目录
能源物理是一门什么课程
能量
能量守恒
热力学第一定律
温度
比热容
潜热
效率
传热

能源物理

第一讲: 能量与能量守恒

作者　马红孺

上海交通大学大学　机械与动力学院

November 18, 2017

目录

1. 能源物理是一门什么课程
2. 能量
3. 能量守恒
4. 热力学第一定律
5. 温度
6. 比热容
7. 潜热
8. 效率
9. 传热

目录
能源物理是一门什么课程
能量
能量守恒
热力学第一定律
温度
比热容
潜热
效率
传热

目录
能源物理是一门什么课程
能量
能量守恒
热力学第一定律
温度
比热容
潜热
效率
传热

课程说明

- 不点名，不许迟到
- 成绩构成：课堂随机测验 + 大作业 + 考试
- 教师联系方式：hrma@sjtu.edu.cn; 手机：15900411483; QQ：1504585098

目录
能源物理是一门什么课程
能量
能量守恒
热力学第一定律
温度
比热容
潜热
效率
传热

能源物理

- 能源很重要，物理很基础

第 42 卷 第 3 期
2008 年 3 月
上 海 交 通 大 学 学 报
JOURNAL OF SHANGHAI JIAOTONG UNIVERSITY
Vol. 42 No. 3
Mar. 2008

文章编号：1006-2467(2008)03-0345-15

对 中 国 能 源 问 题 的 思 考

江 泽 民

- 物理学工作者眼中的能源
- 公民应该了解的能源和物理

目录
能源物理是一门什么课程
能量
能量守恒
热力学第一定律
温度
比热容
潜热
效率
传热

能源物理是一门什么课程

能源：

其它热词：“雾霾”，“能源危机”，“气候变暖”，“辐射”，…

我们的观点？依据？

目录
能源物理是一门什么课程
能量
能量守恒
热力学第一定律
温度
比热容
潜热
效率
传热

参考材料

1. Physics and Technology for Future Presidents, Richard A. Muller, PRINCETON UNIVERSITY PRESS (2010）
2. Sustainable Energy —without the hot air, David JC MacKay, www.withouthotair.com

目录
能源物理是一门什么课程
能量
能量守恒
热力学第一定律
温度
比热容
潜热
效率
传热

能量

能量是做功的本领。

目录
能源物理是一门什么课程
能量
能量守恒
热力学第一定律
温度
比热容
潜热
效率
传热

能量

能量是做功的本领。

能量是任何最终可以转化为热的东西。

目录
能源物理是一门什么课程
能量
能量守恒
热力学第一定律
温度
比热容
潜热
效率
传热

能量

能量是做功的本领。

能量是任何最终可以转化为热的东西。

功，热量?

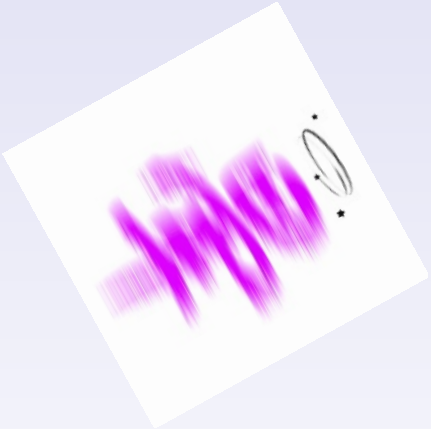
目录
能源物理是一门什么课程
能量
能量守恒
热力学第一定律
温度
比热容
潜热
效率
传热

能量

能量是做功的本领。

能量是任何最终可以转化为热的东西。

功，热量?



能量分为机械能，化学能，电能，核能，... ...

目录
能源物理是一门什么课程
能量
能量守恒
热力学第一定律
温度
比热容
潜热
效率
传热

机械能：动能

动能

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2$$

质量的单位是千克 (kg)

$[m] = kg$

速度的单位是每秒米 (m/s)

$[v] = m/s$

$[E_k] = kg\frac{m^2}{s^2}$ 这个单位称为焦耳，Joule, 简称焦（J）

目录
能源物理是一门什么课程
能量
能量守恒
热力学第一定律
温度
比热容
潜热
效率
传热

机械能：动能

动能

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2$$

质量的单位是千克 (kg)

$[m] = kg$

速度的单位是每秒米 (m/s)

$[v] = m/s$

$[E_k] = kg\frac{m^2}{s^2}$ 这个单位称为焦耳，Joule, 简称焦（J）

目录
能源物理是一门什么课程
能量
能量守恒
热力学第一定律
温度
比热容
潜热
效率
传热

焦耳

1 焦耳的能量 =?

目录
能源物理是一门什么课程
能量
能量守恒
热力学第一定律
温度
比热容
潜热
效率
传热

焦耳

1 焦耳的能量 =?

