

普通物理学实验 II

电子实验报告

实验名称：托卡马克等离子体虚拟仿真实验

指导教师：肖婷

班级：图灵 2303

姓名：张晋恺

学号：3230102400

实验日期：2024年 12 月 25 日 星期 三 上午

浙江大学物理实验教学中心

一、 实验综述

1.1 实验背景

核聚变能在大规模商业应用之前需要解决两大关键问题：一是实现核聚变反应的持续进行，获得聚变能量增益；二是将聚变反应产生的能量转化为可实际应用的热能，并能产生出足够的氦以保证聚变反应自持。

第一个问题的解决依赖于托卡马克等离子体物理技术的发展，本实验主要关注托卡马克等离子体物理过程，并将在下面的章节中重点介绍。第二个问题则取决于包层技术的发展。核聚变后产生的 α 粒子留在等离子体中继续加热燃料离子，而聚变产生的高能中子转变成核热以及氦燃料的增殖是依靠包层来完成的。

聚变包层是聚变堆实现氦自持和能量转换的关键部件。其结构通常包括耐高温、低活化的结构材料，氦气冷却剂结构，固态球床如硅酸锂小球作为氦增殖剂、金属铍球作为中子倍增剂。对包层内球床热工水力学分析能够给出系统中冷却剂的流动和传热特性。有关包层技术的知识我们在此不做展开。

托卡马克主要是由外部线圈产生的环形磁场约束等离子体的一种磁约束核聚变研究装置。在等离子体实验中，首先通过中心螺线管的电磁线圈在装置中产生环向电场击穿并加热等离子体，同时利用外部的高功率射频波、中性束等加热手段产生高温高压等离子体。托卡马克等离子体的约束不仅仅依靠环形磁场，还必须同时使用极向磁场来实现等离子体的压力和磁力的平衡。托卡马克中的极向磁场主要是由环形等离子体电流自身产生。环向磁场和极向磁场共同形成了一个沿着装置环形的螺旋型磁场。

托卡马克高温等离子体真空室中，面向等离子体的部件通常称为第一壁部件。第一壁部件会受到来自等离子体的高能粒子轰击和热负荷冲击。早期托卡马克采用圆形截面，并使用限制器来确定等离子体边界，限制器的表面位置决定了等离子体的最外闭合磁面（last closed flux surface, LCFS）。限制器的主要作用是避免来自等离子体的高能粒子对其他第一壁材料的损伤。但是由于限制器与等离子体直接接触，其表面产生的杂质和气体污染等离子体，且热负荷会导致限制器表面材料腐蚀乃至熔化而产生杂质污染等离子体。

20 世纪 50 年代开始发展 D 形截面托卡马克，通过磁场控制改变等离子体拉长比与三角形变，并采用“偏滤器”。等离子体电流与外部同向的极向场线圈电流共同产生了极向磁场为零的点，磁力线通过该点的面称为分界面，即 LCFS。在 LCFS 内部的磁面是闭合的，而位于其外侧的侧面是开

口的，称为刮削层（scrape-off layer, SOL）。从芯部等离子体跨越磁力线的高能粒子通过 LCFS 进入刮削层，沿着磁力线流向偏滤器靶板，偏滤器材料表面释放的杂质会被电离并受等离子体流冲刷回到偏滤器材料表面，从而实现过滤杂质、排出粒子的功能。

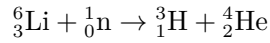
1.2 实验原理

1.2.1 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，并放出 17.6 兆电子伏特的能量



原料中的氘在海水大量存在；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发展能源需求的最终解决方案

1.2.2 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”）

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。

$$\Delta p = J \times B/c$$

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。

1.2.3 磁约束中的带电粒子轨道

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。

1.2.4 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。

二、 实验内容

2.1 实验仪器

2.1.1 EAST 装置

中性束系统、离子回旋装置、弯晶谱仪、低杂波系统、中性束系统、飞行质谱仪、离子回旋装置、汤姆逊诊断装置、EAST 主机。

2.1.2 主体设备

- **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。

2.1.3 诊断设备

- **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，测量等离子体参数轮廓时间间隔可达 300 毫秒。探针系统采用两级传动结构：一级传动为长距离慢动系统，目的是驱动探针系统穿过托卡马克装置的水平窗口进入等待区域，在该区域，探针头不受等离子体的影响；二级传动为短距离快动系统，目的是驱动探针快速进入和退出等离子体削除层区域进行数据诊断。
- **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。包括罗科线圈和磁探针。

