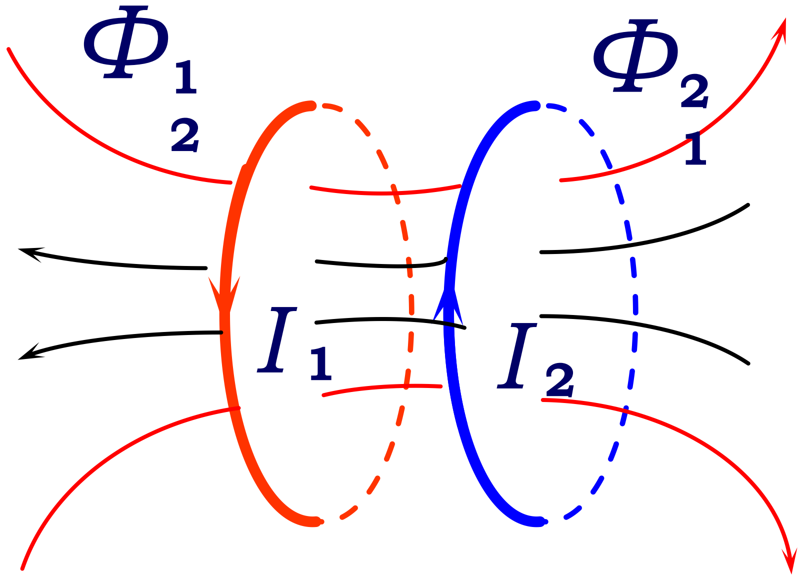
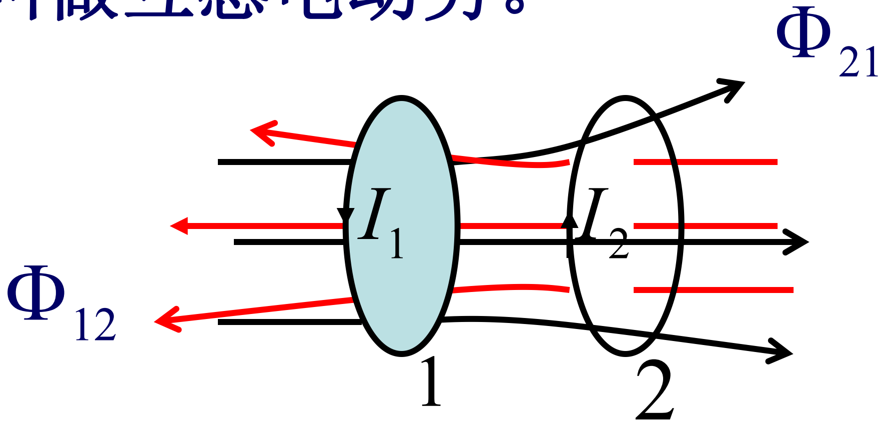
互感

互感应

　　两个线圈，当其中一个线圈的电流发生变化时，将引起穿过另一线圈的磁通量发生变化，从而在该线圈中产生感应电动势，这种现象称为互感现象（或互感）。



这种由一个回路中电流变化而在另一个回路中产生感应电动势的现象，叫做互感现象，这种感应电动势 ε 叫做互感电动势。



Φ_{21}为线圈1电流，对线圈2提供的磁通 $\Phi_{21}=M_{21}I_1$

Φ_{12}为线圈2电流，对线圈1提供的磁通 $\Phi_{12}=M_{12}I_2$

$M_{12}=M_{21}=M$ 为互感系数。（思考？）

由法拉第电磁感应定律得：

—— 回路2中的电流变化在回路1中产生的感应电动势

$$\varepsilon_{12} = -\frac{d\Phi_{12}}{dt} = -M\frac{dI_2}{dt} - I_2\frac{dM}{dt} = -M\frac{dI_2}{dt}$$

—— 回路1中的电流变化在回路2中产生的感应电动势

$$\Phi_{12} = MI_2$$

$$\varepsilon_{21} = -\frac{d\Phi_{21}}{dt} = -M\frac{dI_1}{dt}$$

说明：

负号表明，在一个线圈中所引起的互感电动势要反抗另一线圈中电流的变化.

