

弱相互作用大质量粒子与轴子

(上海交通大学 张园园、刘江来 编译自 Keith Cooper. *Physics World*, 2024, (8): 31)

在地表以下1.47公里的美国南达科他州的桑福德地下实验室里，静静地存放着七吨的液态氙(图1)。它是LUX-ZEPELIN(LZ)实验的研究装置，正在探寻暗物质穿越地球后到达探测器时可能留下的微弱痕迹。

在宇宙学的标准模型中，宇宙中大约27%的物质和能量由暗物质构成，尽管其本质至今未明。一种理论假设是，暗物质由一种名为弱相互作用大质量粒子(weakly interacting massive particle, WIMP)组成。

“暗物质问题最简单的解释就是找到一种像WIMP一样相互作用的基本粒子，”英国伦敦大学学院的物理学家兼LZ合作组发言人Chamkaur Ghag说道。LZ实验希望找到的正是这种粒子。2021年底LZ实验启动并投入运行以来，已经完成了大约5%的暗物质搜寻曝光量，还未发现WIMP的踪迹。

深入地下

根据理论，当太阳系在宇宙空间中穿行时，我们正在穿过一层稀

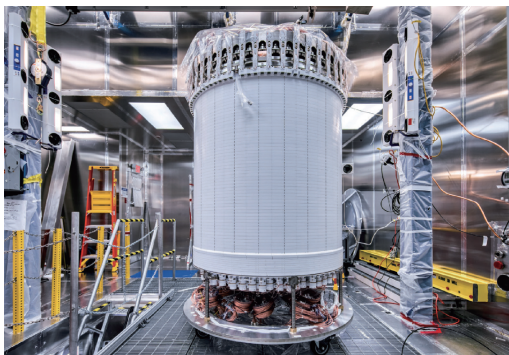


图1 LZ探测器由一个包含七吨液态氙的巨大容器构成。科学家们期望能够借此探测到弱相互作用大质量粒子(WIMPs)

薄的暗物质雾。由于暗物质和普通物质相互作用极其微弱，大部分暗物质粒子会穿透地球到达位于地下的探测器。LZ实验将七吨液态氙设计为理想的WIMP捕捉器，测量极其稀有的WIMP和氙原子碰撞后产生的闪烁光和电离电子信号。

“在实验中寻找暗物质，关键在于对探测器各个部分放射性本底的深入理解，”Ghag解释道。项目团队在筹备实验的五年时间里，对探测器的各个组件进行了细致的筛选和测试，确保每一个螺母、螺栓和垫圈的放射性本底都得到了充分的考量与控制。

“任何超出预期背景模型信号或迹象，我们都会评估它们的统计显著性，”Ghag说道。如果WIMP存在，探测到的碰撞事例数量将告诉物理学家暗物质粒子与普通物质相互作用的强度。

WIMP陷入危机?

一些较为主流的WIMP候选者是由一种被称作“超对称”的理论预测的，该理论假设标准模型中的每个粒子都有一个具有不同量子自旋的、质量更大的“超对称粒子”，其中最轻的中性稳定粒子曾是WIMP的候选者。但大型强子对撞机(LHC)未能探测到超对称粒子，这使得该领域及相关的WIMP理论陷入危机。

在杜伦大学任职的物理学家Francesca Chadha-Day主要通过天体物理观测研

究暗物质，她认为超对称的时代可能已经结束，并表示：“标准的超对称理论尚未得到证实，我倾向于认为该理论可能有严重问题。”然而，她强调超对称粒子“仅是WIMP的一个可能来源”。超对称性的提出旨在解释物理学中的某些难题，例如为什么引力比弱力更弱。但即便超对称性最终未能解决这些问题，其他暗物质理论亦存在，它们同样预测了可能具有WIMP性质的粒子。

LZ实验需要运行至少1000天才能达到其设计灵敏度。Ghag表示，现在说WIMP被排除就像“建造了LHC但在启动前停止”一样为时过早。

轴子宇宙

尽管对WIMPs尚存疑虑，但另一种不同类型的暗物质粒子正引起广泛关注。这种被称为轴子的粒子，Chadha-Day将其形容为“免费的暗物质”，因为科学家们最初提出它是为了解决一个截然不同的问题。

“在粒子物理学领域，存在一个被称为强CP问题的重大谜题，”Chadha-Day说道。这里的C代表电荷，而P代表宇称(有时被称为镜像)。CP对称性描述的是，如果将一个粒子换成它的相反电荷的反粒子，并将其替换为空间镜像，物理定律依旧保持其适用性。根据标准模型的预测，理论上强相互作用力(即负责将夸克结合于质子和中子内部的力量)应当违反CP对称性，然而实验测量则给出截然相反的结论。显然，存在某种因素介入了强力，惊人地维持了CP对称性。这个

因素被认为是轴子。“轴子被认为是解决强 CP 问题的主流方案，”Chadha-Day 说道，“进一步审视轴子的性质，还会发现它可以充当暗物质的角色。”然而，与 WIMP 一样，轴子至今尚未被探测到。

最近超对称性理论遇到的困难，使得科学家对轴子作为暗物质的热情升温。“支持轴子的动机很强，”Ghag 说道，“因为即使它们不是暗物质，它们也可能存在。”

