

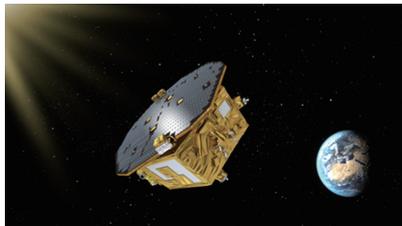
# 通向天基引力波探测器

(北京大学 王树峰 编译自 David Reitze. *Physics*, June 7, 2016)

来自 LISA 探路者任务的初步结果表明, 对于处于自由落体状态的两个测试立方体, 它们之间的相对加速的噪声很小, 满足天基引力波探测的要求。

2016年2月, 激光干涉引力波天文台(LIGO)探测到由两个黑洞合并引发的引力波。这一结果的公布使很多物理和天文学领域的科学家感到震惊和兴奋。当所有的目光转向 LIGO 时, LISA 探路者(LPF)正静悄悄但信心十足地为引力波天文学的下一场革命铺平道路。LPF 是激光干涉空间天线(LISA)引力波探测器的一项技术验证任务。2015年12月上旬, 宇宙飞船发射升空。经过50天的飞行, LPF 到达日地系统拉格朗日点1并进入轨道。飞船发射6个月后, LPF 团队宣布了任务的首批结果。

相比于 LIGO, LISA 的目标是观察频率低得多的引力波, 从 100  $\mu\text{Hz}$  到 1 Hz。这个区间非常有利于观察中到大型的黑洞融合(黑洞的质量达到  $10^4$ — $10^7$  个太阳), 同时也适用于观察两个黑洞质量差异巨大的情形。这些黑洞的融合将会使广义相对论在强引力场条件下得到最严格的检验。要使这种引力波得以显



这幅艺术设想图展现了正处于轨道中拉格朗日点1的 LISA 探路者宇宙飞船。飞船顶部的光伏太阳能电池提供了电力, 飞船侧面可以看到微牛推进器。测试立方体和激光干涉仪系统则位于飞船内部

现, 人们必须避免地球上的低频噪声, 因此迫切需要基于太空的平台。

当空间中有两个相距为  $L$  且自由漂浮的物体时, 引力波在垂直于波传播的方向上会使物体间的距离在每个周期内发生拉伸和压缩  $\Delta L$ 。通过测量光在两组物体间传播所用的时间, 就可以获得时间相关的应变。要达到天文学的目标, LISA 需要的  $L$  长达两百万公里, 因此 LISA 系统由三艘飞船组成, 在远离地球的空间组成一个三角形。它对位移  $\Delta L$  的灵敏度要求为在 100 mHz 附近达到  $5 \times 10^{-11}$  m。

LPF 是一艘单体飞船, 其上的测试立方体的间距小于 1 m。这样的距离对于引力波应变完全无法感知, 但是却可以用来探测 LISA 所需的位移敏感度的极限。LPF 背后的基本原理很简单, 将飞船中两个测试立方体置于自由落体状态, 并测量它们之间残余的时间依赖的纵向位移, 测量时间长达数天或者数周。根据这个测量可以推断它们残余的相对加速以及它们受力的差别。

这些测试立方体是由金—铂合金制成的。它们漂浮在空间中, 每一个都可以在三个平动和三个转动自由度上自由运动。它们的径向位移由激光外差干涉仪探测和控制。这种干涉仪混合了两束频率略有差别的激光, 因而可以实现高精度的位移测量。其余的自由度则是由飞船上的电容性电极感知, 并通过控制电压轻推立方体使位移和角度发

生变化, 达到设定的位置。其作用的频率在测量波段之外, 同时通过限制其施加方式, 使这些力不会干扰测试立方体在 LISA 关注频段范围内的自由落体状态。但是, 仅控制测试立方体自身是不够的。LPF 依赖于无拖曳控制, 使飞船不对测试立方体产生影响。通过读取飞船与其中一个测试立方体的相对位置, 飞船的姿态可以用具有微牛顿推力的推进器来精确地维持。

真正复杂的部分是系统的超高灵敏度。LPF 必须精细地感知立方体的相对径向位移而对其他自由度较不敏感。LISA 极端地要求最小化外力的作用, 以避免它们使立方体产生位移从而掩盖引力波信号。LPF 团队报道的结果是一份精确测量的杰作。LPF 的结果大大超越了“差分加速噪声”这一任务的要求(指频率相关的立方体间残余加速)。但是目前最令人印象深刻的结果是, LPF 超越了 LISA 对于 10 mHz 以上高频率的噪声的限制要求, 并接近了 (25%以内)大部分低频范围的要求。

这些结果非常好地预示了 LISA 任务的未来。虽然 LISA 会利用不同的技术来实现干涉分析, 但 LPF 的实验使我们很好地掌握了如何在测试立方体位移上获得 LISA 所需的精度。这使得我们为达到引力波探测器的新纪元做好了准备。

更多内容详见: M. Armano et al. *Phys. Rev. Lett.*, 2016, 116: 231101.