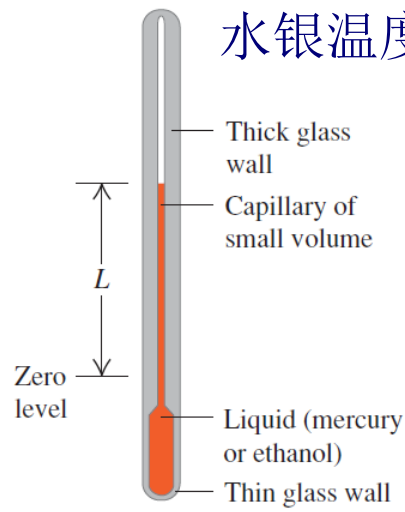
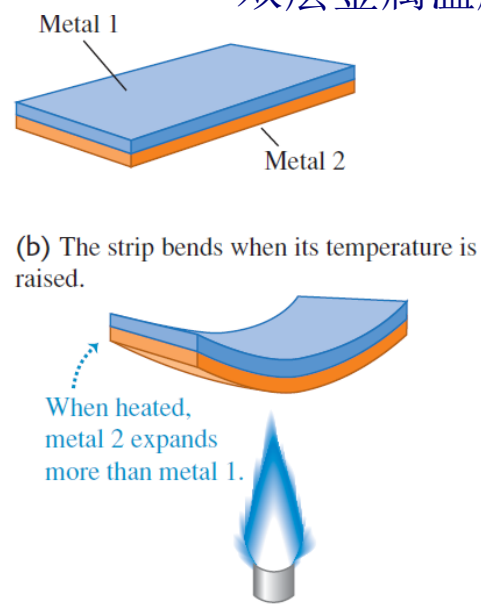


温度计

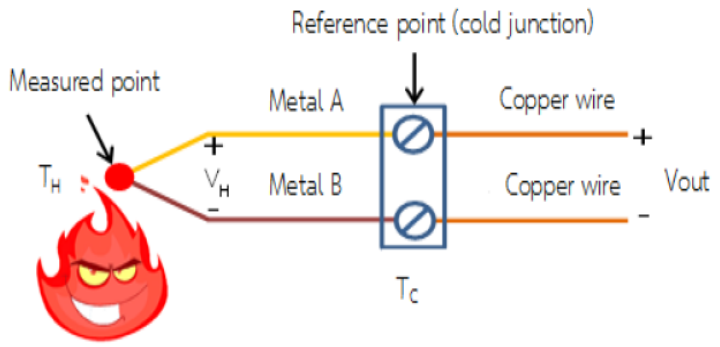
水银温度计



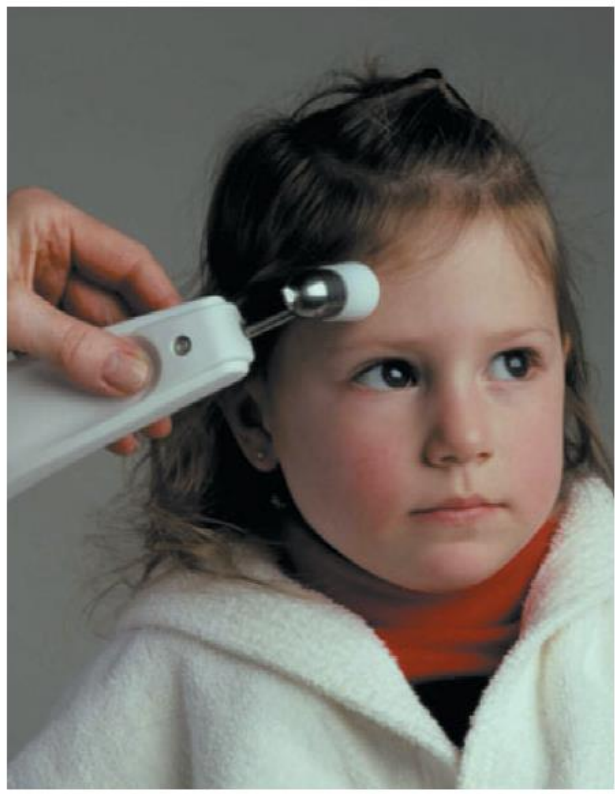
双层金属温度计



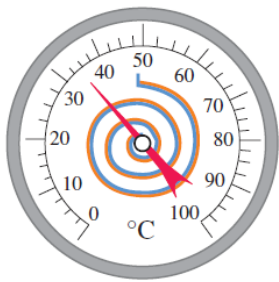
(c) A bimetallic strip used in a thermometer