关于互感的几点说明：

- 互感系数M是表征互感强弱的物理量，是两个　电路耦合程度的量度。
- M与两线圈的形状、大小、匝数、相对位置及周围磁介质的磁导率有关；而和电流的大小无关。

- 互感系数M在数值上等于其中一个线圈中的电流为单位一时，穿过另一个线圈所围面积的磁通量。

即：$I_1 = I_2 = 1,$　则$\Phi_{21} = \Phi_{12} = M$

互感现象预防和应用

互感在电工和电子技术中应用很广泛。通过互感线圈可以使能量或信号由一个线圈方便地传递到另一个线圈；利用互感现象的原理可制成变压器、感应圈等。

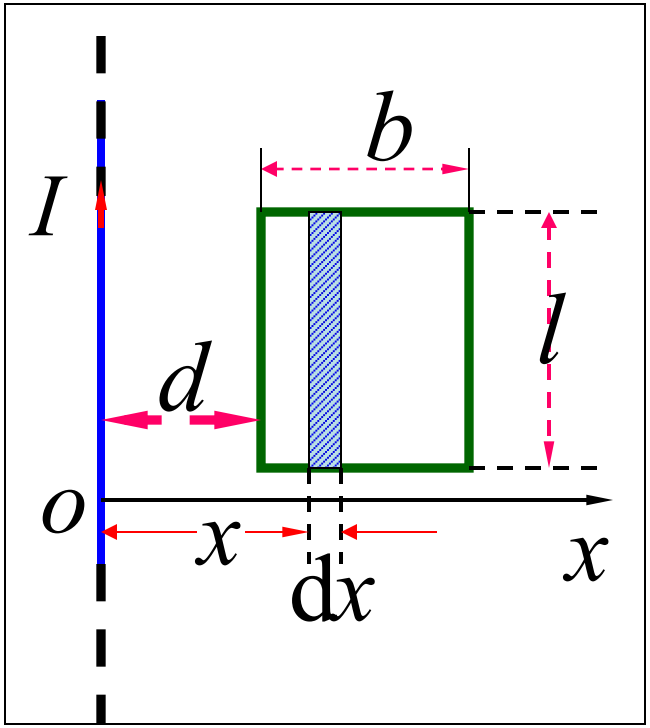
互感的害处：有线电话由于两路电话线之间的互感可能产生串音现象；收录机、电视机及电子设备中也会由于导线或部件间的互感而妨害正常工作。

计算互感系数

设I_1 $\longrightarrow$ I_1的磁场分布$\vec{B}_1$ $\longrightarrow$ 穿过回路2的ψ_{21}

$$\psi_{21} = N_2 \int_{S_2} \vec{B}_1 \cdot \mathrm{d}\vec{S}$$ $\longrightarrow$ 得 $$M = \frac{\psi_{21}}{I_1}$$

例　　在磁导率为 μ的均匀无限大的磁介质中，一无限长直导线与一宽长分别为b和l的矩形线圈共面，直导线与矩形线圈的一侧平行， 且相距为 d. 求二者的互感系数.

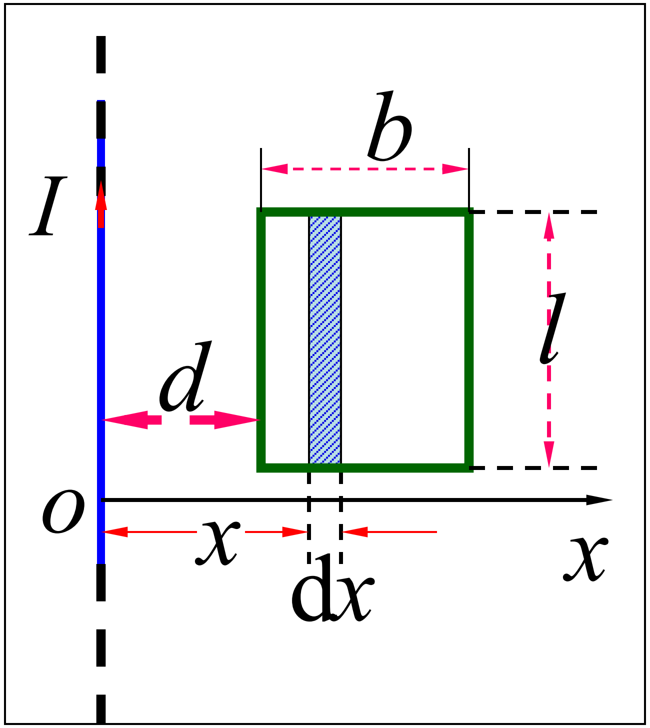


解　　设长直导线通电流 I

$$B = \frac{\mu I}{2\pi x}$$

$$\mathrm{d}\Phi = \vec{B} \cdot \mathrm{d}\vec{s} = \frac{\mu I}{2\pi x} l \mathrm{d}x$$

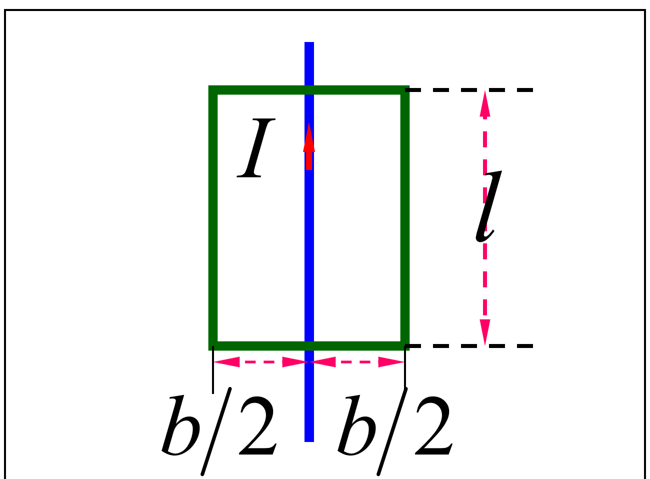
$$\Phi = \int_{d}^{d+b} \frac{\mu I}{2\pi x} l \mathrm{d}x$$



