

Ondas gravitacionales: contexto general y actualidad

Fuentes de GW y experimentos para observarlas

THE SPECTRUM OF GRAVITATIONAL WAVES

Observatories & experiments

Ground-based experiment



Space-based observatory



Pulsar timing array



Cosmic microwave background polarisation



Timescales

milliseconds

seconds

hours

years

billions of years

Frequency (Hz)

100

1

10^{-2}

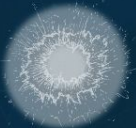
10^{-4}

10^{-6}

10^{-8}

10^{-16}

Cosmic sources



Supernova



Pulsar



Compact object falling onto a supermassive black hole



Merging supermassive black holes



Merging neutron stars in other galaxies



Merging stellar-mass black holes in other galaxies



Merging white dwarfs in our Galaxy

Actualidad de las observaciones de GW

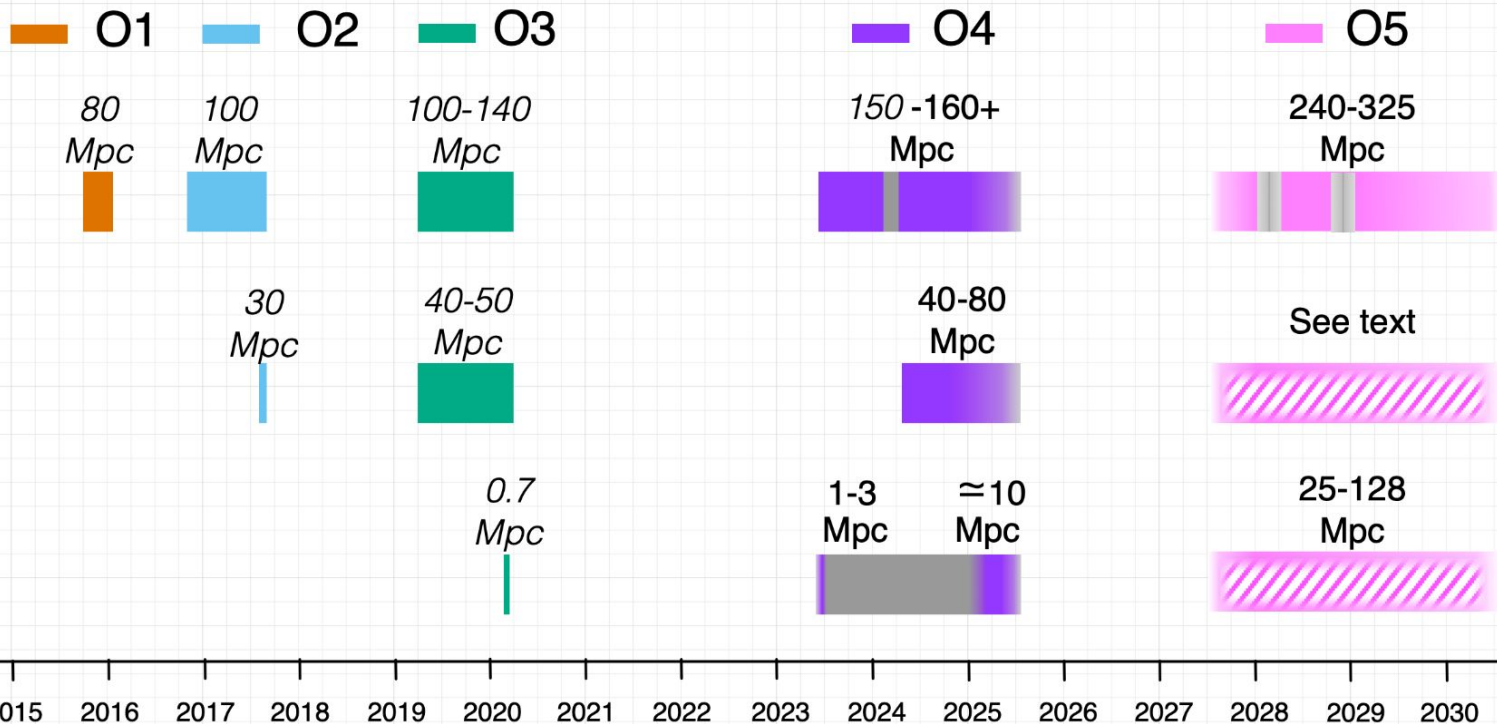
LIGO-Virgo-KAGRA

Updated
2024-06-14

LIGO

Virgo

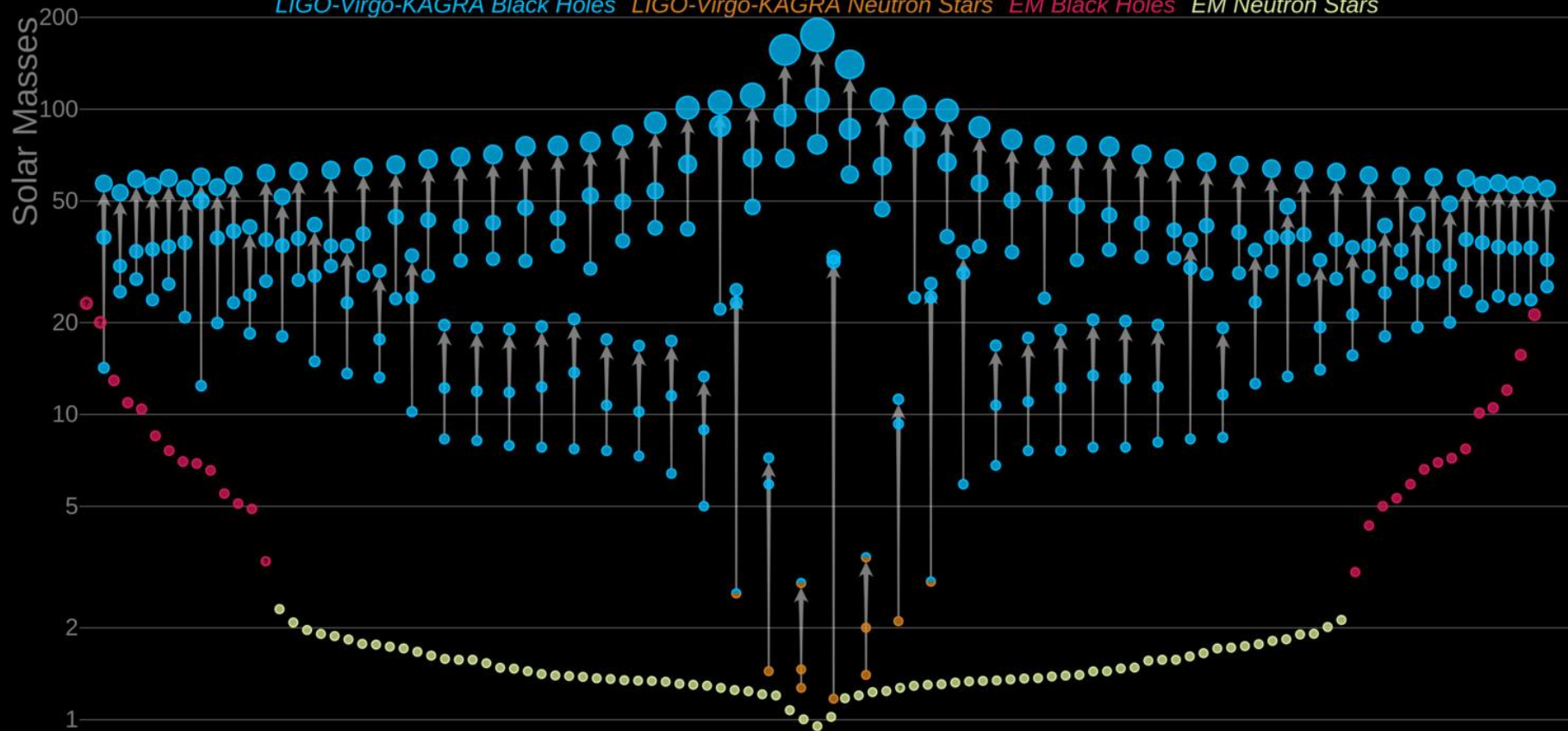
KAGRA



G2002127-v25

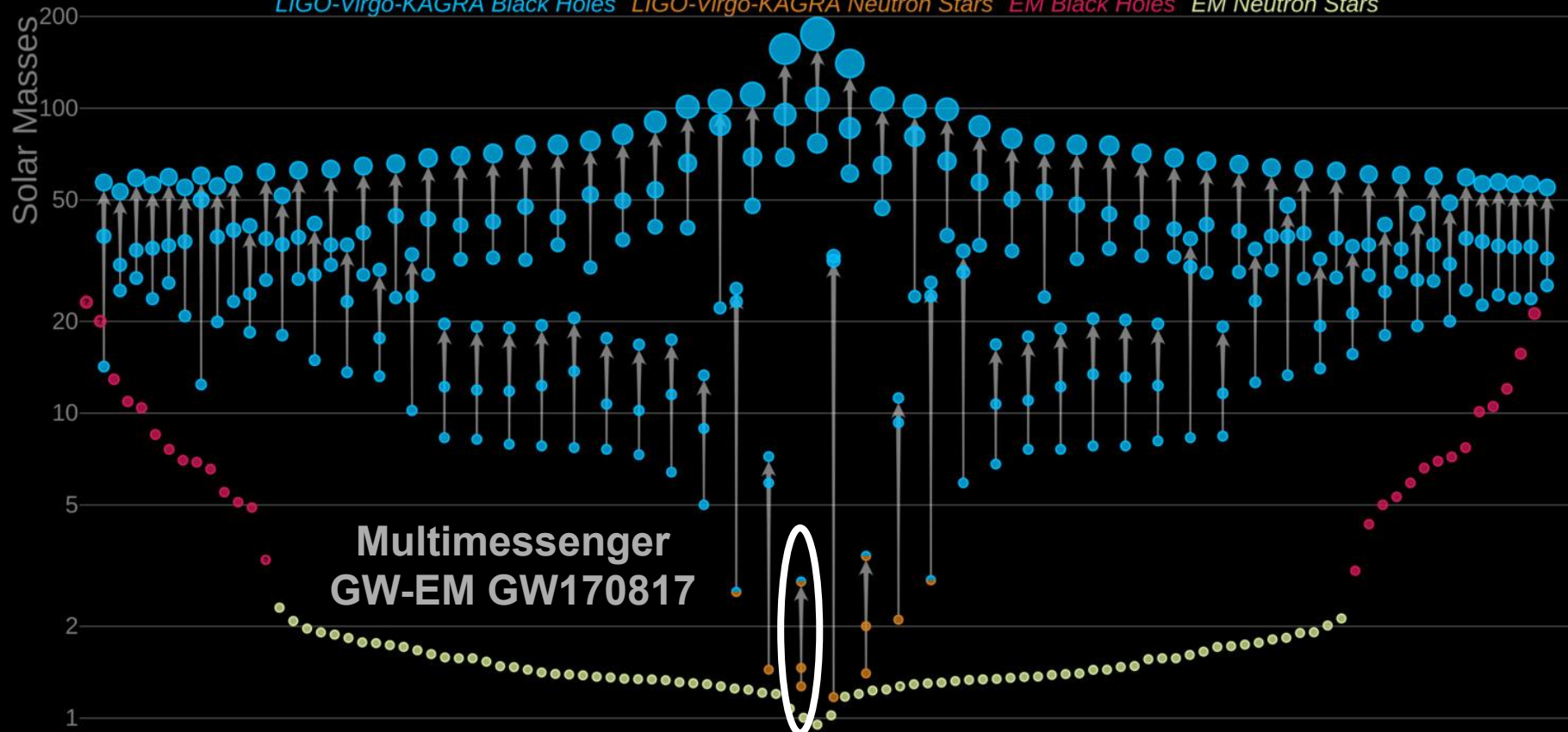
Masses in the Stellar Graveyard

LIGO-Virgo-KAGRA Black Holes *LIGO-Virgo-KAGRA Neutron Stars* *EM Black Holes* *EM Neutron Stars*



Masses in the Stellar Graveyard

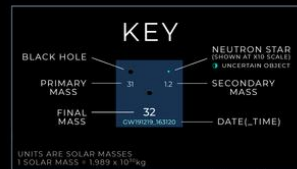
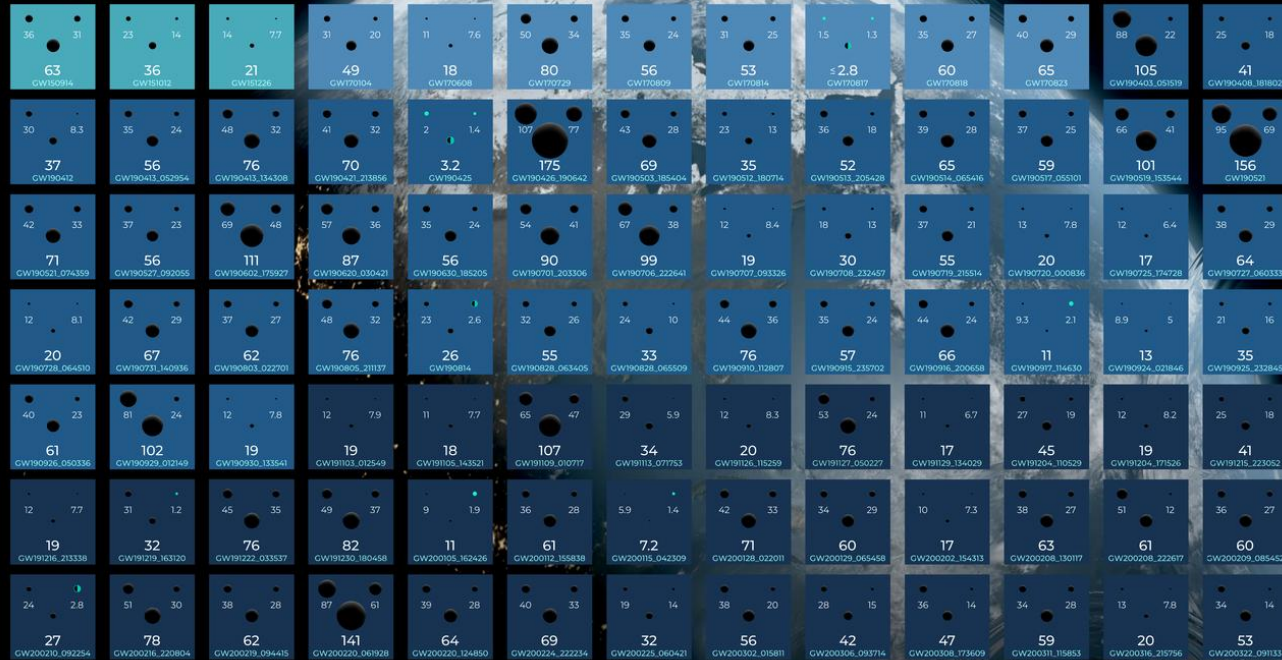
