

GEO-KAGRA O3 观测运行的结果

引言

[KAGRA](#) 是日本的新型引力波探测器，于2019年10月加入到了高新LIGO和高新Virgo的国际引力波探测器网络中。KAGRA计划于2020年加入到了高新LIGO以及高新Virgo的联合观测中，时间为第三次观测运行（O3）的最后一个月（四月）。但由于COVID-19疫情的影响，高新LIGO及高新Virgo不得不在2020年3月27日停止运行。幸运的是，KAGRA找到了位于德国的[GEO 600](#)（在本文中缩写为GEO）作为合作者，GEO一直在LIGO合作组的指导下运行。

在2020年4月，GEO和KAGRA进行了为期两周的联合观测。我们把这次观测叫做GEO-KAGRA联合观测运行 O3GK。我们在一篇科学论文中报告了观测结果。由于两个探测器灵敏度比较低，我们没有发现确凿的引力波事件。然而，在这两周期间，天文学家观测到了数次伽马射线暴（[gamma-ray bursts, GRBs](#)），LIGO-Virgo-KAGRA (LVK) 合作组进行了一系列与之相关的引力波搜寻：[双中子星 \(binary neutron star, BNS\)](#) 并合的[全天搜寻](#)、一般的未建模的爆发源的搜寻、致密双星并合（compact binary coalescences, CBCs）的定向搜寻，以及运行期间与GRBs相关的未建模的爆发源的搜寻（[GRB定向搜寻](#)）。

基于探测器已有的灵敏度，我们没有观测数据中发现引力波信号。然而，这些分析表明，我们已经准备好了把KAGRA数据加入到整体数据分析中。由于KAGRA越来越接近于其设计灵敏度，因此，把KAGRA数据加入到分析中也显得愈加重要。

KAGRA 和 GEO 600

O3GK运行是KAGRA首次与另一个引力波探测器进行联合观测。KAGRA是一台激光干涉型引力波探测器，其臂长是3公里，坐落于日本岐阜县神冈。KAGRA建在一个矿山底下，把低温镜子作为四个测试质量，以减弱地震噪声及热噪声。截至2019年4月，干涉仪的绝大部分都已经安装完毕，并开始试运转（调试探测器使其更加灵敏）。试运转之后，KAGRA的灵敏度在2020年3月底之前已经得到提升，[双中子星可观测范围](#)达到约1兆秒差距（326万光年）。KAGRA是一个还在不断改进中的新型探测器，所以还没达到其最终的设计灵敏度。

GEO是最老的干涉仪型引力波探测器之一，其尺寸较小，只有600米。GEO作为测试新的探测器技术的试验台，扮演着非常重要的角色。这台引力波探测器的灵敏度受限于仪器本身产生的噪声。

在噪声基底之上，我们可以看到在数据中有很多短时标的仪器信号，它们在不同时间段保持不变，我们将其称作噪声毛刺（glitches）。尽管我们花费大量的努力去让噪声尽可能的低，移除尽可能多的噪声毛刺，但是噪声毛刺仍然可以伪装成短时的引力波信号。通过同时运行两台仪器，我们可以显著地减少那些可能被当做真实信号的噪声毛刺的数目。

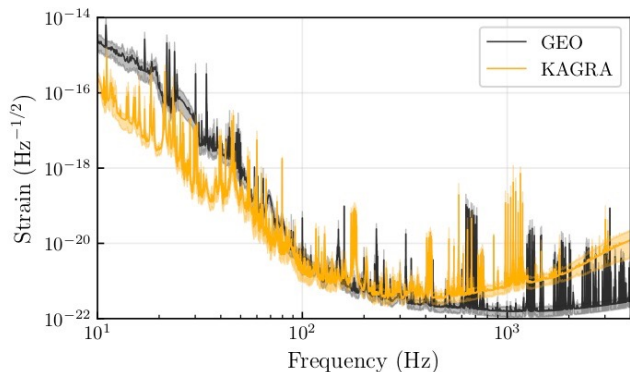


图 1:（来自我们发表论文的图1的左图）该图展示了联合探测期间，KAGRA的典型的灵敏度曲线（黄色）和GEO的灵敏度曲线（黑色）。其中，纵轴给出了探测器的平均应变噪声（strain noise），它描述了镜子在不同频率（横轴）下的移动的大小。实线表示每个频率间隔的平均灵敏度，而阴影区表示在观测期间灵敏度的5%和95%百分位。