热电偶（温差电动势）



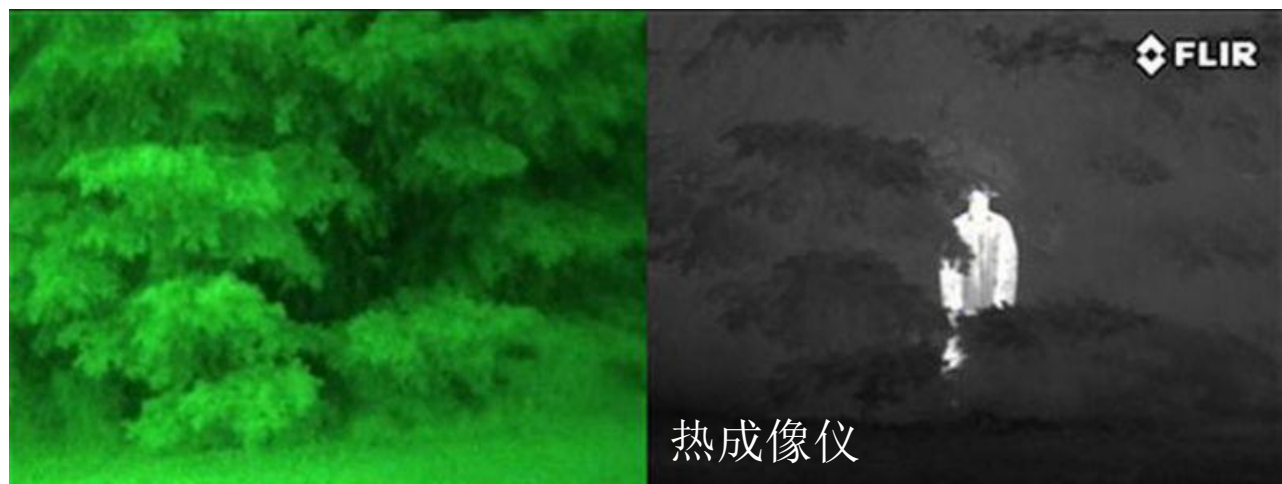
红外温度计



红外测温



建筑物外墙保温

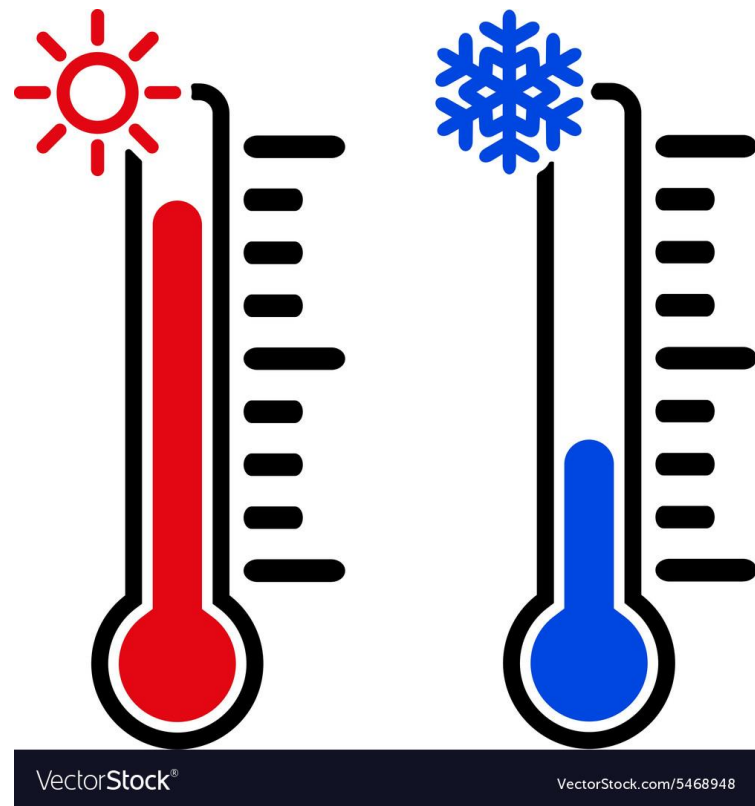


热成像仪

温标：温度的数值表示方法。

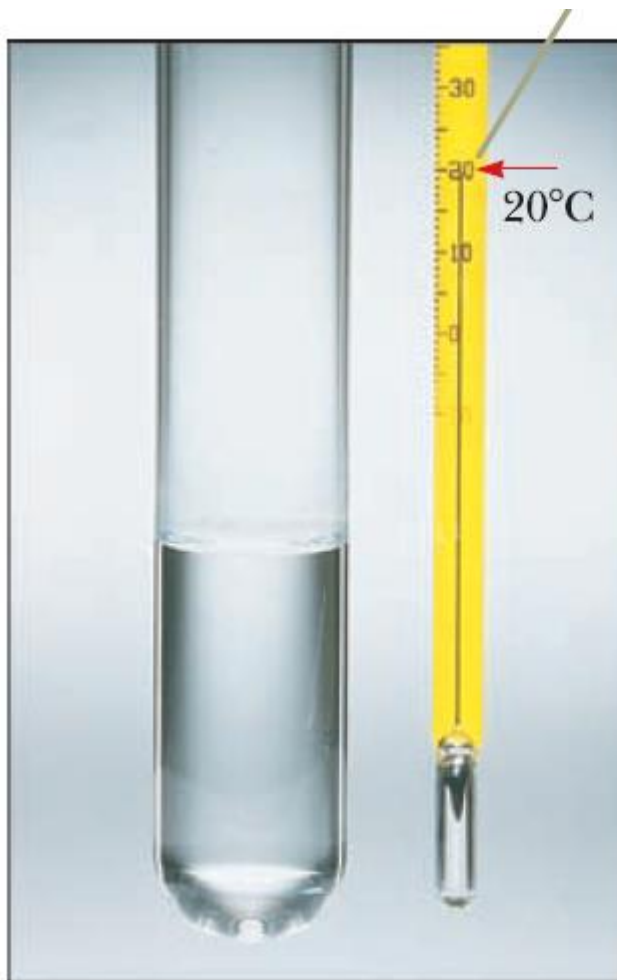
华氏温标：1714年荷兰华伦海特建立，以水结冰的温度为 32°F ，水沸腾的温度为 212°F

摄氏温标 t ：1742年瑞典天文学家摄尔修斯建立，以冰的熔点定为 0°C ，水的沸点定为 100°C ，



水银温度计

温度计没有放入热水中



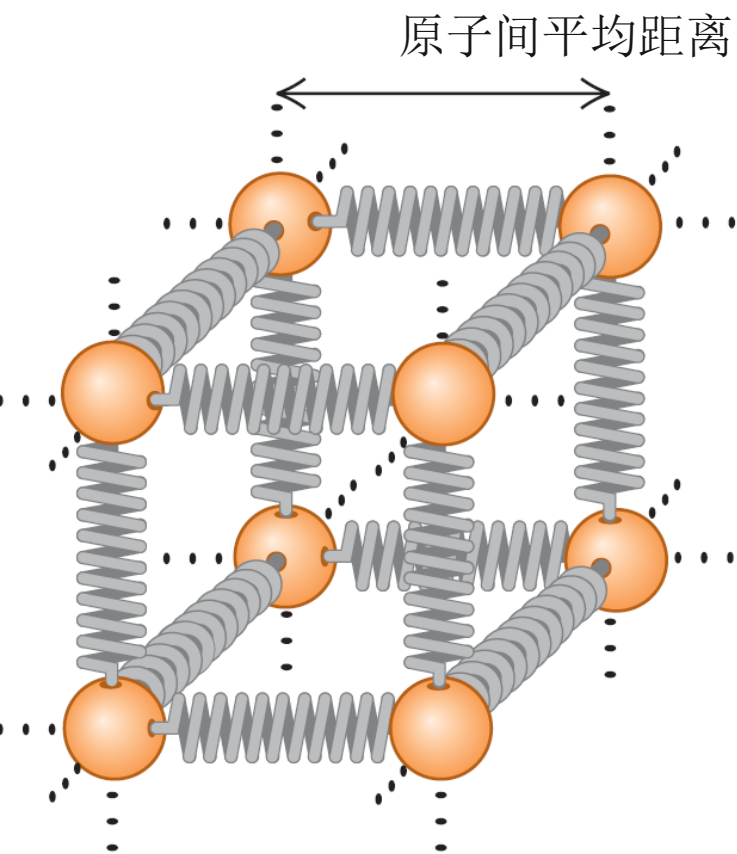
温度计放入热水中



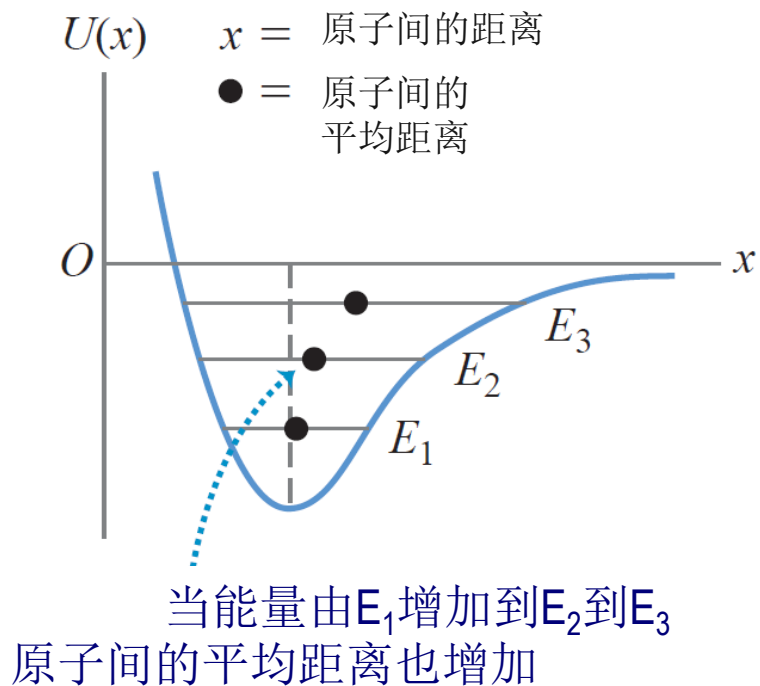
水银温度计在升温前后的比较

水银凝固点 -39°C ，沸点 356.7°C

热膨胀的微观模型



Lennard-Jones potential



$$E = \frac{1}{2} m \bar{v}^2 \propto T$$

热膨胀系数

水银温度计，温度每上升1摄氏度或者1 K, 体积大概增加1/5500。
单位体积随温度的变化的比例（压强不变）称为热膨胀系数 β :

$$\beta \equiv \frac{\Delta V / V}{\Delta T}$$

V : 体积 T : 温度 ΔV : 体积变化。对于水银, $\beta = 1/5500 \text{ K}^{-1} = 1.81 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$
(严格的值取决于温度，但是在0°C到200°C之间变化小于1%)

找一支水银温度计，计算底部球的尺寸。估计需要测量特定的温度精度，温度计的直径需要什么要求？

固体定义线热膨胀系数 $\alpha \equiv \frac{\Delta L / L}{\Delta T}$

对于钢, $\alpha = 1.1 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$. 估计一公里长的钢桥在一个冷的夜晚和一个热的白天长度的变化。

