

托卡马克等离子体虚拟仿真实验

李彬 19307110302

一、 实验目的：

学习磁约束基本原理，了解托卡马克装置基本结构。

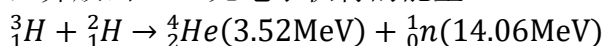
测量托卡马克装置等离子体密度分布与温度分布。

探究单粒子在托卡马克装置中的运动轨迹。

二、 实验原理：

1、 核聚变反应：

氢元素的同位素氘和氚，在一亿度的高温下聚变生成一个阿尔法粒子(氦核)和一个中子的反应，并放出 17.6 兆电子伏特的能量：



2、 磁约束：

根据带电粒子无法横越磁场运动的性质，利用磁场来约束高温的等离子体，维持其高温（~10KeV，约一亿度）、高密度（~ 10^{20}m^{-3} ）的状态，从而达到核聚变反应以及能量增益的条件——劳逊判据：

$$n\tau_E T > 3 \times 10^{21} \text{m}^{-3} \cdot \text{s} \cdot \text{KeV}$$

其中， n 是等离子体密度，密度越大燃料离子发生聚变反应的概率越大； τ_E 是能量约束时间，表征装置的约束性能； T 是等离子体温度，温度越高，原子核穿越库仑势垒发生聚变反应的概率越大。

目前领先的磁约束聚变装置是托卡马克，其中约束磁场的拓扑结构类似于轮胎的形状，其平衡磁场由环向场线圈产生的环向磁场和环向等离子体电流产生的极向磁场共同构成，形成了嵌套的磁面，并将等离子体约束于其中。装置的磁面即对应了等离子体的等压面。等离子体的力学平衡由磁压力与等离子体热压力相平衡得到：

$$\nabla P = \vec{j} \times \frac{\vec{B}}{c}$$

其中 P 、 \vec{j} 、 \vec{B} 分别为等离子体压强，电流和磁场。

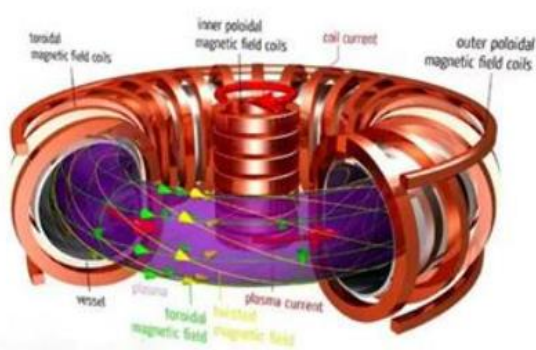


图 1 托卡马克装置

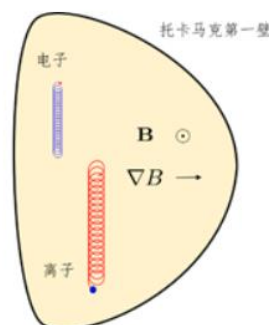


图 2 不同电荷漂移的产生

3、磁约束装置中的带电粒子轨道：

在磁约束装置中具有复杂的磁场位型，相应的带电粒子的运动轨迹也非常复杂，可以分解为沿着磁力线的自由运动、绕磁力线的快速拉莫回旋运动以及横越磁场的缓慢“漂移”运动。带电粒子沿着磁力线方向不受力，而在垂直于磁场方向由于受到洛伦兹力的作用而围绕磁力线做快速的回旋运动。当在非均匀磁场中以及存在电磁扰动时，粒子回旋运动的“导心”会有一些集体的漂移运动；如当磁场具有曲率时，带电粒子沿着弯曲的磁力线运动时会受到离心力的影响，从而会产生额外的“曲率漂移”，其方向垂直于磁场和曲率方向；而当磁场非均匀时，带电粒子的拉莫回旋半径在各点不同，使得带电粒子的导心产生磁场梯度漂移，其方向垂直于磁场和其梯度方向。

不同的粒子成分，其运动特征具有很大的差别。例如，电子和热离子由于其电荷符号相反，磁漂移方向相反，会引起电荷分离，如图 2 所示；此过程产生的电场会导致电子和离子共同向外的电漂移。这也是托卡马克装置中必须引入等离子体电流来产生极向磁场的原因。由于极向场引起的磁场螺旋，使得粒子沿着磁力线的快速自由运动抵消缓慢的磁漂移引起的电荷分离。

