将光学超稳光学钟腔用作共振质量引力波探测器，以搜寻新物理。

M. Naro˙znik, M.Bober, M. Zawada*Institute of Physics,*
Faculty of Physics, Astronomy and Informatics,Nicolaus Copernicus University,
Grudziądzka 5, PL-87-100 Toruń, Poland

我们提出，利用最先进的光学原子钟中的桌面尺寸超稳光学腔，作为探测频率高于2千赫的棒状引力波探测器。我们表明，尺寸小于2米的仪器即可探测引力波频谱中2–20千赫的范围。所提出的腔所用材料及其性能均在当今技术能力范围之内。超稳光学腔不仅能够探测来自双中子星并合及并合后阶段、亚太阳质量原初黑洞并合以及坍缩恒星核心等源的预期引力波信号，还能够用于探寻标准模型之外的新物理，例如通过黑洞超辐射形成的超轻玻色子，包括QCD轴子和类轴子粒子。

arXiv:2301.08200v1 [gr-qc] 19 Jan 2023

引言

第一代引力波探测器基于大型铝制圆柱体中的机械共振；引力波穿过探测器时会触发这种共振 [1]。这类引力波探测器被称为韦伯棒，目前仍在全球网络中联网运行。遗憾的是，尽管现今的共振质量棒状探测器运行极其稳定，且噪声得到了完美抑制，但迄今尚无证据表明通过声学共振现象观测到了引力波事件 [2]。

第二类探测器基于迈克耳孙干涉测量。这类探测器利用电磁辐射而非声波来记录时空中的涟漪。2015年，地基天文台终于具备了足够的灵敏度，探测到了首个引力波事件，即两个黑洞（BH）的并合 [3]。迄今为止，在三次观测运行期中共确认了90个事件，其中绝大多数是黑洞并合（BH-BH），另有两起黑洞与中子星并合事件，以及两起双中子星（NS-NS）并合事件[4] 。在迄今观测到的事件中，双星系统的总质量和光度距离（即通过测量绝对星等和视星等计算出的地球至该系统的距离）范围从 $2.74^{+0.04}_{-0.01}$ 太阳质量（M⊙）和 40^{+8}_{-14} 百万秒差距（双中子星事件）到 142^{+28}_{-16} M⊙ 和$5.3^{+2.4}_{-2.6}$ 十亿秒差距；这也是首次观测到质量超过100 M⊙的黑洞的证据，这种黑洞被称为中等质量黑洞) [5]。

现有类 LIGO 天文台的最高灵敏度范围介于 $\sim$ 10 赫兹和约 2千赫 [6]之间。其他许多前景广阔的实验，例如包含三个独立项目的国际脉冲星计时阵列（IPTA） [7] ，即 NANOGrav [8],、EPTA [9], 和 PPTA [10], ，光学原子钟 [11],、扭转棒天线 TOBA [12], 、原子干涉测量项目（如 AION [13] 和 ELGAR [14], ），以及空间 LISA [15] 和 DECIGO [16], 其灵敏频率低于现有的类 LIGO 探测器。

目前，高频范围存在明显的空白，尽管一些重要的引力波源可能会在引力波频谱的这一区域发射信号；此外，对1-100千赫范围敏感的引力波探测器非常适合用于标准模型之外的新物理搜索。近期提出的基于悬浮传感器的引力波探测器 [17], 若要在10千赫以上的范围达到合理的灵敏度，需要一座低温100米级设施。仍处于早期设计研究阶段的地下LIGO式爱因斯坦望远镜 [18], 将配备10千米长的臂。

在本文中，我们证明，来自最先进光学原子钟 [19, 20] 的桌面尺寸超稳光学腔可用作频率高于2千赫的共振质量引力波探测器。我们计算了现有最先进腔体装置及未来可能的腔体装置的机械共振，并分析了基本噪声对灵敏度的限制。所提出的腔体材料和组件在现有技术能力范围内，均经过筛选以确保具备最佳性能。我们表明，作为共振质量引力波探测器使用的台式超稳光学腔，其灵敏度受基本噪声限制，但仍可探测到理论预测的引力波信号，来源包括双中子星并合及并合后阶段、坍缩恒星核心、亚太阳质量原初黑洞并合，以及由黑洞超辐射产生的QCD轴子和类轴子粒子。

观测原理

在引力波附近，棒状共振探测器（例如韦伯共振质量引力波探测器中使用的探测器）的行为可建模为受驱动且受阻尼的谐振子 [21]；该系统由两个质量块和一根长度为 L 的弹簧组成，其共振频率为 f_0。弹簧常数 k 和质量的取值需满足 $f_0 = 1/2\pi\sqrt{k/\mu}$，其中 μ 是系统的约化质量。

由频率为 f、沿垂直于弹簧的方向传播且偏振方向与弹簧平行的平面引力波所引起的质量位移 x，可用一个简单的运动方程描述：

$$\ddot{x}(t) + 2\beta\dot{x}(t) + 4\pi^2 f_0^2 x(t) = F_{GW}(t), \tag{1}$$

其中，$\beta := \pi f_0/Q$ 是一个阻尼参数，根据定义与弹簧的品质因数 Q相关；$F_{GW} = -\frac{1}{2}hL(2\pi f)^2\cos(2\pi f t)$则是作用于系统的引力波力。引力波的应变振幅记为 h。

式 1 可在频域中求解，对应的量为$\tilde{}$ $\tilde{x}(f) = G(f)h(f)$，其中 $h(f)$ 是频域中的应变，而 $G(f)$ 是以下传递函数

$$G(f) = \frac{L}{2}\frac{f^2}{(f_0^2 - f^2) + if f_0/Q}. \tag{2}$$

系统所能达到的最佳引力波灵敏度，即引力波应变等效功率谱密度（PSD） $S_h(f)$，与系统中存在的噪声的功率谱密度 S_x 之间的关系为

$$S_h(f) = \frac{S_x(f)}{|G(f)|^2}. \tag{3}$$

一般而言，f_0 是探测器的特征共振频率。简单的三维解析方法表明，第 n_l阶共振$f_0 = \frac{1}{2L}\sqrt{\frac{E}{\rho}}n_l^2$取决于探测器长度$L$以及材料的内部属性，即杨氏模量 E 和密度ρ。