图1展示了在联合探测期间两个探测器的典型灵敏度。越小的应变表示越高的灵敏度。在低频段KAGRA更加灵敏，而在高频段GEO更加灵敏。在观测运行期间，KAGRA可以在大约0.8兆秒差距（260万光年）探测到BNS的绕转，而对于GEO来说，这个范围大概是1.1兆秒差距（360万光年）。

图2展示了联合运行期间两个探测器对双中子星的可观测范围。

全天搜寻

LVK合作组展开了**全天的双星搜寻及爆发源搜寻**。全天的双星搜寻是一种**匹配滤波**的搜寻方法，它会拿观测数据跟一组模板**波形**进行对比，这些波形是基于CBCs辐射引力波的理论模型进行构建的。而全天的爆发源搜寻，是用来搜寻未建模的引力波暂现信号。这两种全天搜寻的结果表明，我们没有探测到引力波信号。该结果在图3中得以展示。

GRB定向搜寻

在观测运行期间，发生了几次有趣的天文学事件——GRBs，这些事件的发生可能伴随着引力波。在这些事件发生的前后，我们对数据进行了更加仔细的引力波搜寻。一共有四次GRBs，包括两次**长伽马射线暴**（持续时间长于两秒），以及两次**短伽马射线暴**（持续时间短于两秒），其被天文学家观测到的时间与KAGRA及GEO进行科学观测的时间相重叠。所以，LVK合作组进行了**GRB定向的双星及爆发源的搜寻**，这是基于GRBs的电磁观测给定的时间段及方位进行的搜寻。LVK合作组得出的结论是，在GRB定向的双星及爆发源搜寻中，我们没有观测到任何与这四次GRBs相关的引力波事件存在的证据。

我们分析的GRBs其中之一，编号为GRB 200415A，与3.5兆秒差距外的玉夫座星系（NGC 253）的一颗**磁星的巨耀发**相关。

针对GRB 200415A进行定向的双星搜寻的结果展示在图4中。基于我们的分析，其**排除距离**只是几个**千秒差距**，这不足以排除是起源于CBC的可能性，也不能检验磁星巨耀发的假说。GRB定向的一般爆发源的搜寻结果展示在图5中。对于每个GRB，我们都计算了其对应的排除距离。

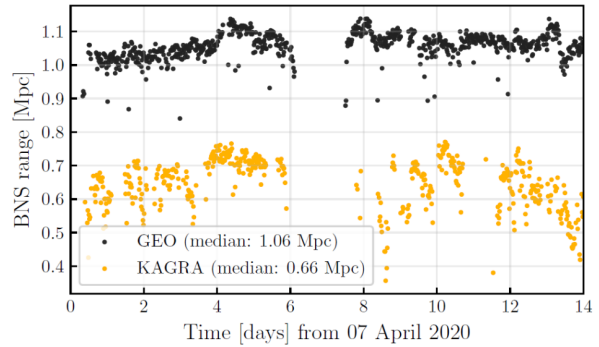


图2：（来自我们论文的图1的右图）联合观测期间，KAGRA（黄色）和GEO（黑色）的双中子星可观测范围。我们在图中展示了观测范围随时间的变化。在第6天和第7天出现了间隔，这是由于当时两个探测器都被坏天气所影响，因而无法锁定。KAGRA的观测范围的中位数是0.66兆秒差距，GEO则是1.06兆秒差距。

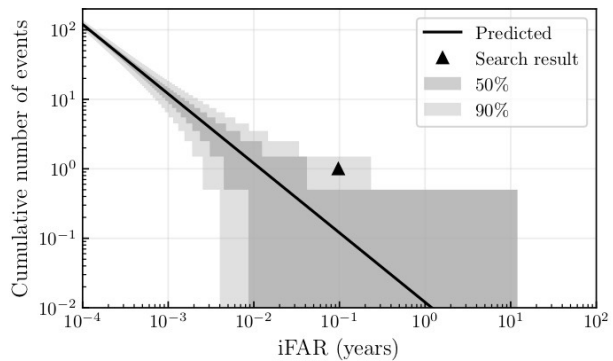


图3：（来自我们论文的图5）事件的累计数作为全天一般爆发源搜寻的**误报率**的倒数（inverse of false-alarm rate, iFAR）的函数。只有一个事件被确认（用三角形表示），它是最显著的事件。但它在90%的置信区间内，这意味着它被认为是由噪声导致的。阴影区域展示了50%和90%的泊松不确定度。

