

浙江大学

物理实验报告

实验名称：托卡马克核聚变等离子体物理虚拟仿真实验

指导教师：肖婷

班级号：\

专业：计算机科学与技术

班级：混合 1901

姓名：段皦一

学号：3190105359

实验日期：10 月 10 日 星期二 下午

【实验目的】

磁约束核聚变是未来利用清洁能源的重要模式之一，其燃料氘可从海水中提取，储量丰富。与传统的核裂变相比，其实验装置没有核泄漏的危险，且反应产物没有放射性污染，因此被认为是最终解决人类社会发展能源需求的潜在方案之一。目前国际领先的磁约束装置是托卡马克，是一种利用磁约束实现受控核聚变的环形容器；正在建造中的国际热核聚变反应堆项目（ITER）也采用托卡马克位型，这是迄今最大的国际合作项目，由中国、欧盟、印度、韩国、日本、俄罗斯、美国七方合作参加，其建设和运行耗资约 200 亿美元。国内已经展开了相关的研究，已实际运行的重要的实验装置有 EAST，HL-2A 等；磁约束聚变等离子体物理理论和模拟亦是浙江大学物理学系的特色学科之一。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。本科生在学习期间，能够直接了解和了解磁约束核聚变实验装置和实验运行的机会非常少，实验中的实验现象也无法直接观察到。

高校承担着人才培养的重任。浙江大学在本科生中开设了磁约束核聚变方面的基础课程，包括等离子体物理基础和核聚变工程的基本理论。依托物理学系等离子体物理学科优势，并与中国科学院合肥分院等离子体物理研究所合作，基于真实的实验数据和前沿的理论模型以及大规模数值模拟，设计仿真实验，帮助学生直观认识和理解磁约束核聚变中的等离子体物理过程，分析各种仪器构造、物理参数对聚变过程的影响，从而更好地理解专业背景和消化专业知识，从而吸引有潜质的人才，为我国培养将来参与并主导 ITER 实验所需的大量人才，锻炼等离子体物理实验的操作经验。该仿真实验亦可满足其它学科学生对这一实验装置的一般性了解。

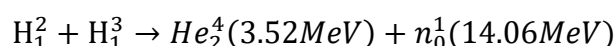
通过本虚拟仿真实验，我们能够对于“人造小太阳”托卡马克核聚变装置有一个更加深入的了解；在进行获取密度分布取值，温度分布取值等实验操作时，我们可以对实验的原理有一个更加清晰地认知。

【实验原理】（电学、光学画出原理图）

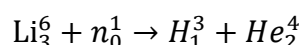
实验原理

1、核聚变反应

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，并放出 17.6 兆电子伏特的能量



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



以上反应的原料丰富，聚变产物 清洁无辐射。因此，聚变能源被认为是人类社会发
展能源需求的最终解决方案。

2、磁约束原理

核聚变反应需要在一亿度的高温下进行，此时燃料氘氚完全电离，形成等离子体。怎样约束高温的等离子体，维持其高密度的状态使其发生聚变反应，是一个国际难题。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”）

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

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； Γ_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。劳逊判据表征了由聚变反应产生的阿尔法粒子对等离子体自加热，维持等离子体自持燃烧的条件。

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（图 1），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。

$$\nabla P = \mathbf{J} \times \mathbf{B} / C$$

其中，P、J、B 分别为等离子体压强，电流和磁场。在环形装置中以上磁流体力学平衡并可由 Grad-Shafranov 方程（GSE）描述。GSE 是磁约束聚变装置设计的基础；改变等离子体的电流、磁场分布，其约束等离子体的径向压强分布也会相应的改变，共同构成了磁约束等离子体的平衡分布。

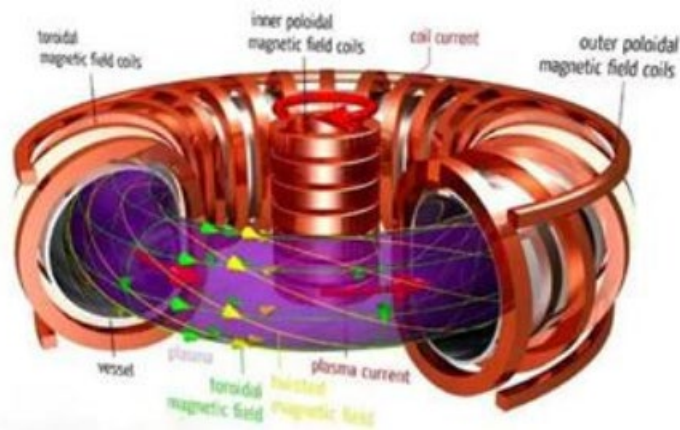


图1 托卡马克拉型图

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。粒子的磁场曲率漂移和梯度漂移（合称磁漂移）表示为式(5)所示。

$$\mathbf{V}_B = \frac{m(v_{\perp}^2 + 2v_{\parallel}^2)}{2q} \cdot \frac{\mathbf{B} \times \nabla B}{B^3}$$

可以看到，其速度与其能量呈正相关，垂直于磁场及其曲率方向，并与电荷符号有关。因此，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（ $V_E = cE \times B/B^2$ ，其中是电荷分离产生的电场）损失，并引起放电失败。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。又例如，聚变产生的阿尔法粒子，具有 3.52MeV 的高能量，其轨道半径要显著大于离子的轨道。

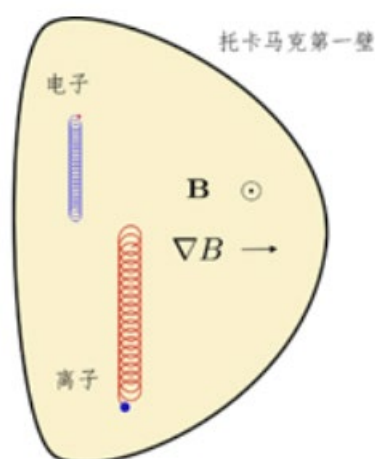


图 2 电子和离子会由于电荷相反，磁漂移方向相反，导致电荷分离

此外，当带电粒子沿着磁力线运动时，由于磁矩守恒 ($v \equiv v_{\perp}^2/B$)，粒子沿着磁力线运动到磁场较强区域时（强场侧，图 3），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”。

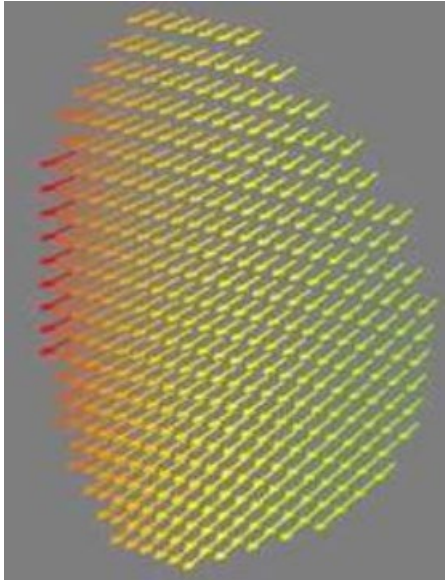


图 3 真空室内环向截面上的磁场分布三维示意图，
颜色表示磁场数值大小，红色表示磁场强，
绿色表示磁场弱，磁场方向由箭头所示。

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”。单个带电粒子的轨道由其磁漂移运动和沿着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速度成正比。对于同样的能量和质量，捕获粒子偏离磁面的距离更大。“捕获粒子”和“通行粒子”对应不同的特征频率，对不稳定性的影响、反常输运等性质不同。因此，在托卡马克装置的复杂磁场几何位型下，理解单个带电粒子的轨道特征，是理解等离子体的复杂动力学行为的基础。

4、等离子体微观湍流与输运

约束等离子体具有芯部压强高、边缘压强低的特点。这个等离子体不均匀性所携带的自由能，会激发等离子体的集体振荡（即不稳定性），如起静电的“漂移波”湍流，其在等离子体的不同参数区间具有不同的自由能来源，如离子温度梯度模、捕获电子模等，因而具有不同的偏振特性。这些漂移波不稳定性，会引起等离子体横越磁场的反常输运，从而导致约束性能下降。等离子体中发生的非线性自组织行为，如带状流激发等，会导致漂移波湍流的饱和；其过程是通过漂移波湍流非线性激发带状流而达到的，在此过程中湍流被带状流散射到稳定的短波长区域，从而被抑制。这个非线性过程，决定了磁约束聚变装置中的湍流的强度，从而决定了磁约束聚变装置的约束水平和经济效益。

本实验根据托卡马克磁约束核聚变中等离子体平衡状态的基本原理出发，通过仿真展示等离子体在真空室内三维空间分布，允许学生自主选择最外磁面位形、改变等离子体电流和密度分布等参数，使用诊断方法进行交互式测量参数分布轮廓，并根据测量结果归纳总结实验规律。另一方面，结合实际实验装置参数，仿真再现等离子体平衡场中的单粒子运动轨迹，需要学生设置粒子类型、初始入射速度等参数，测量粒子运动轨迹，并判断其属于“捕获”粒子或“通行”粒子。

预习部分 认真书写

【实验内容】（重点说明）

1. 全面探索实验条件下的各种参数，包括常用的核聚变装置的各种磁场位形，磁场大小，初始温度分布，初始密度分布；

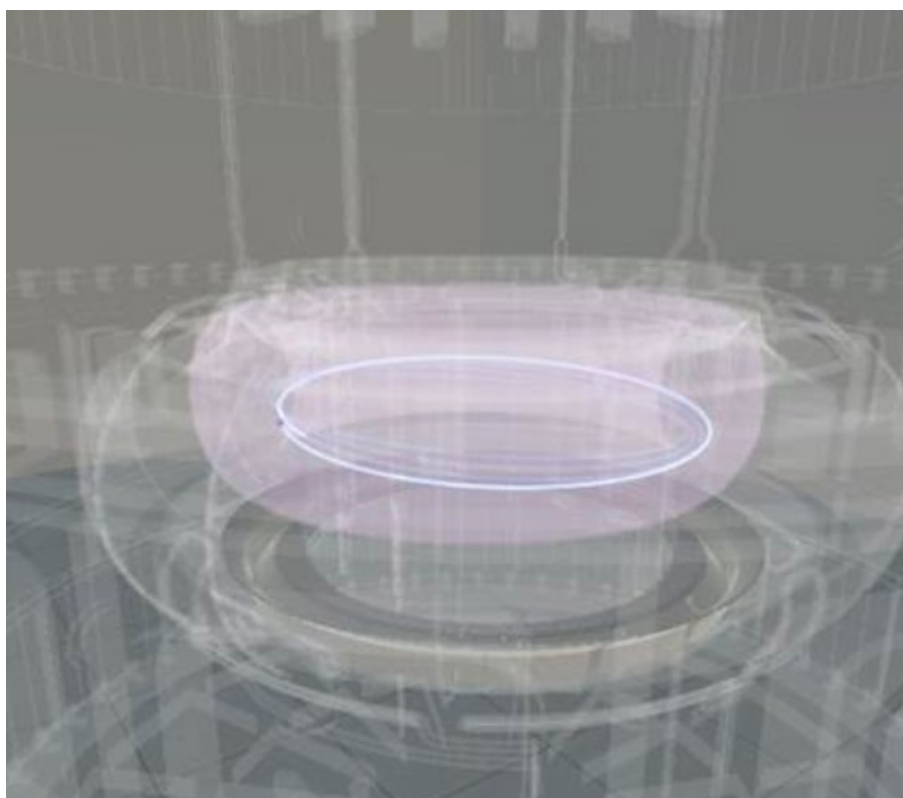
进入实验界面后，先对实验环境与设备进行一个简要的浏览，点击装置，对装置的用途有一个大体的认知，比如 EAST 主机、主要诊断设备等。

接下来，把操作装备组装好，进入主控室在电脑上进行实验的初始化：检查实验装置完好→启动冷却设备、真空系统等→进行等离子体平衡态实验。

2. 模拟单粒子在复杂磁场几何位型中的运动过程，显示粒子运动轨迹；

选择使用给定磁场，或者使用上一步平衡态仿真实验得到的实验条件（磁场分布），进行带点单粒子运动轨迹测量实验。设定粒子类型（D 离子、alpha 粒子 He、电子），设置粒子入射初始速度与入射位置半径。

点击开始运行，显示粒子运动轨迹。观察粒子 3D 运行轨迹（交互式），可以看见粒子运动导心基本沿着磁力线进行，同时显示局域粒子做螺旋运动。



改变粒子类型，粒子入射速度与初始位置，总结不同粒子的运动轨迹参数随不同入射速度大小或方向的变化规律（交互式）。

3. 基于大规模数值模拟结果，考虑线性和非线性物理过程，真实还原聚变反应堆中物质密度扰动，温度扰动，生成剖面分布图，或三维动画投影显示物质分布、温度分布和磁力线分布。

【实验器材及注意事项】

实验仪器

1. 实验仪器设备

真空室：由 16 个 D 形截面的不锈钢扇形焊接组成，提供为热核聚变反应提供了超高真空的运行环境。周围窗口提供抽气、诊断、加热电流驱动及冷却通道。

超导纵场线圈：由 16 个 D 形超导线圈沿环形均匀分布组成，可在等离子体中心产生 3.5T 的环向磁场。

超导极向场线圈：由上下对称分布的中心螺管和四对大线圈组成，提供极向磁场。

外真空杜瓦：为圆桶状结构，它分为圆顶盖、中部环体和基座三个部分。外真空杜瓦主要为极向场、纵场、真空室等部件提供真空、低温环境。

2. 诊断系统

汤姆逊散射仪：目的是测量等离子体的电子温度和密度，为非接触式诊断系统，对等离子体几乎无干扰。其工作原理是将一束激光（即入射电磁波）照射到等离子体内，等离子体中作加速运动的带电粒子在入射电磁波的作用下会发生散射而产生再辐射，通过还原散射谱的形状获得温度测量、通过能量绝对强度来获得电子密度测量。

快动探针：可测量等离子体中电子温度和电子密度、粒子流量、平行等离子体流、湍流输运等，为接触式诊断系统。移动速度可达到 2 米/秒，测量等离子体参量轮廓时间间隔可达 300 毫秒。

电磁测量：电磁测量系统是托卡马克运行、等离子体反馈控制系统和共振磁扰动线圈系统的基本诊断。电磁测量传感器分布在真空室内，提供包括等离子体电流、极向场电流、磁通量、磁场等测量。

注意事项

1. 实验中，首先要对实验的装置模块进行遍历，这是计入虚拟仿真实验分数的。
2. 虚拟实验中，启动实验冷却设备，开启抽真空系统等操作与准备点火运行一气呵成。但是应该注意到，在实际的实验背景下，准备的阶段的冷却降温、抽真空大约需要耗时间一个多月，仿真实验冷却、抽真空已经按照真实实验的实验参数条件进行预设。
3. 在等离子平衡态实验中， a_0 、 b_0 的范围分别为 $[1e6, 1e8]$ ， $[1e17, 1e19]$ 。而 a_1 、 a_2 的范围视极向场电流的大小而定，大小为极向场电流/24。
4. 绘制 $T-R$ ， n_e-R 曲线时，注意要取径向的一组点集进行分析，否则变量不唯一，无法进行有效的分析。
5. 本实验为探究性试验，通过改变参数的大小总结出一定的规律。而这其中，如何有序地改变变量就成为了本实验的一大关键。总结起来，改变实验变量运用的核心思想就是控制变量法，无论怎么变化，都要保证相邻实验组之间有且只有一个变量。其次，为了让实验达到效率与准确性兼顾，实验参数的变化梯度不能过于稀疏，也不宜过度稠密。

数据结果 不得涂改

【实验数据与结果】

1. 等离子平衡态仿真

1.1 磁面位形为三角形面

1.1.1 第一组

相关参数

磁面位形

三角形面

极向场电流

1.2

0.5~2 T*m
 $I \cdot \mu_0$ (I为电流, μ_0 为真空磁导率)

温度轮廓参数

密度轮廓参数

a0

1e6

[1e6,1e8]

b0

1e17

[1e17,1e19]

