



中原工学院

Zhongyuan University of Technology

7 气体动理论

任课教师 [曾灏宪](#)

中原工学院 理学院

热学的研究对象和研究方法

一. 热学的研究对象

热现象 物体与温度有关的物理性质及状态的变化

热学 研究热现象的理论

二. 热学的研究方法

热力学 从能量转换的观点研究物质的热学性质和其宏观规律

统计物理 从物质内部的微观结构出发，运用统计的方法探讨宏观物质的热性质

宏观量 描述宏观物体特性的物理量；如温度、压强、体积、热容量、密度、熵等。

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。

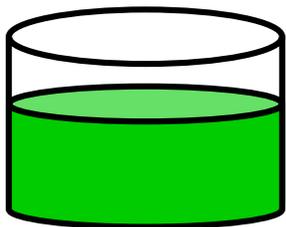
	宏观理论 (热力学)	微观理论 (统计物理学)
研究对象	热现象	热现象
物理量	宏观量	微观量
出发点	观察和实验	微观粒子
方法	总结归纳 逻辑推理	统计平均方法 力学规律
优点	普遍, 可靠	揭露本质
缺点	不深刻	无法自我验证
二者关系	热力学验证统计物理学, 统计物理学揭示热力学本质	

热力学系统 外界

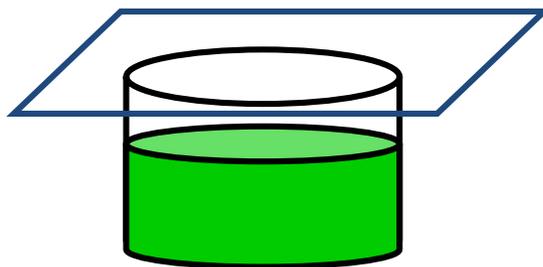
大量粒子组成的**宏观**、**有限**的体系。其比邻环境称为外界

系统	{	开放系统	与外界有 m 、 E 交换
		封闭系统	与外界有 E 交换，无 m 交换
		孤立系统	与外界无 E 、 m 交换

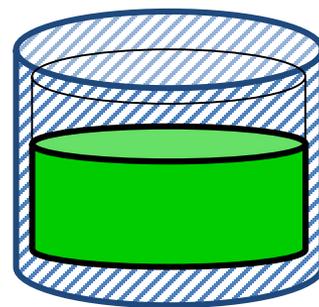
例



开放系统



封闭系统



绝热

孤立系统

热力学： 研究热力学系统的**状态**及**状态变化**

大学物理（上）

7 气体动理论

7.1 平衡态 理想气体物态方程 热力学第零定律

如何描述气体的状态？



压强



体积



温度

这些名词的含义是什么？本质是什么？

一 气体的物(状)态参量 (宏观量)

1 压强 p : 作用于容器壁上单位面积的正压力 (力学描述)。

单位: $1\text{Pa} = 1\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$

标准大气压: 45° 纬度海平面处,
 0°C 时的大气压。

$1\text{atm} = 1.01325 \times 10^5\text{Pa}$



压强

2 体积 V : 气体所能达到的最大空间 (几何描述) .

单位:

