

吉
祥

热学第二讲



吉祥如意

微观描述方法

■ 物质的微观模型：

- 德谟克里特
- 伽桑迪
- 道尔顿
- 阿伏伽德罗
- 现代原子模型(量子力学)



吉祥如意

核心思想

- 物质是由大数分子组成
- 分子处于无规热运动中（例证）
- 分子间存在作用力（吸引力，排斥力）



吉祥如意

物质是由大数分子组成

- 物质，不论是固体、液体还是气体，均由不连续的、大量分子或原子（离子）组成。
- 微粒间有间隙
- 阿伏加德罗常数



吉祥如意

分子热运动例证

- 扩散: (渗碳)
- 布朗运动: 本质, 粒子线度: 10^{-8} m





涨落现象

这种偏离统计平均值的现象称为**涨落现象**

可以证明，在粒子数可自由出入的某空间范围内的粒子数的相对涨落反比于系统中粒子数N的平方根。

$$\frac{[(\Delta N)^2]^{1/2}}{N} \propto \frac{1}{\sqrt{N}}$$



粒子数越少，涨落现象越明显。



应用：

- 小镜子的小角度**振荡**
- 涨落电流的**热噪声**



吉祥如意

分子间存在相互作用力

- **吸引力**: 引力作用半径
- **排斥力**: 作用范围



分子间力与热运动



➤ 三相变化



四大相互作用:

- 万有引力
- 电磁相互作用
- 强相互作用
- 弱相互作用

吉祥如意

分子间的吸引力与排斥力

1、吸引力和排斥力

很多物质的分子**引力**作用半径约为分子直径的两倍左右，超过这一距离，分子间相互作用力已很少。

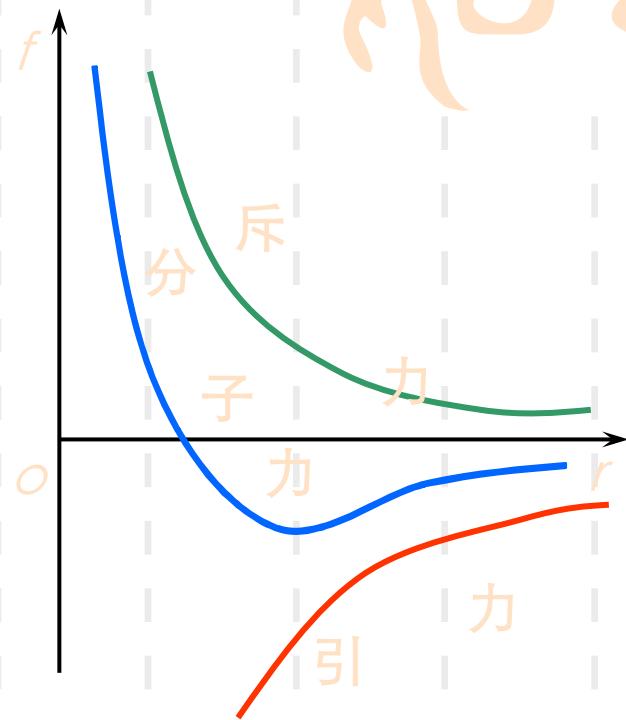


排斥力作用半径就是两分子刚好“接触”时两质心间的距离。



2、分子力与分子热运动

分子力是一种电磁相互作用力，故它是一种保守力，它应该有势能，称为分子作用力势能。





理想气体

微观模型

- 分子数密度: $2.7 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$
- 分子间距离: $3.3 \times 10^{-9} \text{ m}$
- 分子半径: $2.4 \times 10^{-10} \text{ m}$

理想气体微观模型的三个基本假定:

- 分子本身的线度远小于分子间距离
- 分子作用力忽略,作自由的匀速直线运动
- 分子间碰撞是完全弹性的



§ 1.6.2 单位时间内碰在单位面积器壁上 平均分子数

- 由于大数粒子的无规热运动，气体分子与容器器壁发生频繁碰撞。
- 但处于平衡态下大数分子所组成的系统应遵循一定统计规律。下面讨论：

• 气体分子碰撞频率或气体分子碰壁数——处于平衡态下的理想气体在单位时间内碰撞在单位面积上的平均分子数，以 Γ 表示。

• 在气体状态一定时，其 Γ 应恒定不变。



- 这里是一种最简单的求气体分子碰壁数 Γ 的方法。

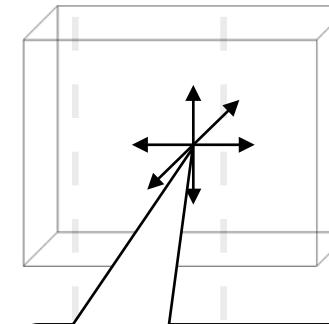
先作两条简化假设：

- (1) 设处于平衡态下的理想气体分子沿 $+x, -x, +y, -y, +z, -z$ 6个方向作等概率运动。

若气体分子数密度为 n , 任何一个单位体积中垂直指向 $+x, -x, +y, -y, +z, -z$ 6个方向运动的平均分子数均为 $n/6$ 。

(2) 假设每一分子均以平均速率运动。显然 Δt 时间内, 所有向 $-x$ 方向运动的分子均移动了距离

$$\bar{v}\Delta t$$

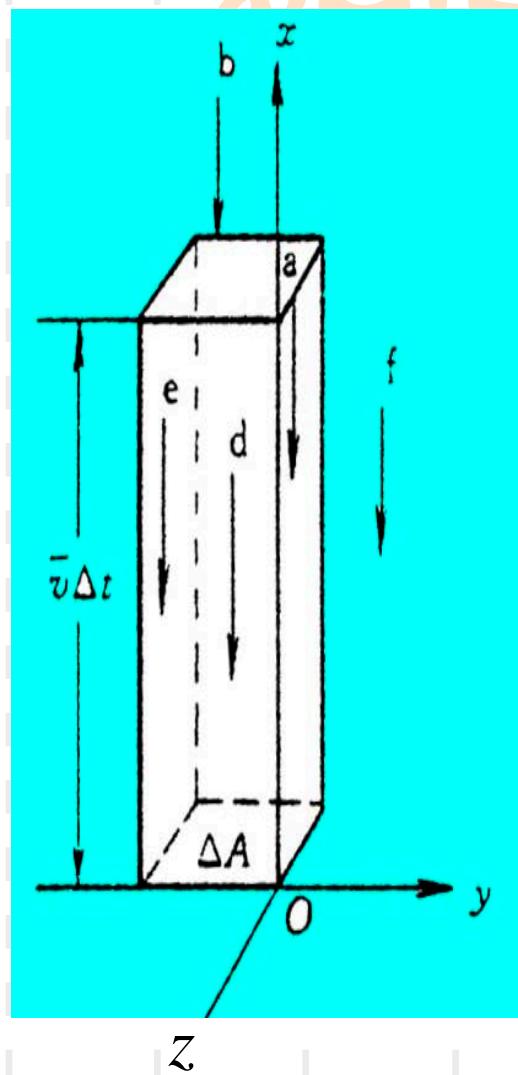


任一分子都向相互正交的6个方向做等概率运动

在上述 2 条假定基础上来考虑气体分子对 x, y 容器壁平面的碰撞。

Δt 时间内碰撞在 ΔA 面积器壁上的平均分子数 ΔN 等于图中柱体内向下运动的分子数。

$$\Delta N = \bar{v} \Delta t \times n / 6$$





单位时间内碰在单位面积器壁上的平均分子数为

$$\Gamma = \frac{\Delta N}{\Delta A \Delta t} = \frac{\bar{n}\bar{v}}{6}$$

- 以后在 § 2.5 中还将专门讨论气体分子碰壁数及其应用，而在 § 2.5.1 中将用较严密的方法导出，所得结果为

$$\Gamma = \frac{1}{4} \bar{n} \bar{v}$$

说明差异不大。

另外要注意：上述 2 公式适用于平衡态理想气体。

[例1.2]设某气体在标准状况下的平均速率为500 m/s,试分别计算1s内碰在 1cm^2 面积及 10^{-19}m^2 面积器壁上的平均分子数。

■ [解] 标准状况下气体分子的数密度

■ $n_0 = 2.7 \times 10^{25} / \text{m}^3$ 故

$$\Delta N_1 = \frac{n_0 v}{6} \Delta A \Delta t = \frac{1}{6} \times 2.7 \times 10^{25} \times 500 \times 10^{-4} \times 1 = 4.5 \times 10^{23} (\text{s}^{-1})$$

$$\Delta N_2 = \frac{1}{6} \times 2.7 \times 10^{25} \times 500 \times 10^{-19} \times 1 = 4.5 \times 10^8 (\text{s}^{-1})$$

气体分子碰撞器壁非常频繁,即使在一个分子截面积的大小范围内(10^{-19}m^2),1s内还平均碰上 4.5×10^8 次。



将下面两个公式

$$\Gamma = n\bar{v}/4$$

$$\Gamma \cong n\bar{v}/6$$

比较后可发现，虽然前面的推导十分粗糙，但并未产生数量级的偏差。



- 这种采用近似模型的处理方法突出了物理思想，揭示了事物主要特征，而无需作较繁杂的数学计算，是可取的。

吉祥如意

气体分子碰壁数计算

$$\Gamma = \frac{\Delta N}{\Delta A \Delta t} = \frac{n \bar{v}}{6}$$



$$\Gamma = \frac{\Delta N}{\Delta A \Delta t} = \frac{n \bar{v}}{4}$$



§ 1.6.3 理想气体压强公式

- (一) 理想气体压强公式
- 气体压强是单位时间内大数分子频繁碰撞器壁所给予单位面积器壁的平均总冲量。
- 这种碰撞是如此频繁，几乎可认为是无间歇的，所施予的力也是恒定不变的。

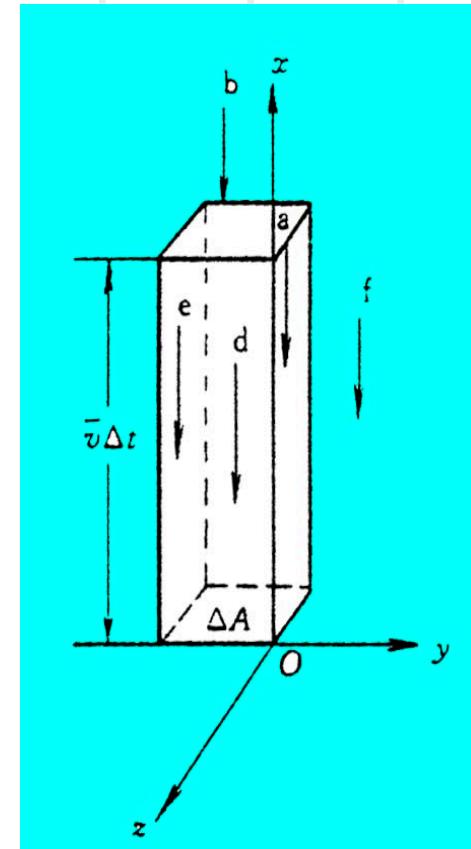
与推导气体分子碰壁数一样，也可采用不同近似程度的模型来推导理想气体压强公式。

- 这里介绍类似前面的最简单的方法，在 § 2.5.1 中将再作较严密的推导。

上节中曾假定，单位体积中均各有 $n/6$ 个分子以平均速率向 $\pm x$, $\pm y$, $\pm z$ 6个方向运动,

- 因而在 Δt 时间内垂直碰撞在 $y-z$ 平面的 ΔA 面积器壁上的分子数等于以 ΔA 为底,
- 以 $\bar{v}\Delta t$ 为高的柱体内所有向 ΔA 运动的分子的总数,

$$\Delta N = (n/6) \times \bar{v}\Delta t \cdot \Delta A$$



因为每个分子与器壁碰撞是完全弹性的，每次碰撞产生的动量改变了

$$2m\bar{v}$$

即向器壁施予冲量

$$-2m\bar{v}$$

Δt 时间内 ΔA 面积器壁所受到的平均冲量

$$= [\frac{1}{6}n\bar{v}\Delta A\Delta t] \times [2m\bar{v}]$$

•单位时间的总冲量是力，单位面积的力是压强，故

$$p = (\frac{1}{6})n\bar{v} \cdot 2m\bar{v} \cong (\frac{1}{3})nm\bar{v}^2$$

称理想气体压强公式。



推导中利用了平均速率近似等于均方根速率的条件，即

$$\bar{v} \cong \sqrt{\bar{v}^2} = v_{\text{rms}}$$

- 下标rms为root mean square的缩写，它表示方均根。

后面我们会看~~为什么~~确实有这样的近似关系，因为

$$v_{\text{rms}} = 1.085 \bar{v}$$

可见由这种近似所产生的误差较小。

- 有意思的是，利用较严密的方法所得到的气体压强公式仍然是

$$P = \frac{1}{3} n m \bar{v}^2$$



(二) 气体分子平均平动动能

$\overline{\varepsilon_t} = (\frac{1}{2})m\overline{v^2}$ 为每个气体分子的平均平动动能
(其中下标 t 表示平动), 即

$$P = \frac{1}{3} n m \overline{v^2} = \frac{2}{3} n \overline{\varepsilon_t}$$

早在1857年, 克劳修斯 (Clausius) 即得到这一重要关系式。

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

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

• 它们都称为理想气体压强公式, 它们都分别表示了宏观量 (气体压强) 与微观量 (气体分子平均平动动能或均方速率) 之间的关系。



必须说明，在推导理想气体压强公式时，认为气
体压强是大数分子碰撞在单位面积器壁上的平均冲
击力。

- 实际上气体压强不仅存在于器壁，也存在于气体内
部，对于理想气体，这两种压强的表达式完全相同。
 - 将气压计引入气体内部并不能测定气体内部的压强
，因为气压计本身就是一个器壁。
 - 气体内部压强由气体性质决定，它与气压计是否引
入无关。请考虑思考题1.19。

吉祥如意

最后还要强调：

气体分子碰壁数及气体压强公式均适用于平衡态下

的气体。

布朗粒子就是因为粒子线度已不属宏观范围，涨落

使表面受到的压强处处作随机变化，因而会产生布朗

运动。

只要器壁取宏观尺寸，同一容器器壁上压强必处处

相等。



(三) 理想气体物态方程的另一形式 $\rho = nkT$

- 理想气体物态方程可改写为
- $\rho V = \nu RT = \nu N_A kT$
- $p = (\nu N_A / V) = (N/V) kT = nkT$
- 其中 k 称为玻耳兹曼常量。
 - R 是描述1mol气体行为的普适常量，

 k 是描述一个分子或一个粒子行为的普适恒量，
 - 这是奥地利物理学家玻耳兹曼 (Boltzmann) 于1872年引入的。
 - 这是理想气体方程的另一重要形式，也是联系宏观物理量 (p, T) 与微观物理量 (n) 间的一个重要公式。

