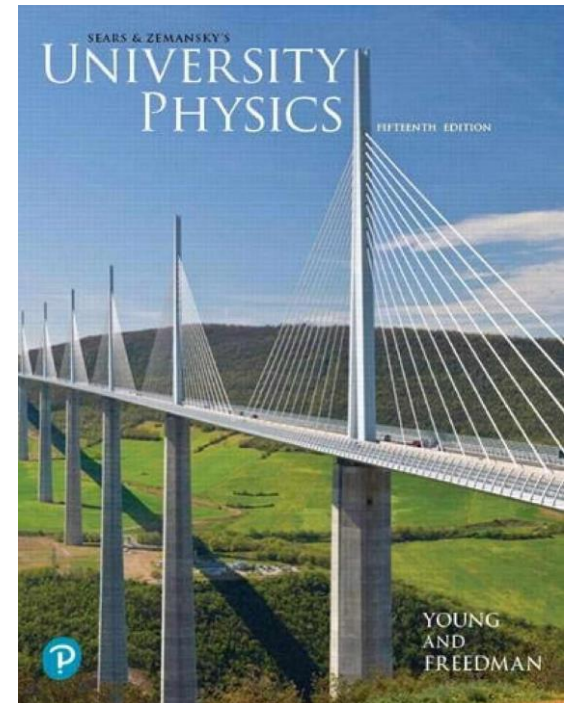


普通物理I PHYS1181

第17讲

温度和热量
Temperature and Heat



本章主要内容

A. 绪论

Introduction

B. 温度和温标

Temperature and temperature scales;

C. 热膨胀和热应力

Thermal expansion and thermal stress;

D. 热、相变和卡路里

Heat, phase changes, and calorimetry;

E. 热传导、热传播和热辐射

Conduction, convection, and radiation

A. 绪论

热现象: 一切与宏观物体**冷热状态**相关联的自然现象, 都称之为**热现象**。

热现象例子:

- **热传导**现象: 不同温度的物体相接触时发生热传导现象
- 物体的**热胀冷缩**现象: 不同的物质热膨胀系数不同
- **超导**现象: 不同的金属或氧化物, 临界温度不同
- 物体的**磁性**与温度有关: 高于居里温度, 磁性将消失

热现象举例-续

- 物体的**光学性质**与温度有关：发光（或吸收）强度和峰位与温度有关
- 物体的**化学性质**与温度有关：通常化学反应速度随温度的提高而提高
- 生物的**存在**与温度有关：生命的起源、生长、繁育的快慢与温度有关

热现象是自然界中一种普遍现象，研究宏观物体热现象的基本规律及其应用，是热学这门学科的基本任务。



热现象的宏观理论 - 热力学理论

只要与热运动有关，都普遍遵守三条基本实验规律，即**热力学三大定律**。

热力学理论 (Thermodynamics)：以热力学三定律为基本依据，把所有研究的宏观物体视为有明显界面的连续介质系统，而不考虑其内部具体的微观结构，通过数学手段进行严密的逻辑推理及演绎，得出有关物质**各种宏观性质之间的关系、宏观物理过程进行的方向和限度**，从而建立起一套处理热现象的宏观理论。

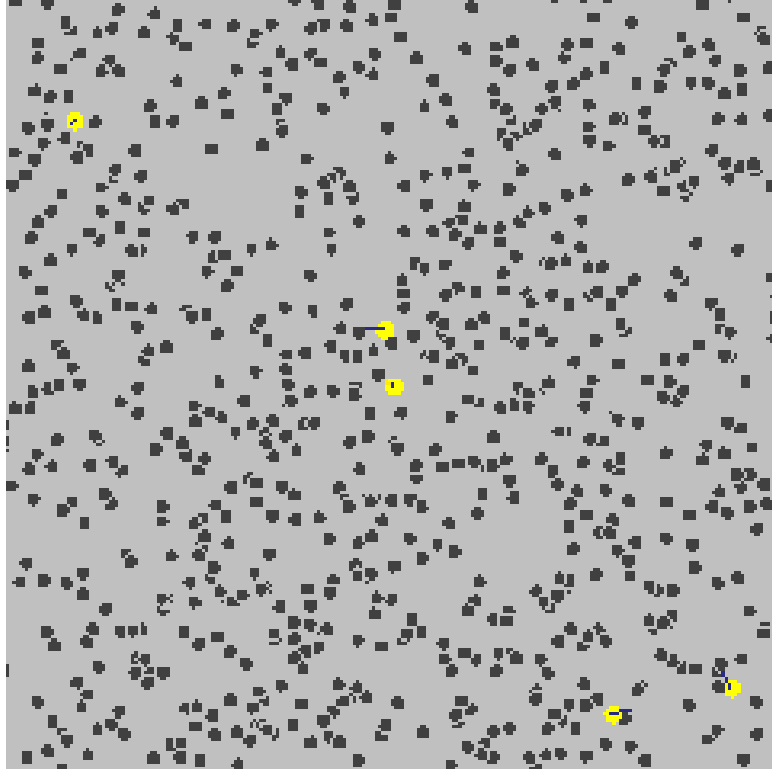
宏观量：从整体上描述系统的状态量，一般可以直接测量。

如 M 、 V 、 E 等----可以累加，称为广延量。

P 、 T 等----不可累加，称为强度量。

- Watt提出热机效率问题和热功当量问题
- 1824 法国工程师N. L. S. Carnot (1796-1832)提出Carnot循环，研究了热机工作效率.
- 1834 B. Clapeyron(1799-1864)发现了Carnot的工作，提出Clapeyron定律 (统一了Gay-Lussac定律和Boyle-Mariotte定律).
- 1840-1850提出能量守恒定律并将它精确化：
J. R. Mayer(1814-1878), J. P. Joule (1818-1899), H. Helmholtz (1821-1894).
- 1857-1865 平衡态热力学 【德国物理学家R. Clausius (1832-1888)】
 - 发展了热的力学理论.
 - 提出内能的概念, 将能量守恒定律表述为 $Q=dE+pdV$ 的形式.
 - 熵的概念与热力学第二定律(1865).
- 1850-1925 经典唯象热力学最后形成
 - 热力学的数学结构：接触几何 (Gibbs).
 - 热力学的公理化形式 (Carathéodory).

B. 温度和温标



温度是对微观运动的**统计**描述

- 温度: T

- * 玻尔兹曼统计分布

$$a_l = W_l e^{-a - be_l} \quad (*\text{能量为}\varepsilon_l\text{的能级粒子占据数})$$

$$\beta = 1/(k_B T)$$

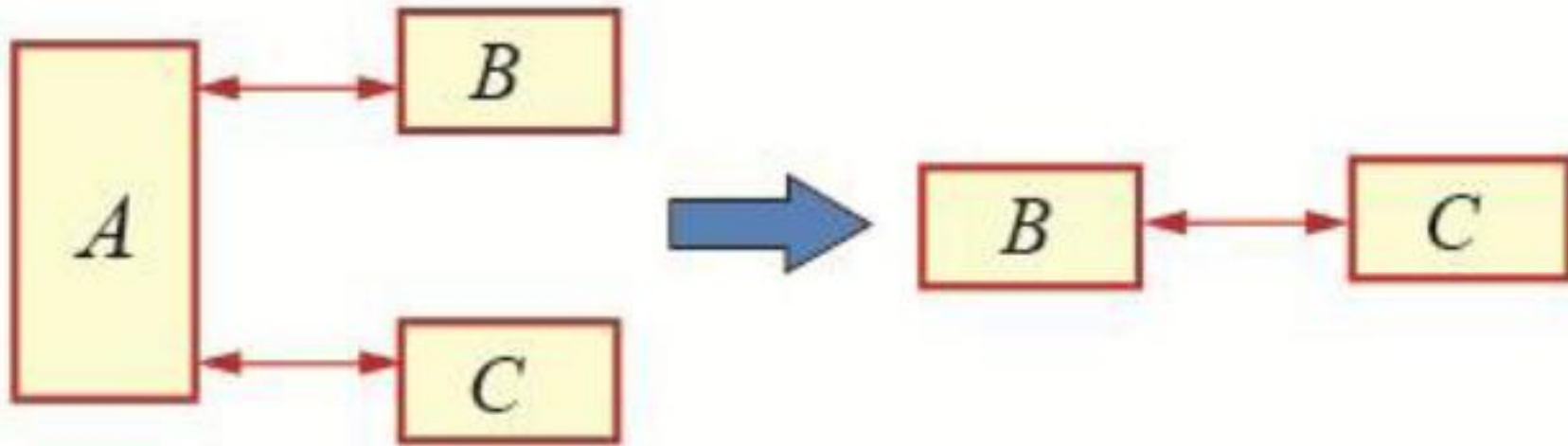
热平衡: 两热力学系统相互接触, 而与外界没有热量交换, 当经过了足够长的时间后, 它们的冷热程度不再发生变化, 则称这两系统达到了热平衡。



