

核酸断裂、细胞毒性等,且紫外光穿透能力有限,并非真实生理激励因子,未来应发展更贴合生物场景的环境响应材料。此外,天然系统存在双向反馈,目前仍更像“可控释放”,陈狄表示,如何从单一行为走向“集成式、多环路”的人造生命功能,是下一步关键。韩海浩进一步指出, RNA 低封装效率(34%)和聚合物(PEG-b-P, 聚己内酯-聚乙二醇衍生物)的长期代谢行为仍是瓶颈,覃好也强调未来必须要解决 RNA 在体内易降解、长期生物相容性不足等挑战,同时开发更温和的调控机制,提升装载与递送效率,才能实现动物模型甚至临床应用。韩海浩则提议通过优化化学修饰提高负载量,开发抗酶涂层增强稳定性,并探索近红外光或磁场等更适合体内环境的触发方式。

未来,该系统可进一步进行升级改造。韩海浩和上海交通大学医学院松江研究院的张君妍(青编)建议,在功能拓展方面,将 siRNA 替换为 mRNA 或 CRISPR-Cas9 系统,可实现蛋白质表达调控或基因编辑等复杂功能;其次,可整合生物传感器模块,使人工细胞能响应活细胞分泌的炎症因子等信号分子,构建“感知-响应”闭环调控网络;最后,通过 PEG 表面修饰增强血清稳定性,结合靶向配体修饰提高细胞识别特异性,将推动系统从细胞实验向动物模型转化。

从科学意义看,Jan 等把“RNA 信号”这条最贴近基因调控的路径移植进人工细胞世界,为精确、可编址的基因层级对话提供了范式;从工程落地看,若能以近红

外/上转换或化学-酶级联替代紫外触发,并把单次“敲低”升级为有反馈的“表达-抑制”闭环,这枚“通信插件”才可能从培养皿走向组织微环境与在体应用。无论如何,它已把人工细胞的拟生行为从“分子代谢”推进到“基因对话”,为生命系统工程打开了新的练兵场。

参考文献(References)

[1] Jiang S S, Chen, Y X, Fang J Y, et

al. *Fusobacterium nucleatum*: Ecology, pathogenesis and clinical implications[J]. *Nat Rev Microbiol*, 2025, 26: 81-82.

[2] Joesaar, A, Yang, S, Bögels B. et al. DNA-based communication in populations of synthetic protocells[J]. *Nat Nanotechnol*, 2019, 14: 369-378.

[3] Cook A B, Sun S, Li Y, et al. Photo-activatable synthetic exosomes for RNA-based communication between artificial cells and living cells [J]. *Angew Chem Int Ed Engl*, 2025, e202514041.

最强黑洞碰撞验证广义相对论

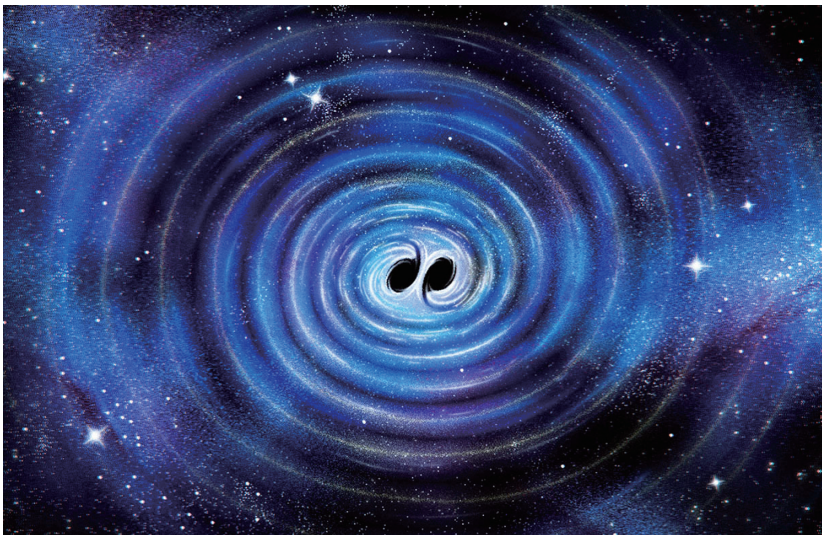
黑洞合并引力波中的“泛音”与广义相对论预测相符

文/Adrian Cho

在首次探测到时空涟漪(引力波)近10年后,物理学家宣布捕获了迄今为止最强的引力波信号,源自遥远星系中2个黑洞的螺旋合并,这让研究人员能够以全新方式验证 Albert Einstein 的引力理论(广义相对论)。据《Physi-

cal Review Letters》报道,对该事件的分析证实了 Stephen Hawking 提出的定理:黑洞的表面积只会增加,不会减少。

佛罗里达大学引力理论学家 Clifford Will 评价:“这是广义相对论中一个基础而纯粹的定理,



黑洞碰撞产生的引力波携带这些不可见天体的关键信息

(图片来源:《Science》)

