

§ 2-7 磁介质的热力学理论

外部磁场使磁介质磁化的功：

$$\begin{aligned} dW &= \mu_0 V H dM \\ &= \mu_0 H dm, \text{ 其中 } m = V \times M \end{aligned}$$

一、忽略磁介质体积变化

1、磁介质的热力学基本方程： $dU = TdS - \underline{pdV}$

$$dU = TdS + \underline{\mu_0 H dm}$$

类似地定义磁介质的吉布斯函数：

$$G = U - TS - \mu_0 H m$$



可得G的全微分为 $dG = -SdT - \mu_0 m dH$

2、磁介质麦氏关系 $\left(\frac{\partial S}{\partial H}\right)_T = \mu_0 \left(\frac{\partial m}{\partial T}\right)_H$

3、TdS方程 $S=S(T,H)$, 有

$$T dS = T \left(\frac{\partial S}{\partial T}\right)_H dT + \left(\frac{\partial S}{\partial H}\right)_T dH$$

根据公式 $dQ=TdS$, 可得在磁场不变时磁介质的热容量 C_H 为

$$C_H = T \left(\frac{\partial S}{\partial T}\right)_H$$

$$T dS = T \left(\frac{\partial S}{\partial T}\right)_H dT + \mu_0 \left(\frac{\partial m}{\partial T}\right)_H dH$$



4、绝热去磁

$$\left(\frac{\partial S}{\partial T}\right)_H \left(\frac{\partial T}{\partial H}\right)_S \left(\frac{\partial H}{\partial S}\right)_T = -1$$

$$\left(\frac{\partial T}{\partial H}\right)_S = -\left(\frac{\partial S}{\partial H}\right)_T \left(\frac{\partial T}{\partial S}\right)_H$$

$$\left(\frac{\partial T}{\partial H}\right)_S = -\frac{T\mu_0}{C_H} \left(\frac{\partial m}{\partial T}\right)_H$$

若磁介质遵守“居里定律”：

$$\mathbf{m} = \frac{C V}{T} \mathbf{H}$$



则有：

$$\left(\frac{\partial T}{\partial H} \right)_S = \frac{C_V}{C_H T} \mu_0 H$$

→

$$\left(\frac{\partial T}{\partial H} \right)_S > 0$$

所以，在绝热(等熵)条件下，
降低磁场，可使温度降低。

“绝热去磁致冷”是获得 1K 以下低温的有效方法

二、考虑磁介质体积的变化

热力学基本微分方程应为： $dU = TdS - pdV + \mu_0 H dm$

吉布斯函数为 $G = U - TS + pV - \mu_0 H m$

$$dG = -SdT + Vdp - \mu_0 m dH$$

$$S = -\left(\frac{\partial G}{\partial T}\right)_{H,p} \quad V = -\left(\frac{\partial G}{\partial p}\right)_{H,T} \quad \mu_0 m = -\left(\frac{\partial G}{\partial H}\right)_{T,p}$$

$$-\mu_0 \left(\frac{\partial m}{\partial p}\right)_{T,H} = \left(\frac{\partial}{\partial p} \left(\frac{\partial G}{\partial H}\right)_{T,p}\right)_{T,H}$$



$$-\mu_0 \left(\frac{\partial m}{\partial p} \right)_{T,H} = \left(\frac{\partial}{\partial p} \left(\frac{\partial G}{\partial H} \right)_{T,p} \right)_{T,H}$$

$$-\mu_0 \left(\frac{\partial m}{\partial p} \right)_{T,H} = \left(\frac{\partial}{\partial H} \left(\frac{\partial G}{\partial p} \right)_{T,H} \right)_{T,p}$$

$$V = - \left(\frac{\partial G}{\partial p} \right)_{H,T}$$

$$\left(\frac{\partial V}{\partial H} \right)_{T,p} = - \left(\frac{\partial}{\partial H} \left(\frac{\partial G}{\partial p} \right)_{H,T} \right)_{T,p}$$

