布律。

## 本章难点:

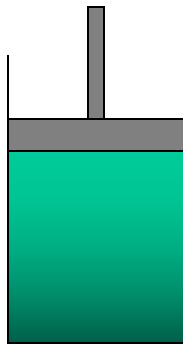
- 1) 明确气体动理论的研究方法  
(以压强公式的推导和运用为代表) ;
- 2) 压强和温度的微观实质和意义;
- 3) 速率分布函数的物理意义以及相关的计算。

# 第七章 气体动理论

## 7-1 热力学系统 平衡态 状态参量

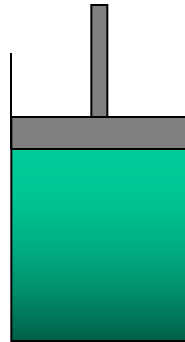
### • 热力学系统

- 热力学研究的对象——由大量的微观粒子组成的宏观物体，称为热力学系统或简称系统。
- 它包含极大量的分子、原子。以阿佛加德罗常数  $N_A = 6 \times 10^{23}$  计。
- 热力学系统以外的物体称为外界。



例：若汽缸内气体为系统，其它为外界

- **热力学系统**
- **孤立系统：**系统与外界既无物质交换, 也无能量交换;
- **封闭系统：**系统与外界无物质交换, 但有能量交换;
- **开放系统：**系统与外界既有物质交换, 又有能量交换。





- **平衡态**

在不受外界影响的条件下，系统（孤立系统）的宏观性质不随时间改变的状态，称为平衡态。

气缸中的气体？

**平衡态的说明：**

- 1) 不受外界影响是指系统与外界不通过做功或传热的方式交换能量，但可以处于均匀的外力场中。
- 2) 平衡是热动平衡（有别于力平衡）；
- 3) 平衡态是一种理想状态。

## •状态参量

当系统处于平衡态时，其宏观状态可以用几个独立的宏观量来描述。

压强  $p = P_a$  温度  $T = -273 + t$  K 体积  $V = \text{m}^3$

## 7-2 气体动理论的基本假设

### 一，分子及其运动假设：

- **分子的观点：**宏观物体是由大量微观粒子（分子或原子）组成的。
- **分子运动的观点：**物体中的分子处于永不停息的无规则运动中，其激烈程度与温度有关。
- **分子力的观点：**分子之间存在着相互作用力。

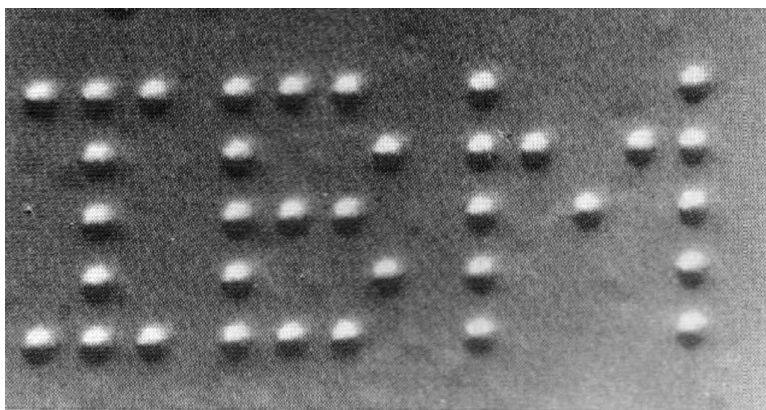
**结论：**一切宏观物体都是由大量分子组成的，分子都在永不停息地作无序热运动，分子之间有相互作用的分子力。

