

目录

1 实验综述	3
1.1 核聚变原理	3
1.2 磁约束原理	3
1.3 磁约束轨道中带电粒子的运动特征	3
1.4 虚拟仿真实验	4
2 实验内容	4
2.1 实验数据	4
2.1.1 不同磁面位形径向温度分布	4
2.1.2 不同磁面位形径向密度分布	7
2.2 粒子轨迹环向截面分析	9
2.2.1 探究入射位置对粒子轨迹的影响	9
2.2.2 探究 V03 对粒子轨迹的影响	11
2.3 结果与误差分析	12
2.3.1 不同磁面位形径向温度分布	12
2.3.2 不同磁面位形径向密度分布	12
2.3.3 粒子轨迹环向截面分析	12
2.3.4 误差分析	12
3 实验拓展	13
3.1 核聚变反应发生以及产生能量增益的条件等	13
3.2 磁约束环形装置中的粒子运动	13
3.3 托卡马克内等离子体中的 α 粒子与电子运动轨迹	13
4 参考文献	14

1 实验综述

1.1 核聚变原理

核聚变反应是指两个较轻的原子核在一定条件下结合成一个较重的原子核，并伴随着大量能量释放的过程。最容易发生的核聚变反应是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，放出 17.6 兆电子伏特的能量。具体方程式为：



原料中的氘在海水中大量存在；而氚的半衰期为 12 年，无法在自然界存在，但可以通过中子与锂元素的核反应制备。具体方程式为：



1.2 磁约束原理

磁约束核聚变的原理是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（“聚变三乘积”）：

$$nT\tau > 3 \times 10^{21} m^{-3} s Kev \quad (3)$$

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。

1.3 磁约束轨道中带电粒子的运动特征

磁约束装置中带电粒子的轨道较为复杂，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。其中，快速拉莫回旋运动是带电粒子在磁场中的特有运动方式，其频率与粒子的速度、磁场强度和粒子的电荷质量比有关。在磁约束装置中，带电粒子的快速拉莫回旋运动使得粒子在磁场中形成环状轨道，从而实现了等离子体的约束。

此外，当带电粒子沿着磁力线运动时，由于 $v = v_{\perp}^2/B$ ，当粒子进入磁场强度较大的区域时，其垂直于磁场方向的速度会增加，而平行于磁场的速度则会减小，这种现象被称为“磁镜”效应。这种效应会导致初始垂直速度较大的粒子的平行速度可能减为零，从而被沿磁力线“反弹”并“困在”磁场较弱的一侧，这类粒子被称为“捕获粒子”或

“香蕉粒子”；而初始垂直速度较小的粒子的平行速度受影响较小，可以沿磁力线运动，覆盖整个磁面，这些粒子被称为“通行粒子”。单个带电粒子的轨迹由其磁漂移运动和沿磁力线的运动共同决定，形成“香蕉轨道”或“通行轨道”，其偏离磁面的距离与粒子的速度成正比。

1.4 虚拟仿真实验

由于磁约束装置运行在超低温、高真空和强磁场环境下，其建设耗资巨大，实验运行费用高昂，因此非常有必要引入虚拟仿真实验。虚拟仿真实验可以将等离子体物理过程与实体实验场景关联在一起，提供功能模块化的虚拟实验空间，也可以提供可变磁位形、多参数调节条件和任意指向实验检测探针，实现实体实验不具备且难以完成的教学和探索功能

2 实验内容

2.1 实验数据

2.1.1 不同磁面位形径向温度分布

表 1: 三角形磁场位形，极向场电流 $=0.96$, $a_0 = 1e7$, $b_0 = 1e18$, $a_1 = 0.04$, $b_1 = 0.04$, $Z=0.01m$

R/m	1.48	1.60	1.74	1.88	2.00	2.10
T/K	612955.1	2725076	7350935	9968944	8809820	5548654
R/m	1.57	1.63	1.77	2.21	2.22	2.30
T/K	1978896	3608320	8205153	1888565	1888565	1234567