$$\Phi=\int_{d}^{d+b}\frac{\mu I}{2\pi x}l\mathrm{d}x$$

$$=\frac{\mu Il}{2\pi}\ln(\frac{b+d}{d})$$

$$M=\frac{\Phi}{I}=\frac{\mu l}{2\pi}\ln(\frac{b+d}{d})$$



若导线如左图放置，根据对称性可知 $\Phi = 0$

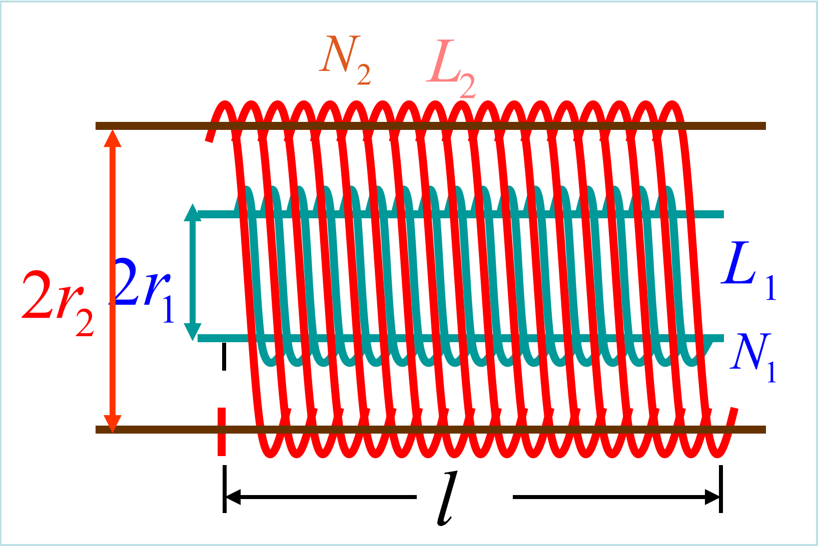
得

$$M=0$$

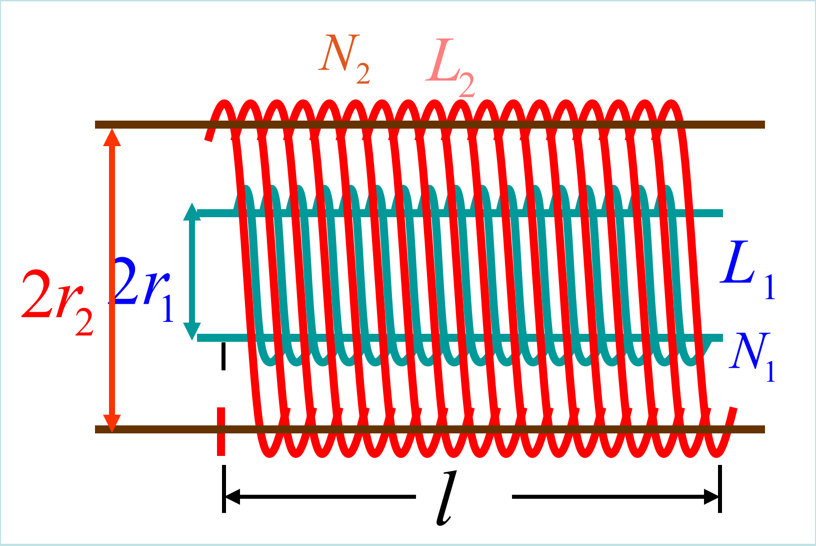
例 两同轴长直密绕螺线管的互感 如图所示，有两个长度均为l，半径分别为r_1和r_2(且$r_1 < r_2$)，匝数分别为N_1和N_2的同轴长直密绕螺线管。试计算它们的互感。

解：设内管r_1通电流I_1

$$B_1 = \begin{cases} \mu \dfrac{N_1}{l} I_1 = \mu n_1 I_1 & (r < r_1) \\ 0 & (r > r_1) \end{cases}$$



穿过外管的磁通量：



$$\psi_{21} = N_2 \int_{s_2} \vec{B}_1 \cdot \mathrm{d}\vec{S} = N_2 B_1 \cdot S_1$$

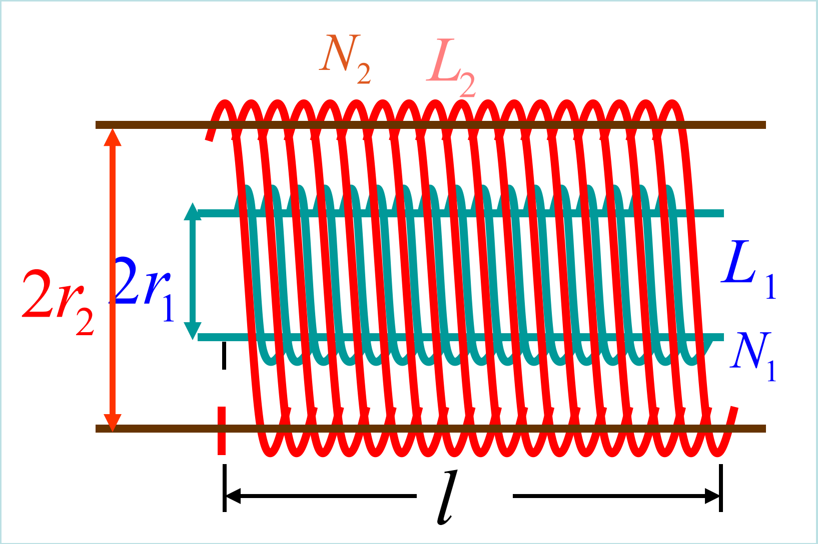
$$= \mu \frac{N_1 N_2}{l} I_1 \cdot \pi r_1^2$$

$$\therefore\ M_{21} = \frac{\psi_{21}}{I_1} = \mu \frac{N_1 N_2}{l} \pi r_1^2 = \mu n_1 n_2 l (\pi r_1^2)$$