从上述气体动理论的基本观点出发，研究和说明宏观物体的各种热现象和本质是分子动理论的任务。

## 物质的微观结构图像

一切宏观物体都是由大量分子组成的。

现代的仪器已可以观察和测量分子或原子的大小以及它们在物体中的排列情况，例如 X 光分析仪，电子显微镜，扫描隧道显微镜等。



利用扫描隧道显微镜技术把一个个原子排列成 IBM 字母的照片。

对于由大量分子组成的系统从微观上加以研究时，必须用统计的方法。

## 二，统计假设：

气体分子的特点：数量多、间距大、速度快、碰撞频繁。

单个分子——无序、具有偶然性、遵循力学规律。

整体（大量分子）——服从统计规律。

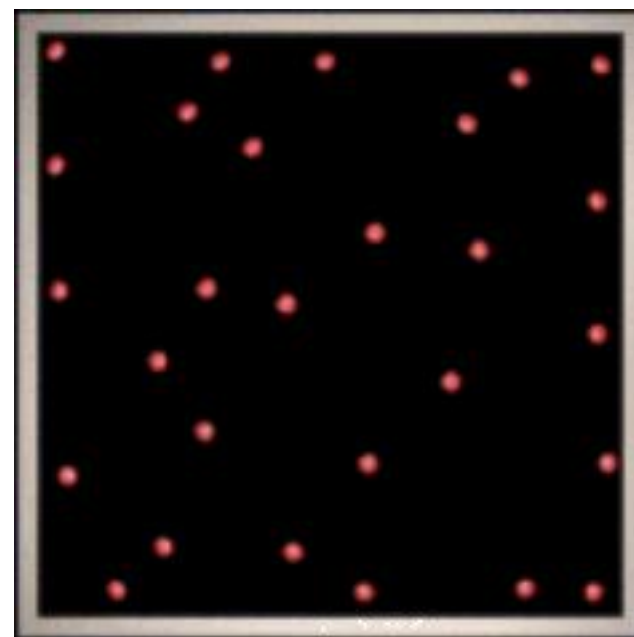
例：常温和常压下的氧分子

平均速率： $\bar{v} \approx 450 \text{ m/s}$

平均碰撞频率： $\bar{z} \sim 10^9 \text{ 次/s}$

平均自由程： $\bar{\lambda} \sim 10^{-7} \text{ m}$ ;

气体分子热运动服从统计规律。



**例：**抛硬币N次， $N_A$ 次正面向上。

N不大时， $\frac{N_A}{N}$  不确定；

N很大时， $\frac{N_A}{N} \cong \frac{1}{2}$

$$p_A = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{N_A}{N} = \frac{1}{2}$$

