

## 第二部分 热学

### 第9章 温度与气体动理论

杨振 副教授

Email: [yangzh97@mail.sysu.edu.cn](mailto:yangzh97@mail.sysu.edu.cn)

中山大学中法核工程与技术学院

2021年5月

# 第9章 温度与气体动理论

——介绍平衡态温度、状态方程等热力学基本概念。

§9.1 平衡态 温度 理想气

体温标

§9.2 理想气体状态方程

§9.3 气体分子的无规则  
运动

§9.4 理想气体的压强

§9.5 温度的微观意义

§9.6 能量均分定理

§9.7 麦克斯韦分布律及实验  
验证

§9.8 玻尔兹曼分布律

§9.9 实际气体等温线

§9.10 范德瓦尔斯方程

§9.11 非平衡态 输运过程

## § 9.11 范德瓦尔斯方程

### 1. 分子力

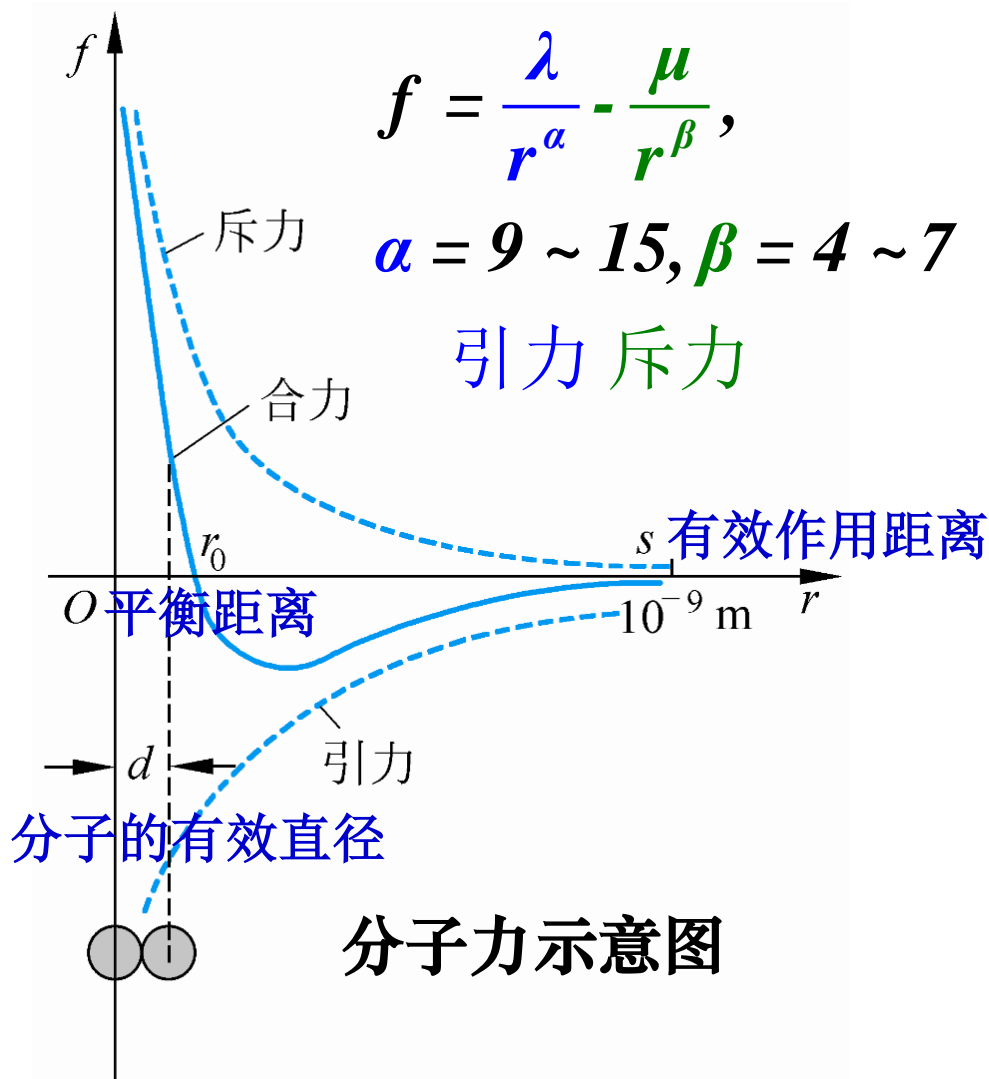
当  $r < r_0$  时，斥力；

当  $r > r_0$  时，引力；

当  $r = r_0$  时，分子力=0

当  $r > s$  时，分子力  $\rightarrow 0$

更接近实际气体的分子模型：  
有吸引力的  
刚性球模型



## 2. 范德瓦耳斯方程——更接近实际气体状态方程

### (1) 分子本身具有一定体积引起的修正：

1 mol 气体  $p = \frac{RT}{V'_m}$   $V'_m$  分子能在其中自由活动的空间的体积。

考虑刚性球分子本身的体积： $p = \frac{RT}{V_m - b}$  体积修正

理论上， $b$  约为 1 mol 气体分子本身体积的 4 倍