吉祥如意

理想气体压强公式

- 气体压强产生的本质
- 气体压强计算：

$$p = \frac{1}{6} n \bar{v} \bullet 2m\bar{v} \approx \frac{1}{3} n m \bar{v}^2$$

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

(理想气体)





- 压强的单位: Pa, Torr(mmHg), bar, atm
- 真空的获得 (见参考书):
 - 极高真空(XHV): $< 10^{-12}$ Pa
 - 超高真空(UHV): $10^{-6} \sim 10^{-12}$
 - 高真空(HV): $10^{-1} \sim 10^{-6}$
 - 低真空: $10^3 \sim 10^{-1}$
 - 粗真空: $10^5 \sim 10^3$





§ 1. 6. 4 温度的微观意义

- (一) 温度的微观意义
- 从微观上理解，温度是平衡态系统的微观粒子热运动程度强弱的度量。
- 将 $p = nkT$ 与 $p = 2n\overline{\varepsilon_t} / 3$ 比较可得分子热运动平均平动动能

$$\overline{\varepsilon_t} = \frac{1}{2} m \overline{v^2} = \frac{3}{2} kT$$

- 它表明分子热运动平均平动动能与绝对温度成正比。
- 绝对温度越高，分子热运动越剧烈。

绝对温度是分子热运动剧烈程度的度量，这是温度的微观意义所在。



应该指出：

(1) $\overline{\varepsilon_t}$ 是分子杂乱无章热运动的平均平动动能，
它不包括整体定向运动动能。

- 只有作高速定向运动的粒子流经过频繁碰撞改变运动方向而成无规则的热运动，定向运动动能转化为热运动动能后，所转化的能量才能计入与绝对温度有关的能量中。

- 问题：宇宙飞船发射升空过程中，速度越来越快，飞船中的气体温度是否在不断升高？

(2) 粒子的平均热运动动能与粒子质量无关，而仅与温度有关。



方均根速率的例题：

[例1.3] 试求T=273K时氢分子的方均根速率及空气分子的方均根速率。

- [解] 氢分子的方均根速率

$$v_{rms} = \sqrt{\frac{3RT}{M_m}} = \sqrt{\frac{3 \times 8.31 \times 273}{2 \times 10^{-3}}} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} = 1.84 \times 10^3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

空气分子的方均根速率

$$v_{rms} = \sqrt{\frac{3 \times 8.31 \times 273}{29 \times 10^{-3}}} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} = 486 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$



1eV 的热运动平均平动能量：

- [例1. 4]在近代物理中常用电子伏特 (eV) 作为能量单位，试问在多高温度下分子的平均平动动能为1eV？
- 1K温度的单个分子热运动平均平动能量相当于多少电子伏特？



[解] $1\text{eV} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$,



$1\text{eV} = 7.74 \times 10^3 \text{ K}$ 热运动平均平动能



1K 温度的热运动平均平动能量



$= 1.29 \times 10^{-4} \text{ eV}$ 。



吉祥如意

- 问题：
- 氢原子基态电子具有-13. 6 eV能量，试问氢原子电离需要多高数量级的温度。
- 太阳中心的温度为 1.5×10^7 K, 试问在太阳中心, 氢原子将以什么形态出现?



吉祥如意

理想气体公式的小结:

$$\Gamma = \bar{n\bar{v}} / 4$$

$$\Gamma \cong \bar{n\bar{v}} / 6$$

$$P = \frac{1}{3} n m \bar{v^2}$$

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

$$p = nkT$$

$$\bar{\varepsilon_t} = \frac{1}{2} \bar{m v^2} = \frac{3}{2} kT$$



吉祥如意

温度的微观意义

由 $p = \frac{2}{3}n\bar{\varepsilon}_t$ } $\rightarrow \bar{\varepsilon}_t = \frac{3}{2}kT$, 即 T 和 $\bar{\varepsilon}_t$ 单值对应。
和 $p = nkT$

由此给出温度的统计意义 —

T是大量分子热运动平均平动动能的量度。

$$\left. \begin{array}{l} \bar{\varepsilon}_t = \frac{1}{2}m\overline{\boldsymbol{v}^2} \\ \bar{\varepsilon}_t = \frac{3}{2}kT \end{array} \right\} \rightarrow \sqrt{\overline{\boldsymbol{v}^2}} = \sqrt{\frac{3kT}{m}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}} \propto \sqrt{T},$$

$\sqrt{\overline{\boldsymbol{v}^2}}$ 称为方均根速率 (root-mean-square speed)

吉
祥
如意

$T = 273\text{K}$ 时，

$$\bar{\varepsilon}_t = \frac{3}{2}kT \doteq 5.65 \times 10^{-21} \text{ J}$$

$$\doteq 3.53 \times 10^{-2} \text{ eV} \quad (\text{记住数量级!})$$

吉
祥
如意

$$\text{H}_2: \sqrt{\boldsymbol{v}^2} = 1.84 \times 10^3 \text{ m/s}$$

吉
祥
如意

$$\text{O}_2: \sqrt{\boldsymbol{v}^2} = 4.61 \times 10^2 \text{ m/s} \quad (\text{记住数量级!})$$



吉祥如意

■ 概括：

➤ 温度：T

- 平均平动动能的量度
- 描述平衡态
- 统计概念
- 无规则运动

➤ 热量：Q

- 能量的多少

水位与水量的区别

吉祥如意

单 位

- | | |
|--|---------------------|
| ■ M: 10^6 | ■ μ : 10^{-6} |
| ■ G: 10^9 | ■ n: 10^{-9} |
| ■ T: 10^{12} | ■ p: 10^{-12} |
| ■ P:  10^{15} | ■ f: 10^{-15} |
| ■ E: 10^{18} | ■ a: 10^{-18} |



吉祥如意

- $1 \text{ eV} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$
- $1 \text{ eV} \sim 7.74 \times 10^3 \text{ K}$



吉祥如意

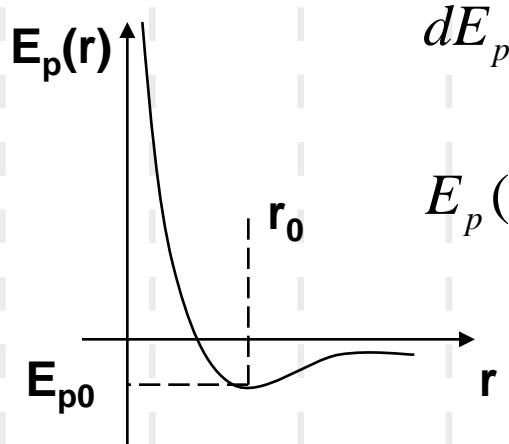
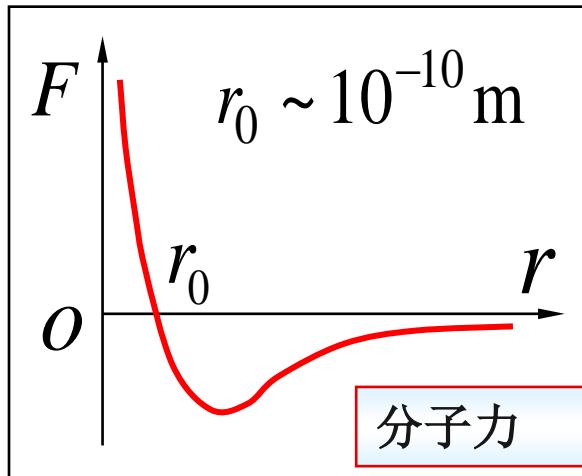
压强再讨论