热力学第零定律 (热平衡的传递性)

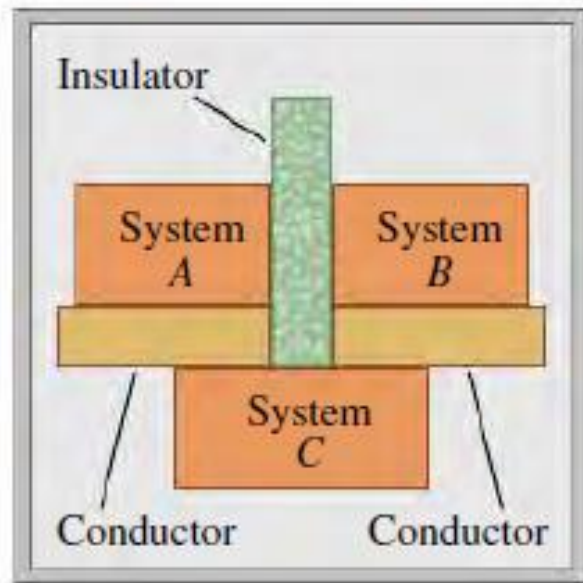
如果系统B、C同时和系统A达到热平衡，则系统B和C也处于热平衡——**热力学第零定律**。

The zeroth law of thermodynamics: If C is initially in thermal equilibrium with both A and B, then A and B are also in thermal equilibrium with each other.

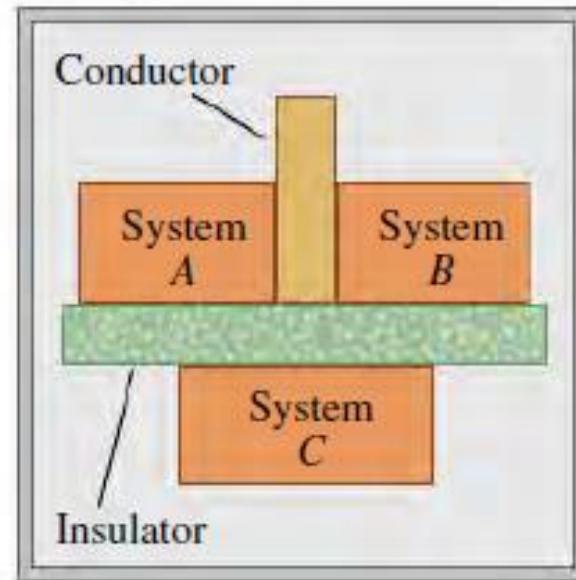


温度的概念起源于比较 – 冷 v.s. 热
日常认识中, “热” — 能量 — 是可以传递的。

(a) If systems *A* and *B* are each in thermal equilibrium with system *C* ...



(b) ... then systems *A* and *B* are in thermal equilibrium with each other.

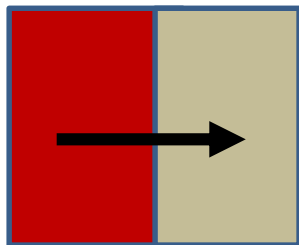


- Two systems are in thermal equilibrium if and only if they have the same **temperature**. 具有相同温度的两个系统为热平衡。反而言之, 处于热力学平衡状态的两个系统具有相同的 (即确定的) 温度。

温度 - 能量的标度



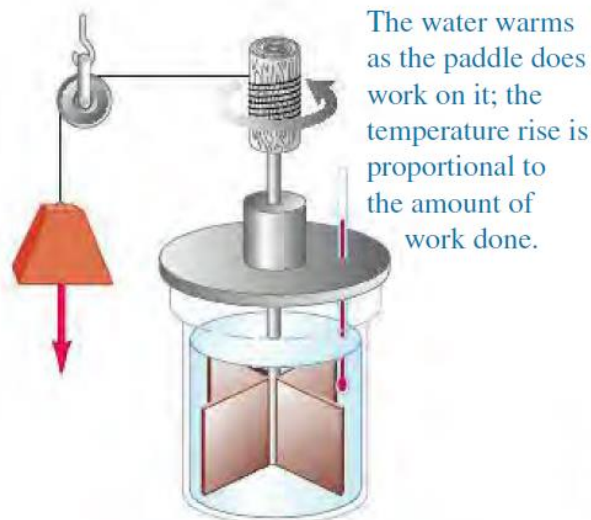
热素?



曾经错误的认识：认为一种物质“热素”在高温到低温物体之间传递。

正确的认识：

- 注入能量，温度升高：温度是体系“某种”能量的标度。
- 能量：焦耳 J ~ 温度：开尔文 K



温度对应的对象：

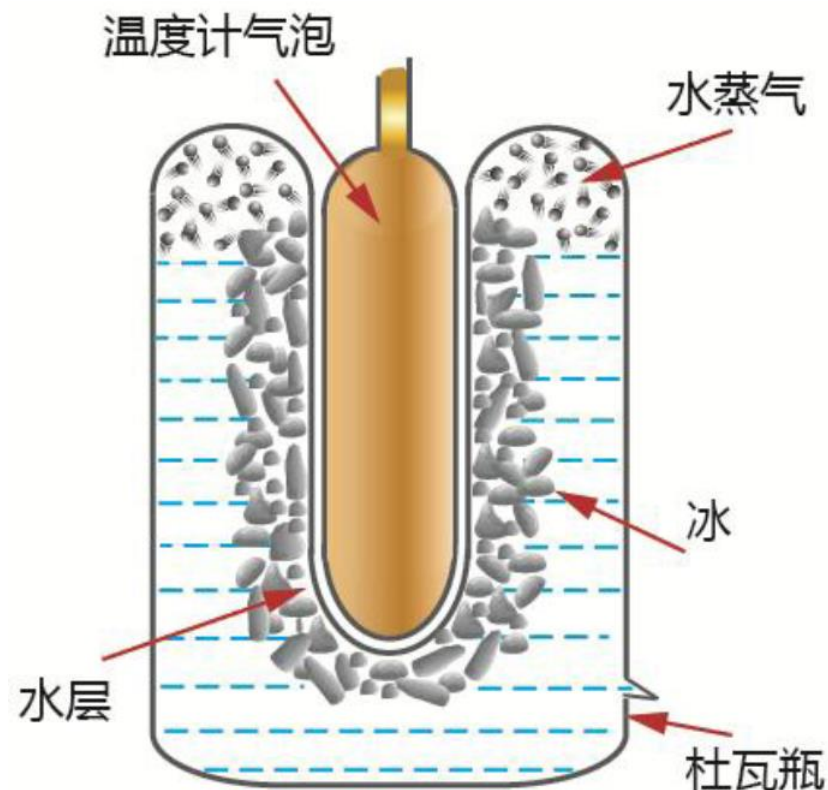
- 一般不对应单个分子，原子或质点。
- 大量分子（粒子）的集体效应在宏观上表现为物体的热现象和热性质。
- 温度是对集体对象的统计性质的标度。

经验温标

1. 经验温标依据：物质的物理属性随温度的变化而变化。

- I. 选取测温物质；
- II. 选取固定点（水的三相点），规定其温度数值（273.16K）
- III. 分度，确定温度T与表示测温属性的测温参量x的函数关系：