$$b = 4N_A \frac{4}{3} \pi \left( \frac{10^{-10}}{2} \right)^3 \approx 10^{-6} \text{ m}^3 = 1(\text{cm}^3)$$

在标准状态下，1 mol 气体所占的容积为  $V_{m,0} = 22.4 \text{ L}$ 。此时  $b$  仅为  $V_{m,0}$  的  $4/10^5$ 。可以忽略。但如果  $p$  增大，容积与  $b$  可比拟时， $b$  的修正必须考虑。

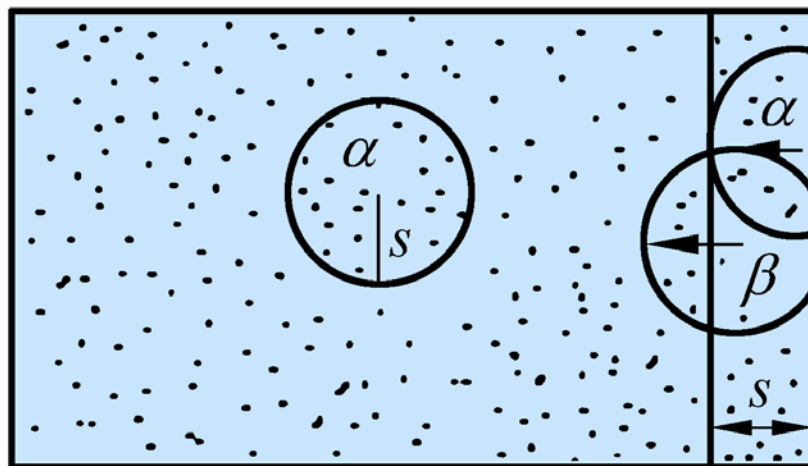
$b$  为反映气体分子本身体积的改正项。

## (2) 分子间引力引起的修正：

器壁受到的压强要比没  
考虑引力时要小

$$p = \frac{RT}{V_m - b} - p_{in}$$

气体内压强的产生



内压强 $p_{in}$ ：表面层分子受到指向气体内部的单位面积的作用力。

$$p_{in} \propto n^2 \propto \frac{1}{V_m^2} \text{ 或 } p_{in} = \frac{a}{V_m^2}$$

$a$ ：反映分子之间引力的常量。

1 mol 气体的范德瓦尔斯方程

$$(p + \frac{a}{V_m^2})(V_m - b) = RT$$

质量为 $m$ 的气体的范德瓦尔斯方程

$$(p + \frac{m^2}{M^2} \frac{a}{V^2})(V - \frac{m}{M} b) = \frac{m}{M} RT, \quad V = \frac{m}{M} V_m$$

对氮气，常温和压强低于 $5 \times 10^7$  Pa范围

$$a = 0.84 \times 10^5 \text{ Pa L}^2/\text{mol}^2, \quad b = 0.0305 \text{ L/mol}$$