一个 2kg 的质量以每秒 1 米的速度运动时具有的动能；0.003g 冰熔化所需的能量。熔化 1g 冰需要大约 300 焦耳能量。

目录
能源物理是一门什么课程
能量
能量守恒
热力学第一定律
温度
比热容
潜热
效率
传热

机械能：势能

势能
重力势能：

$$E_p = mgh$$

弹性势能：

$$E_p = \frac{1}{2}kx^2$$

目录
能源物理是一门什么课程
能量
能量守恒
热力学第一定律
温度
比热容
潜热
效率
传热

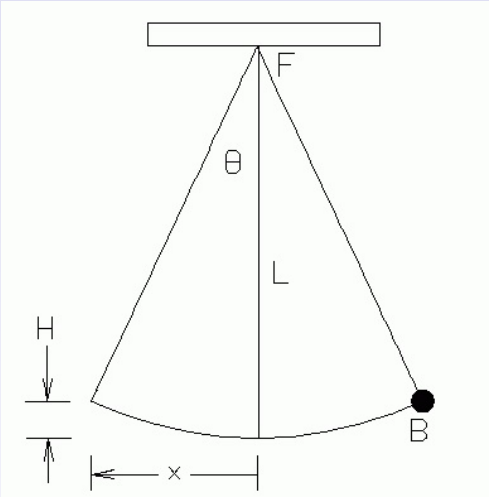
机械能守恒

单摆，在高点，速度为 0，动能为 0，势能 mgh

在低点，速度为 v, 动能 $\frac{1}{2}mv^2$, 势能 0

理论 (牛顿第二定律), 和实验 (伽利略, ...) 均表明

$$\frac{1}{2}mv^2 = mgh$$



在运动的过程中

$$\frac{1}{2}mv^2 + mgz = mgh$$

目录
能源物理是一门什么课程
能量
能量守恒
热力学第一定律
温度
比热容
潜热
效率
传热

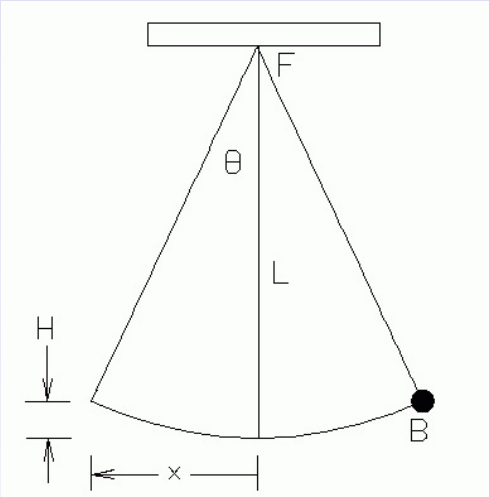
机械能守恒

单摆，在高点，速度为 0，动能为 0，势能 mgh

在低点，速度为 v, 动能 $\frac{1}{2}mv^2$, 势能 0

理论 (牛顿第二定律), 和实验 (伽利略, ...) 均表明

$$\frac{1}{2}mv^2 = mgh$$



在运动的过程中

$$\frac{1}{2}mv^2 + mgz = mgh$$

目录
能源物理是一门什么课程
能量
能量守恒
热力学第一定律
温度
比热容
潜热
效率
传热

根据直觉，下面的能量按照从大到小的次序排序，哪一个更接近正确。A, 步枪子弹的动能；B，50g 冰溶化为水所需的能量；C，普通轿车行驶 1 分钟；D，从 3 层楼掉下来的铅球。

1. A > B > C > D
2. C > B > D > A
3. B > C > D > A
4. D > B > A > C

目录
能源物理是一门什么课程
能量
能量守恒
热力学第一定律
温度
比热容
潜热
效率
传热

电磁能

电能是最常见，最有用的能量之一。根据麦克斯韦电磁理论，电场和磁场均具有能量，电场的能量密度 (单位体积的能量) 与电场强度的平方成正比，磁场的能量密度与磁感应强度的平方成正比，在有电场和磁场存在的情况下，电磁场的能量密度为

$$\rho_{\mathrm{E}} = \frac{1}{2}\left(\epsilon_0 \vec{\mathrm{E}}^2 + \frac{1}{\mu_0}\vec{\mathrm{B}}^2\right)$$

式中 $\vec{\mathrm{E}}$ 和 $\vec{\mathrm{B}}$ 分别为电场强度和磁感应强度，$\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}\mathrm{F/m}$ 为真空的介电常数，单位是法拉/米 (F/m); $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}\mathrm{H/m}$ 为真空磁导率，单位是亨利/米 (H/m) 。真空中的光速由与这两个参数之间的关系是：

$$\mathrm{c}^2 = \frac{1}{\epsilon_0 \mu_0}$$

目录
能源物理是一门什么课程
能量
能量守恒
热力学第一定律
温度
比热容
潜热
效率
传热

电磁能

电磁场的能量可以流动，其能流密度由坡印亭矢量给出，用 $\vec{S}$ 表示

$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H}$$

式中 $\vec{H}$ 是磁场强度。

作为能源的电能通常有两类，一类是储存在电网中的交流电动势，另一类是用化学方法储存的直流电动势，即电池。

目录
能源物理是一门什么课程
能量
能量守恒
热力学第一定律
温度
比热容
潜热
效率
传热

能量守恒

其它形式的能量：热，... ...

