

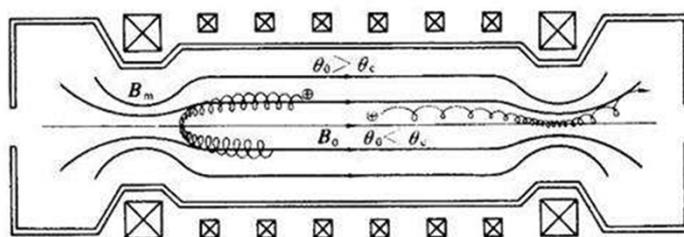
# RMF线圈的设计与改进

——物理学院17级本科6班 赵梓含  
指导教师：周幸祥

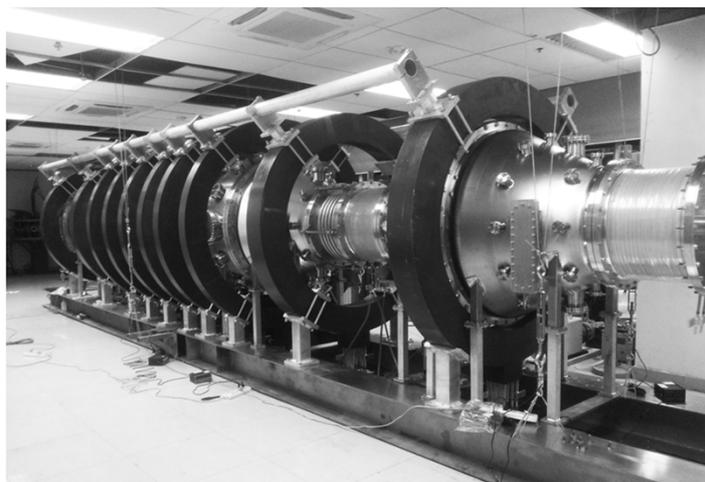
## RMF线圈的设计与改进

- 什么是RMF
- 现在使用的RMF线圈
- RMF线圈的理论计算及改进
- 引用文献

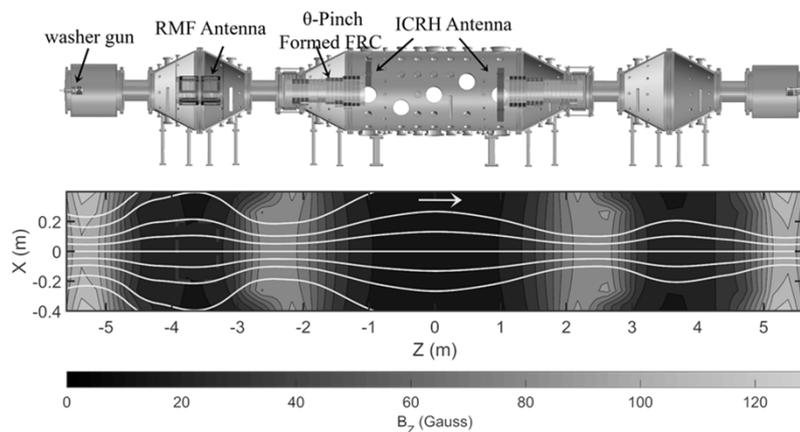
# 磁镜约束等离子体



# KMAX

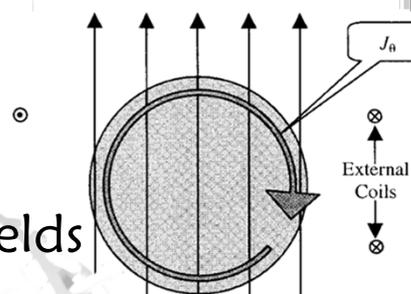


## Present KMAX Device

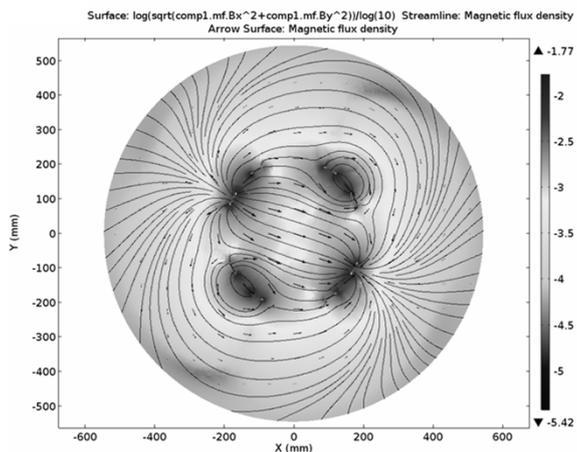


## Rotating Magnetic Fields

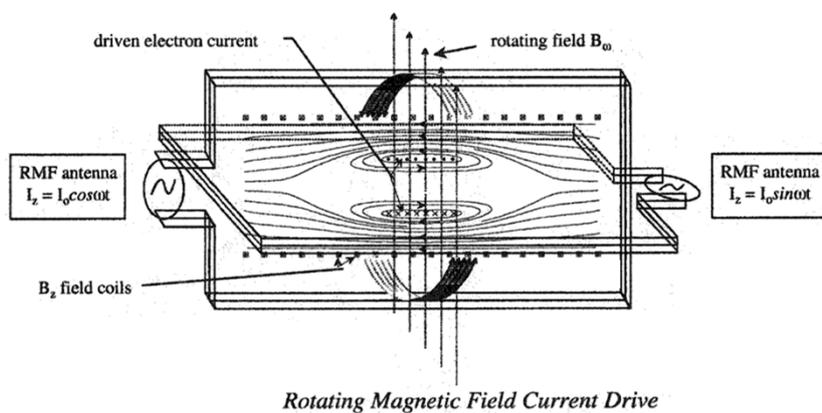
- 横向的旋转磁场 (RMF) 可以通过对电子洛伦兹力 ( $v_z \times B_r$ ) 来驱动环形电流, 并维持反场位形 (Field Reversed Configuration, FRC), 其中  $v_z$  是轴向屏蔽电流,  $B_r$  是 RMF 的径向分量。