$$1\text{m}^3 = 10^3 \text{L} = 10^3 \text{dm}^3$$



体积

3 温度 T : 气体冷热程度的量度 (热学描述)。

单位: K (开尔文)。
热力学温标

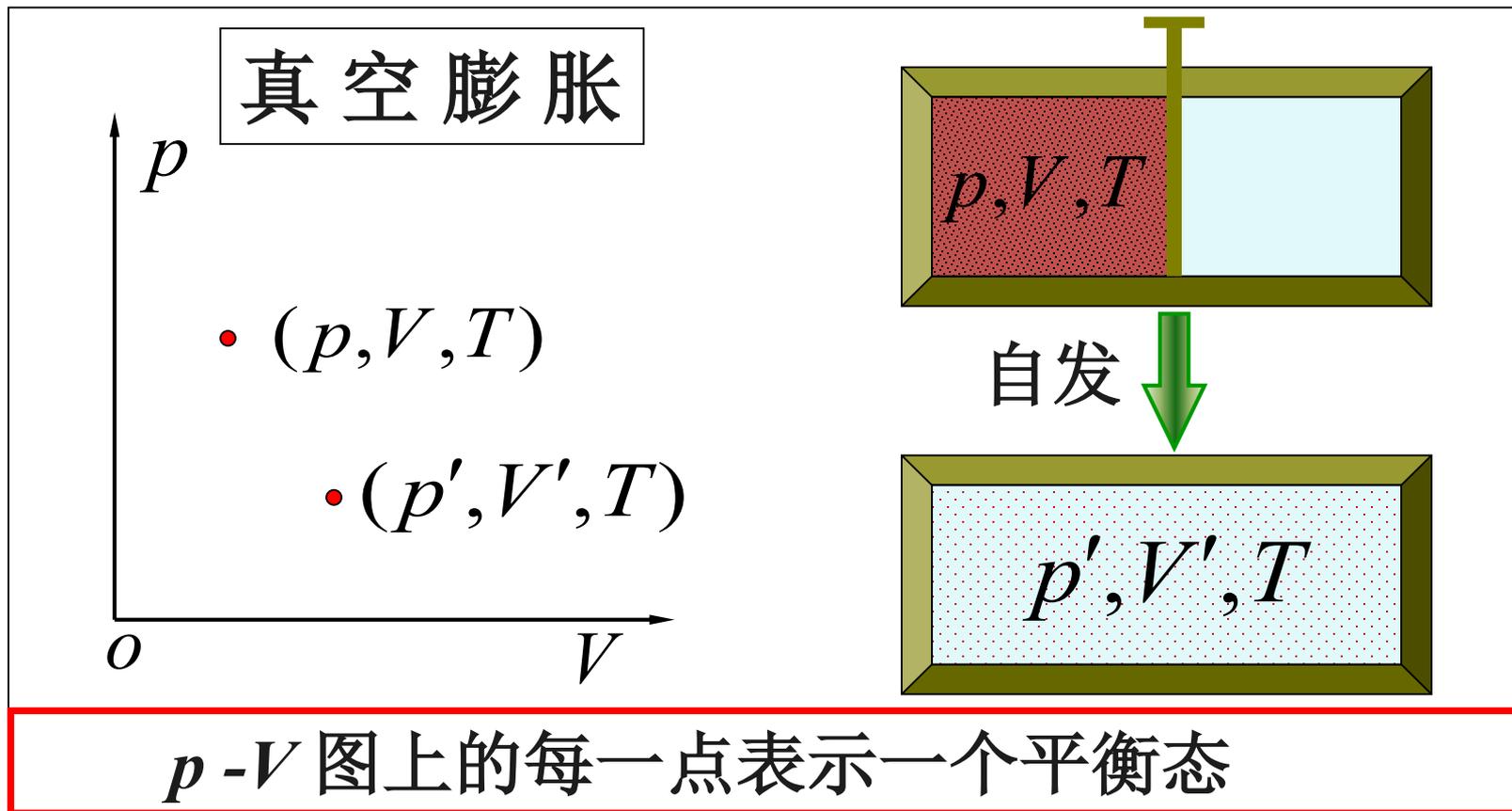
$$T = 273.15 + t$$



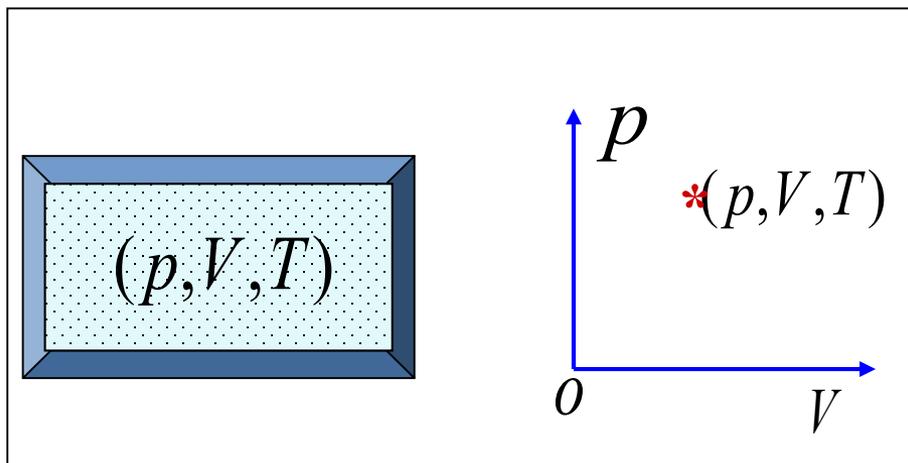
温度

二 平衡态

一定量的气体，在不受外界影响的情况下，经过一定的时间，系统达到一个稳定的、宏观性质不随时间变化的状态称为平衡态。（理想状态）



平衡态的特点



- 1) 单一性（系统中 p, T 处处相等——均匀）；
- 2) 物态的稳定性——不随时间变化；
- 3) 自发过程的终点；
- 4) 热动平衡（宏观不变，微观运动的动态平衡）。