同理：设外管r$_2$通电流I_2

$$B_2 = \begin{cases} \mu \dfrac{N_2}{l} I_2 = \mu n_2 I_2 & (r < r_2) \\ 0 & (r > r_2) \end{cases}$$

穿过内管的磁通量：



$$\psi_{12} = N_1 \int_{S_1} \vec{B}_2 \cdot d\vec{S} = N_1 B_2 \cdot S_1$$

$$= \mu \frac{N_1 N_2}{l} I_2 \cdot \pi r_1^2$$

$$\therefore M_{12} = \frac{\psi_{12}}{I_2} = \mu \frac{N_1 N_2}{l} \pi r_1^2 = \mu n_1 n_2 l (\pi r_1^2)$$

$$\therefore M_{12} = M_{21} = M$$

$$\because L_1 = \mu n_1^2 V_1 = \mu (\frac{N_1}{l})^2 l \cdot \pi r_1^2 = \mu \frac{N_1^2}{l} \pi r_1^2$$

$$L_2 = \mu \frac{N_2^2}{l} \pi r_2^2$$

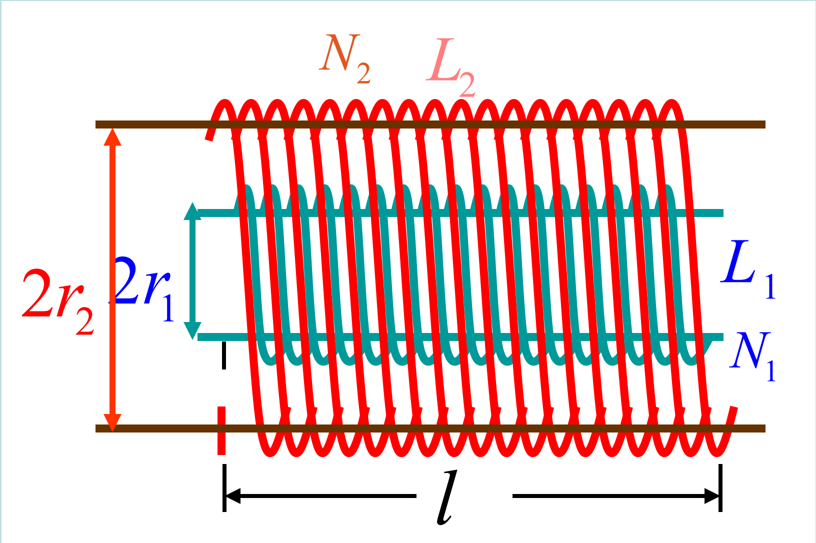
$$\boldsymbol{M = \frac{r_1}{r_2}\sqrt{L_1 L_2}}$$