LIGO-Virgo-KAGRA Black Holes LIGO-Virgo-KAGRA Neutron Stars EM Black Holes EM Neutron Stars



OBSERVING
01
RUN
2015 - 2016

02
2016 - 2017

03a+b
2019 - 2020



Note that the color indicates the time from 0 to 100 days. The color scale is red for the first 10 days, orange for the next 10 days, yellow for the next 10 days, green for the next 10 days, blue for the next 10 days, and purple for the next 10 days. The color scale is red for the first 10 days, orange for the next 10 days, yellow for the next 10 days, green for the next 10 days, blue for the next 10 days, and purple for the next 10 days.

GRAVITATIONAL WAVE MERGER DETECTIONS

SINCE 2015

ABC Center of Excellence for Gravitational Wave Discovery



Get to know

GW230529

Full name GW230529_181500

~ 650 million light years away



Detectors



- Offline OR not operational
- Online BUT not used for analysis*
- Online AND used for analysis

Discovered on 29 May 2023 at 18h15 UTC

most likely a merger between a
Neutron Star & Black Hole (NSBH)



~1.4 M_{\odot}



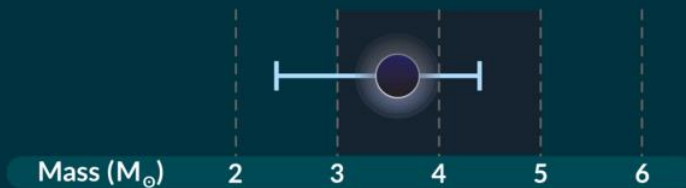
~3.6 M_{\odot}

Most symmetric NSBH event so far

more likely than prior GW NSBHs to have the neutron star
ripped apart by the black hole

