

基于人工智能的双锥对撞实验结果预测研究

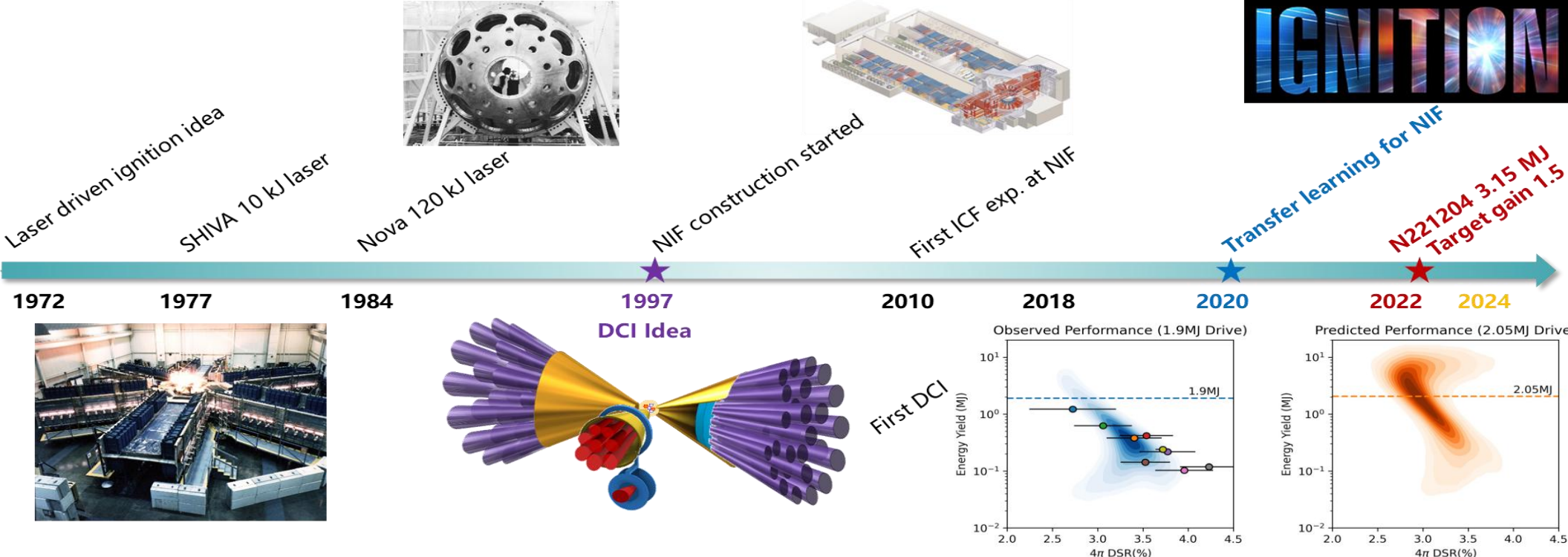
组员 / 王瑜含、汪子旭

指导老师 / 吴福源、张杰

背景介绍与主要成果

• 1972年，美国劳伦斯国家实验室的John Nuckolls首次明确提出，实现聚变能量正增益需要兆焦级别的激光能量驱动；2022年，美国国家点火装置（NIF）首次在2.05MJ激光能量输入的实验中产生了3.15MJ的聚变能量输出，实现了能量增益大于1的点火目标。而中国的张杰院士在1997年首次提出了双锥对撞点火（DCI）方案。在DCI中引入人工智能技术可以实现：（1）基于**真实实验数据**，精调现有数值模拟程序的输出结果；（2）利用机器学习模型**加速**传统数值模拟的推理计算；（3）结合贝叶斯概率推断，**预测**实验结果的分布概率。