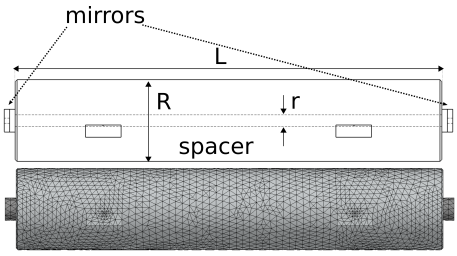

图 1. 光学原子钟实验中使用的典型超稳光学腔横截面及有限元法模拟所用网格。 L 和 R 分别表示其长度和外半径，而 r 表示反射镜之间内部通孔的半径。

对于超稳光学腔而言，这种简化近似不足以准确确定腔共振的精确值。此外，在现有系统中，光学腔放置在经过精确计算的位置，以抑制大多数可能出现的机械共振。因此，我们针对若干现有的先进腔体配置以及未来可能采用的配置进行了有限元法（FEM）模拟，并将地球引力场和支撑点纳入考量。图 1 展示了一种常用于光学钟实验的水平式设计腔体的剖面图，以及我们在有限元法模拟中使用的网格。网格分辨率根据局部曲率半径调整，范围为 1.5 mm 至 7 mm。图 1 还定义了间隔件的几何参数，即间隔件半径 R、长度 L 和内孔直径 r。对于由超低膨胀玻璃（ULE）制成的间隔件，以及由熔融石英（FS）制成的反射镜基底，通常会在反射镜外侧额外加装超低膨胀环，以调节腔的零交叉温度 [22]——然而，这些环对整个系统的机械共振特性贡献不大。

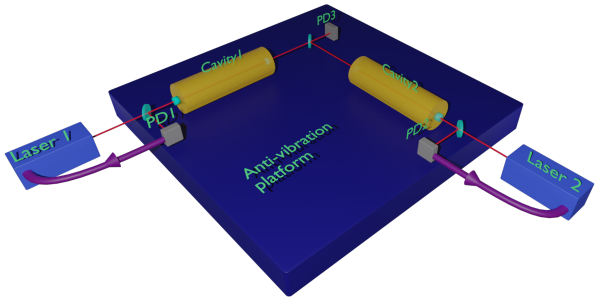

图 2.（在线彩色）两个腔彼此垂直对齐。通过稳定到腔上的激光束之间的频率差或相位差，检测两个腔之间的相对长度变化。PD 表示光电二极管。

为检测光学腔的长度变化，将激光锁定到其中一个腔模的频率上。光子在光学腔内的传播路径缩短或延长，会根据简单公式 $\Delta L/L = -\Delta\nu/\nu$使腔模频率 ν 变化 $\Delta\nu$。通过 Pound-Drever-Hall 技术等方法 [23]，，将激光频率紧密稳定在腔模频率上后，腔的长度变化便会转化为激光的相位或频率变化。

为探测引力波（GW）引起的腔长变化，需要一个参照，例如第二个与之垂直的腔。图 2 展示了两个彼此垂直排列的超稳光学腔组成的系统，这两个腔可以位于水平面或垂直面内。将两个腔都安装在同一套真空系统中，并将系统安装在同一个隔振平台上，可以大幅减小环境扰动。用两束激光分别锁定到两个腔后，腔之间的相对长度变化会转化为两束激光之间的相位差或频率差。通过光电二极管上的光学拍频，可以探测到这一差值

。拍频信号可在真空中探测：既可以使用经两个腔传输的光（如图 2 所示），也可以使用在腔前从主光束中分出的光。前一种情况下，光经光学腔滤波，但强度较低；后一种情况下，光强较高，可提升拍频探测信号。用于激光稳频所需的拍频探测系统、光学元件和光电二极管也可以放置在真空中，并安装在同一隔振平台上。激光的光可通过光纤传输到平台。采用这种配置，腔可以在真空中由多个热屏蔽罩包围，从而获得优异的隔热效果。此外，将腔和拍频系统安装在共用真空装置中，还可以省去光学光程稳定化 [24]。

基本灵敏度极限

超稳光学腔对引力波的基本灵敏度主要受热过程限制，即机械热噪声和光学热噪声。机械热噪声指的是处于非零温度 T 下的腔体的布朗运动。腔体各组成部分的热力学涨落可通过涨落耗散定理 [25, 26] 定量表示为分数功率谱密度 $S_{y,\ t}$。机械热噪声的大小取决于间隔件几何形状及其质量 m、反射镜镀膜厚度d_{ct}，以及腔体的固有物理参数，例如杨氏模量 E、泊松比 σ 和机械损耗角 ϕ:

$$S_{y,t}(f) = \frac{4k_bT\phi_{sp}}{(2\pi)^3 mL^2}\frac{f_0^2}{f[(f_0^2-f^2)^2+f_0^4\phi_{sp}^2]} + \frac{4k_bT}{2\pi^{5/2}}\frac{1-\sigma_{sb}^2}{fE_{sb}wL^2}\phi_{sb}\left(1+\frac{2d_{ct}}{w\sqrt{\pi}}\frac{1-2\sigma_{sb}}{1-\sigma_{sb}}\frac{\phi_{ct}}{\phi_{sb}}\right). \quad (4)$$

其中，sp、sb、ct 分别表示间隔件、反射镜基底和反射镜镀膜的指标，w 为反射镜上的光束光斑半径。分数功率谱密度 $S_y(f)$ 与长度涨落的功率谱密度 $S_x(f)$ 之间的关系为$S_y(f) = S_x(f)/L^2$。

此外，镜面基底和多层反射镜镀膜中的热弹性噪声与热折射噪声构成了非布朗光学热噪声，其对总分数功率谱密度的贡献可表示为分数功率谱密度 $S_{y,o} \sim L^{-2}(1+\sigma_{sb})^2\alpha_{sb}^2T^2A(w,\ f) + L^{-2}T^2B(w,\ f)$，其中 α_{sb}为反射镜基底的热膨胀系数，$A(w,\ f)$ 和 $B(w,\ f)$ 分别为反射镜基底和镀膜的有效材料常数（见 [27]）。