能量的一个一般的图像：　　无！

能量是一个抽象的概念，可以处于不同的形式，不能产生和消失，只能在各种形式之间转变，在转变过程中其总量不变。

一个给定的孤立系统，其能量为

$$E = mc^2$$

m 是系统的质量，c 是真空中的光速。

能量守恒定律是自然界最重要的定律之一，到目前为止，它是精确的，没有任何例外。

目录
能源物理是一门什么课程
能量
能量守恒
热力学第一定律
温度
比热容
潜热
效率
传热

热力学第一定律

热力学第一定律或许是物理学中最精确成立的很少的几个基本定律之一。

热力学定律就是能量的守恒和转化定律。

目录
能源物理是一门什么课程
能量
能量守恒
热力学第一定律
温度
比热容
潜热
效率
传热

热力学第一定律

热力学第一定律或许是物理学中最精确成立的很少的几个基本定律之一。

热力学定律就是能量的守恒和转化定律。

热能

宏观：由于温度差而传递的能量 Q

微观：分子运动的动能的平均值 $\langle \frac{1}{2}mv^2 \rangle$,

$$\langle \frac{1}{2}mv^2 \rangle = \frac{3}{2}kT$$

$$k = 1.3 \times 10^{-23} J/K$$

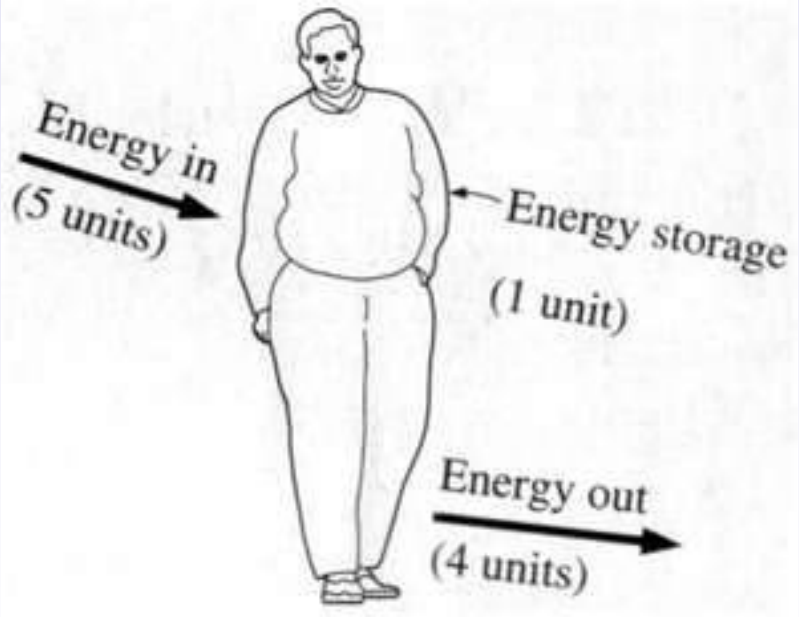
目录
能源物理是一门什么课程
能量
能量守恒
热力学第一定律
温度
比热容
潜热
效率
传热