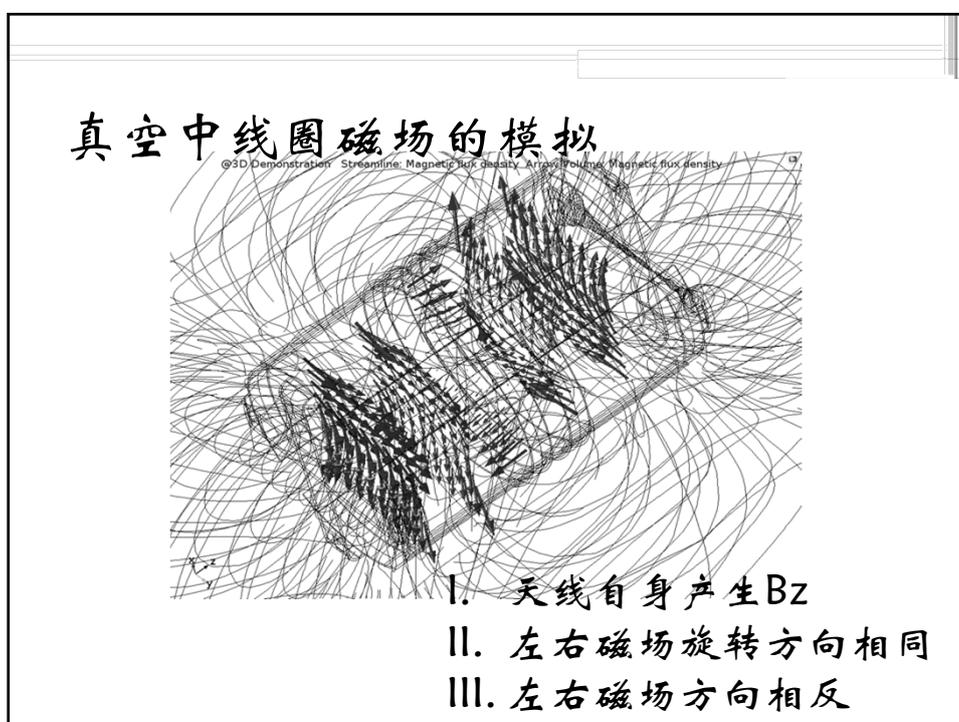
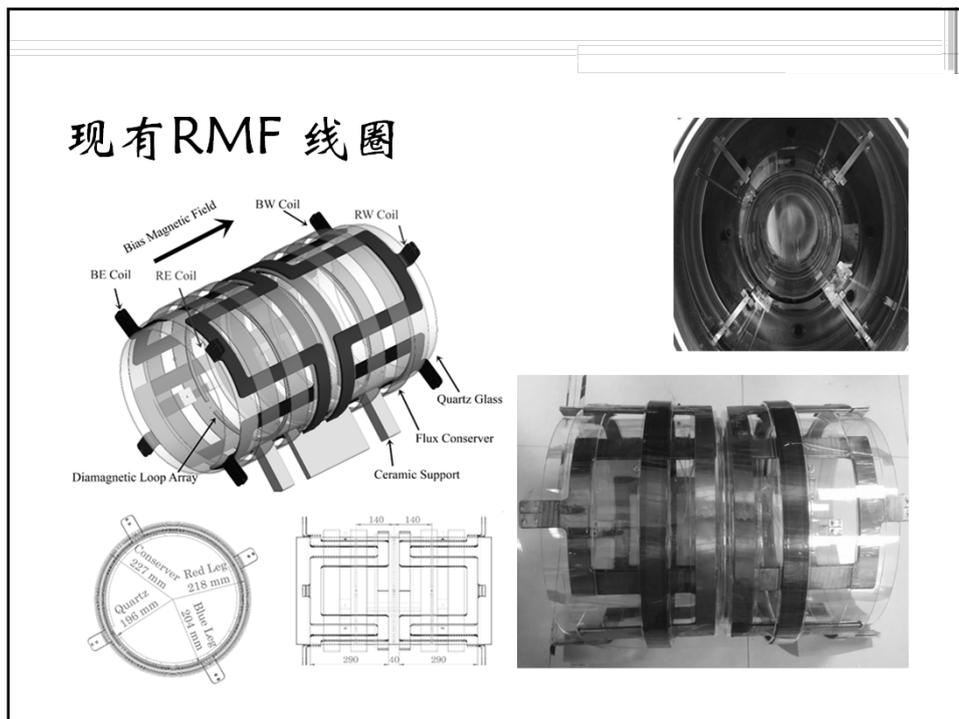


## Bx, By @ Z > 0 mm



## 最简单的RMF线圈



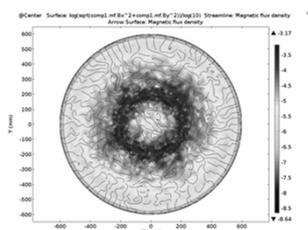
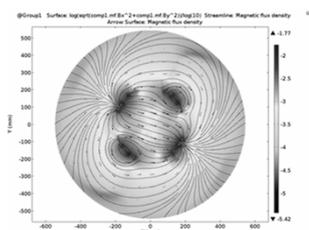


## “铜壁”作用

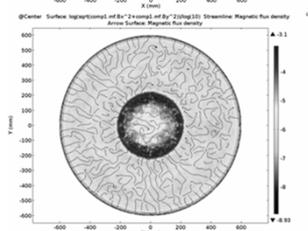
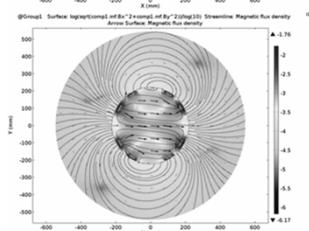
Bx, By @ Z > 0 mm

Bx, By @ Z = 0 mm

w/o FC



With FC



## RMF线圈的相关计算讨论

- 在对天线的讨论中，我们将天线模型简化为一组排列在半径  $R_0$  的圆柱面上的无限长的偶极子线圈。
- 我们主要对其在真空中的磁矢势进行讨论。

## RMF线圈的相关计算讨论

### ◆真空中的磁矢势

——改进方向：减小无关谐波的相对大小

- A. 增大线圈相对半径
- B. 每相使用两个线圈
- C. 调整同一相的两个线圈之间的相位差
- D. 增加相数

### ◆引入等离子体

## 真空磁矢势计算

- 在真空中，由一组无限长的偶极子线圈排列在半径  $R_c$  的圆柱面上的磁矢势可以扩展为

$$A_z = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \sum_{n=\text{odd}} \frac{1}{n} \left( \frac{r}{R_c} \right)^n \cos(n(\theta - \varphi))$$