Primary object in lower mass gap

further supports that this region is not empty

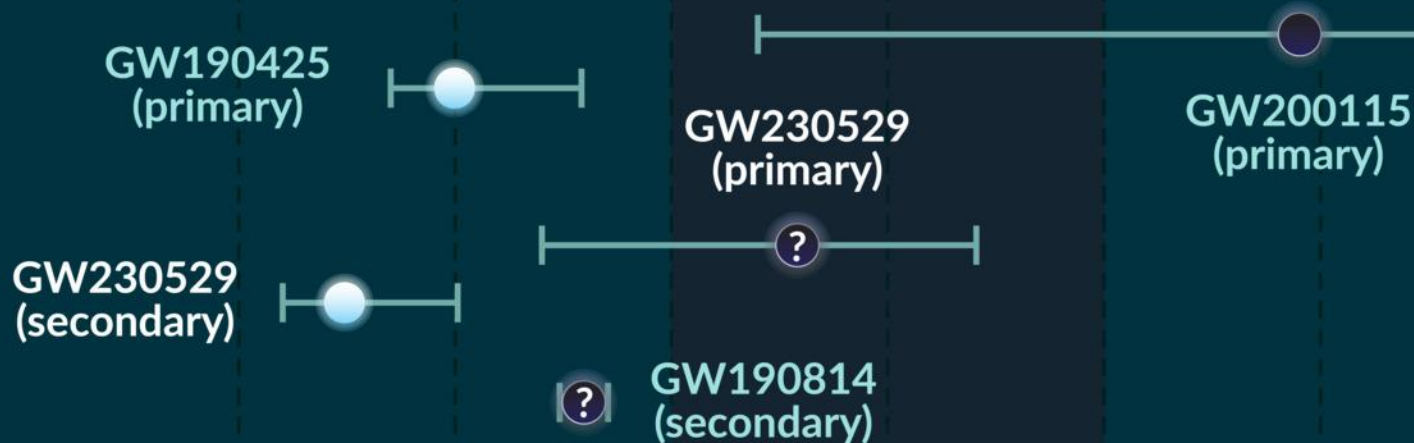


* Although the KAGRA detector was in observing mode, its sensitivity was insufficient to impact the analysis of GW230529

@astronerdika

FILLING THE MASS GAP

with observations of compact binaries from gravitational waves



Mass of compact object (M_{\odot}) 1 2 3 4 5 6

Includes components of compact binary mergers detected with a False Alarm Rate (FAR) of less than 0.25 per year

LISA

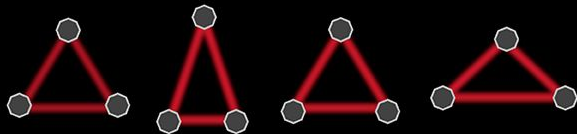
On January 25th the European Space Agency gives LISA the go-ahead to build the instruments and spacecraft. This work will start in January 2025 once a European industrial contractor has been chosen.

The launch of the three spacecraft is planned for 2035, on an Ariane 6 rocket.

LISA - LASER INTERFEROMETER SPACE ANTENNA

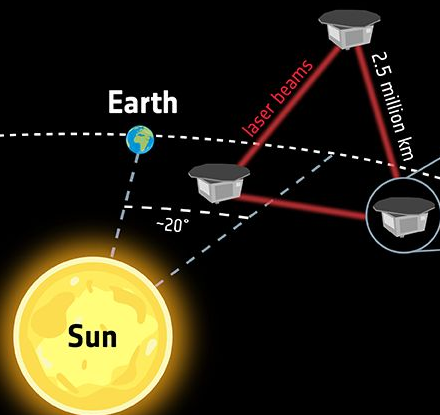
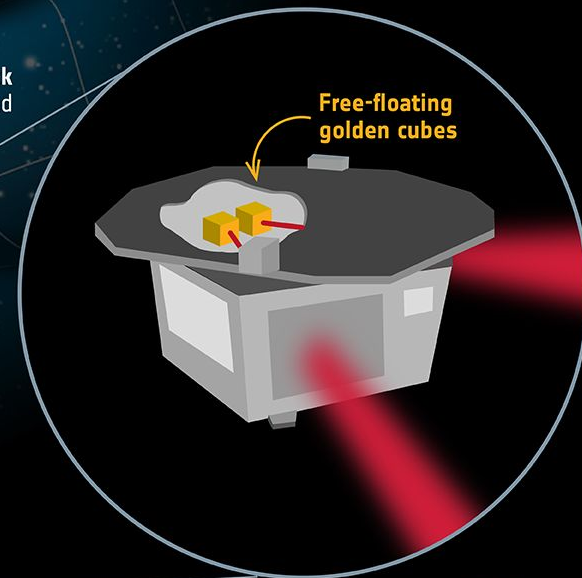
Gravitational waves are ripples in spacetime that alter the distances between objects. LISA will detect them by measuring subtle changes in the distances between **free-floating cubes** nestled within its three spacecraft.

③ **identical spacecraft** exchange **laser beams**. Gravitational waves change the distance between the **free-floating cubes** in the different spacecraft. This tiny change will be measured by the laser beams.



** Changes in distances travelled by the laser beams are not to scale and extremely exaggerated*

Powerful events such as **colliding black holes** shake the fabric of spacetime and cause gravitational waves



Pulsar Timing Arrays

- International PTA
 - European PTA, EPTA
 - Indian PTA, InPTA
 - North American Nanohertz Observatory, NANOGrav
 - Parkes PTA (Australia), PPTA
 - Chinese PTA, CPTA
 - South Africa PTA, SAPTA

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL LETTERS

OPEN ACCESS

The NANOGrav 15 yr Data Set: Evidence for a Gravitational-wave Background

Gabriella Agazie¹ , Akash Anumalapudi¹ , Anne M. Archibald² , Zaven Arzoumanian³, Paul T. Baker⁴ , Bence Bécsey⁵ , Laura Blecha⁶ , Adam Brazier^{7,8} , Paul R. Brook⁹ , Sarah Burke-Spolaor^{10,11}  [Show full author list](#)

Published 2023 June 29 • © 2023. The Author(s). Published by the American Astronomical Society.

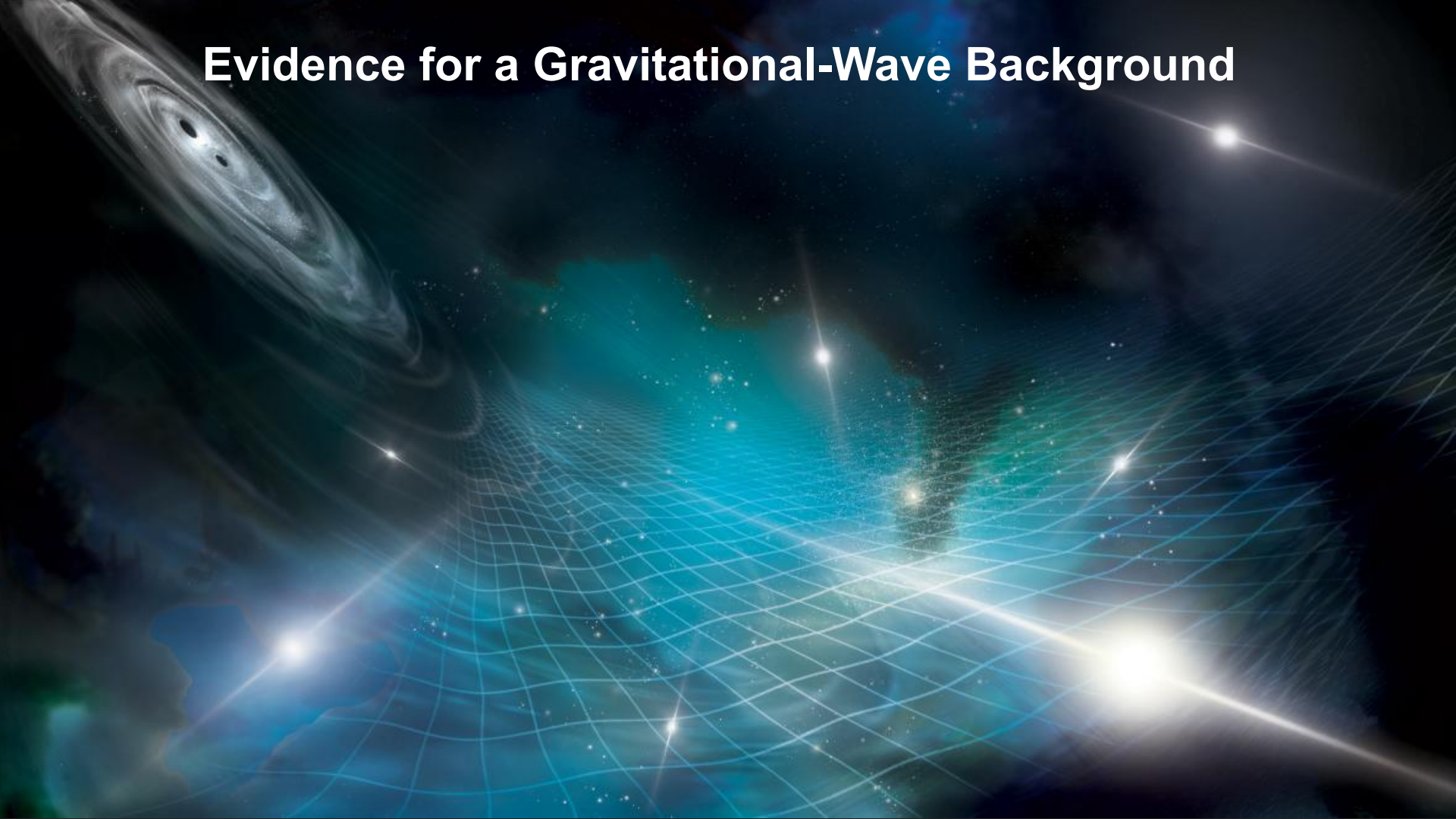
[The Astrophysical Journal Letters](#), [Volume 951](#), [Number 1](#)