2.2 实验过程

2.2.1 托卡马克装置认识

- 托卡马克装置认识与重要诊断测量装置组装
- 通过点击各装置，对托卡马克装置的各部分进行认识。
- 等离子体诊断装置与电磁装置模块组装

- 实验启动准备：装置检查、启动冷却和抽真空装置。（较为简单，未截图）
- 进行学习测验。



(a) 托卡马克装置认识



(b) 装置组装

图 1: 基本操作

2.2.2 等离子体平衡

启动等离子体磁流体力学平衡仿真实验，观察磁面位形，磁场分布等图像。

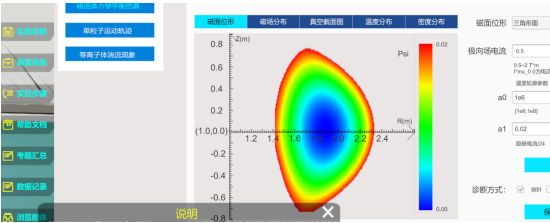


图 2: 观察图像

测量等离子体温度分布轮廓，点击“温度分布”显示真空室内环向截面上的温度分布，测量五组以上数据，并绘制径向 T-R 曲线。

R(m)	Z(m)	T(K)
1.72	0.74	4057253
1.72	0.56	5779434
1.77	0.38	7790948
1.87	0.20	9488192
1.92	0.03	9974244
1.85	-0.22	8966099
1.82	-0.37	7593156
1.75	-0.52	5777172