三 理想气体物态方程

理想气体宏观定义：同时遵守玻意耳定律、盖·吕萨克定律、查理定律以及阿伏伽德罗定律的气体。

物态方程：平衡态宏观参量间的函数关系。

$$pV = \nu RT$$

$$N_A k = R$$

$$\nu = N / N_A$$

$$\nu = m' / M$$

$$R = 8.31 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

—— 摩尔气体常量

$$k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$$

—— 玻尔兹曼常数

$$N_A = 6.02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$$

—— 阿伏伽德罗常数

N 是体积 V 中的气体分子数

M : 摩尔质量

对质量为 m' 的理想气体 $\nu = m'/M$

理想气体
物态方程

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

分子数密度 (n)：单位体积内的分子数目。

$$n = N/V$$

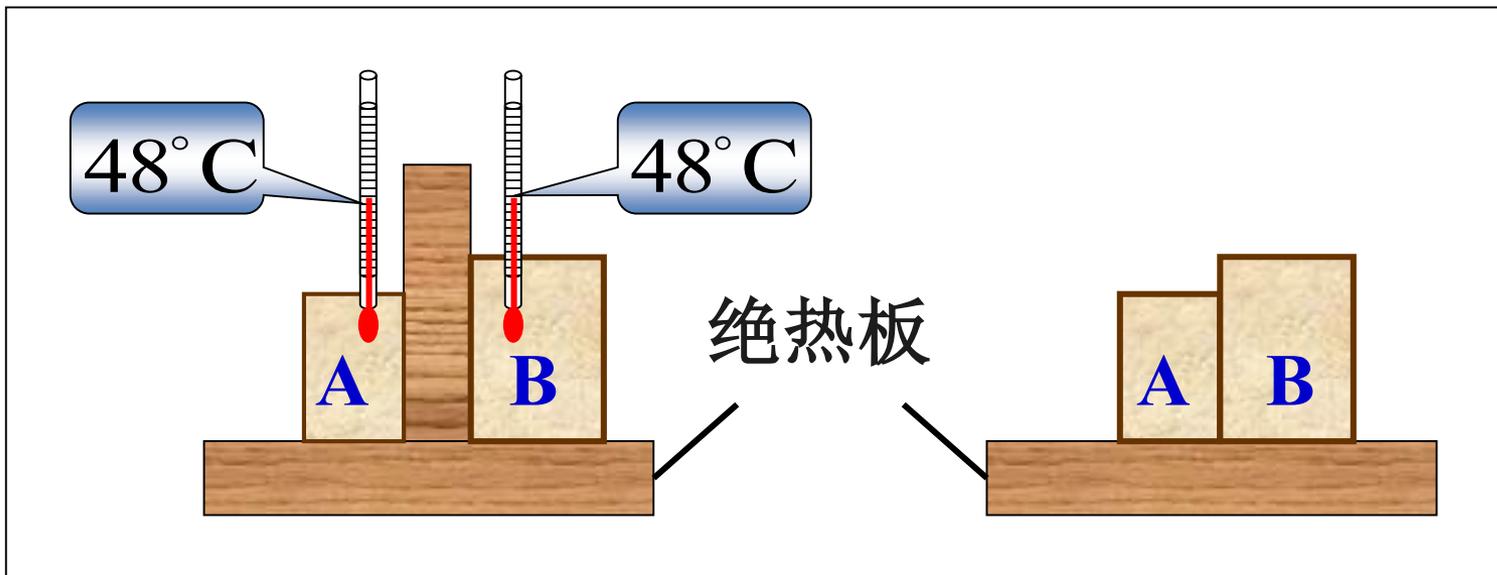
$$p = nkT$$

一般气体在温度不太低、压强不太大时近似为理想气体

例 在一密闭容器内，储有A、B、C三种理想气体，A气体的分子数密度为 n_1 ，它产生的压强为 P_1 ，B气体的分子数密度为 $2n_1$ ，C气体的分子数密度为 $3n_1$ ，则混合气体的压强为