热膨胀



a

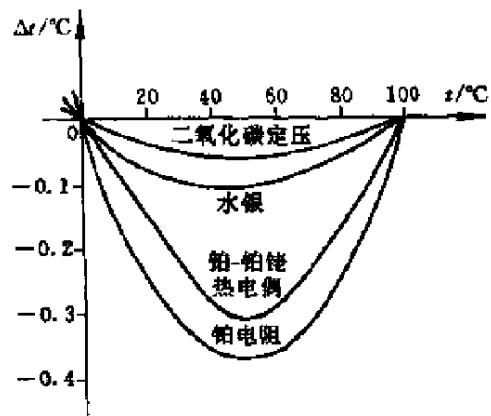
大桥的连接缝，防止冷热桥面收缩和膨胀



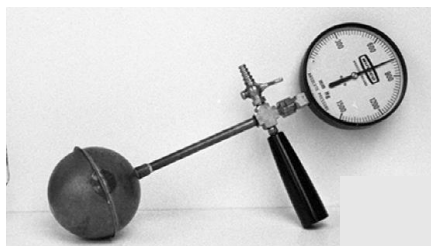
美国新泽西，7月

课后作业：高铁的无缝钢轨怎么解决热胀冷缩的？

理想气体温标

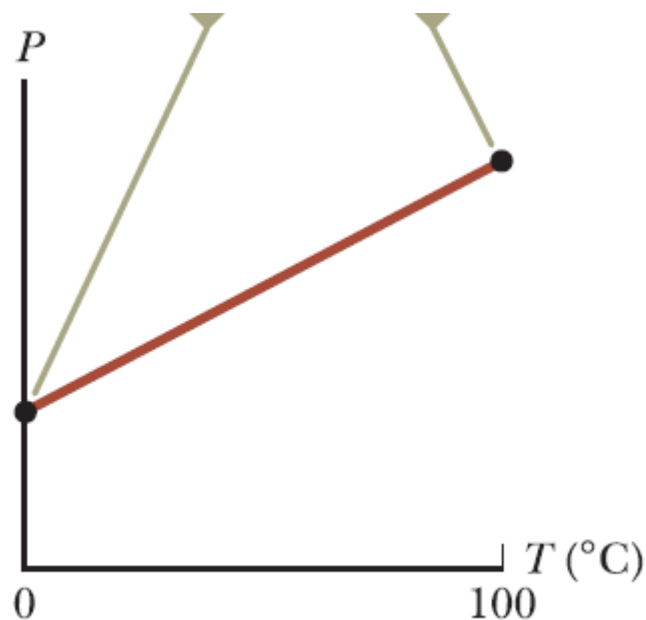


常用温度计对结果有偏差。

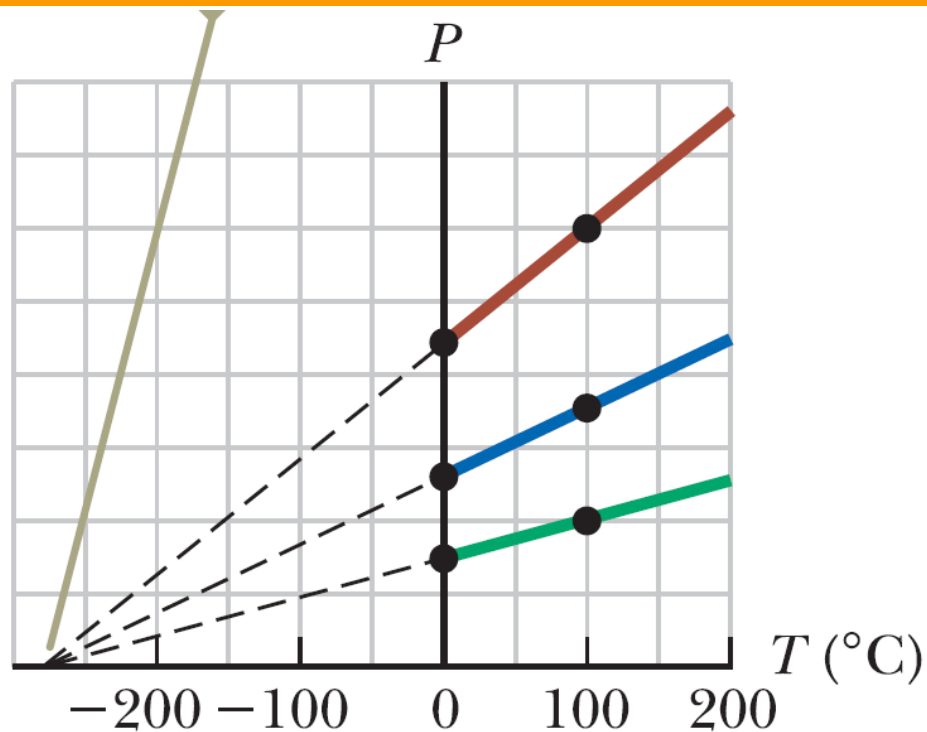


气体温标

两点代表温度参考点（水的冰点和沸腾点）



理想气体温标



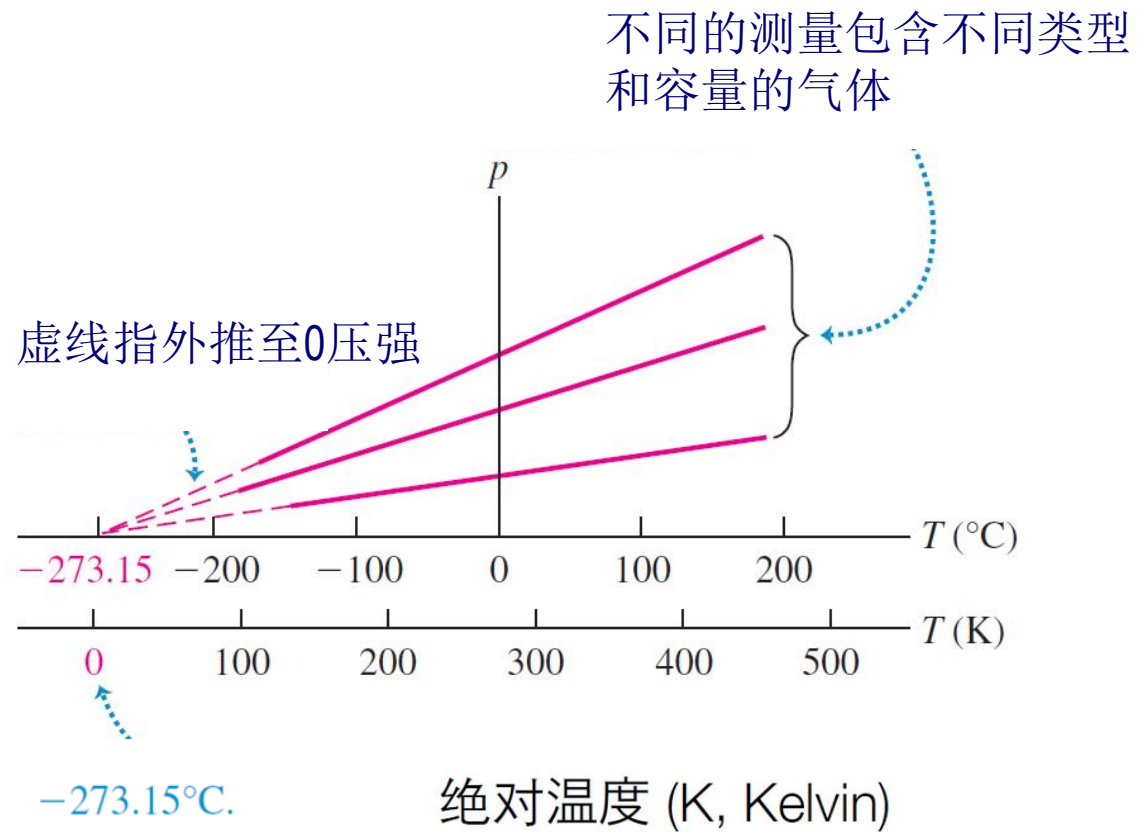
测量一定体积下，不同量的气体不同温度下压强的变化

压强随温度线性变化，无论初始量多少，外推后在 -273°C 附近压强趋向于0。

保持压强不变，则在 -273°C 附近体积趋向于0。

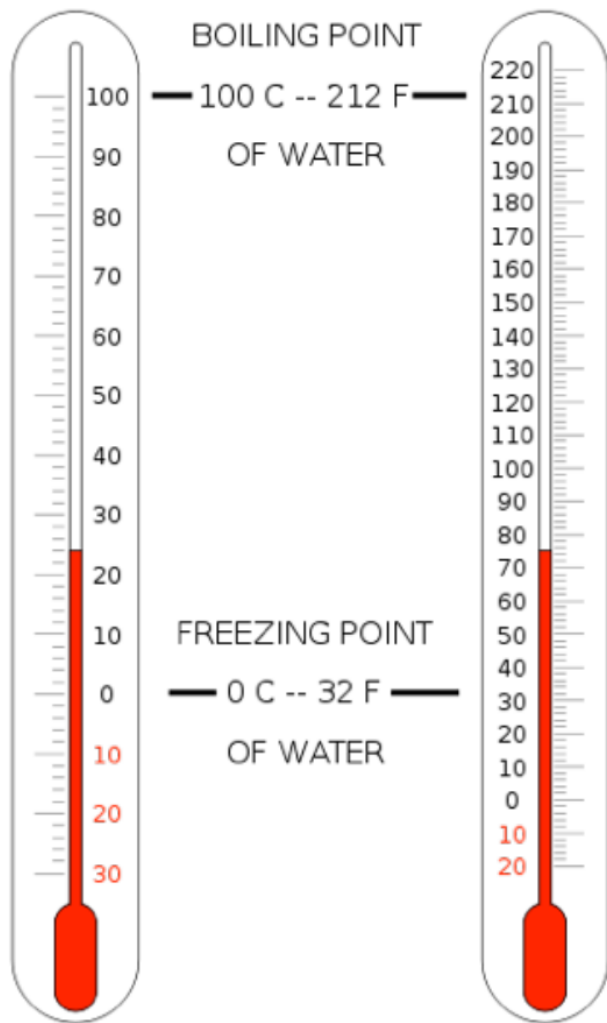
理想气体温标

Sargent-Welch/VWR International, Courtesy of
Cenco Physics



温度计和温标

摄氏温标 (°C, Celsius, 1742)