范德瓦耳斯方程比玻意耳定律更近似地表示了实际气体的宏观性质。

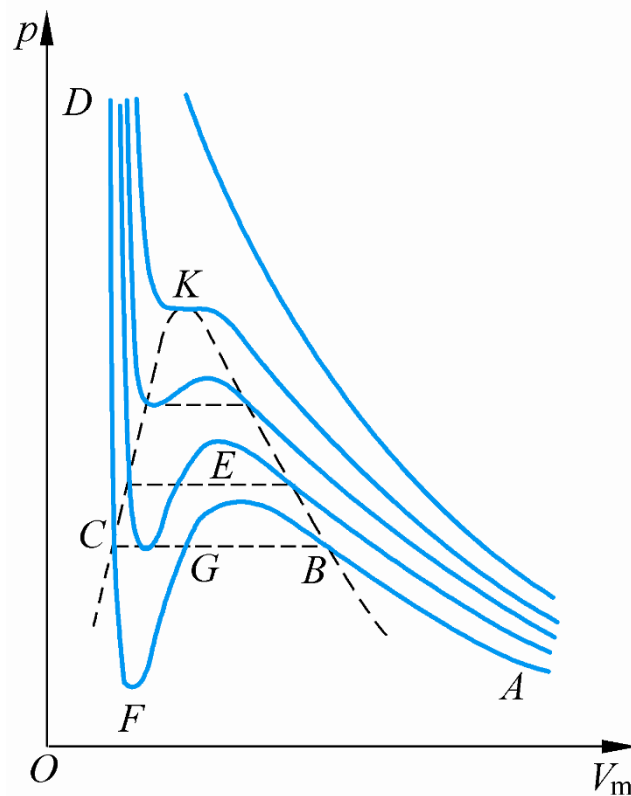
3. 范德瓦尔斯气体等温线  
与实际气体等温线非常类似，  
也有一条“临界等温线”。