在实际应用中，为测量腔长所用的光强会保持在最低可检测水平，以避免反射镜表面额外受热。这会引入另一个可能限制灵敏度的因素：光的量子特性所导致的散粒噪声$S_{y,\ s} = \sqrt{2\pi\hbar c/(8\mathcal{F}L\sqrt{\lambda P_c})}$，其中 $\mathcal{F}$ 为光学腔精细度，$\hbar$ 为约化普朗克常数，λ 为光波长，P_c 为注入光学腔的光功率 [23]。不过，随着新型反射镜镀膜材料能够支持更高的腔内光功率，这种噪声还会进一步降低。

图 3 展示了由基本噪声限制的估算灵敏度，这些噪声以分数振幅谱密度 $A_y = \sqrt{S_y}$ 表示（其中 S_y 包含此前所述的所有噪声分量）；该灵敏度对应于现有最先进的超稳光学腔（长 0.5 m，由室温下的超低膨胀玻璃制成），假设将反射镜镀层替换为晶体 AlGaAs 镀层 [28]；以及可能采用的低温 0.5 m 和 1 m 长单晶硅腔，其反射镜带有晶体 AlGaAs 镀层，工作温度分别为 4 开尔文和 0.1 开尔文。所有情形均展示了不含散粒噪声（对应于硬性基本极限）的结果，同时也展示了估算得到的示例性散粒噪声极限；该估算针对向精细度为 $\mathcal{F} = 150000$ 的腔内注入 $50\ \mu$W 光功率的情况。

图 4 展示了几种可能的超稳光学腔对引力波的估计应变幅度灵敏度 $A_h(f) = \sqrt{S_h(f)}$。图中还加入了其他现有。(LIGO [29], AURIGA [30] 和 MiniGrail [31]）及计划中的（NEMO [32], ELGAR [14], 光学悬浮传感器 [17, 34], 和爱因斯坦望远镜[33]）引力波探测器的灵敏度，以供比较。

讨论

法布里-珀罗探测器的可探测频率范围也受到限制，这是因为光速有限，且光会在反射镜表面反射。精细度决定光子离开光学腔之前在腔内的反射次数；这些反射有助于反馈至激光频率——腔的精细度越高，光子在腔内的衰荡时间越长，伺服环路带宽则越低。给定 $\mathcal{F}$ 时，可探测到的引力波最高频率受 $f_{RD} < \frac{\pi c}{\mathcal{F}L}$ 限制。对于腔长为 0.5 m、精细度为 $\mathcal{F} = 150000$ 的光学腔，

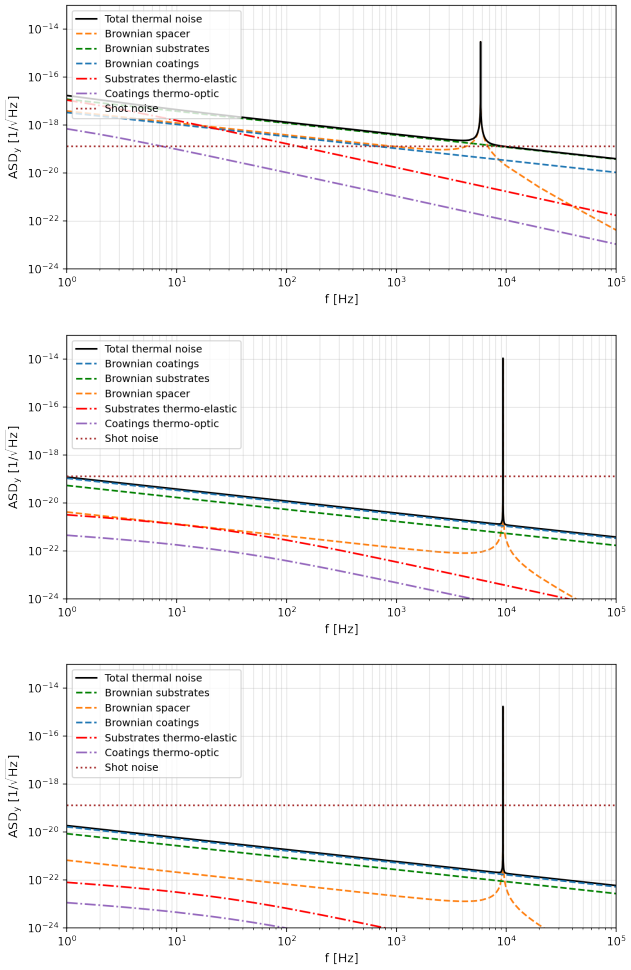

图 3.（在线彩色版）由基本噪声限制的灵敏度，以现有一代超稳光学腔的振幅谱密度（ASD）表示（由室温下的超低膨胀玻璃（ULE）制成的 0.5 m 长腔），假设将反射镜镀层替换为晶体 AlGaAs 镀层 [28]（上）；由单晶硅制成、反射镜带有晶体 AlGaAs 镀层的可能低温 0.5 m 长腔在 4 开尔文（中）和 0.1 开尔文（下）时的情况。示例性散粒噪声极限是按 50 μ W 腔内光功率和 150000 的腔精细度估算的。

极限为 $f_{RD} \sim 12566$ Hz。

图5比较了图4中光学腔的引力波灵敏度极限与落在最大共振灵敏度范围内的天体物理源的分数幅度谱密度。图中展示了双中子星的旋近、并合及并合后阶段、坍缩恒星核心、亚太阳质量黑洞并合，以及黑洞超辐射形成的QCD轴子和类轴子粒子的预测信号。图中虽然只展示了腔长为 0.5 m、1 m 和 2 m 的腔，但改变腔长（$f_0 \sim 1/L$）即可移动机械共振位置（灵敏度峰值）。