抛硬币的**统计规律**。



抛硬币

每抛一次出现正面向上是偶然的

抛少数次，正面向上的结果有明显偶然性

抛大量次数，正面向上约占1/2，呈现规律性

## 伽尔顿板实验



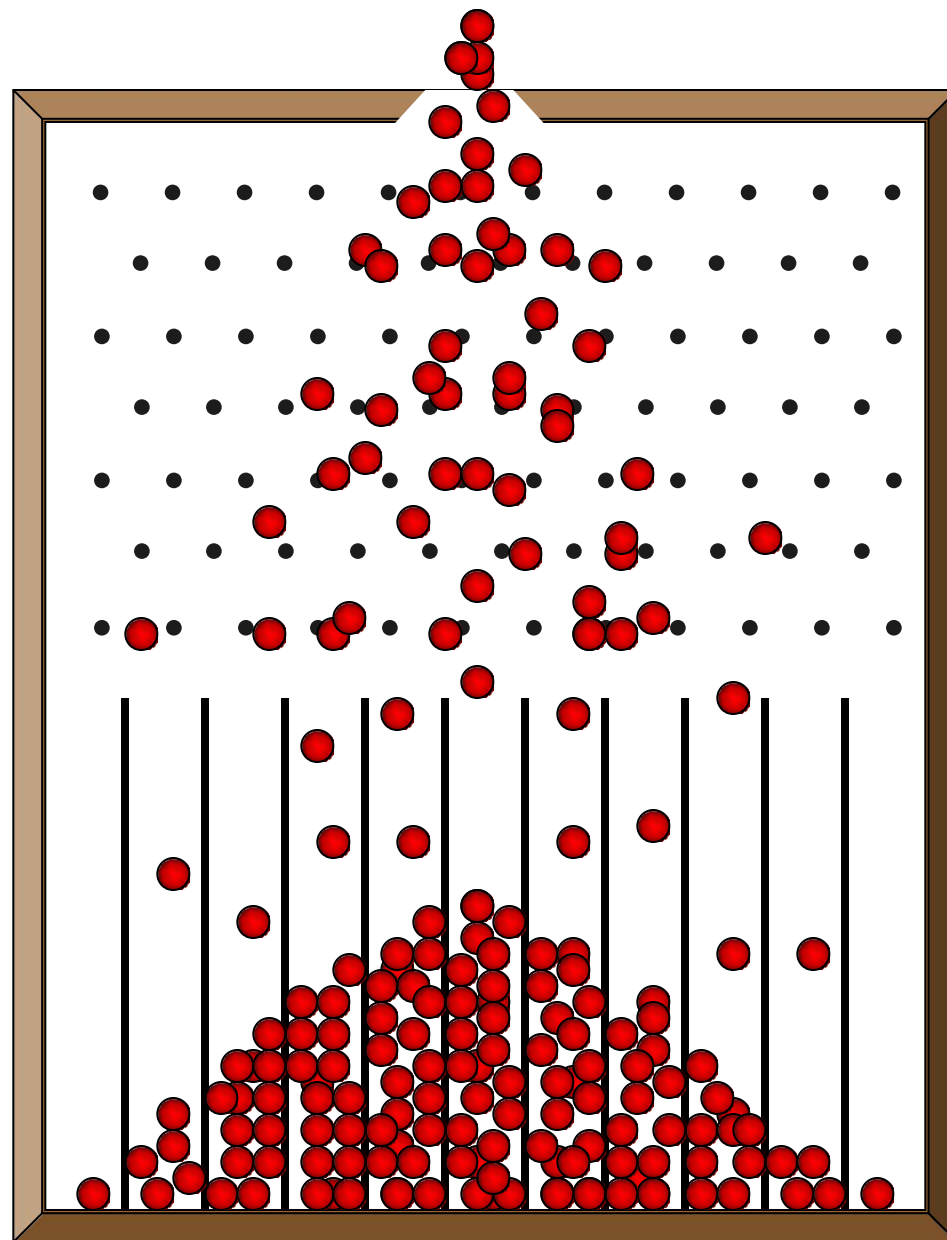
小球在伽尔顿板中的分布规律：

中央多，两端少

每个小球落入哪个槽是偶然的；

少量小球按狭槽分布有明显偶然性；

大量小球按狭槽分布呈现规律性。



**统计规律：**是指大量偶然事件整体所遵循的规律。

**特点：**（1）只对大量偶然的事件才有意义；  
（2）它是不同于个体规律的整体规律；  
（3）总是伴随着涨落。

**热运动服从统计规律。**热学规律从本质上不同于力学规律。研究对象数量的增加必然引起物理规律的变化。（从量变到质变）

**研究方法：**从气体分子热运动观点出发，运用统计方法（即对微观量求统计平均值的方法）来研究大量气体分子热运动，从而揭示气体热现象及其微观本质。



### 三，理想气体的微观假设：

- (1) 理想气体分子本身的体积忽略不计，可视为弹性质点；
- (2) 分子之间，分子与器壁之间的碰撞是完全弹性碰撞；
- (3) 除碰撞之外，分子之间的相互作用可以忽略不计。

因为分子的线度 $\ll$ 分子间的平均距离

## 7-3 理想气体的压强公式

### 一 理想气体的微观模型

#### 1. 对单个分子的力学性质的假设

1) 分子可视为质点；线度  $d \sim 10^{-10} \text{ m}$ ,  
间距  $r \sim 10^{-9} \text{ m}$ ,  $d \ll r$ ;

2) 除碰撞瞬间，分子间无相互作用力；

3) 碰撞均为完全弹性碰撞（弹性质点）；

4) 分子的运动遵从经典力学的规律。

（理想气体分子是弹性的可自由运动的质点。）

## 2. 对分子集体行为的统计假设

(1) 每个分子运动速度各不相同，而且通过碰撞不断变化；

(2) 若忽略重力的影响，每一个分子的位置在容器中任何一点的机会（或概率）均等，即分子按位置的分布是均匀的。

(3) 每一个分子的速度指向任何方向的机会（或概率）均等，即分子速度按方向的分布是均匀的。

平衡态的统计假设：

1) 分子按位置的分布是均匀的

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

2) 分子各方向运动概率均等，即：分子的速度按方向的分布是均匀的。

各方向运动概率均等

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

$x$ 方向速度平方的平均值

$$\overline{v_x^2} = \frac{1}{N} \sum_i N_i v_{ix}^2$$

各方向运动概率均等

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

## 【统计平均值】定义

$$\bar{\xi} = \frac{N_1\xi_1 + N_2\xi_2 + N_3\xi_3 + \cdots}{N_1 + N_2 + N_3 + \cdots} = \frac{\sum_i N_i \xi_i}{\sum_i N_i}$$