$BE$ ：过饱和蒸汽 不太稳定  
引入凝结核心 - 液化  $\rightarrow BC$

应用：云室

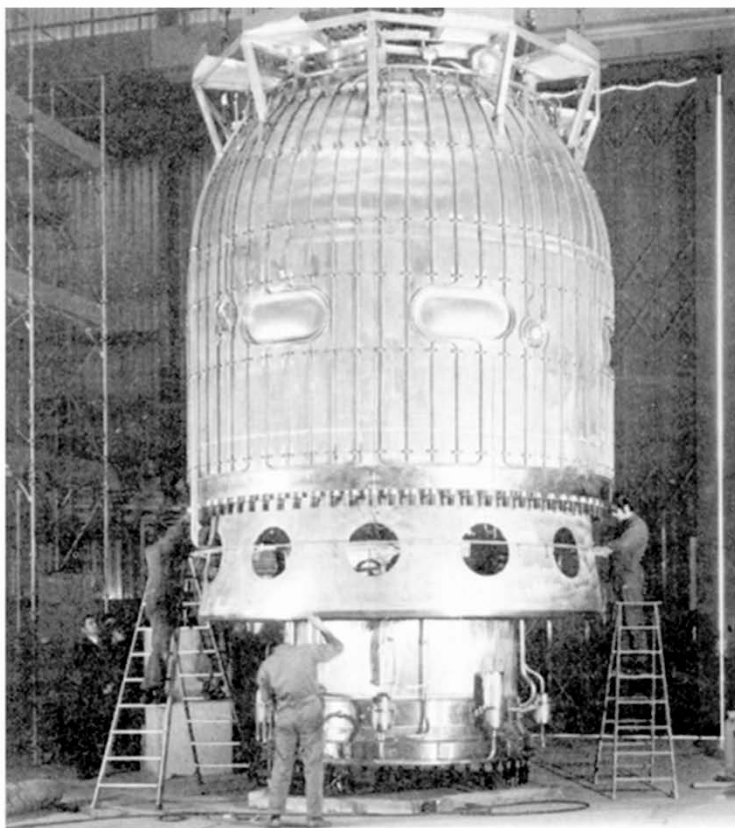
$CF$ ：过热液体  
引入汽化核心 — 汽化

应用：气泡室

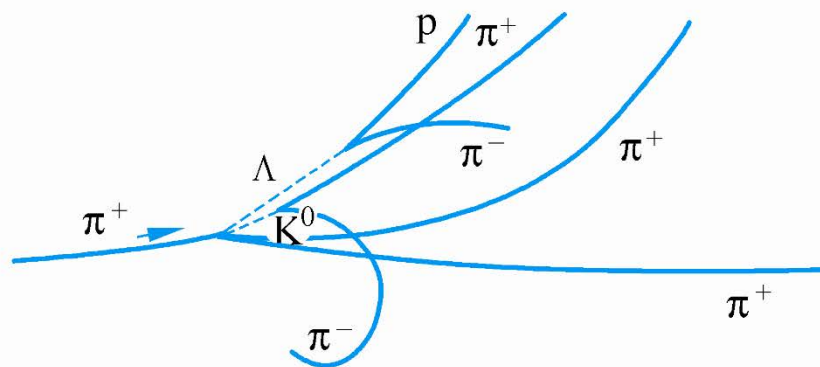
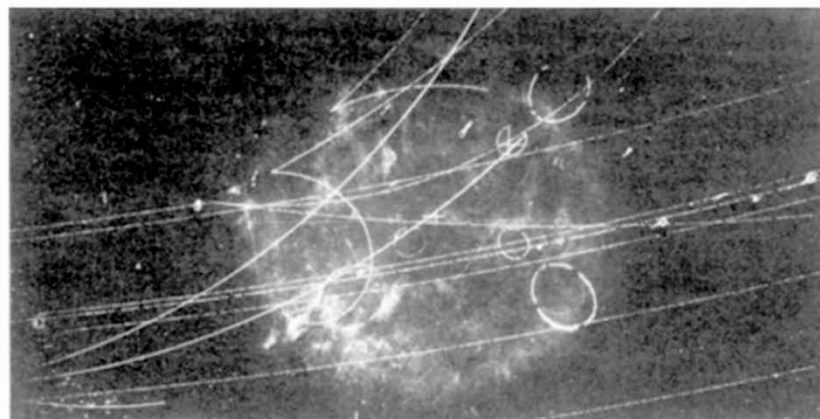


$FE$ ：实际不可实现

$BC$ ：虚线实际气体  
方程仍不完善！



(a)



(b)

气泡室的外形和高速粒子径迹的照片



## § 9.12 非平衡态 输运过程

当气体的宏观物理性质(如：流速、温度、密度)不均匀时，系统就处于**非平衡态**。

**输运过程**：在不受外界干预时，系统自发地从非平衡态向平衡态过渡过程。

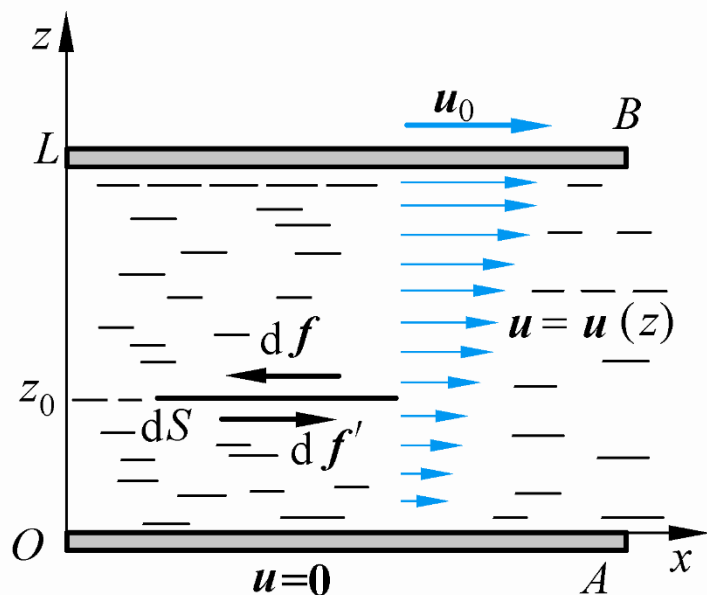
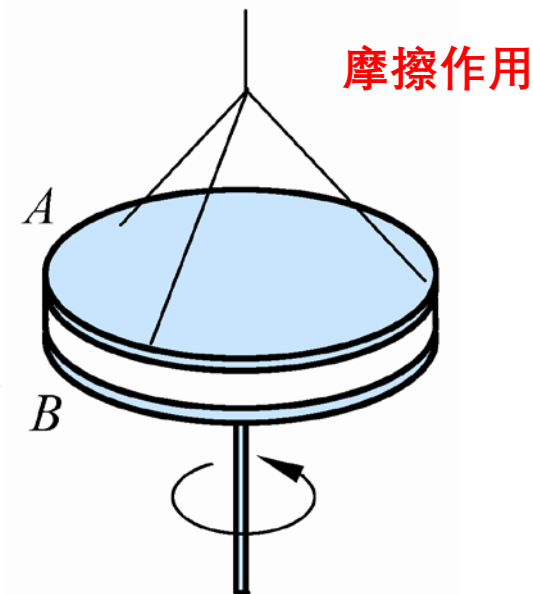
输运过程有三种：