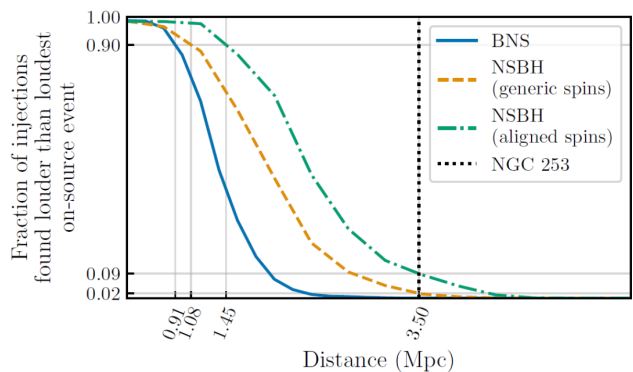


图4：（来自我们论文的图7）基于对BNS和中子星-黑洞（NSBH）信号的GRB定向双星搜寻的分析，给出的GRB 200415A的排除距离。曲线对应于三种模拟的样本（population）：BNSs（蓝色实线），一般自旋指向的NSBHs（橙色虚线）以及自旋朝向与轨道角动量对齐的NSBHs（绿色点虚线）。我们用竖线标记了0.91兆秒差距，1.08兆秒差距和1.45兆秒差距的90%的排除距离，也标记了到NGC 253的距离（3.5兆秒差距）。我们对BNS，NSBH（一般自旋）和NSBH（对齐自旋）三种情形下到NGC 253的距离的置信度，分别在0%，2%和9%处用横线进行了标记。因此，目前的搜寻灵敏度不足以排除CBCs的可能性。

未来展望

通过这里展示的分析，LVK合作组已经证明了KAGRA能成为引力波探测器网络的一部分。目前，LVK的探测器已经下线，正在为即将到来的第四次观测运行（O4）做改进，O4计划于2022年12月中旬开始 (<https://www.ligo.org/scientists/GWEMalerts.php>)。

一旦KAGRA能在其设计的构造下运行，它将达到比高于高新LIGO和高新Virgo探测器的灵敏度。到那时，KAGRA将在探测引力波信号上扮演至关重要的角色。让更多的探测器进入探测器网络中是非常重要的，这有助于发现更多的信息，提高我们精确对源进行定位的能力。KAGRA的臂的朝向跟其他探测器很不一样，这使得它的贡献尤为重要。

(简体中文翻译: 梁迪聪、邵立晶)

更多信息

在我们的网站
阅读新闻:

<https://www.ligo.org/news.php>

<https://www.virgo-gw.eu/>

<https://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/>

阅读完整的科学论文:

<https://dcc.ligo.org/LIGO-P2100286/public>

O3GK 的数据公开:

<https://www.gw-openscience.org/>

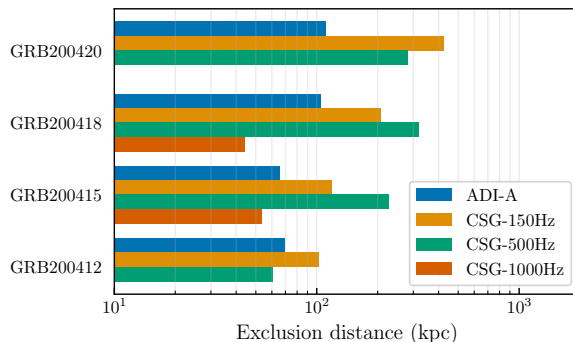


图 5: (来自我们论文的图 8) 基于GRB定向的一般爆发源搜寻的分析给出的四个GRBs的排除距离。其中，每一种颜色对应于不同的引力波信号模型。这里考虑的四种模型分别是吸积盘不稳定性 (accretion disk instability, ADI) 信号模型A和三种圆正弦高斯 (circular sine-Gaussian, CSG) 信号，其中心频率分别是150Hz, 500Hz和1000Hz。

访问我们的网站

www.ligo.org

www.virgo-gw.eu

gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/



术语表

全天搜寻: 这是标准的搜寻方法。对于O3GK的数据，LVK合作组进行了一次针对双中子星并合和一般的未建模的爆发源的匹配滤波的搜寻。

双中子星: 由两颗在密近轨道相互绕转的中子星构成的系统(看[这里](#))