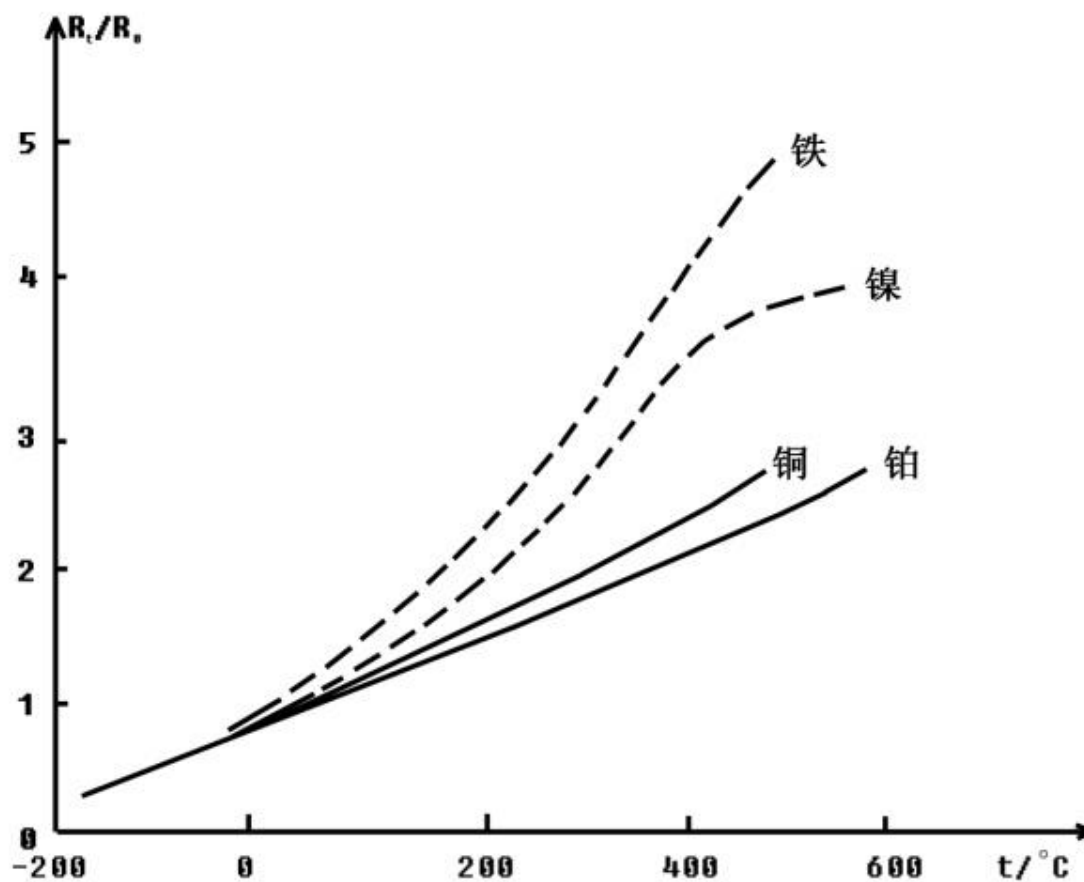
$$T(x) = 273.16K \cdot \frac{x}{x_{tr}}$$



水的三相点的实验装置图

经验温标：利用特定测温物质的特定测温参量所建立的温标。

例：金属的电阻随温度变化



思考：

各类温度计都似乎依赖于测温物质的测温属性。有没有不依赖于任何测温物质及其测温属性的温度计？

理想气体温度计

理想气体方程：

Ideal-gas equation:

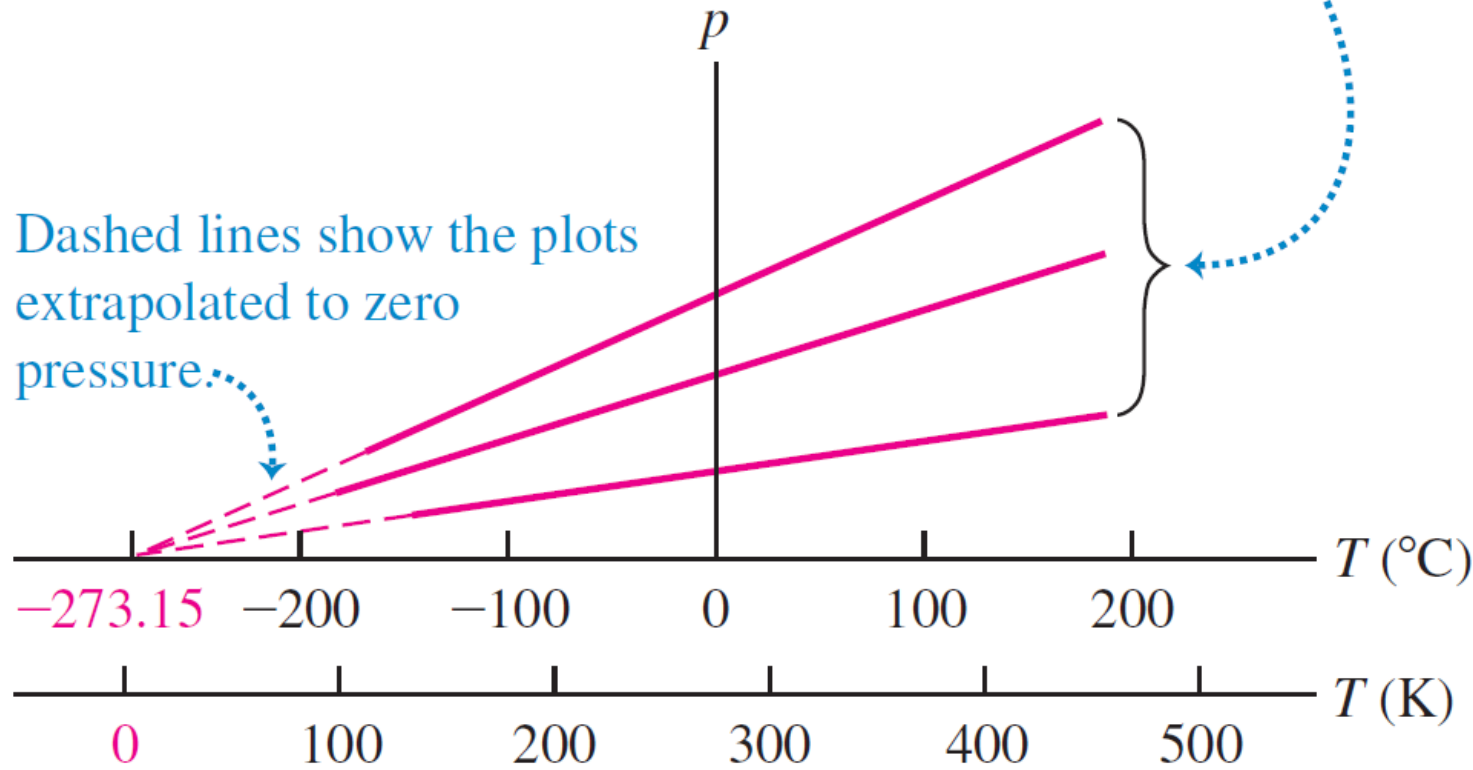
$$pV = nRT$$

Gas pressure → p ← Number of moles of gas
Gas volume → V ← Absolute temperature of gas
← R → Gas constant

Gas constant $R=8.314 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$

理想气体为假想的气体。假设气体分子本身不占有体积，气体分子持续以直线运动，并且与容器器壁间发生弹性碰撞，因而对器壁施加压强，气体分子间无作用力，气体分子的平均能量与开尔文温度成正比。适用理想气体状态方程。

Plots of pressure as a function of temperature for gas thermometers containing different types and quantities of gas



Dashed lines show the plots extrapolated to zero pressure.

The extrapolated plots all reach zero pressure at the same temperature: -273.15°C .

$$\lim_{p \rightarrow 0} T(p) = -273.15^{\circ}\text{C}$$

各种不同气体作为测温物质，所测的温度只有微小差别，而且随气体压强降低，这差别渐渐降低，当压强趋于零时，这差别将消失。由此得到的**温度仅取决于气体的共同性质，与气体的种类无关。**