CENTIGRADE

FAHRENHEIT

华氏温标 (°F, Fahrenheit, 1714)

	K	C	F
Water boils	373	100°	212°
	↑ 100 K	↑ 100 C°	↑ 180 F°
Water freezes	273	0°	32°
	↓	↓	↓
CO ₂ solidifies	195	-78°	-109°
Oxygen liquefies	90	-183°	-298°
Absolute zero	0	-273°	-460°

绝对温度 (K, Kelvin)

$$T_K = T_C + 273.15$$

试估计Kelvin温度(T_K)

1. 人体温度
2. 水的沸点
3. 记忆中最冷的日子
4. 液氮的沸点 (-196°C)
5. 铅的熔点 (327°C)

$$T_K = T_C + 273.15$$

生病用温度计量体温时，大致的弛豫时间是多少？

水银温度计，温度每上升1摄氏度或者1 K, 体积大概增加1/5500。
单位体积随温度的变化的比例（压强不变）称为热膨胀系数。

热力学温标

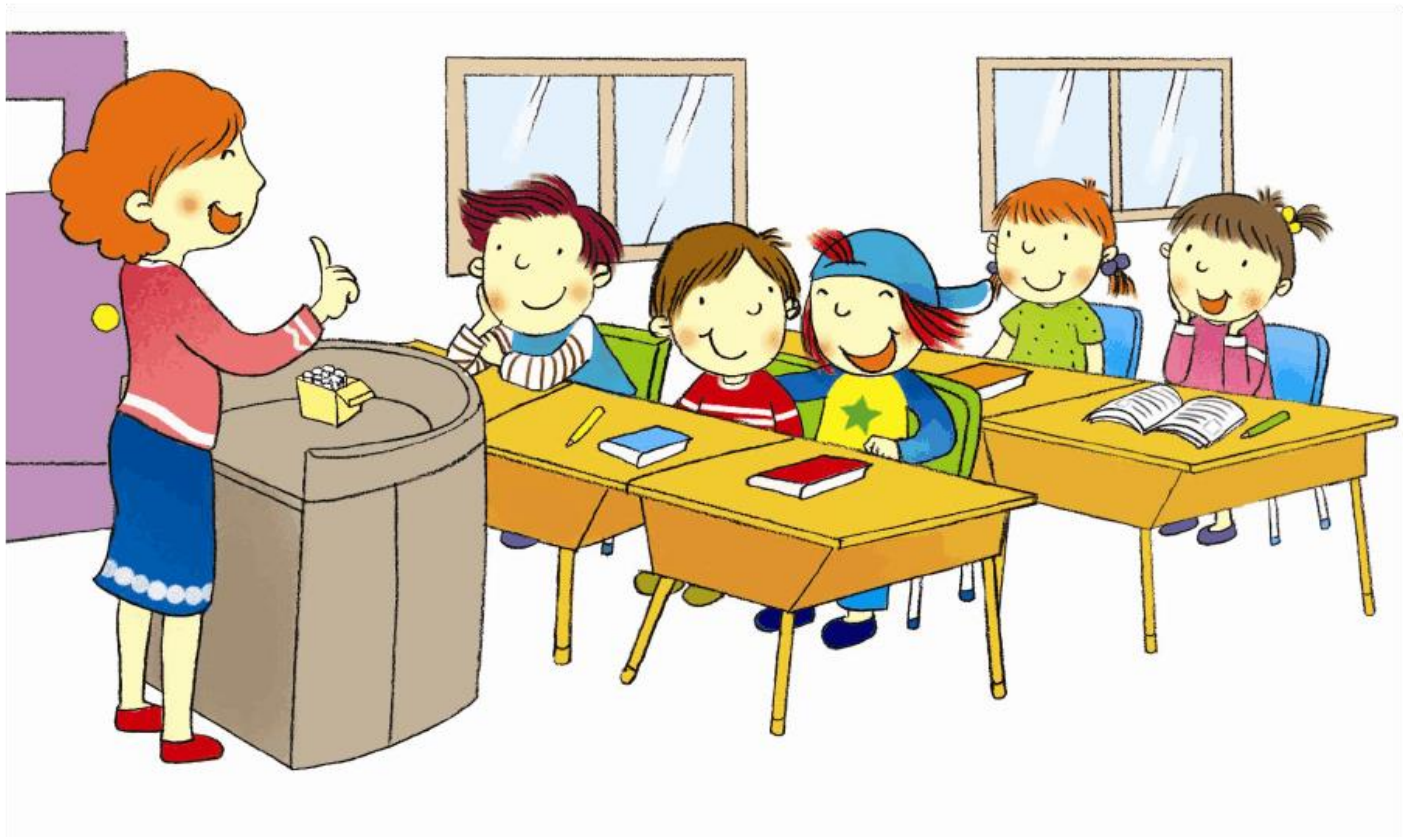
热力学温标：与工作物质无关的温标，由英国的开尔文建立，与摄氏温度的关系为

$$T(K) = t(^{\circ}C) + 273.15$$

单位为开(K)，称为热力学温度.

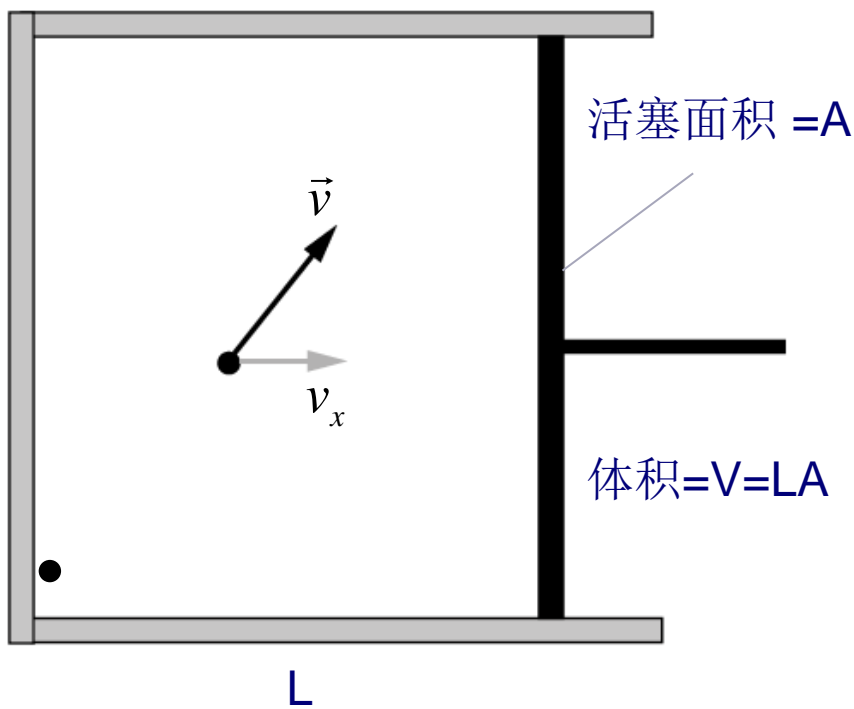
问题

估算一下，教室里有多少个空气分子？



理想气体的微观模型

一个分子



任何一点:

$$p = p_x = p_y = p_z$$

N 个分子:

$$PV = Nm\overline{v_x^2}$$

平均压强

$$\bar{P}_x = \frac{\bar{F}_{x, \text{活塞}}}{A} = -\frac{\bar{F}_{x, \text{分子}}}{A} = -\frac{m(\overline{\frac{\Delta v_x}{\Delta t}})}{A}$$