- 由于碰撞产生的平均总冲量（气体）
- 分子作用力（液体）：
 ➤ 排斥力
 ➤ 吸引力：实际物质的内压强： Δp_i
- 重量（固体）：只有上下关系

吉祥如意

分子间作用力

一、分子间互作用势能曲线



$$dE_p(r) = -F(r)dr \text{ 或 } F = -\frac{dE_p}{dr}$$

$$E_p(r) = -\int_{\infty}^r F(r)dr$$

- 一种理解：指分子的大小： r_0
- 两分子质心的最短距离---分子的**有效直径**： d

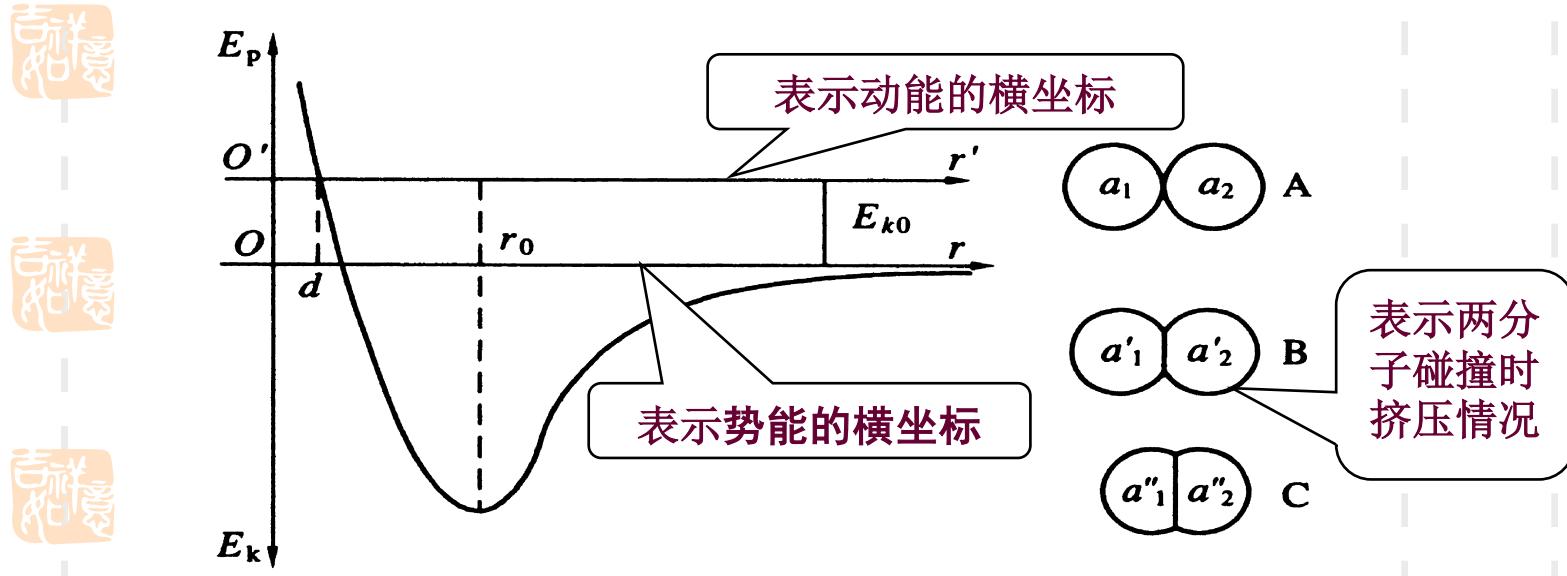
分子直径

§ 1.7.2 分子碰撞有效直径, 固体分子热振动, 固体热膨胀

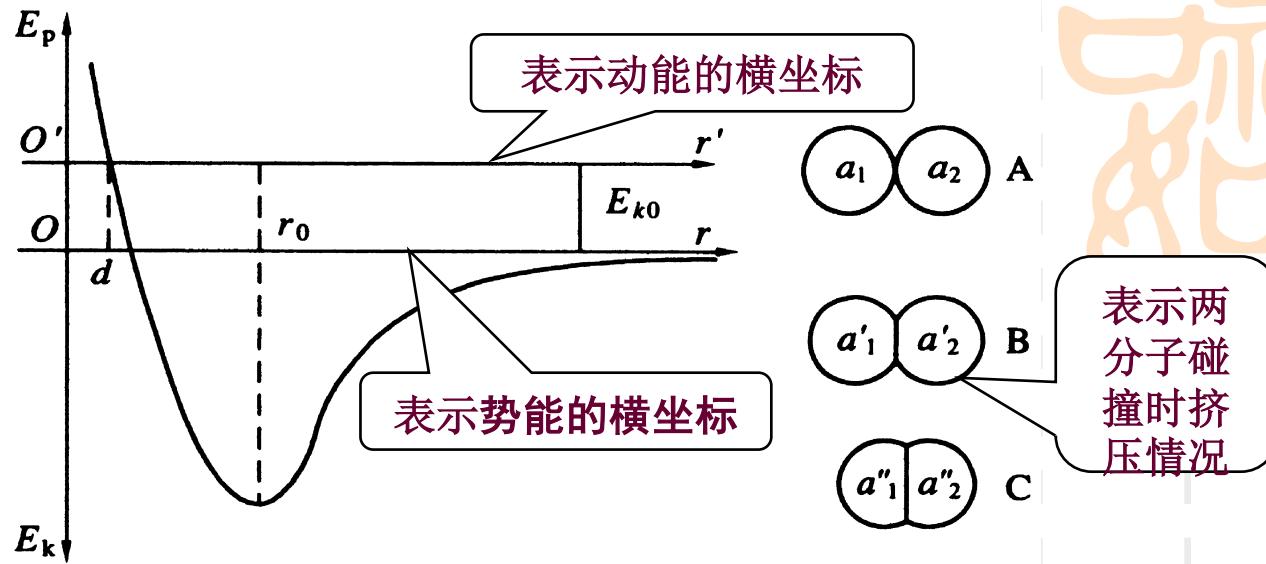
(一) 用分子势能曲线解释分子间对心碰撞

设一分子质心 a_1 静止不动, 另一分子质心 a_2 从极远处(这时势能为零)以相对运动动能 E_{k0} 向 a_1 运动。

- 图中的横坐标表示两分子质心间距离 r 。



吉祥如意

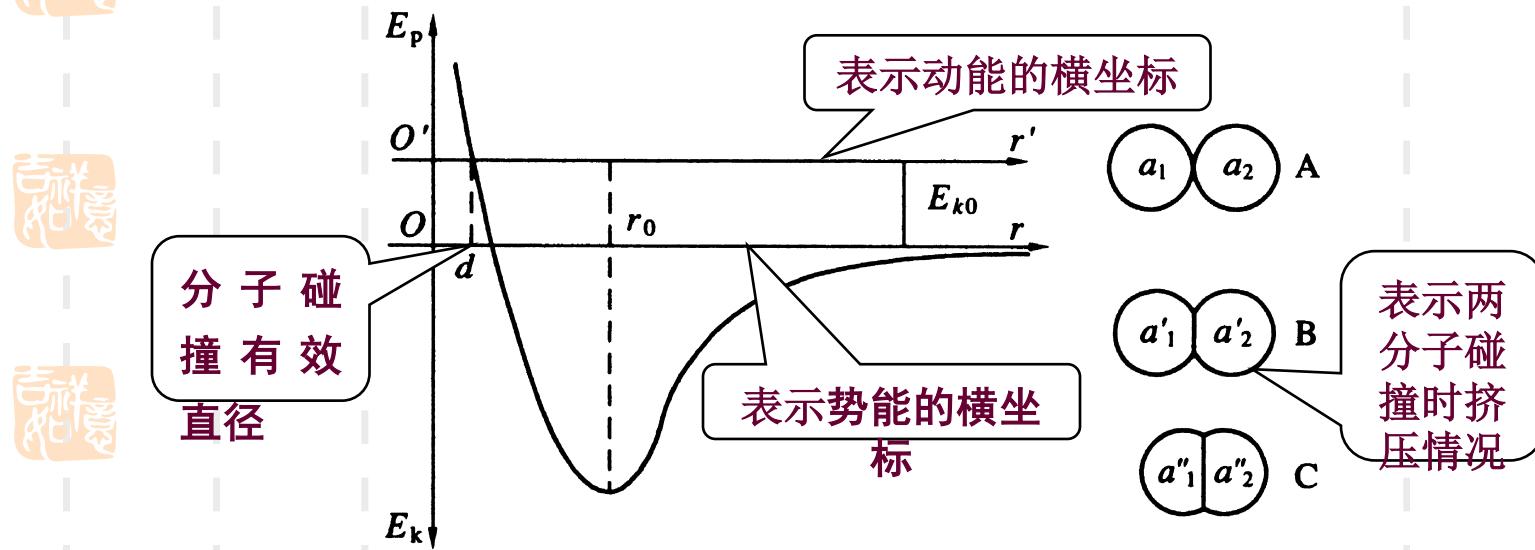


纵坐标有两个，方向向上的纵坐标为势能 E_p ，原点为 O' ，横坐标为 r ；方向向下的纵坐标表示相对运动动能 E_k ，坐标原点为 O '，横坐标为 r' ；当 a_2 向 a_1 靠近时，受到分子引力作用的 a_2 具有数值越来越大负势能，所减少势能变为动能增量，总能量是一恒量。

在图中 a_2 向 a_1 靠近时, 在相互距离为 d 时, 它们受到的挤压达到最大, 然后 a_2 反向运动。所以

d 是两分子对心碰撞时相互接近的最短质心间距，故称 **分子碰撞有效直径**。

当温度升高时， E_{K0} 增加，横轴 r' 升高， d 将减小，说明 d 与气体温度有关。温度越高， d 越小。