一般情况：

$$M = K\sqrt{L_1 L_2}$$

K：耦合系数，取决于两线圈的相对位置及绕法。

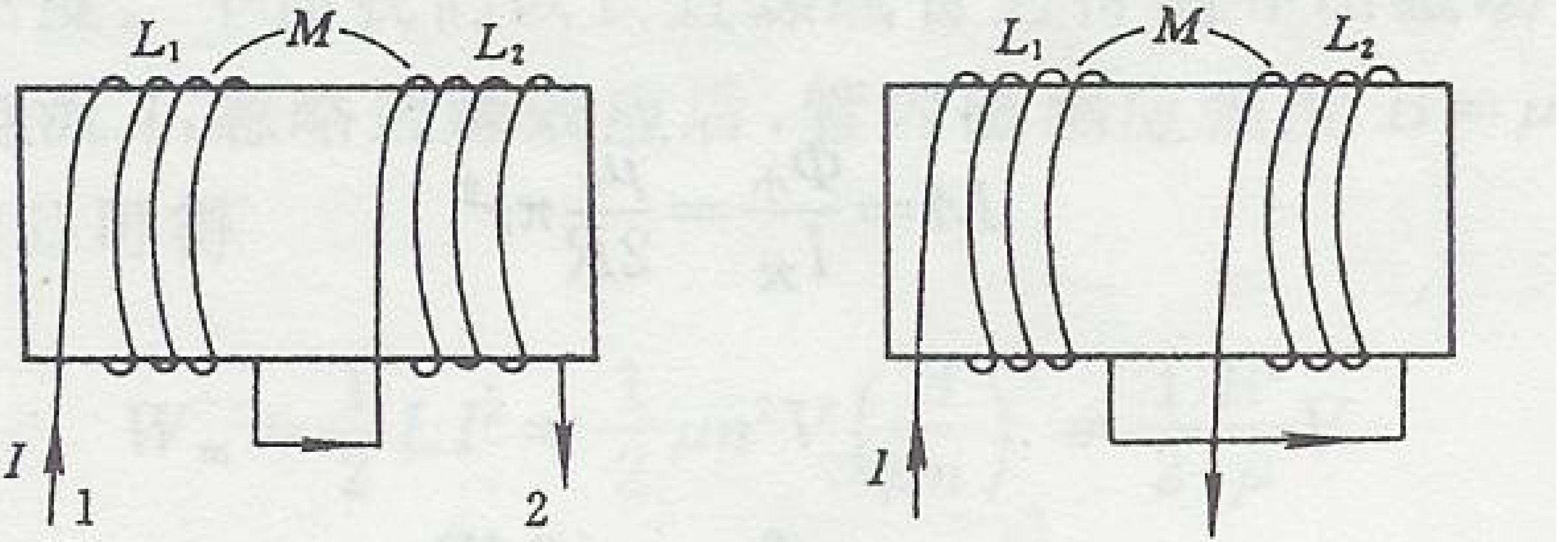
（ $0 \le K \le 1$ ）



两螺线管共轴，且 $R_1 = R_2$，$K = 1$：完全耦合

两螺线管轴相互垂直，　　$K = 0$：不耦合

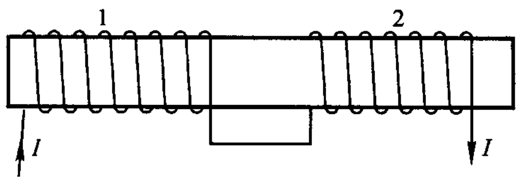
两个串联线圈的连接方式

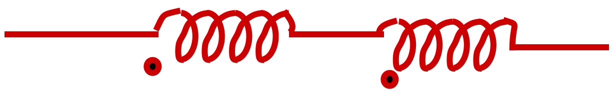


(a) 顺接　　(b) 反接

计算两个串联线圈的自感系数

1）两个线圈顺接串联的自感





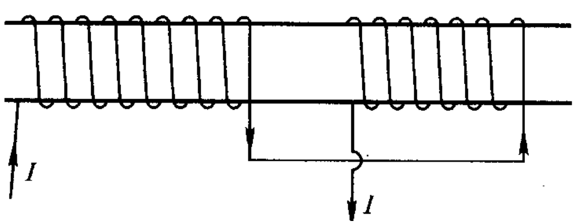
$$\psi_1 = \psi_{11} + \psi_{12} = L_1 I_1 + M I_2$$

$$\psi_2 = \psi_{22} + \psi_{21} = L_2 I_2 + M I_1$$

$$\psi = \psi_1 + \psi_2 = (L_1 + L_2 + 2M) I$$

$$\boxed{L = \frac{\psi}{I} = L_1 + L_2 + 2M}$$

2）两个线圈反接串联的自感



$$\psi_1 = \psi_{11} - \psi_{12} = L_1 I_1 - M I_2$$

$$\psi_2 = \psi_{22} - \psi_{21} = L_2 I_2 - M I_1$$

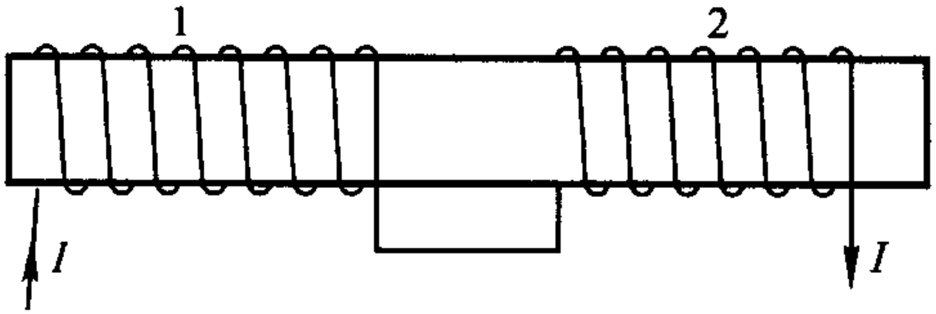
$$\psi = \psi_1 + \psi_2 = (L_1 + L_2 - 2M) I$$

$$\boxed{L = \frac{\psi}{I} = L_1 + L_2 - 2M}$$

思考：两个线圈顺接串联的自感

- 螺线管公式的适用性

$$\boldsymbol{L} = \mu_0 \boldsymbol{n}^2 \boldsymbol{V}$$



$$L = \frac{\Psi}{I} = L_1 + L_2 + 2M$$

3、涡电流

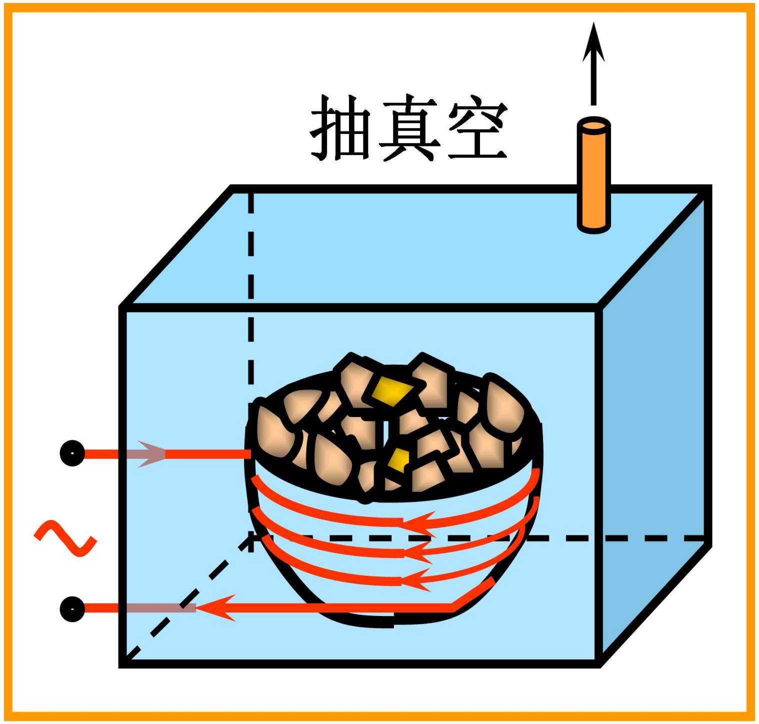
当大块导体，特别是金属导体处在变化的磁场中时，由于通过金属块的磁通量发生变化，因此在金属块中产生感应电动势。而且由于大块金属电阻特别小，所以往往可以产生极强的电流，这些电流在金属内部形成一个个闭合回路，所以称作涡电流，又叫涡流。