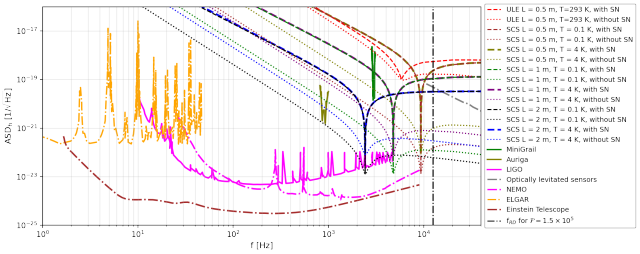

图 4. 由超低膨胀玻璃制成、室温下现有的 0.5 m 长光学腔对引力波的估算灵敏度（假设将反射镜镀层替换为晶体 AlGaAs 镀层 [28]（红色）），以及由单晶硅（SCS）制成、可能的低温 0.5 m、1 m 和 2 m 长腔在 4 开尔文和 0.1 开尔文下的灵敏度。所有情况均分别展示了不考虑（虚线）散粒噪声（SN）时的结果——这对应于硬性基本极限——以及考虑（点线）散粒噪声时的结果；后者是按注入精细度为 150000 的腔内的 50 μ W 光功率估算的示例性散粒噪声极限。图中还加入了其他现有引力波探测器 [29–31]（实线）和计划中的引力波探测器 [14, 17, 32, 33]（点划线）的灵敏度，以供比较。黑色竖直点划线表示精细度为 $\mathcal{F} = 150000$ 的 0.5 m 长腔的示例性衰荡频率极限。

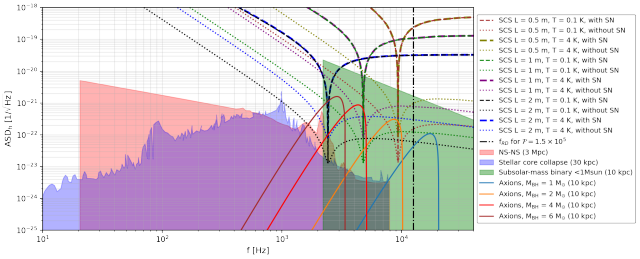

图5. 技术上可行的光学腔的引力波灵敏度极限与若干可能源的预测引力波信号的比较。点线和虚线分别表示由4 K下的单晶硅制成、长度为0.5 m、1 m和2 m的腔对引力波信号的灵敏度。所有情况均展示了不考虑散粒噪声（SN）的情形（虚线），对应于硬性基本极限；以及考虑散粒噪声的情形（点线），其极限值是对注入精细度为150000的腔中的 50 μW光功率进行估算得到的示例性散粒噪声极限。黑色竖向点划线表示长度为0.5 m、精细度F = 150000的腔的示例性衰荡频率极限。砖红色区域表示距离为3 Mpc的典型双中子星（NS）旋近、并合和并合后（NS-NS） [32] 引力波信号。蓝色区域表示距离为30 kpc处，快速自旋、中等金属丰度的大质量恒星前身星 [35] 形成黑洞过程中产生的特征引力波谱。绿色区域表示距离为1 kpc处的原初亚太阳质量黑洞可能产生的引力波信号 [21], ；该信号是针对由两个质量相等的黑洞组成的双星系统，其质量各为 <1 $M_\odot$，并在黑洞最内稳定圆轨道处解析计算得到的。实线表示银河系内10 kpc范围内黑洞周围轴子或类轴子粒子发射引力波所产生的预测信号，计算采用 10^6s的相干积分时间。对于主导能级（$l = m_l = 1$, $n = 0$），分别计算了初始质量为1、2、4和6 $M_\odot$（蓝色、橙色、红色和棕色）的黑洞，初始自旋为0.9 [36, 37]。

并合中子星。典型双中子星（NS）旋近、并合及并合后（NS-NS）过程所预测的引力波应变取自 [32]，并按距离为3 Mpc（本星系群的大小）时的振幅谱密度进行缩放。来自更远距离源的较弱信号构成图5中的砖红色阴影区域。旋近过程中发出的潮汐效应信号灵敏度不足以探测，而来自大质量中子星遗迹 [38, 39]、频率高于1 kHz的并合后信号，则可能由大多数双中子星并合 [40] 产生。若要使光学腔的机械共振与引力波信号的峰值匹配，腔长需达到2 m，这对低温SCS间隔件而言在技术上颇具挑战；不过，这类源具有无可争议的优势：它们已经被观测到 [41–43]，因此中子星科学的风险较低。

坍缩恒星核心。理论预测表明，大质量恒星前身星在快速自旋、中等金属丰度条件下形成黑洞的过程，会产生持续数秒 [44, 45] 且振幅很高的引力波信号。慢速旋转模型的特征引力波谱取自 [35] ，并按距离为30 kpc（银河系的尺度）时的振幅谱密度进行缩放。来自更远距离源的较弱信号构成图5中的蓝色阴影区域。

亚太阳质量黑洞双星的并合。虽然目前尚无已知机制能够通过标准恒星演化过程产生亚太阳质量黑洞，但观测到亚太阳质量黑洞并合将表明它们具有原初起源。这使得此类观测尤为重要，因为原初黑洞可能会对暗物质分布作出贡献 [46–48] ，并验证有关暗物质触发黑洞形成的理论 [49–51]。我们通过解析计算了两个质量相等的黑洞双星在最内稳定圆轨道处的潜在引力波信号；每个黑洞的质量为 <1 M$_\odot$，距离为1千秒差距 [21]（图5中的绿色阴影区域）。

轴子和类轴子粒子（*ALP*）的超辐射。诸如轴子或类轴子粒子（ALP）这样的轻玻色场可以在黑洞周围形成引力束缚态 [52–55]。通过超辐射 [56] ，其占据数会指数增长，代价是旋转黑洞的角动量和能量损失，从而形成相干的轴子或类轴子粒子束缚态，并发射引力波 [17, 36, 37, 57–66]。预计在轴子/类轴子粒子在引力束缚能级之间跃迁、轴子/类轴子粒子湮灭为引力子，以及轴子/类轴子粒子云发生玻色新星坍缩时，会产生引力波信号。前两种机制应产生持续时间较长的单色引力波信号，因为参与跃迁和湮灭的轴子/类轴子粒子处于黑洞势的精确能量本征态。根据 [36, 37] 中的解析近似，计算了轴子/类轴子粒子可能产生的信号，采用的参数值与 [17], 中相同；也就是说，考虑的是由银河系内、距离我们不超过 10 千秒差距范围内的黑洞周围轴子/类轴子粒子产生的引力波信号，10^6 秒的相干积分时间。针对初始质量为 1、2 和 3 M$_\odot$ 、初始自旋为 0.9 的黑洞，计算了主导能级（$l = m_l = 1,\ n = 0$）（图5中的实线）。