图 3: 部分数据截图

绘制径向 T-R 曲线图如下

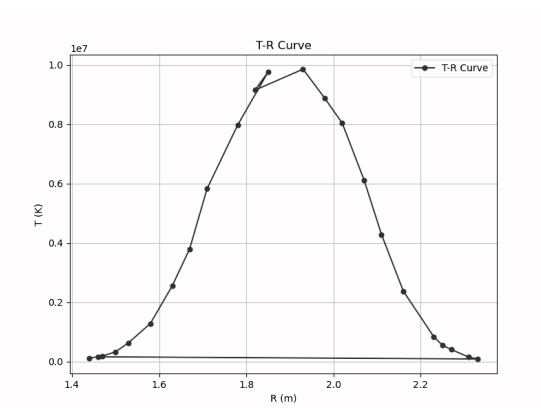


图 4: 径向 T-R 曲线

同理，测量等离子体密度分布轮廓，点击“密度分布”显示真空室内环向截面上的密度分布，测量五组以上数据，并绘制径向 n-R 曲线。

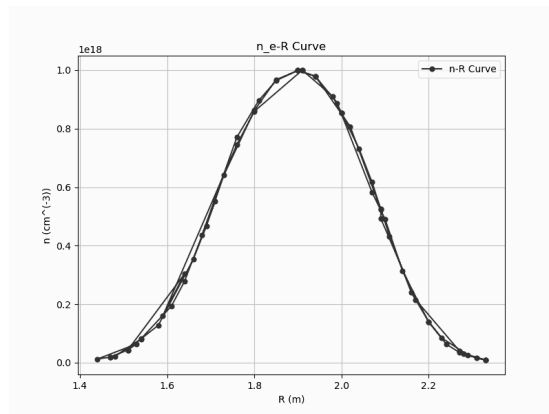


图 5: 径向 n-R 曲线

修改不同磁场位形，观察等离子体平衡状态的变化。

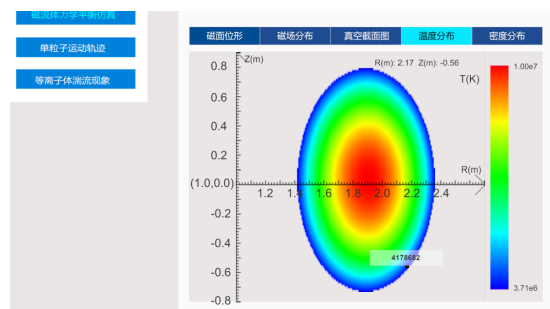


图 6: 椭圆磁场

2.2.3 单粒子在复杂磁场中的运动轨迹仿真实验

首先完成测试题，测量分析带电粒子在托卡马克复杂位形磁场中的运动轨迹。

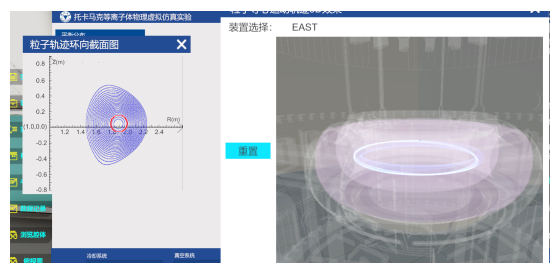


图 7: 粒子轨迹

随后修改不同的磁场位形，或者修改不同的粒子初始参数，观察粒子轨

迹的变化。这一部分较为简单，未截图。

2.2.4 等离子体微观湍流的观察

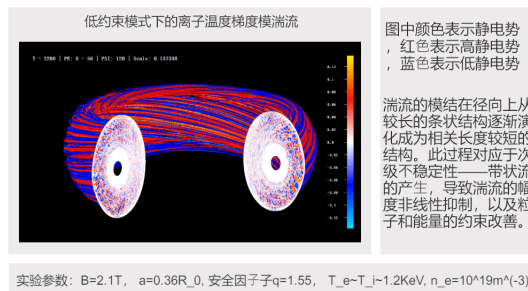


图 8: 湍流

最后完成实验, 关闭励磁电流, 完成实验评价, 查看实验成绩。

托卡马克等离子体物理虚拟仿真实验	张雷	3230102400	完成	100	2024-12-24 18:59:58	2024-12-24 19:12:45	13	步骤详情
------------------	----	------------	----	-----	---------------------	---------------------	----	----------------------

图 9: 实验通过

三、 实验总结

本次实验是我本学期最后一次实验，也是我第一次体验虚拟仿真实验，实验的设计对我来说十分新颖，步骤的设置与讲解也十分清楚详细，同时允许重复实验，一开始由于不熟悉实验要求，导致我前两次实验没有通过，后来经过仔细阅读实验要求，并重新进行实验，最终通过了实验；通过这次实验，我学习到了托卡马克等离子体物理过程，并了解了托卡马克装置的结构与工作原理，对于磁场和粒子在磁场中的运动有了更加深刻的认识，同时对于等离子体微观湍流有了初步的了解；

这次实验之后，我的普通物理实验过程也圆满结束，从普通物理实验一的入门，到普通物理实验二的深入，这一年里，我学习到了很多知识，也收获了很多乐趣，感谢每一位老师的教导与帮助，感谢不放弃的自己；江湖路远，后会有期。

四、 实验拓展

4.1 核聚变反应发生及产生能量增益的条件

核聚变反应发生的关键条件：

- 高温（数千万至数亿摄氏度）
高温使粒子获得足够的动能，克服原子核之间的库仑斥力（正电荷之间的排斥力），从而接近到发生核反应的范围内。例如，太阳核心的温度约为 1500 万 K。
- 高压或高密度
高压使粒子更容易发生碰撞，增加反应的几率。在实验室中，使用强磁场（如托卡马克装置）或惯性约束（如激光聚变）实现高密度约束。
- 足够长的约束时间
粒子必须在高温和高压环境中保持足够长的时间（称为约束时间），才能确保足够多的反应发生。
- 燃料选择与反应截面
核燃料的选择直接影响反应的难易程度。最常见的核聚变燃料是氢的同位素（如氘和氚），因为它们的库仑斥力较小，更容易发生聚变。
- 能量增益（点火条件）
要实现核聚变能量增益（即输出能量大于输入能量），需要满足劳逊判据（“聚变三乘积”）： $n \cdot \tau \cdot T > \text{临界值}$ 。其中 n ：粒子的密度， τ ：约束时间， T ：温度。如果达到这一准则，聚变反应就能自持运行，称为点火条件。
- 最易发生且被广泛研究的反应是氘-氚（D-T）聚变反应：



4.2 托卡马克内等离子体中的电子与聚变产生的 alpha 粒子，其运动轨迹有何不同，原因是什么？

电子：质量轻、速度快、轨迹紧密沿磁场线运动，回旋半径小，容易受电磁波和磁场扰动的影响。

α 粒子：质量大、速度慢、回旋半径大、轨迹松散，在等离子体中起到加热作用。

关键差异：电子的轨迹更受磁场的紧密约束，而 α 粒子由于较大的质量和高能量，其轨迹更为松散且不易被磁场完全约束。这也是为什么在托卡马克装置中需要优化磁场设计，以确保更多的 α 粒子能量沉积在等离子体中用于自加热，而不是直接损失。

4.3 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怎样的运动

如果仅存在环向磁场（沿环形装置的环向方向，即与装置中心轴平行），则等离子体中的带电粒子（正负电性不同的粒子）将表现出特定的螺旋运动，但无法有效约束。