**【例】** 设容器中有3150个氮气分子，其中有：100个分子的速率为100m/s；500个分子的速率200m/s；2000个分子的速率为300m/s；400个分子的速率为400m/s；100个分子的速率为500m/s；50个分子的速率为600m/s。求该气体系统分子的平均速率、均方根速率和平均平动动能。

解：由统计平均值的定义：

$$\bar{v} = \frac{\sum N_i v_i}{N} = 302 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\sqrt{\overline{v^2}} = \sqrt{\frac{\sum N_i v_i^2}{N}} = 313 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\overline{\varepsilon_t} = \frac{\sum N_i (\frac{1}{2} m v_i^2)}{N} = \frac{1}{2} m \overline{v^2} = 2.61 \times 10^{-21} \text{ J}$$

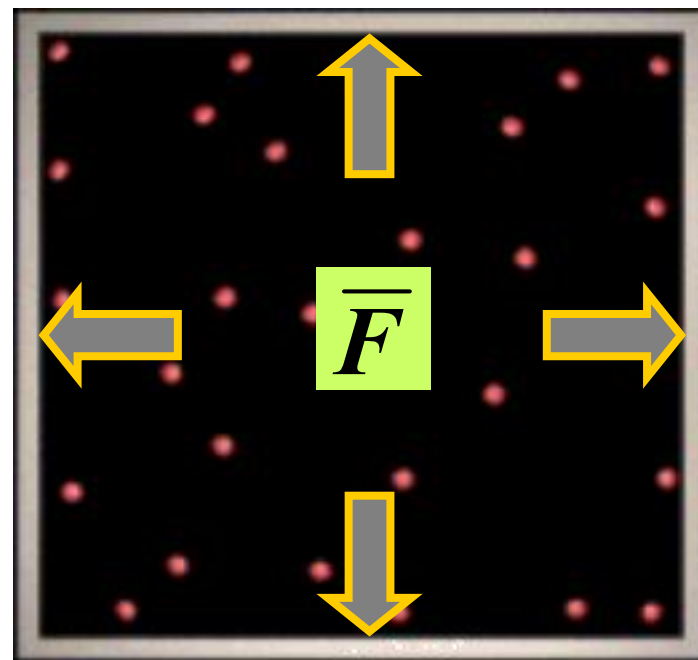
## 二 理想气体压强公式

### 1、定性解释

单个分子对器壁碰撞特性：  
偶然性、不连续性、不均匀的。

大量分子对器壁碰撞的总效果：  
恒定的、持续的力的作用。

气体在宏观上施于器壁的压强，是大量分子对器壁不断碰撞的结果。



密集雨点对雨伞的冲击力。

气体分子频繁碰撞容器壁  
——给容器壁冲量。大量分子在  
 $\Delta t$  时间内给予  $\Delta I$  的冲量。

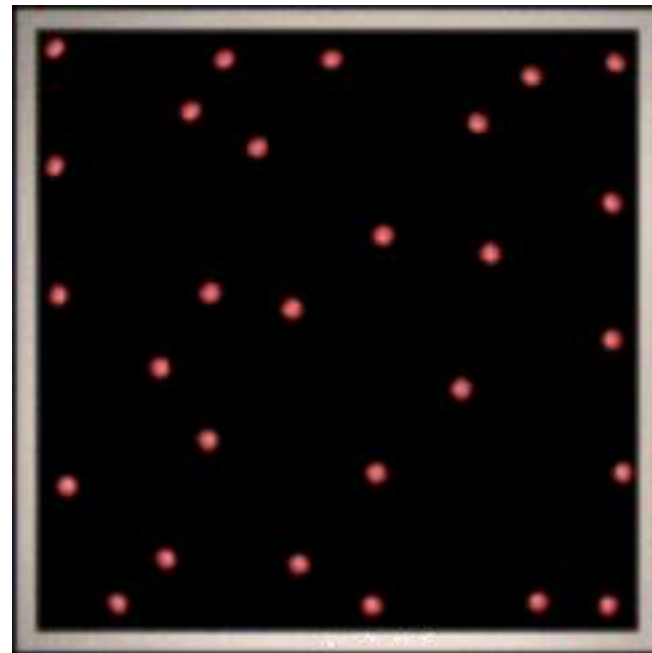
宏观上表现为对器壁的平均  
作用力为：

$$\overline{F} = \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

气体对容器壁的压强为：

$$P = \frac{\overline{F}}{S} = \frac{\Delta I}{S \Delta t}$$

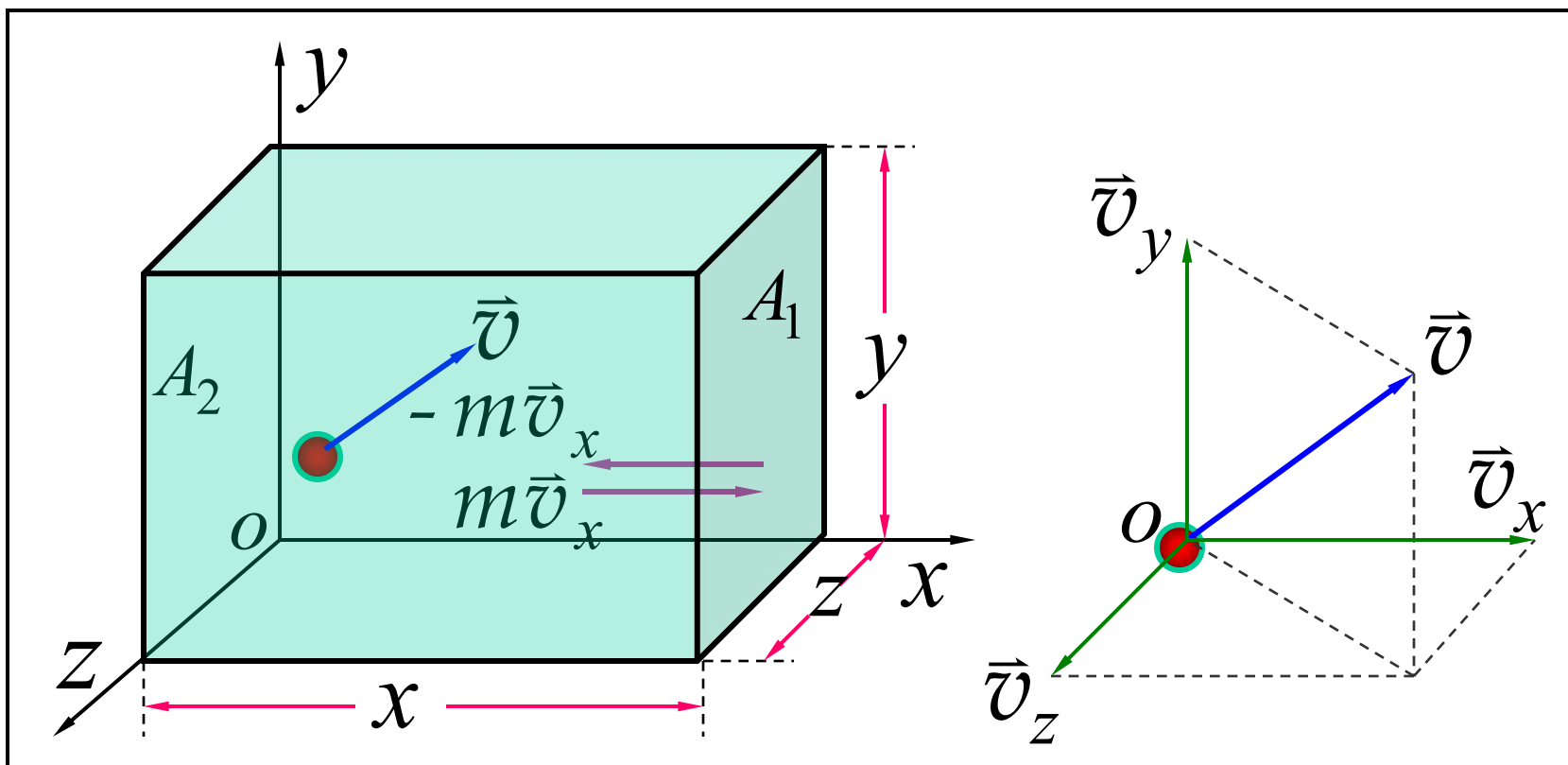
从定量的意义上，气体的压强等于大量分子在  
单位时间内施加在器壁单位面积上的平均冲量。