[Focus on NANOGrav's 15 yr Data Set and the Gravitational Wave Background](#)

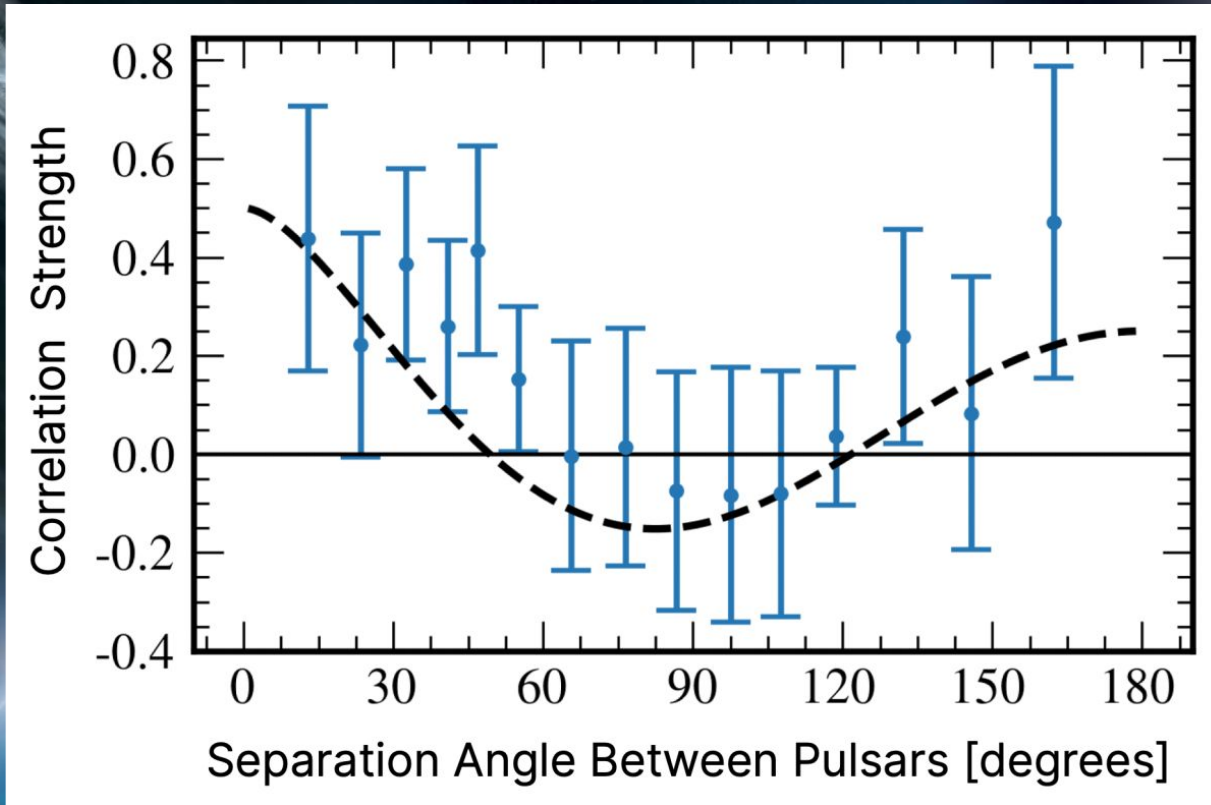
Citation Gabriella Agazie *et al* 2023 *ApJL* **951** L8

DOI 10.3847/2041-8213/acdac6

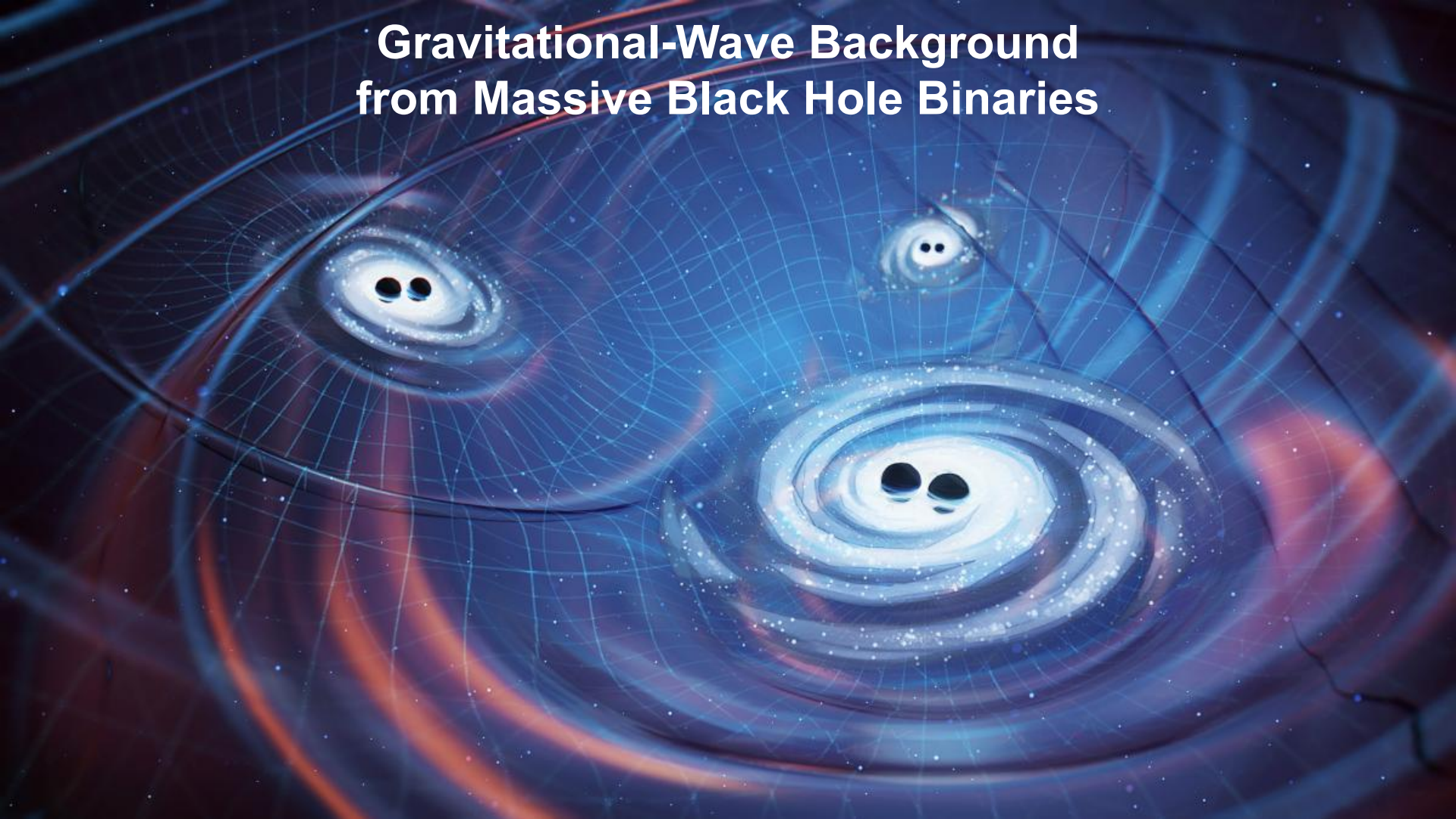
Evidence for a Gravitational-Wave Background



