

对撞机中微子的黎明

(中国原子能科学研究院 周书华 编译自 Elizabeth Worcester. *Physics*, July 19, 2023)

中微子是宇宙中最丰富的粒子之一，但是它们极少与物质相互作用。科学家们使用高强度的中微子源和大的探测器，已经观测到来自太阳、宇宙射线在大气中的相互作用、地球内部、超新星和其他天体的中微子，也观测到了来自人造中微子源(如核反应堆和使用固定靶的粒子加速器)的中微子。现在，大型强子对撞机(LHC)上的前向搜索实验(FASER)成功探测到了对撞束中产生的中微子。

中微子不能用对撞机中的探测器直接观测，科学家通过入射的中微子与物质相互作用所产生的粒子来研究中微子。这些稀少的相互作用的概率随着中微子能量的增加而增加，最高能量的中微子最可能产生在沿着对撞轴的前向区。

FASER的设计和安装特别考虑到探测在大型强子对撞机(LHC)的ATLAS实验前向区的中微子。FASER位于距离ATLAS的束流对撞相互作用点(IP)约480 m的地方，

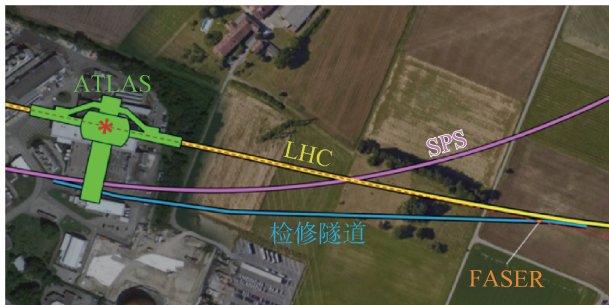
如图所示，所以不会影响束流的轨迹。带电粒子被控制LHC束流的磁铁偏转开，约100 m的岩石和水泥将FASER和ATLAS的相互作用点分开。结果是只有与物质发生弱相互作用的中性粒子可以无阻碍地通过岩石和水泥，从相互作用点到达FASER。

当中微子与物质通过交换W玻色子相互作用时，产生与中微子的味相同的带电的轻子。例如，涉及电子中微子的相互作用会产生一个电子，而涉及缪子中微子的则产生一个缪子。FASER合作组主要鉴别在最靠近ATLAS相互作用点的钨靶内产生的缪子和反缪子的事件。在实验中，使用当带电粒子通过时发光的闪烁体“否决”探测器，选择符合在靶中产生缪子的事件，并排除来自靶外的缪子进入闪烁探测器的带电粒子事件，磁场内的硅微条组成的径迹谱仪用来测量缪子的动量和轨迹。研究人员分析了2022年7月到11月之间获取的数据，在所

研究的数千个事件中有153个事件通过了选择标准，确认为符合缪子或反缪子中微子相互作用的事件。基于模拟和统计分析，研究团队确定几乎所有这些事件都来自真正的涉及缪子或反缪子中

微子的相互作用。只有很小部分事件可能是通过了选择标准的非信号事件“本底”。最终的中微子事件数是 153^{+12}_{-13} ，统计显著性超过假设的本底16个标准偏差，表明这一观测与模拟的预期一致。这些事件的空间分布和特性与它们是中微子相互作用一致，因此，该实验首次探测到粒子对撞机上产生的中微子。FASER观测到153个信号事件不久，另一个LHC实验，散射与中微子探测器(Scattering and Neutrino Detector)，报道了有很高统计显著性的8个事件，为来自粒子对撞机LHC的中微子的观测提供了附加的验证。

没有其他实验直接探测过LHC上可达到的中微子能量范围，与大多数人造中微子源不同，LHC碰撞产生大量的全部3种味的中微子：电子、 μ 子和 τ 子中微子。至今只探测到很少的 τ 子中微子，但是下一代的FASER可以测量数千个 τ 子中微子。在某些模型中， τ 子中微子谱具有低于标准模型预言的能量。在对撞机中微子物理新领域中，可能观测到数以千计的各种味的高能中微子，这些高能中微子可用于寻找新物理，并扩展我们对自然界的基本作用力的认识。FASER为未来对撞机的中微子物理测量实验打开了大门。在LHC研究中心的白皮书——前向物理设施(FPF)中描述了一套实验，其中包括用于FASER的升级版的探测器。FPF计划研究广泛的课题，包括寻找假想的粒子和暗物质、天体物理、检验量子色动力学、以及中微子物理。



FASER安装在检修隧道中，该隧道连接着LHC和超级质子同步加速器SPS。在ATLAS实验相互作用点(红色星号)的质子碰撞产生的中微子束(红色虚线)沿着与LHC相切的方向飞出