a1

0.05

励磁电流/24

b1

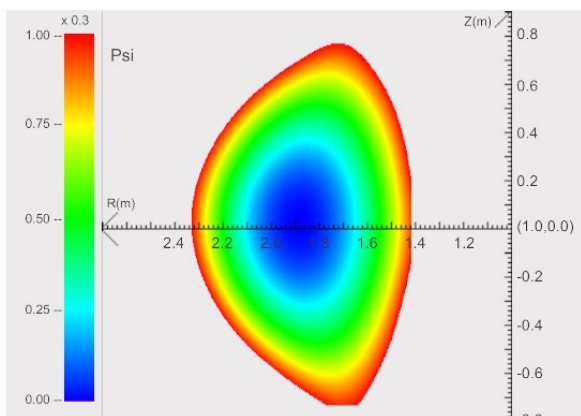
0.05

励磁电流/24

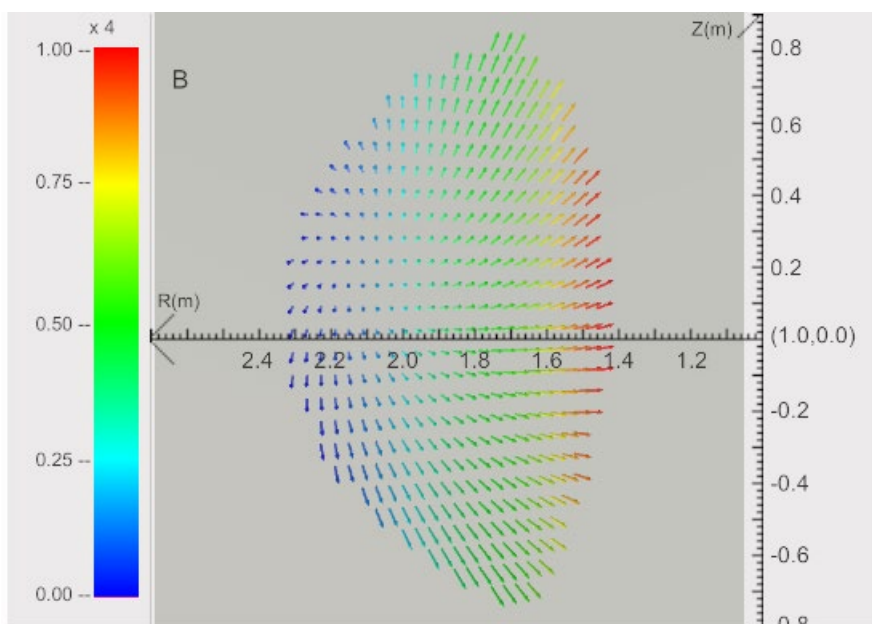
运行

诊断方式: ☒ 探针 ☐ 汤姆逊散射诊断方式

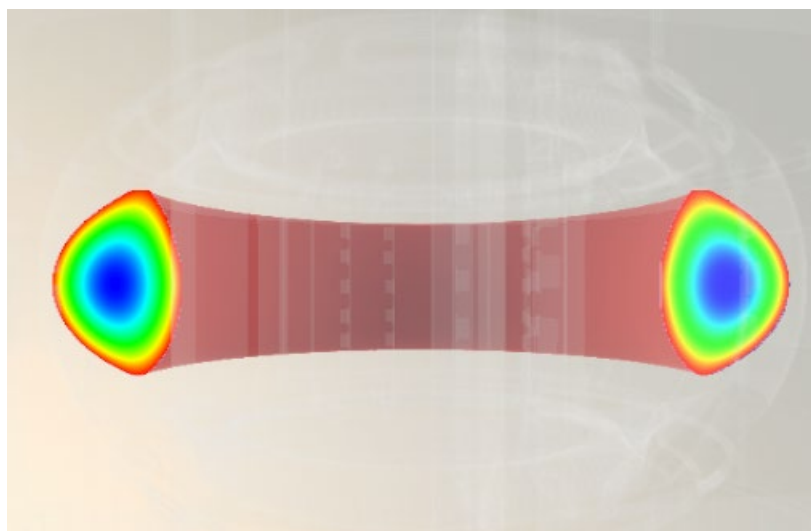
磁面位形



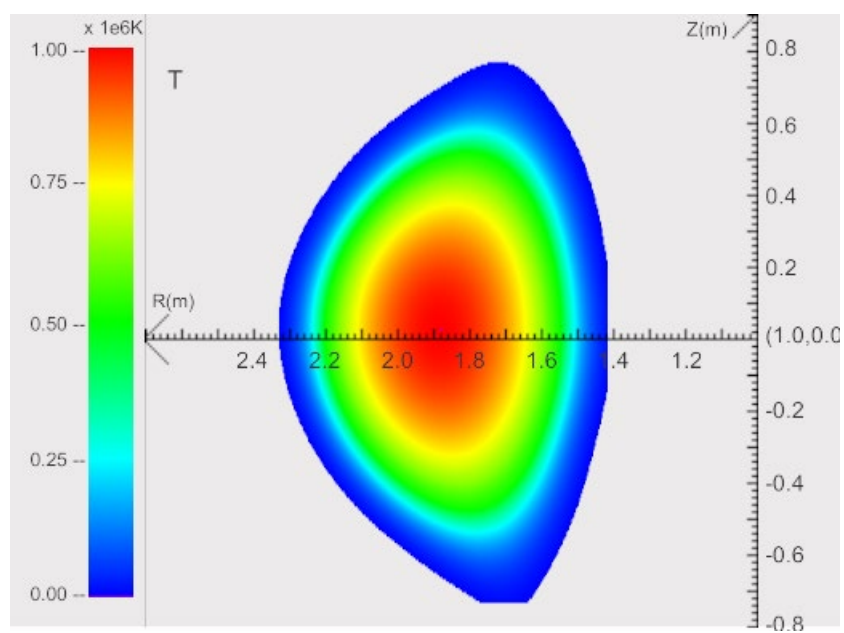
磁场分布



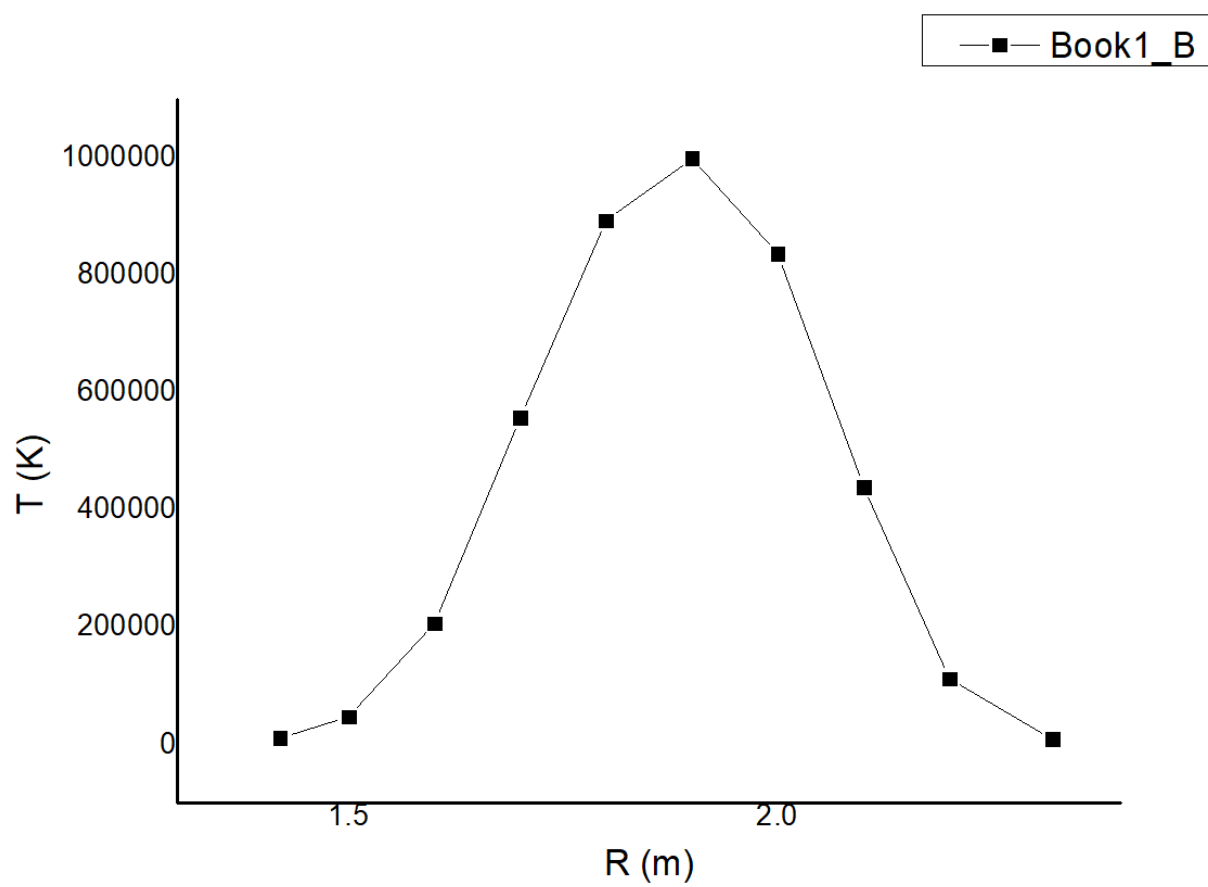
真空截面图



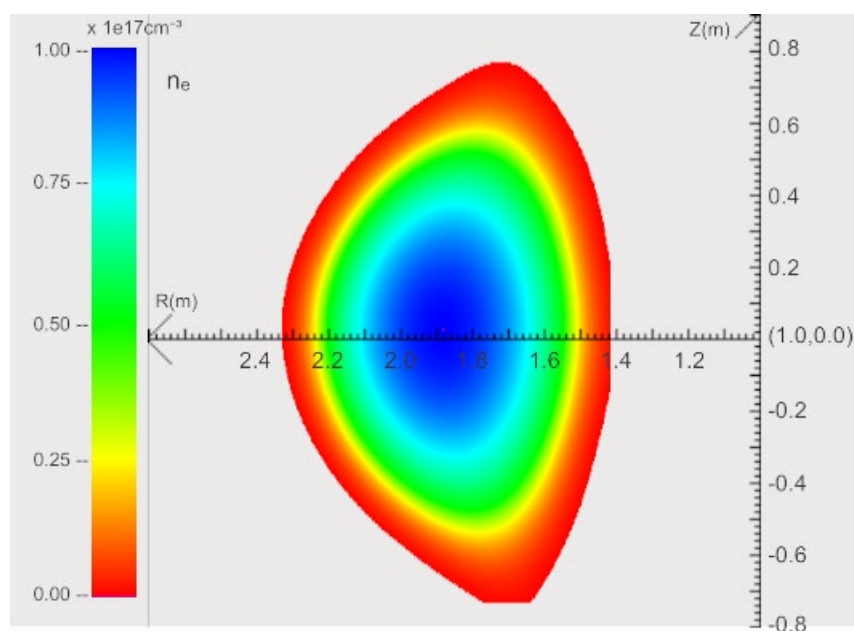
温度分布



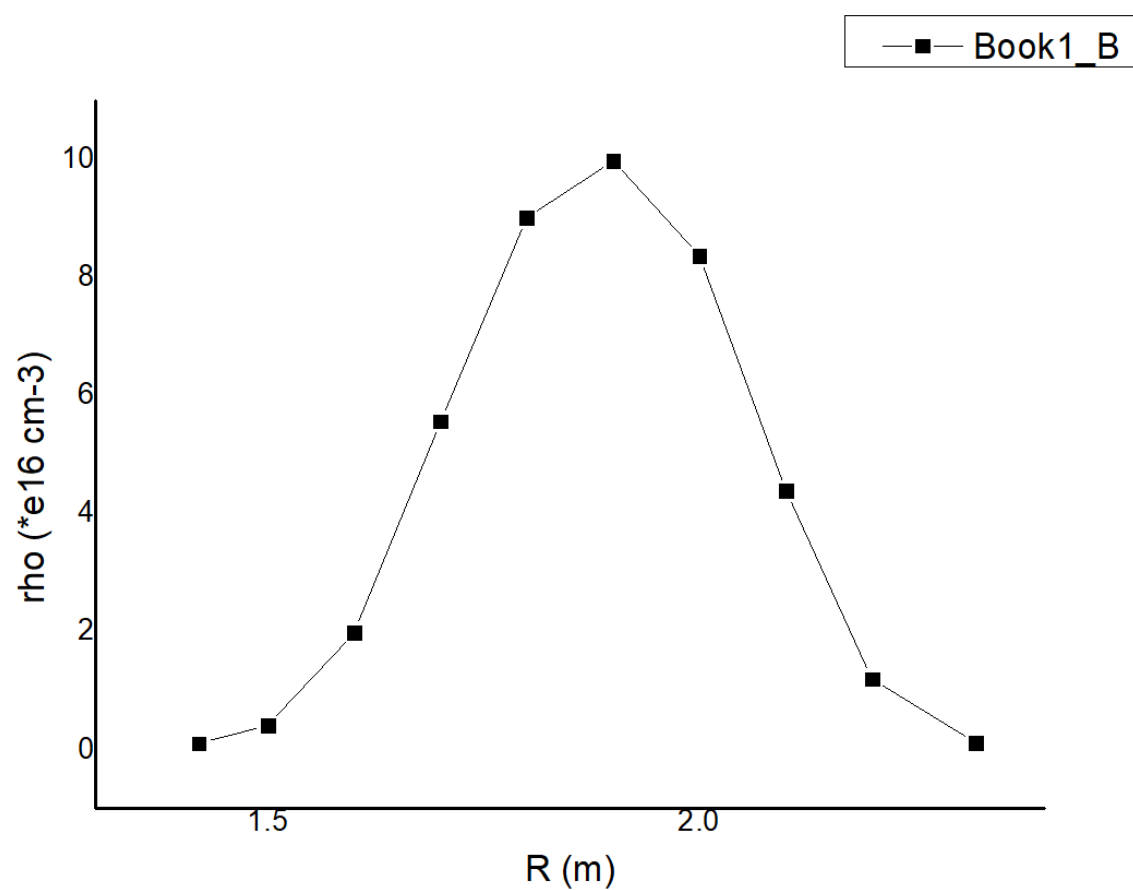
T-R 曲线



密度分布



$\rho - T$ 曲线



1.1.2 第二组

相关参数

磁面位形

三角形面

极向场电流

1.2

0.5~2 T·m
 $I \cdot \mu_0$ (I 为电流, μ_0 为真空磁导率)

温度轮廓参数

密度轮廓参数

a0

1e7

b0

1e18

[1e6,1e8]

[1e17,1e19]

a1

0.05

b1

0.05

励磁电流/24

励磁电流/24

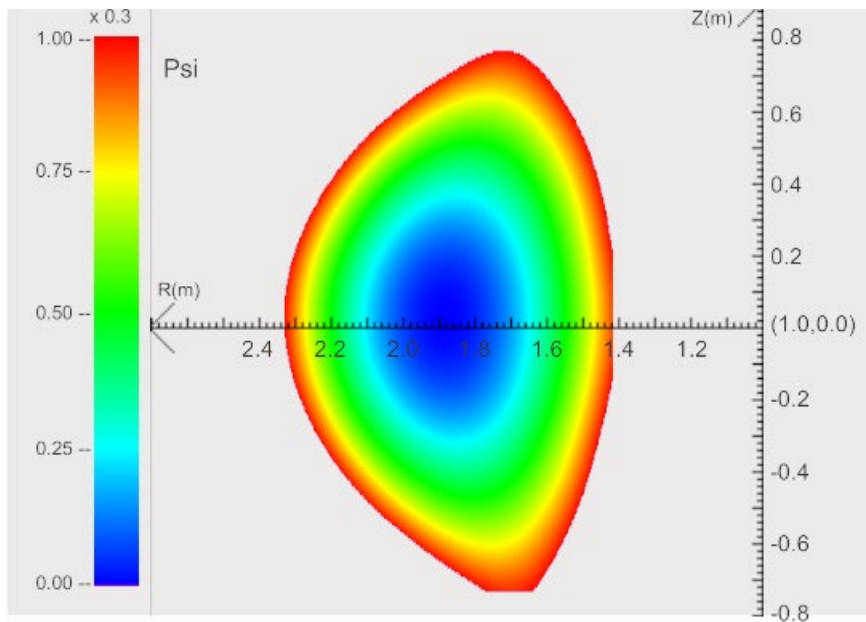
运行

诊断方式:

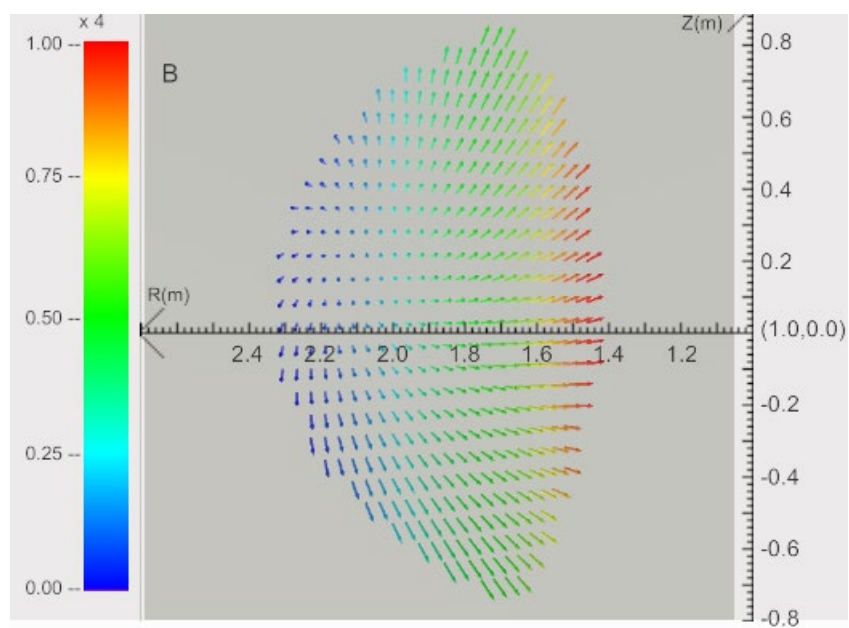
☒ 探针

☐ 汤姆逊散射诊断方式

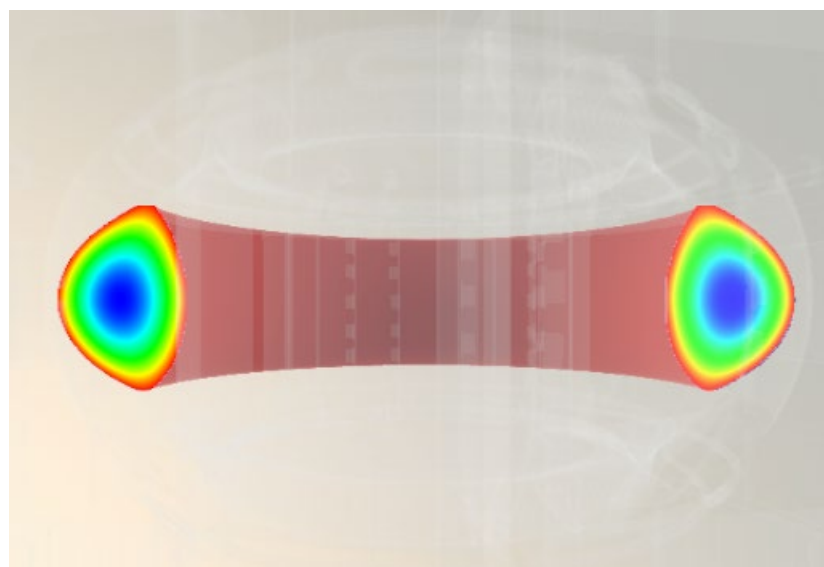
磁面位形



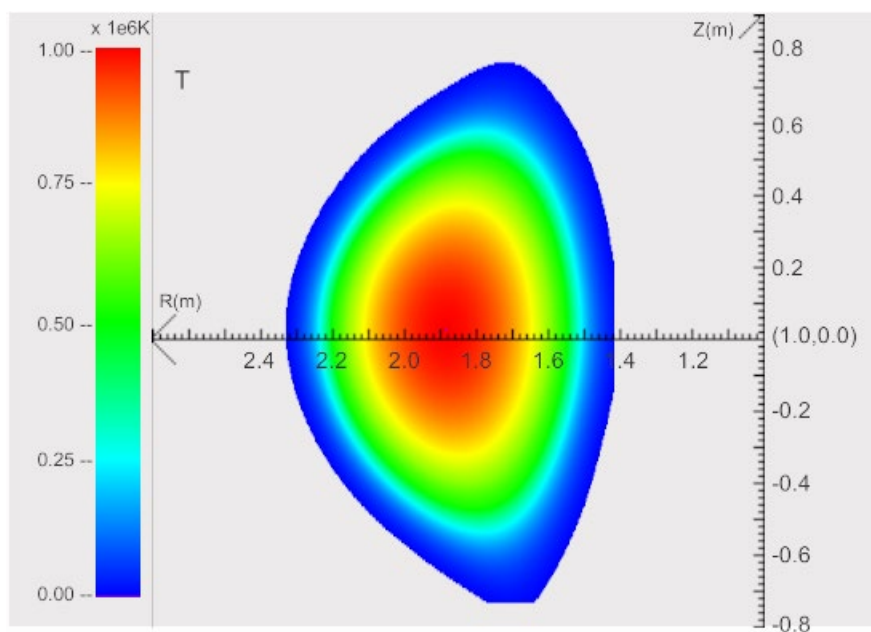
磁场分布



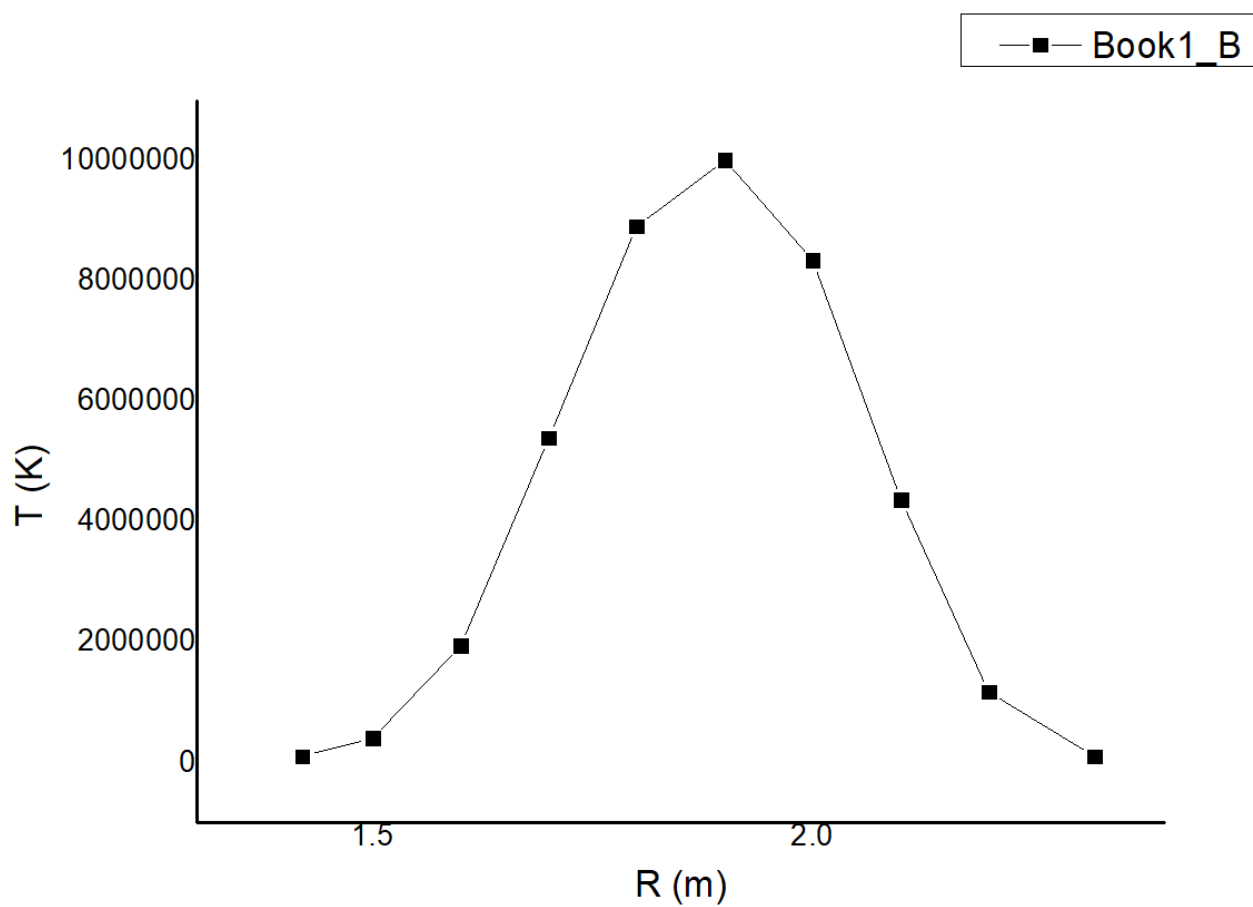
真空截面图



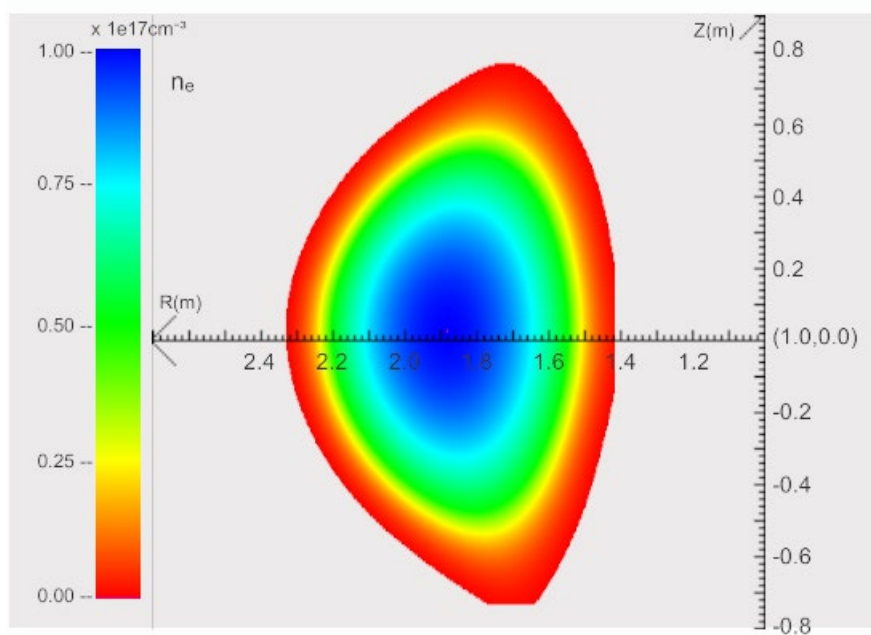
温度分布



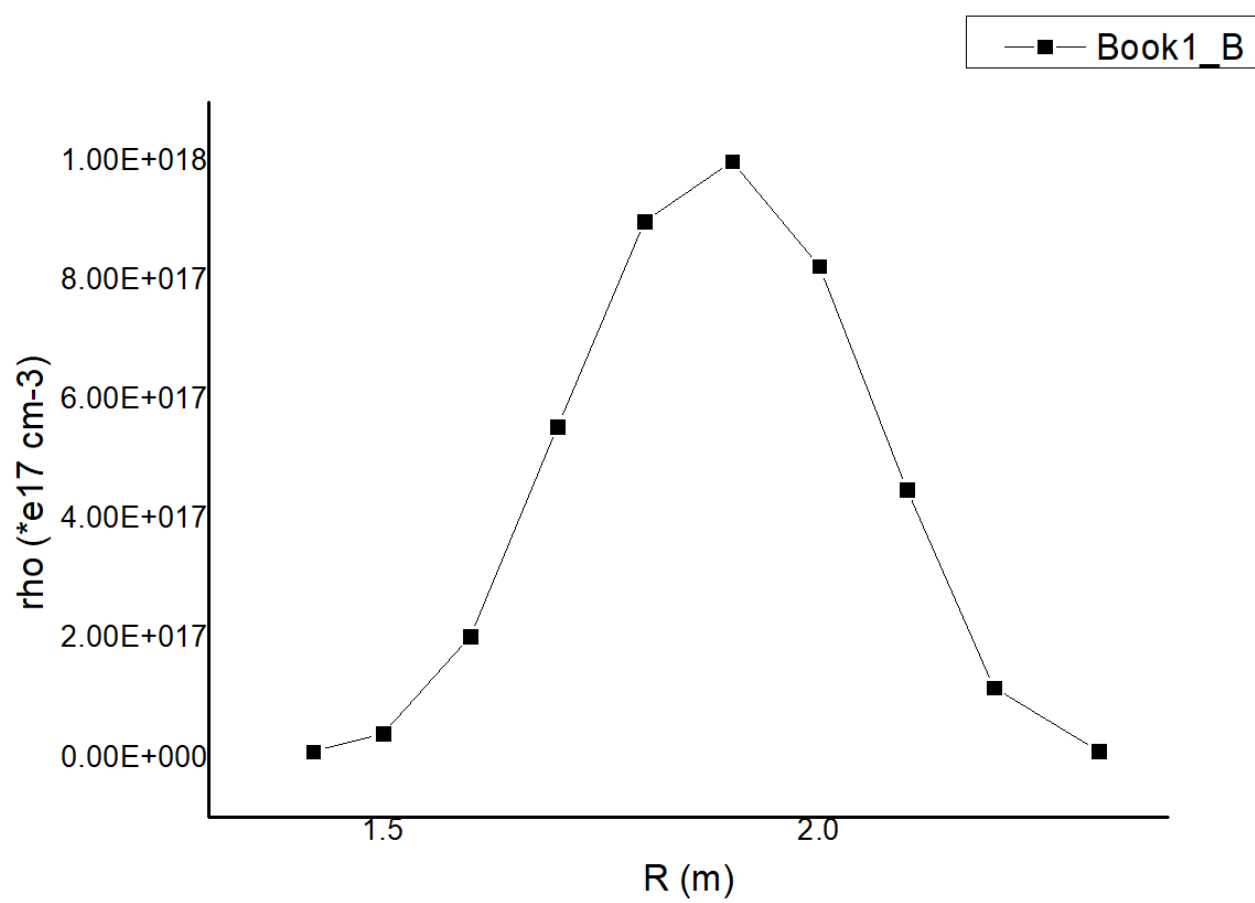
T-R 曲线



密度分布



$\rho - T$ 曲线



1.1.3 第三组

相关参数

磁面位形 三角形面

极向场电流 1.2

0.5~2 T·m
 $I \cdot \mu_0$ (I 为电流, μ_0 为真空磁导率)

温度轮廓参数

密度轮廓参数

a0 1e8 b0 1e19

[1e6,1e8]

[1e17,1e19]

a1 0.05 b1 0.05

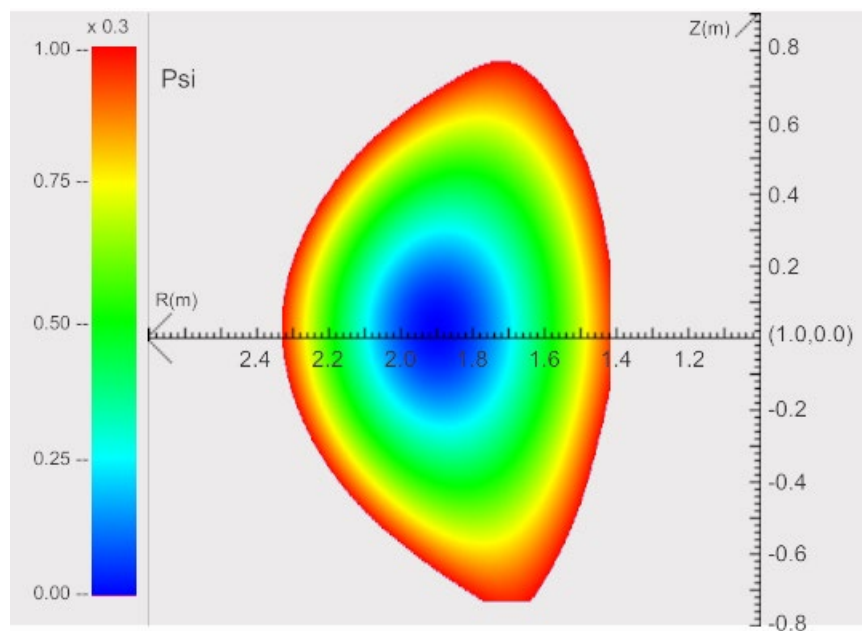
励磁电流/24

励磁电流/24

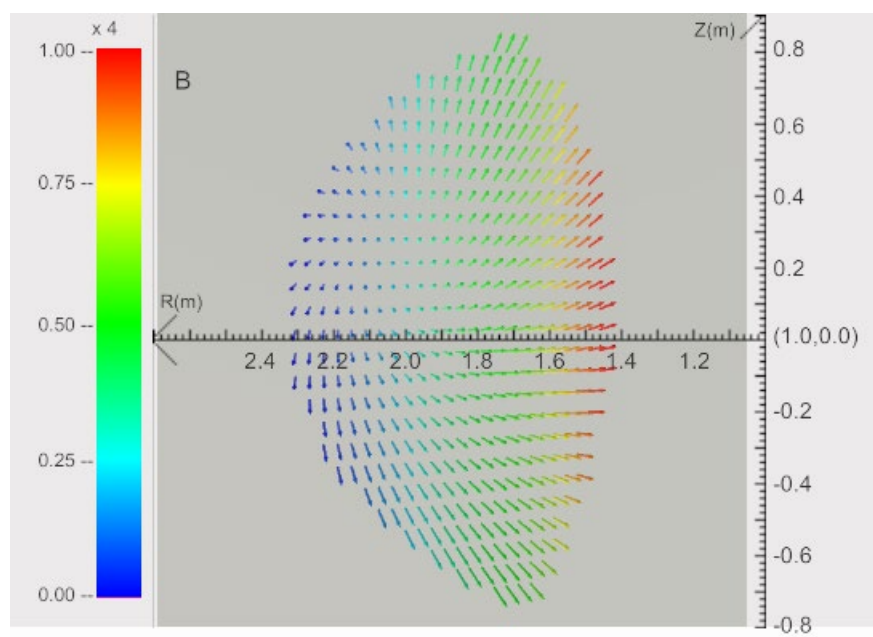
运行

诊断方式: ☒ 探针 ☐ 汤姆逊散射诊断方式

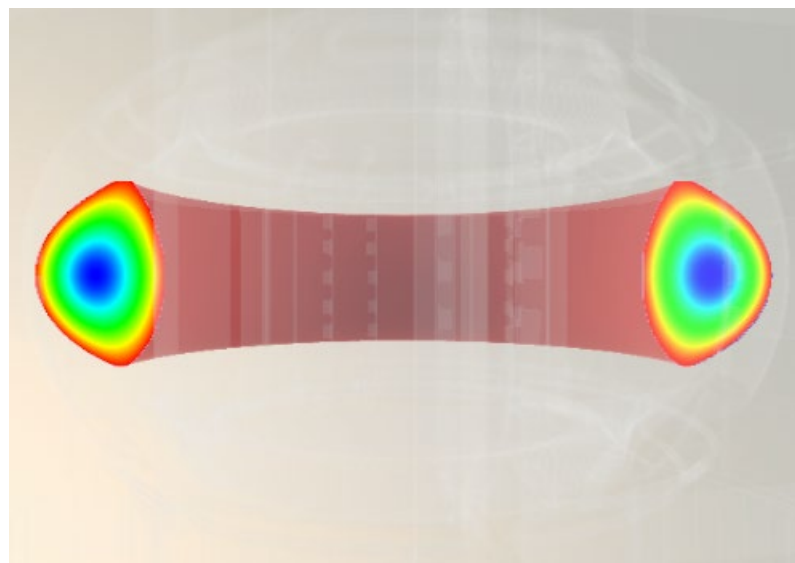
磁面位形



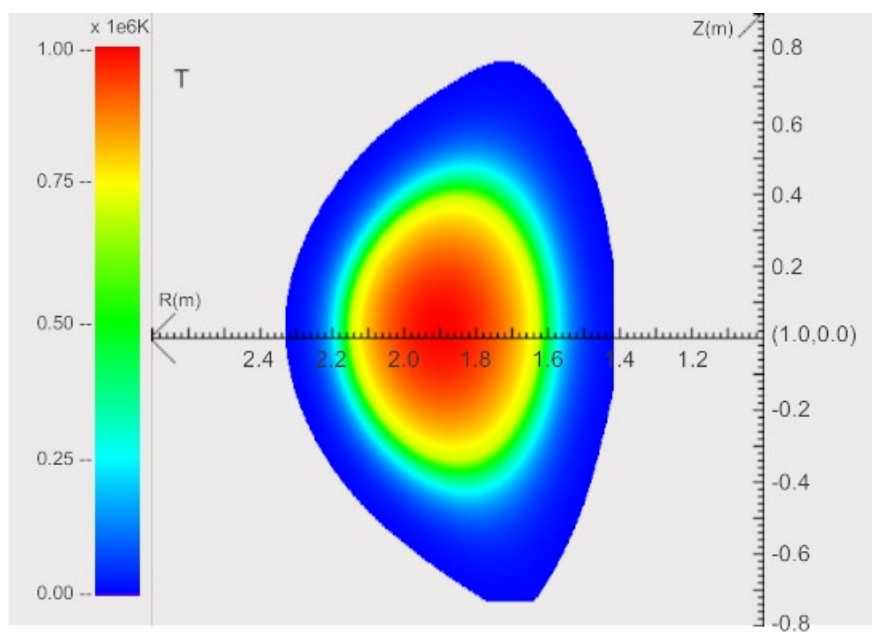
磁场分布



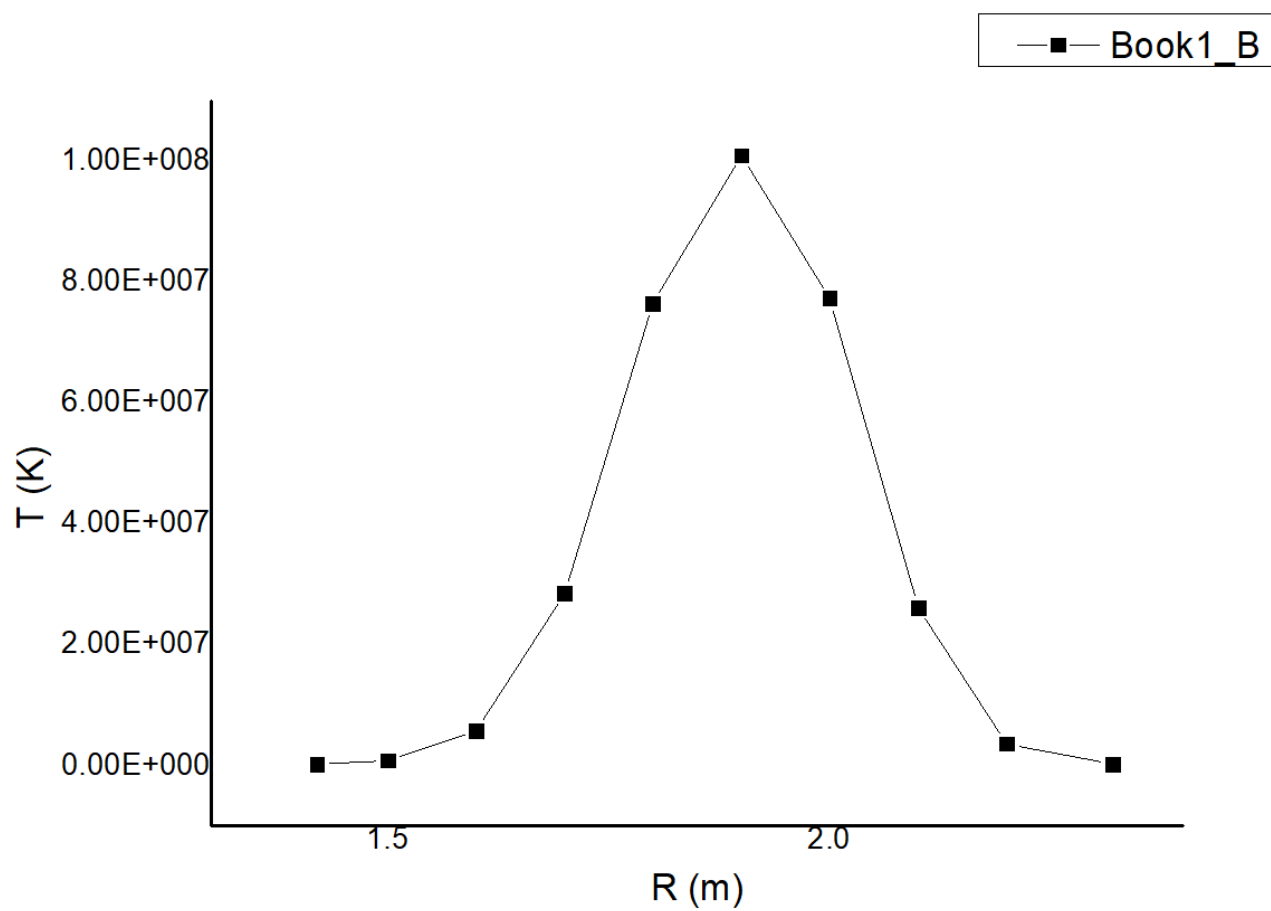
真空截面图



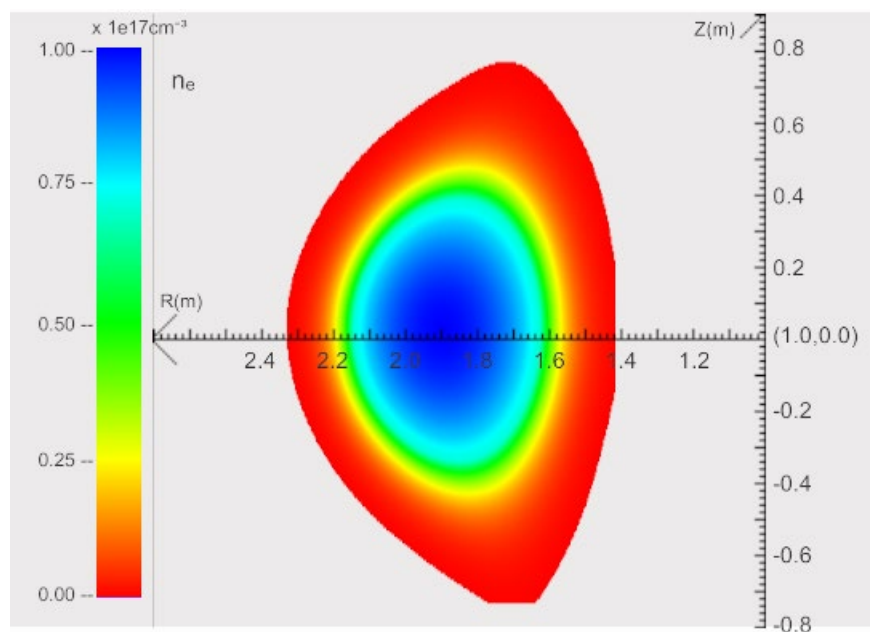
温度分布



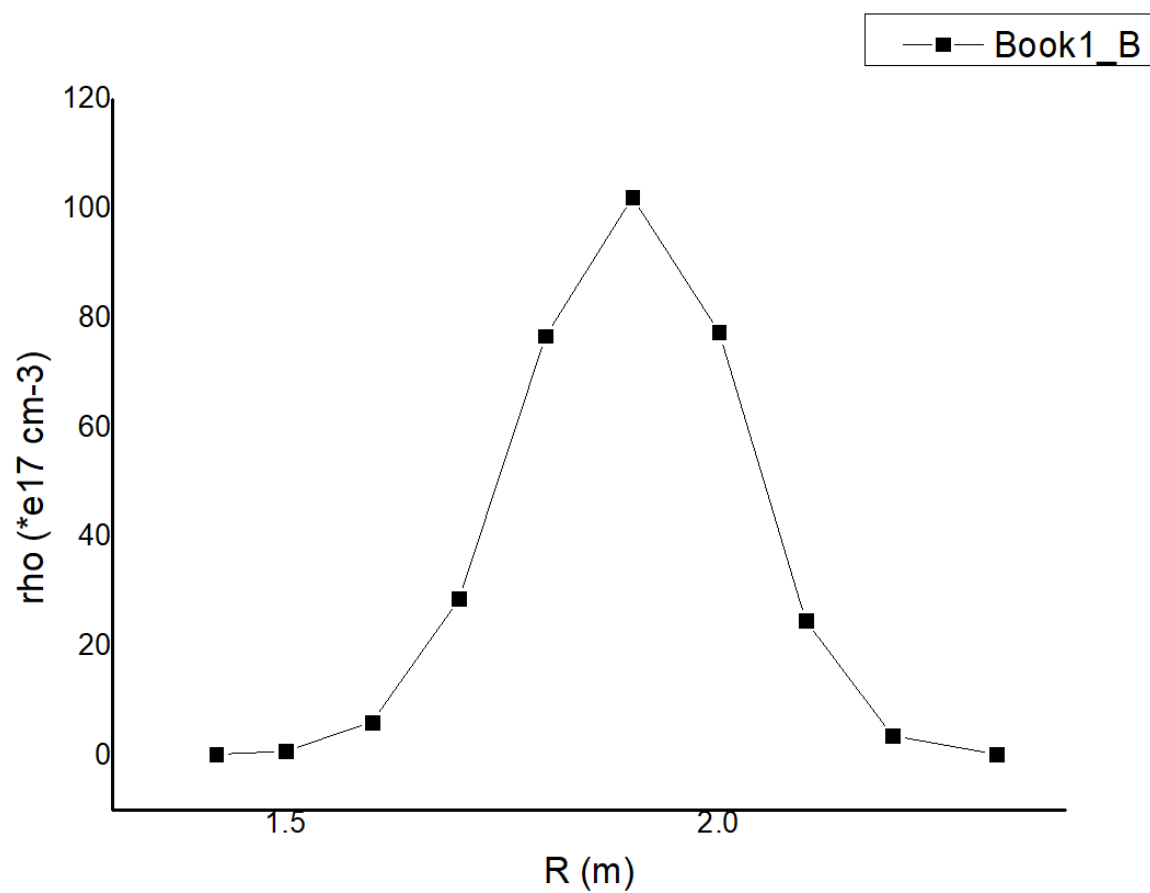
T-R 曲线



密度分布



$\rho - T$ 曲线



1.2 磁面位形为椭圆面

1.2.1 第一组

相关参数

磁面位形

椭圆面

极向场电流

1.2

0.5~2 T·m
 $I \cdot \mu_0$ (I为电流, μ_0 为真空磁导率)

温度轮廓参数

a0

1e6

[1e6,1e8]