热力学第一定律

数学表示

$$\Delta U = Q + W$$

其中 Q 是对系统传入的能量，W 是对系统做的功，ΔU 是系统内能的改变。



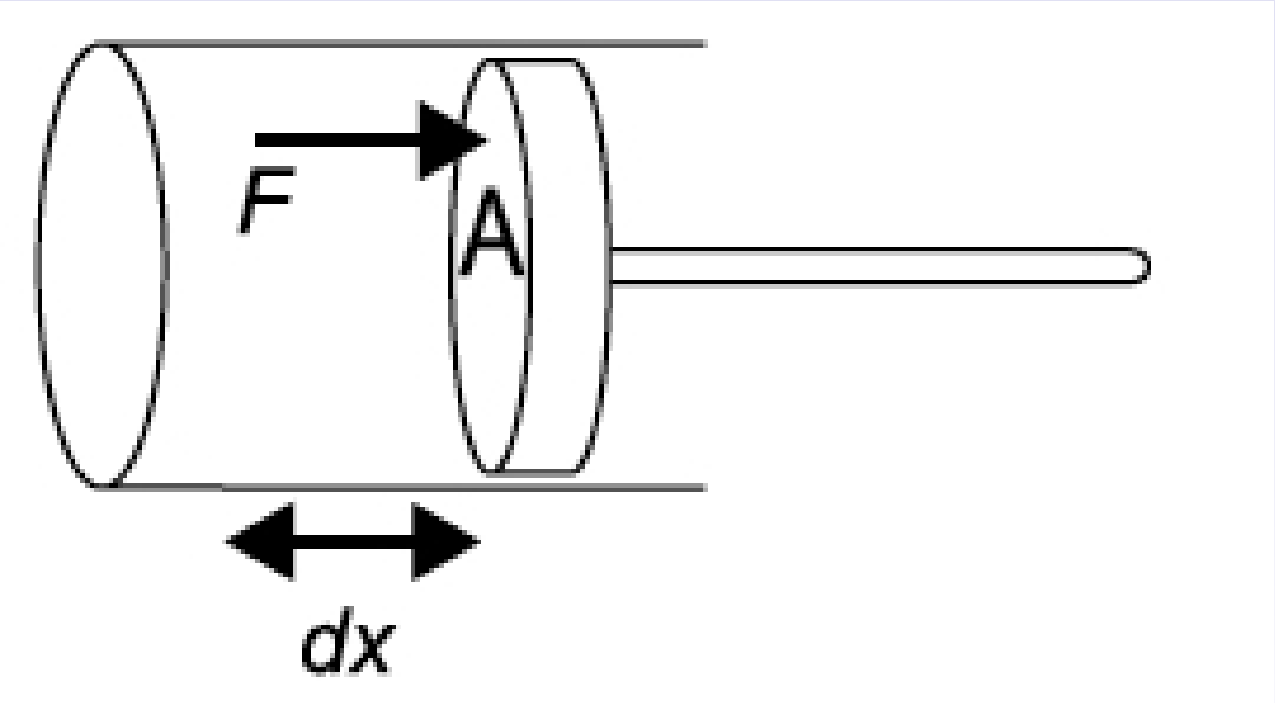
目录
能源物理是一门什么课程
能量
能量守恒
热力学第一定律
温度
比热容
潜热
效率
传热

热力学第一定律

体积功

机械功：$W = \int_{x_i}^{x_j} \vec{F} \cdot d\vec{r}$

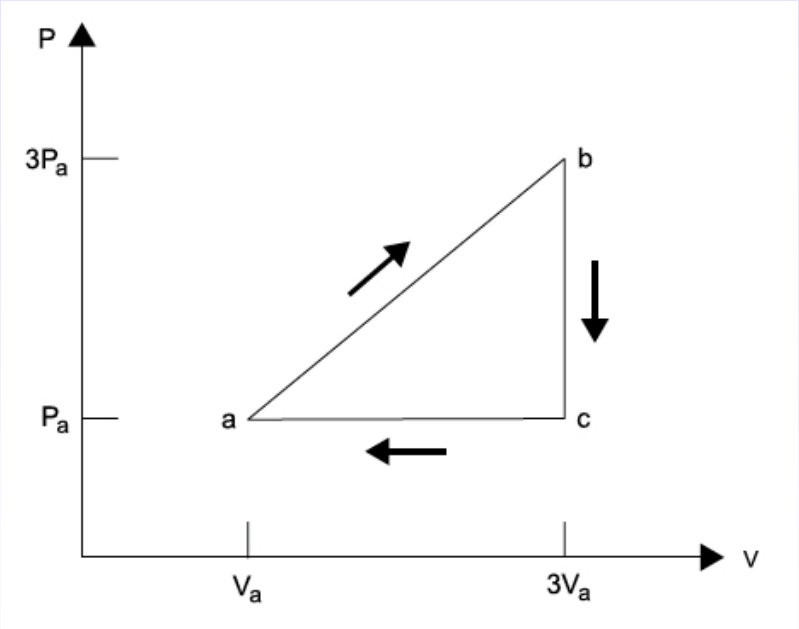
压力功：$W = -\int_{V_i}^{V_j} PdV$



目录
能源物理是一门什么课程
能量
能量守恒
热力学第一定律
温度
比热容
潜热
效率
传热

热力学第一定律: 例题

设想一个简单的热机经历如图所示循环，循环物质是理想气体。$P_a = 100\text{kPa}$, $V_a = 1.00\text{L}$ ($1\text{L} = 10^{-3}\text{m}^3$.) 在 b 点的压强和体积均为 a 点的三倍。从 $a \to b$ 吸热 420J，$b \to c$ 放热 160J, 求每一步做的功，内能的改变以及 $c \to a$ 的热传递。