- (A) $3P_1$ (B) $4P_1$ (C) $5P_1$ (D) $6P_1$

四 热力学第零定律



如果物体 A 和 B 分别与处于确定状态的物体 C 处于热平衡状态，那么 A 和 B 之间也就处于热平衡。

又叫**热平衡定律**，是建立温度概念的基本定律。

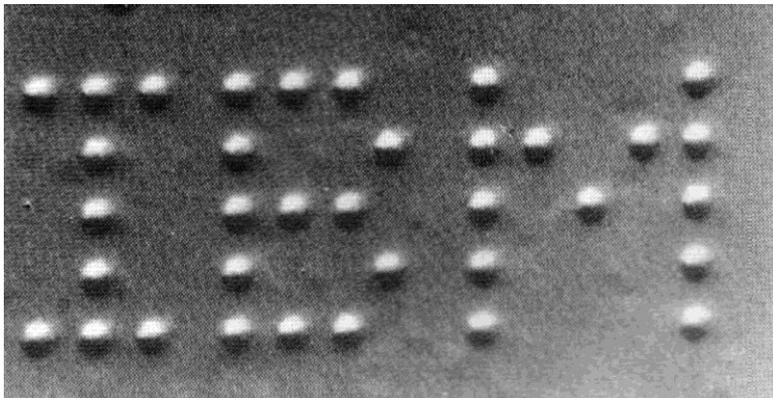
大学物理（上）

7 气体动理论

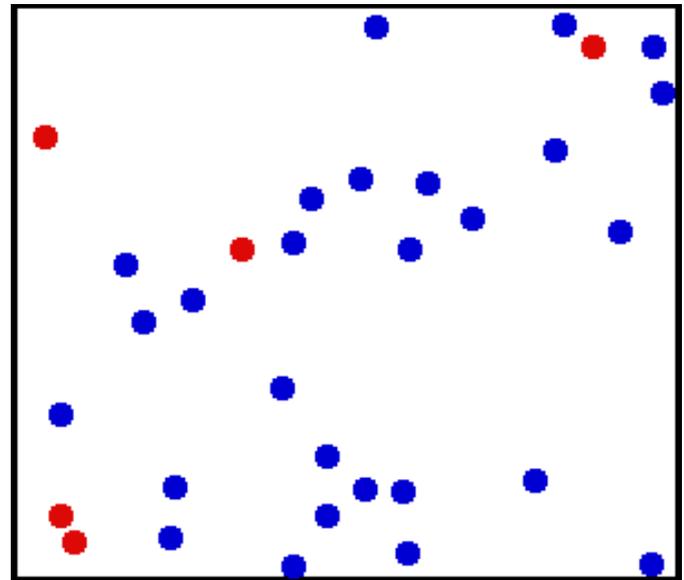
7.2 物质的微观模型 统计规律性

宏观物体都是由大量不停息地运动着的、彼此有相互作用的分子或原子组成的。

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。



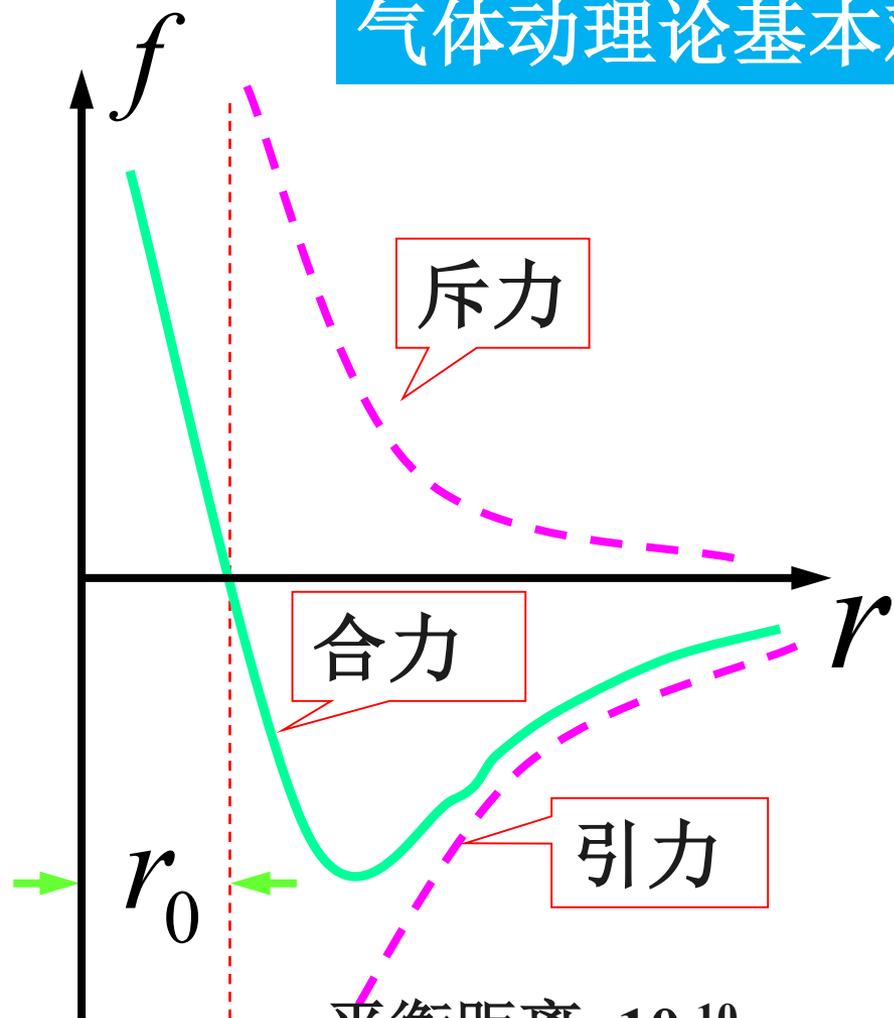
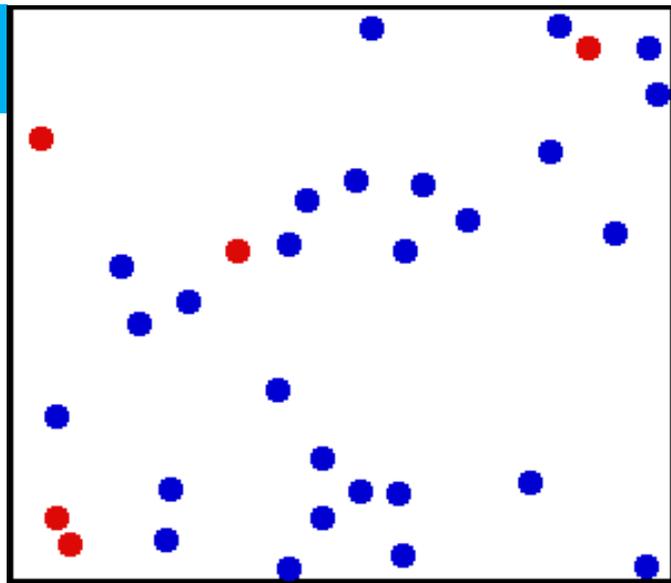
利用扫描隧道显微镜技术把一个个原子排列成 IBM 字母的照片。



气体分子平动

一 分子线度和分子力

气体动理论基本观点



- ❖ 分子
- ❖ 分子无规则运动
- ❖ 分子力（分子之间有相互作用力——引力和斥力）

r_0 : 平衡距离 $\sim 10^{-10}\text{m}$

$r > 10^{-9}\text{m}$ 时分子力可忽略

二 分子热运动的无序性及统计规律性

热运动

大量实验事实表明分子都在作永不停止的无规则运动。

例：常温和常压下的氧分子

$$\bar{v} \cong 450 \text{ m/s}$$

$$\bar{\lambda} \sim 10^{-7} \text{ m}; \quad \bar{z} \sim 10^{10} \text{ 次/s}$$

$\bar{\lambda}$ （平均自由程）：连续两次碰撞所经过路程的平均值

\bar{z} ：单位时间内平均碰撞次数

统计规律性

在一定的条件下，大量的偶然事件存在着一种必然规律性。

说明:

- 1). 某次测量值与统计平均值之间总有偏离 —— 涨落 (起伏) 现象
- 2). 构成整体偶然事件数量越大, 涨落现象就越不明显

概率: 在一定条件下, 某偶然事件出现的可能性的

大小 设 N 为实验总次数, N_A 为事件 A 出现的次数, 则

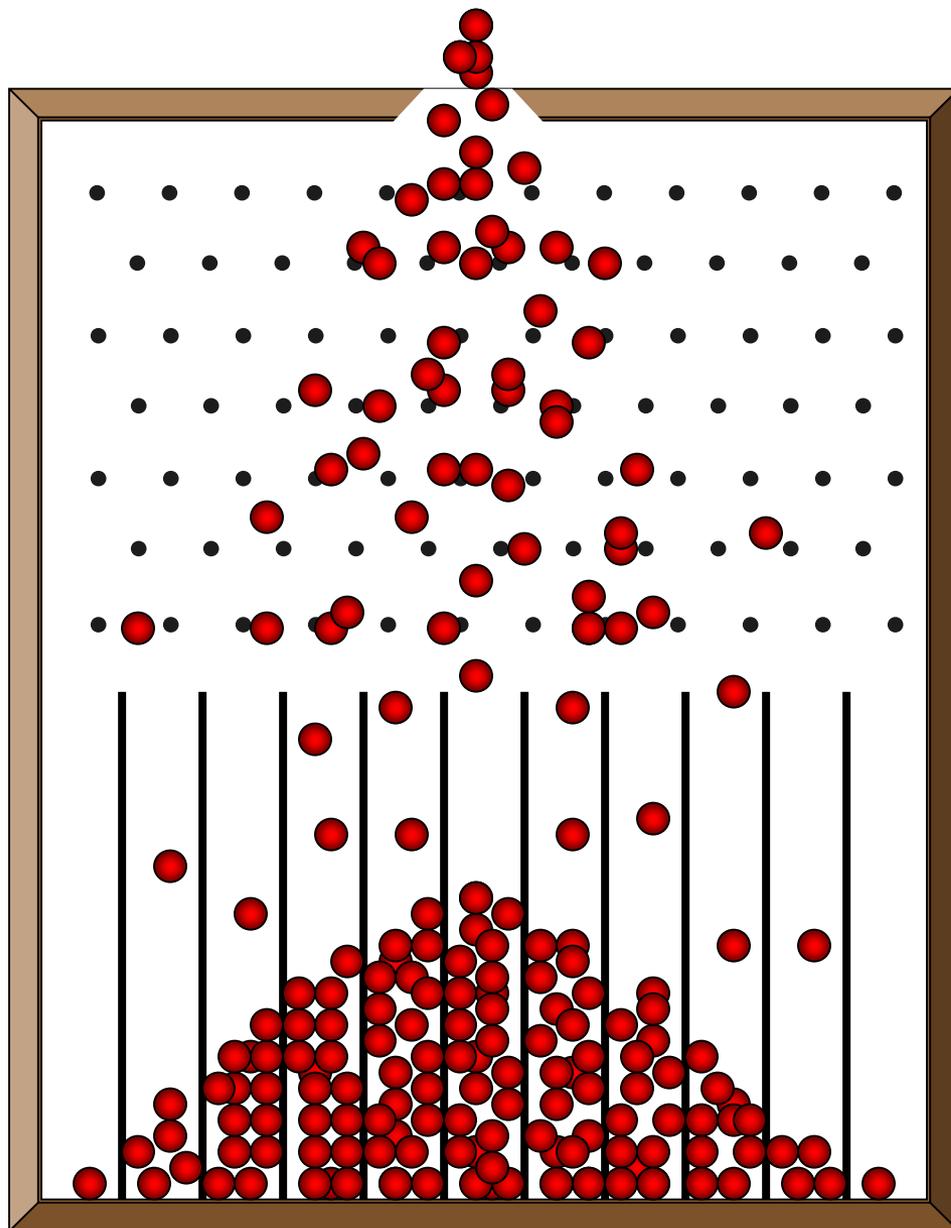
$$\omega_A = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{N_A}{N} \quad \text{简写为} \quad \omega_A = \frac{N_A}{N}$$

对 n 件事件:

$$\sum \omega_i = \sum \frac{N_i}{N} = \frac{\sum N_i}{N} = 1 \quad \text{—— 归一化条件}$$

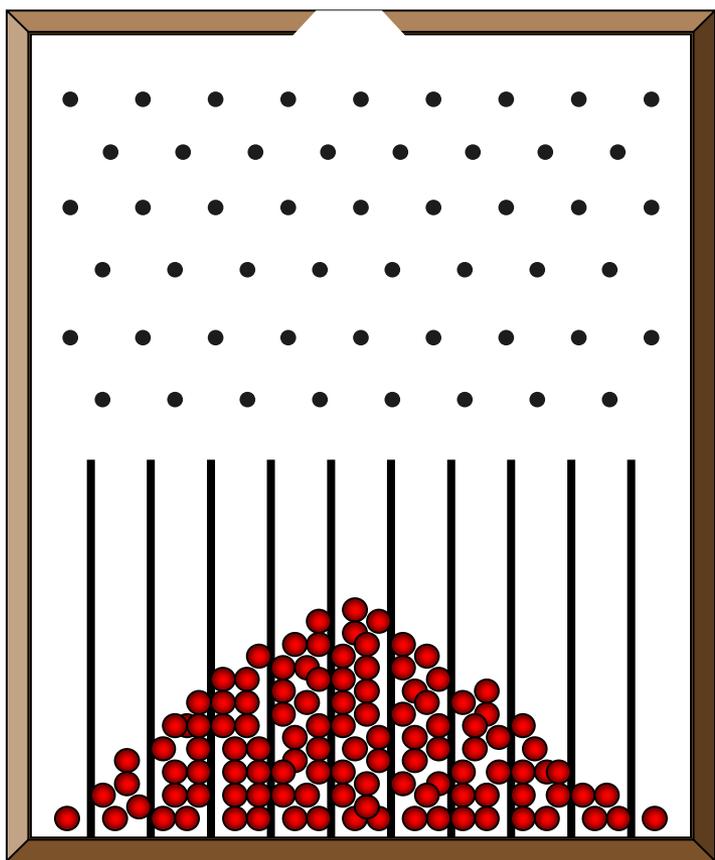
任一事件的几率满足 $0 \leq \omega_i \leq 1$

对于由大量分子组成的热力学系统从微观上加以研究时，必须用统计的方法。



小球在伽尔顿板中的分布规律

统计规律 当小球数 N 足够大时小球的分布具有统计规律.



设 N_i 为第 i 格中的粒子数 .

粒子总数
$$N = \sum_i N_i$$

$$\omega_i = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{N_i}{N}$$

概率 粒子在第 i 格中出现的
可能性大小 .

