

《大学物理》课程教师简介

教师: 汪加洁
Email: wangjiajie@xidian.edu.cn

个人简介:

■物理学博士（光学方向），副教授（西安电子科技大学 物理与光电工程学院）

学术经历:

- 2016.03-2017.03 德国莱布尼茨材料科学研究所（Leibniz Institute of Material Science）访问学者
- 2008.09-2011.12 法国国立应用科学学院鲁昂分院（INSA De Rouen）物理学博士学位
- 2002.09-2006.07 西安电子科技大学 电子信息科学与技术 理学学士学位

主要研究方向:

■激光波束的调控及光场计算；数字全息及应用；微粒的光操纵及应用；复杂目标对调控电磁（激光）波束的散射特性研究；电磁波束在复杂随机介质中的传播与散射；

项目简介:

■主持并完成有国家自然科学基金项目，陕西省自然科学基金项目，留学回国人员科研启动基金项目，国家博士后科学基金项目，浙江大学重点实验室开放基金项目等，并作为主要完成人参与了法国驻华大使馆资助的中法合作项目，国家自然科学基金项目，973子课题，欧盟区域发展基金项目等。已发表学术论文40余篇，参与编写专著或教材2部。

个人主页



热学篇

(Thermodynamic system)

- 研究对象：由大量微观粒子组成的宏观热力学系统。
(气体分子)

e.g. 标准态下，1mol气体有 6.022×10^{23} 个分子

(Thermal phenomenon)

- 研究内容：与温度有关的热现象，即分子热运动。

(Thermal Motion)

单个分子：无规则、偶然的热运动。

大量分子：遵守确定的热运动规律（统计规律）。

- 研究目的：揭示热运动宏观规律及其微观本质

热学篇

➤ 描述方法:

(**Macroscopic quantity**)

1. **宏观描述**: 采用宏观物理量对系统状态的宏观性质加以描述

如: P 、 T 、 V 等, 可用仪器直接测定。

2. **微观描述**: 通过对微观粒子运动状态的描述, 揭示宏观体系的状态

如: μ 、 p 、 E_k ...等微观量 (**Microscopic quantity**)

➤ 研究方法:

1. **热力学 (Thermodynamics)**

通过实验来总结体系状态。宏观理论。如: 热力学定律

2. **分子动理论 (Kinetic theorem of molecule)**

从微观角度出发, 研究大量粒子的热运动规律, 采用统计方法得出相关结论。微观理论。

§ 12-1 基本概念（热学）

一、气体状态参量（State Parameter）

1. 压强： 单位面积上受到的垂直作用力（宏观）
大量分子对器壁碰撞的平均冲量（微观）

单位： Pa (Nm^{-2}) 帕斯卡

atm 标准大气压 cmHg 厘米汞柱

$$1\text{atm} = 76\text{ cmHg} = 1.013 \times 10^5 \text{Pa}$$

2. 体积： 分子活动的空间 （并非分子大小的总和）
3. 温度： 物体冷热程度的量度（宏观）
分子热运动剧烈程度的量度（微观）

热力学温标： $T = t + 273.15$ K

二、热力学系统、平衡态和平衡过程

➤ 研究对象： 大量微观粒子组成的**热力学系统**。

系统的分类：按照系统与外界的不同接触方式分类

1. 开放系统 既有物质交换，又有能量交换。

2. 封闭系统 没有物质交换，只有能量交换。

3. 孤立系统 既无物质交换，又无能量交换。

➤ 平衡态：一个**孤立系统**，**宏观状态参量不随时间变化的状态**

判断依据：（1）系统与外界没有物质或能量的交换

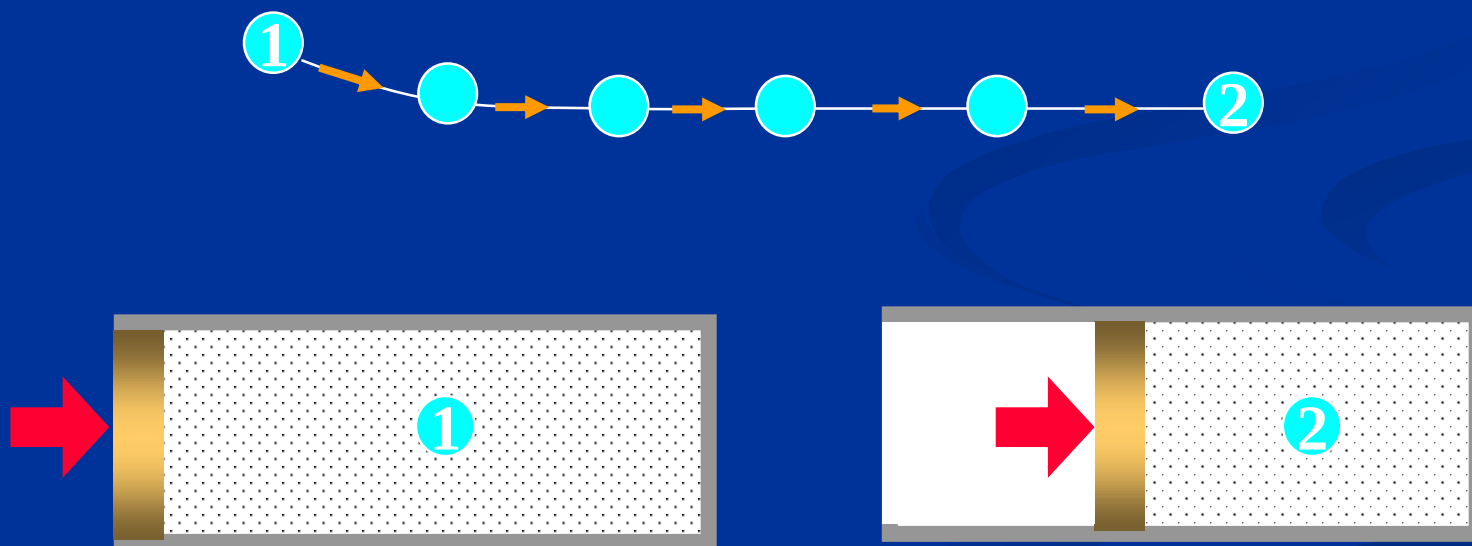
（2）系统的宏观性质不随时间变化

说明：宏观上各状态量不变，而微观上分子热运动永不停息。

➤ 平衡过程:

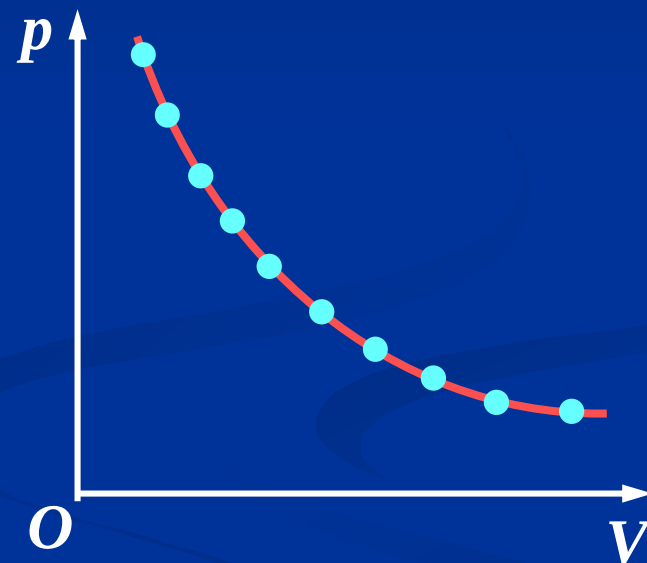
过程进行的很缓慢，在过程进行的每一时刻，系统都无限的接近平衡态。

(准静态过程)



说明:

- (1) 平衡（准静态）过程是无限缓慢进行的理想化过程；
- (2) 除一些进行得极快的过程（如爆炸过程）外，大多数情况下都可以把实际过程看成是准静态过程；
- (3) 准静态过程的状态图表示.