磁介质麦氏关系

$$\left(\frac{\partial V}{\partial H} \right)_{T,p} = -\mu_0 \left(\frac{\partial m}{\partial p} \right)_{T,H}$$

磁致伸
缩效应

压磁效应

在温度和压力保
持不变时体积随
磁场的变化率

在温度和磁场不变
时介质磁矩随压强
的变化率

二种效应是某些
传感器的工作原理

已知顺磁物质的磁化强度 M 为： $M = \frac{C}{T}H$ (居里定律)

若维持温度不变，使磁场由0增至 H ，求磁化热。

解： $dQ = TdS$ 在维持 T 不变的条件下

$$Q = \int TdS = T \cdot \Delta S \quad \left(\frac{\partial S}{\partial H} \right)_T = \mu_0 \left(\frac{\partial m}{\partial T} \right)_H$$

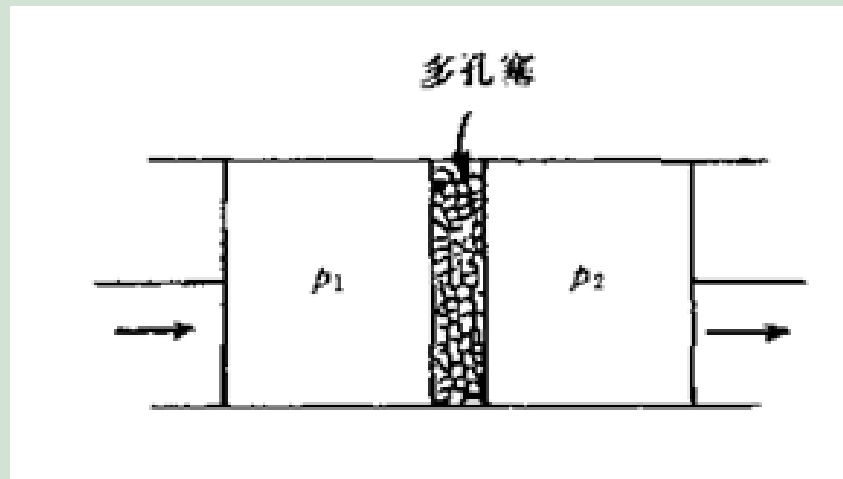
$$M = \frac{C}{T}H \quad \therefore \left(\frac{\partial m}{\partial T} \right)_H = -\frac{CV}{T^2}H \quad \therefore \left(\frac{\partial S}{\partial H} \right)_T = -\mu_0 \frac{CV}{T^2}H$$