- $\varphi$  是线圈的角位置， $I$  是电流。在  $I_i = I \sin(\omega t - \xi_i)$  的多相线圈的中，矢量势是

$$A_z = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \sum_{n=\text{odd}} \left[ \frac{1}{n} \left( \frac{r}{R_c} \right)^n \sum_{i=1}^{I_c} [\cos(n(\theta - \varphi_i)) \cdot \sin(\omega t - \xi_i)] \right]$$

- 则可以将每个n的z方向磁矢势 $\alpha_n$ 分别写出：

$$\alpha_n = \frac{\mu_o I}{8\pi} \left(\frac{r}{R_c}\right)^n \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{I_c} \{\sin(\omega t - \xi_i) e^{-in\varphi_i}\}, \quad n = \text{odd},$$

$$\alpha_n = 0, \quad n = \text{even}.$$

- 得到了所期望的n=1的旋转，以角频率 $\omega$ 旋转，但也有以 $(-1)^{(n-1)/2}(\omega/n)$ 频率旋转的奇谐波。这些奇谐波对当前的驱动有不利影响，需要尽量减少。

A. 增大天线相对半径

- 增加线圈半径的 $R_c$ 是减少其他奇谐波的相对大小的一种明显的方法。然而，这在实验中是不实际的，因为用来达到基本的n=1旋转场的所需能量与 $R_c^2$ 成正比。

- 最简单的RMF线圈是由一个两相系统组成的，每个阶段有一个线圈对，每一个线圈对在空间和相位上以 $\pi/2$ 分开。如果 $\varphi_1=0$ ， $\varphi_2=\pi/2$ ，并且有 $\xi_1=\pi$ ， $\xi_2=-\pi/2$ ，此时真空中磁矢势可以表示

为：

$$A_z = -\frac{\mu_o I_o}{\pi} \sum_{n=\text{odd}} \left[ \frac{1}{n} \left(\frac{r}{R_c}\right)^n \sin(\omega t + (-1)^{(n+1)/2} n\theta) \right]$$

B. 每相使用两个线圈

- 这个两相天线每相使用两个线圈也可以减少谐波。对于一个两相系统，每个相有两个线圈，真空中磁矢势可以表示为：

$$A_z = -\frac{2\mu_o I_o}{\pi} \sum_{n=\text{odd}} \left[ \frac{\cos(\frac{1}{2}n\alpha_c)}{n} \left(\frac{r}{R_c}\right)^n \sin(\omega t + (-1)^{(n+1)/2} n\theta) \right]$$

### C. 调整同一相的两个线圈之间的相位差

$$A_z = -\frac{2\mu_o I_o}{\pi} \sum_{n=\text{odd}} \left[ \frac{\cos(\frac{1}{2}n\alpha_c)}{n} \left(\frac{r}{R_c}\right)^n \sin(\omega t + (-1)^{(n+1)/2}n\theta) \right]$$

- 其中  $\alpha_c$  是同一相的两个线圈之间的相位差。这个表达式表明，相对于我们需要的  $n=1$  的波，每一个更高模的波都被因数  $\cos(\frac{1}{2}n\alpha_c)/\cos(\frac{1}{2}\alpha_c)$  削弱了。
- $\alpha_c$  选择  $60^\circ$  消除  $n=3$  的谐波；选择  $36^\circ$  消除了  $n=5$  的谐波。计算发现， $\alpha_c$  取  $45^\circ$  是一个很好的折中方案。

### D. 增加相数

- 使用一个三相系统，每个相有两个线圈，可以进一步减少谐波。三相系统真空中磁矢势可以表示为：

$$A_z = -\frac{3\mu_o I_o}{\pi} \sum_{n=\text{odd}} \left[ \frac{\cos(\frac{1}{2}n\alpha_c)}{n} \left(\frac{r}{R_c}\right)^n \times \gamma_n \sin(\omega t + \beta_n n\theta) \right]$$