由此绘制出三角形磁场位形位形径向温度分布如下图所示：

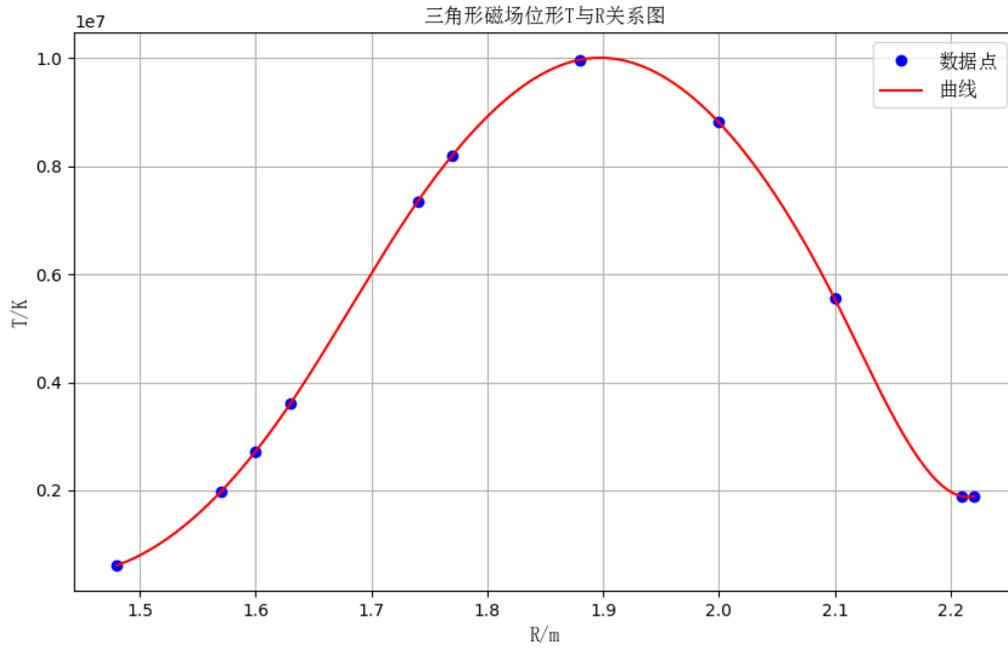


图 1: 三角形磁场位形径向温度分布

表 2: 圆形磁场位形, 极向场电流 =1.2, $a_0 = 1e7$, $b_0 = 1e18$, $a_1 = 0.05$, $b_1 = 0.05$, $Z=0.01m$

R/m	1.49	1.50	1.51	1.60	1.74
T/K	680930	813092.9	886730.3	2388688	6752895
R/m	1.88	2.00	2.10	2.16	2.22
T/K	9728550	9567727	7295620	5473202	3146909