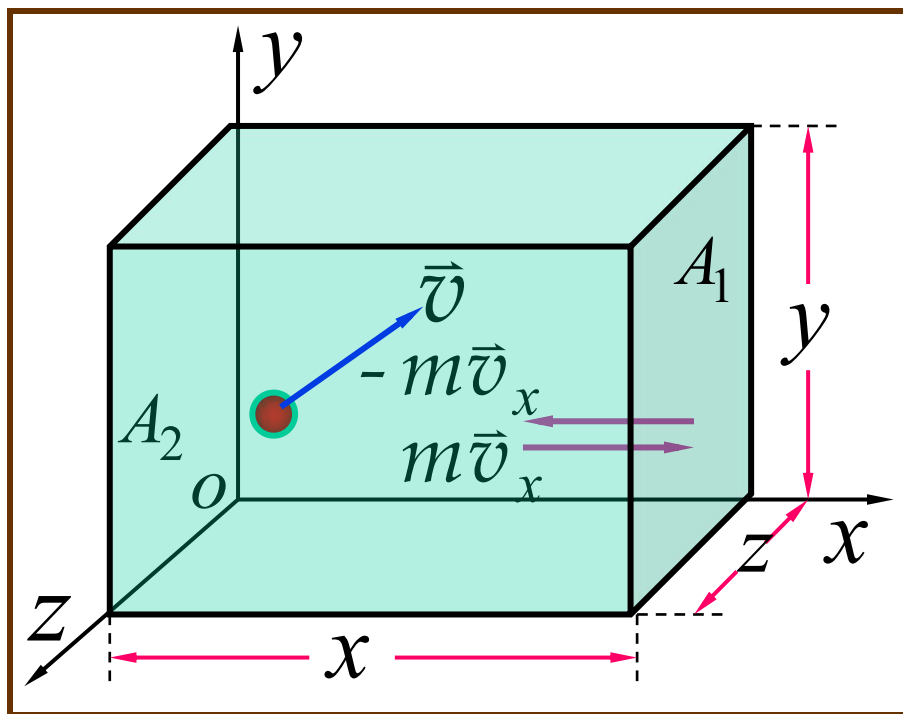


## 2、理想气体压强公式推导

设边长分别为  $x$ 、 $y$  及  $z$  的长方体中有  $N$  个全同的质量为  $m$  的气体分子，计算  $A_1$  壁面所受压强。



◆ 单个分子遵循力学规律



$x$ 方向动量变化

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

分子施于器壁的冲量

$$2mv_{ix}$$

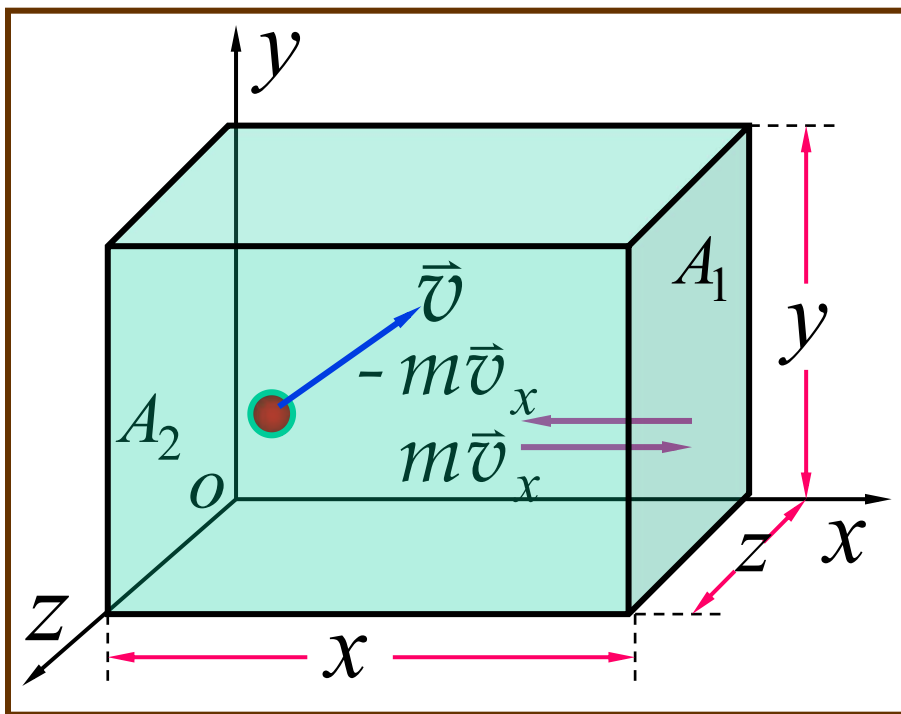
两次碰撞间隔时间

$$2x/v_{ix}$$

单位时间碰撞次数  $v_{ix}/2x$