理想气体温标

实验表明，在压强趋于零的极限下，各种气体所确定的 T_V 趋于一个共同的极限温标，这个温标就称作**理想气体温标**。

$$T = T_{tr} \frac{p}{p_{tr}} = (273.16K) \frac{p}{p_{tr}}$$

日常生活的摄氏温度与热力学温度 T 的数值关系

$$T_K = T_C + 273.15$$

273.15与273.16有0.01度的差别，来源于水的三相点标定为273.16K，即0.01°C，而冰点是273.15K，即0°C

什么时候用273.15？换算K-C的温标的时候、水的冰点

理想气体温标

定容气体温度计

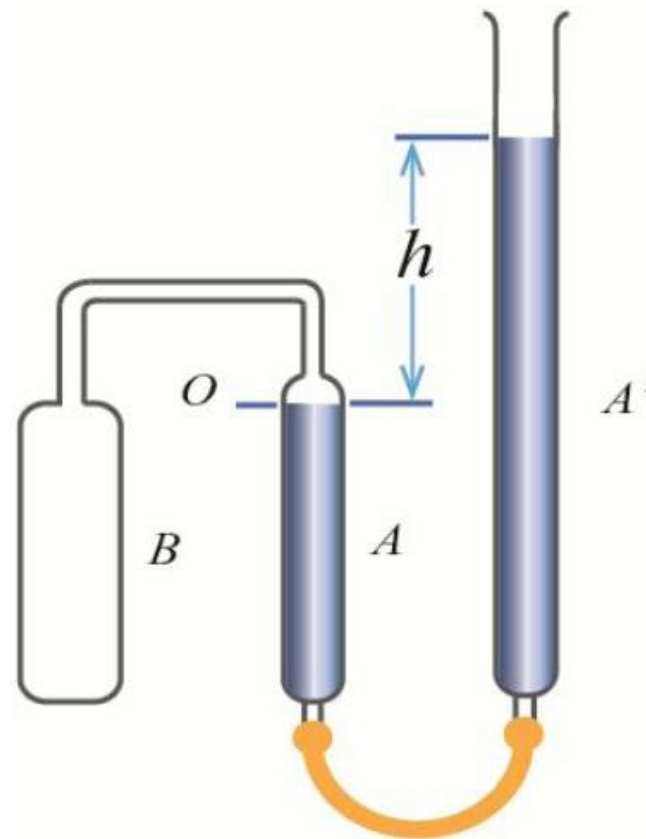
$$T(p) = 273.16K \cdot \frac{p}{p_{tr}}$$

定压气体温度计

$$T(V) = 273.16K \cdot \frac{V}{V_{tr}}$$

* T_{tr} :水三相点温度

定容气体温度计



例: 定容气体温度计的测温泡浸在水的三相点槽内时, 其中气体的压强为 $6.7 \times 10^3 \text{ Pa}$ 。 (1) 当温度计测量 300 K 的温度时, 气体的压强是多少? (2) 当气体的压强为 $9.1 \times 10^5 \text{ Pa}$ 时, 待测温度是多少?

解: 记温度计内气体在水的三相点时的压强为 p_{tr} , 则有

$$T(p) = 273.16 \text{ K} (p/p_{\text{tr}})$$

(1) 由 $T(p) = 273.16 \text{ K} (p/p_{\text{tr}})$, 有

$$p = \frac{T(p)p_{\text{tr}}}{273.16 \text{ K}} = \frac{300 \text{ K} \times 6.7 \times 10^3 \text{ Pa}}{273.16 \text{ K}} = 7.358 \times 10^3 \text{ Pa}$$

(2) 由 $T(p) = 273.16 \text{ K} (p/p_{\text{tr}})$, 有

$$T(p) = 273.16 \text{ K} (p/p_{\text{tr}}) = \frac{273.16 \text{ K} \times 9.1 \times 10^5 \text{ Pa}}{6.7 \times 10^3 \text{ Pa}} = 3.710 \times 10^4 \text{ K}$$

摄氏温标

创立人：摄尔修斯（瑞典天文学家）

时间：1742年

单位： $^{\circ}\text{C}$ （摄氏温度）

测温物质：酒精或水银

测温属性：热膨胀

固定标准点：标准大气压下，水的冰点： 0°C ，摄尔修斯

标准大气压下，水的沸点： 100°C

分度：等分

摄氏温标与热力学温标的换算关系：

应用范围：生活和科技中普遍使用



摄尔修斯

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

华氏温标

创立人：华伦海特 (G. D. Fahrenheit)

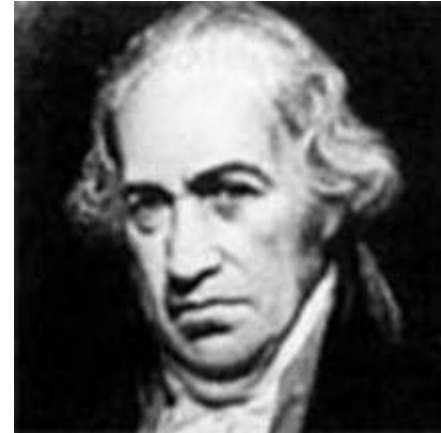
时间：1714年

单位：°F (华氏度)

测温物质：酒精或水银

测温属性：热膨胀

分度：等分



华伦海特

固定标准点：无盐的冰水混合物： $32^{\circ}F$

一大气压下水的沸点： $212^{\circ}F$

华氏温标与摄氏温标换算关系：

$$t_F(^{\circ}F) = 32 + \frac{9}{5}t(^{\circ}C)$$

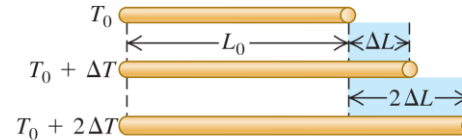
应用范围：英美工程界和日常生活

C. 热膨胀和热应力 Thermal expansion and thermal stress

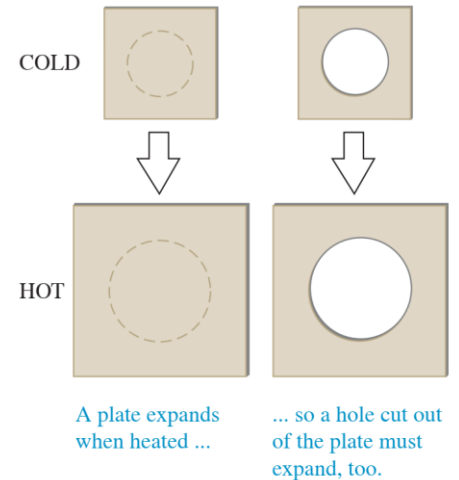
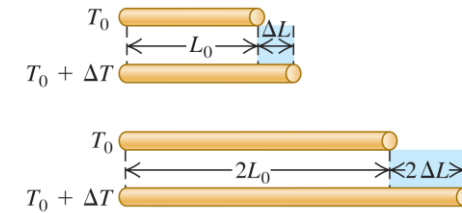
热胀冷缩： 绝大多数的物质材料在加热时会膨胀（正的膨胀系数）

膨胀量与温度变化量 ΔT 呈正比关系：

(a) For moderate temperature changes, ΔL is directly proportional to ΔT .



(b) ΔL is also directly proportional to L_0 .



Linear thermal expansion:

Change in length

$$\Delta L = \alpha L_0 \Delta T$$

Coefficient of linear expansion

线膨胀系数 α

Volume thermal expansion:

Change in volume

$$\Delta V = \beta V_0 \Delta T$$

Coefficient of volume expansion

体膨胀系数 β

对于各向同性的固体，有： $\beta = 3\alpha$

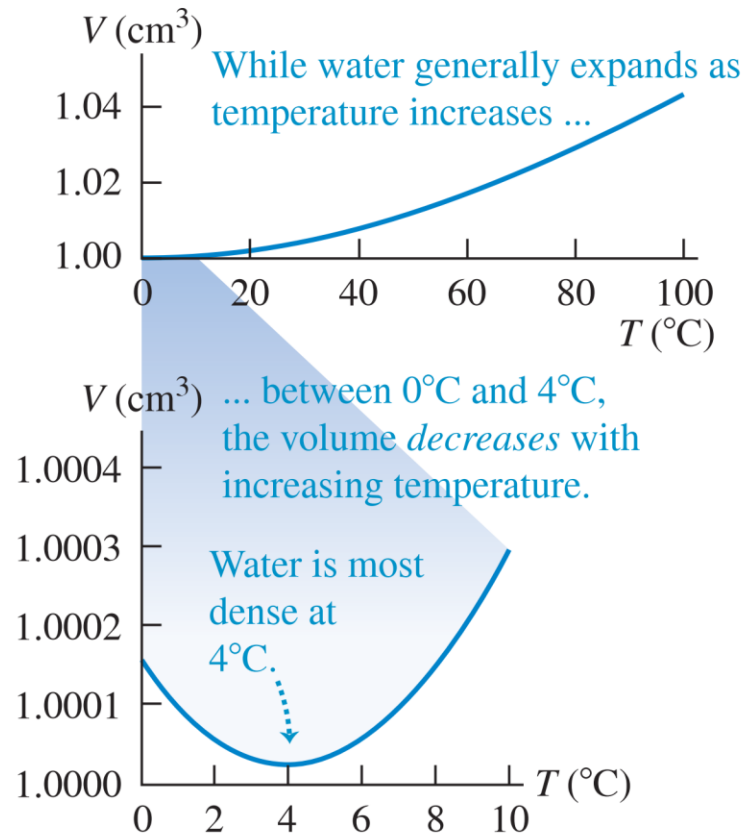
Material	α [K^{-1} or $(\text{C}^\circ)^{-1}$]	β [K^{-1} or $(\text{C}^\circ)^{-1}$]
Aluminum	2.4×10^{-5}	7.2×10^{-5}
Brass	2.0×10^{-5}	6.0×10^{-5}
Copper	1.7×10^{-5}	5.1×10^{-5}
Glass	$0.4\text{--}0.9 \times 10^{-5}$	$1.2\text{--}2.7 \times 10^{-5}$
Invar (nickel-iron alloy)	0.09×10^{-5}	0.27×10^{-5}
Quartz (fused)	0.04×10^{-5}	0.12×10^{-5}
Steel	1.2×10^{-5}	3.6×10^{-5}