$$Q = -\int_0^H \mu_0 V \frac{C}{T} H dH = -\frac{CV}{T} \frac{\mu_0 H^2}{2}$$

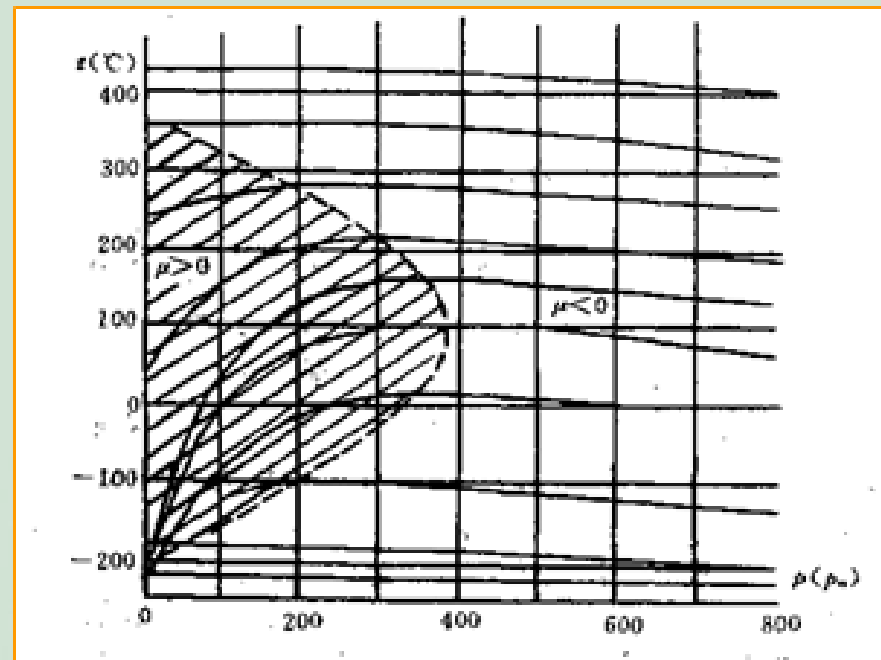


§ 2-8 低温的获得

1. 节流过程制冷



$$p_1 > p_2$$



$$\mu = \left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_H = \frac{1}{C_p} \left[T \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p - V \right] = \frac{V}{C_p} [T\alpha - 1]$$

优点 { 装置没有移动部分
一定压强降落下, 温度愈低所
获得的温度降落愈大

焦汤效应的典型大小: $10^{-1} \sim 1K \cdot P_n^{-1}$

缺点: 节流过程降温, 气体的初始温度必须低于反转温度

节流过程重复进行, 气体温度可到 T_c 以下

1895年林德用该方法实现空气的液化 称林德法

1898年杜瓦H₂液化, 1908年昂尼斯He液化



2. 气体绝热膨胀制冷

$$\left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_S = \frac{T}{C_P} \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P = \frac{VT\alpha}{C_P} > 0$$

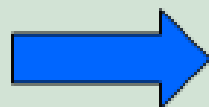
气体经绝热膨胀后温度总是降低的

优点:不必先预冷

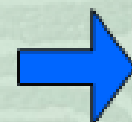
缺点:膨胀机会移动, 温度愈低降温效应愈小.