单个分子单位时间施于器壁的冲量

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



单个分子单位时间  
施于器壁的**冲量**：

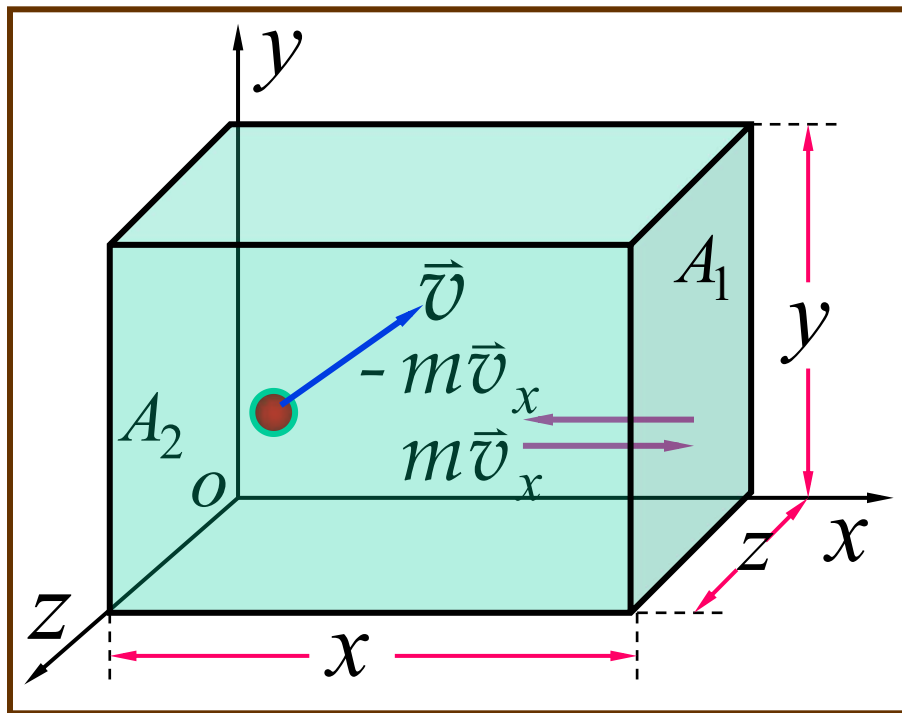
$$m v_{ix}^2 / x$$

◆ **大量分子总效应**

单位时间  $N$  个粒子  
对器壁**总冲量**：

$$\sum_i \frac{m v_{ix}^2}{x} = \frac{m}{x} \sum_i v_{ix}^2 = \frac{Nm}{x} \sum_i \frac{v_{ix}^2}{N} = \frac{Nm}{x} \overline{v_x^2}$$