由此绘制出圆形磁场位形位形径向温度分布如下图所示

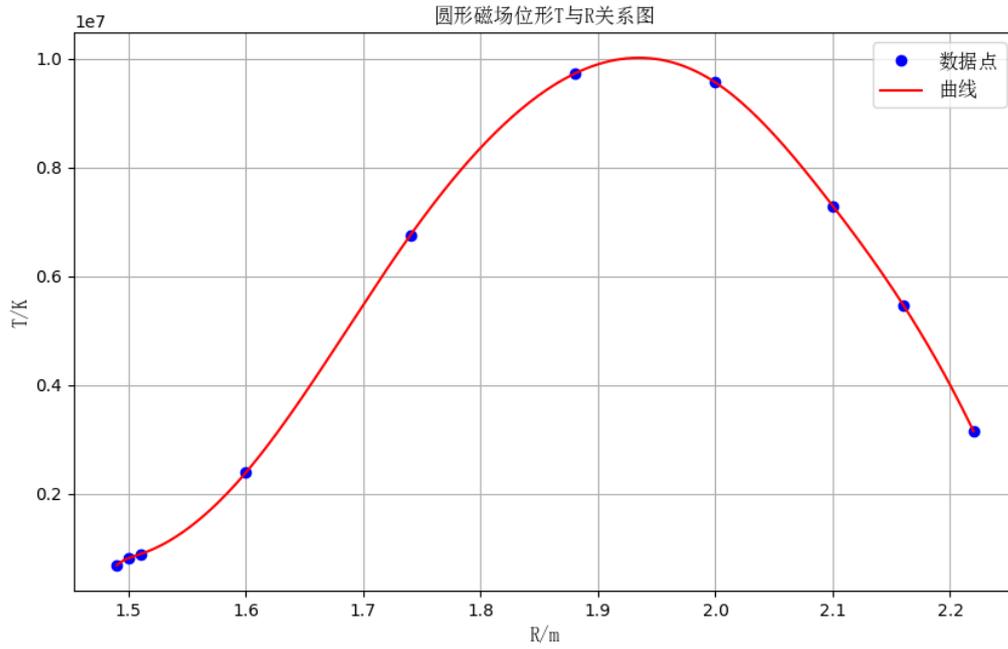


图 2: 圆形磁场位形径向温度分布

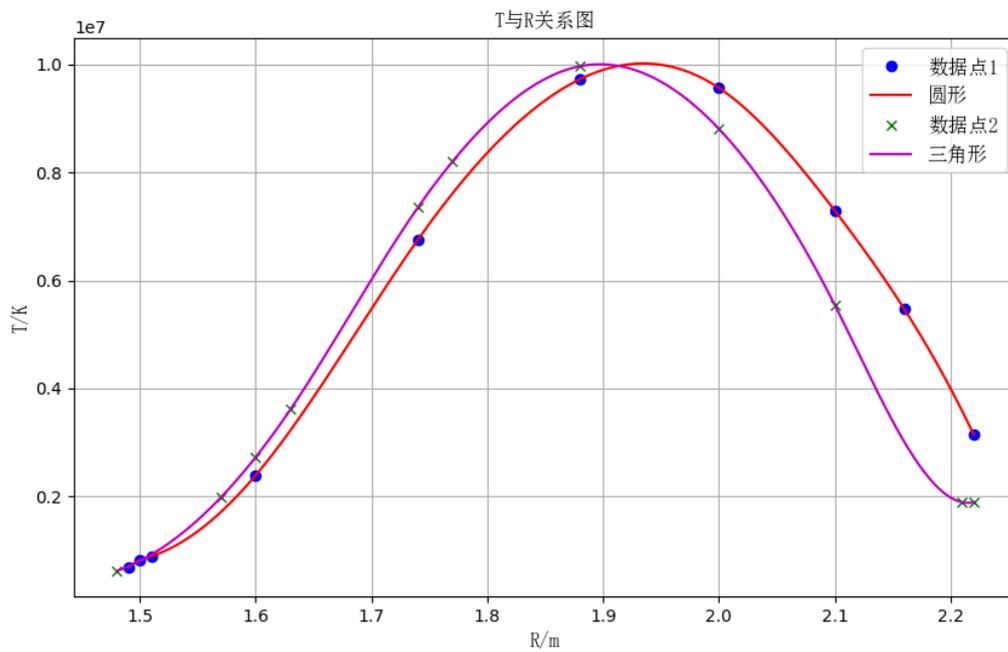


图 3: 径向温度分布对比

2.1.2 不同磁面位形径向密度分布

表 3: 三角形磁场位形, 极向场电流 $=0.96$, $a_0 = 1e7$, $b_0 = 1e18$, $a_1 = 0.04$, $b_1 = 0.04$, $Z=0.22m$

R/m	1.46	1.49	1.59	1.65	1.70	1.76
$n_e/10^{17}cm^{-3}$	0.30305662	0.5719372	2.029991	3.438995	4.919459	6.476539
R/m	1.82	1.86	1.94	2.00	2.08	2.21
$n_e/10^{17}cm^{-3}$	7.7922	8.214297	8.007621	6.86461	4.566011	1.15079

由此绘制出三角形磁场位形等离子体径向密度分布如下图所示:

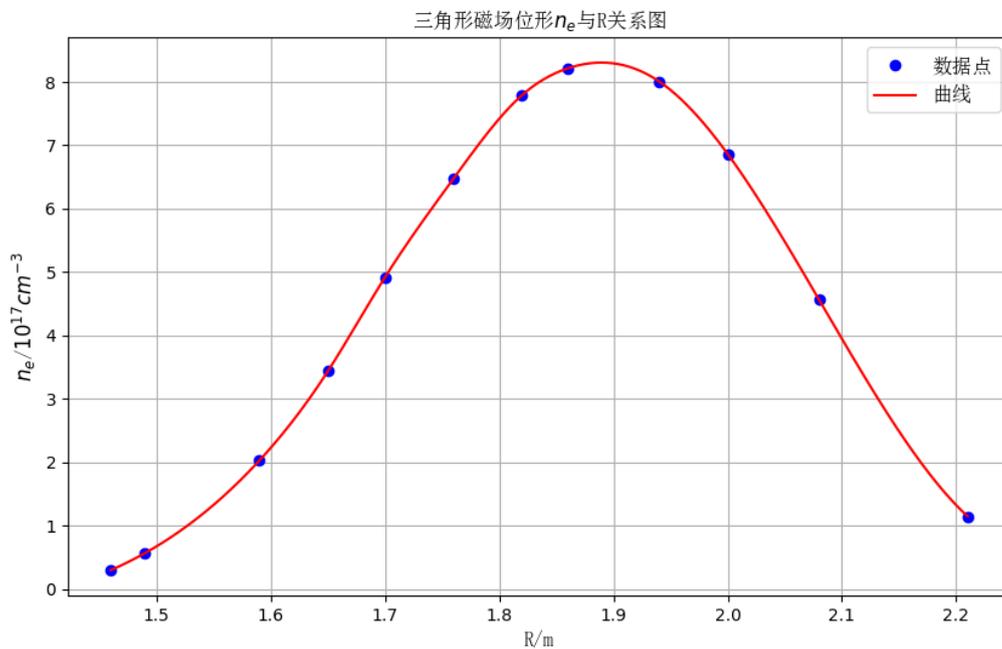


图 4: 三角形磁场位形等离子体径向密度分布

表 4: 圆形磁场位形, 极向场电流 $=1.2$, $a_0 = 1e7$, $b_0 = 1e18$, $a_1 = 0.05$, $b_1 = 0.05$, $Z=0.22m$

R(m)	1.57	1.62	1.65	1.68	1.70	1.76
$n_e/10^{17}cm^{-3}$	0.9171371	1.673632	2.389521	2.936417	3.37149	4.398507
R(m)	1.82	1.86	1.94	2.00	2.08	2.12
$n_e/10^{17}cm^{-3}$	5.853618	6.1228	6.554659	6.129968	5.345997	3.962249

由此绘制出圆形磁场位形等离子体径向密度分布如下图所示:

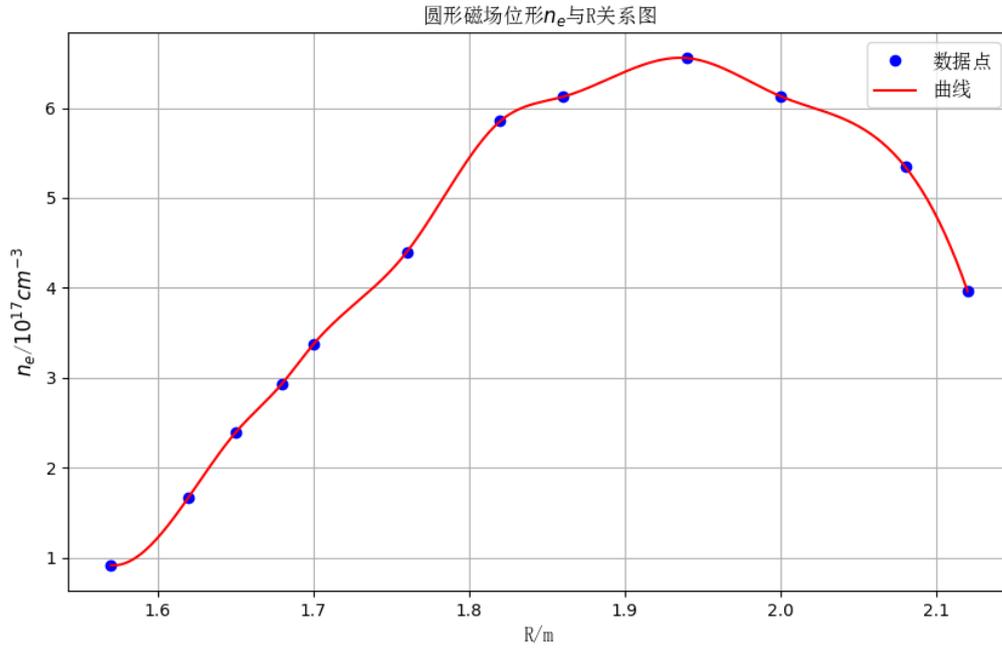


图 5: 圆形磁场位形等离子体径向密度分布

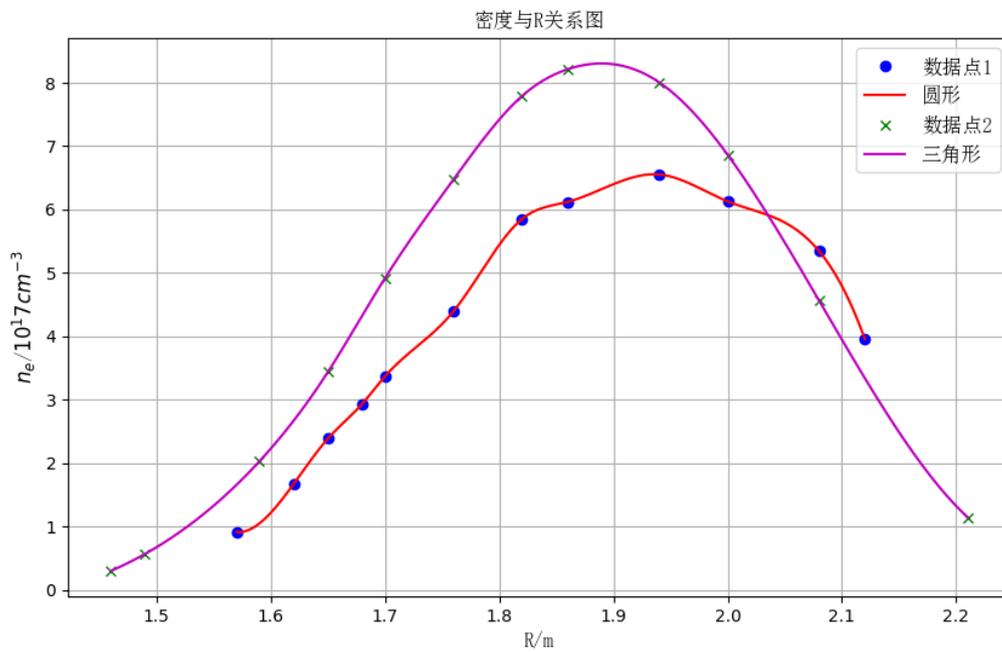


图 6: 径向密度分布对比

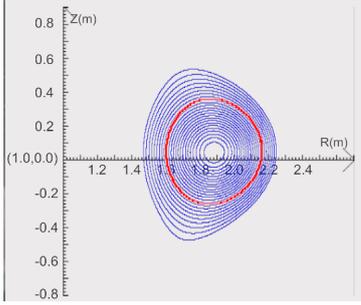
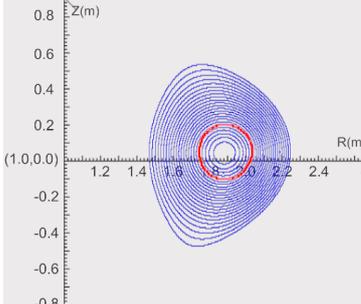
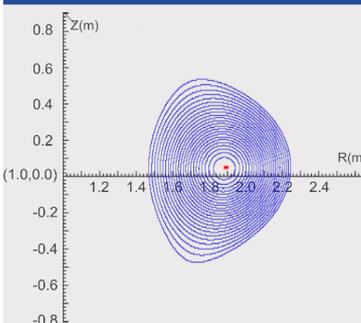
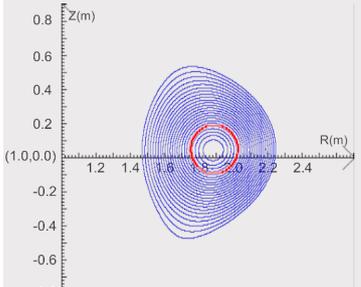
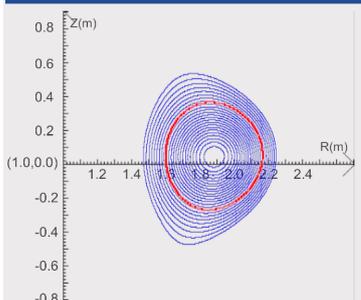
2.2 粒子轨迹环向截面分析