密度轮廓参数

b0

1e17

[1e17,1e19]

a1

0.05

励磁电流/24

b1

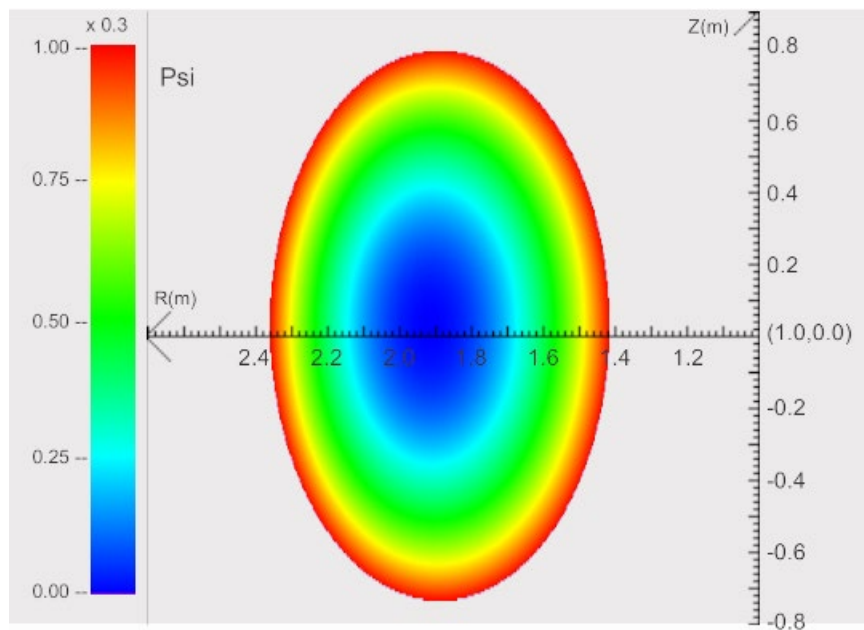
0.05

励磁电流/24

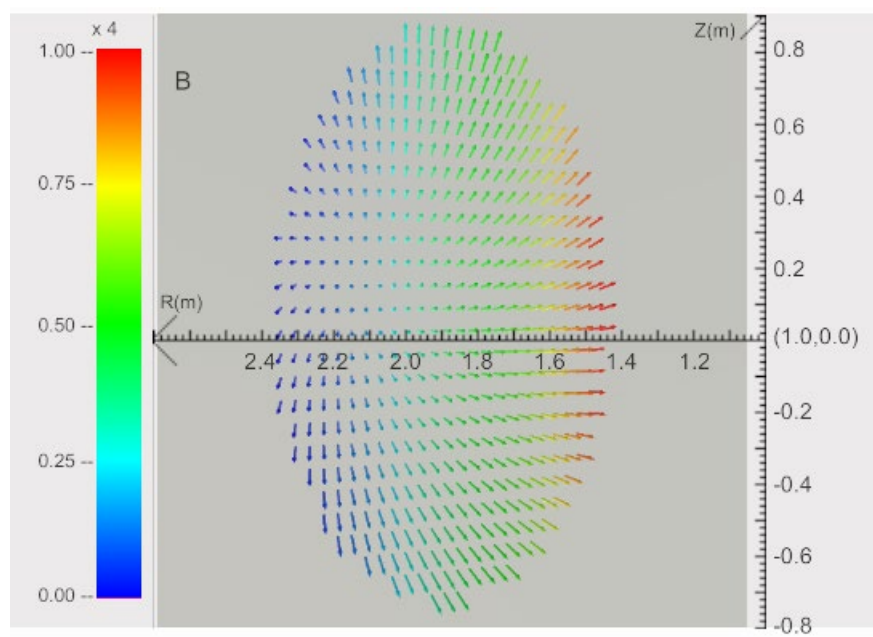
运行

诊断方式: ☒ 探针 ☐ 汤姆逊散射诊断方式

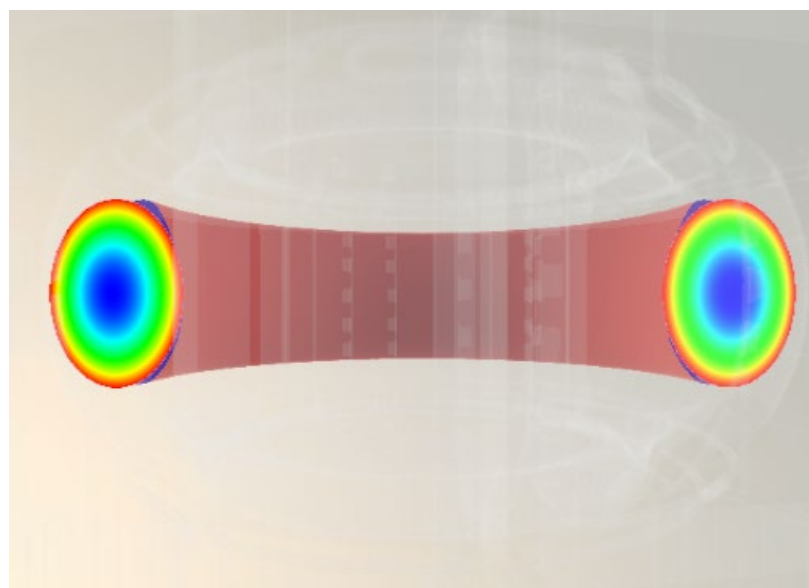
磁面位形



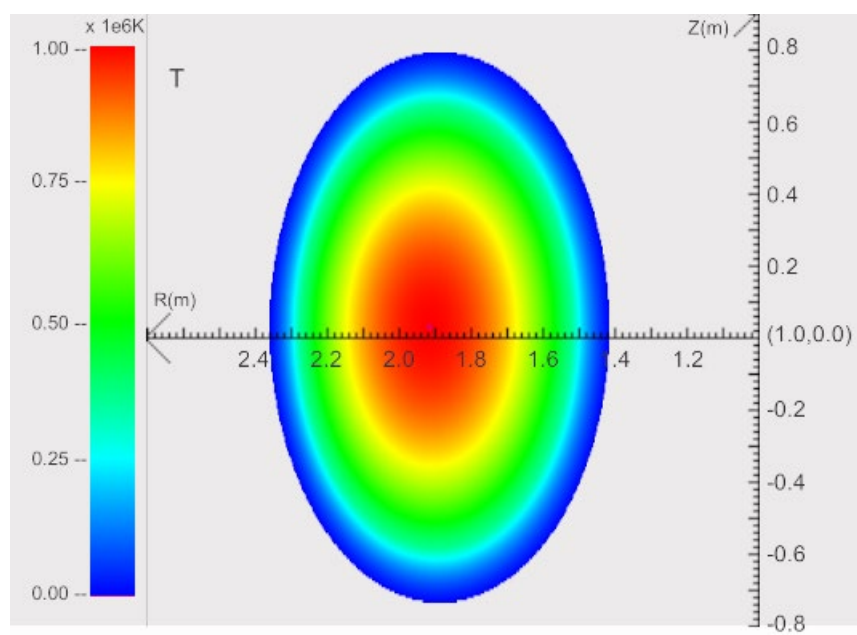
磁场分布



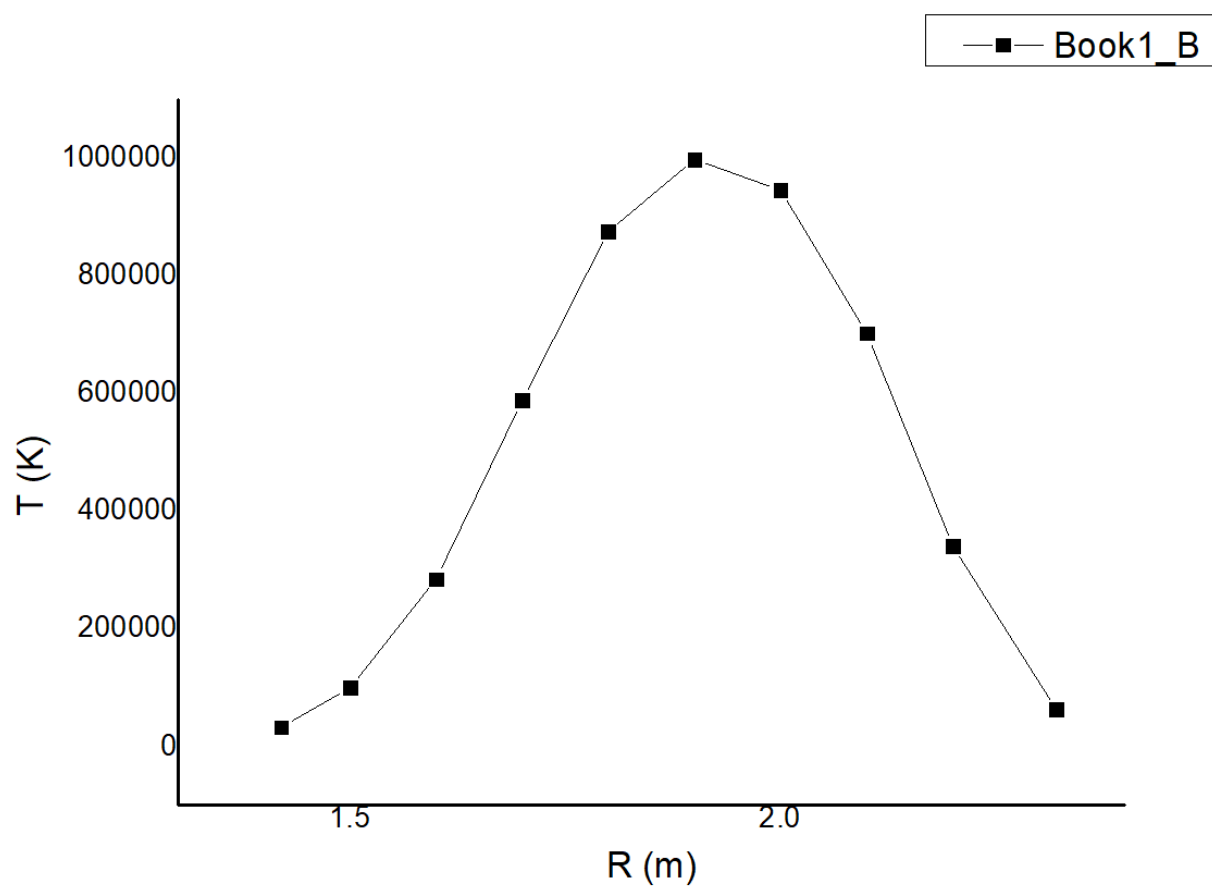
真空截面图



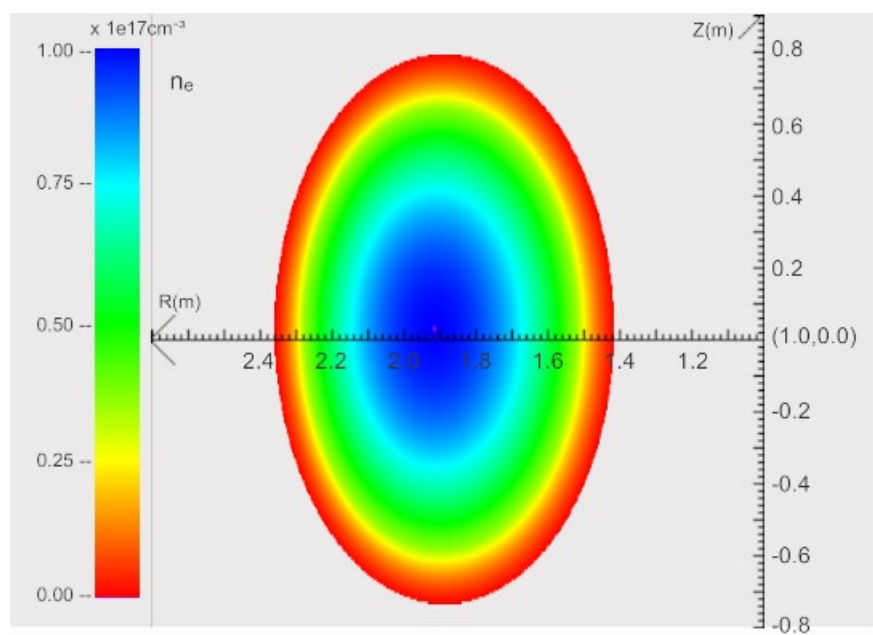
温度分布



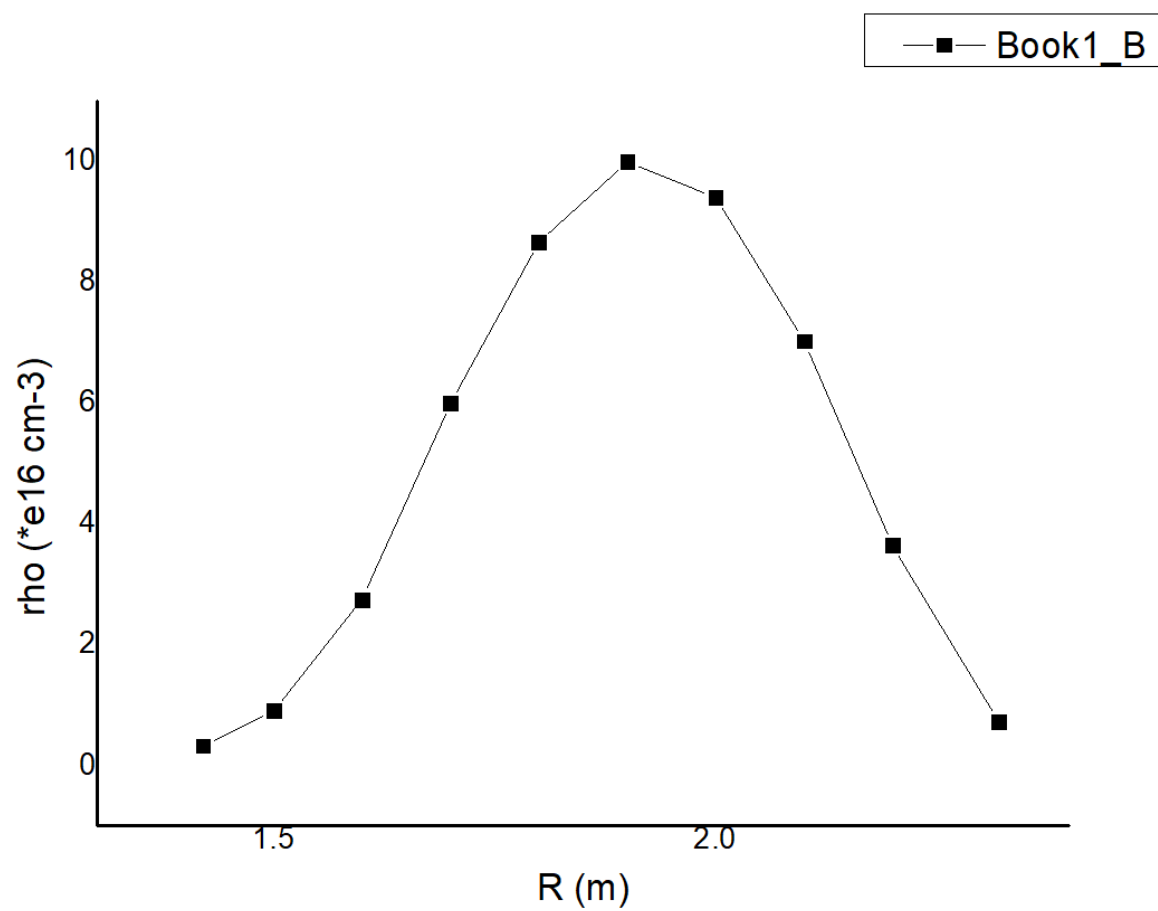
T-R 曲线



密度分布



$\rho - T$ 曲线



1.2.2 第二组

相关参数

磁面位形

椭圆面

极向场电流

1.2

0.5~2 T·m
 $I \cdot \mu_0$ (I为电流, μ_0 为真空磁导率)

温度轮廓参数

密度轮廓参数

a0

1e7

b0

1e18

[1e6,1e8]

[1e17,1e19]

a1

0.05

b1

0.05

励磁电流/24

励磁电流/24

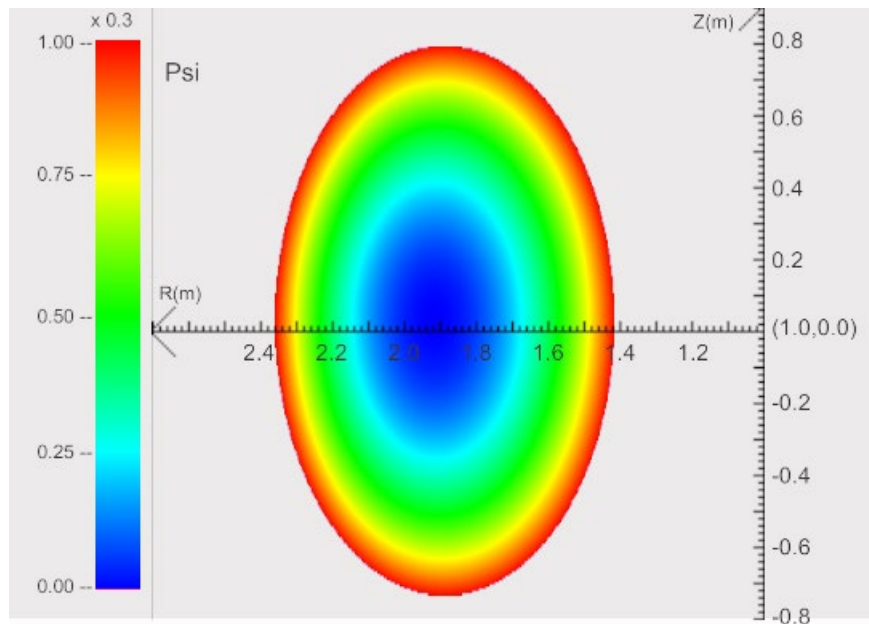
运行

诊断方式:

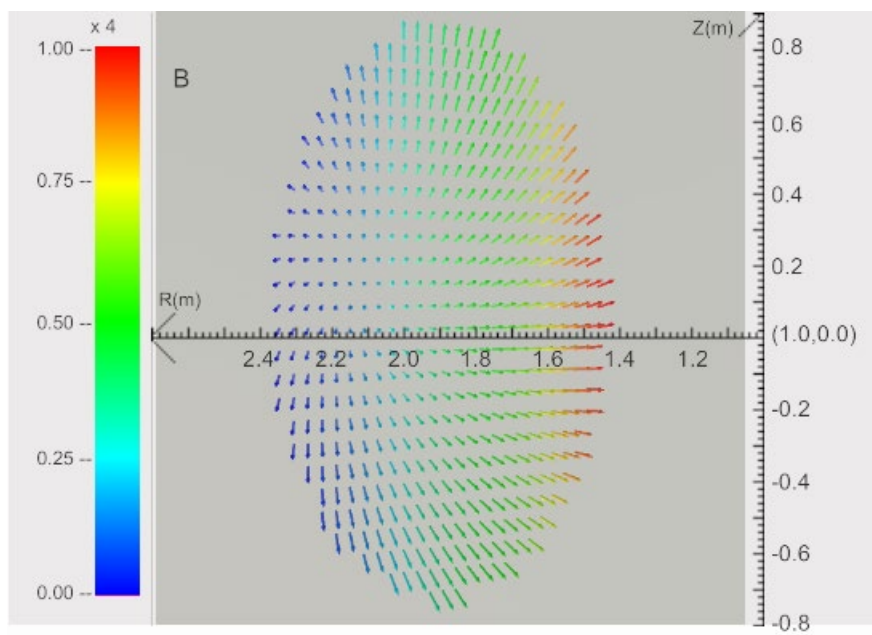
☒ 探针

☐ 汤姆逊散射诊断方式

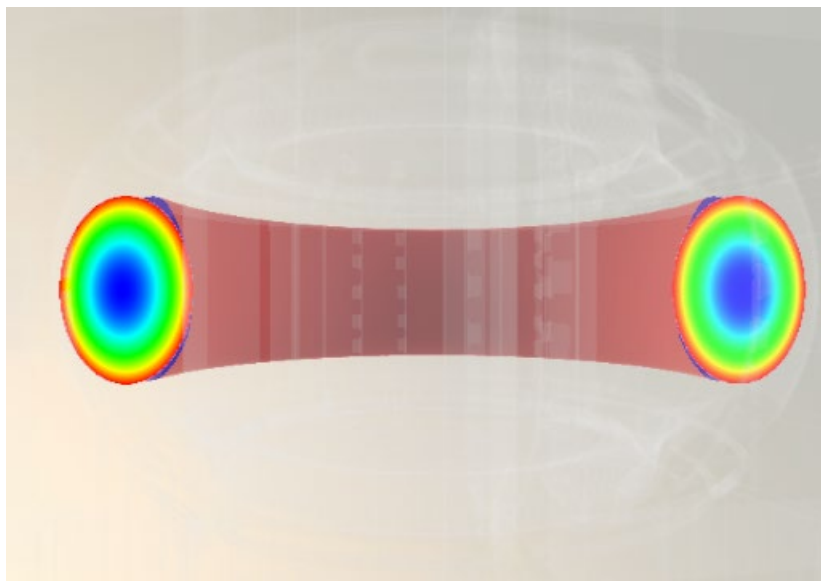
磁面位形



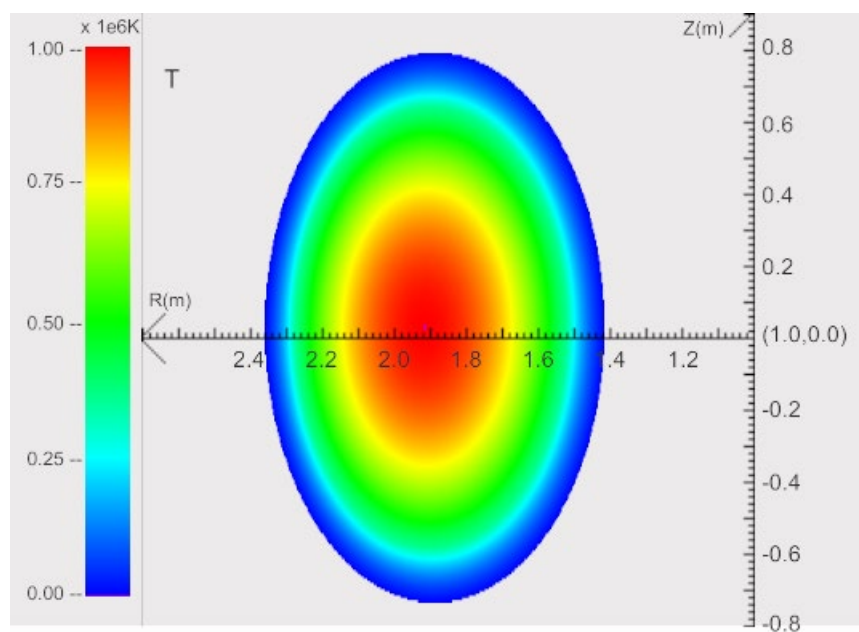
磁场分布



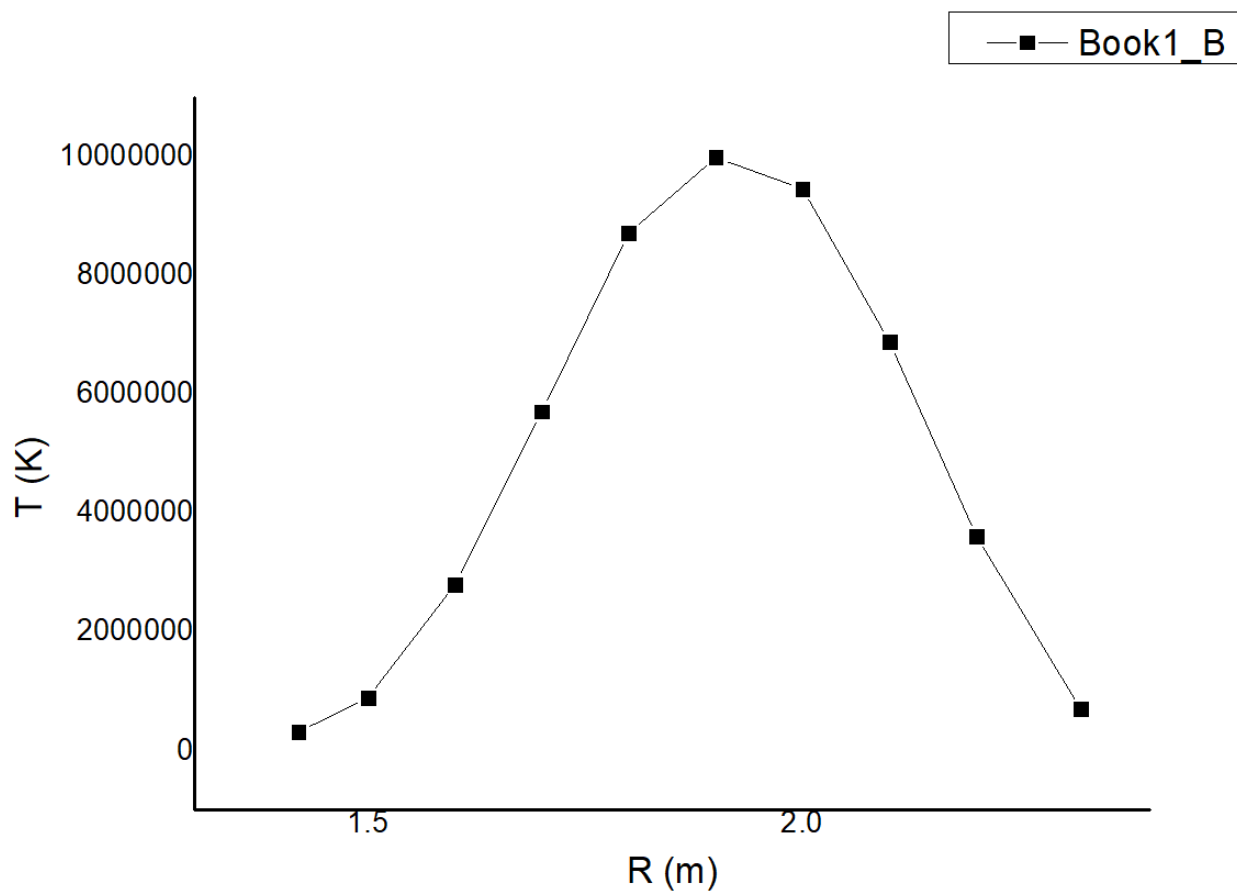
真空截面图



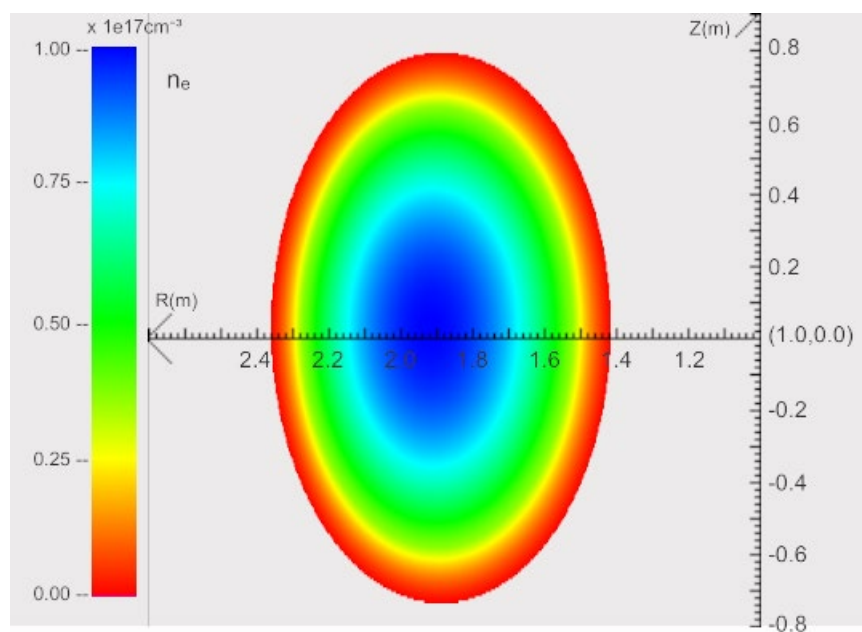
温度分布



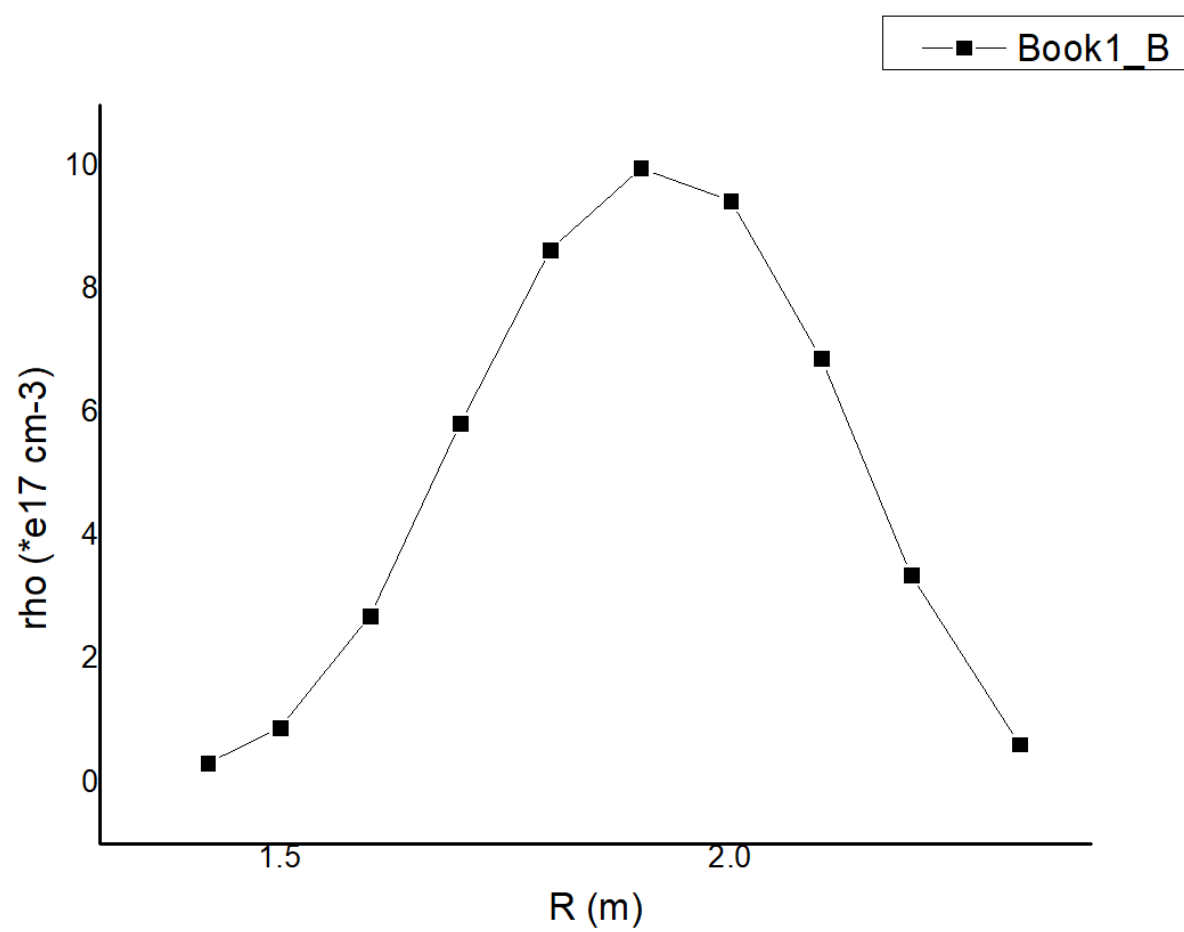
T-R 曲线



密度分布



$\rho - T$ 曲线



1.2.3 第三组

相关参数

磁面位形

椭圆面

极向场电流

1.2

0.5~2 T*m
I*mu_0 (I为电流, mu_0为真空磁导率)

温度轮廓参数

a0

1e8

[1e6,1e8]

密度轮廓参数

b0

1e19

[1e17,1e19]

a1

0.05

励磁电流/24

b1

0.05

励磁电流/24

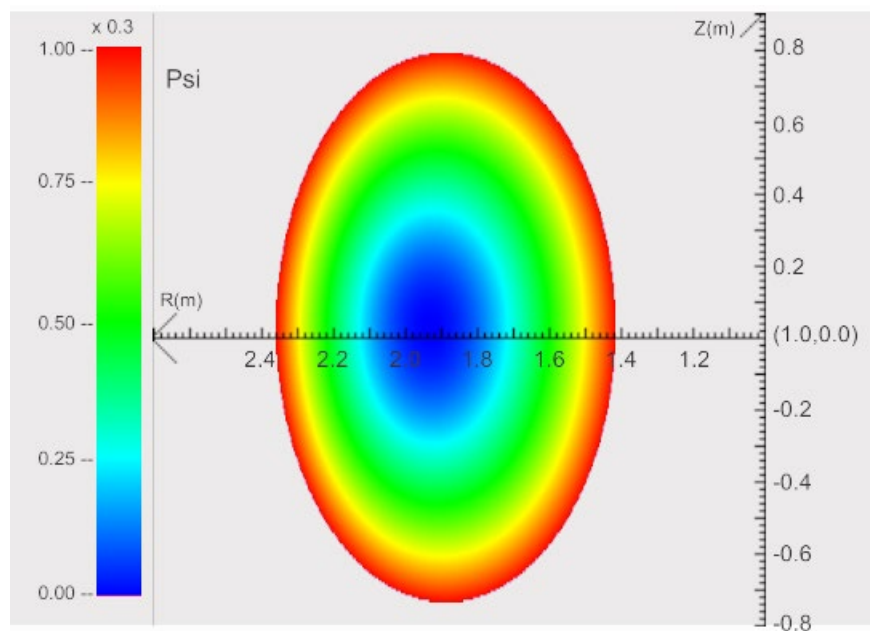
运行

诊断方式:

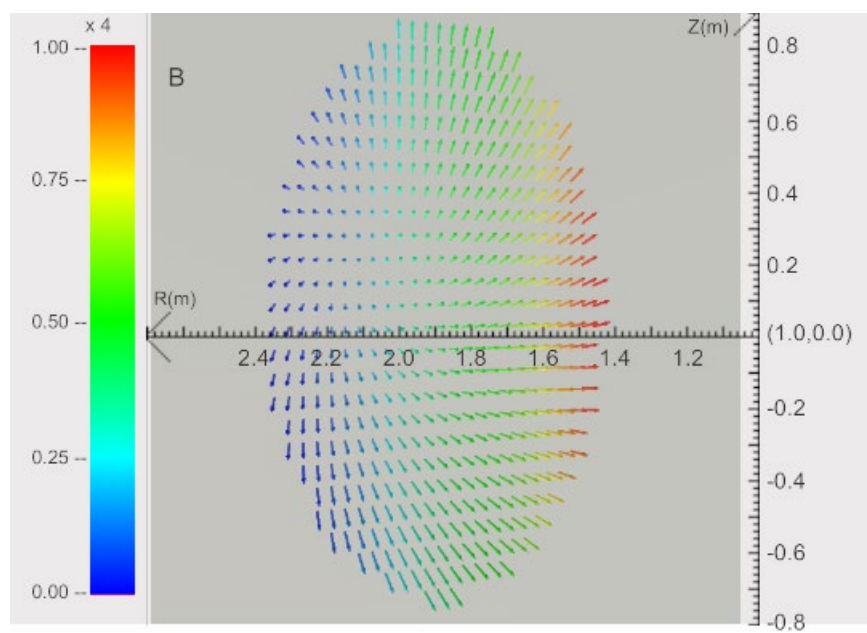
☒ 探针

☐ 汤姆逊散射诊断方式

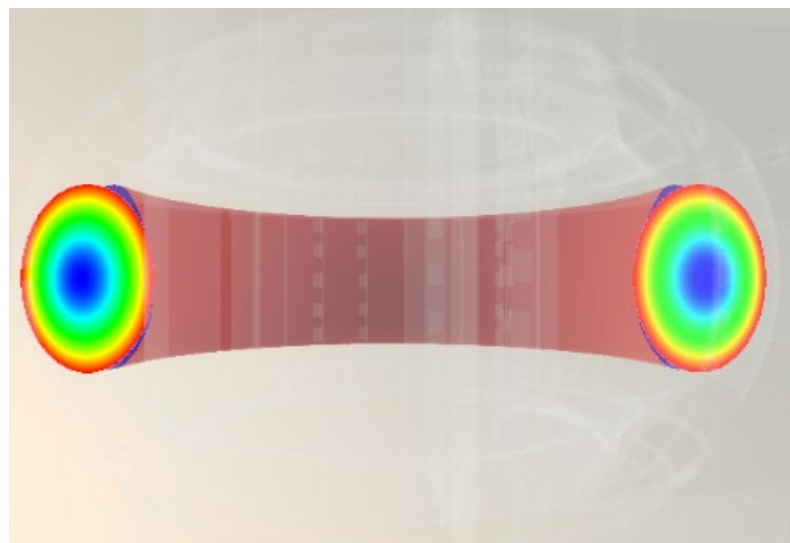
磁面位形



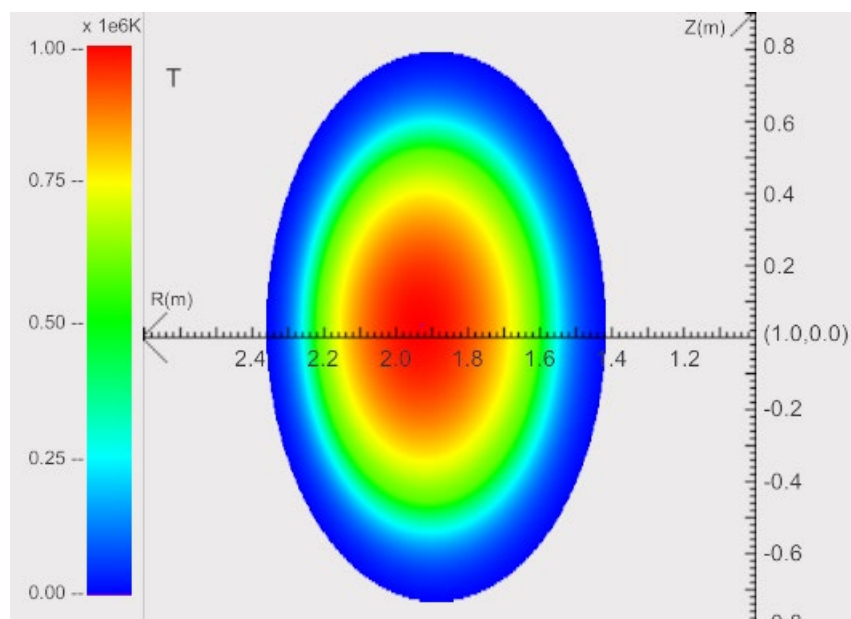
磁场分布



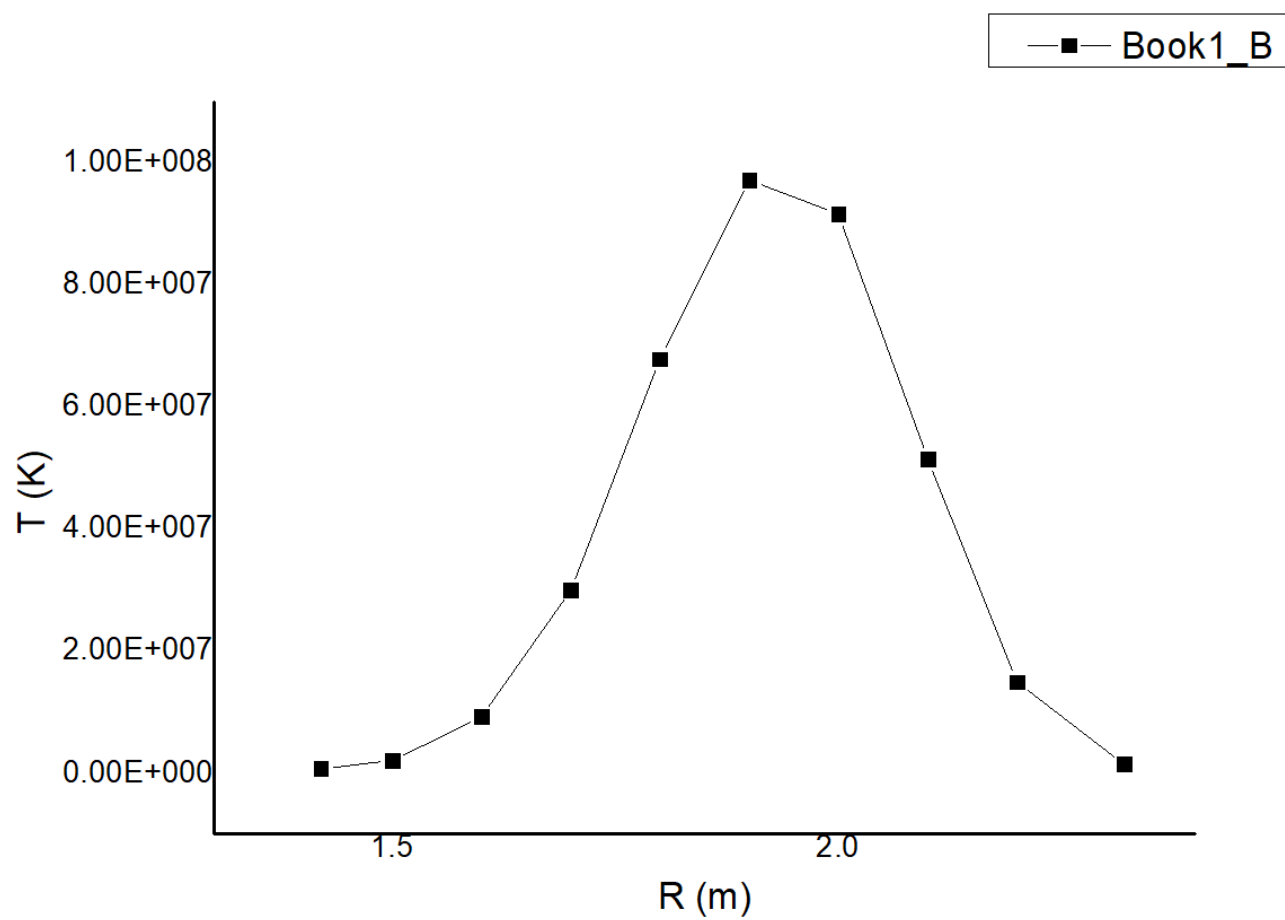
真空截面图



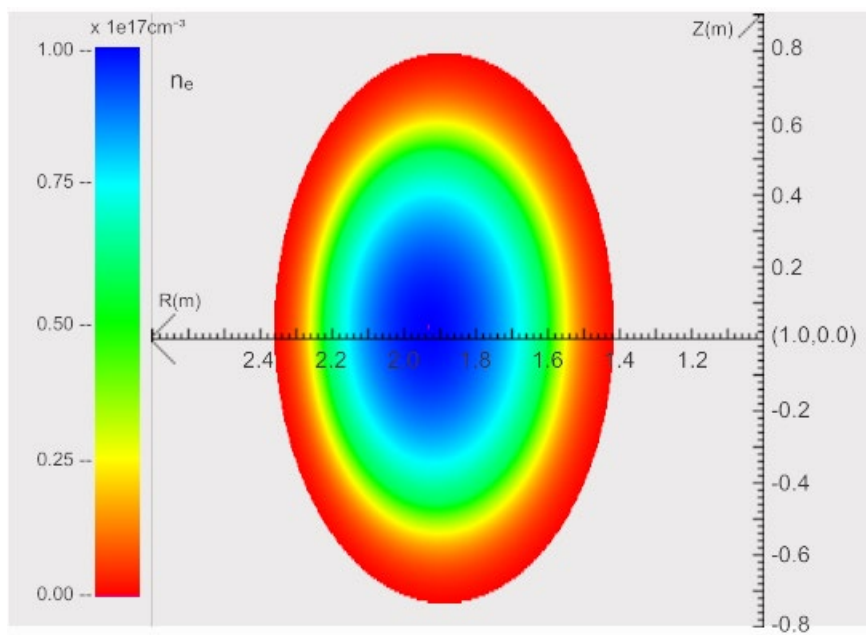
温度分布



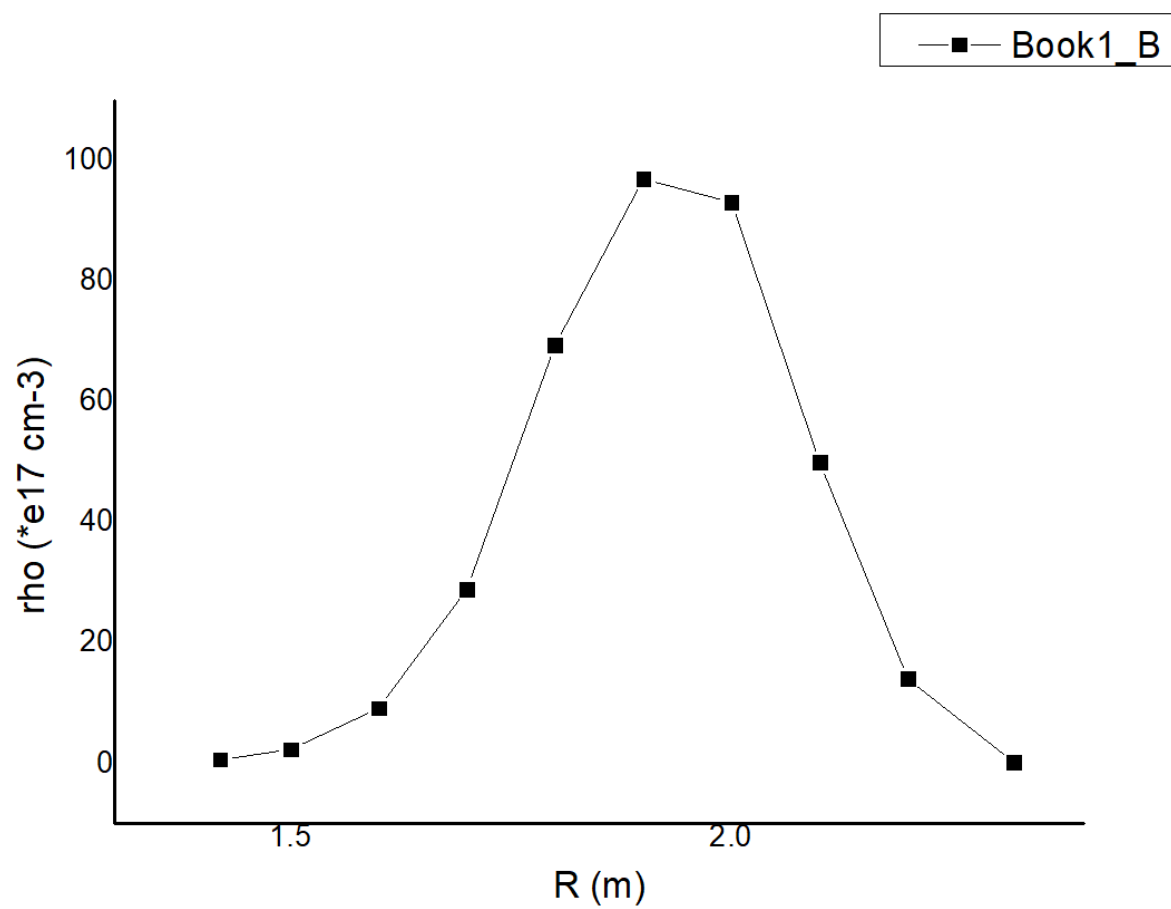
T-R 曲线



密度分布



$\rho - T$ 曲线



1.3 磁面位形为圆形面

1.3.1 第一组

相关参数

磁面位形

圆形面

极向场电流

1.2

0.5~2 T*m
 $I \cdot \mu_0$ (I为电流, μ_0 为真空磁导率)

温度轮廓参数

a0

1e6

[1e6, 1e8]

密度轮廓参数

b0

1e17

[1e17, 1e19]

a1

0.05

励磁电流/24

b1

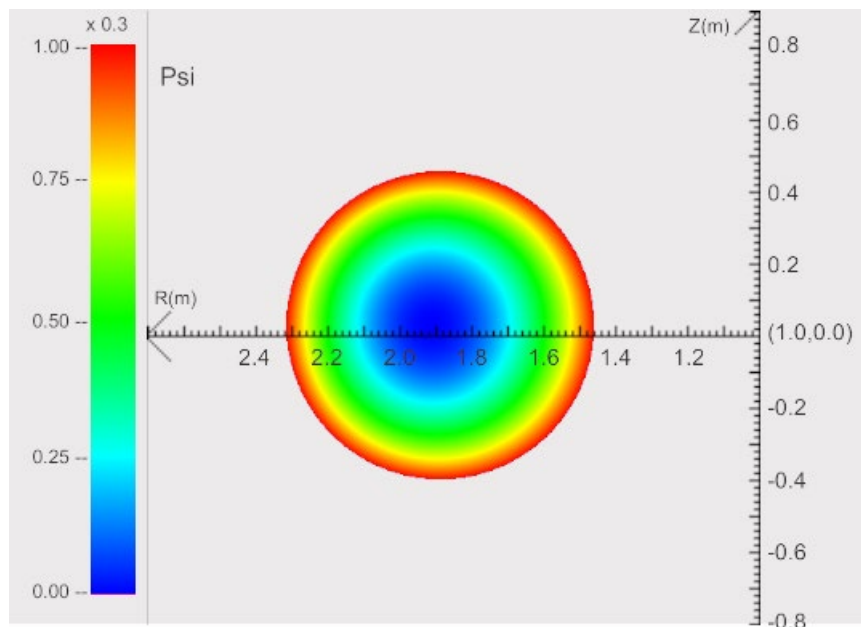
0.05

励磁电流/24

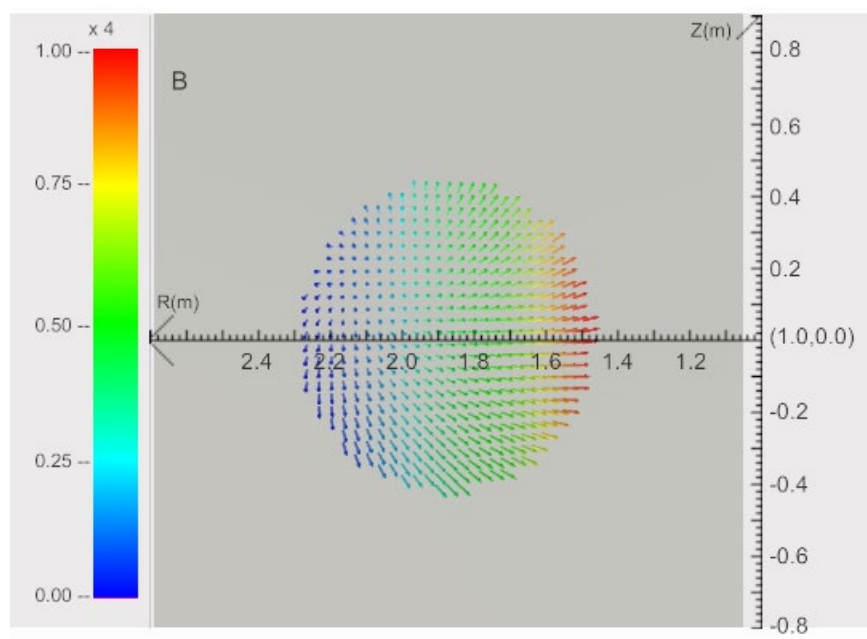
运行

诊断方式: ☒ 探针 ☐ 汤姆逊散射诊断方式

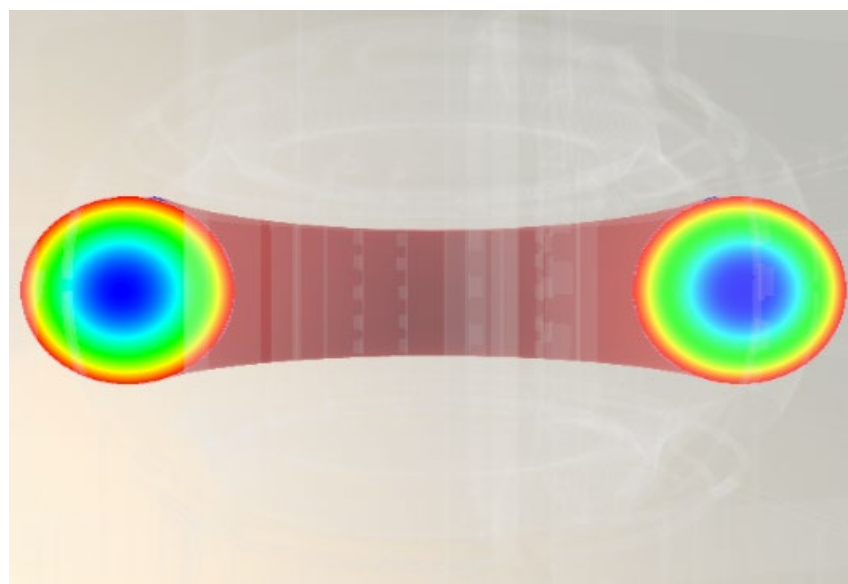
磁面位形



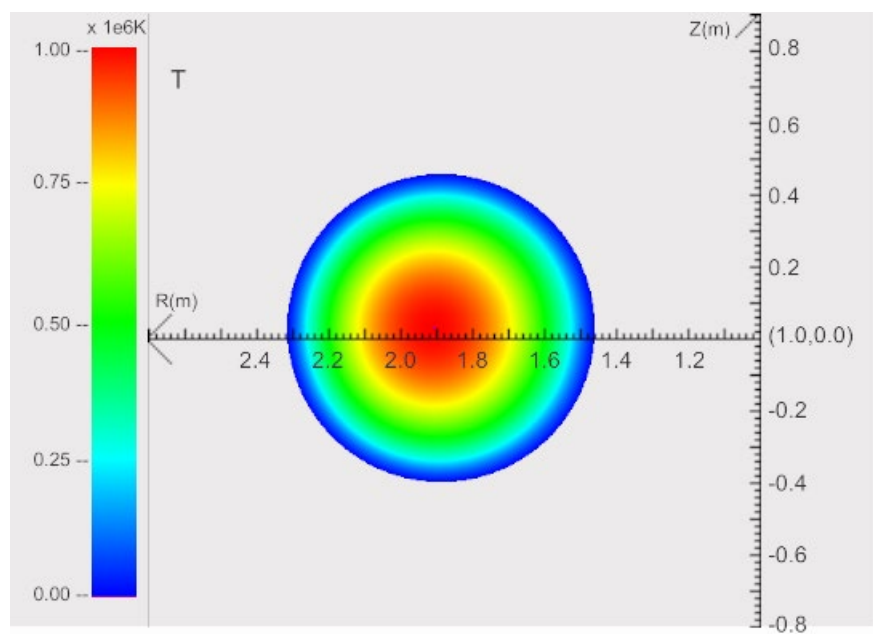
磁场分布



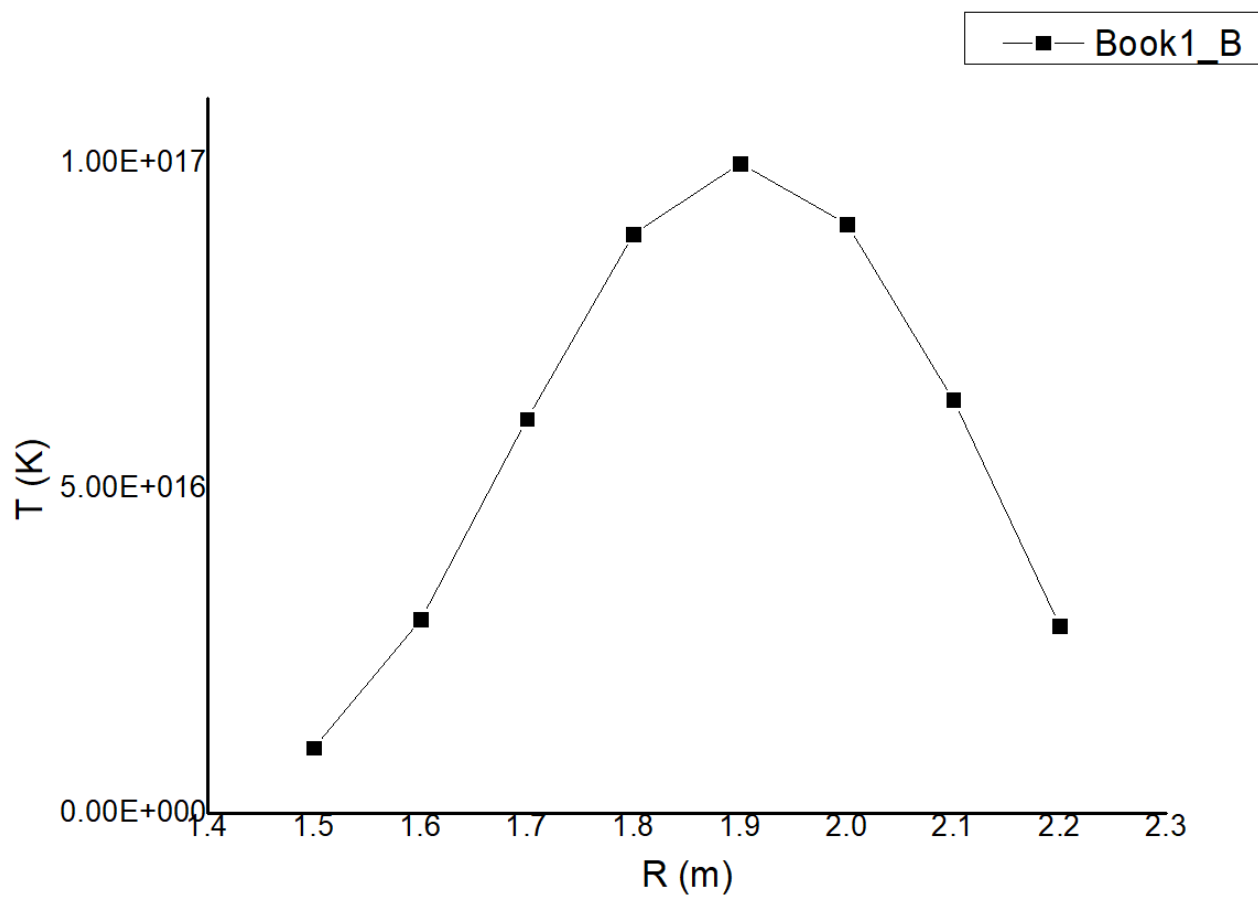
真空截面图



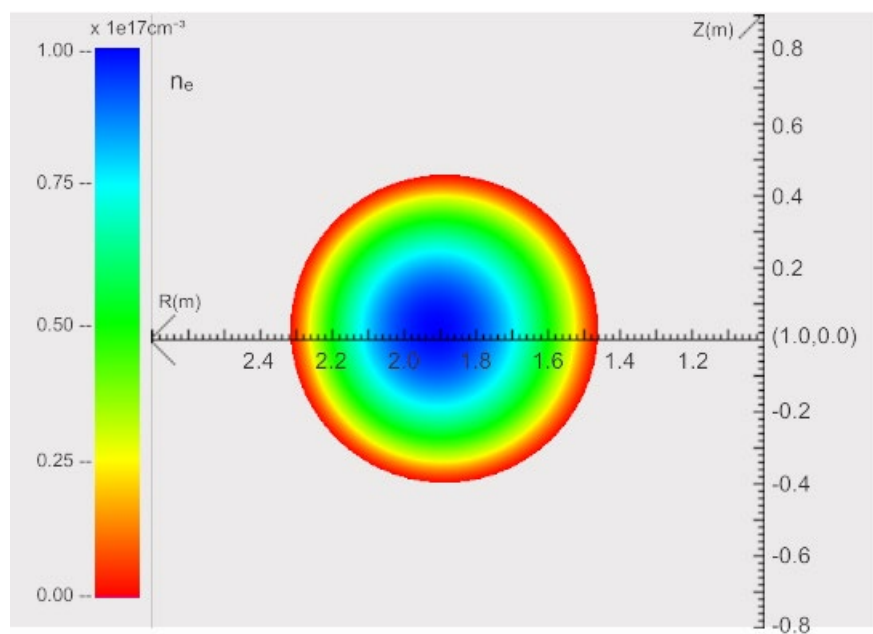
温度分布



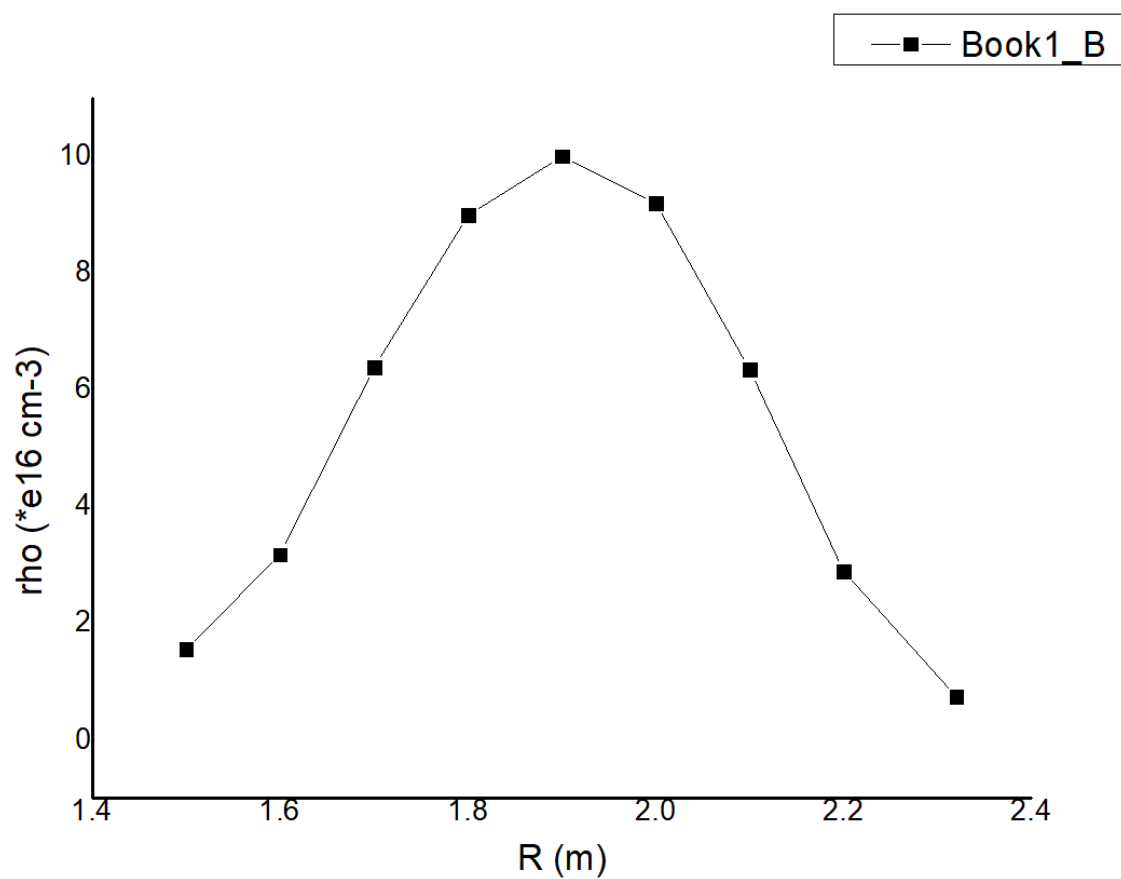
T-R 曲线



密度分布



$\rho - T$ 曲线



1.3.2 第二组

相关参数

磁面位形

圆形面

极向场电流

1.2

0.5~2 T·m
 $I \cdot \mu_0$ (I 为电流, μ_0 为真空磁导率)