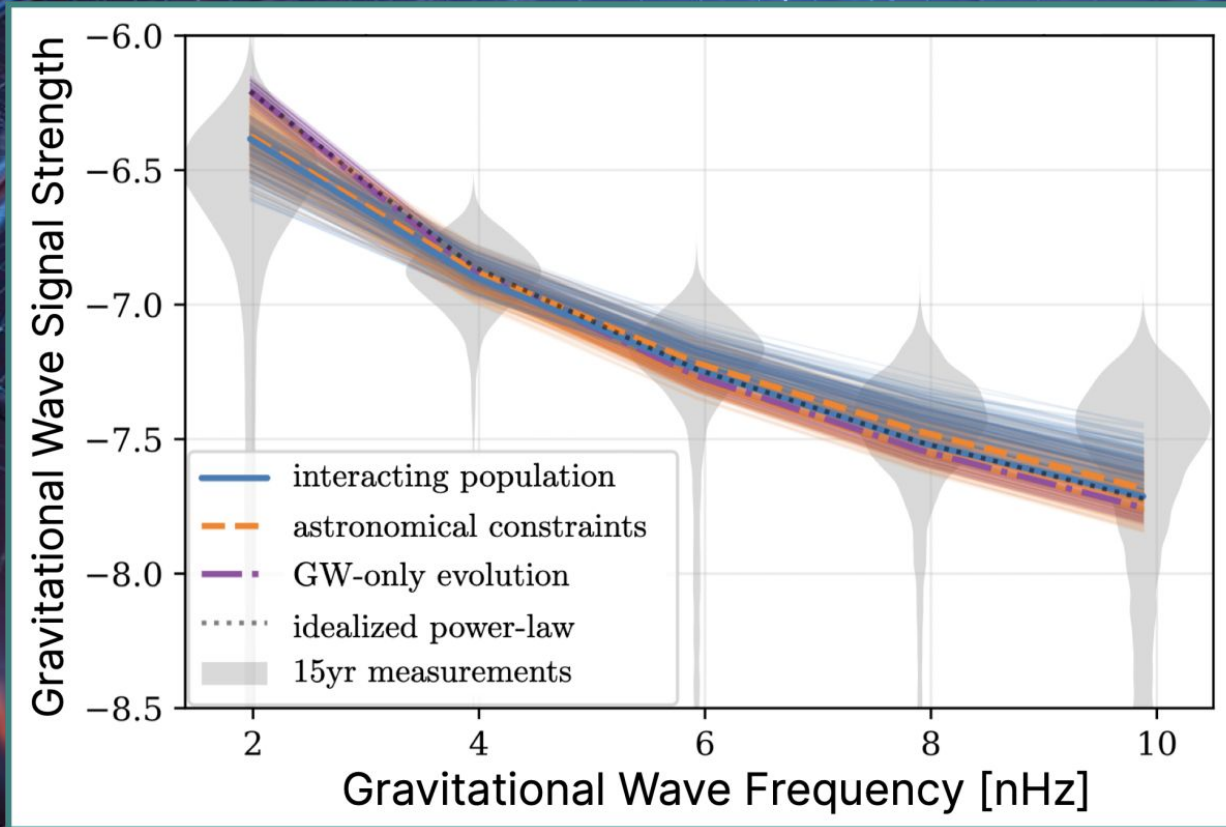
Evidence for a Gravitational-Wave Background



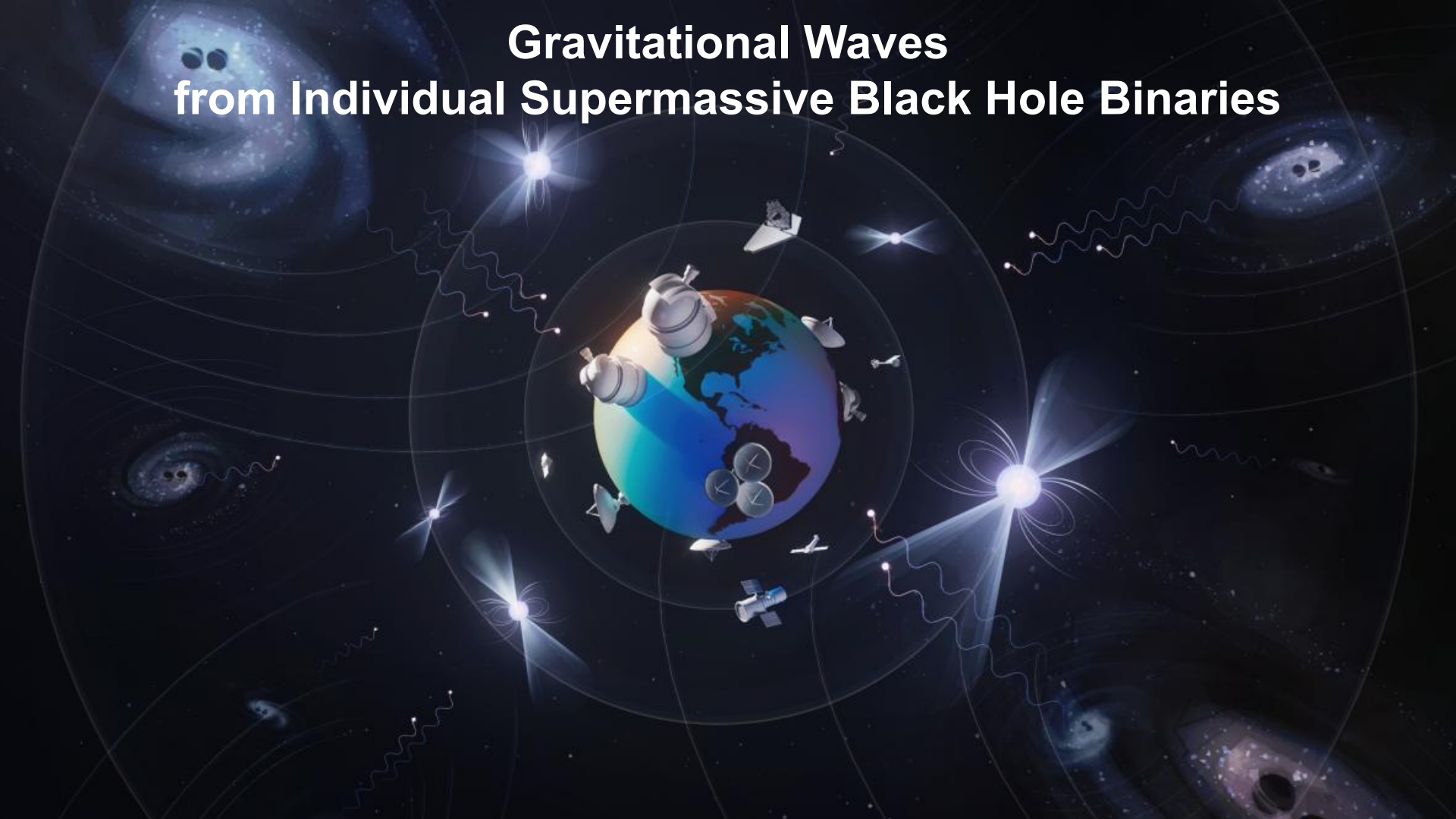
Gravitational-Wave Background from Massive Black Hole Binaries



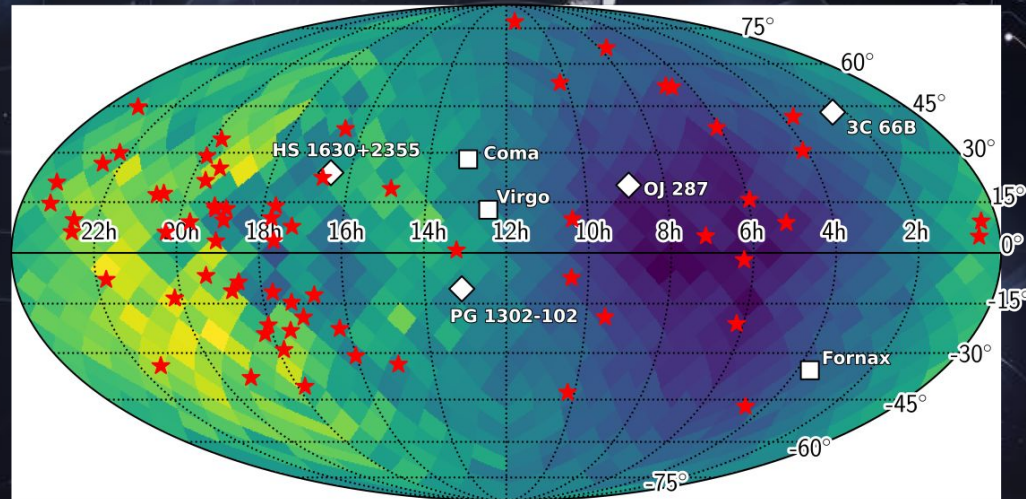
Gravitational-Wave Background from Massive Black Hole Binaries