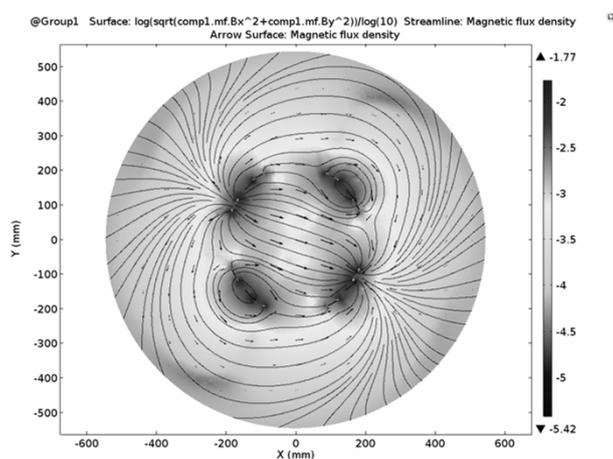
- 其中， $\gamma_1=1$ ,  $\gamma_3=0$ ,  $\gamma_5=1$ , and  $\gamma_{n+6}=\gamma_n$ ,  $\beta_1=1$ ,  $\beta_5=-1$ ,  $\beta_{n+6}=\beta_n$ 。此时， $n=3, 9, 15, \dots$  的谐波都没有出现，第5、11和17次谐波旋转方向与  $n=1$  相反。第5次谐波可以通过将线圈  $\alpha_c$  设置为  $36^\circ$  将其消除，从而使第7个谐波成为第一个有害的谐波。

## Improvements

- A. 增大天线相对半径 —— 仪器空间有限，且不可能做到仪器外（电磁屏蔽）
- B. 每相使用两个线圈 —— 已是每相两个线圈（理论上，我们可以放更多地线圈使其产生磁场更加均匀稳定，但是在实际中，会遇到线圈以及石英隔板厚度，所需电源，天线有一定宽度等等问题）
- C. 调整同一相的两个线圈之间的相位差 —— 原为两相天线时的较佳  $\alpha_c = 60^\circ$ ，但随着我们将天线改为三相， $\alpha_c$  也将改为  $36^\circ$
- D. 增加相数 —— 将原两相天线改为三相
- E. 保留FC

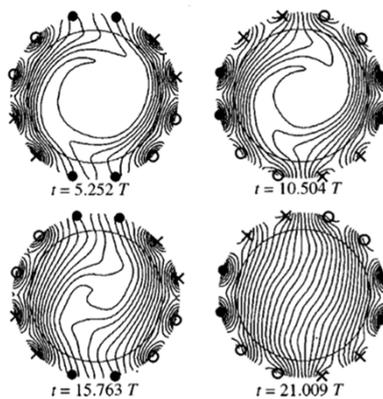
## The original version

—— Bx, By @ Z > 0 mm



## The improved version

— B<sub>x</sub>, B<sub>y</sub> @ Z > 0 mm

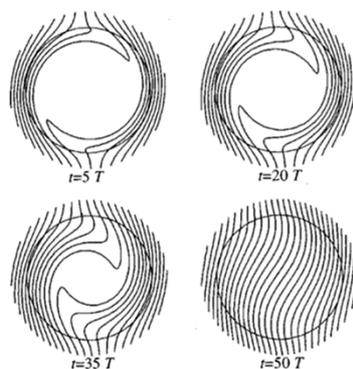


Evolution of RMF field lines during penetration for calculation with a three-phase antenna, two coils per phase,  $\lambda = 11.6$ , and  $\gamma = 19.9$ ,  $k = 8$ , and  $\alpha = 30^\circ$ .

## RMF天线的相关计算讨论

- ◆ 真空中的磁矢势
- ◆ 引入等离子体

## RMF 的渗透



Evolution of magnetic field lines as the RMF penetrates a plasma column.

## 引用文献

- ◆ Richard D. Milroy, *Physics of Plasmas* 6, 2771 (1999) *A numerical study of rotating magnetic fields as a current drive for field reversed configurations*
- ◆ Andrew Maxwell Peter *Paramagnetic Spin-up of a Field Reversed Configuration with Rotating Magnetic Field Current Drive*