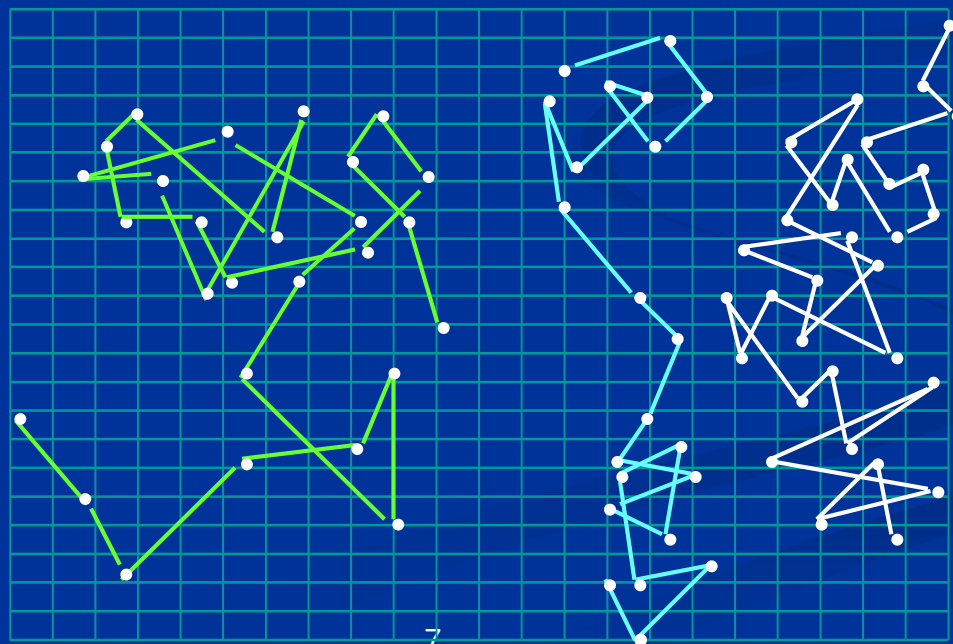


图中每一个点代表一个平衡态，每一条曲线代表一个平衡过程。

三、理想气体状态方程

1、分子运动的基本观点

- I. 宏观物体由大量粒子（分子、原子、离子等）组成，分子之间存在一定的空隙；e. g. 物体可以被压缩；水和酒精混合后的体积小于两者原来的体积之和。
- II. 分子在永不停息地作无规则热运动；e.g. 花粉的布朗运动（Brown motion）



（布朗运动）

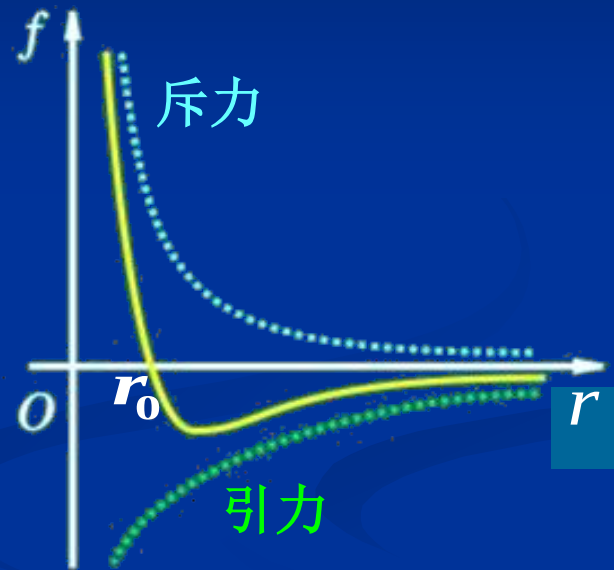
III. 分子间存在相互作用力

在一定温度下，气体可凝聚成液体和固体：**分子间的相互吸引力**；
液体和固体很难被进一步压缩：**分子间的排斥力**。

$r_0 \approx 10^{-10} \text{ m}$ （平衡位置， $F=0$ ）

$r > r_0$ 分子力表现为引力

$r < r_0$ 分子力表现为斥力



(分子力与分子间距离的关系)

★ 总结：

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**作无规则热运动，分子之间有**相互作用的**分子力。

2、理想气体（Ideal Gas）的微观模型

- I、分子间距 $\gg$ 分子直径，单个理想气体分子可视为质点。
- II、气体状态下，分子间作用力及其微小。除碰撞瞬间外，分子做自由运动，忽略分子间作用力。
- III、分子与分子之间、分子与容器壁之间的碰撞是完全弹性。