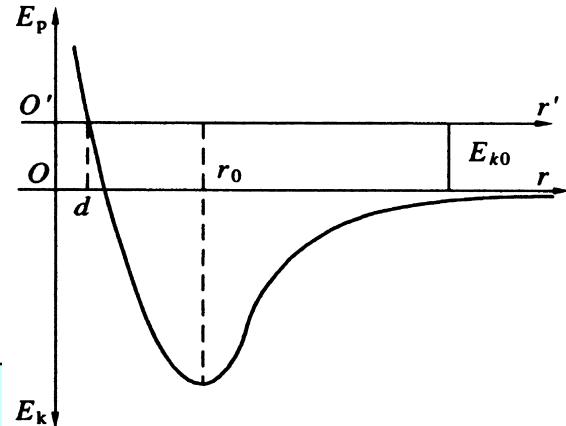
关于分子的直径：

由于原子核外的电子呈电子云分布，因而原子或分子没有明确的边界，也就谈不上有什么明确的直径。

- 通常提到的分子直径有两种理解：
- (1) 一种指分子的大小，这主要是指由它们组成固体时，最邻近分子间的平均距离。

由于固体中的分子（或原子）处于密堆积状态，分子（或原子）均在平衡位置附近振动。这相当于两个能扩张及收缩的弹性球相互接触时所发生的情况。

分子直径 r_0 指固体分子在振动的平衡位置时两分子质心间平均距离。



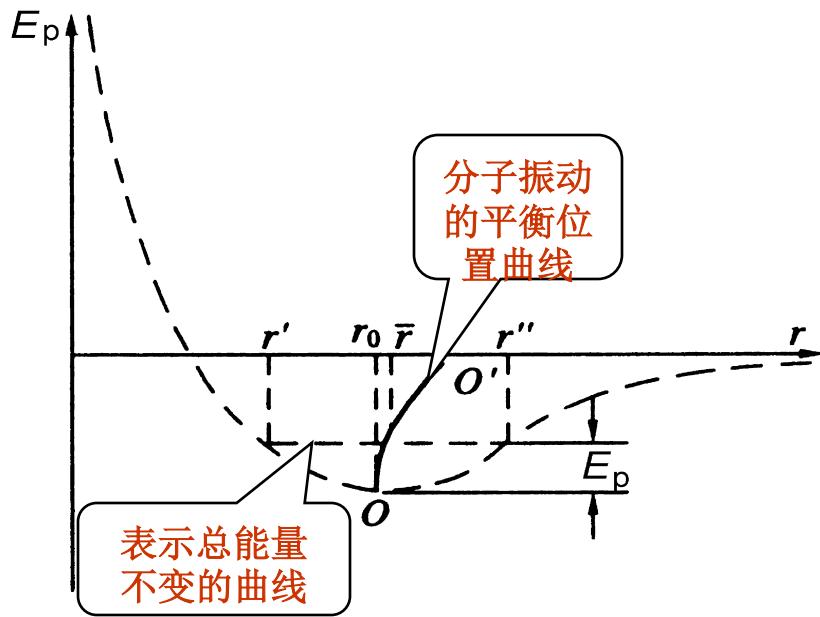
(2) 另一种理解的分子直径是指：

分子碰撞有效直径 d ——两分子相互作对心碰撞时，两分子质心间最短距离。

图中 r_0 与 d 不相等，但通常情况下差异不大。

- 要说明，图中对分子间碰撞的分析限于两分子间对心碰撞（即两分子间的碰撞均在分子联心轴线上发生）。
- 实际发生的分子间碰撞基本上都是非对心的，因而以后要引入分子碰撞截面的概念。

(二) 利用分子势能曲线解释固体内分子的运动是振动。



(三) 利用分子势能曲线解释固体的线膨胀

$$\bar{r} = \frac{r' + r''}{2} > r_0$$

r_0 随了温度上升而增加，因而产生线膨胀。

吉
祥
如意

实际气体物态方程

范德瓦尔斯气体的压强

理想气体： T 较高， p 较小时， 满足理想气体的物态方程；

真实气体： T 较低， p 较大时， 不满足理想气体的物态方程。

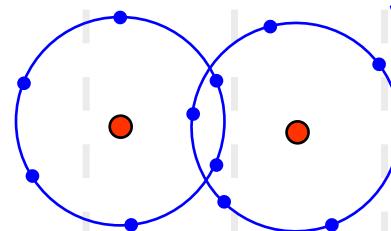
找真实气体物态方程的途径： 从实验中总结出经验的或半经验的公式； 修改理想气体模型，在理论上导出物态方程。