结论

本文研究了采用当今最先进技术制造的台式超稳光学腔，并报告称，该装置可用作引力波频谱中2–20 kHz范围内的谐振质量引力波探测器。此外，尽管其灵敏度具有谐振特性，但与金属韦伯棒探测器不同，该探测方案也能在谐振范围之外观测潜在引力波信号，只是灵敏度较低。我们表明，该装置不仅能够探测来自双中子星并合及并合后阶段、亚太阳质量原初黑洞并合和坍缩恒星核心等源的预期引力波信号，还能探寻标准模型之外的新物理，例如通过黑洞超辐射形成的超轻玻色子，包括QCD轴子和类轴子粒子。

致谢

本项目（20FUN08 NEXTLASERS）获得了由参与国共同资助的 EMPIR计划以及欧盟地平线2020研究与创新计划的资助。本研究是波兰托伦国家实验室 FAMO（KL FAMO）计划的一部分，并由波兰科学与高等教育部提供补助金支持。

[1] J. Weber，《引力波的探测与产生》，《物理评论》**117**，306（1960）。[2] B. Abbott *et al.*，《随机背景下干涉仪与共振棒引力波数据的首次互相关分析》，物理评论D **76**，022001（2007），arXiv:gr-qc/0703068 [gr-qc]。[3] B. Abbott *et al.*（LIGO科学合作组和Virgo合作组），《双黑洞并合产生的引力波观测》，物理评论快报 **116**，061102（2016）。[4] R. Poggiani，《LIGO/VIRGO合作组O3观测运行的结果》，PoS **HEASA2021**，060（2021）。[5] R. Abbott *et al.*，《GW190521中150 M$_\odot$ 双黑洞并合的性质与天体物理学意义》，《天体物理学杂志快报》**900**，L13（2020）。[6] B. Abbott *et al.*，《使用高级LIGO、Advanced Virgo和KAGRA观测并定位引力波瞬变的前景》，《相对论生活评论》**21**，3（2018），arXiv:1304.0670 [gr-qc]。

[7] G. Hobbs, A. Archibald, Z. Arzoumanian, D. Backer, M. Bailes, N. D. R. Bhat, M. Burgay, S. Burke-Spolaor, D. Champion, I. Cognard, W. Coles, J. Cordes, P. De- morest, G. Desvignes, R. D. Ferdman, L. Finn, P. Freire, M. Gonzalez, J. Hessels, A. Hotan, G. Janssen, F. Jenet, A. Jessner, C. Jordan, V. Kaspi, M. Kramer, V. Kon- dratiev, J. Lazio, K. Lazaridis, K. J. Lee, Y. Levin, A. Lommen, D. Lorimer, R. Lynch, A. Lyne, R. Manch- ester, M. McLaughlin, D. Nice, S. Oslowski, M. Pilia, A. Possenti, M. Purver, S. Ransom, J. Reynolds, S. Sanidas, J. Sarkissian, A. Sesana, R. Shannon, X. Siemens, I. Stairs, B. Stappers, D. Stinebring, G. Theureau, R. van Haasteren, W. van Straten, J. P. W. Verbiest, D. R. B. Yardley, 和 X. P. You, 《国际脉冲星计时阵列项目：将脉冲星用作引力波探测器》, 《经典与量子引力》**27**, 084013（2010年）, arXiv:0911.5206 [astro- ph.SR]。[8] Z. Arzoumanian, P. T. Baker, A. Brazier, S. Burke- Spolaor, S. J. Chamberlin, S. Chatterjee, B. Christy, J. M. Cordes, N. J. Cornish, F. Crawford, H. Thank- ful Cromartie, K. Crowter, M. DeCesar, P. B. Demorest, T. Dolch, J. A. Ellis, R. D. Ferdman, E. Ferrara, W. M. Folkner, E. Fonseca, N. Garver-Daniels, P. A. Gentile, R. Haas, J. S. Hazboun, E. A. Huerta, K. Islo, G. Jones, M. L. Jones, D. L. Kaplan, V. M. Kaspi, M. T. Lam, T. J. W. Lazio, L. Levin, A. N. Lommen, D. R. Lorimer, J. Luo, R. S. Lynch, D. R. Madison, M. A. McLaughlin, S. T. McWilliams, C. M. F. Mingarelli, C. Ng, D. J. Nice, R. S. Park, T. T. Pennucci, N. S. Pol, S. M. Ransom, P. S. Ray, A. Rasskazov, X. Siemens, J. Simon, R. Spiewak, I. H. Stairs, D. R. Stinebring, K. Stovall, J. Swiggum, S. R. Taylor, M. Vallisneri, R. van Haasteren, S. Vige- land , W. W. Zhu, 以及 NANOGrav 合作组, 《NANOGrav 11 年数据集：随机引力波背景的脉冲星计时约束》, 《天体物理学杂志》**859**, 47（2018年）, arXiv:1801.02617 [astro-ph.HE]。[9] L. Lentati, S. R. Taylor, C. M. F. Mingarelli, A. Sesana, S. A. Sanidas, A. Vecchio, R. N. Caballero, K. J. Lee, R. van Haasteren, S. Babak, C. G. Bassa, P. Brem, M. Burgay, D. J. Champion, I. Cognard, G. Desvignes, J. R. Gair, L. Guillemot, J. W. T. Hessels, G. H. Janssen, R. Karuppusamy, M. Kramer, A. Lassus, P. Lazarus, K. Liu, S. Os- lowski, D. Perrodin, A. Petiteau, A. Pos- senti, M. B. Purver, P. A. Rosado, R. Smits, B. Stappers, G. Theureau, C. Tiburzi, 和 J. P. W. Verbiest, 《欧洲脉冲星计时阵列对各向同性随机引力波背景的限制》, 《皇家天文学会月报》**453**, 2576（2015年）, arXiv:1504.03692 [astro-ph.CO]。[10] R. M. Shannon, V. Ravi, L. T. Lentati, P. D. Lasky, G. Hobbs, M. Kerr, R. N. Manchester, W. A. Coles, Y. Levin, M. Bailes, N. D. R. Bhat, S. Burke- Spolaor, S. Dai, M. J. Keith, S. Os- lowski, D. J. Reardon, W. van Straten, L. Toomey, J.-B. Wang, L. Wen, J. S. B. Wyithe, 以及 X.-J. Zhu, 《脉冲星观测中缺失的双超大质量黑洞引力波》, 《科学》**349**, 1522（2015年）, https://science.sciencemag.org/content/349/6255/1522.full.pdf

