

科学家给难觅真身的暗物质天体发“身份证”

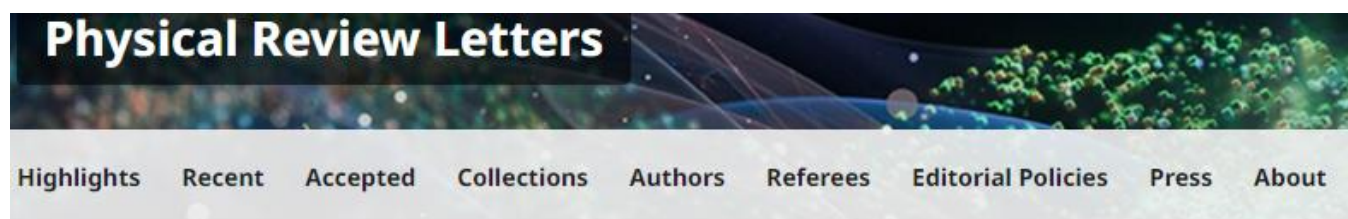
作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/41062.html>

本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！

科学家给难觅真身的暗物质天体发“身份证”。宇宙中约85%的物质是人们看不见也摸不着的暗物质，它不发光、不吸收光，却通过引力牢牢拉住了星系和星系团。然而，历经数十年探索，尽管科学家知道它们就在那里，却仍未直接抓到暗物质真身。

近日，韩国高等研究院博士后研究员杨星宇、北京师范大学博士后研究员陈坦与宁波大学校长、中国科学院院士蔡荣根合作，首次提出振荡玻色星会产生一种会呼吸的引力透镜效应，为捕捉暗物质提供了一种独一无二的观测时间指纹。相关成果近日正式发表于《物理评论快报》。



Periodic Gravitational Lensing with Oscillating Boson Stars

Xing-Yu Yang (杨星宇) ^{1,*}, Tan Chen (陈坦) ^{2,3,†}, and Rong-Gen Cai (蔡荣根) ^{4,‡}

Phys. Rev. Lett. **137**, 031403 – Published 17 July, 2026

DOI: <https://doi.org/10.1103/6w3p-8ym2>

图片来自：《物理评论快报》

给暗物质天体发身份证

目前的暗物质探测主要有两类互补策略：一是粒子物理途径，包括对撞机产生和地下实验室直接探测，寻找暗物质粒子本身；二是天文引力途径，通过引力效应（星系旋转曲线、引力透镜等）推断暗物质的存在与分布。

引力透镜是天文学家探测暗物质的重要工具。但长久以来，天文学界在利用这种方式追踪暗物质

时，所考虑的透镜模型几乎都是静态的——透镜天体的形态和质量分布不随时间变化。现在，科学家首次提出：如果暗物质由超轻的实标量玻色子，如轴子或类轴子粒子构成，它们可以在引力作用下凝聚成一种叫作振荡玻色星的致密天体。

振荡玻色星有一个关键特征——由于没有守恒荷来维持构型稳定，其内部时空和物质分布会持续发生相干振荡，像心脏一样周期性地膨胀和收缩。这类天体也被称为振荡子，其振荡频率与玻色子质量紧密相关，寿命可达宇宙年龄。

研究发现，振荡会使玻色星天然携带一条随之脉动的径向焦散线，当远方恒星的视线恰好穿过这条焦散线的活动范围时，恒星的透镜成像每半个振荡周期就会产生一次剧烈的亮度变化和位置摆动，所有信号都与玻色星自身的呼吸节奏相位锁定，构成一组独一无二的时间指纹。

这种呼吸节奏‘指纹’其他天体都无法模仿。杨星宇说。黑洞会吞噬穿过其内部的临界光线，普通恒星由于不透明而直接阻挡光线，稳态的复标量玻色星则不具备振荡的焦散线。因此，一旦在时域巡天中捕捉到这类周期性信号，就为暗物质致密天体的存在提供了有力证据。即便未能探测到，也可以借此对这类天体在暗物质中所占的比例给出严格的观测约束。