平均碰撞时间

$$\Delta t = 2L / v_x$$

速度的变化

$$\Delta v_x = (-v_x) - (v_x) = -2v_x$$

平均压强

$$\bar{P}_x = -\frac{m(-2v_x)}{A(2L / v_x)} = \frac{mv_x^2}{AL} = \frac{mv_x^2}{V}$$

理想气体的微观模型

N 个分子:

$$PV = Nm \overline{v_x^2}$$

压强和分子的动能

分子的速率 $v^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2$

每个分子的速率不一样，对所有分子平均

$$\overline{v^2} = \overline{v_x^2} + \overline{v_y^2} + \overline{v_z^2}$$

x,y,z 各向同性，忽略重力

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

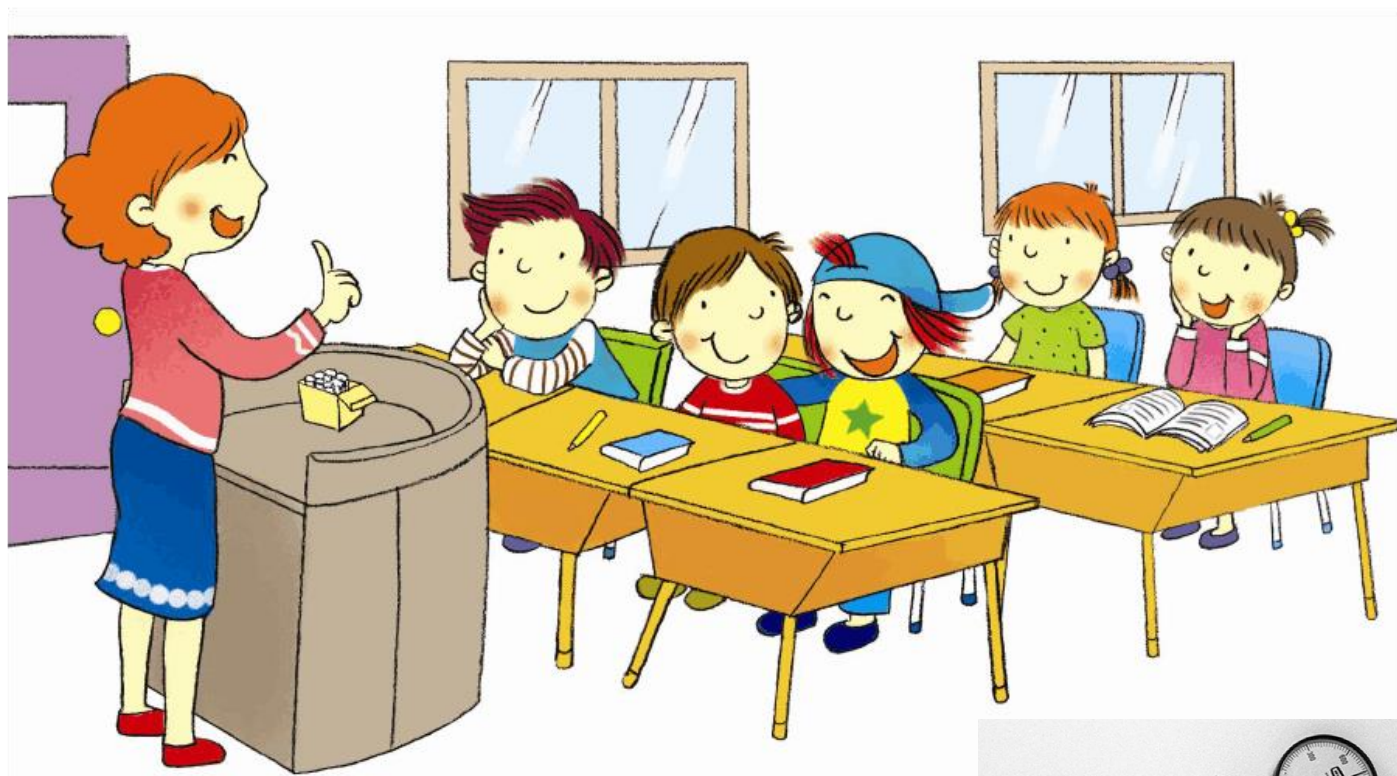
$$PV = Nm \overline{v_x^2} = \frac{1}{3} Nm (\overline{v^2}) = \frac{2}{3} N \left[\frac{1}{2} m (\overline{v^2}) \right]$$

$$PV = \frac{2}{3} E_k$$

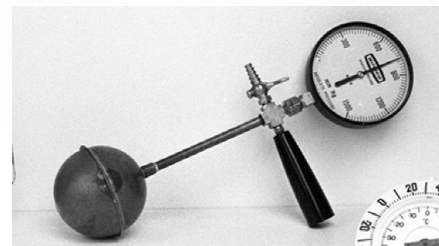
E_k 为所有分子的平动动能

问题

估算一下，教室里有多少个空气分子？



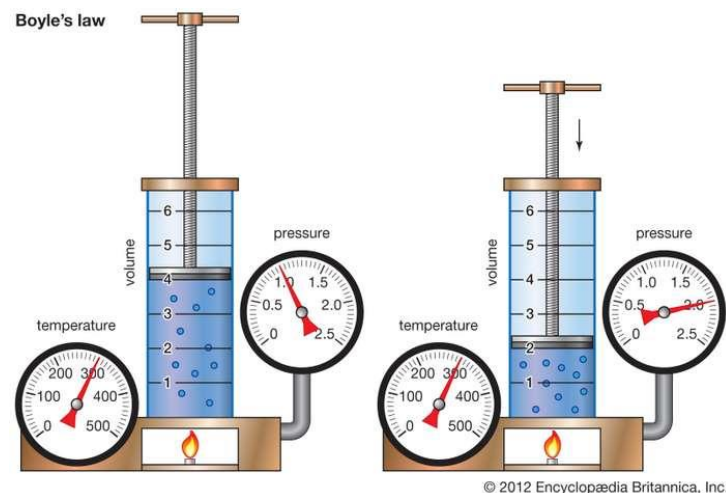
实验测一下 P, V, T 的关系



P,V,T的半经验定律

波意尔定律

空气在温度保持不变时压缩， PV 保持不变
 $p \propto 1/V$, (温度 T 不变时)