此外，当带电粒子沿着磁力线运动时，由于磁矩守恒：

$$\mu = \frac{v_{\perp}^2}{B} \quad (1)$$

粒子沿着磁力线运动到磁场较强区域时，其垂直磁场方向能量增加，相应地，平行于磁场的速度减小，这叫做“磁镜”效应。该效应会导致初始时垂直速度较大的粒子的平行速度可能会变为零从而被沿着磁力线“反弹”，并被“捕获”在弱场侧，这类粒子叫做磁捕获粒子或者“香蕉粒子”。而初始时垂直速度较小的粒子的平行速度受影响较小，可以沿着磁力线运动，覆盖整个磁面，这些粒子叫做“通行粒子”。

三、 实验装置：

Ilab-x 平台“托卡马克等离子体虚拟仿真”模块。

四、 实验内容：

- 1、托卡马克装置
- 2、等离子体磁流体力学实验：
 - 测量等离子体温度分布
 - 测量等离子体密度分布
- 3、单粒子运动轨迹仿真：
 - 测试不同初始位置、速度对运动轨迹的影响
 - 寻找“通行轨道”与“束缚轨道”

五、 实验记录：

1. 托卡马克装置：
装置组件：

EAST 主机：由高真空室、纵向场/极向场线圈、内外冷屏、真空杜瓦等部件组成

中性束系统：加热与粒子流驱动系统，提供高能粒子流。

离子回旋装置：利用离子回旋共振效应进行加热。

汤姆孙散射诊断装置：将激光打至等离子体内，测量等离子体电子温度与密度。

电子回旋加热仪器：利用电子回旋共振效应对电子进行加热。

偏振干涉仪：使用 11 通道远红外激光，对等离子体内部磁场进行诊断。



图 3 托卡马克装置图

等离子体诊断装置与电磁装置的组装：

等离子体诊断探针存在两级传动，第一级传动为长距离慢动，驱使探针进入等待区域；第二级为短距离快动，驱使探针快速进退等离子体刮削区域进行诊断。

电磁测量装置包含两类线圈，如图所示：磁通环与磁探针。磁探针可以测量切向与法向的磁场，由多个面积较小的多匝线圈组成。磁通环是面积较大的单匝线圈，用以测量磁通值。

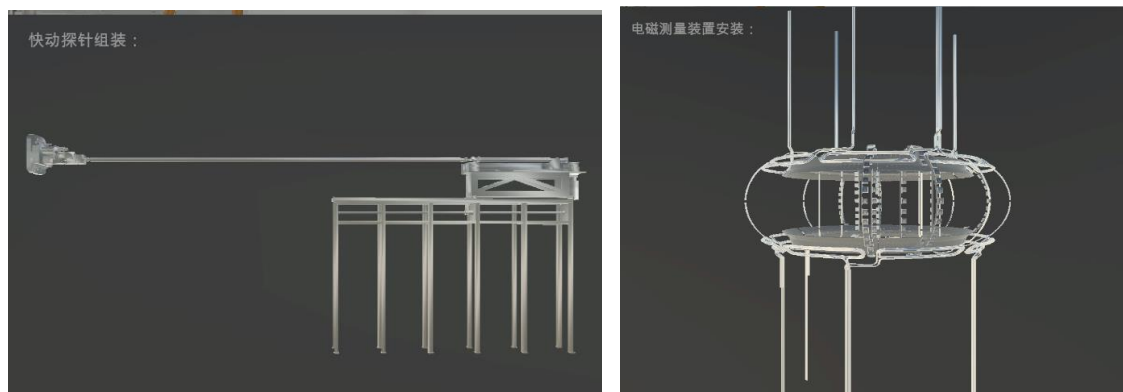


图 4 等离子体诊断装置与电磁装置

2. 等离子体磁流体力学实验：

选取椭圆面磁面位形，极向场电流为 $1\text{T}\cdot\text{m}$ ，温度轮廓参数为： 1×10^7 ，密度轮廓参数： 1×10^{18} ，得到的磁场分布、温度分布、密度分布为：