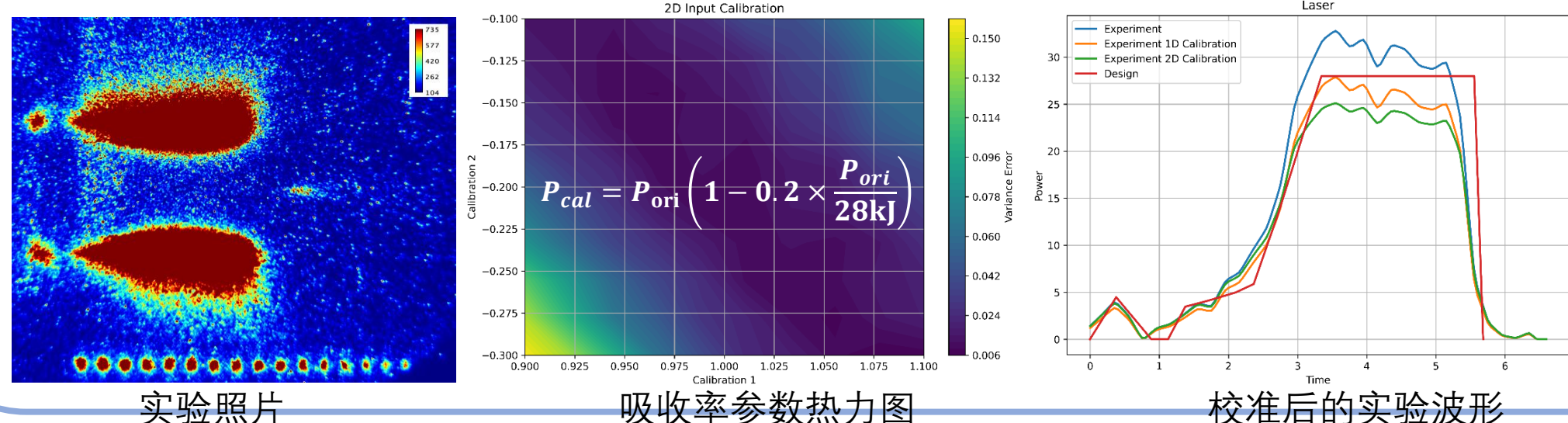
• 本项目的**主要成果**为：（1）基于MULTI流体程序，发展了多功能的**开源**PyMulti工具库；（2）基于机器学习和蒙特卡洛采样方法，**校准了R10轮次实验波形**；（3）基于**深度神经网络**等架构，结合DCI物理过程，训练了针对内爆速度、内爆时间等物理量的代理模型；（4）基于**迁移学习**方案，采用实验数据精调了模型的输出；（5）基于实验误差分布的波形扰动，得到了对实验输出的**概率分布预测**；（6）展示了机器学习模型在更高能量级别的实验中的预测表现，实现了对本方案基于人工智能的技术路线的**可行性验证**。