目录
能源物理是一门什么课程
能量
能量守恒
热力学第一定律
温度
比热容
潜热
效率
传热

热力学第一定律: 例题

解： $W_{a\to b} = -100\text{kPa}\times 2\times 10^{-3}\text{m}^3 - \frac{1}{2}200\text{kPa}\times 2\times 10^{-3}\text{m}^3 = -400\text{J}$, 负号表示系统对外做功。

$$W_{b\to c} = 0, \quad W_{c\to a} = 200\text{J}.$$

$$\Delta U_{ba} = Q_{a\to b} + W_{a\to b} = 420\text{J} - 400\text{J} = 20\text{J},$$

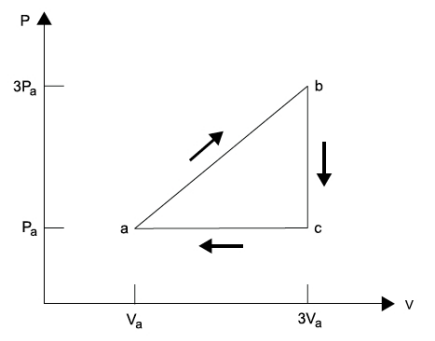
$\Delta U_{cb} = -160\text{J}$, 因

$$\Delta U_{ba} + \Delta U_{cb} + \Delta U_{ac} = 0, \quad \Delta U_{ac} = 140\text{J}$$

$$Q_{c\to a} = \Delta U_{ac} - W_{c\to a} = 140\text{J} - 200\text{J} = -60\text{J},$$

负号表明对外放热。

整个循环中，对外做功 200J, 吸热 420J, 放热 220J.



目录
能源物理是一门什么课程
能量
能量守恒
热力学第一定律
温度
比热容
潜热
效率
传热

温度

温度是反映冷热程度的量。

经验温标：摄氏，华氏，等

绝对温标，或开尔文温标 T：0K 是最低温度

$$0\mathrm{K} = -273.15^{\circ}\mathrm{C}$$

微观意义：

$$\frac{3}{2}kT = \langle \frac{1}{2}mv^2 \rangle$$

温度的定义（基于统计热力学）

$$T = \left(\frac{\partial U}{\partial S}\right)_V$$

即恒定体积下内能随熵的变化率。

目录
能源物理是一门什么课程
能量
能量守恒
热力学第一定律
温度
比热容
潜热
效率
传热

两个线性定标的温度计，一个是水银温度计，另一个是酒精温度计，二者的测量范围都是 0°C 到 50°C，对于同一物体，二个温度计测出的温度是否相同？

1，一定相同　　2，不相同

用绝对温标，0K 是最低温度。有没有可能出现绝对温标下的负温度？为什么

1，有　　2，没有

目录
能源物理是一门什么课程
能量
能量守恒
热力学第一定律
温度
比热容
潜热
效率
传热

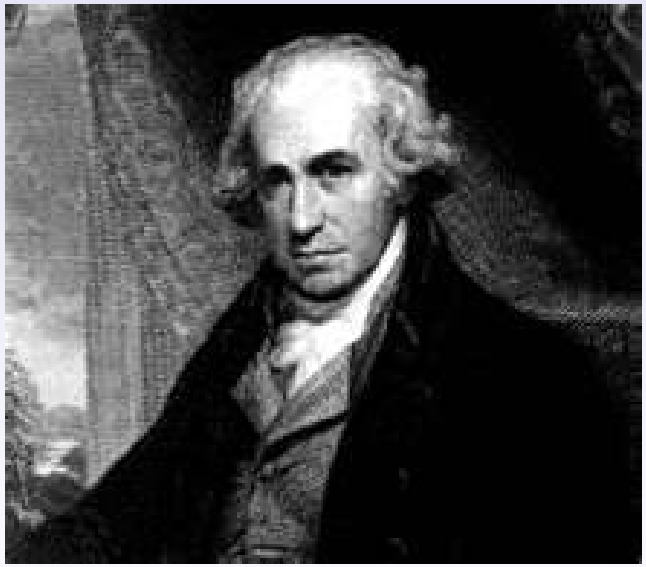
功率

功率是能量使用的速率。或单位时间做的功。

$$P = \frac{dW}{dt}$$

单位是瓦特 ($W = J/s$)

另一个已经基本不用了的单位是马力，一马力大约 750W.