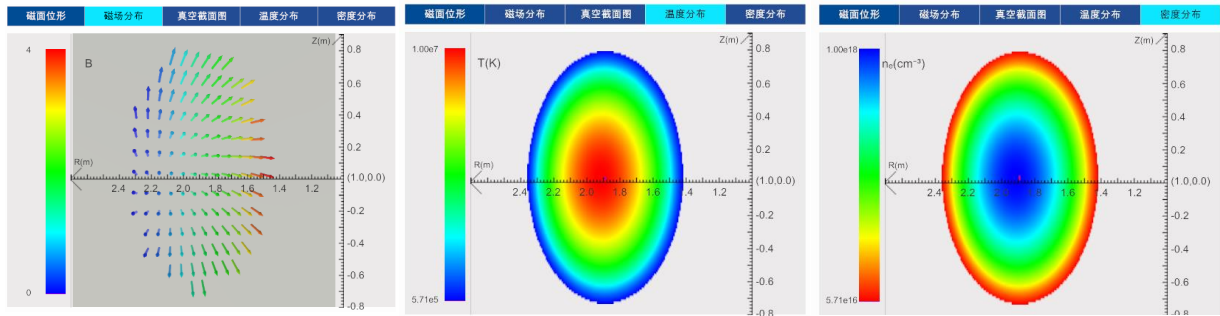


图 5 椭圆位形面的磁场分布、温度分布、密度分布

可见，此时的磁场横截面形状为椭圆形，且托卡马克环形内圈的磁场强，靠外侧的磁场弱；而对于等离子体，其中心处的温度与密度较高，并向外侧减弱。直观地从温度与密度的图像看，温度与密度应具有相似分布形式，并且这种分布形式沿径向对称。

测量径向的温度分布：

表格 1 椭圆位形面径向温度分布

R/m	T/K
1.50	1294528
1.60	3415422
1.70	6393904
1.80	8898973
1.90	9990703
2.00	9595319
2.10	7445183
2.20	4363627
2.30	1546690

测量径向密度分布：

表格 2 椭圆位形面径向密度分布

R/m	$n/ \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$
1.50	1.294528
1.60	3.410913
1.70	6.393903
1.80	8.759896
1.90	9.990703
2.00	9.501059
2.10	7.445182
2.20	4.376239
2.30	1.538572

密度与温度分布的数值变化很接近，推测具有相似的函数形式。其变化情况均为截面中心数值高，向边界递减。

选取三角形面磁面位形，计算得到磁场分布、温度分布、密度分布：

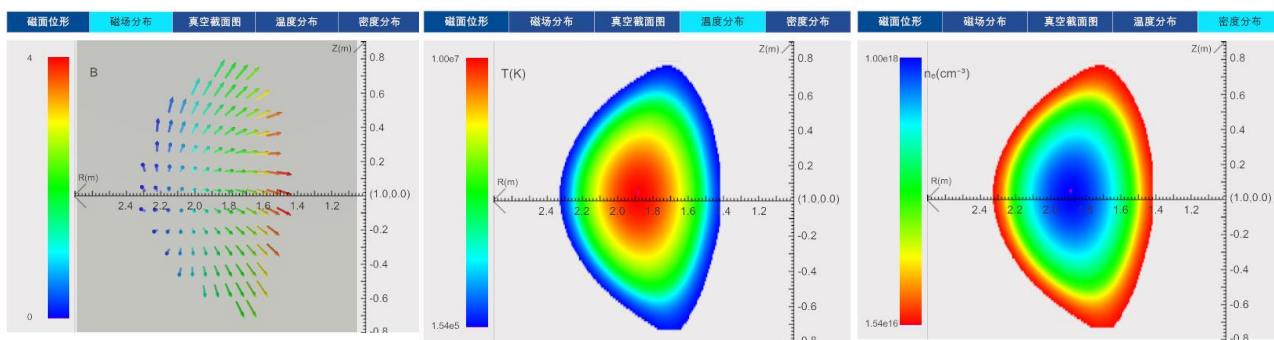


图 6 三角位形面磁场分布、温度分布、密度分布图

测得温度分布：

表格 3 三角位形面径向温度分布

R/m	T/K
1.50	654651.4
1.60	2557244
1.70	6101363
1.80	9136354
1.90	9982504
2.00	8492555
2.10	5198599
2.20	1937116
2.30	352081.7

此时磁场形状近似为三角形，仍为托卡马克环形内侧强，向外侧减弱；等离子体的形状随之改变。温度、密度总体上仍呈截面中心强，向两侧减弱的趋势，但与椭圆位形相比，此时的温度密度梯度变化更剧烈，并且两侧分布不对称。