这种‘正反两面都能用’的特性，使这项研究对暗物质寻踪具有独特的推动意义。杨星宇说。

一项纯理论研究背后

研究团队估算，在合理参数范围内，现有天体测量和高频次测光巡天可探测的振荡玻色星事例可达百万量级。

作为一项纯理论研究，它不需要大型天文观测设备，全部解析推导、数值计算均依托普通工作站完成，其中不乏拦路虎。

最大的难题在于如何处理含时度规下的光线偏折。振荡玻色星的时空度规是随时间周期变化的，不像史瓦西黑洞那样有一个静态、解析的偏折角公式。研究者需要先求解爱因斯坦-克莱因-戈登场方程得到玻色星振荡的时空度规，再追踪每一条光子轨迹计算偏折角，最后建立透镜方程来分析焦散结构。这个链条中每一步都有技术难点。

突破来自两个方面。一是他们找到了一个经过验证的拐折幂律插值公式，能够以解析形式精确描述偏折角对时间和最近趋近距离的依赖关系，避免了全数值拟合的繁琐。二是他们意识到焦散线的周期性胀缩是振荡玻色星的普遍特征，这个物理发现让他们把注意力集中在焦散穿越导致的观测效应上，最终梳理出了一整套相位锁定的可观测信号。

尽管如此，这项研究从最初构思到论文正式接收，整个研究周期长达一年半。这是论文仅有的三位作者通力合作的结果：杨星宇提出振荡玻色星周期性焦散穿越透镜效应原创构想，主导推导、计算与论文撰写；陈坦长期从事引力透镜研究，协助透镜方程搭建与焦散结构解析；蔡荣根把关研究方向，提供学术指导。三人通过线上线下讨论紧密协作，层层校验理论逻辑，保障研究严谨、完整。

国际上，玻色星作为暗物质候选者的研究已有数十年历史，但过往研究主要集中在玻色星的构成、稳定性和引力波辐射等方面。在引力透镜方向，早期研究计算过静态玻色星的透镜效应，但未曾涉及含时焦散结构。近年来，随着Gaia等高精度天体测量卫星、时域巡天项目的蓬勃发展，利

用透镜效应探测暗物质致密天体成为一个快速增长的前沿方向。在此背景下，这项研究填补了把时间维度引入引力透镜研究的空白。

国际审稿人评价该思路有趣且极具原创性，新颖且富有洞察力，成果可推广至更广泛的暗物质模型，普适价值突出——这一透镜现象不仅限于论文讨论的实标量场，还可以自然地出现在其他暗物质场景中。

一名青年学者的成长

谈起科研之路，杨星宇表示，自己的成长离不开蔡荣根的引领。2016年初，当时在北京师范大学物理学系读大三的他入选中国科学院面向全国高校举办的本科生科研项目，蔡荣根成为他的指导老师。那是我第一次正式接触科研，项目的成果后来构成了我本科毕业论文的主体。杨星宇回忆说。2017年，他进入中国科学院理论物理研究所（以下简称理论物理所）硕博连读，在时任该所研究员蔡荣根指导下深入研究，直到2022年获得博士学位。

初识蔡老师时，我还是个科研门外汉，满腔热情却不知如何前行。杨星宇回忆道。蔡荣根一直强调，做理论物理研究要多交流、多合作，要有国际视野。博士毕业后，他听从建议前往韩国高等研究院深造。



蔡荣根（左）和杨星宇。受访者供图

如今，在韩国高等研究院这几年，杨星宇主要关注暗物质的引力探针，包括用引力波探测自相互作用暗物质、用引力透镜探测超轻暗物质形成的玻色星等，与当地同行建立了稳定的合作关系。

他表示，这项工作只是开端，后续有多个自然延伸方向。其一，拓宽暗物质模型研究边界，纳入带自耦合类轴子、超轻矢量玻色子等候选粒子，探究不同模型下差异化的焦散结构与观测信号；其二，联合观测领域科研人员，依托现有时域巡天数据库开展周期性透镜信号搜寻——把理论预言变成真正的天文发现；其三，跳出光学引力透镜研究范畴，探索振荡玻色星对引力波的调制作用，挖掘含时引力透镜在引力波天文学中的应用潜力。

谈及未来，杨星宇表示，理论物理所首任所长、两弹一星功勋奖章获得者彭桓武先生曾说：回国不需要理由，不回国才需要理由。不久之后，随着海外科研生活结束，他希望用所学所长为我国物理研究贡献一份力量。

据悉，该研究受到国家自然科学基金与韩国高等研究院个人研究基金资助。（来源：中国科学报冯丽妃）

相关论文信息：<https://doi.org/10.1103/6w3p-8ym2>

作者：蔡荣根等 来源：《物理评论快报》

更多 科学进展 请访问 <https://www.iikx.com/news/progress/>

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，[爱科学iikx.com](https://www.iikx.com)转发