理想气体分子是一个个大小不计，除碰撞瞬间外没有相互作用的弹性小球。

3、理想气体状态方程（克拉伯龙方程）

$$PV = \frac{m}{M_{\text{mol}}} RT = \nu RT$$

形式一

m ——气体质量

M_{mol} ——气体摩尔质量

ν ——气体摩尔数

R ——摩尔气体常量。 $R=8.31\text{J/mol.k}$

玻意耳定律、查理定律、盖—吕萨克定律
(T 不变)、 (V 不变)、 (P 不变)

形式二

$$P = nKT$$

$n=N/V$ ——单位体积分子数（分子数密度）

$K=R/N_0$ ——玻耳兹曼常数(Boltzmann constant), $K=1.38 \times 10^{-23}\text{J/K}$

N_0 ——阿佛加德罗常数, $N_0=6.022 \times 10^{23}/\text{mol}$

45分钟内容(课间休息)

§ 12-2 气体分子的热运动

一、分子热运动特征

- (1) 在惯性支配下的自由运动。
- (2) 分子间频繁的碰撞 （每秒几十亿次）
- (3) 单个分子：偶然的、无序的，其运动遵守力学规律。
大量分子：热运动在整体上遵从确定的统计规律。

在**无外力场作用**条件下，平衡态下理想气体分子**运动统计假设**：

- (1) 气体分子按位置的均匀分布：分子数密度均匀分布；
- (2) 分子沿各个方向运动几率相同 。

二、统计规律的特征：伽尔顿板实验

实验现象：

若无小钉：必然事件；若有小钉：偶然事件

一个小球落在哪里有偶然性

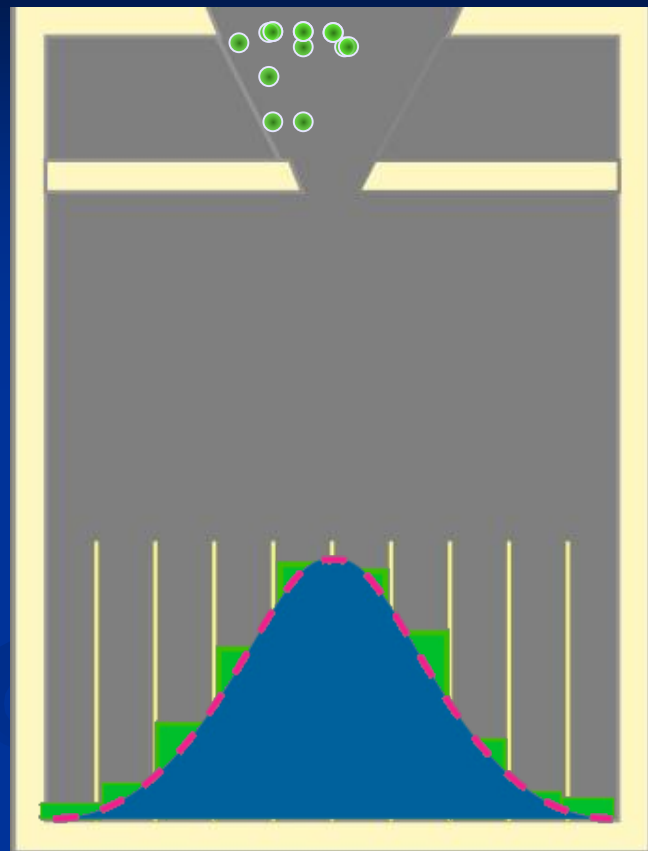
少量小球的分布每次不同

大量小球的分布近似相同

由于微观状态千变万化，统计平均值和实际测量值之间永远存在偏差，这种相对统计平均值出现偏差的现象即为涨落。

结论：

- (1) 统计规律是大量偶然事件的总体所遵从的规律；
- (2) 统计规律和涨落现象是分不开的。统计规律必然伴随着涨落



二、统计规律的特征

统计规律性——大量偶然事件总体上所具有的确定的规律性。

（与机械运动有着本质的区别）

1. 研究对象：大量偶然事件组成的整体

2. 统计平均值

$$\overline{M} = \frac{N_A M_A + N_B M_B + \cdots}{N}$$

$$N = N_A + N_B + \cdots \quad (\text{大量的})$$

如：

$$\overline{v}_x = \frac{\sum_i \Delta N_i v_{ix}}{N} = \frac{\int v_x dN}{N} \quad \overline{v_x^2} = \frac{\sum_i \Delta N_i v_{ix}^2}{N} = \frac{\int v_x^2 dN}{N}$$

$$\overline{\varepsilon_k} = \frac{\sum_i (\frac{1}{2} \mu v_i^2) \Delta N_i}{N} = \frac{\int (\frac{1}{2} \mu v^2) dN}{N}$$