1873年，范德瓦尔斯用简洁的物理模型导出了真实气体的物态方程： 范德瓦尔斯方程。

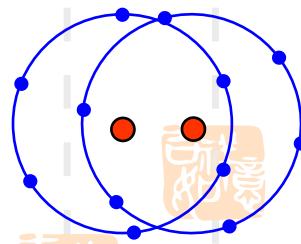




分子间距离 r 太大，
无相互作用力



r 小， 吸引力



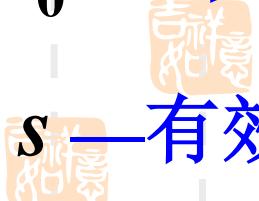
r 更小， 排斥力



d — 分子有效直径 ($\sim 10^{-10}\text{m}$)

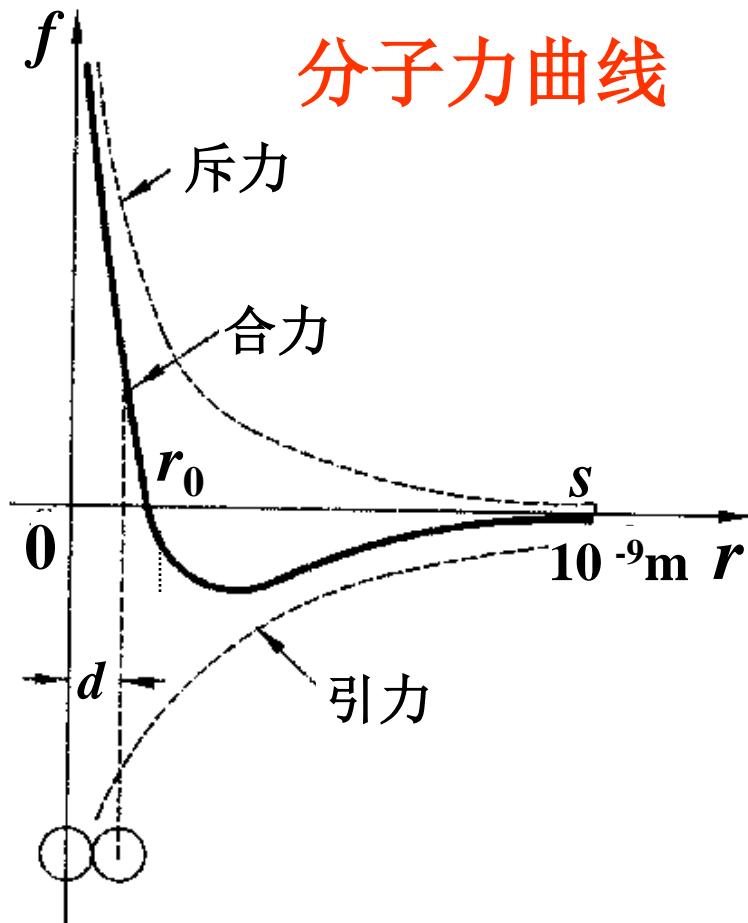


r_0 — 平衡距离 ($> d$)



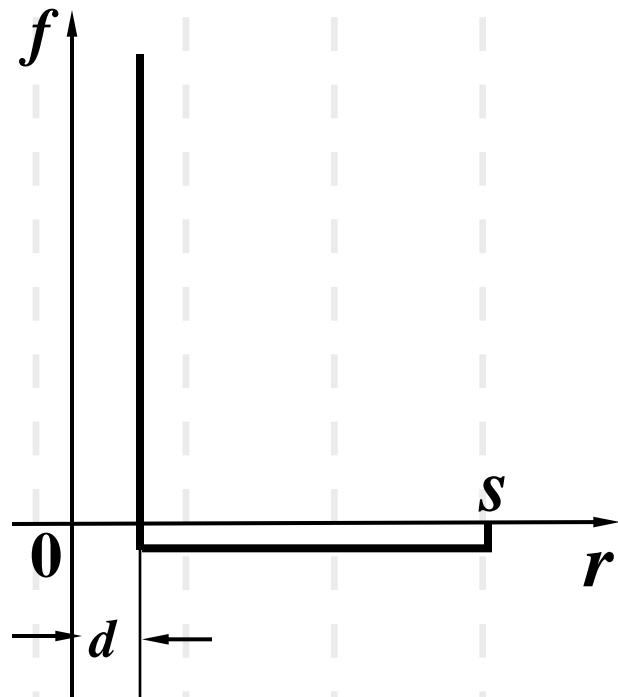
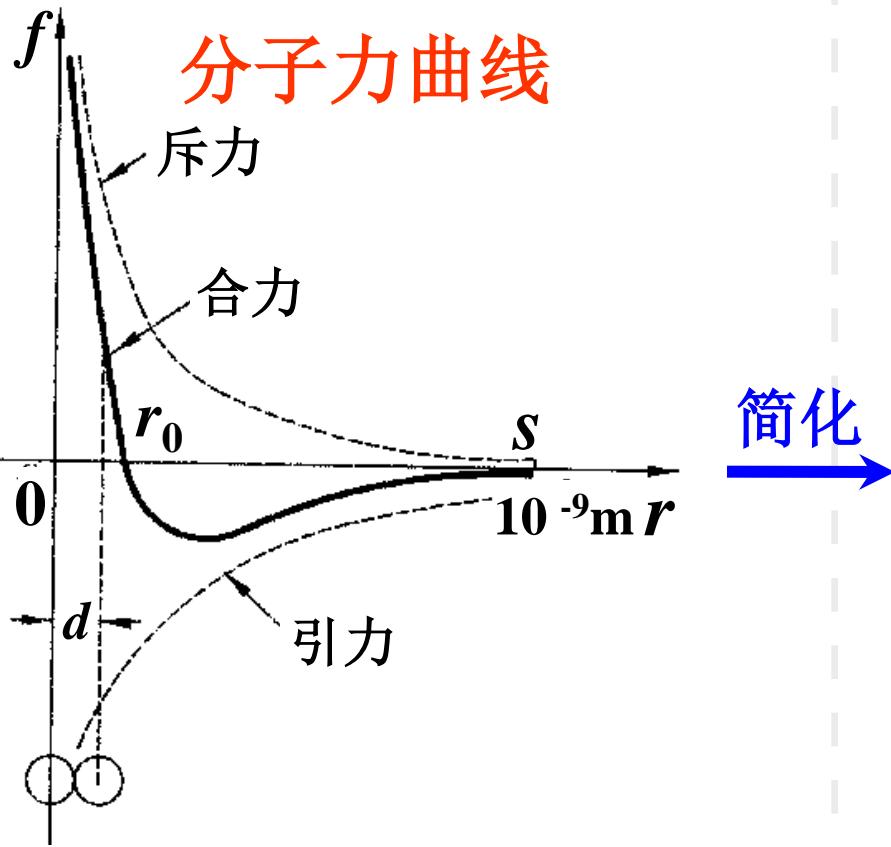
s — 有效作用距离 ($\sim 10d$)