目录
能源物理是一门什么课程
能量
能量守恒
热力学第一定律
温度
比热容
潜热
效率
传热

比热容

物体的温度变化 ΔT, 需要吸收的热量为 Q, 当 ΔT 很小时

$$Q = mC\Delta T$$

m 是质量，C 定义为物质的比热容。

比热容与加热的方式有关，也与温度有关。

对于气体，定压比热与定容比热有较大差别，对于固体和液体，二者差别不大。

目录
能源物理是一门什么课程
能量
能量守恒
热力学第一定律
温度
比热容
潜热
效率
传热

潜热

相变过程中吸收的热量。

$$Q = mL$$

固液相变：冰的融化，$L = 334\mathrm{kJ/kg}$

气液相变：水的汽化，$L = 2260\mathrm{kJ/kg}$

目录
能源物理是一门什么课程
能量
能量守恒
热力学第一定律
温度
比热容
潜热
效率
传热

潜热

相变过程中吸收的热量。

$$Q = mL$$

固液相变：冰的融化，$L = 334\mathrm{kJ/kg}$

气液相变：水的汽化，$L = 2260\mathrm{kJ/kg}$

1，跑步 1 小时，出汗 0.5 升。需多少能量汽化这些水？对应的功率是多少？

2，试估算，你走上五楼需要消耗多少能量？

1. 100–200 J
2. 1000 – 2000 J
3. 375 J
4. 10-50 kJ

目录
能源物理是一门什么课程
能量
能量守恒
热力学第一定律
温度
比热容
潜热
效率
传热

效率

对于一个循环过程，如果吸收的能量为 Q_H，对外做功 W，效率定义为

$$\eta = \frac{W}{Q_H}$$

热力学第一定律，效率最大 100%

目录
能源物理是一门什么课程
能量
能量守恒
热力学第一定律
温度
比热容
潜热
效率
传热

传热

传热通常有三种方式：传导，对流和辐射

传导

均质板, 单位时间热量传输

$$\frac{dQ}{dt} = k\frac{A\Delta T}{L}$$

k 是热传导系数，A 是板的面积，L 是板的厚度。

一般

$$\vec{j} = k\nabla T$$

目录
能源物理是一门什么课程
能量
能量守恒
热力学第一定律
温度
比热容
潜热
效率
传热

传热

对流

由流体通过流动带走热量的传热方式，这种过程涉及流体的流动，比较复杂，不再详细讨论。

辐射

任何物质都会以热辐射的方式发射电磁波，也吸收电磁波。辐射的功率和吸收的功率是

$$\frac{\mathrm{dQ}}{\mathrm{dt}} = \varepsilon\sigma \mathrm{AT}^4$$

$\sigma = 5.67\mathrm{W/m^2/K^4}$ 是斯特潘-玻尔兹曼常数，A 是面积，$\varepsilon \leq 1$ 是一个与物质表面的性质有关的系数，对于黑体，$\varepsilon = 1$.

目录
能源物理是一门什么课程
能量
能量守恒
热力学第一定律
温度
比热容
潜热
效率
传热

传热

例题：室内温度 20°C，计算人在室内的辐射功率。

人的体表温度大约 35°C，表面积大约 $1.5\mathrm{m}^2$，$\varepsilon = 0.5$，辐射的功率和吸收的功率之差为净辐射功率

$$\mathrm{P} = 0.5 \times 5.7 \times 10^{-8} \times 1.5 \times \left(308^4 - 293^4\right) = 55\mathrm{W}$$