[11] S. Kolkowitz、I. Pikovski、N. Langellier、M. D. Lukin、R. L. Walsworth 和 J. Ye, 《利用光晶格原子钟探测引力波》, 物理评论D **94**, 124043（2016年）。[12] M. Ando、K. Ishidoshiro、K. Yamamoto、K. Yagi、W. Kokuyama、K. Tsubono 和 A. Takamori, 扭转低频引力波观测用棒天线, 《物理评论快报》**105**, 161101（2010年）。[13] L. Badurina、E. Bentine、D. Blas、K. Bongs、D. Borto- letto、T. Bowcock、K. Bridges、W. Bowden、O. Buch- mueller、C. Burrage、J. Coleman、G. Elertas、J. Ellis、C. Foot、V. Gibson、M. Haehnelt、T. Harte、S. Hedges、R. Hobson、M. Holynski、T. J ones、M. Langlois、S. Lel- louch、M. Lewicki、R. Maiolino、P. Majewski、S. Malik、J. March-Russell、C. McCabe、D. Newbold、B. Sauer、U. Schneider、I. Shipsey、Y. Singh、M. Uchida、T. Valen- zuela、M. van der Grinten、V. Vaskonen、J. Vossebeld、D. Weatherill 和 I. Wilmut, 《AION：原子干涉仪观测台与网络》, 《宇宙学与天体粒子物理学杂志》**2020年** (05), 011。[14] B. Canuel、S. Abend、P. Amaro-Seoane、F. Badaracco、Q. Beaufils、A. Bertoldi、K. Bongs、P. Bouyer、C. Brax- maier、W. Chaibi、N. Christensen、F. Fitzek、G. Flouris、N. Gaaloul、S. Gaffet、C. L. Garrido Alzar、R. Geiger、S. Guellati-Khelifa、K. Hammerer、J. Harms、J. Hinderer、J. Junca、S. Katsanevas、C. Klempt、C. Kozanitis、M. Krutzik、A. Landragin、I. L`azaro Roche、B. Leykauf、Y. H. Lien、S. Loriani、S. Merlet、M. Merzougui、M. Nofrarias、P. Papadakos、F. Pereira、A. Peters、D. Plexousakis、M. Prevedelli、E. Rasel、Y. Rogister、S. Rosat、A. Roura、D. O. Sabulsky、V. Schkolnik、D. Schlippert、C. Schubert、L. Sidorenkov、J. N. Siemß、C. F. Sopuerta、F. Sorrentino、C. Struckmann、G. M. Tino、G. Tsagkatakis、A. Vicer´e、W. von Klitzing、L. Wo- erner 和 X. Zou, 《ELGAR——欧洲引力与原子干涉研究实验室》, arXiv 预印本, arXiv: 1911 03701 2019 1911 03701 。（）, arXiv: [ ] 。physics.atom-ph。[15] P. Amaro-Seoane、H. Audley 等, 《激光干涉空间天线》, arXiv 预印本, arXiv:1702.00786（2017年）, arXiv:1702.00786 [astro-ph.IM]。[16] S. Sato、S. Kawamura、M. Ando、T. Nakamura、K. Tsub- ono、A. Araya、I. Funaki、K. Ioka、N. Kanda、S. Mori- waki、M. Musha、K. Nakazawa、K. Numata、S. ichiro Sakai、N. Seto、T. Takashima、T. Tanaka、K. Agat- su ma、K. suke Aoyanagi、K. Arai、H. Asada、Y. Aso、T. Chiba、T. Ebisuzaki、Y. Ejiri、M. Enoki、Y. Eriguchi、M.-K. Fujimoto、R. Fujita、M. Fukushima、T. Futa- mase、K. Ganzu、T. Harada、T. Hashimoto、K. Hayama、W. Hikida、Y. Himemoto、H. Hirabayashi、T. Hira- matsu、F.-L. Hong、H. Horisawa、M. Hosokawa、K. Ichiki、T. Ikegami、K. T. Inoue、K. Ishidoshiro、H. Ishihara、T. Ishikawa、H. Ishizaki、H. Ito、Y. Itoh、N. Kawashima、F. Kawazoe、N. Kishimoto、K. Kiuchi、S. Kobayashi、K. Kohri、H. Koizumi、Y. Kojima、K. Kokeyama、W. Kokuyama、K. Kotake、Y. Kozai、H. Kudoh、H. Ku- nimori、H. Kuninaka、K. Kuroda、K. ichi Maeda、H. Matsuhara、Y. Mino、O. Miyakawa、S. Miyoki、M. Y. Morimoto、T. Morioka、T. Morisawa、S. Muko- hyama、S. Nagano、I. Naito、K. Nakamura、H. Nakano、K. Nakao、S. Nakasuka、Y. Nakayama、E. Nishida、K. Nishiyama、A. Nishizawa、Y. Niwa、T. Noumi、Y. Obuchi、M. Ohashi、N. Ohishi、M. Ohkawa、N. Okada、K. Onozato、K. Oohara、N. Sago、M. Saijo、M. Sakagami、S. Sakata、M. Sasaki、T. Sato、M. Shibata、H. Shinkai、K. Somiya、H. Sotani、N. Sugiyama、Y. Suwa、R. Suzuki、H. Tagoshi、F. Takahashi、K. Takahashi、K. Takahashi、R. Takahashi、R. Takahashi、T. Takahashi、H. Taka- hashi、T. Akiteru、T. Takano、K. Taniguchi、A. Taruya、H. Tashiro、Y. Torii、M. Toyoshima、S. Tsujikawa,