归一化条件
$$\sum_i \omega_i = \sum_i \frac{N_i}{N} = 1$$

压强 p ：作用于容器壁上单位面积的正压力。

—— 跟什么有关？如何计算？

—— 分析→建模→求解

大学物理（上）

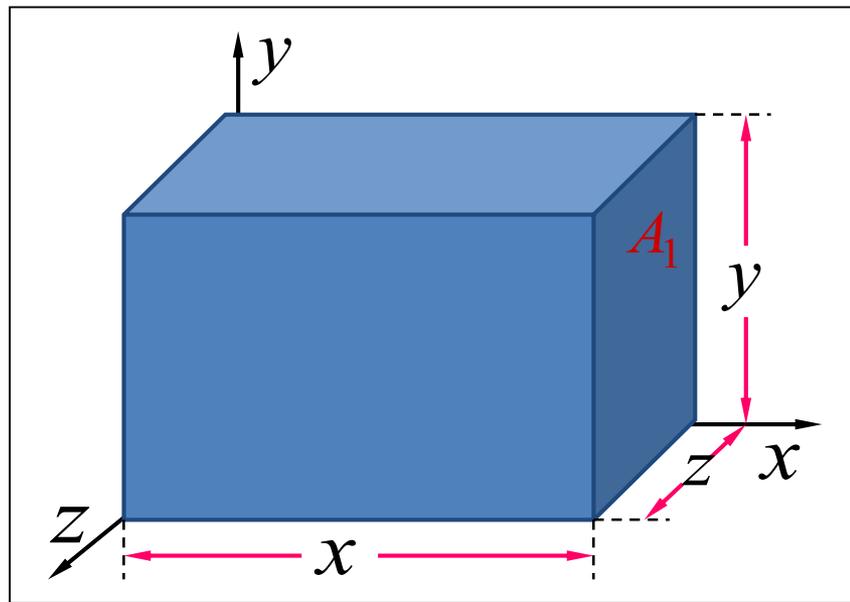
7 气体动理论

7.3 理想气体的压强公式

思路

$$- P = \frac{F}{S}$$

$$- S = yz, \quad F = ?$$



- 分子运动，碰撞器壁，动量定理

$$- F = \frac{\Delta(mv)}{\Delta t}, \quad \text{可取单位时间来计算}$$

- 先计算单个分子，再推广到全部

} 适用条件?

适用条件?

一 理想气体的微观模型

取近似：

1. 将分子看作**质点**
2. 分子间相互作用力除**碰撞**外可忽略不计
3. 分子间的相互碰撞以及分子与气壁的碰撞可以看作是**完全弹性碰撞**
4. 分子的运动遵从**经典力学**的规律

二 统计假设

均匀性假设

1. **位置**：每个分子处在容器空间内任一点的几率相同，任一点附近分子数密度均相等。
2. **速度**：每个分子向各个方向运动的概率相同，即气体分子的速度沿各个方向的分量的各种平均值相等。

分子各方向运动概率均等 意味着什么？

分子运动速度 $\overline{v_x^2} = \frac{1}{N} \sum_i v_{ix}^2$

各方向运动概率均等 $\rightarrow \overline{v_x^2} = \frac{1}{N} \sum_i v_{ix}^2$

x 方向速度平方的平均值 $\overline{v_x^2} = \frac{1}{N} \sum_i v_{ix}^2$

各方向运动概率均等 $\rightarrow \overline{v_x^2} = \overline{v_y^2} = \overline{v_z^2} = \frac{1}{3} \overline{v^2}$

➤ 前提:

单个分子对器壁碰撞特性：偶然性、不连续性。

大量分子对器壁碰撞的总效果：恒定的、持续的。

热动平衡的统计规律（平衡态）（统计假设）

1) 分子按位置的分布是均匀的

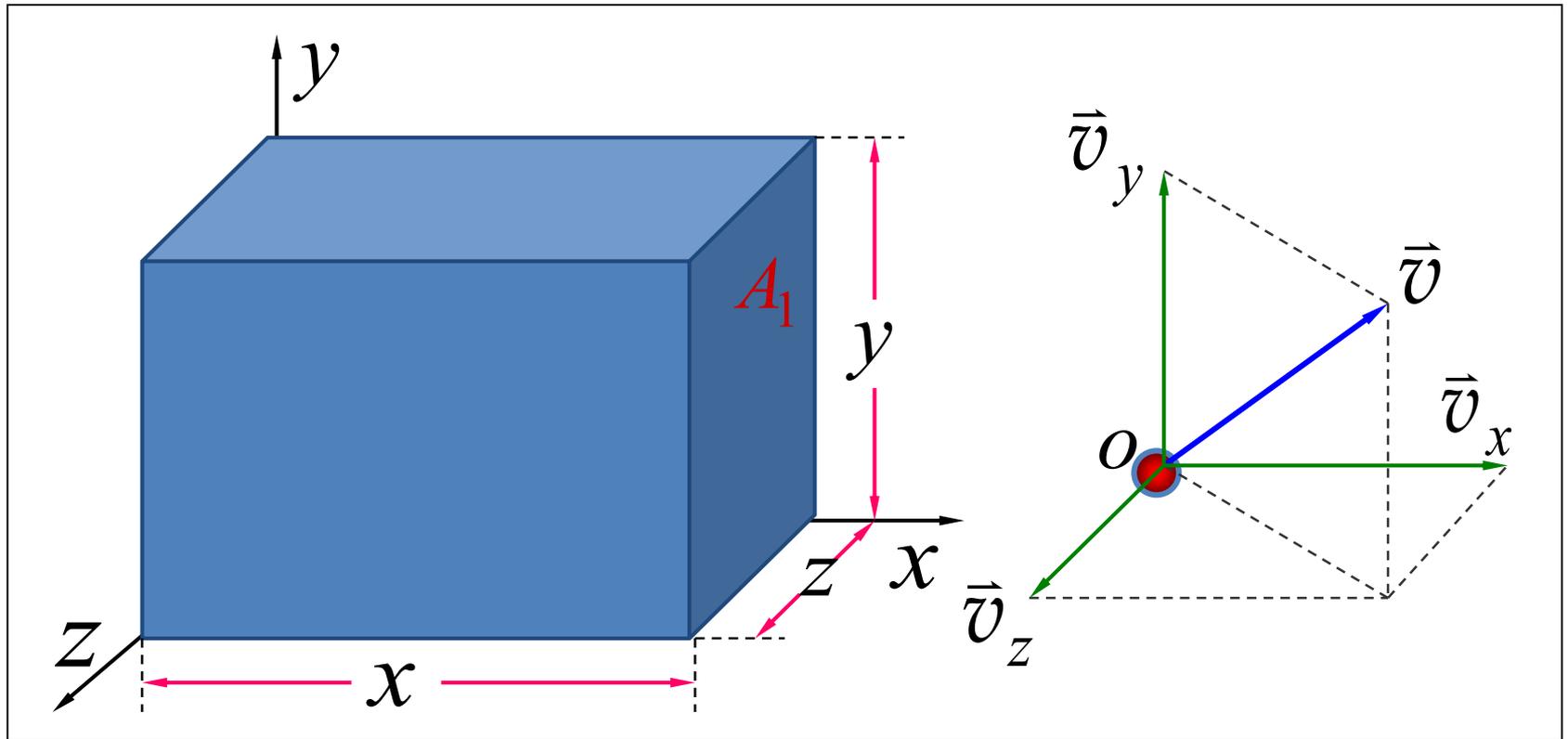
$$n = \frac{dN}{dV} = \frac{N}{V}$$

2) 分子各方向运动概率均等

分子运动速度 $\overline{v_x^2} = \overline{v_y^2} = \overline{v_z^2} = \frac{1}{3} \overline{v^2}$