3. 单粒子运动轨迹仿真：

粒子类型：D（氘）

探究入射初始位置对轨迹的影响：

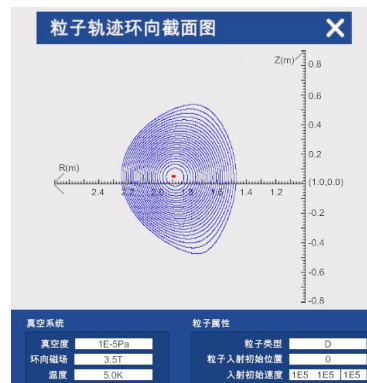
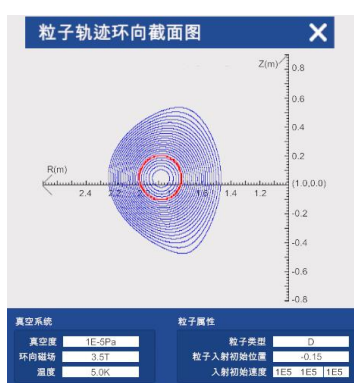
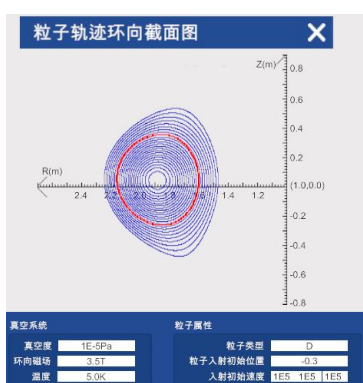
设定初始速度：

径向 v_1 : $1e5$

切向 v_2 : $1e5$

环向 v_3 : $1e5$

选取初始位置为：-0.3, -0.15, 0, 0.15, 0.3，记录环向截面的轨迹。



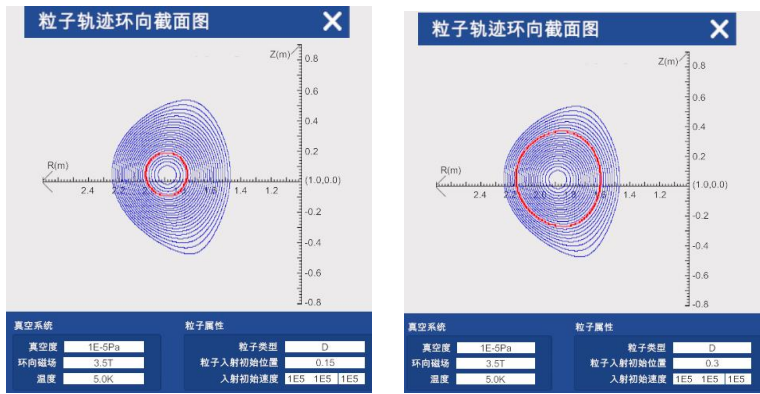


图 7 不同初始入射位置对环向截面轨迹的影响，初始位置从左至右依次依次为：-0.3，-0.15，0，0.15，0.3

在速度一定时，随着初始位置的绝对值减小，粒子在环向截面的轨迹面积越小。

通行轨道与捕获轨道：

设定初始入射位置： -0.2，处于磁场较强的区域

设置速度：

径向：5e5

切向：1e6

环向：0

得到“通行轨迹”：

在环向截面图中，可见粒子运动轨迹基本沿着磁力线位形方向。在导心运动轨迹 3D 效果图中，可以看到进行着“上下”的漂移运动以及环向的环形运动，此时能够做完整的绕行，因而为通行轨迹。