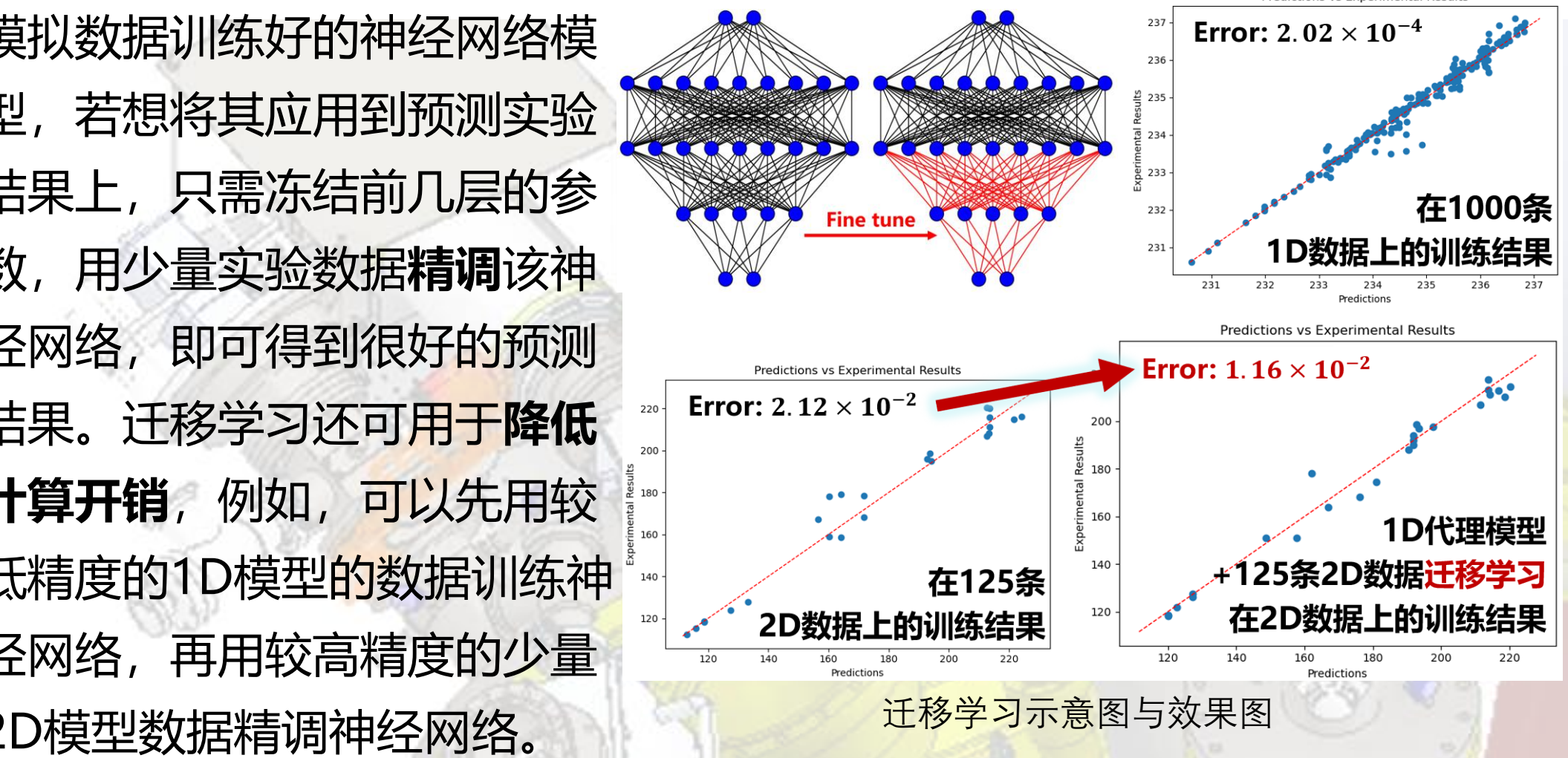
输入校准：预测R10实验对撞时刻

输出校准：迁移学习

R10轮次实验中，流体模拟程序预测的对撞时刻与实验测得的实际对撞时刻有较大差距，因此对精确诊断对撞时刻的其他物理量带来了较大困难。针对这一问题，我们采用基于**机器学习**和**蒙特卡洛采样**方法的“输入校准”方法，对实验波形校准修正后输入模拟程序，得到更为准确的对撞时刻预测。该项研究的物理意义还在于，得到了对应于不同激光强度的“**能量吸收率**”，可供后续理论研究。



迁移学习的原理是，对于使用模拟数据训练好的神经网络模型，若想将其应用到预测实验结果上，只需冻结前几层的参数，用少量实验数据**精调**该神经网络，即可得到很好的预测结果。迁移学习还可用于**降低计算开销**，例如，可以先用较低精度的1D模型的数据训练神经网络，再用较高精度的少量2D模型数据精调神经网络。



代理模型：MultiNet的开发与使用

概率分布预测

直接调用MULTI程序模拟内爆过程的计算成本较高，不便于高并发参数优化实验的开展。NIF基于HYDRA程序的模拟数据，利用神经网络模型搭建起了“**代理模型**”，实现了高精度、高性能模拟，并自然地适应迁移学习的要求。



高并发的神经网络代理模型使得基于贝叶斯后验推断的实验结果预测成为可能。通过给定先验概率分布，结合实验数据和模拟程序，通过贝叶斯推断得到实验的**误差分布**。对设计的实验参数进行符合后验分布的扰动，可以实现对实验结果的**概率分布预测**。基于假定的误差分布，提高能量至30kJ后，平均密度大幅提升。



PyMulti

更高能量的预测表现

在前期工作的PyMulti4Fusion程序基础上，考虑PyTorch的应用环境和算例的实际情况，我们开发了融合MULTI-1D和MULTI-2D的Python程序，以实现Multi程序的**自动化调用**、**采样**、**数据处理**。与此同时，我们集成了**均匀采样**、**随机采样**、**MCMC采样**等方法，以覆盖多精度的采样需求。



为了回答模型是否能够**预测未来实验参数**，如更高能量的激光的实验结果这一问题，我们测试了26-40kJ激光能量的结果。实验表明模型在更高能量处仍能保持较好的准确性。



展望

▣**搭建一个可扩充的大型模拟-实验数据库**：
基于不同的模拟程序，搭建大型模拟数据库，并收集加入现有实验数据；一个高质量的大型数据库既是迁移学习模型的重要基石，也是后续进一步研究的基础设施。

▣**含时模型的开发**：
现有的模型较为简单，难以精确预测精细波形结构带来的扰动；我们计划在当前工作的基础上，结合最前沿的深度学习模型，如Transformer等模型，来进一步提高精确度。

▣**多物理过程训练、物理信息嵌入**。
现有的工作主要针对压缩加速和对撞阶段，我们还可以引入更多的物理限制，确保模型预测的可信度；同时，对于后续的点火阶段，同样可以进行进一步的研究。