感应淬火

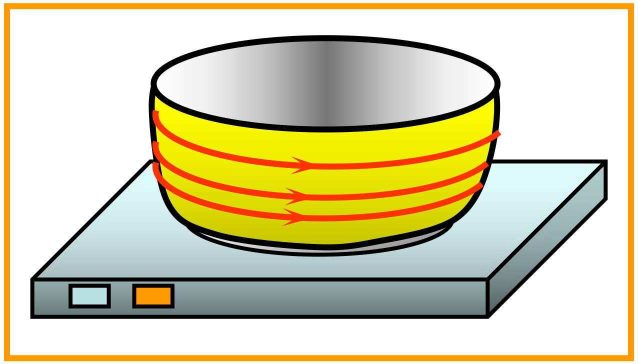
高频感应炉：

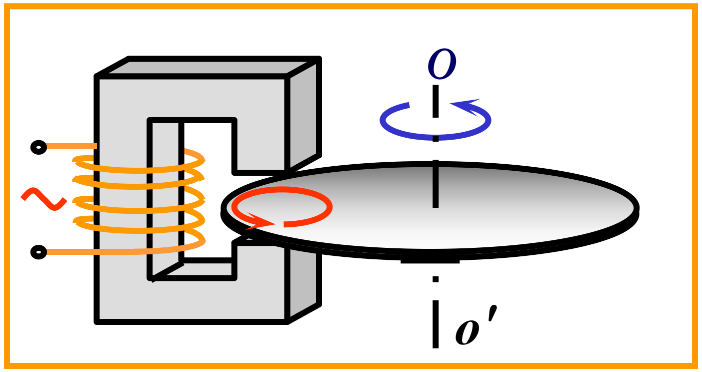
采用高频交流电就可以在金属圆柱体内汇集成强大的涡流，释放出大量的焦耳热，最后使金属自身熔化。这就是高频感应炉的原理。