温度轮廓参数

密度轮廓参数

a0

1e7

[1e6,1e8]

b0

1e18

[1e17,1e19]

a1

0.05

励磁电流/24

b1

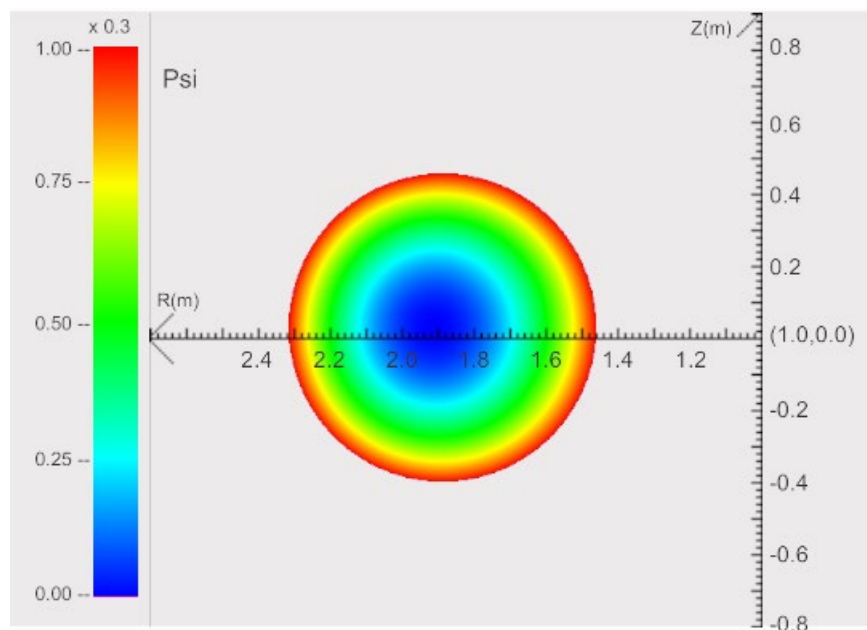
0.05

励磁电流/24

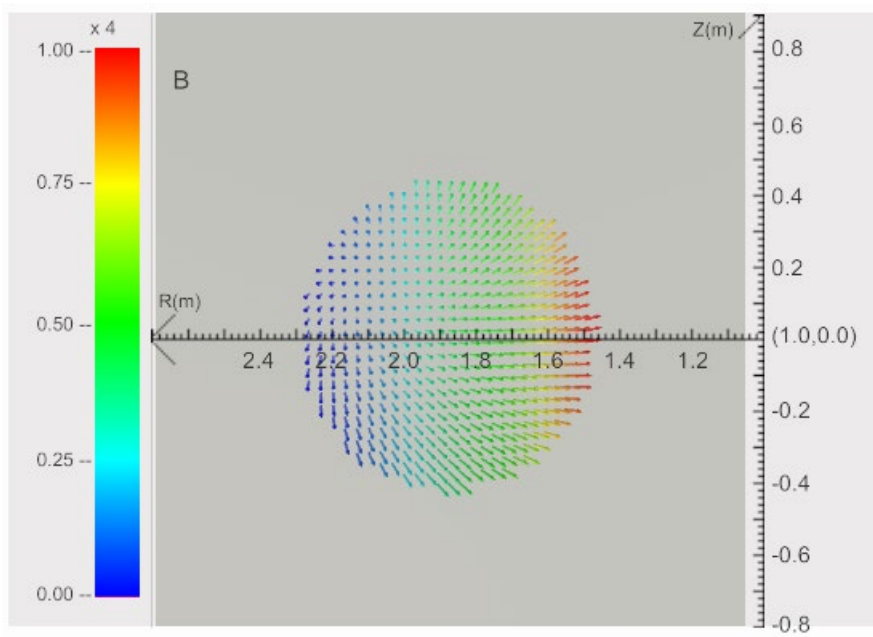
运行

诊断方式: ☒ 探针 ☐ 汤姆逊散射诊断方式

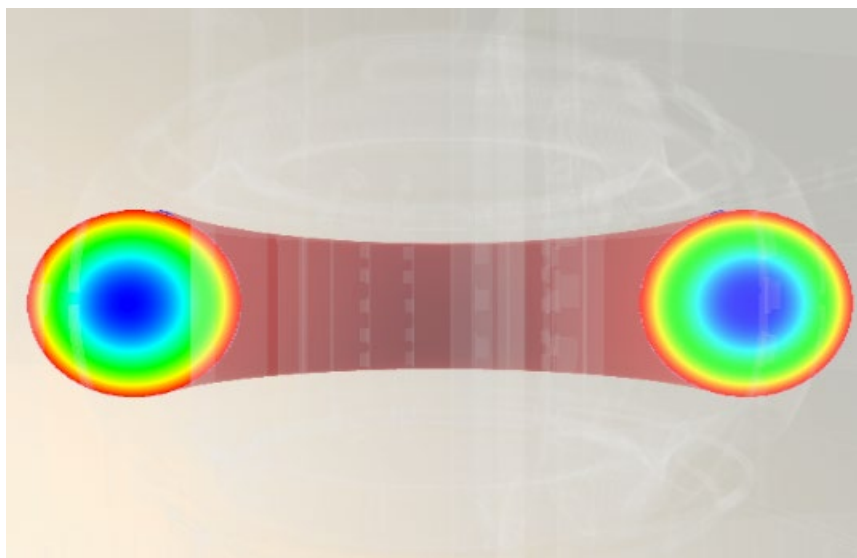
磁面位形



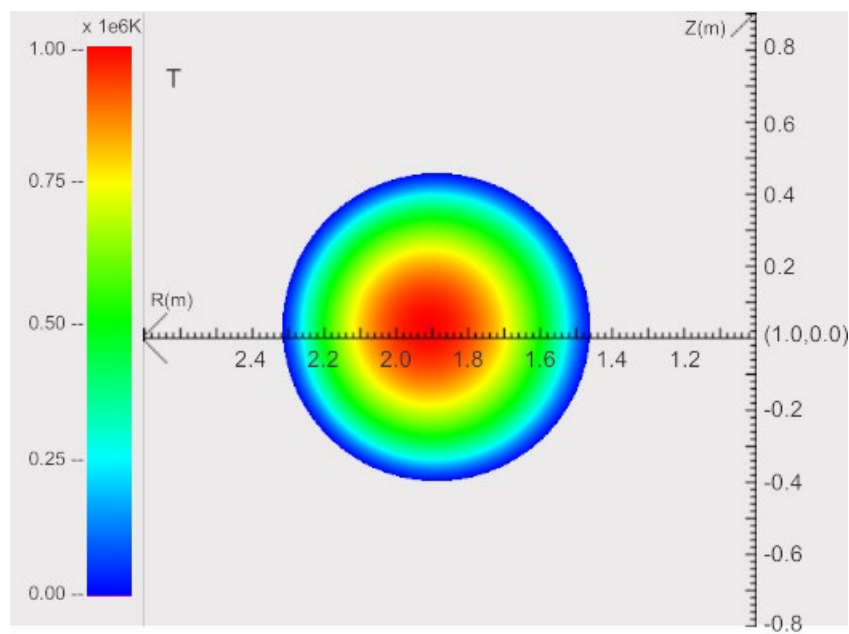
磁场分布



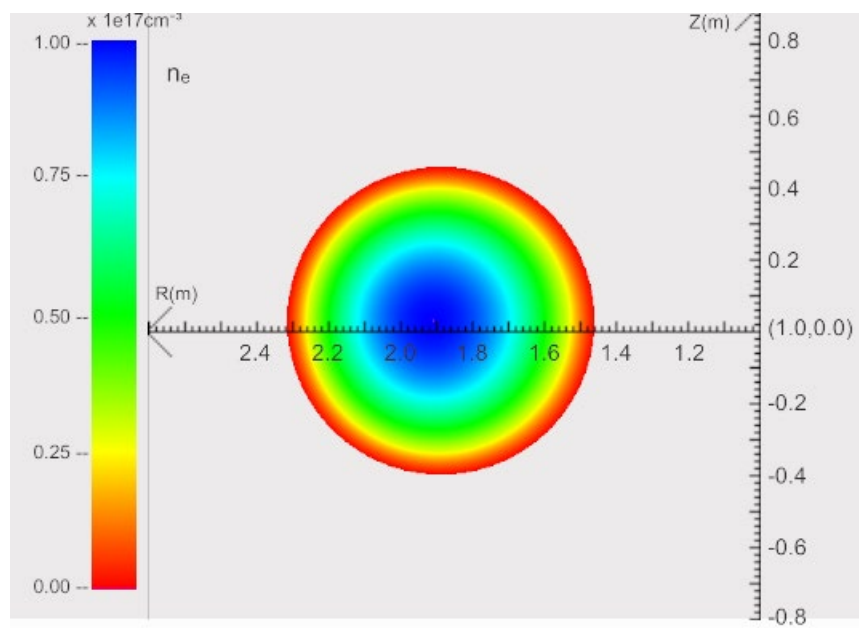
真空截面图

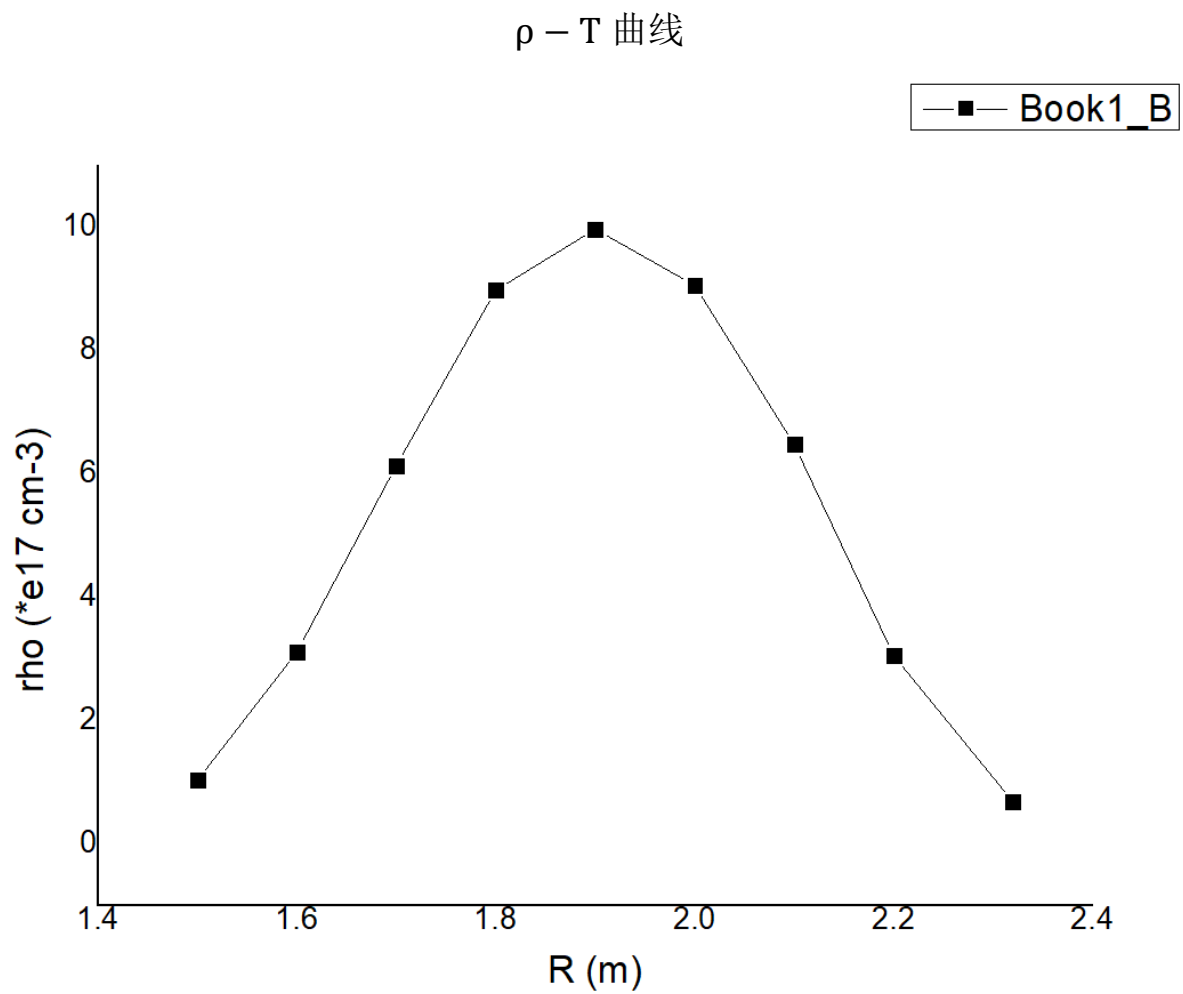


温度分布



密度分布





1.3.3 第三组

相关参数

磁面位形 圆形面

极向场电流
0.5~2 T·m
I*mu_0 (I为电流, mu_0为真空磁导率)

温度轮廓参数

密度轮廓参数

a0
[1e6,1e8]

b0
[1e17,1e19]