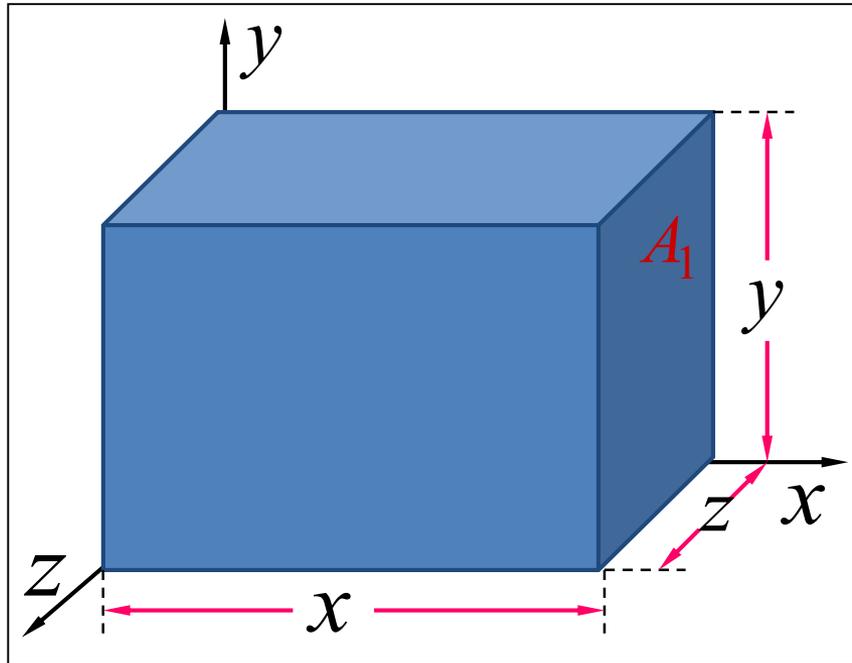
三 理想气体压强公式

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。



单个分子对器壁碰撞特性：偶然性、不连续性。

单个分子遵循牛顿力学规律



x 方向动量增量

$$\Delta p_{ix} = -2m v_{ix}$$

分子施于器壁的冲量

$$2m v_{ix}$$

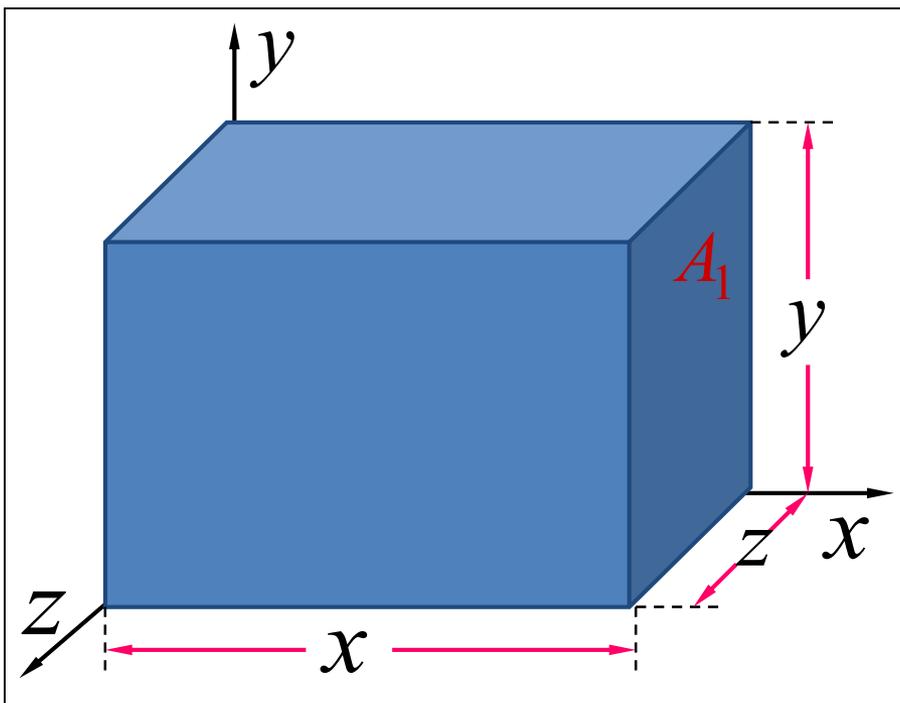
两次碰撞间隔时间

$$2x / v_{ix}$$

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 $m v_{ix}^2 / x$

大量分子的总效应



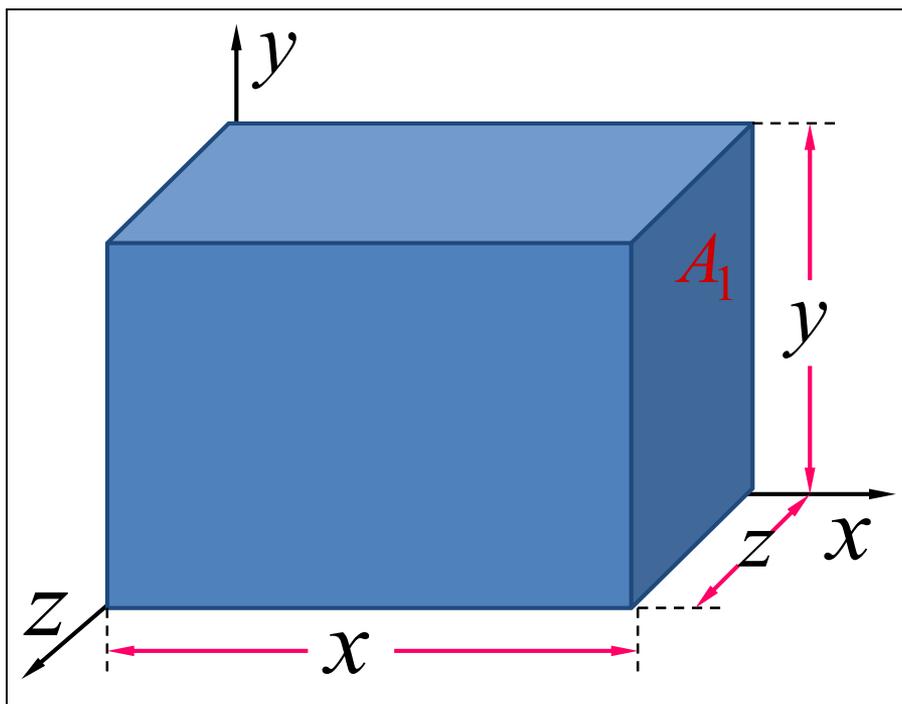
单个分子单位时间施于器壁的冲量

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

单位时间 N 个粒子对器壁总冲量?

$$\begin{aligned} \sum_i \frac{mv_{ix}^2}{x} &= \frac{m}{x} \sum_i v_{ix}^2 \\ &= \frac{Nm}{x} \sum_i \frac{v_{ix}^2}{N} = \frac{Nm}{x} \overline{v_x^2} \end{aligned}$$

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



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

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

分子平均平动动能 $\bar{\varepsilon}_k = \frac{1}{2} m \overline{v^2}$

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

压强的物理意义

统计关系式



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

宏观可测量量

微观量的统计平均值

分子平均平动动能 $\bar{\varepsilon}_k = \frac{1}{2} \overline{mv^2}$

压强公式反映了宏观量与微观量统计平均值之间的关系。压强的微观意义是大量气体分子在单位时间内施于器壁单位面积上的平均冲量。

统计结果，只有对大量的分子才有意义。

大学物理（上）

7 气体动理论

7.4 理想气体分子平均平动动能 与温度的关系

理想气体压强公式 $p = \frac{2}{3} n \bar{\varepsilon}_k$

理想气体状态方程 $pV = \frac{m'}{M} RT$ $p = nkT$

分子平均平动动能

$$\bar{\varepsilon}_k = \frac{1}{2} m \overline{v^2} = \frac{3}{2} kT$$

微观量的统计平均值

宏观可测量的量

温度 T 的物理意义

$$\bar{\varepsilon}_k = \frac{1}{2} m \overline{v^2} = \frac{3}{2} kT$$

- 1) 温度是分子**平均**平动动能的量度 $\bar{\varepsilon}_k \propto T$ (反映了热运动的剧烈程度)。
- 2) 温度是大量分子的**集体**表现, 对个别分子来说温度无意义。
- 3) 在同一温度下, **各种**气体分子**平均**平动动能均相等。(与热力学第零定律一致)

注意

热运动与宏观运动的区别: 温度所反映的是分子的无规则运动, 它与**物体的整体运动无关**, 物体的整体运动是其中所有分子的一种有规则运动的表现。

练习

一瓶氦气和一瓶氮气密度相同，分子平均平动动能相同，而且它们都处于平衡状态，则它们

- (A) 温度相同、压强相同。
- (B) 温度、压强都不同。
- (C) 温度相同，但氦气的压强大于氮气的压强。
- (D) 温度相同，但氦气的压强小于氮气的压强。

例 理想气体体积为 V ，压强为 p ，温度为 T ，一个分子的质量为 m ， k 为玻尔兹曼常量， R 为摩尔气体常量，则该理想气体的分子数为：

(A) pV/m

(B) $pV/(kT)$

(C) $pV/(RT)$

(D) $pV/(mT)$

作业

➤ **P206: 6; 7;**

玻意耳定律、盖·吕萨克定律和查理定律 以及阿伏伽德罗定律

➤ 玻意耳定律（波意耳-马略特定律）

- 在定量定温下理想气体的体积与压强成反比。

➤ 盖·吕萨克定律

- 在定量定压下，理想气体的体积 V 随温度 t 线性地变化。

➤ 查理定律（查理-盖-吕萨克定律）

- 定量定体（体积恒定）时，理想气体的压强与其温度成正比。

➤ 阿伏伽德罗定律

- 在相同的温度和压力下，**1**摩尔任何理想气体都占有同样的体积。

版权声明

本课件根据高等教育出版社《物理学教程（第二版）上册》（马文蔚 周雨青 编）配套课件制作。课件中的图片和动画版权属于原作者所有；部分例题来源于清华大学编著的“大学物理题库”；其余文字资料由 [Haoxian Zeng](#) 编写，采用 [知识共享 署名-相同方式共享 3.0 未本地化版本 许可协议](#) 进行许可。详细信息请查看[课件发布页面](#)。