(I) 平衡态下气体分子速度的统计平均值为

$$\bar{\vec{v}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1} \Delta N_i \vec{v}_i = \frac{1}{N} \sum_{i=1} \Delta N_i v_{ix} \hat{x} + \frac{1}{N} \sum_{i=1} \Delta N_i v_{iy} \hat{y} + \frac{1}{N} \sum_{i=1} \Delta N_i v_{iz} \hat{z}$$

$$\vec{v}_i = v_{ix} \hat{x} + v_{iy} \hat{y} + v_{iz} \hat{z}$$

$$\bar{\vec{v}} = \bar{v}_x \hat{x} + \bar{v}_y \hat{y} + \bar{v}_z \hat{z}$$

气体处于平衡状态时，气体分子沿各个方向运动的概率相等，故有

$$\bar{v}_x = \bar{v}_y = \bar{v}_z = 0$$

$$\bar{\vec{v}} = 0$$

(II) 平衡态下大量气体分子速率平方的统计平均值为

$$\begin{aligned}\overline{v^2} &= \frac{1}{N} \sum_{i=1} \Delta N_i v_i^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1} v_{ix}^2 + \frac{1}{N} \sum_{i=1} \Delta N_i v_{iy}^2 + \frac{1}{N} \sum_{i=1} \Delta N_i v_{iz}^2 \\ &= \overline{v_x^2} + \overline{v_y^2} + \overline{v_z^2}\end{aligned}$$
$$v_i^2 = v_{ix}^2 + v_{iy}^2 + v_{iz}^2$$