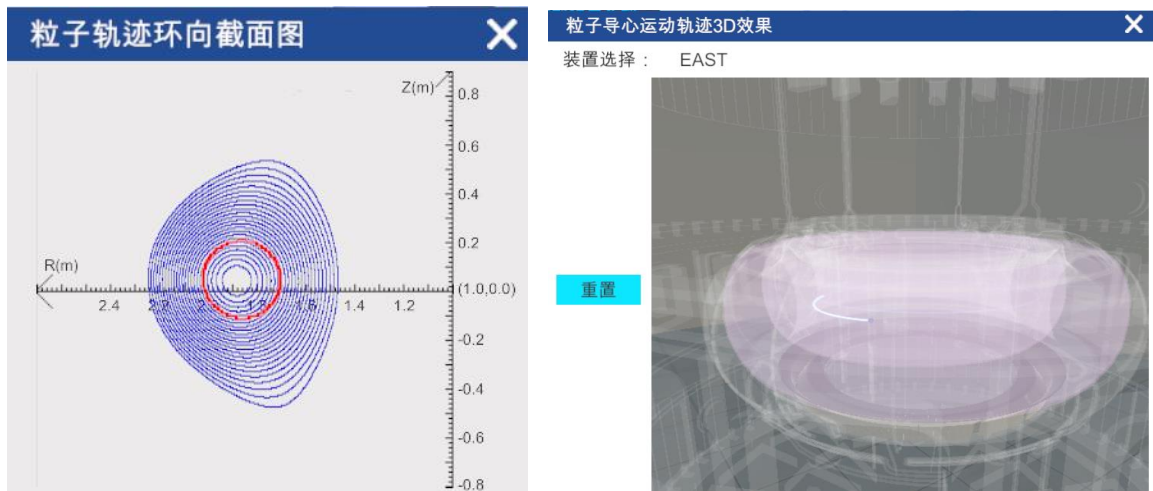


图 8 通行轨迹的环向轨迹与 3D 效果图

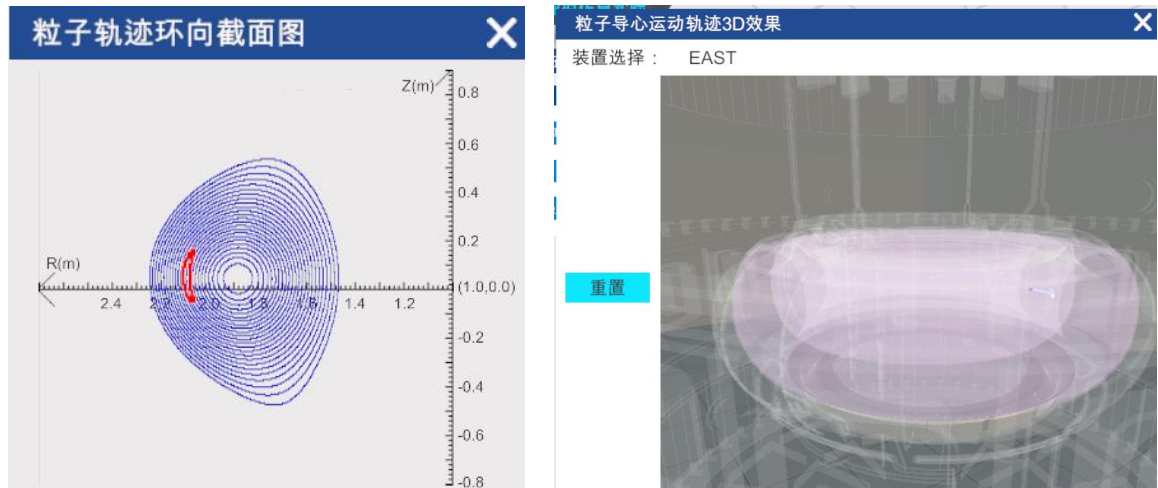


图 9 捕获轨迹（“香蕉”轨迹）的环向轨迹与 3D 效果图

改变入射初始位置： 0.2，移至磁场较弱的区域

设置速度：

径向： $5e5$

切向： $1e6$

环向： 0

得到“捕获轨迹”：

此时粒子在做折返运动，并绕着托卡马克环轴进行缓慢的环形运动。在环形界面图的运动轨迹呈“香蕉”状，因此也称为“香蕉轨道”。

保持初始位置： 0.2 不变

减小粒子速度：

径向： $5e5$

切向： $1e4$

环向： 0

粒子运动基本被完全束缚，在一个小区间内进行往复运动。

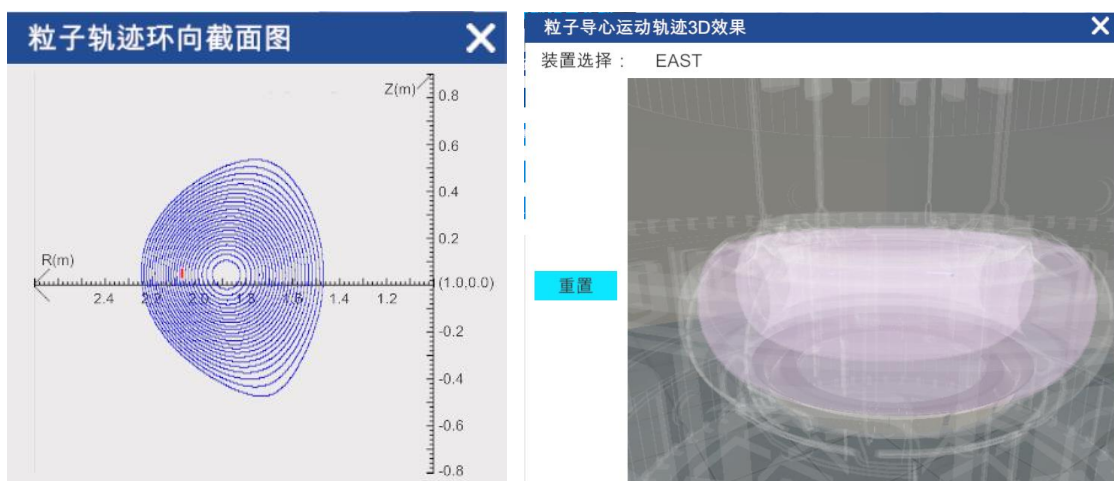


图 10 低速粒子运动情况模拟图

增大粒子速度:

径向: $5e6$

切向: $1e6$

环向: 0

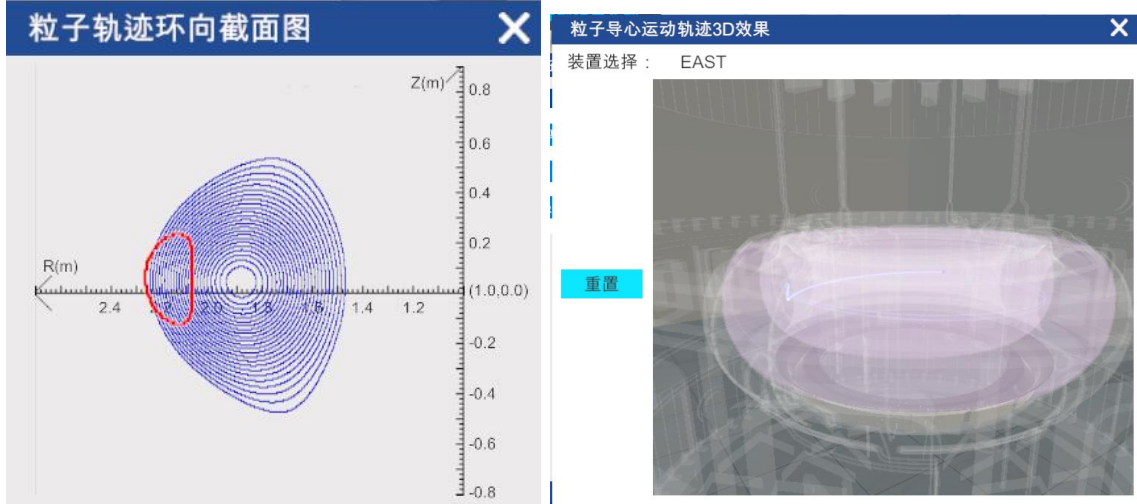


图 11 高速粒子运动情况模拟图

粒子速度增大，从结果中可见其运动受到的束缚不足，即将脱离约束。

六、 数据处理:

不同位形径向温度、密度分布:

椭圆面位形的温度分布如图左侧所示，采用高斯函数拟合:

$$T = T_0 + \frac{A}{\sigma} \sqrt{\frac{2}{\pi}} e^{-\frac{(R-\bar{R})^2}{\sigma^2}}$$

得到拟合结果:

$$R^2 = 0.997$$

$$\bar{R} = 1.916 \pm 0.003\text{m}$$

$$\sigma = 0.50 \pm 0.03$$

$$A = (7.50 \pm 0.8) \times 10^6$$

拟合系数为 0.997，从图中右侧的残差图可以看出，残差分布较均匀，变化范围约为 400000K，是峰值的 4.004%，表明采用高斯函数的拟合程度高。通过拟合，得到中心值为 $1.916 \pm 0.003\text{m}$ ，与理论值 1.9m 的相对误差为 0.8421%，分布的方差为 0.50。这说明椭圆面位形的温度分布具有对称性，以 $R = 1.916 \pm 0.003\text{m}$ 为对称轴。