Gravitational Waves from Individual Supermassive Black Hole Binaries



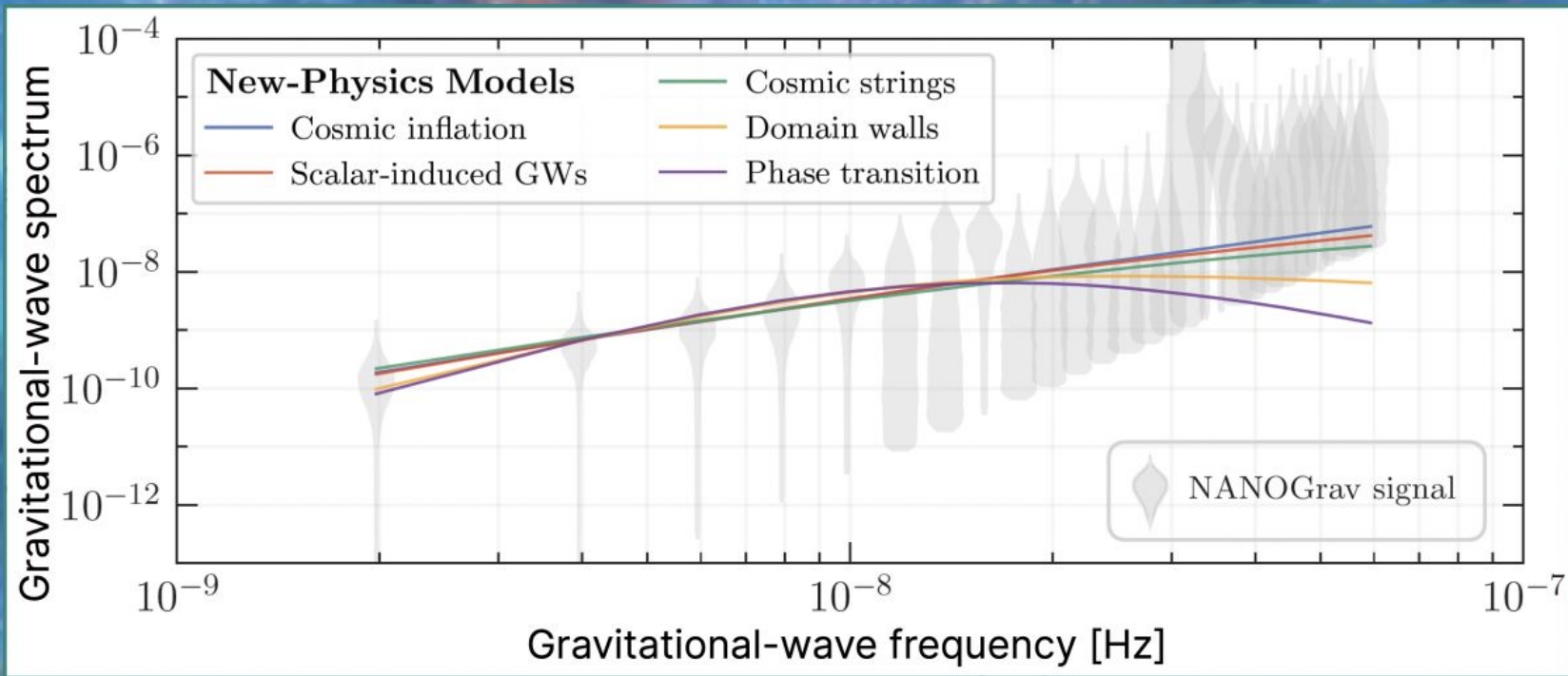
Gravitational Waves from Individual Supermassive Black Hole Binaries



Signals from New Physics



Signals from New Physics



Otros experimentos sobre GW

- Ground-based experiments (operational)
 - GEO 600
 - TAMA 300
 - MiniGrail
 - Mario Schenberg
- Ground-based experiments (proposed)
 - AIGO
 - LCGT
 - ET
 - INDIGO
 - AGIS
 - TOBA
- Space-based experiments (proposed)
 - DECIGO
 - BBO

Volvamos un momento a:
Fuentes de GW y experimentos para observarlas

THE SPECTRUM OF GRAVITATIONAL WAVES

Observatories & experiments

Ground-based experiment



Space-based observatory



Pulsar timing array



Cosmic microwave background polarisation



Timescales

milliseconds

seconds

hours

years

billions of years

Frequency (Hz)

100

1

10^{-2}

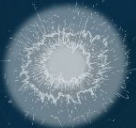
10^{-4}

10^{-6}

10^{-8}

10^{-16}

Cosmic sources



Supernova



Pulsar



Compact object falling onto a supermassive black hole



Merging supermassive black holes



Merging neutron stars in other galaxies



Merging stellar-mass black holes in other galaxies



Merging white dwarfs in our Galaxy

Fuentes de ondas gravitatorias

1. **Merger de binarias** (BH, NS, objetos compactos, SMBH, etc.)
2. **Burst no modelados** como la ráfaga de GW generadas en la explosión de supernovas, pulsar glitches, transición NS->BH
3. **GW continuas** como las producidas por los pulsares

Señal
coherente

4. **Fondos estocásticos**

Señal
incoherente

¿Qué es un fondo estocástico de GW?

Es la superposición incoherente de las GW que llegan desde todas las direcciones del cielo producidas por distintos eventos en toda la historia del universo.

A diferencia de las otras señales de ondas gravitacionales, un fondo estocástico solo aparecería como ruido en un único detector de ondas gravitacionales.

$$s(t) = n(t) + h(t)$$

$$\begin{aligned}\langle s_1(t) s_2(t) \rangle &= \langle (n_1(t) + h(t)) (n_2(t) + h(t)) \rangle \\ &= \langle n_1(t) n_2(t) \rangle + \langle n_1(t) h(t) \rangle + \langle h(t) n_2(t) \rangle + \langle h(t) h(t) \rangle \\ &\approx \langle h(t) h(t) \rangle ,\end{aligned}$$

¿Qué es un fondo estocástico de GW?

A partir de la correlación de la salida de dos detectores calibrados

$$h_{rms}^2 = \left\langle \sum_{i,j} h_{ij} h_{ij} \right\rangle = \int_0^\infty df S_h(f)$$

$$\rho_{GW} = \int_0^\infty df \rho_{GW}(f) = \int_0^\infty df S_h(f) \frac{\pi c^2 f^2}{8G}$$

$$\frac{d\rho_{GW}}{df} = \rho_{GW}(f)$$

$$\Omega_{GW}(f) = \frac{f \rho_{GW}(f)}{\rho_c}$$

La dependencia en frecuencia depende del tipo de fenómeno que esté generando el fondo, no se esperan grandes variaciones ni en frecuencia ni en tiempo.

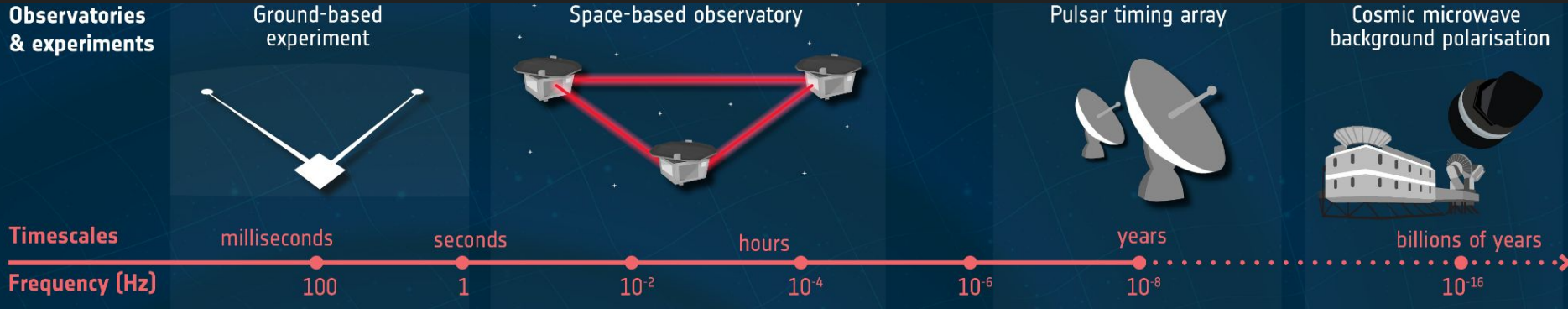
Posibles fuentes de fondos estocásticos de GW

Debe existir un fondo estocástico de ondas gravitacionales en cierto nivel. El espacio-tiempo está constantemente oscilando debido a toda la actividad a lo largo de la historia del universo.

- Origen cosmológico
 - Inflación, fluctuaciones primordiales tensoriales
 - (p)Reheating, durante el decaimiento de la energía del inflatón hacia los campos de materia
 - Cosmic strings, defectos topológicos producidos por rupturas de simetrías de nueva física.
 - Transiciones de fase de primer orden, debido a la colisión de burbujas o turbulencia
 - Modelos pre Big Bang (e.g. string cosmology)
- Origen astrofísico
 - Binarias de agujeros negros, de estrellas de neutrones, de estrellas compactas y pulsares muy distantes para ser resueltos.
 - Caso particular: binarias de agujeros negros supermasivos.