器壁  $A_1$  所受**平均冲力**：  $\overline{F} = \overline{v_x^2} Nm / x$



器壁  $A_1$  所受平均冲力:

$$\bar{F} = \overline{v_x^2} Nm/x$$

气体压强

$$p = \frac{\bar{F}}{yz} = \frac{Nm}{xyz} \overline{v_x^2}$$

统计规律

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

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

$$\text{分子平均平动动能: } \bar{\epsilon}_t = \frac{1}{2} m \overline{v^2}$$

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

## 压强的物理意义

统计关系式



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

宏观可测量量

微观量的统计平均值

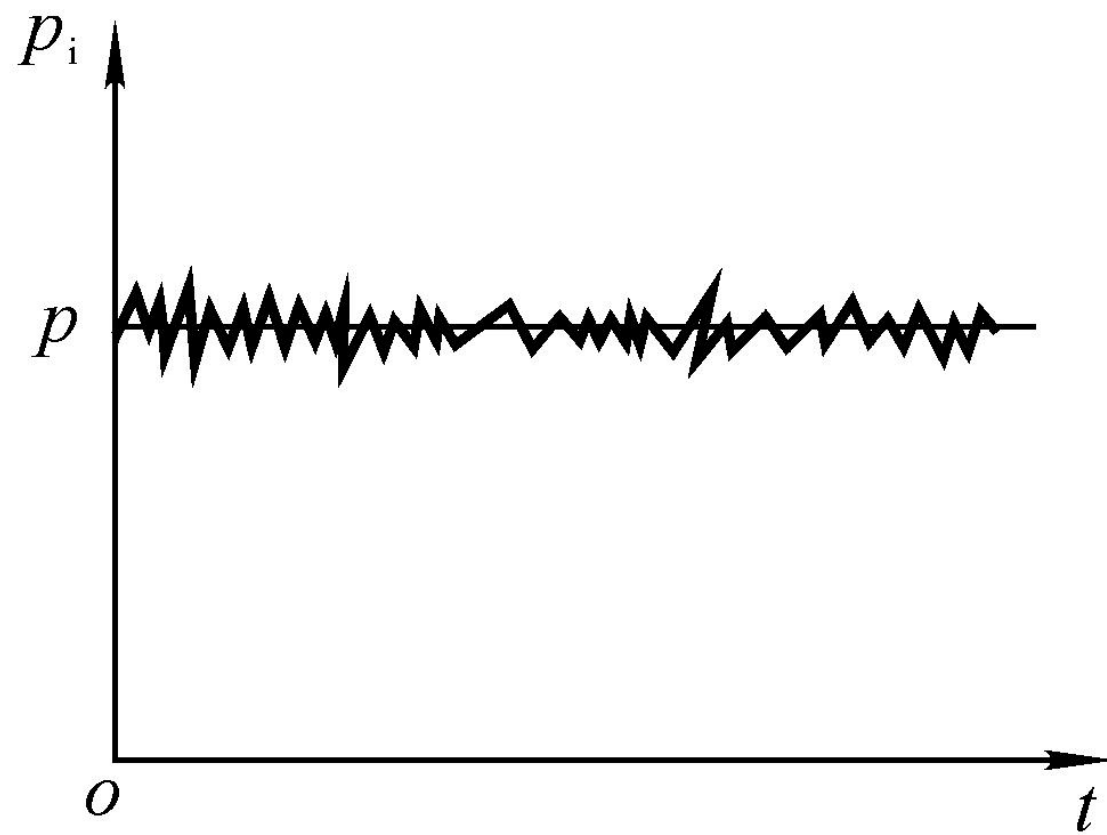
分子平均平动动能

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

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

理想气体的压强取决于气体的分子数密度和分子的平均平动动能。

- 分子数密度越高 (  $n$  大 ), 则单位时间内撞击器壁的分子数越多, 压强  $p$  越大;
- 分子的平均平动动能越大, 则每次撞击对器壁的冲量大; 同时也使得平均碰撞次数增多, 导致压强  $p$  也越大。



涨落

作业：

7. 1

7. 3

7. 4

上页

下页