目录
能源物理是一门什么课程
能量
能量守恒
热力学第一定律
温度
比热容
潜热
效率
传热

传热

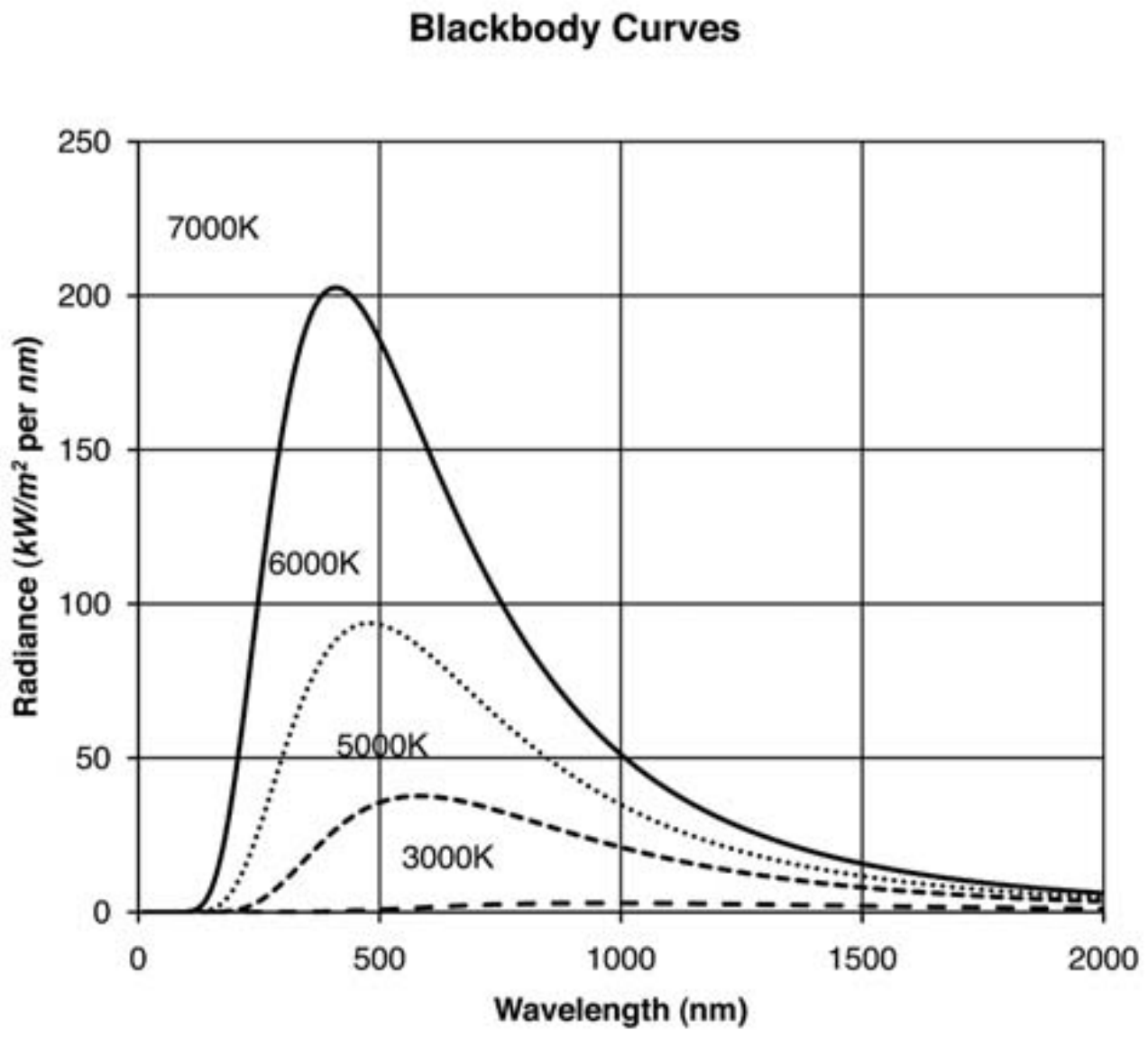
每种波长的辐射是不同的，普朗克发现，单位面积，单位波长的辐射功率是

$$I(T,\lambda) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5\left(e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1\right)}$$

辐射极大出现在 $\lambda_{\mathsf{max}} = \frac{2.9\times10^{-3}}{T}$ 处。人体辐射的极大对应的波长是 $\lambda_{\mathsf{max}} = \frac{2.9}{308}\times10^{-3}\mathrm{m} = 9\times10^{-6}\mathrm{m}$