透镜图像

根据预测，轴子比 WIMP 更轻，并通过电磁力(和引力)与物质相互作用。直接探测轴子的实验往往使用磁场，因为在磁场的存在下，轴子可以转化为光子。

天体物理的观测数据也可以用来研究暗物质究竟是 WIMP 还是轴子。来自星系和星系团周围暗物质的额外质量可以弯曲来自更远物体的光路，被称为“引力透镜”效应，这种效应的形状和扭曲程度受透镜星系中暗物质分布的影响。“由于轴子非常轻，量子效应变得尤为显著，”Chadha-Day 说道。引力透镜可以被想象为一系列由物质引发的空间曲率变化的“等高线”，等高线最为密集汇聚之处被称为临界曲线。同 WIMP 预言下的平滑分布不同，在轴子的情况下，量子干涉可以使临界曲线呈波纹状。

2023 年，香港大学 Alfred Amruth 领导的团队在类星体 HS 0810+2554 的引力透镜的临界曲线上发现了一些波纹的迹象，并且用轴子比 WIMP 更能解释透镜图案(图 2)。然而，鉴于他们仅对单一系统进行了研究，距离轴子的全面胜利仍相去甚远。

暗物质自相互作用

杜伦大学的天文学家 Massey 不

愿将自己局限于某一种暗物质模型，而是选择了一种唯象学方法，“我希望验证暗物质粒子之间是否有自相互作用”。研究暗物质之间相互作用的最佳天然实验室是两个星系团之间的碰撞。在星系团中，星系间距如此

之大，以至于它们在碰撞中互相错过。相比之下，星系团内的氢气云体积庞大，以至于它们无法避开彼此，因此碰撞后不会移动太远。我们知道，星系团里的每一个星系都被一个更大的、不可见的暗物质晕所包围。若暗物质之间“熟视无睹”，则碰撞后暗物质晕还是和对应的星系待在一起。但如果暗物质间存在着自相互作用，碰撞后暗物质晕将处于星系和氢气云之间的某个位置。因此，通过引力透镜确定暗物质晕的位置，可以推算出暗物质自相互作用的大小。

高空天文学

以上研究的困难在于一对星系团的碰撞可能需要一亿年才能完成。我们需要的是从不同的角度、以不同的速度观察星系团碰撞的各个阶段。

超压气球成像望远镜(SuperBIT)正是做这样研究的装置，它是一个气球携带的成像望远镜，Massey 是该项目的英国首席科学家。SuperBIT 在 NASA 提供的超级压力气球辅助下，升至 40 公里的高

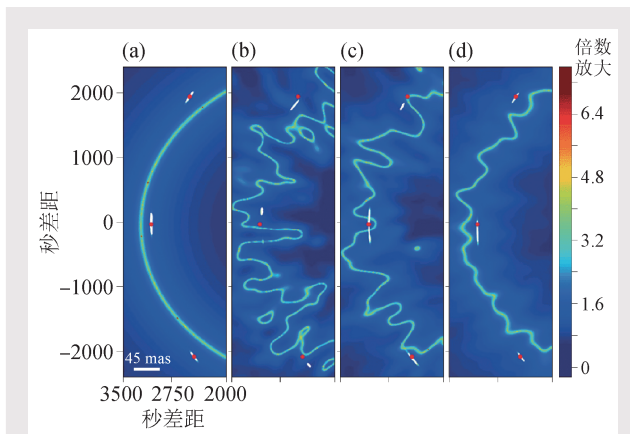


图 2 引力透镜的形状会根据暗物质是 WIMPs 还是轴子而变化。类星体的光线绕过前景星系弯曲形成引力透镜，浅蓝色线条表示临界曲线。图(a)显示了 WIMP 型暗物质的模型，而图(b)、(c)和(d)显示了不同的轴子型暗物质模型。WIMP 型的临界曲线是光滑的，而波动的轴子粒子使临界曲线呈现出波纹状

空，旨在用望远镜绘制尽可能多的星系团碰撞中的暗物质，拼凑出碰撞不同阶段星系团的图景。SuperBIT 共飞行了五次，最后一次飞行发生在 2023 年的 4 月到 5 月，从新西兰发射并绕地球飞行了五圈半。望远镜降落在阿根廷的着陆点，虽然它顺利着陆，但释放设备在平流层冻结，导致降落伞未能及时分离。最终，大风导致望远镜被降落伞在地面上拖曳。

“(由于释放设备失效)气球降落精度从微米变成了公里范围，整个装置成为一堆散落在阿根廷的镜子和金属零件、陀螺仪和硬盘，这真是令人心碎，”Massey 说道。幸运的是，望远镜运行得非常出色，并且所有数据在灾难发生前已下载到远程硬盘上。SuperBIT 团队正在处理这些数据。

天文观测可以为我们指引方向，但只有在 LZ 等实验室研究中取得对暗物质粒子的确切测量，才能完全解决暗物质本质的问题。在探测尚未明确的情况下，暗物质将继续成为天文学家和物理学家的共同谜团，也为理论留下了众多可能性。