反例：水在4°C时体积最小、密度最大

(0°C冰的密度小于4°C水。

原因：冰中水分子之间的氢键相互作用具有方向性，形成的水分子网格空隙反而比液体水更大)

冬季只有湖面结冰，水生动物得以更好的生存



热应力:

公路桥梁建设时
需要预留伸缩缝

$$\left(\frac{\Delta L}{L_0}\right)_{\text{thermal}} = \alpha \Delta T \quad \text{杨氏模量: } Y = \frac{F/A}{\Delta L/L_0}$$

$$Y = \frac{F/A}{\Delta L/L_0} \quad \text{so} \quad \left(\frac{\Delta L}{L_0}\right)_{\text{tension}} = \frac{F}{AY}$$

$$\left(\frac{\Delta L}{L_0}\right)_{\text{thermal}} + \left(\frac{\Delta L}{L_0}\right)_{\text{tension}} = \alpha \Delta T + \frac{F}{AY} = 0$$

因此, 对于棒状物体, 热应力与棒材截面积 A 、温度变化量 ΔT 成正比关系:

Thermal stress:

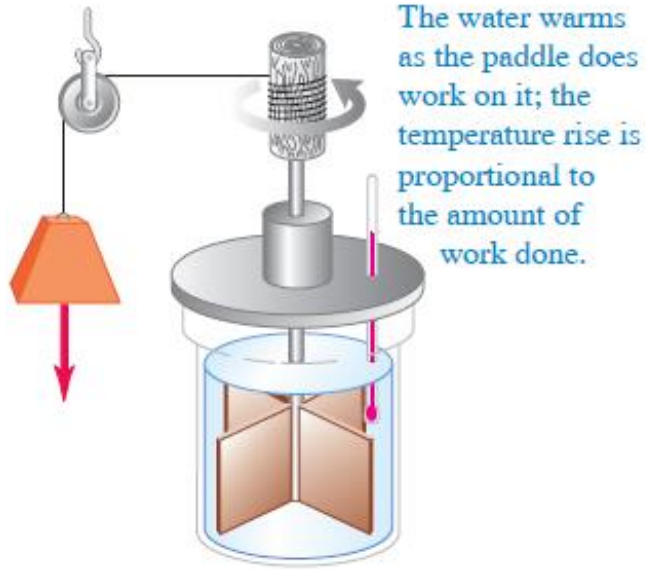
Force needed to
keep length of rod
constant

$$\frac{F}{A} = -Y\alpha \Delta T$$

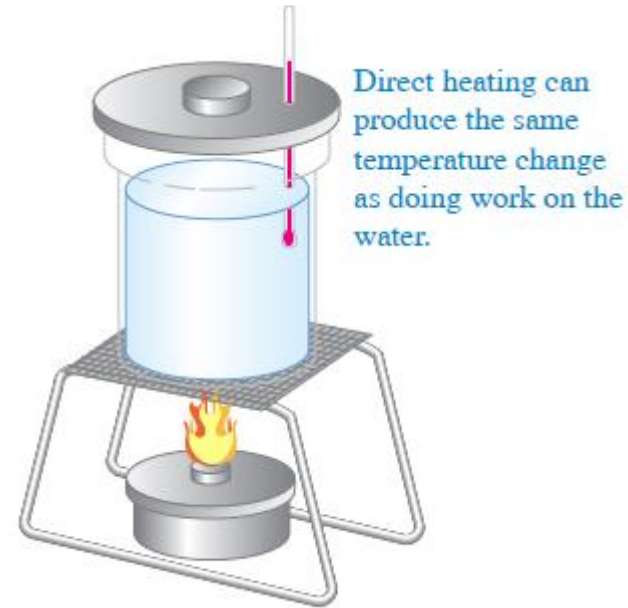
Young's modulus
Temperature change
Coefficient of linear expansion
Cross-sectional area of rod



D. 热量、卡路里和相变



做功可以提高温度



热传导也可以提高温度

热量定义：仅由于温度差而发生的能量传递称为热流或热传递，以这种方式传递的能量称为热量（ Q ）。

Energy transfer that takes place solely because of a temperature difference is called heat flow or heat transfer, and energy transferred in this way is called **heat**.

热量的标度-卡路里

卡路里（缩写为Cal.）：将1克水的温度从14.5°C提高到15.5°C所需要的热量。

The calorie (abbreviated cal) is the amount of heat required to raise the temperature of 1 gram of water from 14.5°C to 15.5°C.

注意：卡路里（Cal.）非能量的国际单位，焦耳（J）是能量国际单位。

$$1 \text{ cal} = 4.186 \text{ J}$$

$$1 \text{ kcal} = 1000 \text{ cal} = 4186 \text{ J}$$

$$1 \text{ Btu} = 778 \text{ ft} \cdot \text{lb} = 252 \text{ cal} = 1055 \text{ J}$$

热容量 Heat Capacity (简称热容)

热容量： 使系统温度升高1K所需的吸收的热量

$$C = \lim_{DT \rightarrow 0} \frac{DQ}{DT} \quad \text{单位： J} \times \text{K}^{-1}$$

比热容： 单位质量的热容, specific heat

摩尔热容量： $C_m = C/n$ n 是系统的物质质量(mol)

➤ C 、 C_m 与过程有关

等容热容量： 等容过程中系统温度升高1K所需的吸收的热量。

$$C_V = \lim_{\Delta T \rightarrow 0} \left(\frac{DQ}{DT} \right)_V$$

已知： $DV = 0$ $W = -\int_{V_1}^{V_2} p dV$

能量守恒： $\Delta Q = \Delta U - \Delta W = \Delta U$

$$C_V = \lim_{\Delta T \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta U}{\Delta T} \right)_V = \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_V$$

等压热容量：等压过程中系统温度升高1K所需的吸收的热量。

$$C_p = \lim_{DT \rightarrow 0} \left(\frac{DQ}{DT} \right)_p$$

等压过程： $DQ = DU + pDV$

定义焓： $H = U + pV$

则： $DQ = (DH)_p$

$$C_p = \left(\frac{\partial H}{\partial T} \right)_p$$

等压过程中系统从外界吸收的热量等于**态函数焓H**的增值。

这是态函数焓 $H=H(p, T)$ 的重要特性。

常见物质等压热容 C_p

TABLE 17.3 Approximate Specific Heats and Molar Heat Capacities (Constant Pressure)

Substance	Specific Heat, c (J/kg · K)	Molar Mass, M (kg/mol)	Molar Heat Capacity, C (J/mol · K)
Aluminum	910	0.0270	24.6
Beryllium	1970	0.00901	17.7
Copper	390	0.0635	24.8
Ethanol	2428	0.0461	111.9
Ethylene glycol	2386	0.0620	148.0
Ice (near 0°C)	2100	0.0180	37.8
Iron	470	0.0559	26.3
Lead	130	0.207	26.9
Marble (CaCO ₃)	879	0.100	87.9
Mercury	138	0.201	27.7
Salt (NaCl)	879	0.0585	51.4
Silver	234	0.108	25.3
Water (liquid)	4190	0.0180	75.4

例题：

A camper pours 0.300 kg of coffee, initially in a pot at 70.0 °C, into a 0.120 kg aluminum cup initially at 20.0 °C. What is the equilibrium temperature? Assume that coffee has the same specific heat as water and that no heat is exchanged with the surroundings.