2.2.1 探究入射位置对粒子轨迹的影响

表 5: $V01=1.00E+04$ m/s, $V02=5.00E+05$ m/s, $V03=5.00E+05$ m/s

编号	粒子类型	入射初始位置 (m)	$\Delta R(m)$	$\Delta Z(m)$	捕获/通行	纵横比
1	He	-0.3	0.56	0.72	通行	1.285714286
2	He	-0.15	0.32	0.36	通行	1.125
3	He	0	0.02	0.02	通行	1
4	He	0.15	0.28	0.32	通行	1.142857143
5	He	0.3	0.60	0.68	通行	1.133333333

表 6: 图片与编号对应

编号	图片
1	 <p>A plot showing particle trajectory ring cross-sections. The vertical axis is labeled Z(m) and ranges from -0.8 to 0.8. The horizontal axis is labeled R(m) and ranges from 1.0 to 2.4, with a tick mark at (1.0,0.0). The plot displays several concentric blue rings. Two red dashed circles are overlaid on the rings, centered at approximately R=1.8, Z=0.</p>
2	 <p>A plot showing particle trajectory ring cross-sections. The vertical axis is labeled Z(m) and ranges from -0.8 to 0.8. The horizontal axis is labeled R(m) and ranges from 1.0 to 2.4, with a tick mark at (1.0,0.0). The plot displays several concentric blue rings. Two red dashed circles are overlaid on the rings, centered at approximately R=1.8, Z=0.</p>
3	<p>粒子轨迹环向截面图</p>  <p>A plot showing particle trajectory ring cross-sections. The vertical axis is labeled Z(m) and ranges from -0.8 to 0.8. The horizontal axis is labeled R(m) and ranges from 1.0 to 2.4, with a tick mark at (1.0,0.0). The plot displays several concentric blue rings. A single red dot is located at the center of the rings, approximately at R=1.8, Z=0.</p>
4	<p>粒子轨迹环向截面图</p>  <p>A plot showing particle trajectory ring cross-sections. The vertical axis is labeled Z(m) and ranges from -0.8 to 0.8. The horizontal axis is labeled R(m) and ranges from 1.0 to 2.4, with a tick mark at (1.0,0.0). The plot displays several concentric blue rings. Two red dashed circles are overlaid on the rings, centered at approximately R=1.8, Z=0.</p>
5	<p>粒子轨迹环向截面图</p>  <p>A plot showing particle trajectory ring cross-sections. The vertical axis is labeled Z(m) and ranges from -0.8 to 0.8. The horizontal axis is labeled R(m) and ranges from 1.0 to 2.4, with a tick mark at (1.0,0.0). The plot displays several concentric blue rings. Two red dashed circles are overlaid on the rings, centered at approximately R=1.8, Z=0.</p>

2.2.2 探究 V03 对粒子轨迹的影响

表 7: 入射初始位置 =0.22m, V01=1.00E+04 m/s, V02=5.00E+05 m/s

粒子类型	V03 m/s	$\Delta R(m)$	$\Delta Z(m)$	捕获/通行	纵横比
He	1.00E+04	0.06	0.44	捕获	7.3333333333
He	1.00E+05	0.40	0.40	通行	1
He	9.00E+06	0.32	0.36	通行	1.125
He	5.00E+04	0.38	0.44	捕获	1.15789
He	3.00E+04	0.18	0.40	捕获	2.222222222

表 8: 图片与编号对应

编号	图片
1	
2	
3	
4	粒子轨迹环向截面图 <input type="checkbox"/>
5	粒子轨迹环向截面图 <input type="checkbox"/>

2.3 结果与误差分析

2.3.1 不同磁面位形径向温度分布

由绘制的图形可以看出，不同磁面位形径向温度分布都遵循了高温等离子体中心、低温边缘的分布规律。在三角形磁场位形中，等离子体中心温度较高，边缘温度较低，且高温出现在径向距离小处；在圆形磁场位形中，等离子体中心温度较高，边缘温度较低，且高温出现在径向距离大处。这与磁约束装置中的等离子体温度分布规律相符，说明虚拟仿真实验的模拟结果是合理的。