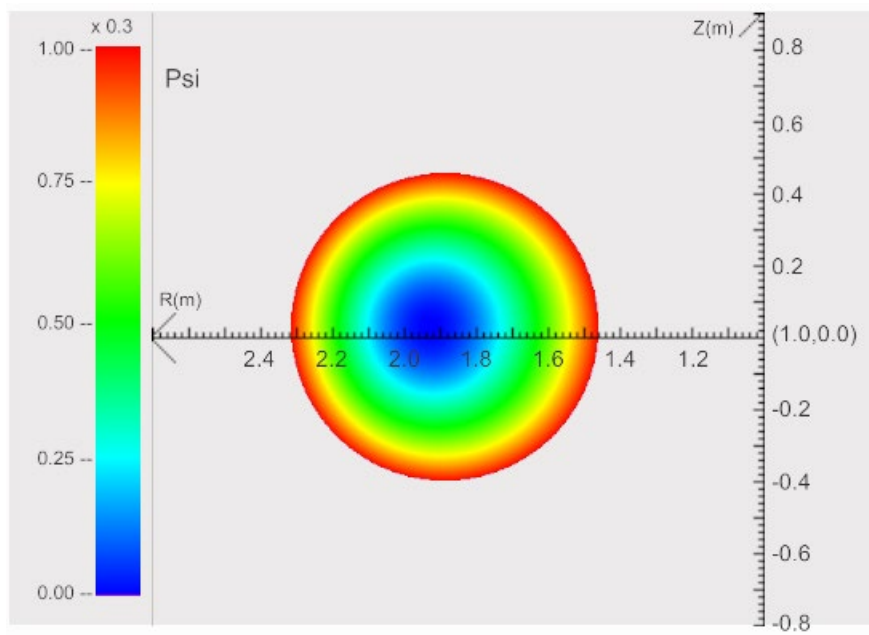
a1
励磁电流/24

b1
励磁电流/24

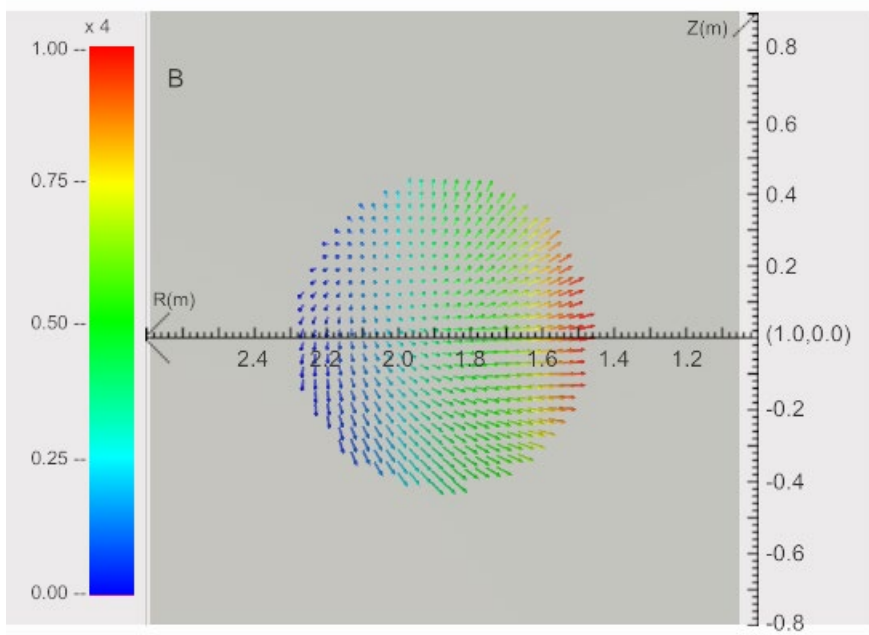
运行

诊断方式: ☒ 探针 ☐ 汤姆逊散射诊断方式

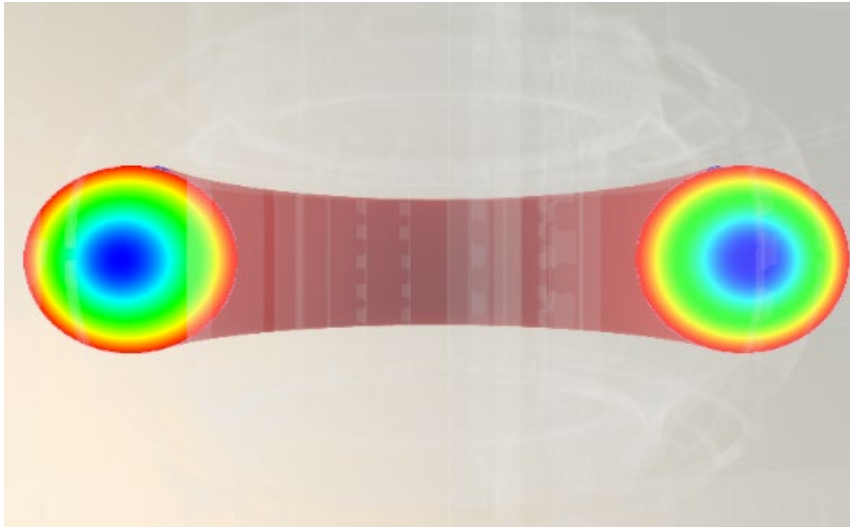
磁面位形



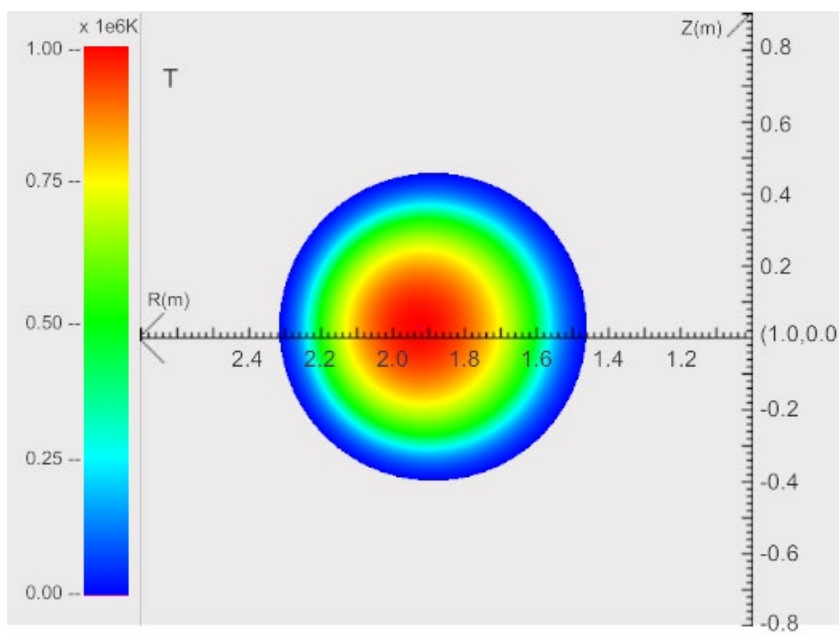
磁场分布



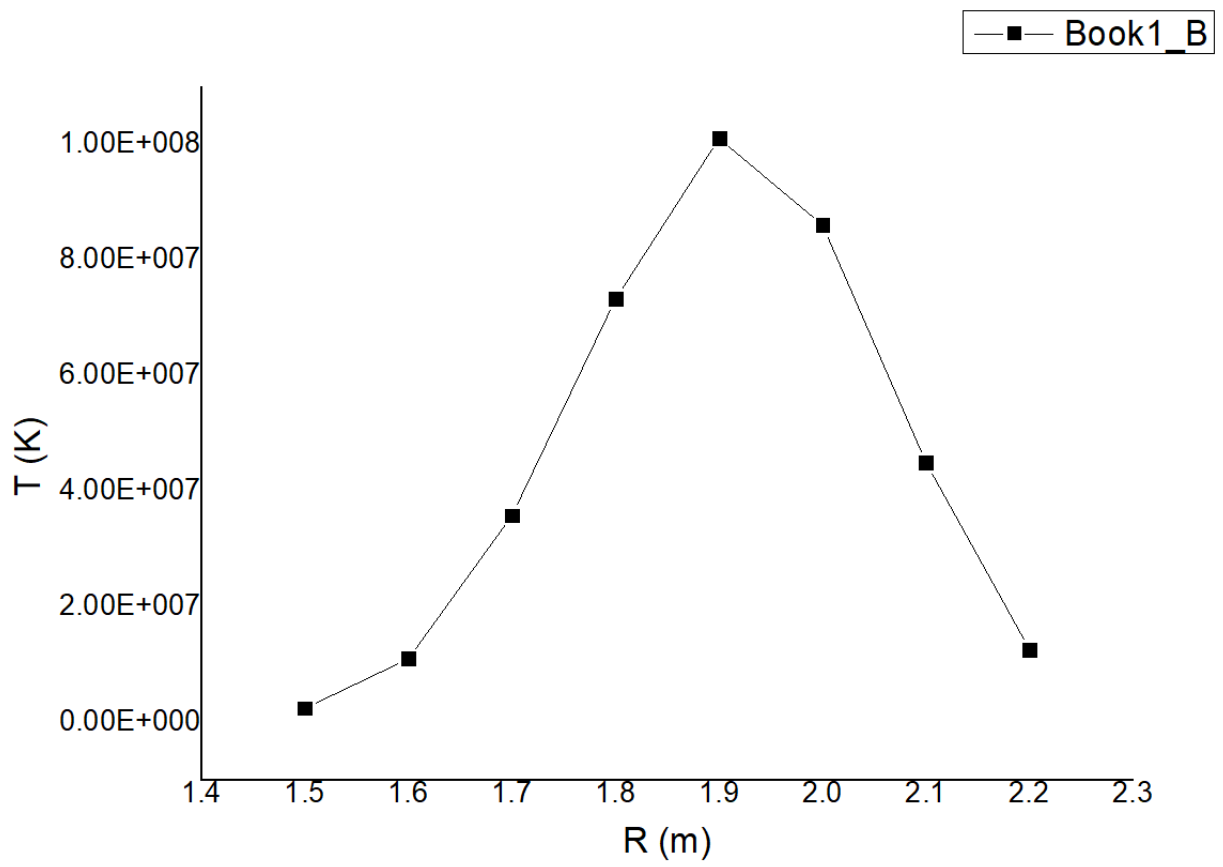
真空截面图



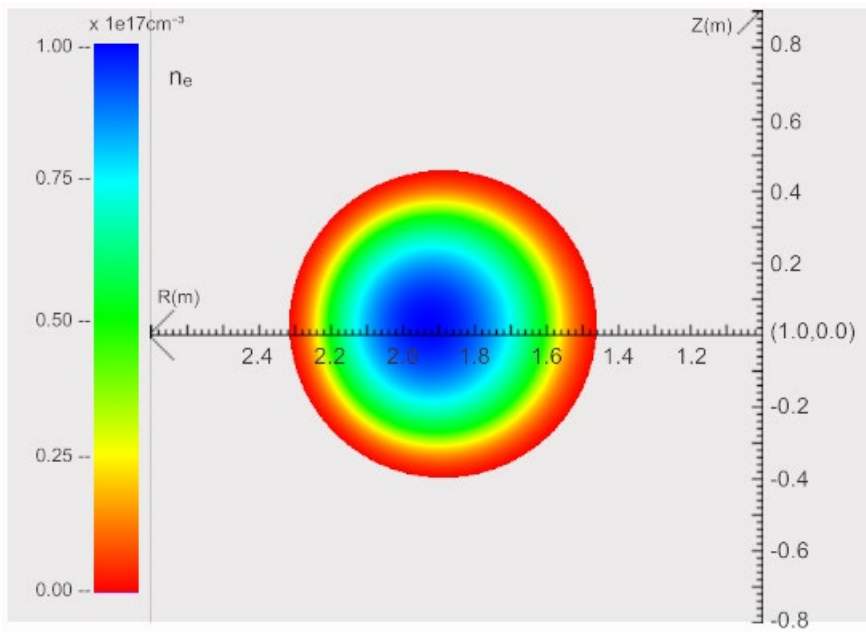
温度分布

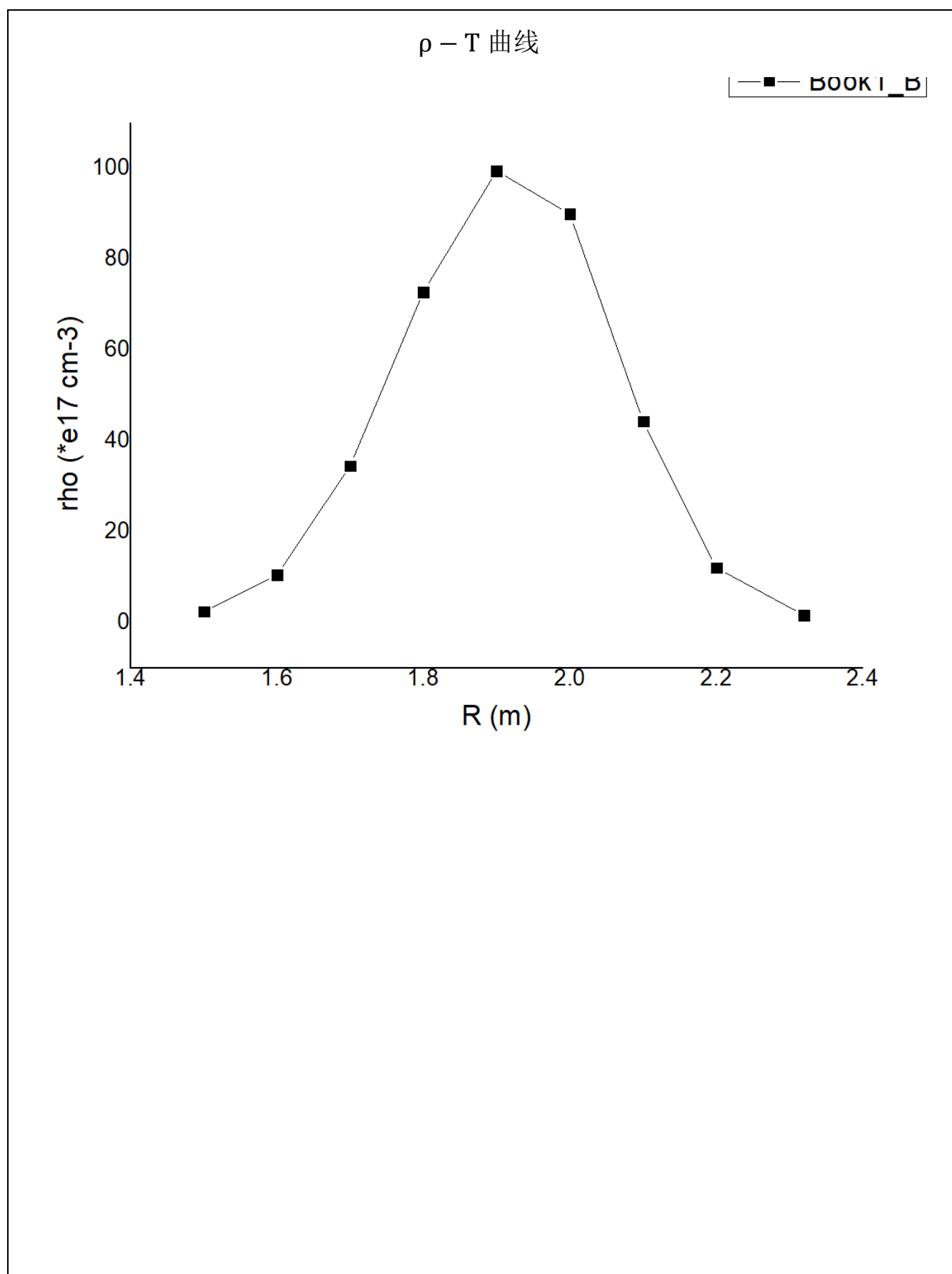


T-R 曲线



密度分布





2. 单粒子运动轨迹

2.1 He

粒子属性

粒子类型He

粒子入射初始位置0.15[-0.45, 0.42] m

速度v01: 1e4 v02: 4e4 v03: 4e4
[1e4, 1e7] m/s

运行

粒子轨迹环向截面图

粒子导心运动轨迹3D效果

粒子属性

粒子类型He

粒子入射初始位置0.15[-0.45, 0.42] m

速度v01: 1e5 v02: 4e4 v03: 4e4
[1e4, 1e7] m/s

运行

粒子轨迹环向截面图

粒子导心运动轨迹3D效果

粒子属性

粒子类型He

粒子入射初始位置0.15[-0.45, 0.42] m

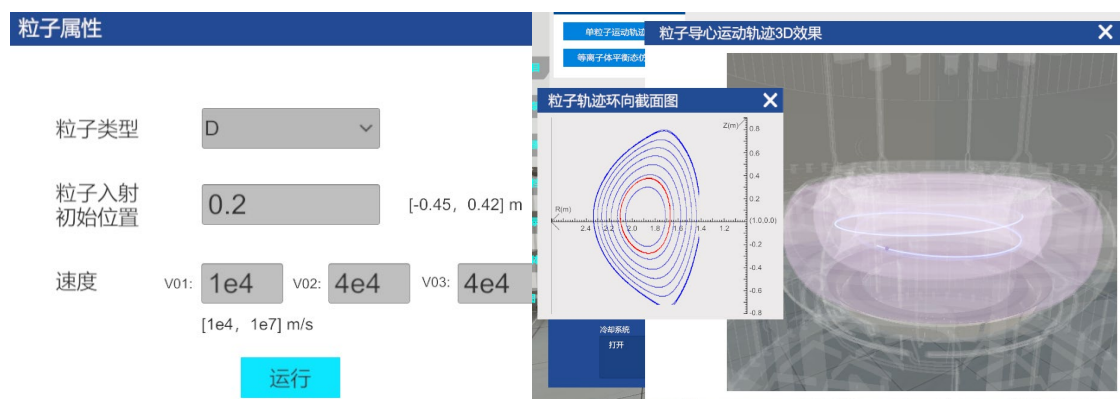
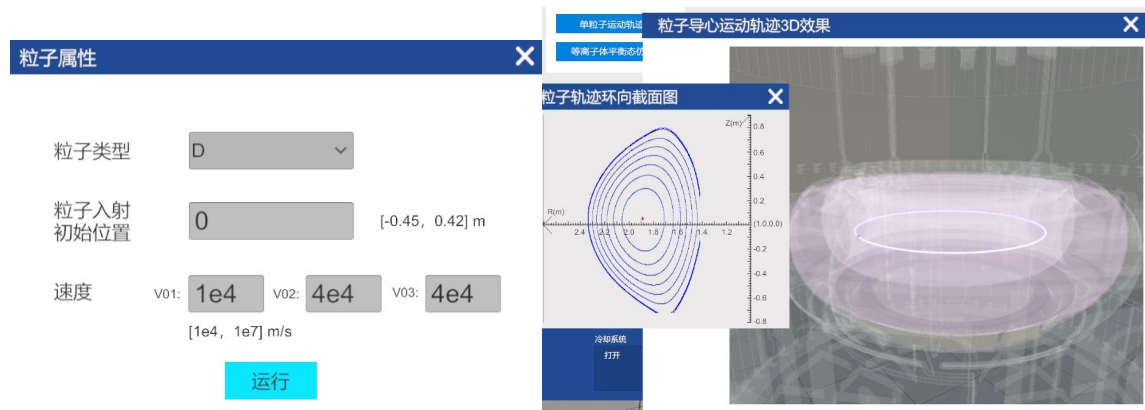
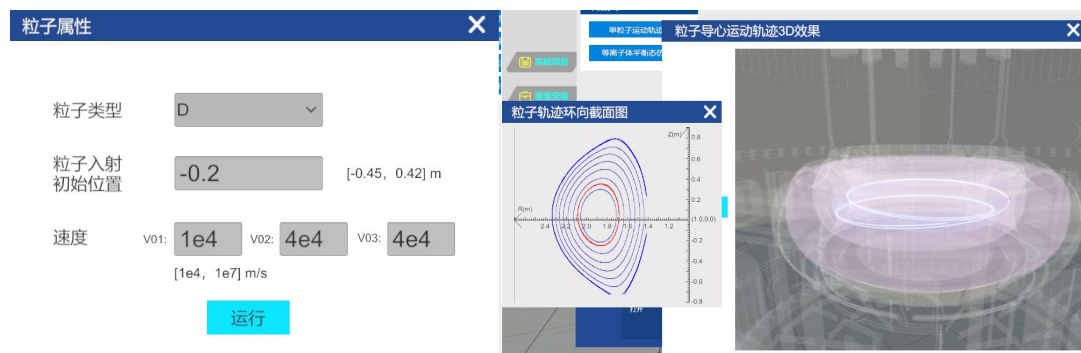
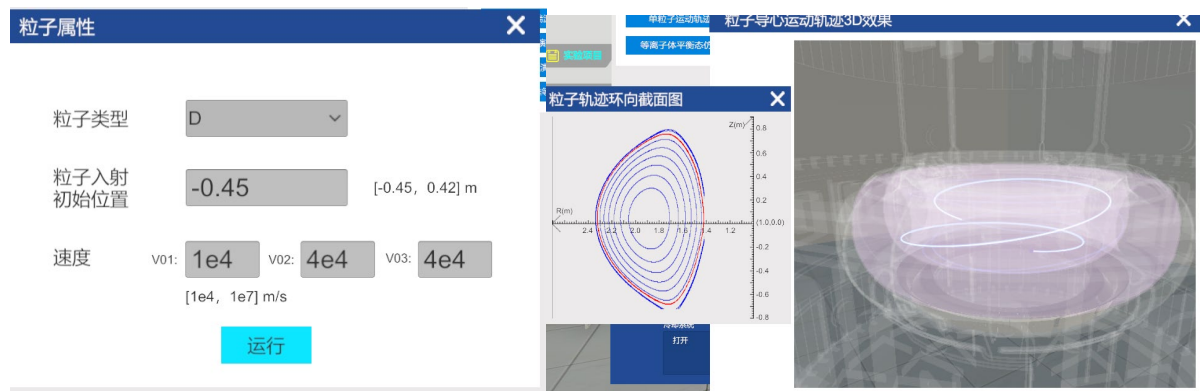
速度v01: 1e6 v02: 4e4 v03: 4e4
[1e4, 1e7] m/s

运行

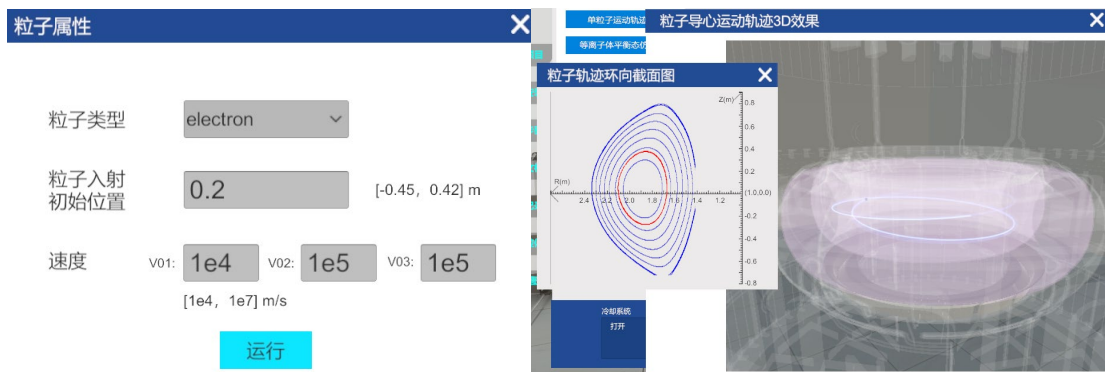
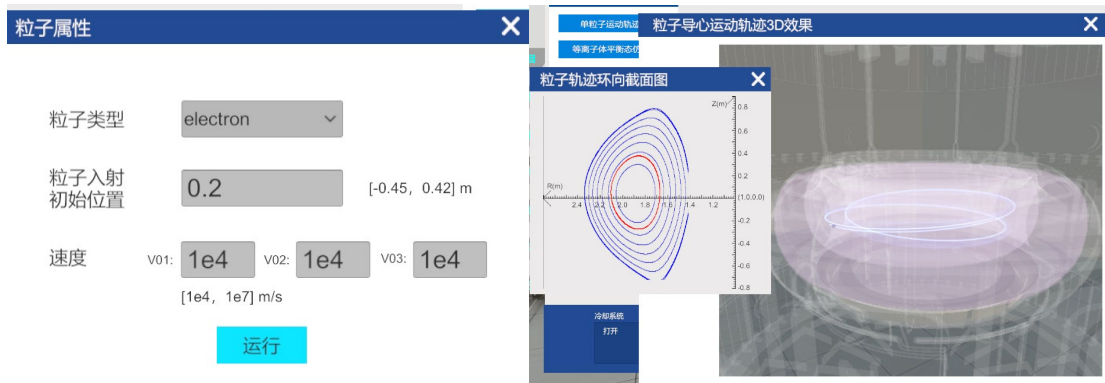
粒子轨迹环向截面图

粒子导心运动轨迹3D效果

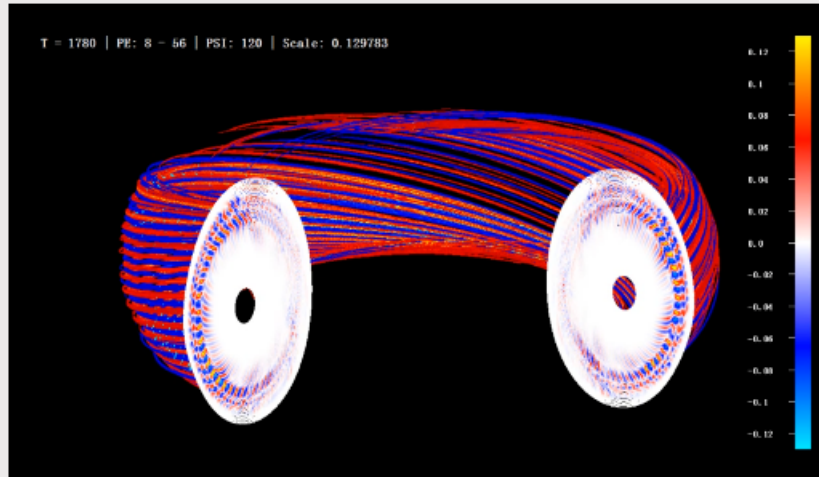
2.2 D



2.3 Electron



低约束模式下的离子温度梯度模湍流

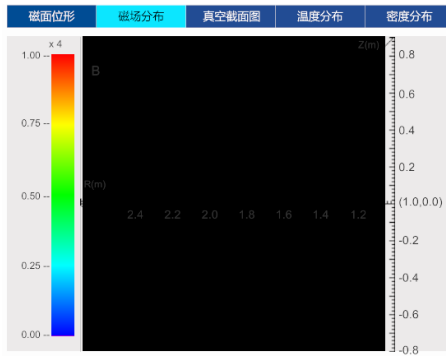


重新播放

【误差分析】

该实验平台有一些 bug 以待修复：

1. 等离子体平衡态仿真有时候会无法产生磁场分布曲线：



2. 单粒子体运动轨迹有时候会无法产生局与螺旋图。
3. 建议移动视野直接通过鼠标的移动产生，不需要附加点击鼠标右键的设定，非常麻烦。

【实验心得及思考题】

1. 为了方便与精确，本实验径向取点时，点的纵坐标为 0，即取 x 轴上的点，这样既方便，也比较准确，减小了实验过程中，因为读数而产生的误差。
2. 通过对比发现，在实验一等离子体平衡态仿真实验中，当 a_0, b_0 的值指数升高是，磁面位形不同的情况均出现密度、温度在相应位置点的指数倍升高。
3. 通过观察发现，温度、密度的曲线分布近似呈正态分布，而当 a_0, b_0 的值升高的时候，曲线峰值更加尖锐，这意味着分布曲线中的参数 σ 变小了。
4. 按照磁面位形进行对比，三角形面的曲线最为尖锐，椭圆面次之，而圆形面的曲线是最为圆润的，这意味着圆形面的温度、密度的径向分布梯度相对较小，可以依据三种磁面位形的这一特点，根据不同的应用场景，选择合适的磁面位形。
5. 通过对 He 粒子的实验可以知道，当 V_{01} 越大时，粒子运动的范围限制就越大，从一开始的圆周运动，到之后的圆弧往返运动，且速度越大，圆弧就越小； V_{01} 越大，粒子运动的速度反而越小。
6. 通过对 D 粒子的实验可以知道，改变初始位置，粒子旋转的方向会变化，粒子运动的范围会变化。
7. 通过对 electron 的实验可以知道，改变 V_{02}, V_{03} ，粒子的运动速度会相应改变，而粒子的运动轨迹都不会变化。

【数据记录及草表】

1.等离子体平衡态仿真

温度分布

磁位 面形	极向 场电 流	a0	b0	a1	b1	R1 (1.42)	R2 (1.50)	R3 (1.60)	R4 (1.70)	R5 (1.80)	R6 (1.90)	R7 (2.00)	R8 (2.10)	R9 (2.20)	R10 (2.32)
三角 形面	1.2	1e6	1e17	0.05	0.05	10672.47	46893.46	206312.9	556492.9	892772.8	998739.8	837139.3	438978.8	111840	8649.254
		1e7	1e18			97387.41	403088.2	1935482	5389923	8912811	10010079	8351078	4359342	1170956	101408.6
		1e8	1e19			162086.1	812000	5679684	2.84e7	7.64e7	1.01e8	7.73e7	2.61e7	3576245	192212.7
椭圆 面		1e6	1e17			32242.35	99398.87	283711.3	588288.9	875224.8	998486.9	945502.4	702300.5	340230.3	63223.25
		1e7	1e18			314039.5	885937.7	2797194	5708038	8715699	9990146	9459992	6878820	3609701	700913.2
		1e8	1e19			640000.3	2014402	9126736	2.99e7	6.78e7	9.72e7	9.16e7	5.14e7	1.49e7	1410396
圆形 面		1e6	1e17			\	101000	298000	606000	891000	1000000	906000	636000	213000	\
		1e7	1e18			\	1082622	3126388	6338555	8930691	1.02e7	9175609	6339690	2852122	766461.3
		1e8	1e19			\	2458962	1.10e7	3.58e7	7.32e7	1.01e8	8.60e7	4.49e7	1.26e7	\

密度分布

磁位面 形	极向场 电流	a0	b0	a1	b1	R1 (1.42)	R2 (1.50)	R3 (1.60)	R4 (1.70)	R5 (1.80)	R6 (1.90)	R7 (2.00)	R8 (2.10)	R9 (2.20)	R10 (2.32)	
三角形 面	1.2	1e6	1e17	0.05	0.05	9.94e14	4.11e15	1.97e16	5.56e16	9.01e16	9.98e16	8.37e16	4.38e16	1.19e16	1.13e15	
		1e7	1e18			9.71e15	4.03e16	2.03e17	5.55e17	9e17	1e18	8.24e17	4.5e17	1.17e17	1.09e16	
		1e8	1e19			1.61e16	8.12e16	6.07e17	2.86e18	7.67e18	1.02e19	7.74e18	2.46e18	3.58e17	1.94e16	
椭圆面		1e6	1e17			3.22e15	9.04e15	2.74e16	5.99e16	8.66e16	9.99e16	9.40e16	7.02e16	3.64e16	7.17e15	
		1e7	1e18			3.15e16	8.85e16	2.70e17	5.83e17	8.65e17	9.97e17	9.44e17	6.88e17	3.36e17	6.21e16	
		1e8	1e19			6.02e16	2.27e17	9.13e17	2.89e18	6.94e18	9.70e18	9.31e18	4.99e18	1.40e18	1.65e17	
圆形面		1e6	1e17			\	1.55e16	3.17e16	6.39e16	8.99e16	1.00e17	9.20e16	6.35e16	2.88e16	7.34e15	
		1e7	1e18			\	1.03e17	3.11e17	6.13e17	8.97e17	9.96e17	9.05e17	6.47e17	3.05e17	6.81e16	
		1e8	1e19			\	2.45e17	1.05e18	3.45e18	7.28e18	9.94e18	8.99e18	4.43e18	1.21e18	1.62e17	

教师签字：