La suma de todas las ondas gravitacionales no resueltas individualmente formará un fondo estocástico. A su vez, este podría dificultar la observación de un fondo estocástico de origen puramente cosmológico.

¿Cómo se mide un fondo estocástico?



A través de la correlación sobre diferentes detectores: pueden ser co-localizados (el ruido pasa a correlacionarse fuertemente) o distantes (no ven la GW al mismo tiempo)

Límites indirectos: al ser radiación podrían acotarse a través del Neff

Posibles fuentes de fondos estocásticos de GW

Debe existir un fondo estocástico de ondas gravitacionales en cierto nivel. El espacio-tiempo está constantemente oscilando debido a toda la actividad a lo largo de la historia del universo.

- Origen cosmológico
 - Inflación, fluctuaciones primordiales tensoriales
 - (p)Reheating, durante el decaimiento de la energía del inflatón hacia los campos de materia
 - Cosmic strings, defectos topológicos producidos por rupturas de simetrías de nueva física.
 - Transiciones de fase de primer orden, debido a la colisión de burbujas o turbulencia
 - Modelos pre Big Bang (e.g. string cosmology)
- Origen astrofísico
 - Binarias de agujeros negros, de estrellas de neutrones, de estrellas compactas y pulsares muy distantes para ser resueltos.

La suma de todas las ondas gravitacionales no resueltas individualmente formará un fondo estocástico. A su vez, este podría dificultar la observación de un fondo estocástico de origen puramente cosmológico.

Ondas gravitatorias cosmológicas

$$ds^2 = a^2 \left[-d\eta^2 + (\delta_{ij} + h_{ij}^{\text{TT}}) dx^i dx^j \right]$$

Sector tensorial de la ecuación de Einstein a primer orden (*)

$$\delta G_j^{\text{TT}} = 8\pi G \delta T_j^{\text{TT}}$$

$$(h_{ij}^{\text{TT}})'' + 2\mathcal{H}(h_{ij}^{\text{TT}})' - \nabla^2 h_{ij}^{\text{TT}} = 16\pi G a^2 \sigma_{ij}^{\text{TT}}$$

$$\tilde{h}_{ij}^{\text{TT}}(\eta, \mathbf{k}) = \sum_{A=+, \times} e_{ij}^A(\hat{\mathbf{k}}) \tilde{h}_A(\eta, \mathbf{k}), \quad \tilde{\sigma}_{ij}^{\text{TT}}(\eta, \mathbf{k}) = \sum_{A=+, \times} e_{ij}^A(\hat{\mathbf{k}}) \tilde{\sigma}_A(\eta, \mathbf{k}).$$

$$\tilde{h}_A'' + 2\mathcal{H}\tilde{h}_A' + k^2\tilde{h}_A = 16\pi G a^2 \tilde{\sigma}_A.$$

Ondas gravitatorias cosmológicas

$$\tilde{h}''_A + 2\mathcal{H}\tilde{h}'_A + k^2\tilde{h}_A = 16\pi G a^2 \tilde{\sigma}_A.$$

1) Condiciones iniciales (GW primordiales) $h(\eta, k) = h_{in}(k) \chi(\eta, k)$

$$\chi(\eta, k) \longrightarrow \text{Evolución dinámica} \quad \begin{cases} \chi(\eta_{ini}, k) = 1 \\ \chi'(\eta_{ini}, k) = 0 \end{cases}$$

$$h_{in}(k) \longrightarrow P_h(k) \quad \text{Espectro de potencia primordial depende de las condiciones iniciales, e.g. determinadas por Inflación}$$

2) Efectos de evolución no trivial

$$a(\eta) \longrightarrow \text{background no standard}$$

$$\sigma(\eta, k) \longrightarrow \text{efectos viscosos y free-streaming}$$

3) Inducción o producción tardía de GW

$$\sigma(\eta, k) \left\{ \begin{array}{l} \text{campos escalares durante reheating} \\ \text{transiciones de fase cosmológicas} \\ \text{fluctuaciones térmicas} \\ \text{pert. escalares de segundo orden} \\ \text{pert. tensoriales de segundo orden} \end{array} \right.$$

Espectros primordiales (escalar y tensorial) producidos durante inflación

Cada perturbación tendrá su propio espectro, suelen darse dos muy importantes

Caso escalar: \mathcal{R}

Espectro de potencia adimensional de las perturbaciones de curvatura
(invariante de gauge)

Parametrización usual
slow-roll inflation

$$\mathcal{P}_{\mathcal{R},\text{in}}(k) = A_{\mathcal{R}} \left(\frac{k}{k_*} \right)^{n_s - 1}$$

Caso tensorial: h_{ij}^{TT}

Espectro de potencia adimensional de las perturbaciones espaciales
transversales y sin traza (TT) de la métrica (invariante de gauge)

Parametrización usual
slow-roll inflation

$$\mathcal{P}_{T,\text{in}}(k) = A_T(k_*) \left(\frac{k}{k_*} \right)^{n_T}$$

Tensor-to-scalar ratio

$$r(k) = \frac{\mathcal{P}_{T,\text{in}}(k)}{\mathcal{P}_{\mathcal{R},\text{in}}(k)}.$$

Espectros primordiales (escalar y tensorial) producidos durante inflación

¿Cómo se calculan $\mathcal{P}_{\mathcal{R},\text{in}}(k)$ y $\mathcal{P}_{T,\text{in}}(k)$?

Fluctuaciones cuánticas durante inflación y depende explícitamente del modelo de inflación

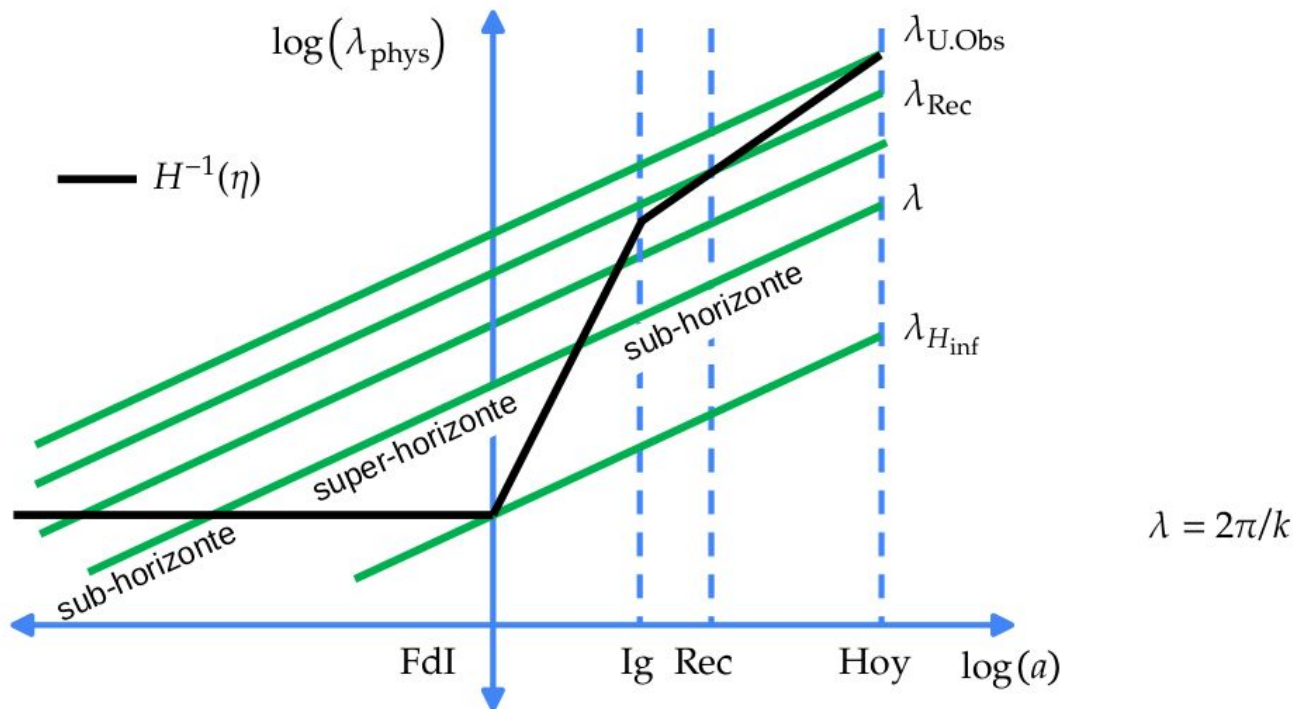
Para los modelos básicos de single field slow-roll inflation

$$P_{\mathcal{R}}(k) = \frac{2\pi}{k^3} \frac{H^2}{m_{\text{Pl}}^2 \epsilon_{\text{sr}}} \Big|_{aH=k} \quad ; \quad P_{\text{T}}(k) = 4P_h(k) = \frac{32\pi}{k^3} \frac{H^2}{m_{\text{Pl}}^2} \Big|_{aH=k} \quad ; \quad r(k) = 16 \epsilon_{\text{sr}} \Big|_{aH=k}.$$

$$\epsilon_{\text{sr}} \equiv \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{H} \right) = -\frac{H'}{aH^2}, \quad \delta_{\text{sr}} \equiv \frac{1}{H} \frac{\ddot{\phi}}{\dot{\phi}}$$

Una característica muy importante es que los modos k tanto de \mathcal{R} como de h se mantienen congelados, constantes, mientras se encuentran fuera del horizonte por la evaluación a la salida del horizonte en inflación.