卡皮查综合降温法

绝热膨胀
使He降温到反
转温度以下

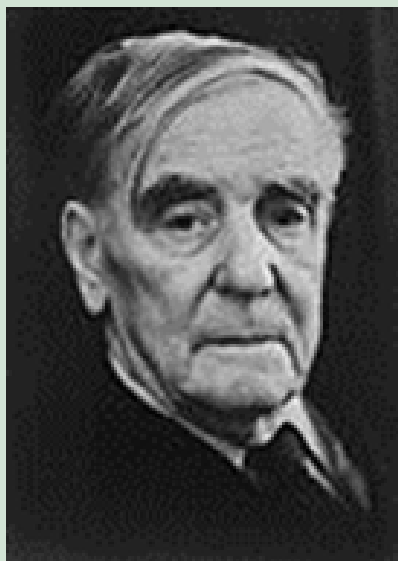


节流过程
He液化



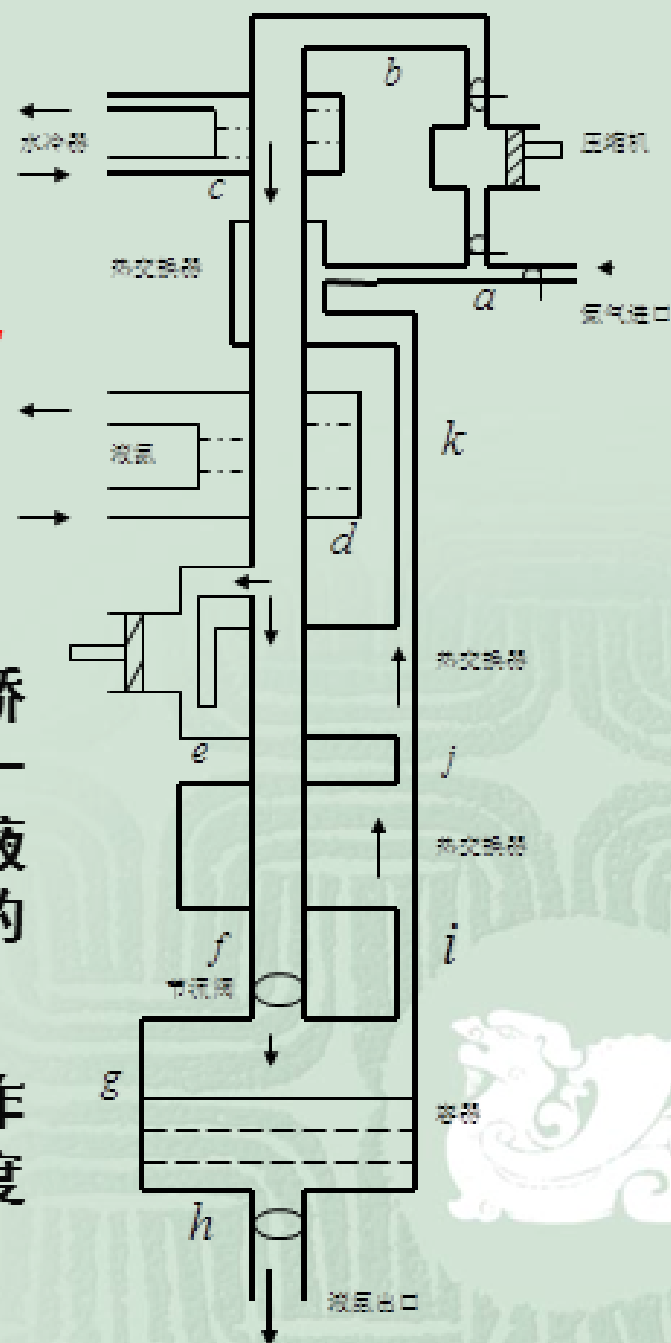
低至1K的低温





卡皮查液化机

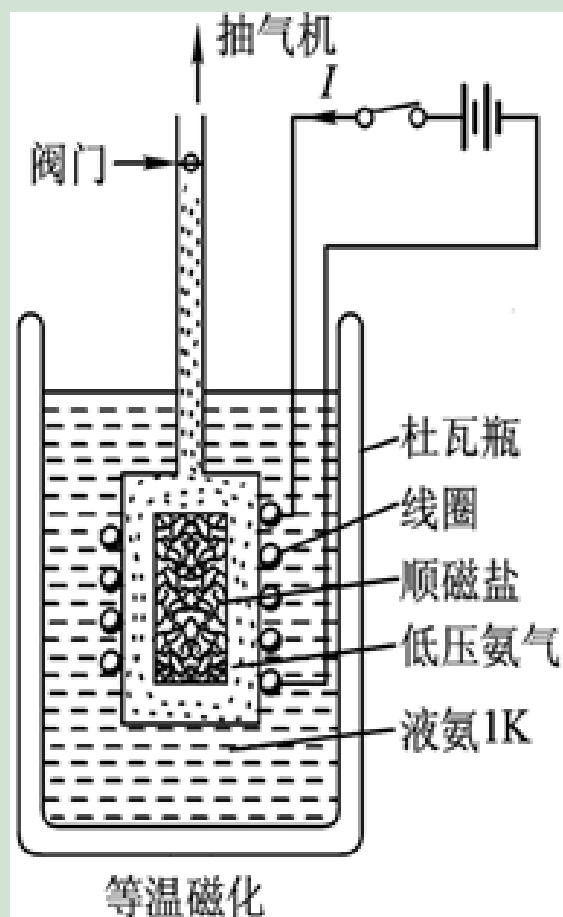
- 卡皮查被称为“低温物理之父”。最突出的贡献是1934年在英国剑桥大学蒙德实验室，制成了一台用一个膨胀机而不用液态氢予冷的氮液化器，成为全世界研究低温物理的仪器。
- 由于在低温物理的基础研究方面作出重大贡献，使他获得了1978年度诺贝尔物理学奖金的一半。



3. 磁冷却法

德拜1926年提出

在绝热过程中顺磁性固体的温度随磁场的减小而下降.