解：

$$Q_C + Q_{Al} = m_C c_W \Delta T_C + m_{Al} c_{Al} \Delta T_{Al} = 0$$

$$m_C c_W (T - T_{0C}) + m_{Al} c_{Al} (T - T_{0Al}) = 0$$

$$T = \frac{m_C c_W T_{0C} + m_{Al} c_{Al} T_{0Al}}{m_C c_W + m_{Al} c_{Al}} = 66.0^\circ\text{C}$$

单元系的相变

什么是单元系？

同一化学成分的系统



什么是单元复相系？

同一化学成分的不同相

如：水和水蒸气
水、水蒸气和冰



常见物质熔化热和蒸发热

TABLE 17.4 Heats of Fusion and Vaporization

Substance	Normal Melting Point		Heat of Fusion, L_f (J/kg)	Normal Boiling Point		Heat of Vaporization, L_v (J/kg)
	K	°C		K	°C	
Helium	*	*	*	4.216	-268.93	20.9×10^3
Hydrogen	13.84	-259.31	58.6×10^3	20.26	-252.89	452×10^3
Nitrogen	63.18	-209.97	25.5×10^3	77.34	-195.8	201×10^3
Oxygen	54.36	-218.79	13.8×10^3	90.18	-183.0	213×10^3
Ethanol	159	-114	104.2×10^3	351	78	854×10^3
Mercury	234	-39	11.8×10^3	630	357	272×10^3
Water	273.15	0.00	334×10^3	373.15	100.00	2256×10^3
Sulfur	392	119	38.1×10^3	717.75	444.60	326×10^3
Lead	600.5	327.3	24.5×10^3	2023	1750	871×10^3
Antimony	903.65	630.50	165×10^3	1713	1440	561×10^3
Silver	1233.95	960.80	88.3×10^3	2466	2193	2336×10^3
Gold	1336.15	1063.00	64.5×10^3	2933	2660	1578×10^3
Copper	1356	1083	134×10^3	1460	1187	5069×10^3

*A pressure in excess of 25 atmospheres is required to make helium solidify. At 1 atmosphere pressure, helium remains a liquid down to absolute zero.

例 计算水的沸点随压力的改变。已知在 $1p_n$ 下，水的沸点为 373.15K ，水的气化热为 $L = 2.257 \times 10^6 \text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，水的比体积为 $v^a = 1.043 \times 10^{-3} \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ ，水蒸气比体积 $v^b = 1.673 \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$

解：

$$\frac{dp}{dT} = \frac{L}{T(v^b - v^a)} = \frac{2.257 \times 10^6 \text{J} \cdot \text{kg}^{-1}}{373.15\text{K} \times 1.672 \times 10^{-3} \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}}$$

$$= 3.62 \times 10^3 \text{Pa} \cdot \text{K}^{-1} = 0.0357 p_n \cdot \text{K}^{-1}$$

结果与实验观测值 $0.0356 p_n \cdot \text{K}^{-1}$ 吻合。

$$\frac{dT}{dp} = 28\text{K} / p_n$$

例 A glass contains 0.25 kg of Omni-Cola (mostly water) initially at 25 °C. How much ice, initially at -20 °C, must you add to obtain a final temperature of 0 °C with all the ice melted? Ignore the heat capacity of the glass.

解:

Cola



Ice



$$m_C c_W \Delta T_C + m_I c_I \Delta T_I + m_I L_f = 0$$

$$m_C c_W (T - T_{0C}) + m_I c_I (T - T_{0I}) + m_I L_f = 0$$

$$m_I [c_I (T - T_{0I}) + L_f] = -m_C c_W (T - T_{0C})$$

$$m_I = m_C \frac{c_W (T_{0C} - T)}{c_I (T - T_{0I}) + L_f}$$

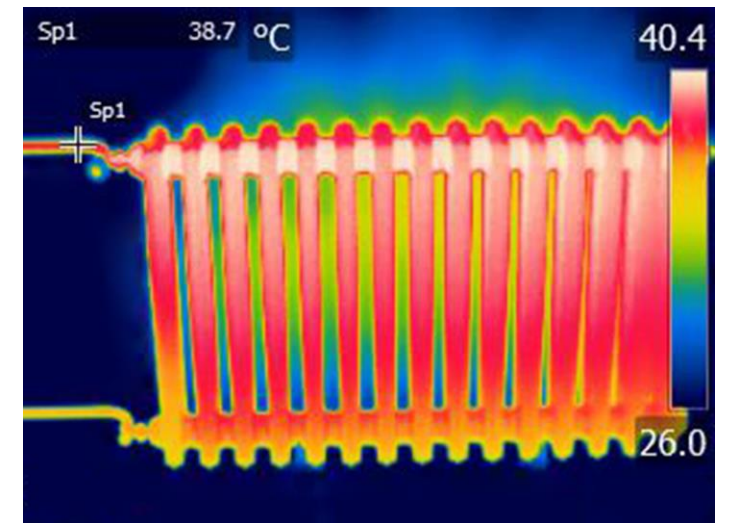
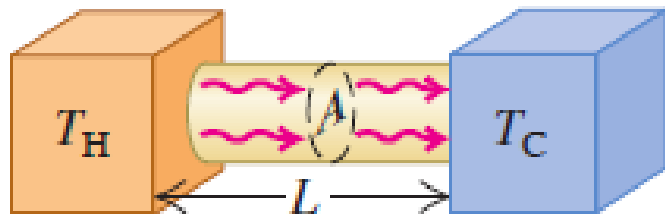
$$m_I = 0.070 \text{ kg} = 70 \text{ g}$$

E. 热传播的机制 Mechanism of heat transfer

I. 热传导 Thermal conduction

II. 热对流 Thermal convection

III. 热辐射 Thermal radiation



热传导 Thermal conduction

热传导：热量通过材料从高温端传递到低温端。

热传导速率：当热量dQ在时间dt中通过棒传递时，热量的传导速率为dQ/dt。我们称此速率为热流，用H表示。

Rate of heat flow

Temperatures of hot and cold ends of rod

Heat current in conduction

$$H = \frac{dQ}{dt} = kA \frac{T_H - T_C}{L}$$

Length of rod

Thermal conductivity of rod material

Cross-sectional area of rod

$L \sim 0$

$$H = \frac{dQ}{dt} = -kA \frac{dT}{dx}$$

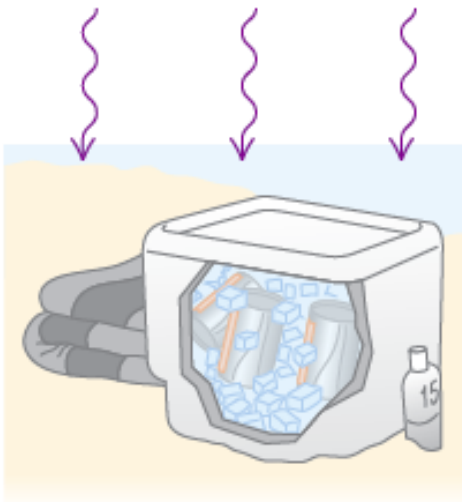
热绝缘方程: $H = \frac{A(T_H - T_C)}{R}$

热阻 $R = \frac{L}{k}$

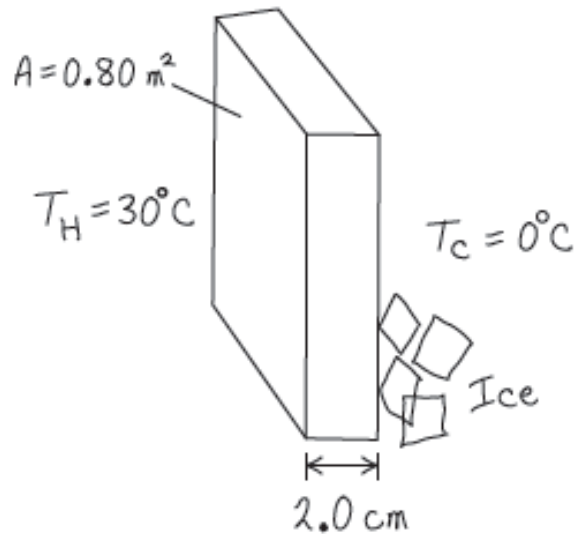
例: 聚苯乙烯泡沫塑料冷却器的总壁面积 (包括盖子) 为0.80平方米, 壁厚为2.0厘米。它充满了冰, 水和罐装Cola, 温度均为0 °C。如果外壁温度为30 °C, 流入箱子的热流速率是多少? 箱子的热阻是多少?