具有加热速度快、温度均匀、易控制、材料不受污染等优点。



- 电磁炉加热时炉体本身并不发热，在炉内线圈接通交流电时，在炉体周围产生交变的磁场。当金属容器放在炉上时，在容器上产生涡电流，使容器发热，达到加热食物的目的。





- 电度表记录用电量，就是利用通有交流电的铁心产生交变的磁场，在缝隙处铝盘上产生涡电流，涡电流受磁场作用，表盘受到一转动力矩，使表盘转动。

弊

增加能耗

热效应过强--温度过高

--造成事故

应减少涡流

如变压器铁芯。

减少涡流的途径

1、选择高阻值材料

（电机变压器的铁芯

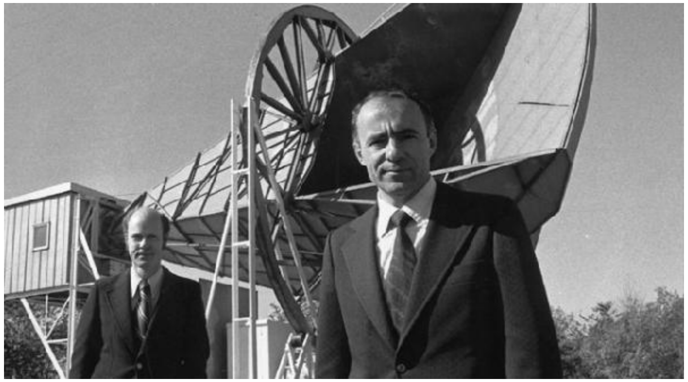
材料是硅钢而非铁）

2、多片铁芯组合

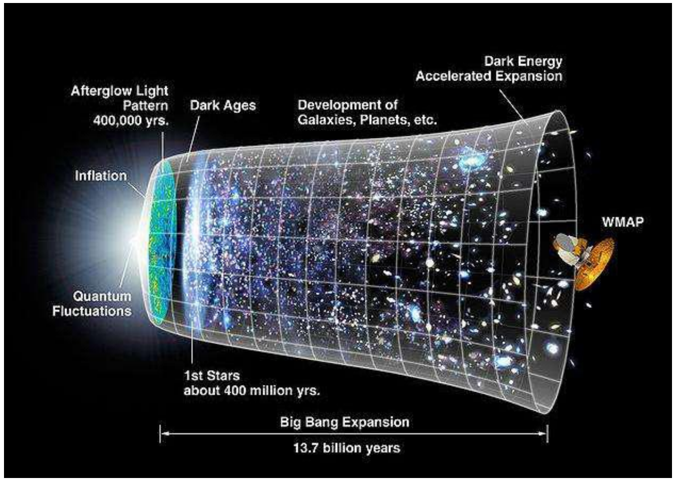
思考：电磁炉和微波炉的原理有什么不同？

富有启发性的有关微波的两个科学小故事

1） 微波背景辐射的发现

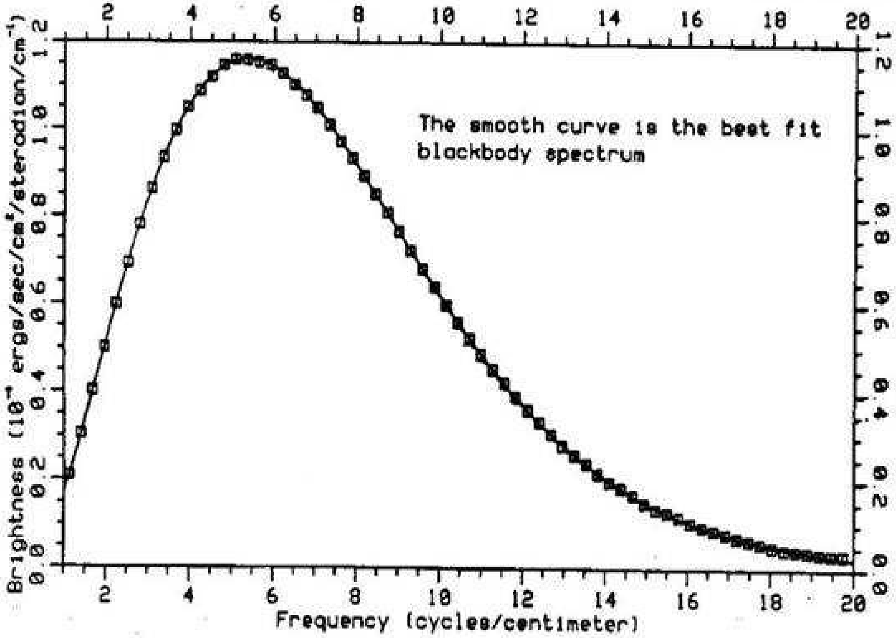


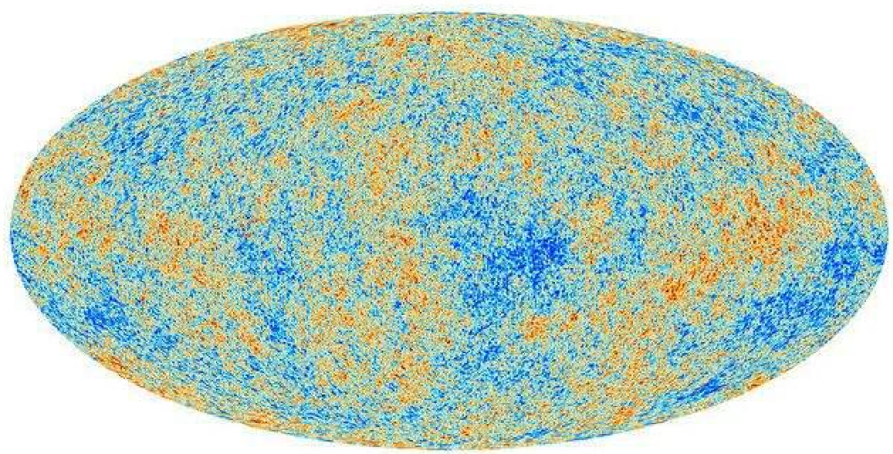
- 宇宙微波背景辐射是来自宇宙空间背景上的各向同性或者黑体形式和各向异性的微波辐射，也称为微波背景辐射，特征是和绝对温标2.725K的黑体辐射相同，频率属于微波范围。
- 1964年，彭齐亚斯和威尔逊在7.35厘米的波长上测到宇宙空间的各向同性辐射。此后又在1毫米到21厘米的射电波段以及在X和γ射线波段上观测到了这一现象。这个现象后来被命名为宇宙微波背景辐射。1965年5月13日，他们把描述这一发现的论文《在4080兆赫处天线附加温度的测量》寄给了《天体物理学报》, 并因此获得1978年诺贝尔物理学奖。



- 早在20世纪40 年代，伽莫夫等人根据热大爆炸宇宙学说的观点，预言宇宙空间应该充满着残余辐射，它们的温度已经相当低了，大致为几K 或至多几十K。
- 当时，美国普林斯顿大学的狄克小组，正准备筹建专门设备，来寻找前人预言的残余辐射，或者叫宇宙背景辐射。因此，当彭齐亚斯等的论文一发表，消息一传开，狄克等人立即意识到，这很可能就是他们打算要找的东西。事实也正是这样。多少人想找的东西，一直没有找到，两位工程师却在无意之间发现了它，正是：有心栽花花不开，无意插柳柳成行。

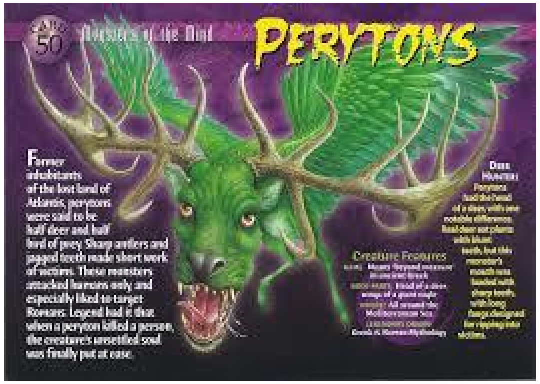
- **2006年诺贝尔物理学奖授予美国科学家约翰·马瑟和乔治·斯穆特，以表彰他们发现了宇宙微波背景辐射的黑体形式和各向异性。**