传热

目录
能源物理是一门什么课程
能量
能量守恒
热力学第一定律
温度
比热容
潜热
效率
传热

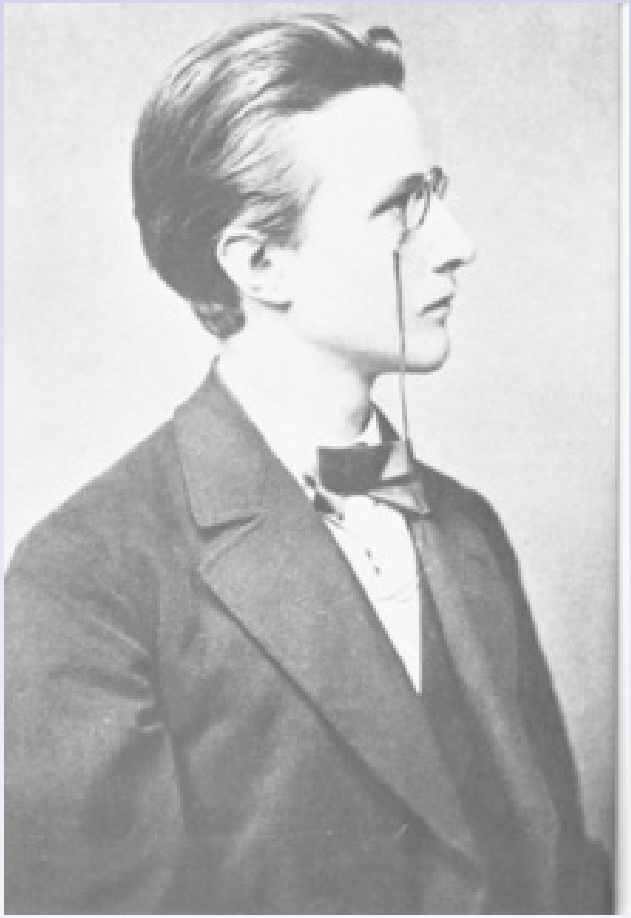


目录
能源物理是一门什么课程
能量
能量守恒
热力学第一定律
温度
比热容
潜热
效率
传热

普朗克，量子论

1900 年，普朗克导出黑体辐射的公式，量子论诞生！

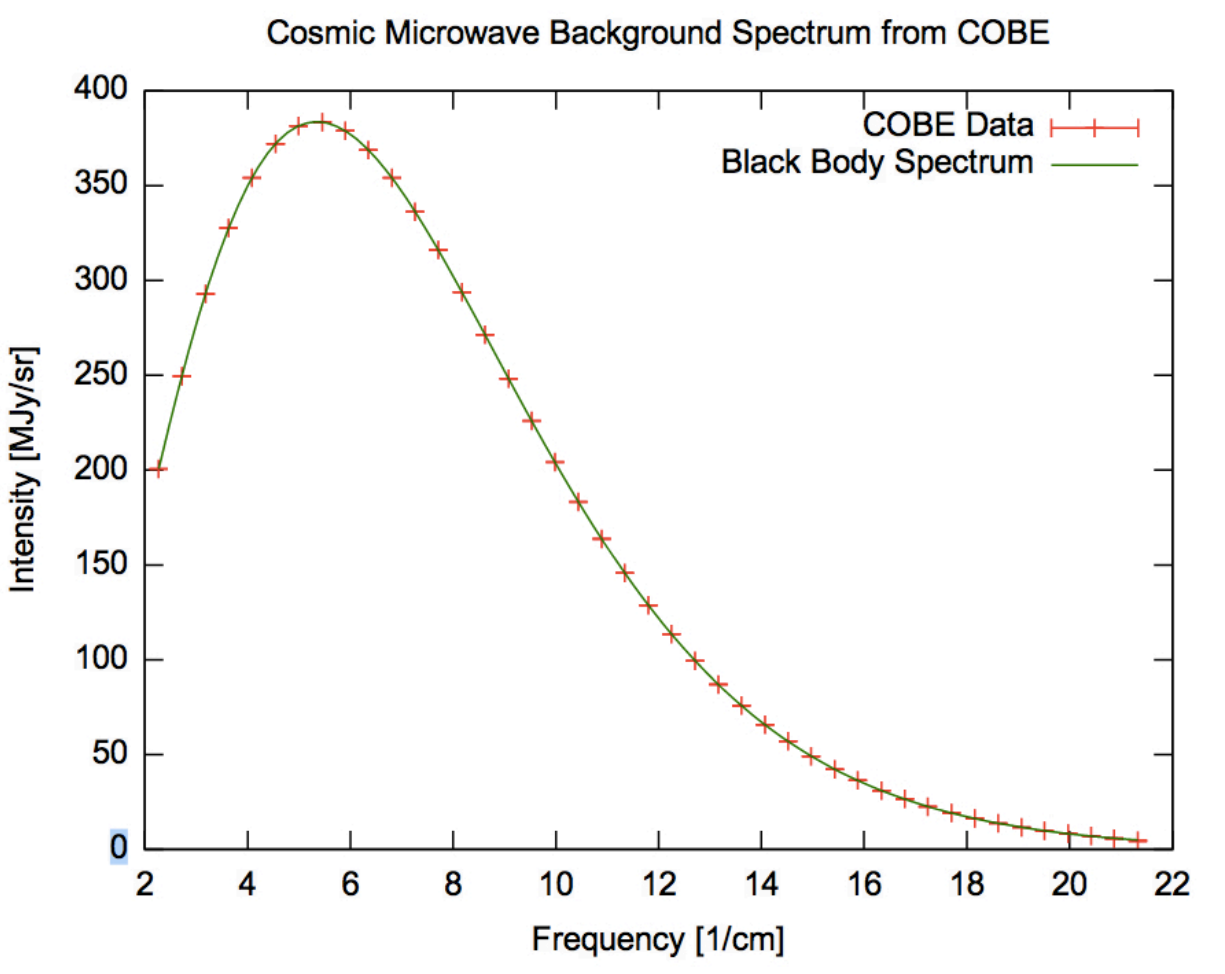
核能，太阳能光伏，… …



普朗克，1878

目录
能源物理是一门什么课程
能量
能量守恒
热力学第一定律
温度
比热容
潜热
效率
传热

宇宙背景辐射



最精确的黑体辐射谱。

$$2.72548 \pm 0.00057\mathrm{K}$$