内摩擦、热传导、扩散

# 1. 内摩擦

流体内各部分运动速度不同时发生。

相邻的空气层之间因速度不同，引起的相互作用力称为**内摩擦力**，或**黏力**。



流速 $u$ 是 $z$ 的函数，流速梯度 $\frac{du}{dz}$ ：沿 $z$ 方向经单位长度时流速的增加量，描述流速不均匀性的物理量。

设 $dS$ 的下面流速小的流体层对上面流速大的流体层的粘滞力为 $df$ ，反作用为 $df'$ 。

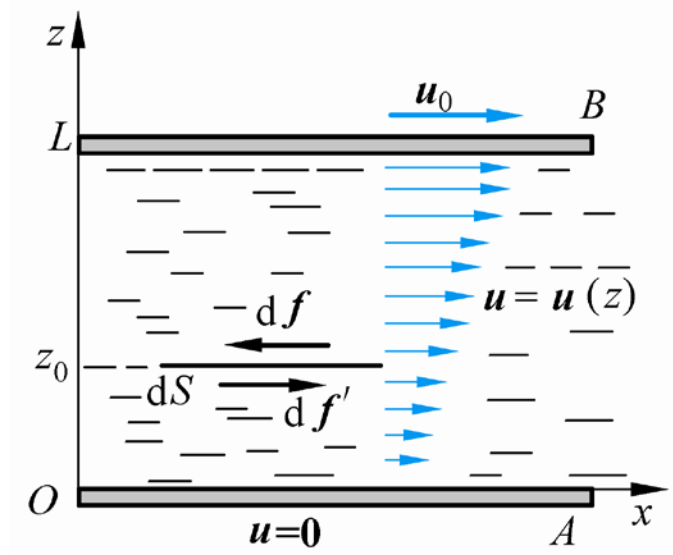
由牛顿第三定律：

$$df' = -df$$

实验证明：黏力与流速梯度和面积成正比。

$$df = -\eta \left( \frac{du}{dz} \right)_{z_0} dS$$

$\eta$  —— 内摩擦系数或黏度 ( $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ) ,  $\eta > 0$