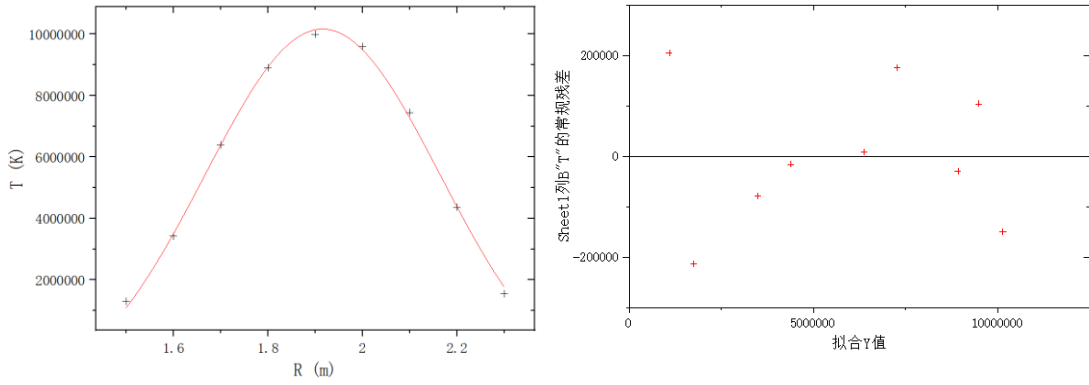


图 12 椭圆位形面径向温度分布拟合图与残差图

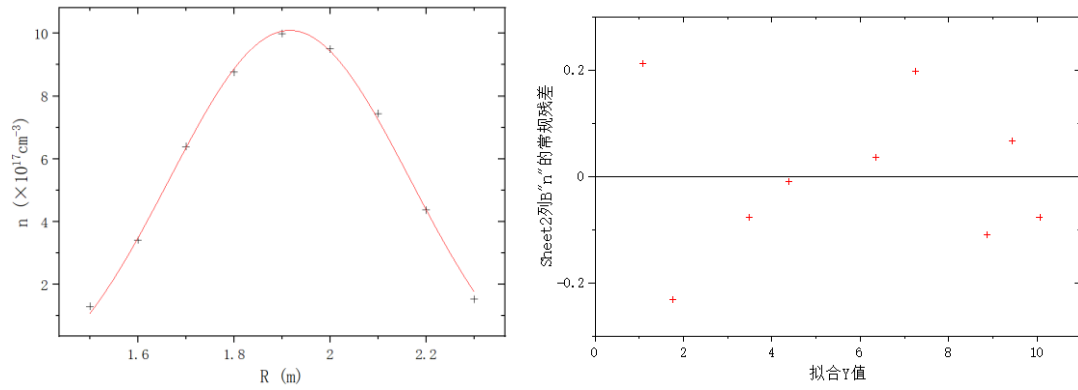


图 13 椭圆位形面径向密度分布拟合图与残差图

对椭圆面位形密度分布进行高斯函数拟合，如图 13 所示。
拟合结果为：

$$R^2 = 0.997$$

$$\bar{R} = 1.916 \pm 0.003\text{m}$$

$$\sigma = 0.50 \pm 0.02$$

$$A = (7.59 \pm 0.8) \times 10^6$$

由此可见，椭圆面位形的密度分布也较好地符合高斯函数的形式，其中心位置与方差与温度分布相近。

对三角形面温度分布进行拟合：

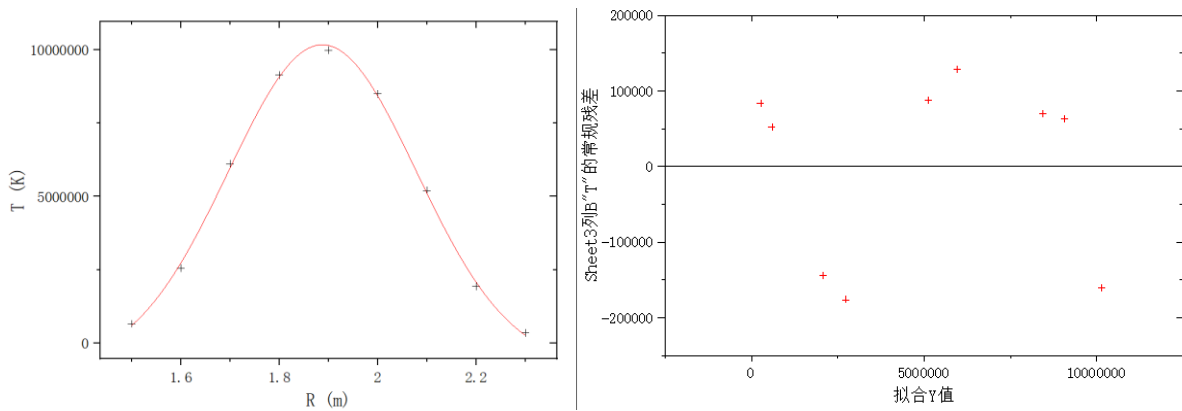


图 14 三角形位形面温度拟合图与残差图

$$R^2 = 0.998$$

$$\bar{R} = 1.888 \pm 0.002\text{m}$$

$$\sigma = 0.382 \pm 0.011$$

$$A = (5.25 \pm 0.2) \times 10^6$$

由此可见，三角形位形的温度分布也较好地符合高斯函数的形式，温度分布沿中心值 $\bar{R} = 1.888 \pm 0.002\text{m}$ 对称分布，在实验记录中的直观判断有误。