分子力曲线



范氏气体模型

对理想气体模型需要做两方面的修正：需要考虑气体分子本身的体积；考虑分子之间的相互作用力。



范氏气体模型



范氏气体模型：

- (1) 分子是直径为 d 的刚球；
- (2) 在 $d - s$ 的范围内，分子间有恒定引力。这就是有引力的刚球分子模型

范德瓦尔斯方程：

考虑 1mol 气体：

对理想气体： $pV_m = RT$

p 为实测压强； V_m 为 1 mol 气体分子自由活动空间的体积，也即容器容积。

对真实气体：

1. 分子体积引起的修正：设分子自由活动空间的体积 = $V_m - b$ ， b 是与分子体积有关的修正量。则：

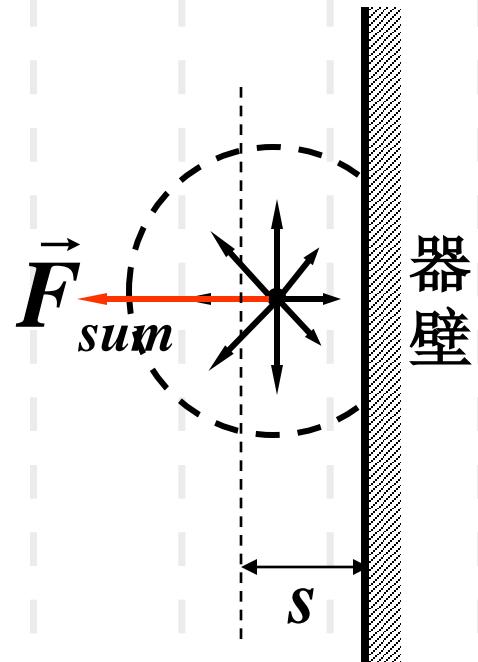
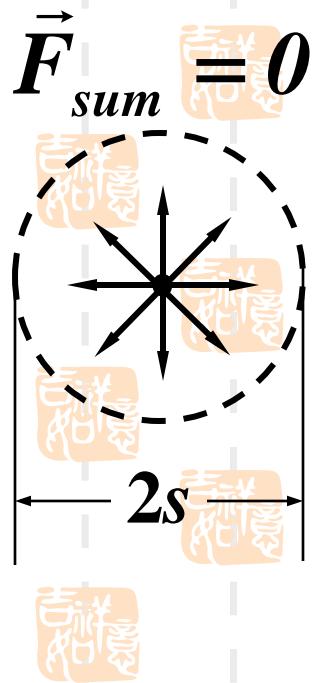
$$p(V_m - b) = RT$$

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

2. 分子间引力引起的修正:

在容器内部，分子受到的吸引力之和为零，在器壁附近 s 范围内的分子受到的吸引力使

分子碰壁的冲量减小。



令

$$p < \frac{RT}{V_m - b}$$

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

则 $(p + p_{in}) \cdot (V_m - b) = RT$

p_{in} 称内压强。进入表面层范围 s 内的每个分子都减小了对器壁的冲力：

(1) 表面层内分子浓度越高，压强的减小量越大，故内压强与表面的分子数密度成正比；

(2) 撞向器壁的分子数密度越高，压强的减小越大，故内压强也与撞向器壁的分子数密度成正比。

$$\therefore p_{in} \propto n^2 \propto \frac{1}{V_m^2}, \quad \text{令 } p_{in} = \frac{a}{V_m^2}$$

*a*为反映分子间引力作用的修正项，则1mol的范德瓦尔斯方程为： $(p + \frac{a}{V_m^2})(V_m - b) = RT$

常量*a*，*b*可由实验定出，气体不同，*a*、*b*不同。对*v* mol 气体，其体积为 $V = v \cdot V_m$ ，于是有*v* mol 气体的范德瓦尔斯方程：

$$(p + v^2 \cdot \frac{a}{V^2})(V - vb) = vRT$$

方程中的 *p* 为实测压强，*V* 为容器的容积。常温常压下有数量级：

$$\frac{b}{V_m} \sim 10^{-3}, \quad \frac{P_{in}}{p} \sim 10^{-2},$$

所以常温常压时分子体积和分子间作用力的修

正可忽略。但是随着压强 p 的增加，分子体积和分子间作用力的影响也逐渐增加，当压强 p 达数百大气压时， b 和 p_{in} 达到完全不能忽略的程度。书 P.70 表 2.3 给出了 1 摩尔氮气在温度 $T = 273K$ 时的数据：

实验值		计算值	
p (atm)	V_m (l)	pV_m (atm · l)	$(p + \frac{a}{V_m^2})(V_m - b)$ (atm · l)
1	22.41	22.41	22.41
100	0.2224	22.24	22.40
500	0.06235	31.17	22.67
700	0.05325	37.27	22.65
900	0.04825	43.40	22.4
1000	0.0464	46.4	22.0

此表说明范氏气体方程更符合实际。

对O₂, $a = 1.36 \times 10^{-6}$ atm · m⁶/mol², $b = 32 \times 10^{-6}$ m³/mol

在 $T = 300K$ 时, 计算得到:

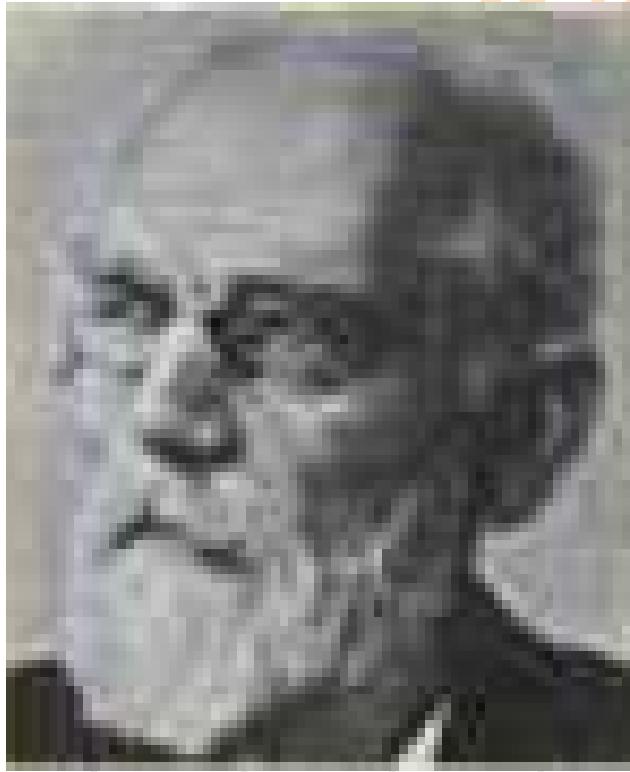
V_m (l/mol)	20	0.2	0.05
$p_{理} = \frac{RT}{V_m}$ (atm)	1.23	124	492
$p_{范} = \left(\frac{RT}{V_m - b} - \frac{a}{V_m^2} \right)$ (atm)	1.23	113	824

- 这表明: ① 常温常压下, a , b 影响很小;
② V_m 小时分子引力影响为主, $p_{范} < p_{理}$;
③ V_m 更小时分子体积修正为主, $p_{范} > p_{理}$ 。

吉祥如意

范德瓦尔斯由于在研究气态和液态方程方面的贡献， 获1910

年诺贝尔物理学奖。



范德瓦尔斯
(1837-1923)
荷兰人

吉祥如意

补充材料讨论

- 热膨胀现象（见PPT文件）
- 天空中的涨落





(3) 热噪声

约翰孙提出热噪声是由于传导电子在导体中作无规热运动（即布朗运动）而引起的论点。温度越高，电子热运动越剧烈，电流涨落也越明显，热噪声也越大。

热噪声电平与绝对温度成正比的关系称为尼奎斯特理。

- 热噪声是半导体器件及电子线路中的一种障碍。例如在宇航通讯、军事通讯、红外成像及射电测量中需要有极高放大率的放大器。
- 但是在放大被测信号的同时也把热噪声放大了。为了检测到极微弱的信号，必须减小热噪声电平。为此必须把放大器置于低温条件（如 $<77\text{K}$ 液氮温度下）。