内摩擦的微观机制在液体中和气体中不同。气体内摩擦的微观机制：是分子热运动输运定向动量的过程。

可证

$$\eta = \frac{1}{3} nm \bar{v} \lambda$$

## 2. 热传导

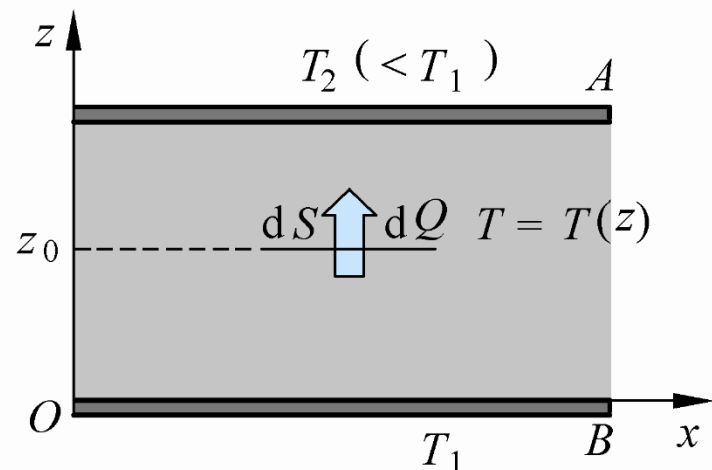
——物体内部各部分温度不均匀，将有热量传递。

温度 $T$ 是 $z$ 的函数，温度梯度 $dT/dz$ ：沿 $z$ 方向经单位长度的温度增加量，描述温度不均匀情况的物理量。

实验表明：在 $dt$ 时间内通过 $dS$ 沿 $z$ 轴方向传递的热量。

$$dQ = -\kappa \left( \frac{dT}{dz} \right)_{z_0} dS dt$$

$\kappa$ ——热导率（W/m·K）， $\kappa > 0$



热传导现象示意图

热量总是从温度高区域向温度低区域传递！

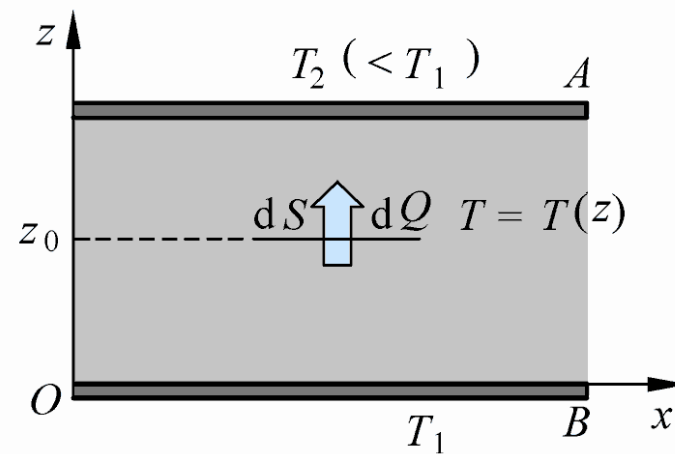
热传导的微观机制在固体、液体和气体中都不同。

气体内的**热传导的微观机制**：是分子在热运动中输运热运动能量的过程。

可证：

$$\kappa = \frac{1}{3}nm\bar{v}\lambda c_V$$

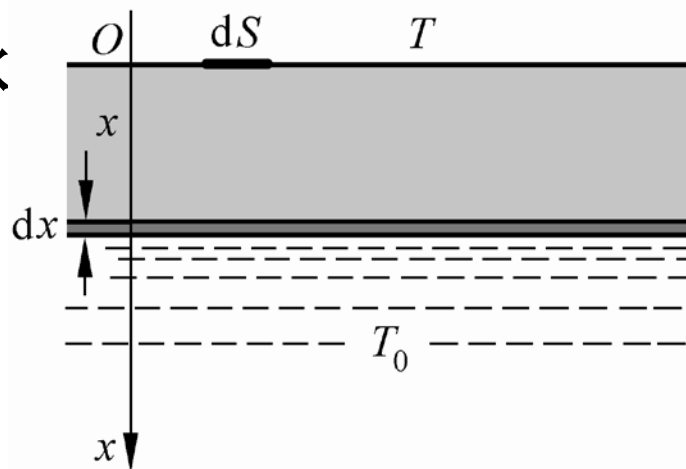
$c_V$ ——气体的定体比热 (J/kg·K)



**例** 北京冬季有些天白天的气温为零度，晚上在零度以下。白天破冰后，第二天又发现结冰厚度为 $D=3.0\text{cm}$ 。以晚上时间连续10小时计，晚上的平均气温如何？已知：冰的溶化热 $\lambda=3.3\times 10^5\text{ J/kg}$ ，冰的密度 $\rho=0.92\times 10^3\text{ kg/m}^3$ ，热导率 $\kappa=0.92\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ 。