解:

(a) A cooler at the beach



(b) Our sketch for this problem

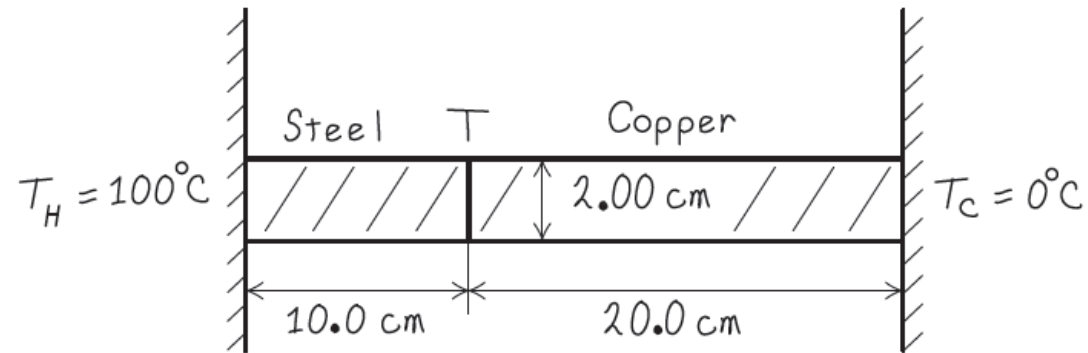


$$H = kA \frac{T_H - T_C}{L} = (0.027 \text{ W/m} \cdot \text{K})(0.80 \text{ m}^2) \frac{30^\circ\text{C} - 0^\circ\text{C}}{0.020 \text{ m}}$$
$$= 32.4 \text{ W} = 32.4 \text{ J/s}$$

$$R = \frac{L}{k} = \frac{0.02 \text{ m}}{0.027 \text{ W/m} \cdot \text{K}} = 0.74 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$$

例：将长10.0厘米的钢条焊接到长20.0厘米的铜条上。每个条都有一个正方形的横截面，一侧为2.00厘米。通过与蒸汽接触将钢棒的自由端保持在100 °C，通过与冰接触将铜棒的自由端保持在0 °C。两根杆的侧面均完全绝缘。求出两个棒的交界处的稳态温度以及流过棒的总热量。

解：



$$H_S = k_S A \frac{T_H - T}{L_S} = H_{Cu} = k_{Cu} A \frac{T - T_C}{L_{Cu}}$$

$$T = \frac{\frac{k_S}{L_S} T_H + \frac{k_{Cu}}{L_{Cu}} T_C}{\left(\frac{k_S}{L_S} + \frac{k_{Cu}}{L_{Cu}} \right)}$$

热对流 Thermal convection

热对流是指通过流体的运动，将热量从一个空间区域传递到另一空间区域。

如果流体循环通过鼓风机或泵，该过程称为**强制对流**；如果是由于热膨胀（例如热空气上升）引起的密度差异，该过程是称为**自由对流**。

一些热对流的实验发现：

1. 对流产生的热流与表面积成正比，因此，使用对流传递热量的散热器和散热片一般具有大表面积。
2. 流体的粘度会减慢固定表面附近的自然对流。对于空气，这会在垂直表面上产生具有大约与1.3厘米胶合板的绝缘值相同的热阻。强制对流能够减小该膜的厚度，增加热传递速率。这是“风寒因素”的原因：在相同温度空气中，你在冷风中变冷的速度比静止时快。
3. 自由对流引起的热流大约和流体内外温度差的 $5/4$ 次方成正比。

热辐射 Thermal radiation

热辐射： 受热的物体会辐射电磁波。

- 任何物体在任何温度下都辐射电磁波，热辐射强度和强度按频率的分布与辐射体的温度和性质有关。
- 如果辐射体对电磁波的吸收与辐射达到平衡，热辐射的特性将只取决于温度，与辐射体的其它特性无关，称为平衡辐射。

卫星拍摄河流红外成像



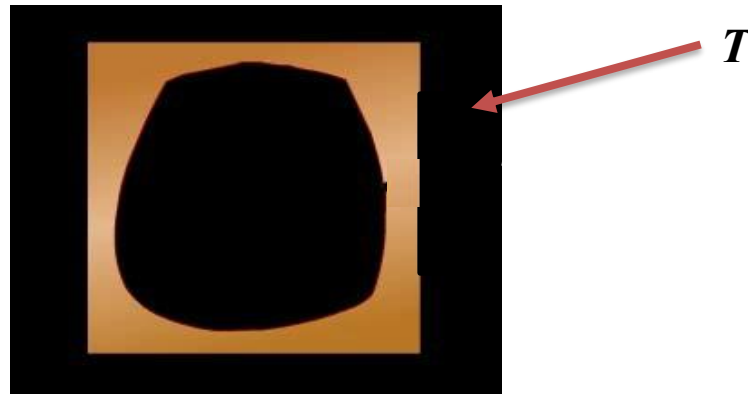
Covid19人体红外成像



黑体辐射 (平衡辐射)

考虑一个封闭的空窑，窑壁保持一定温度 T

- 窑壁将不断向空窑发射并吸收电磁波，窑内辐射场与窑壁达到平衡后，二者具有共同的温度：窑内**平衡辐射**，也称为**黑体辐射**。



平衡辐射特性

- 包含各种频率，沿着各个方向传播的电磁波，电磁波的振幅和相位都无规的；
- 窑内平衡辐射空间均匀并且各向同性；
- **内能密度和内能密度按频率的分布只取决于温度。**

热辐射速率H和温度T的关系:

Heat current in radiation $H = Ae\sigma T^4$

Area of emitting surface A

Emissivity of surface e

Absolute temperature of surface T

Stefan-Boltzmann constant σ

——斯特藩—玻耳兹曼 (Stefan—Boltzmann)定律

σ 称为斯特藩常量: $5.669 \times 10^{-8} W \times m^{-2} \times K^{-4}$

- 1879年斯特藩实验观测发现
- 1884年玻尔兹曼用热力学理论导出

净热辐射速率 H_{net} 和黑体温度 T , 环境温度 T_s 的关系:

Net heat current in radiation $H_{net} = Ae\sigma(T^4 - T_s^4)$

Area of emitting surface A

Emissivity of surface e

Absolute temperatures of surface (T) and surroundings (T_s)

Stefan-Boltzmann constant σ

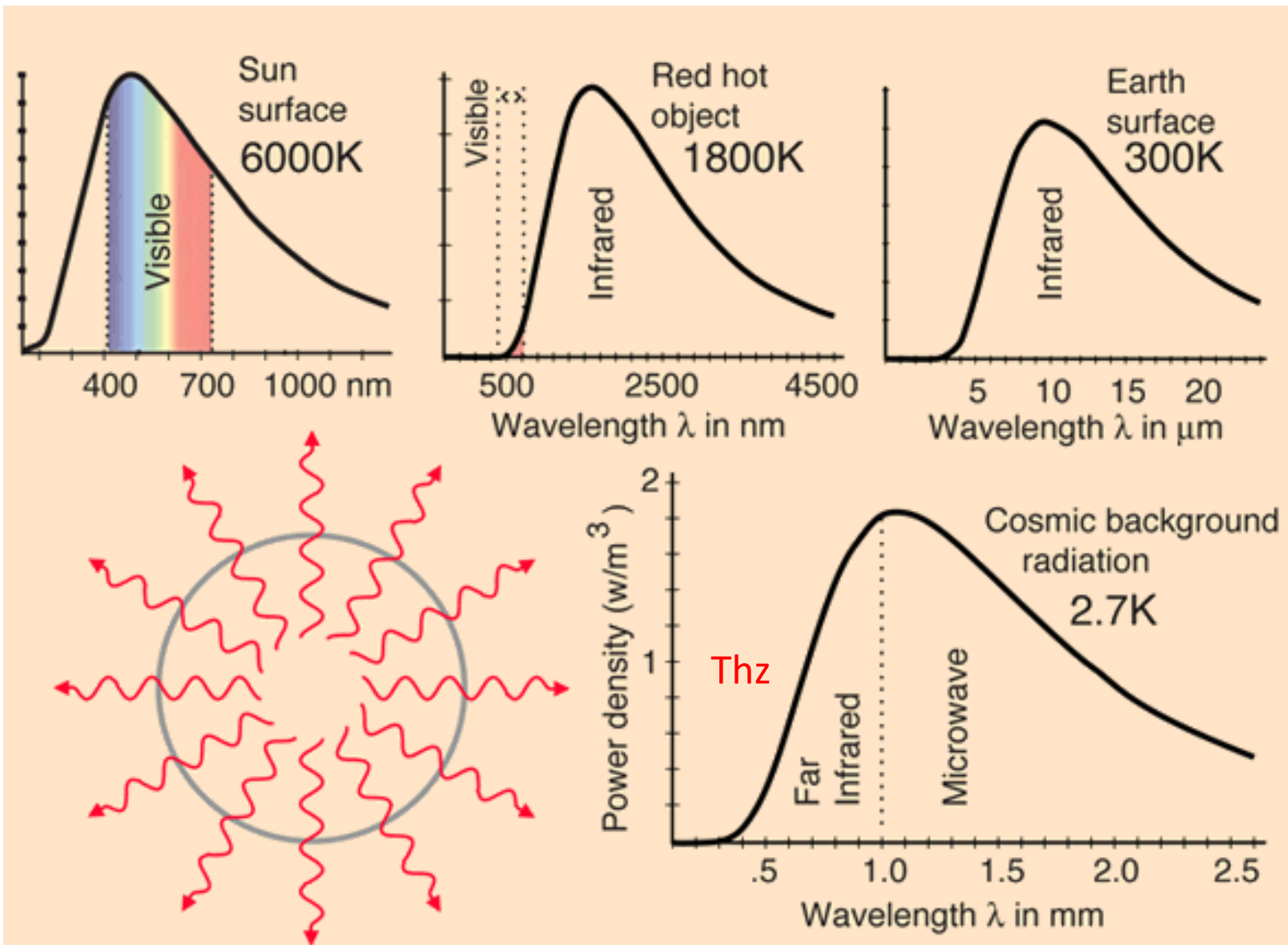
例题：人体表面积1.20平方米，表面温度30 °C = 303 K，人体辐射能量的总辐射速率是多少？如果环境温度为20 °C，人体辐射能量的净辐射速率是多少？人体的发射率e接近为1，与皮肤色素沉着无关。