盖-吕萨克定律

体积 V 不变时，

$$P \propto T$$

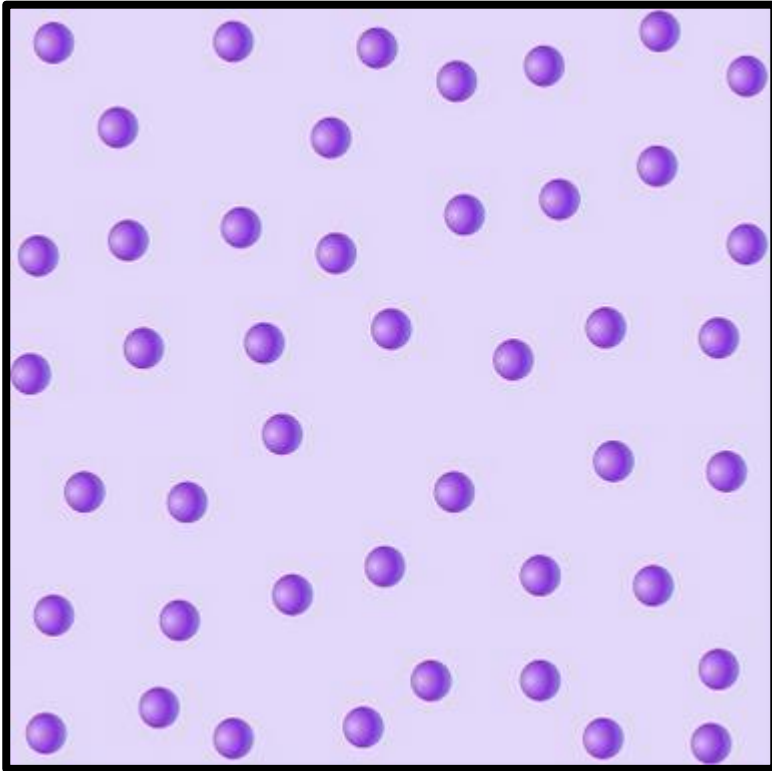
查理定律

固定压强 P 下，

$$V \propto T$$

三个公式组合： $PV \propto T$

理想气体状态方程



$$PV = nRT$$

P: 压强

V: 体积

n: 摩尔数

T: 温度

R: 普适气体常数

$$R = 8.31 \text{ J} / (\text{mol} \cdot \text{K})$$

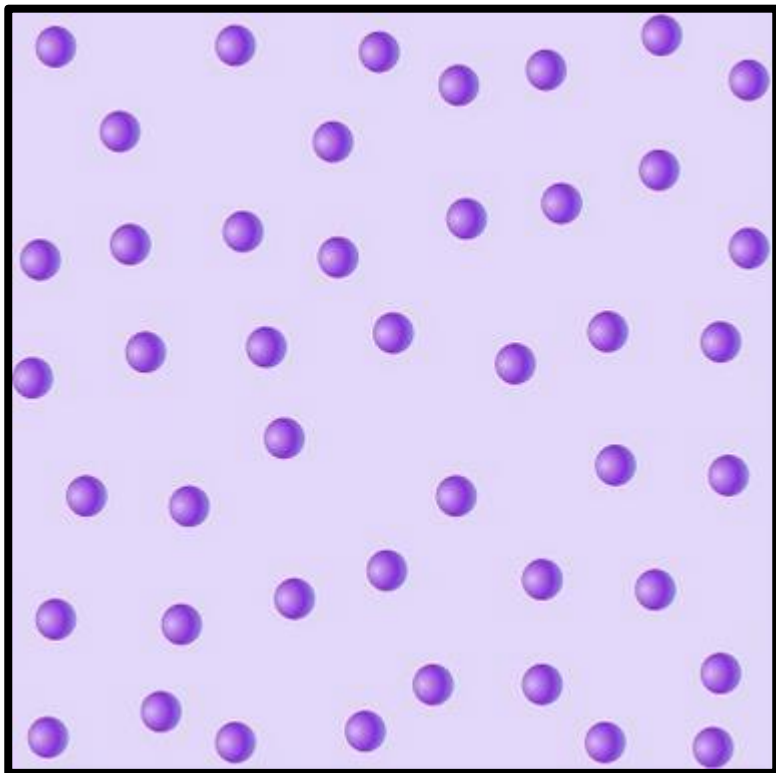
$$n = \frac{N}{N_A}$$

N: 气体分子数

N_A : 阿伏伽德罗常数

$$N_A = 6.02 \times 10^{23}$$

理想气体状态方程



$$PV = nRT$$

$$PV = NkT$$

定义 $k = \frac{R}{N_A} = 1.381 \times 10^{-23} \text{ J / K}.$

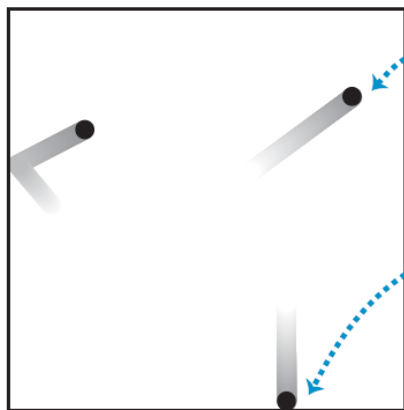
玻尔兹曼常数

$$nR = Nk$$

估算一下，教室里有多少个空气分子？

理想气体

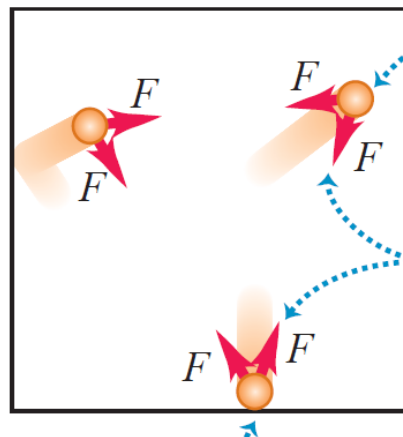
理想气体



Gas molecules are infinitely small.

They exert forces on the walls of the container but not on each other.

实际气体



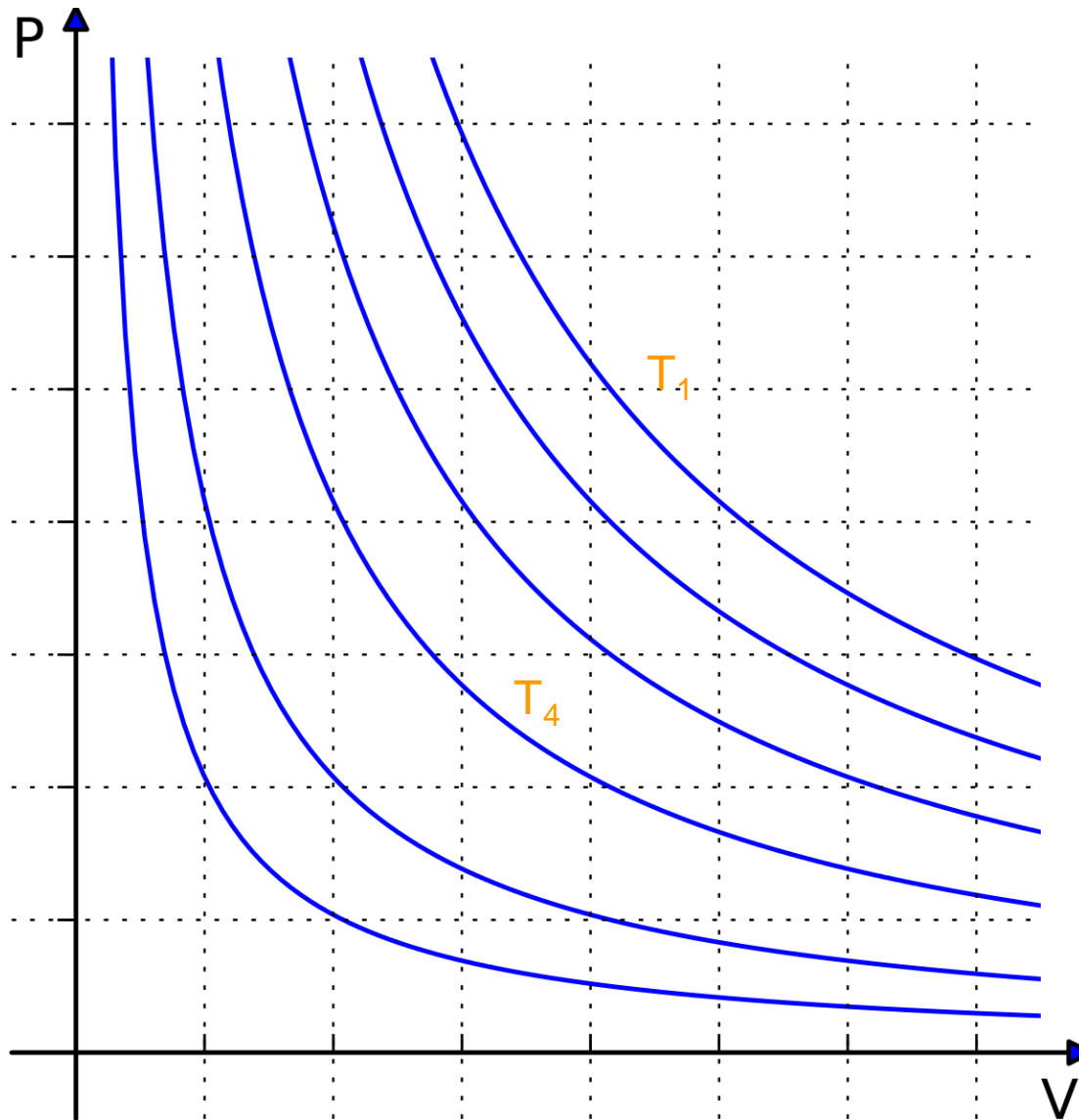
Gas molecules have volume, which reduces the volume in which they can move.

They exert attractive forces on each other, which reduces the pressure ...