2.3.2 不同磁面位形径向密度分布

从图中可以看出，不同磁面位形等离子体径向密度分布都遵循了高密度等离子体中心、低密度边缘的分布规律。在三角形磁场位形中，等离子体中心密度较高，边缘密度较低，且总体上来说密度都比圆形磁场位形的密度高；在圆形磁场位形中，等离子体中心密度较高，边缘密度较低，且总体上来说密度都比三角形磁场位形的密度低。这可能说明了三角形磁场位形对等离子体的约束效果更好，能够使得等离子体更加集中，密度更高。

2.3.3 粒子轨迹环向截面分析

根据截面图分析，

1. 当粒子性状表现为通行时，初始位置偏离越大，环向截面图中所体现的粒子运动半径越大。这是因为在磁约束条件下，产生的位置偏差越大，磁矩一定时，截面向所受的磁场力就越小，由洛伦兹力公式变形 $R = \frac{mv}{Bq}$ ，纵向半径 R 会增大。
2. 当粒子性状表现为捕获时，V03 对粒子轨迹的影响较大。当 V03 较小时，粒子容易被捕获，而当 V03 较大时，粒子容易通行。

2.3.4 误差分析

在温度与密度测量中，主要是读取仿真得到的数据，所以误差的主要来源是仿真软件的误差。

在粒子轨迹环向截面分析中，也和上面一样受到仿真精度的影响，此外由于纵横距离是肉眼得出的，还存在读数的偶然误差。

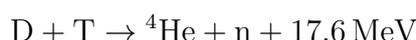
3 实验拓展

3.1 核聚变反应发生以及产生能量增益的条件等

核聚变反应发生以及产生能量增益的条件主要包括以下几点：

- **高温：**核聚变反应需要在极高的温度下进行，以克服原子核之间的静电斥力。通常要达到数千万到上亿摄氏度。
- **高密度：**反应物质的密度需要足够高，以增加粒子碰撞的概率。
- **足够的约束时间：**反应物质需要在高温高密度的状态下保持足够长的时间，以确保足够多的核反应发生。
- **适当的燃料：**常见的核聚变燃料包括氘（D）和氚（T），它们容易发生核聚变反应。

最常见的核聚变反应是氘和氚的反应，其表达式如下：



其中，D 表示氘核（ ${}^2\text{H}$ ），T 表示氚核（ ${}^3\text{H}$ ）， ${}^4\text{He}$ 表示氦核，n 表示中子，17.6 MeV 表示释放的能量。

3.2 磁约束环形装置中的粒子运动

在磁约束环形装置中，如果仅有环向磁场，等离子体中不同电性的粒子将做如下运动：

- **正电性粒子：**在环向磁场中，正电性粒子将受到洛伦兹力的作用，沿着磁场线做螺旋运动。
- **负电性粒子：**负电性粒子在环向磁场中也会受到洛伦兹力的作用，沿着磁场线做螺旋运动，但与正电荷方向相反。

我认为在仅有环向磁场的情况下，等离子体中的不同电性粒子都会沿着磁场线做螺旋运动，但它们的螺旋方向相反。

3.3 托卡马克内等离子体中的 α 粒子与电子运动轨迹

在托卡马克装置中，等离子体中的电子与聚变产生的 α 粒子（氦核）的运动轨迹有显著不同。

- **电子：**电子的质量较小，电荷为负。在托卡马克的环向磁场和极向电场的共同作用下，电子会沿着磁场线做螺旋运动，同时由于其质量较小，电子的回旋半径较小，运动轨迹更加紧密。
- **α 粒子：** α 粒子（氦核）的质量较大，电荷为正。在相同的磁场和电场作用下， α 粒子也会沿着磁场线做螺旋运动，但由于其质量较大，回旋半径较大，运动轨迹相对较宽。

原因：

- **质量差异：**电子的质量远小于 α 粒子的质量，因此在相同的洛伦兹力作用下，电子的加速度更大，回旋半径更小。
- **电荷差异：**电子带负电，而 α 粒子带正电，因此它们在磁场中的运动方向相反，但由于质量差异，轨迹的紧密程度不同。

总的来说，电子在托卡马克中的运动轨迹较为紧密，而 α 粒子的运动轨迹较为宽松，这是由于它们的质量和电荷不同所导致的。

4 参考文献

参考文献

[1] 实验指导书-托卡马克等离子体物理虚拟仿真实验.