但高斯函数的方差与椭圆面位形存在差距，其方差更小，高斯函数波形更为尖锐，因此温度梯度更大。而三角形面位形与椭圆面位形的峰值接近（相对差距为0.08%），因此在腔体附近，三角面位形的温度更低，有利于包含仪器腔壁。

三角形面位形的拟合残差图呈均匀分布，其残差变化范围约400000K，约为峰值的4.007%，拟合误差较小。

粒子轨迹：

初始入射位置将影响粒子环向截面的轨迹，随着入射位置绝对值的增大，即远离环向截面的中心，粒子轨迹面积越大。

对于捕获轨道，其粒子环向截面的轨迹仅存在于弱场一侧，而在强场一侧不会产生捕获轨道。这是磁矩守恒的结果：由式（1）可见，当粒子处于弱场时，为保证 μ 一定，则垂直磁场方向的速度 v_{\perp} 也很小，这导致粒子无法进入磁场更大的区域，在磁场较小的区域内振荡，形成“香蕉”轨道；而当粒子处于强场时，其垂直磁场方向速度 v_{\perp} 很大，可以轻易地进出弱场区域，因此绕着磁力线进行环向运动，形成更为“饱满”的通行轨道。

因此，捕获轨道与通行轨道的形成与粒子初始入射位置有关。当粒子初始位置位于强场区域，其初始磁矩 μ 较大，垂直磁场方向的速度 v_{\perp} 也很大，很难形成捕获轨道（“香蕉”轨道）；而当粒子初始时处于弱场区，其磁矩较小，垂直磁场方向的速度 v_{\perp} 较小，难以进入强场区，更容易形成捕获轨道。

除去初始入射位置的影响，粒子的运动速度也是影响轨道类型的重要因素。例如，在最后一组实验中，尽管初始处于弱场区，但由于粒子初始速度足够大，也能形成近似“饱满”的通行轨道。

关于等离子体电子温度、密度的测量以及其满足的分布：

查阅文献得知[1]，核聚变反应堆中电子温度与密度的测量方法主要有汤姆孙散射法、束发射光谱仪与电子回旋辐射测量（ECE）。

汤姆孙散射法通过施加一束激光，等离子体内的加速电子产生再辐射，由此获得散射谱，分析电子密度与温度[1,2]。其中电子回旋辐射测量是通过测量反应堆内部等离子体电荷做回旋运动产生的电磁辐射，进而通过辐射的强度计算电子密度与温度[3]。束发射光谱仪通过观察由注入的中性束发出的荧光测量局部的密度涨落。当中性粒子与等离子体相互作用时，其中一部分被激发并经历自发辐射退激[1]。

模拟程序中提及的朗缪尔探针法为测量等离子体电子温度的接触式方法，但由于核聚变反应装置的超高温，其并不适合应用于此。

由文献中的实验数据可知，电子温度与密度的分布存在梯度，其变化趋势与模拟程序的结果接近。其梯度可以通过多项式拟合求出，而并不一定为模拟程序中如此贴合的高斯分布。

七、 实验结论：

本实验基于 IILab-x 虚拟仿真平台的“托卡马克等离子体物理虚拟仿真实验”，学习了托卡马克装置的基本结构。

本实验进一步探究了不同磁场位形面（椭圆位形、三角位形）对应的温度、密度分布，得出相同位形面的条件下，温度与密度分布形式相似，均服从于高斯分布，但不同位形面对应的高斯函数的参数值不同。通过拟合得到椭圆位形的 $\sigma = 0.50 \pm 0.02$ ，三角位形的 $\sigma = 0.382 \pm 0.011$ ，三角位形的函数形状更尖锐，温度与密度梯度更大。

本实验根据东方超环装置实际位形——三角位形面，探究单个粒子在其中的运动，探究了粒子初始入射位置对运动轨道的形成、观察到了捕获轨道与通行轨道，从磁矩守恒的角度对上述实验现象进行了分析，总结了形成捕获轨道与通行轨道的影响因素——初始入射位置与初始速度。

八、 参考文献：

[1] 王荣良. EAST 宽频电子温度涨落特征的实验研究[D]. 安徽:中国科学技术大学,2021.

[2] 谢爱根,赵君煜,方自深,等. HT-7 汤姆逊散射测量电子温度的相对论修正[J]. 强激光与粒子束,2000,12(4):476-478.

[3] 徐德明,曹建勇,丁玄同. HL-1M 托卡马克中的电子温度空间分布[J]. 核聚变与等离子体物理 ,2000,20(1):38-42,47.
DOI:10.3969/j.issn.0254-6086.2000.01.007.