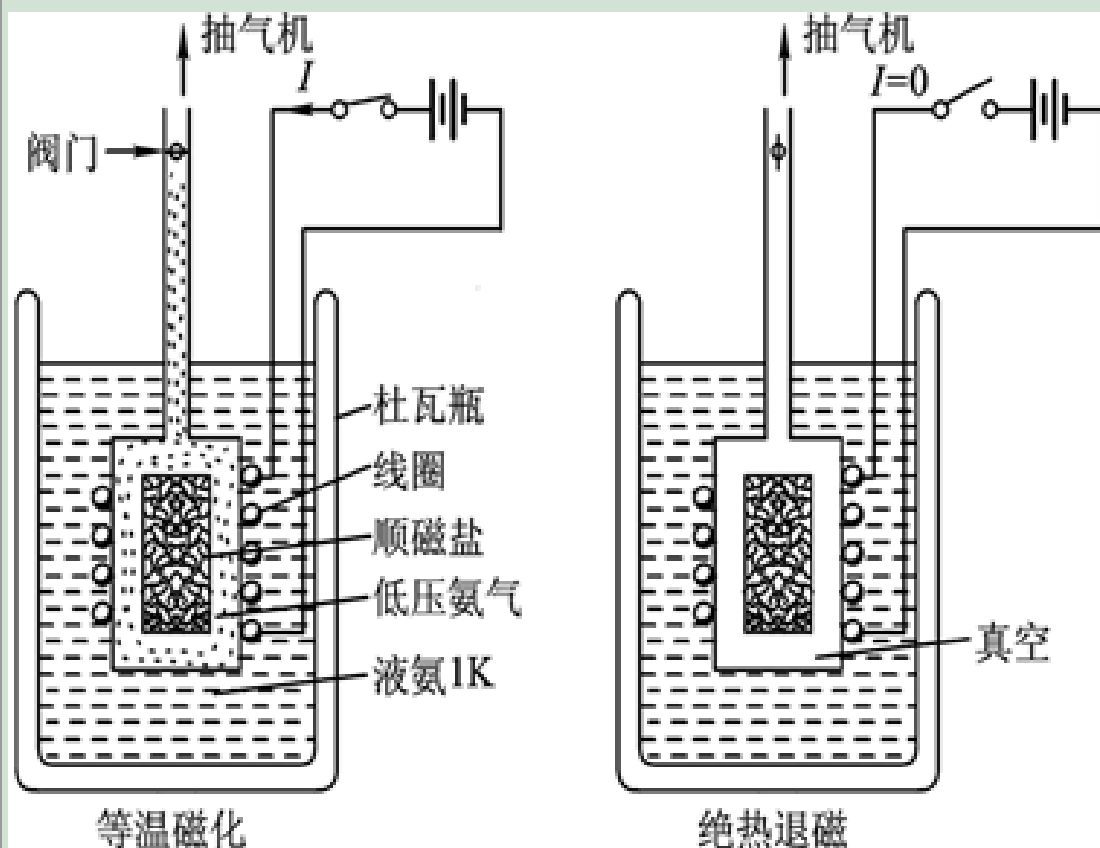


顺磁性固体样品放在装有低压氮气的容器内，通过低压氮气与液氮的接触而保持在1K左右的低温

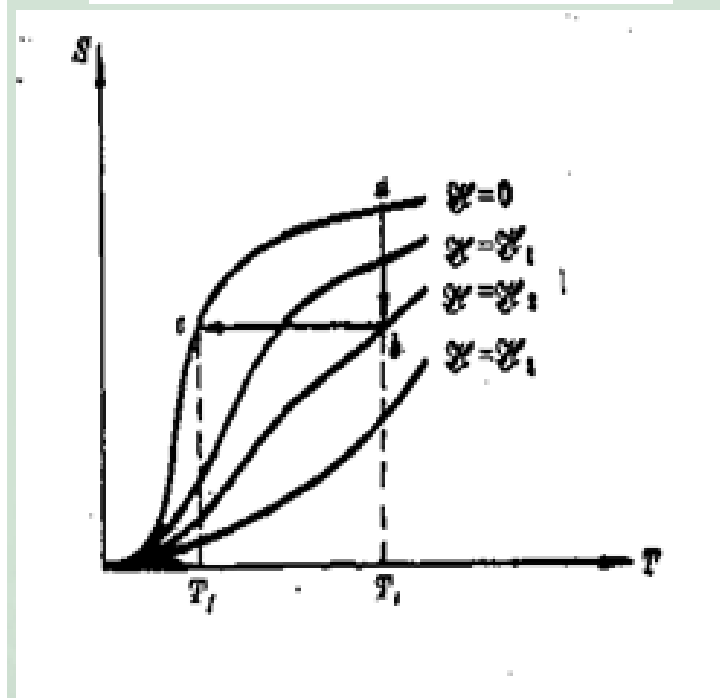
加 $10^6 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$ 磁场使顺磁体磁化，

磁化过程释出的热由液氮吸收，

从而保证磁化过程是等温的。



$$\left(\frac{\partial T}{\partial H} \right)_S = \frac{CV}{C_H T} \mu_0 H$$



顺磁体磁化后，抽去低压氮气而使顺磁体绝热，
然后准静态地使磁场减少（一般为零）。