见证它被验证实在令人振奋。现在可以确信,我们观测的正是黑洞。”

2025年1月14日,美国激光干涉引力波天文台(LIGO)探测到了这个信号。该天文台由分别位于路易斯安那州和华盛顿州的2个L型干涉仪组成,通过激光在4 km长臂中共振来探测引力波,其臂长变化小于质子宽度的1/100。通过对比信号与模型,研究人员确定这是由质量分别为太阳33.6倍和32.2倍的2个遥远黑洞螺旋合并产生的。

虽然这2个黑洞的质量与2015年9月14日该天文台首次探测事件中黑洞的质量近乎相同,但经过后续技术升级,探测器的灵敏度已提升3倍。新信号的信噪比高达80,呈现出前所未有的清晰度,使研究人员能够以突破性的精度进行分析。

合并后,最终黑洞的视界(光都无法逃逸的强引力边界)会像被敲击的钟体般发生短暂震荡。本次观测到的“铃荡”频率达到每秒247次,持续约10 ms。主震荡

会伴随泛音(通常频率稍低且衰减更快),这些泛音是检验广义相对论的关键要素。

理论上,除了质量和角动量这2个参数,黑洞几乎没有其他特征,这意味着泛音的频率和衰减速率并非独立存在,必然存在数学关联。通过对比泛音与主铃荡音,物理学家得以验证广义相对论的预测。

观测的真正难点在于捕捉泛音,因为其衰减时间可能短于单个震荡周期。麻省理工学院理论物理学家 Scott Hughes 形象地阐述道:“比起铃铛鸣响,它更像闷雷轰响。”尽管其他黑洞合并事件也曾提及泛音存在(包括该天文台首次探测事件),但加州理工学院物理学家、激光干涉引力波天文台成员 Katerina Chatziioannou 指出:“本次观测到的泛音清晰明确,是决定性证据。”最终数据表明,主震频率与泛音频率的分布模式完全符合广义相对论的理论预测。

需要说明的是,激光干涉引力波天文台借助基于广义相对论

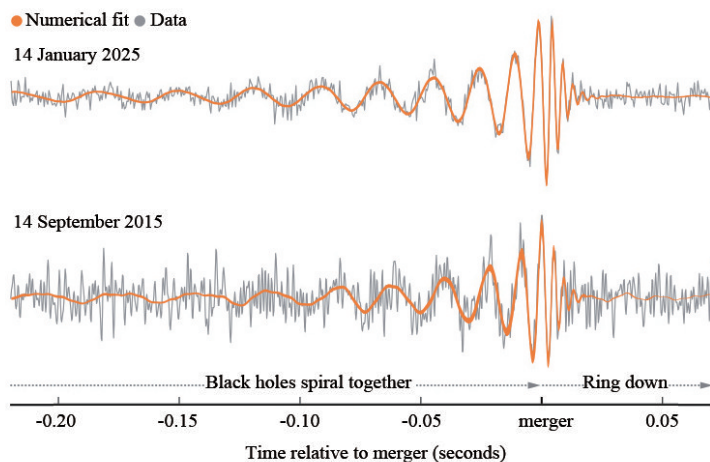
建立的模拟来识别信号特征,这可能导致偏差。为消除其影响,研究人员摒弃了大部分信号,仅分析铃荡阶段。Flatiron 研究所、激光干涉引力波天文台物理学家 Maximiliano Isi 强调:“信号强度是实现这一切的基础。”不过普林斯顿大学引力理论学家 Frans Pretorius 认为,分析过程中可能仍存在某些固有偏差。

激光干涉引力波天文台研究人员通过黑洞最终的质量和角动量计算出其视界面积约为40万 km²。结合2个黑洞合并前的数据,他们发现尽管最终黑洞质量小于初始双黑洞质量之和(部分质量以引力波形式耗散),但其视界面积大于初始双黑洞面积之和,这符合霍金面积定理的数学预测:无论黑洞的质量与角动量如何演化,其视界面积永远不会减小。

这项研究表明,随着激光干涉引力波天文台灵敏度提升,黑洞已成为实证研究的对象。Hughes 评价道:“量变引发了质变。”Pretorius 指出,随着进一步提升该天文台性能或建设新观测台,科学家将探测到更多震荡模式与泛音,“或许我们会发现广义相对论的不足,并通过高精度测量观测到异常现象。”

当然,这一切取决于激光干涉引力波天文台能否实现性能提升。2025年6月,美国白宫提议关闭该天文台的一个观测站,作为削减国家科学基金会57%预算计划的一部分。这将急剧降低该天文台的探测灵敏度,倾听“黑洞之声”的愿景也会随之黯淡。

(译自《Science》,2025,389(6763))



上图是此次研究2025年捕获的GW250114,下图则是10年前探测到的引力波事件GW150914。随着探测技术的飞跃进展,尤其是对仪器噪声的极大压制,GW250114的信号比当年首次探测的清晰得多

(图片来源:《Science》)