**解** 如图，取垂直向下为 $x$ 轴正方向，未结冰时的自由水面为 $O$ 点。在 $dt$ 时间内在 $x$ 处再结冰的厚度为 $dx$ ，则由公式

$$dQ = -\kappa \left( \frac{dT}{dz} \right)_{z_0} dS dt$$



冰层温度一样

得到

$$\lambda \rho dS dx = -\kappa \frac{T - T_0}{x} dS dt$$

在 $T_0=0^\circ\text{C}$ 时，有

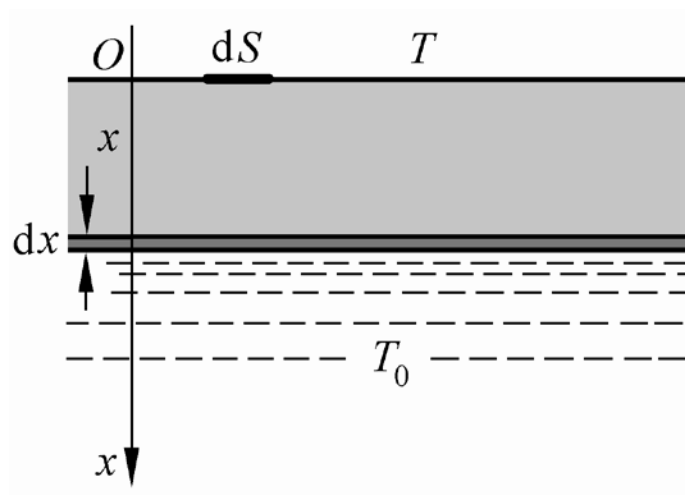
$$dt = -\frac{\lambda \rho x}{\kappa T} dx$$

两边积分，可得

$$t = -\frac{\lambda \rho D^2}{2\kappa T}$$

求出晚上的平均气温：

$$T = -\frac{\lambda \rho D^2}{2\kappa t} = -4.1^\circ\text{C}$$



**3.扩散**——物体各处的密度不均匀，将有物质从密度大处向密度小处散布。

密度 $\rho$ 是 $z$ 的函数，密度梯度 $d\rho/dz$ : 沿 $z$ 方向经单位长度的组分增加量，描述不均匀情况。

实验表明：在 $dt$ 时间内通过 $dS$

传递的组分质量

$$dM = -D \left( \frac{d\rho}{dz} \right)_{z_0} dS dt$$

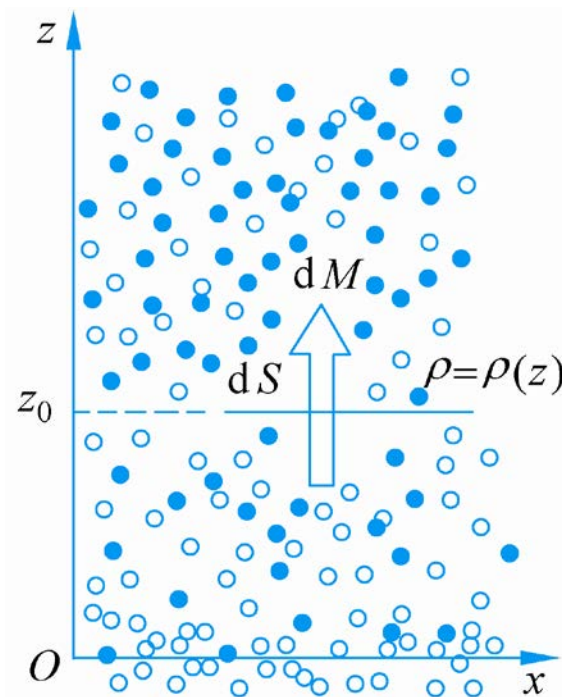
$D$ —扩散系数  
单位 $m^2/s$

气体中**扩散现象**的微观机制：

是分子热运动运输质量的过程。

可证：

$$D = \frac{1}{3} \bar{v} \lambda$$



扩散现象示意图