由于气体处于平衡状态时，气体分子沿各个方向运动的概率相等，故有

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

3. 概率的概念

状态A出现的概率 $W_A = \lim_{N \rightarrow \infty} (N_A / N)$

4. 归一化概念

把所有可能出现的状态的概率相加，其和应为1。

$$\sum_i W_i = 1 \quad \text{——归一化条件}$$

§ 12-3 理想气体压强的微观解释

一、理想气体的模型

宏观模型：在任何情况下严格符合气体三个实验定律。

微观模型：大小不计，除碰撞瞬间没有相互作用力的弹性球。

统计假设：平衡态下分子密度均匀分布，作热运动的分子向各方向运动的机会均等。

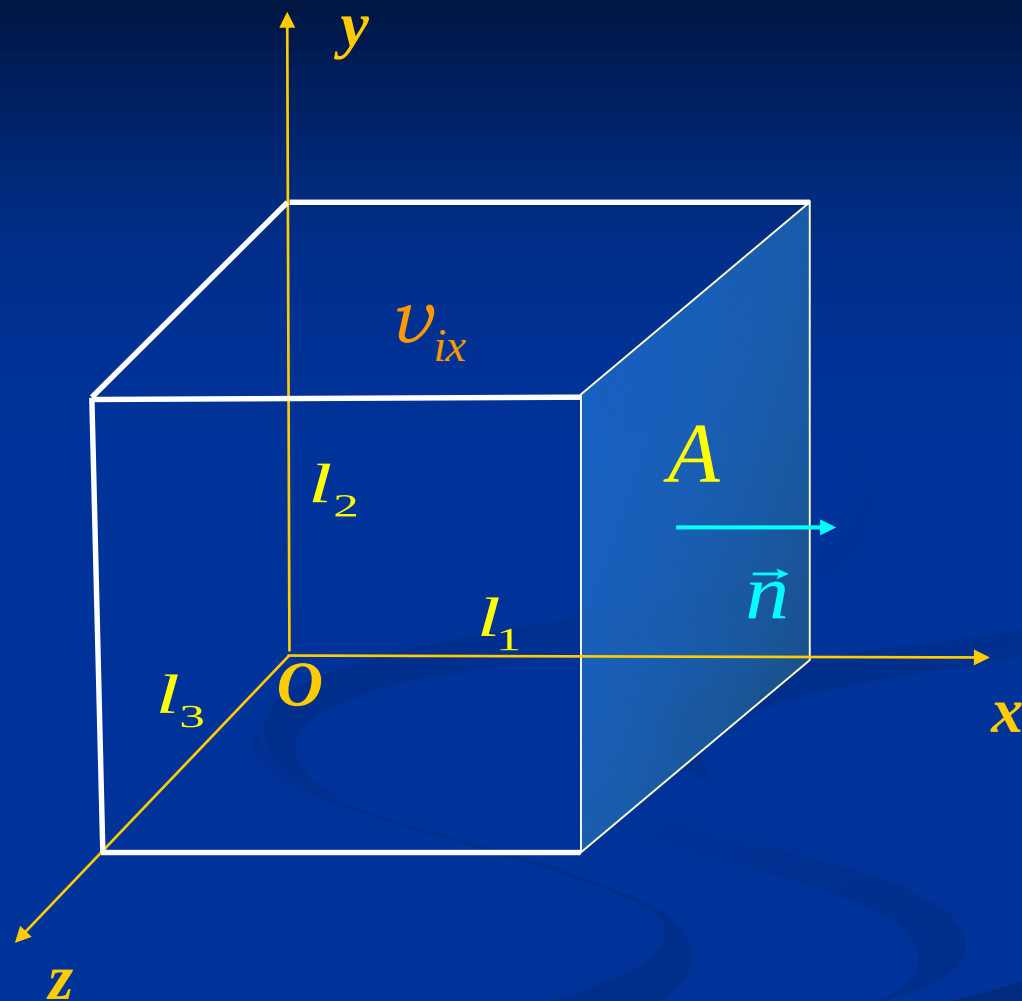
$$\overline{v_x} = \overline{v_y} = \overline{v_z} = 0 \qquad \overline{v_x^2} = \overline{v_y^2} = \overline{v_z^2} = \frac{1}{3} \overline{v^2}$$

二、理想气体的压强

体积为 V 的长方体容器中有 N 个同种理想气体分子，单个分子质量 m ，平衡态下分子数密度 n

假定分子 i 速度 $\vec{v}_i$

$$\vec{v}_i = v_{ix}\hat{x} + v_{iy}\hat{y} + v_{iz}\hat{z}$$



- 分子*i*与 A 碰撞1次，自身动量改变： $mv_{ix} \rightarrow -mv_{ix}$
- 分子*i*与 A 碰撞1次，给予A的冲量： $2mv_{ix}$
- 在dt 时间内，分子*i*与 A 碰撞的次数为： $v_{ix} dt / 2l_1$
- 在dt 时间内，分子*i*给予A的冲量为： $v_{ix} dt / 2l_1 \cdot 2mv_{ix}$
- 在dt 时间内，所有分子给予A的冲量dI 为：

$$dI = \sum_{i=1}^N v_{ix} dt / 2l_1 \cdot 2mv_{ix} = \sum_{i=1}^N \frac{mv_{ix}^2}{l_1} dt$$

- 由压力定义得： $F = \frac{dI}{dt} = \sum_{i=1}^N \frac{mv_{ix}^2}{l_1}$

●由压力定义得:

$$F = \frac{dI}{dt} = \sum_{i=1}^N \frac{mv_{ix}^2}{l_1}$$

●由压强定义得

$$P = \frac{F}{S} = \sum_{i=1}^N \frac{mv_{ix}^2}{l_1 l_2 l_3} = \frac{mN}{l_1 l_2 l_3} \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_{ix}^2 \right) = \frac{mN}{V} \cdot \overline{v_{ix}^2}$$

$$P = n \cdot m \overline{v_{ix}^2} = n \cdot m \frac{1}{3} \overline{v^2}$$

气体分子的平均平动动能

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

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

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

★说明:

(1) 压强 p 是一个统计平均量。它反映的是宏观量 p 和微观量 $\bar{\varepsilon}$ 的关系。对大量分子，压强才有意义。

(2) 压强大小与气体容器形状无关；

(3) 气体压强公式对混合理想气体也成立；

$$n = n_1 + n_2 + \dots$$

(4) 分子数密度 n 上升或热运动加剧，会使压强 P 增加；

45分钟内容（本次课结束）