(4) 晴朗天空呈现的蓝色；东方日出、西方日落时天空的红色：

- 这是由大气中气体分子数密度涨落致使光发生散射而产生。这被称为分子散射或瑞利散射。

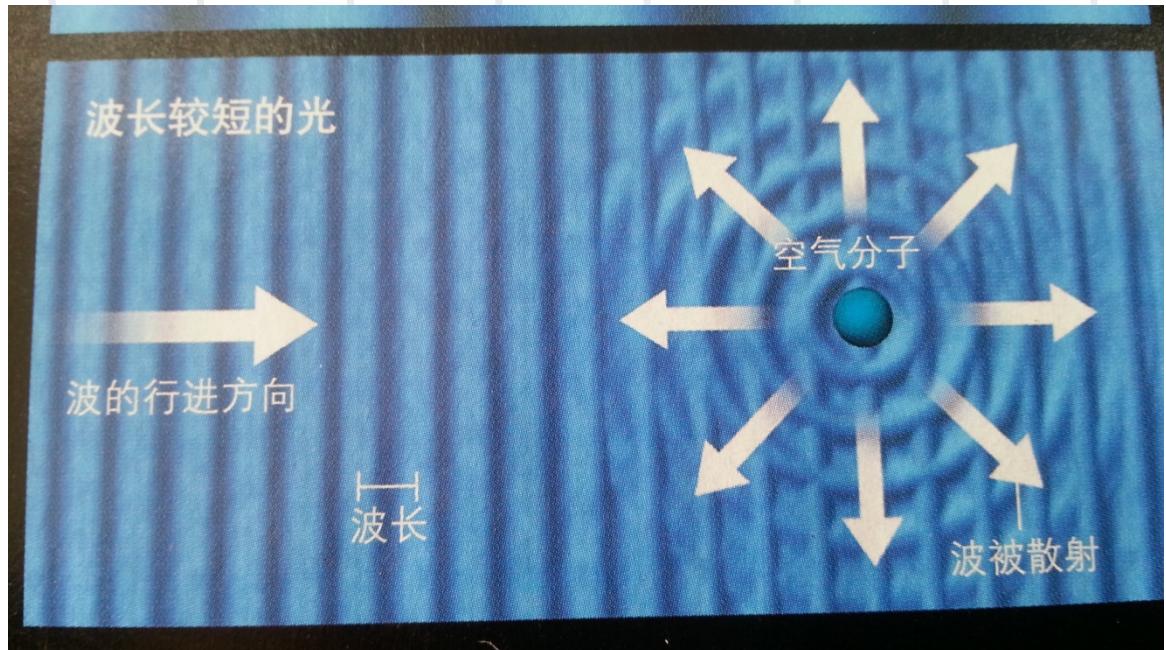
理论指出光在气体中的散射强度与波长四次方成反比



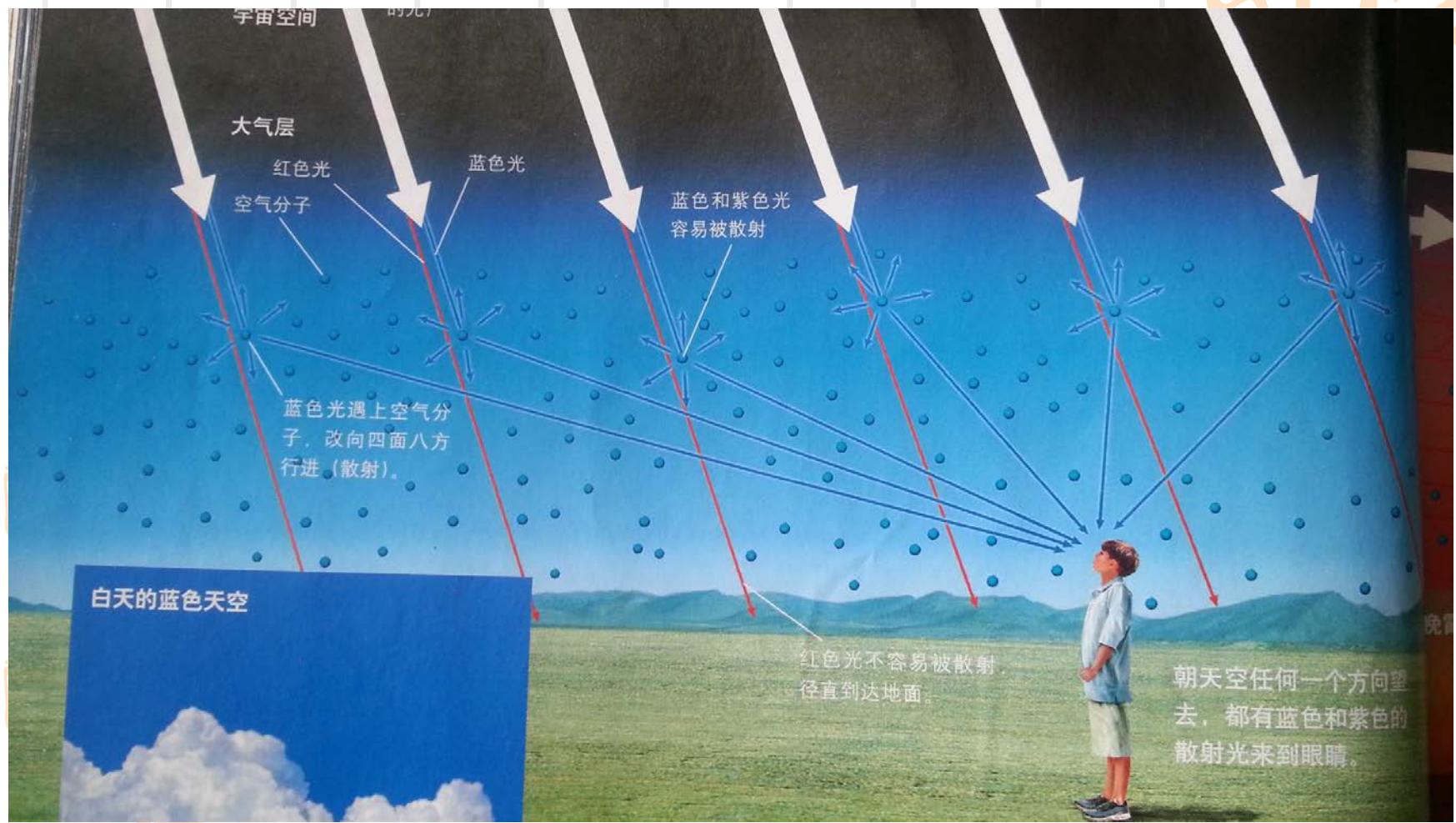
- 由于可见光中波长比较小的紫、蓝光易于散射，所以在晴天的天穹呈蓝色；
- 而被大量散射掉蓝色光后的透射光是红色的，所以人们看到日出或日落时太阳是火红的。



吉祥如意



吉祥圖



吉祥圖