2） Perytons之谜

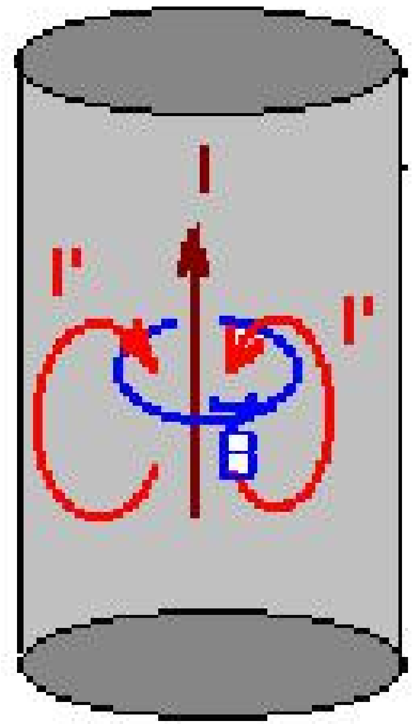
- 在17年前的一天，帕克斯射电望远镜团队突然收到了一种异常强烈的无线脉冲信号。自那时以来，他们会陆续侦测到该信号，被命名为“perytons”。
- 自1998年以来，对该噪音的搜寻工作成为该研究团队的主要任务：了解该快速射电爆发（FRB）的来源这个简单但难以捉摸的信号可能来自银河系外。
- 在2016年4月发表于arXiv预印本服务器上的一份报告中，天文学家描述了对这个名为“perytons”的信号的细致搜寻工作。经过若干次实验后，研究人员发现，只有在一台附近的微波炉还在运行时，强行打开炉门，微波炉突然停止工作，就会从炉门泄漏出一些微波辐射，而同时，望远镜的天线正好朝向这边。“我们已经解决了perytons之谜，并增加了我们对FRB是真实存在的信心。”Petroff说，“我们很高兴终于解决了这个问题，因此我们可以关注那些真正感兴趣的东西了。”
- 但网友纷纷吐槽这次乌龙事件：
  “那个研究了17年，申请了无数研究经费的perytons神秘信号，其实就是微波炉。”



4、趋肤效应

交变电流集中在导体表面的现象

- 为什么在电流变化时会有趋肤效应产生?
- I变——B变——I’ (涡电流)
- 轴线附近I与I’方向相反
- 而表面附近I和I’同向
- 所以轴线附近的电流被削弱
- 表面附近的电流被加强

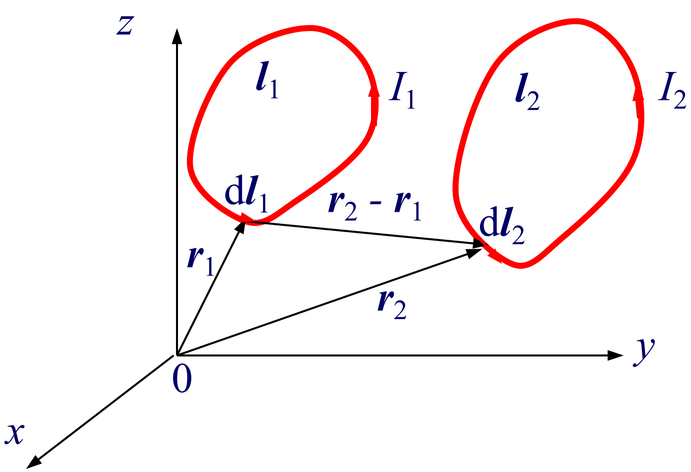


趋肤效应

趋肤效应的后果及应用

- 传输高频信号时，由于趋肤效应会使导线的有效截面减少，从而是等效电阻增加
- 对于良导体，在高频下的趋肤明显，即电流仅分布在导体表面很薄的一层
- 工业上可用于金属表面的淬火

课下思考题：



尝试证明：任意两个回路之间的互感公式为

$$M_{21}=\frac{\mu}{4\pi}\oint_{l_2}\oint_{l_1}\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{l}_1\cdot\mathrm{d}\boldsymbol{l}_2}{|\boldsymbol{r}_2-\boldsymbol{r}_1|}\qquad M_{12}=\frac{\mu}{4\pi}\oint_{l_1}\oint_{l_2}\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{l}_2\cdot\mathrm{d}\boldsymbol{l}_1}{|\boldsymbol{r}_1-\boldsymbol{r}_2|}$$

考虑到 $\mathrm{d}\boldsymbol{l}_1\cdot\mathrm{d}\boldsymbol{l}_2=\mathrm{d}\boldsymbol{l}_2\cdot\mathrm{d}\boldsymbol{l}_1$， $|\boldsymbol{r}_2-\boldsymbol{r}_1|=|\boldsymbol{r}_1-\boldsymbol{r}_2|$，所以由上两式可见， $M_{12}=M_{21}$

课下作业

1、6.6.1

2、6.6.2


谢谢
moodflow.com