Y. Tsunesada、A. Ueda、K. ichi Ueda、M. Utashima、Y. Wakabayashi、H. Yamakawa、K. Yamamoto、T. Yamazaki、J. Yokoyama、C.-M. Yoo、S. Yoshida 和 T. Yoshino，《DECIGO 的现状》，《物理学杂志：会议系列》840，012010（2017年）。[17] N. Aggarwal、G. P. Winstone、M. Teo、M. Baryakhtar、S. L. Larson、V. Kalogera 和 A. A. Geraci，《利用悬浮传感器式引力波探测器搜寻新物理》，《物理评论快报》128，111101（2022年）。[18] F. Amann、F. Bonsignorio、T. Bulik、H. J. Bulten、S. Cuccuru、A. Dassargues、R. DeSalvo、E. Fenyvesi、F. Fidecaro、I. Fiori、C. Giunchi、A. Grado、J. Harms、S. Koley、L. Kov´acs、G. Losurdo、V. Mandic、P. Mey- ers、L. Naticchioni、F. Nguyen、G. Oggiano、M. Olivieri、F. Paoletti、A. Paoli、W. Plastino、M. Razzano、P. Ruggi、G. Saccorotti、A. M. Sintes、L. Somlai、P. V´an 和 M. Vas´uth，《爱因斯坦望远镜的选址标准》，《科学仪器评论》91，094504（2020年），https://doi.org/10.1063/5.0018414。[19] A. D. Ludlow、M. M. Boyd、J. Ye、E. Peik 和 P. O. Schmidt，《光学原子钟》，Rev. Mod. Phys. 87，637（2015年）。[20] M. Abdel-Hafiz *et al.*，《光学钟研制指南：10^{-18} 分数频率不确定度》（2019年）。[21] J. D. E. Creighton 和 W. G. Anderson，*Gravitational-Wave Physics and Astronomy: An Introduction to Theory Experiment and Data Analysis* 2011，（Wiley，）。[22] T. Legero、T. Kessler 和 U. Sterr，《利用熔融石英反射镜调节光学参考腔的热膨胀特性》，《美国光学学会杂志B：光学物理》27，914（2010年），arXiv:1002.2070 [physics.optics]。[23] E. D. Black，《Pound–Drever–Hall 激光频率稳频简介》，《美国物理学杂志》69，79 2001( )。[24] S. Falke、M. Misera、U. Sterr 和 C. Lisdat，《向光学钟中的原子传送脉冲式相位稳定光》，《应用物理学B》107，301（2012年）。[25] H. B. Callen 和 T. A. Welton，《不可逆性与广义噪声》，《物理评论》83，34（1951年）。[26] H. B. Callen 和 R. F. Greene，《关于不可逆热力学定理》，《物理评论》86，702（1952年）。[27] G. Cole、W. Zhang、M. Martin、J. Ye 和 M. Aspelmeyer，《高反射率光学涂层中布朗噪声降低十倍》，《自然·光子学》7，644（2013年）。[28] S. H¨afner、S. Falke、C. Grebing、S. Vogt、T. Legero、M. Merimaa、C. Lisdat 和 U. Sterr，8×10^{-17} 使用长室温腔实现的分数激光频率不稳定度，《光学快报》**40**, 2112 2015 1502 02608 （），[ ] arXiv：。physics.optics。[29] R. E. Vogt、R. W. P. Drever、K. S. Thorne、F. J. Raab 和 R. Weiss，*The Construction, Operation, and Support of a Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory (LIGO). VOLUME 1: LIGO Science and Concepts.* （提交给美国国家科学基金会的提案，1989年）。[30] A. Branca、M. Bonaldi、M. Cerdonio、L. Conti、P. Falferi、F. Marin、R. Mezzena、A. Ortolan、G. A. Prodi、L. Taf- farello、G. Vedovato、A. Vinante、S. Vitale 和 J.-P. Zen- dri，《利用 AURIGA 探测器搜寻超轻标量暗物质候选者》，《物理评论快报》118，021302（2017年）。[31] L. Gottardi、A. de Waard、O. Usenko、G. Frossati、M. Podt、J. Flokstra、M. Bassan、V. Fafone、Y. Mi- nenkov、and A. Rocchi，在 5 K 下运行的球形引力波探测器 MiniGrail 的灵敏度，《物理评论》D 76，102005 (2007)。[32] K. Ackley、V. B. Adya、P. Agrawal、P. Altin、G. Ash- ton、M. Bailes、E. Baltinas、A. Barbuio、D. Beniwal、C. Blair、and et al.，中子星极端物质天文台：全球网络中的千赫兹频段引力波探测器，《澳大利亚天文学会刊》37，e047 (2020)。[33] C. J. Moore、R. H. Cole、and C. P. L. Berry，引力波灵敏度曲线，《经典与量子引力》**32**，015014 2015 1408 0740 ( )，[ ] arXiv: . gr-qc .。[34]A. Arvanitaki and A. A. Geraci，使用光学悬浮传感器探测高频引力波，物理评论快报110，071105 (2013)。[35] P. Cerd´a-Dur´an、N. DeBrye、M. A. Aloy、J. A. Font、and M. Obergaulinger，黑洞形成型核心坍缩中的引力波特征，《天体物理学杂志快报》779，L18 (2013)。[36] M. Isi、L. Sun、R. Brito、and A. Melatos，对来自超轻玻色子的引力波进行定向搜索，物理评论D 99，084042 (2019)。[37] M. Isi、L. Sun、R. Brito、and A. Melatos，勘误：对来自超轻玻色子的引力波进行定向搜索 [物理评论D 99，084042 (2019)]，物理评论D 102，049901 (2020)。[38] M. Shibata and K. Taniguchi，双中子星并合形成黑洞：盘质量、短伽马射线暴和准正常模振铃，物理评论D 73，064027 (2006)。[39] L. Baiotti、B. Giacomazzo、and L. Rezzolla，螺旋内旋中子星双星的精确演化： prompt and delayed collapse to a black hole，物理评论D 78，084033 2008( )。[40] B. Margalit and B. D. Metzger，多信使矩阵：中子星并合对核物质状态方程约束的未来，《天体物理学杂志快报》880，L15 (2019)。[41] B. Abbott、others、LIGO科学合作组、and Virgo合作组，GW170817：双中子星旋近引力波的观测，物理评论快报**119**，161101 2017 1710 05832 ( )，[ ] arXiv: . gr-qc .。[42] B. P. Abbott、others、and LIGO科学合作组 and Virgo合作组，搜索来自双中子星并合GW170817长寿命遗迹的引力波，《天体物理学杂志》875，160 (2019)。[43] B. P. Abbott *et al.*，GW190425：总质量为 $\sim 3.4\ M_\odot$的紧致双星并合观测，《天体物理学杂志快报》892，L3 (2020)。[44] E. O' Connor and C. D. Ott，失败的核心坍缩超新星中的黑洞形成，《天体物理学杂志》730，70 (2011)。[45]N. de Brye、P. Cerd´a-Dur´an、M. ´A. Aloy、and J. A. Font，塌缩星场景的广义相对论模拟，载于*Progress in Mathematical Relativity Gravitation and Cosmology*，由 A. Garcıa-Parrado、F. C. Mena、F. Moura 和 E. Vaz 编（Springer Berlin Heidelberg，柏林，海德堡，2014）第231–235页。