双中子星可观测范围: 一种标准的对干涉仪灵敏度的测量，其定义是：由两颗中子星组成的双星系统的绕转，能在匹配滤波下以信噪比8被探测到的平均距离。

黑洞: 一个由极端致密的物体导致的极端弯曲的时空区域，在其中引力非常强，使得任何东西，即使是光都不能逃出这片区域。

爆发源搜寻: 一种利用引力波探测器网络对同时发生的额外能量的搜寻，在这搜寻中不需要假设任何具体的引力波模型。

致密天体: 一种极端致密的天体，如黑洞、中子星或**白矮星**。

排除距离: 排除距离是指在这个距离以内，模拟信号的总体样本的90%都能被重现探测到，至少其置信度与在伽马射线暴发生时间附近的探测器噪声导致的最强的候选事件一样。

误报率: 测量探测器的噪声涨落可能产生一个类似于候选事件的信号的频率。误报率越小，那么这个候选事件是天体物理过程产生的概率越大。

伽马射线: 极其高能的光子，甚至比X射线的能量更高。

伽马射线暴(GRB): 一束来自遥远天体源的伽马射线，持续时间可达几百秒。但在很多情形下，其持续时间甚至少于几秒钟。

GEO 600: GEO探测器是地基的干涉仪，位于德国汉诺威。

引力波波形成: 用来表征引力波信号随时间的演化。

GRB定向搜寻: 指那些与观测期间出现的伽马射线暴相关联的对引力波信号的定向搜寻。通过伽马射线暴定下时间和方位，相较于全天搜寻，我们可以探测到更弱的引力波信号。对于O3GK数据，LVK合作组已经进行了一次匹配滤波的搜寻，包括对于双中子星、中子星-黑洞并合以及一般的未建模的爆发源的搜寻。

KAGRA: KAGRA探测器是位于日本岐阜县神冈山下的地下干涉仪。它是一种激光干涉仪，其臂长为3公里，镜子是超低温的。

千秒差距 (kpc): 一千倍的秒差距，约等于3.26光年。

光年: 一种距离单位，等于光走一年的距离。1光年大约等于9.46 万亿千米 (或者说约等于5.88 万亿英里)。

LIGO: 激光干涉引力波天文台，由两个4公里长的干涉仪引力波探测器构成，它们相距3000公里 (1900英里)，分别位于美国路易斯安那州的利文斯顿 (Livingston) 和华盛顿州的汉福德 (Hanford)。

长伽马射线暴: 其持续时间超过2秒钟。它被认为是在大质量恒星核坍缩时产生的。

磁星: 一种中子星，其强磁场诱发一些不寻常的行为，如短暴。

磁星巨耀发: 一种非常强的短暴，将太阳在100,000年中辐射的总能量在短于1秒钟内释放。

匹配滤波: 一种用来探测被噪声埋没的信号的方法。用基于广义相对论计算出来的引力波波形成在数据中扫描，当在数据中发现相匹配的模式时会报告。

兆秒差距 (Mpc): 一种距离单位，是秒差距的一百万倍，约等于3.26百万光年。

中子星: 大质量恒星塌缩后产生的极端致密天体。这星体的致密程度是如此之高，使得原子无法保持分离，整个星体就像个巨大的原子核。它们质量一般是太阳质量的1到2倍，但却只有10公里左右的半径。

中子星-黑洞双星: 由位于密近轨道的相互绕转的一颗黑洞和一颗中子星构成的系统(看[这里](#))

噪声: 由于多种仪器和环境效应导致的在引力波测量中的涨落。引力波探测器的灵敏度由噪声所限制。

观测运行: 引力波探测器记录观测数据的运行阶段。

秒差距 (pc): 天文学中常用的距离单位，约等于3.26光年。这大概对应于31万亿公里。

灵敏度: 用于描述仪器探测信号的能力。拥有低噪声的仪器能探测到更弱的信号，因此被称为有更高的灵敏度。

短伽马射线暴: 其持续时间短于2秒。被认为是来源于致密双星 (双中子星或中子星-黑洞) 的并合。

信噪比: 信号功率与噪声功率的比值，用来比较信号与噪声之间的等级。这用来测量信号相对于可能污染它的噪声源的强度。

应变: 等于引力波诱导的探测器臂长的变化量除以总的臂长，臂长的变化是由于引力波通过探测器产生了时空形变而导致的。

Virgo: Virgo探测器是位于意大利卡希纳 (Cascina) 的地基干涉仪，靠近比萨市。