理想气体假设：

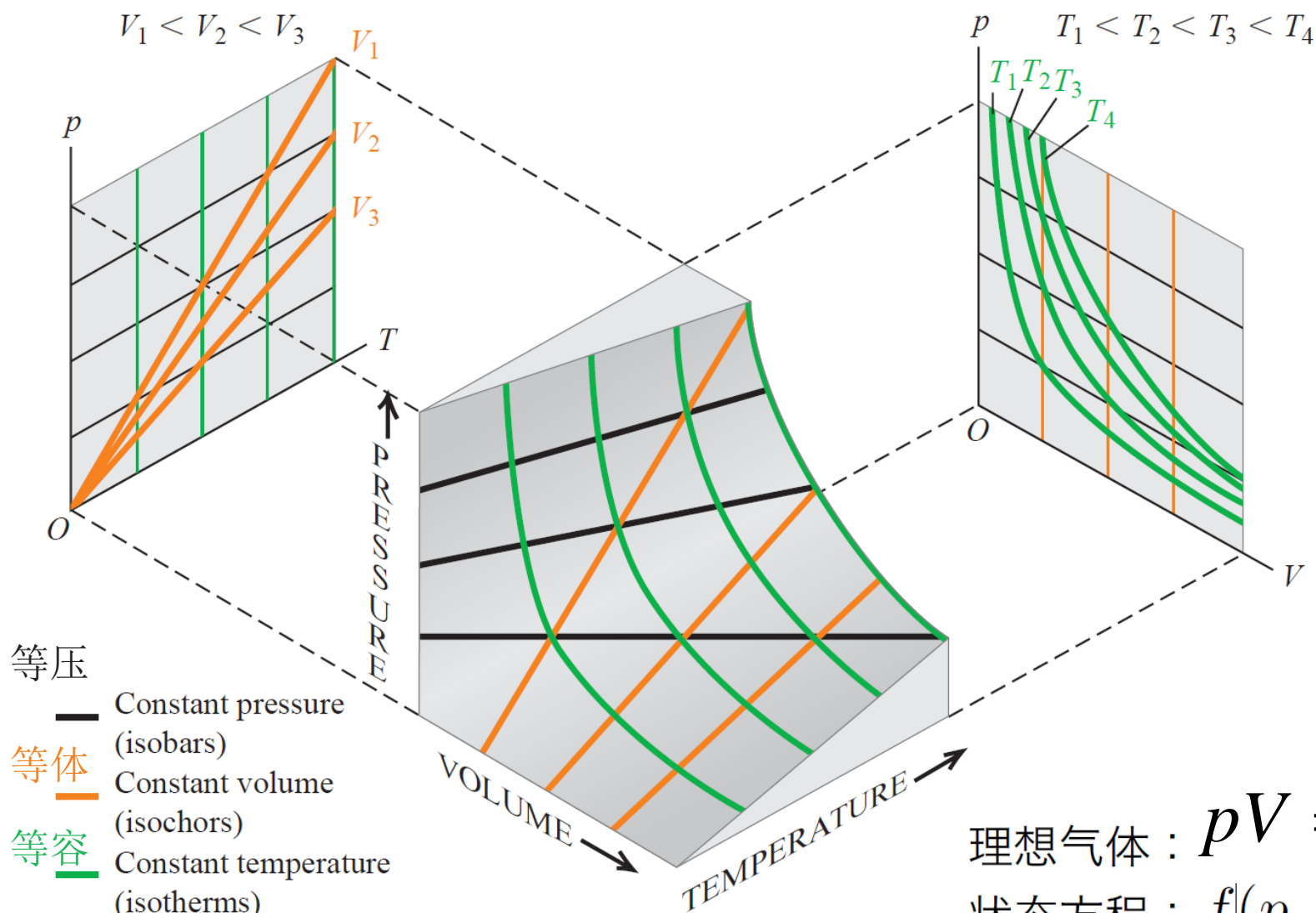
1. 分子本身占有空间体积可忽略不计
2. 分子之间及分子与容器壁之间不断弹性碰撞
3. 除在碰撞瞬间外，分子之间、分子与容器壁之间无相互作用
4. 分子运动遵守经典牛顿力学规律

理想气体状态方程



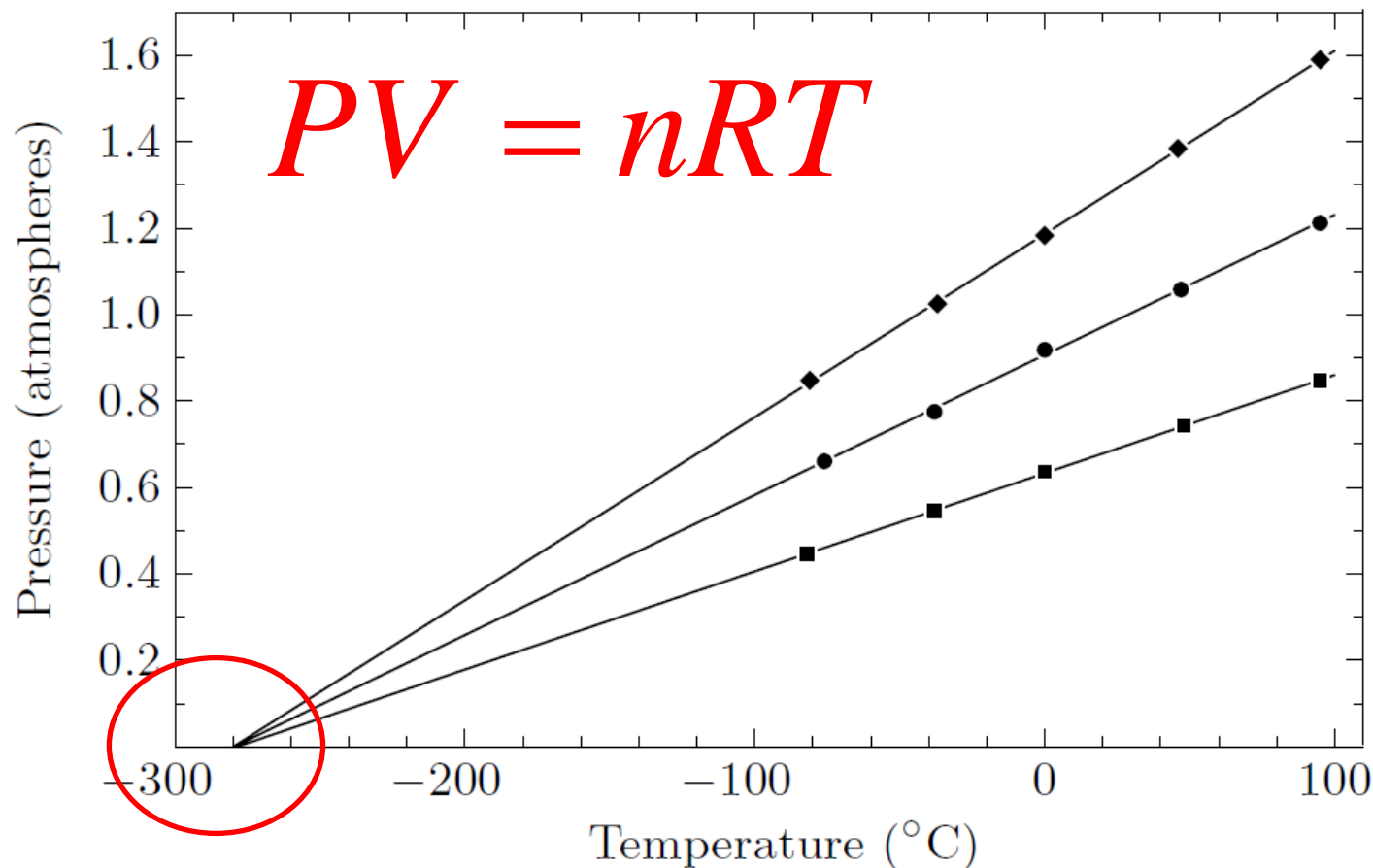
$$PV = nRT$$

理想气体状态图



理想气体： $pV = nRT$
状态方程： $f(p, V, T) = 0$

思考一下： 体积一定， 压强如何随温度变化？

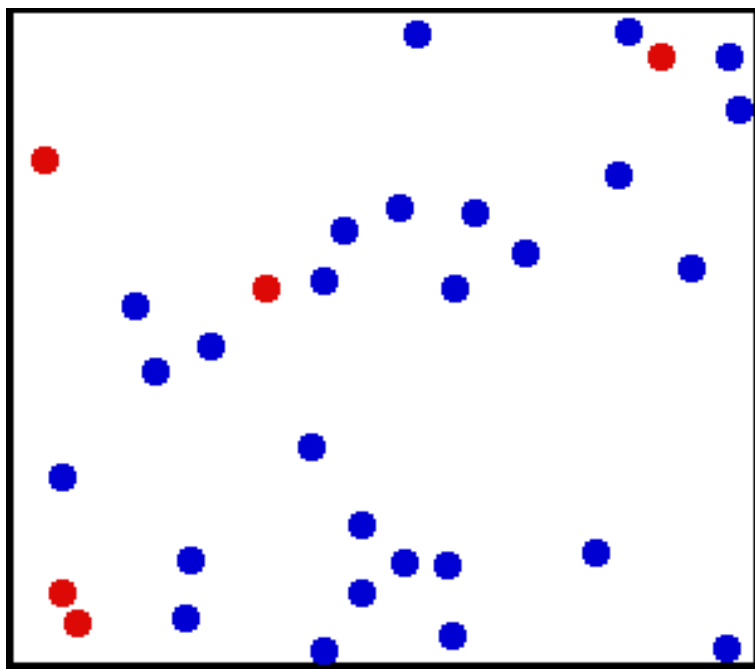


学生测得压力-温度曲线

微观量

描述系统内个别微观粒子特征的物理量。如分子的质量、直径、速度、动量、能量等。

微观量与宏观量有一定的内在联系。



P, V, T

$\overline{v_x^2}$

温度的本质

理想气体的微观模型

N 个分子:

$$PV = Nm \overline{v_x^2}$$

理想气体状态方程

$$PV = NkT$$

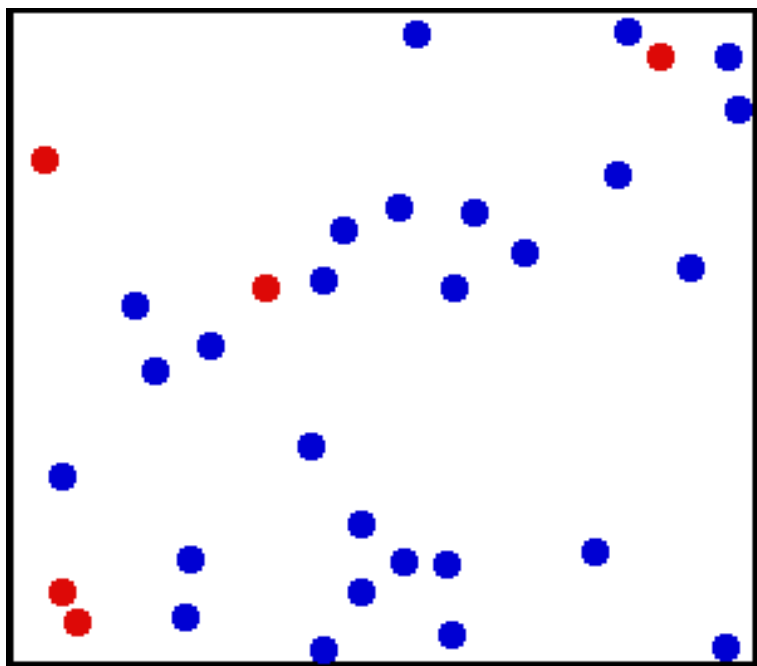
温度的本质

$$kT = \overline{mv_x^2} \quad \text{或者} \quad \frac{1}{2} \overline{mv_x^2} = \frac{1}{2} kT \quad \text{同样} \quad \frac{1}{2} \overline{mv_y^2} = \frac{1}{2} \overline{mv_z^2} = \frac{1}{2} kT$$

温度的本质

$$\overline{\varepsilon_k} = \frac{1}{2} \overline{mv^2} = \frac{1}{2} m (\overline{v_x^2} + \overline{v_y^2} + \overline{v_z^2}) = \frac{1}{2} kT + \frac{1}{2} kT + \frac{1}{2} kT = \frac{3}{2} kT$$

气体的温度是气体分子平均平动动能的量度



$$T = \frac{2}{3} \frac{\overline{\varepsilon_k}}{k}$$

定量的能量：

分子在室温下（300K），kT能量为：

$$(1.38 \times 10^{-23} \text{ J / K})(300 \text{ K}) = 4.14 \times 10^{-21} \text{ J}$$

平均平动动能为3/2倍。

用电子-伏特(eV)表示：1eV=1.6×10⁻¹⁹J.室温下：

$$kT = (8.62 \times 10^{-5} \text{ eV / K})(300 \text{ K}) = 0.026 \text{ eV} \approx \frac{1}{40} \text{ eV}.$$

理想气体分子的方均根速率

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

(大量分子速率的平方平均值的平方根)

$$v_{rms} = \sqrt{\overline{v^2}} = \sqrt{\frac{3kT}{m}}$$

注意, v_{rms} 不等于 \bar{v} , 略微大于 \bar{v}

混合理想气体的状态方程

混合理想气体， n 种组分，第 i 种组分质量 M_i ，摩尔质量 μ_i ，物质的摩尔量 $n_i = M_i / \mu_i$ ，则混合气体总的摩尔量为

$$n = n_1 + n_2 + \dots + n_i = \frac{M_1}{\mu_1} + \frac{M_2}{\mu_2} + \dots + \frac{M_n}{\mu_n}$$

系统温度为 T ，第 i 种组分气体压强和体积为 p_i 和 V_i ，则

$$p_i V_i = n_i R T$$

而各种气体所占体积相同 $V_1 = V_2 = \dots = V_n = V$ ，

因此 $p_i V_i = n_i R T$ ，

$$\sum_i p_i V = \sum_i n_i R T$$

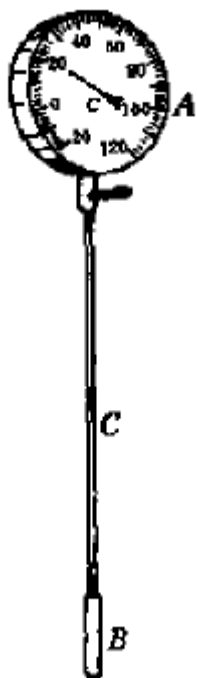
所以：

$$pV = nRT \text{ (混合气体理想状态方程)}$$

$$\text{压强: } p = p_1 + p_2 + \dots + p_n$$

道尔顿分压定律

例题 1



如图为低温测量中常用的一种气体温度计的示意图，上端A是压力计，下端B是测温泡，两者通过导热性能很差的毛细管C相连。毛细管很细，容积与A的容积 V_A 和B的容积 V_B 相比可以忽略不计。测量时，先把温度计在室温 T_0 下充气到压强 P_0 ，并密封起来。然后将B浸入待测物质。设B中气体与待测物质平衡后，A的读数为 p ，试求待测温度（用 V_A, V_B, P_0, T_0 及 p 表示）。

测温后，两者压力相同，但是温度不同。而且由于升温，A和B的气体质量（摩尔数都会改变）

$$\text{测温前压力计A: } p_0 V_A = n_A R T_0$$

$$\text{测温前测温泡B: } p_0 V_B = n_B R T_0$$

$$\text{测温后压力计A: } p V_A = (n_A - \Delta n) R T_0$$

$$\text{测温后测温泡B: } p V_B = (n_B + \Delta n) R T$$

解得：

$$T = \frac{p V_B}{p_0 (V_A + V_B) - p V_A} T_0$$

例题2

中等肺活量的人在标准状态状况下吸气一次大约吸进1.0g的氧，如果空气温度及各组分含量不随高度变化，飞行员飞到气压等于 $5.0 \times 10^4 \text{ Pa}$ 的高空每次吸进的氧气量有多少克？

解：高空处空气压强为 p , 温度为 T ，吸入空气的体积 V 不变。

空气的理想气体状态方程：

$$PV = nRT$$

$$n = \frac{PV}{RT}$$

标准状况下：

$$P_0 V = n_0 RT$$

$$n_0 = \frac{P_0 V}{RT}$$

$$\text{所以 } n = \frac{p}{p_0} n_0$$

因为组分不变(摩尔组分不变，质量组分也不变)

$$m = \frac{p}{p_0} m_0$$

例题3

在制造 $He-Ne$ 激光器的激光管时，需要充入一定比例的 He 和 Ne 混合气体，如图所示。原来在容器1和2中分别充有压强为 $2.0 \times 10^4 Pa$ 的氦气和压强为 $1.2 \times 10^4 Pa$ 的氖气，容器1容积是容器2的两倍。现打开活塞，使这两部分气体混合。试求混合后气体的总压强和两种气体的分压强。

混合前后，气体的总体积及温度不变。

混合后两组分的分压强分别为 p_{He} , p_{Ne} 。则

$$p_{He}(V_1 + V_2) = p_1 V_1$$

$$p_{Ne}(V_1 + V_2) = p_2 V_2$$

因此

$$p_{He} = \frac{V_1}{V_1 + V_2} p_1 = \frac{2V_2}{2V_2 + V_2} p_1 = \frac{2}{3} p_1$$

$$p_{Ne} = \frac{V_2}{V_1 + V_2} p_2 = \frac{V_2}{2V_2 + V_2} p_2 = \frac{1}{3} p_2$$