[46] Y. B. Zel'dovich and I. D. Novikov, 膨胀过程中核心延迟形成假说与热宇宙学模型, Soviet Ast. **10**, 602 (1967). [47] S. Hawking, 极低质量引力坍缩天体, 《皇家天文学会月报》 **152**, 75 (1971), https://academic.oup.com/mnras/article-pdf/152/1/75/9360899/mnras152-0075.pdf. [48] P. Pani and A. Loeb, 原初黑洞被中子星潮汐捕获：对暗物质约束的意义, 《宇宙学与天体粒子物理学杂志》**2014** (06), 026. [49] S. Shandera, D. Jeong, and H. S. G. Gebhardt, 亚太阳质量暗黑洞双星并合产生的引力波, 物理评论快报**120**, 241102 (2018). [50] D. Singh, M. Ryan, R. Magee, T. Akhter, S. Shandera, D. Jeong, and C. Hanna, 引力波对暗物质钱德拉塞卡质量的限制, 物理评论D **104**, 044015 2021( ). [51] B. Dasgupta, R. Laha, and A. Ray, 暗核心坍缩产生的低质量黑洞, 物理评论快报**126**, 141105 (2021). [52] T. Damour, N. Deruelle, and R. Ruffini, 关于定常几何时空中的量子共振, Lettere al Nuovo Ci- mento (1971-1985) **15**, 257 (1976). [53] I. M. Ternov, V. R. Khalilov, G. A. Chizhov, and A. B. Gaina, 粒子在 Kerr 场和 Schwarzschild 场中的有限运动, Soviet Physics Journal **21**, 1200 (1978). [54] T. J. Zouros and D. M. Eardley, 旋转黑洞中有质量标量扰动的不稳定性, 《物理学年鉴》**118**, 139 (1979). [55] S. Detweiler, 克莱因–戈尔登方程与旋转黑洞, 物理评论D **22**, 2323 (1980). [56] R. Brito, V. Cardoso, and P. Pani, *Superradiance* (Springer 国际出版公司，2020). [57] A. Arvanitaki, S. Dimopoulos, S. Dubovsky, N. Kaloper, and J. March-Russell, 弦轴子宇宙, 物理评论D **81**, 123530（2010年）。[58] A. Arvanitaki 和 S. Dubovsky, 《利用精密黑洞物理探索弦理论宇宙》, 物理评论D **83**, 044026 2011（）。[59] H. Yoshino 和 H. Kodama, 《黑洞周围轴子云的引力辐射：超辐射阶段》, 理论与实验物理进展 **2014年**, 10.1093/ptep/ptu029（2014）, 043E02, https://academic.oup.com/ptep/article-pdf/2014/4/043E02/19300525/ptu029.pdf。[60] A. Arvanitaki、M. Baryakhtar 和 X. Huang, 《利用黑洞和引力波发现QCD轴子》, 物理评论D **91**, 084011（2015年）。[61] R. Brito、V. Cardoso 和 P. Pani, 《作为粒子探测器的黑洞：超辐射不稳定性的演化》, 《经典与量子引力》**32**, 134001（2015年）。[62] A. Arvanitaki、M. Baryakhtar、S. Dimopoulos、S. Dubovsky 和 R. Lasenby, 《高级LIGO中的黑洞并合与QCD轴子》, 物理评论D **95**, 043001 2017（）。[63] R. Brito、S. Ghosh、E. Barausse、E. Berti、V. Cardoso、I. Dvorkin、A. Klein 和 P. Pani, 《来自超轻玻色子的随机引力波与可分辨引力波》, 物理评论快报 **119**, 131101（2017年）。[64] R. Brito、S. Ghosh、E. Barausse、E. Berti、V. Cardoso、I. Dvorkin、A. Klein 和 P. Pani, 《利用LIGO和LISA搜索超轻玻色子》, 物理评论D **96**, 064050（2017年）。[65] D. Baumann、H. S. Chia 和 R. A. Porto, 《利用双黑洞探测超轻玻色子》, 物理评论D **99**, 044001 2019（）。[66] K. K. Y. Ng、O. A. Hannuksela、S. Vitale 和 T. G. F. Li, 《通过对一群双黑洞并合进行自旋测量来搜寻超轻玻色子》, 物理评论D **103**, 063010（2021年）。