解：

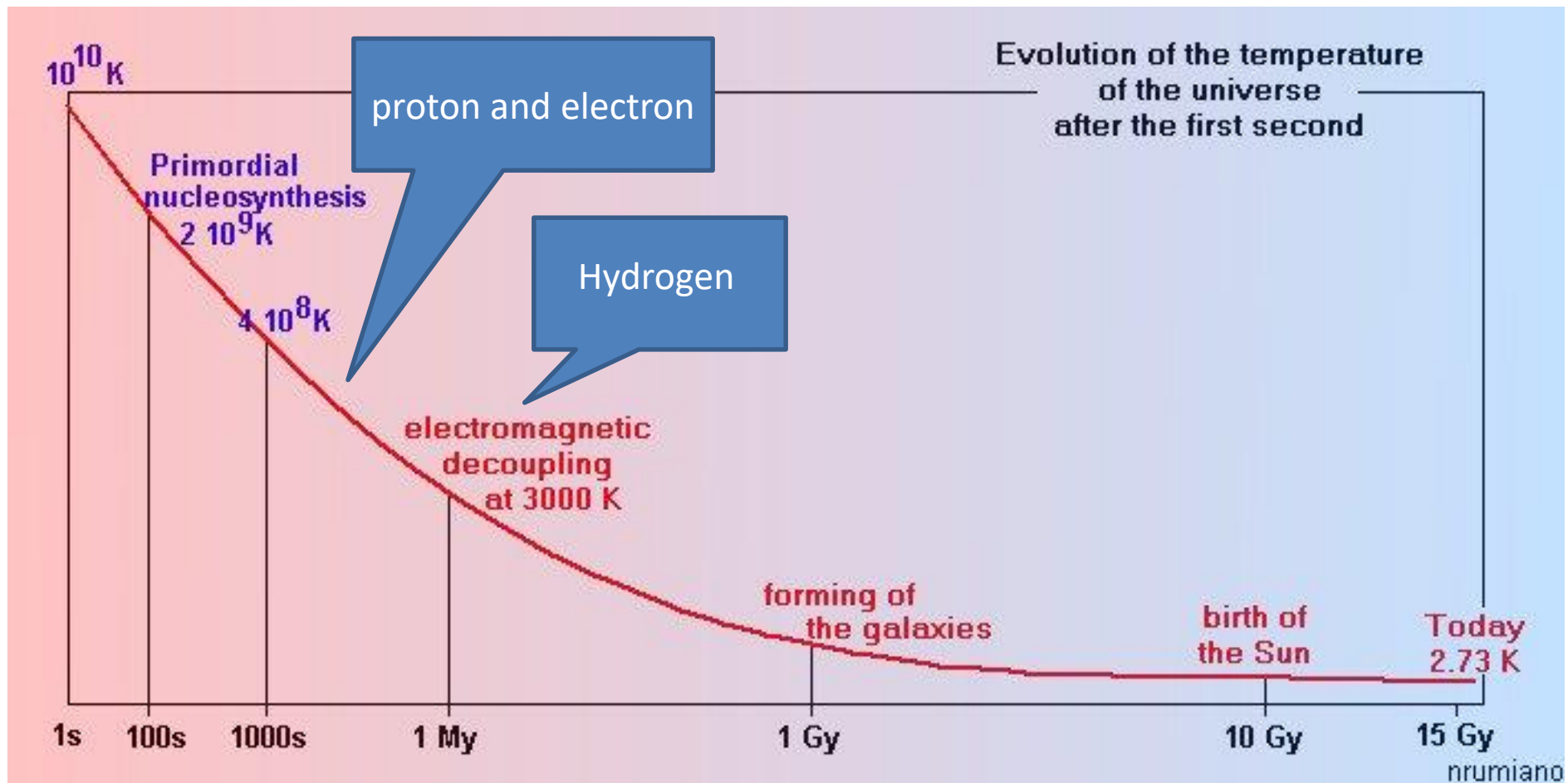
$$\begin{aligned} \text{总辐射速率 } H &= Ae\sigma T^4 \\ &= (1.20 \text{ m}^2)(1)(5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4)(303 \text{ K})^4 = 574 \text{ W} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{净辐射速率 } H_{\text{net}} &= Ae\sigma(T^4 - T_s^4) \\ &= (1.20 \text{ m}^2)(1)(5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4)[(303 \text{ K})^4 - (293 \text{ K})^4] \\ &= 72 \text{ W} \end{aligned}$$

天体辐射



宇宙的演化



Homework

1. “28”自行车车轮直径为71.12cm(相当于28英寸),内胎截面直径为3cm, 在-3°C的天气里向空胎里打气。打气筒长 30cm,截面半径1.5cm。打了20下,气打足了,问此时车胎内压强是多少?设车胎内最后气体温度为7°C。
2. 一个大热气球的容积为 $2.1 \times 10^4 \text{m}^3$,气球本身和负载质量共 $4.5 \times 10^3 \text{kg}$,若其外部空气温度为20°C,要想使气球上升,其内部空气最低要加热到多少度?
3. You are making pesto for your pasta and have a cylindrical measuring cup 10.0 cm high made of ordinary glass [$\beta = 2.7 \times 10^{-5} (\text{C}^\circ)^{-1}$] that is filled with olive oil [$\beta = 6.8 \times 10^{-4} (\text{C}^\circ)^{-1}$] to a height of 3.00 mm below the top of the cup. Initially, the cup and oil are at room temperature (22.0°C). You get a phone call and forget about the olive oil, which you inadvertently leave on the hot stove. The cup and oil heat up slowly and have a common temperature. At what temperature will the olive oil start to spill out of the cup?

Homework

4. A copper sphere with density 8900 kg/m^3 , radius 5.00 cm , and emissivity $e = 1.00$ sits on an insulated stand. The initial temperature of the sphere is 300 K . The surroundings are very cold, so the rate of absorption of heat by the sphere can be neglected. (a) How long does it take the sphere to cool by 1.00 K due to its radiation of heat energy? Neglect the change in heat current as the temperature decreases. (b) To assess the accuracy of the approximation used in part (a), what is the fractional change in the heat current H when the temperature changes from 300 K to 299 K ?

Homework

5. A metal wire, with density ρ and Young's modulus Y , is stretched between rigid supports. At temperature T , the speed of a transverse wave is found to be v_1 . When the temperature is increased to $T + \Delta T$, the speed decreases to $v_2 < v_1$. Determine the coefficient of linear expansion of the wire.

6. The molar heat capacity of a certain substance varies with temperature according to the empirical equation

$$C = 29.5 \text{ J/mol} \cdot \text{K} + (8.20 \times 10^{-3} \text{ J/mol} \cdot \text{K}^2)T$$

How much heat is necessary to change the temperature of 3.00 mol of this substance from 27°C to 227°C ? (*Hint:* Use Eq. (17.18) in the form $dQ = nC dT$ and integrate.)