1. 等温磁化 $a \rightarrow b$

2. 绝热去磁 $b \rightarrow c$

在这绝热去磁过程中，顺磁体的温度降低

4. 激光致冷

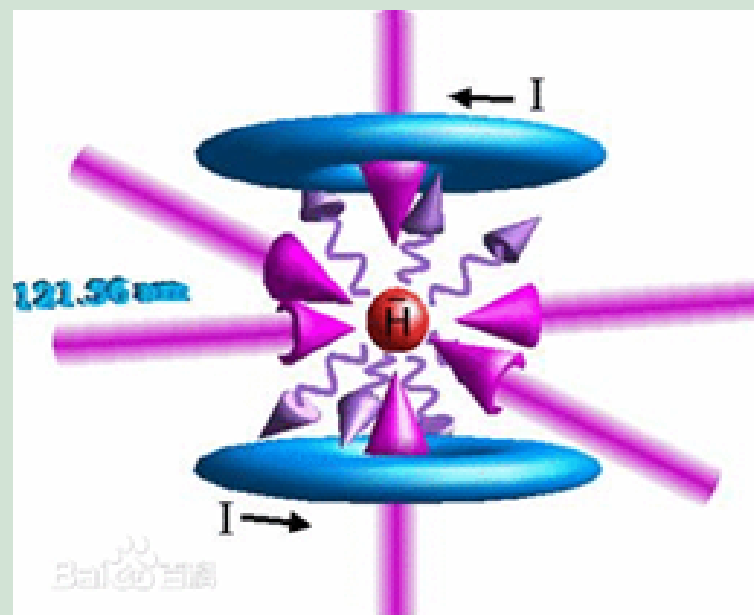
采用两束反向传播的激光照射中性原子，使一束激光与该中性原子运动相同，另一束激光与其运动方向相反，总的作用效果是使原子受到阻力。

若用3或6个相互垂直的反向传播激光束照射中性原子，可使其各方位的热运动被减慢而冷却。

可到170nk.

“光学粘胶”

因“发展了用激光冷却和捕获原子的方法”而获得1997年诺贝尔物理学奖



朱棣文

5. 稀释制冷法

1951年伦敦（F. London）提出

根据 ^4He 和 ^3He 混合液体的相变规律设计



获得低温的方法