Modos sub- y super-horizonte y espectros primordiales



Recordemos que el inflatón $\phi = \phi(t)$ y $V = V(\phi(t))$

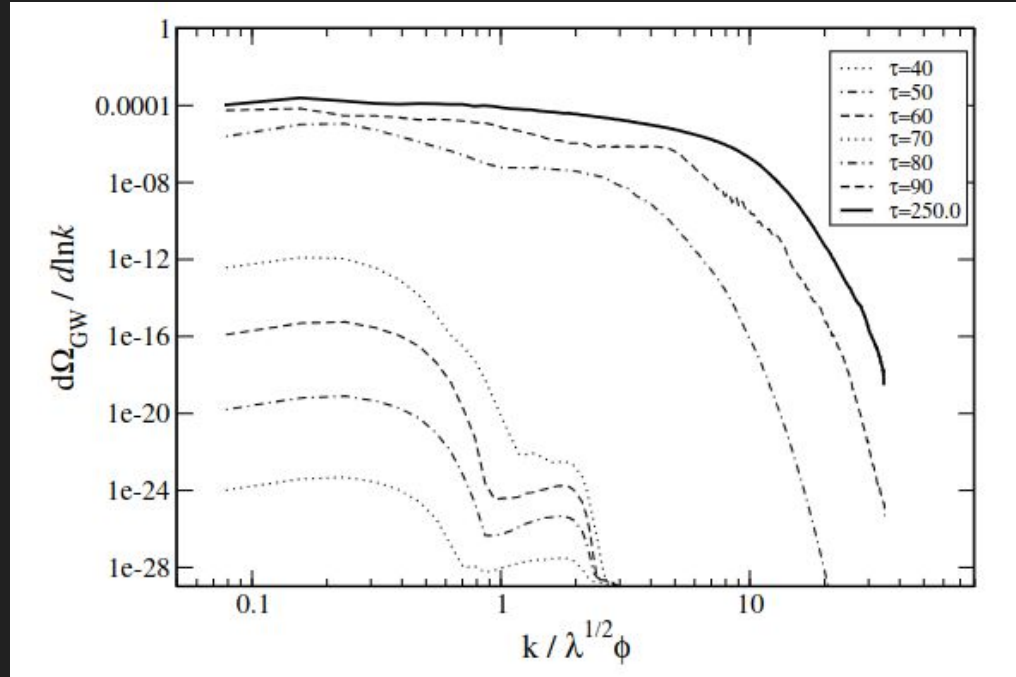
Generación de GW por campos escalares estocásticos

$$\rho_{\text{gw}}(\eta) = \frac{4\pi G}{a^4(\eta)V} \int \frac{d^3k}{(2\pi)^3} \int_{\eta_i}^{\eta_f} d\eta' d\eta'' a(\eta') a(\eta'') \cos[k(\eta' - \eta'')] \\ \times \sum_{ij} \langle \tilde{T}_{ij}^{\text{TT}}(\eta', \mathbf{k}) \tilde{T}_{ij}^{*,\text{TT}}(\eta'', \mathbf{k}) \rangle ,$$

$$T_{ij} = \partial_i \phi \partial_j \phi - g_{ij} \left[\frac{1}{2} g^{\rho\sigma} \partial_\rho \phi \partial_\sigma \phi + V(\phi) \right]$$

$$\tilde{T}_{ij}^{\text{TT}}(\eta, \mathbf{k}) = \Lambda_{ij,kl}(\hat{\mathbf{k}}) \int \frac{d^3p}{(2\pi)^3} p_k p_l \tilde{\phi}(\eta, \mathbf{p}) \tilde{\phi}(\eta, \mathbf{k} - \mathbf{p})$$

Generación de GW por campos escalares estocásticos



Muy eficiente durante la etapa de transición del fin de inflación, las oscilaciones del inflatón alrededor del mínimo de potencial generan producción de partículas por amplificación paramétrica (preheating)

Producción de GW por dinámica de burbujas en transiciones de fase

v_b	Velocidad de la burbuja	β^{-1}	Régimen de colisión
β^{-1}	Duración de la transición	$1/f_* \sim$	
		$v_b \beta^{-1}$	Régimen turbulento

$$\Omega_{\text{gw}} \sim \kappa^2 \left(\frac{H_*}{\beta} \right)^2 \Omega_R$$

Modelado efectivo
del estado de
materia

$$T_{\text{tot}}^{\mu\nu} = T_{\text{field}}^{\mu\nu} + T_{\text{fluid}}^{\mu\nu}$$

$$\begin{aligned} \partial_\mu T_{\text{field}}^{\mu\nu} &= \delta^\nu, \\ \partial_\mu T_{\text{fluid}}^{\mu\nu} &= -\delta^\nu, \end{aligned}$$

$$T_{\text{field}}^{\mu\nu} = \partial^\mu \phi \partial^\nu \phi - \frac{1}{2} \eta^{\mu\nu} (\partial\phi)^2$$

$$\delta^\nu = \eta u^\mu \partial_\mu \phi \partial^\nu \phi$$

SGWB, PTAs y SMBHBs

- Los PTAs son sensibles a ondas gravitacionales cuya frecuencia es mayor que la inversa del intervalo de tiempo T de observación, $f > \sim 1/T$
- Como $T \sim 10$ yr entonces $f \sim 1$ nHz, modulaciones más lentas son absorbidas como variaciones seculares en los parámetros del pulsar. Por otro lado $f < f_{\text{sampling}} \sim 1 / \text{semana} \sim 1$ microHz
- Alrededor de los nHz se espera que el fondo estocástico de GW esté dominado por un origen astrofísico, las binarias de agujeros negros supermasivos.

SMBHBs

Suma sobre fuentes cosmológicas

$$h_c^2(f) = \frac{4G}{\pi c^2 f^2} \int_0^\infty \frac{dz}{1+z} \int d\xi \frac{dn(z; \xi)}{d\xi} \left(\frac{dE_{\text{gw}}^{(r)}(f_r; \xi)}{d \log f_r} \right) \Big|_{f_r=(1+z)f}$$

Régimen dominado por GW (recordar “last-parsec problem”: fricción dinámica, interacción de 3 cuerpos?, luego régimen GW)

$$\frac{dE_{\text{gw}}^{(r)}}{d \log f_r} = \frac{1}{3G} (GM_c)^{5/3} (\pi f_r)^{2/3}$$

$$h_c^2(f) = \frac{4G^{5/3}}{3c^2 \pi^{1/3}} f^{-4/3} \int_0^\infty \frac{dz}{(1+z)^{1/3}} \int_0^\infty dM_c M_c^{5/3} \frac{dn(z; M_c)}{dM_c}$$

SGWB y PTAs

El intervalo de tiempo en el que los pulsos son medidos por el observador en la Tierra es igual al período de rotación del púlsar más un término adicional inducido por la onda gravitacional.

$$t'_{\text{obs}} - t_{\text{obs}} = T_a + \Delta T_a$$

$$z_a(t) = -(\Delta\nu_a/\nu_a)(t) = \Delta T_a/T_a$$

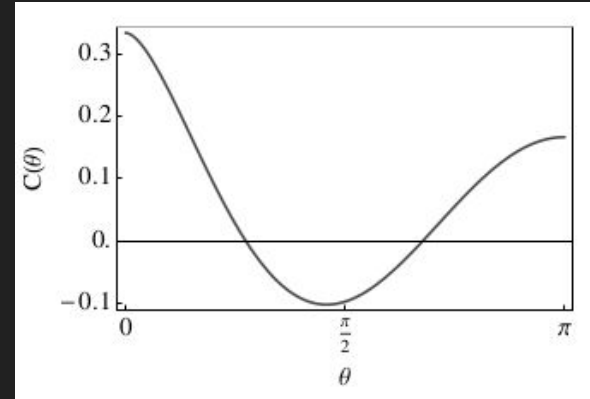
$$z_a(t) = \frac{n_a^i n_a^j}{2(1 + \hat{\mathbf{n}} \cdot \hat{\mathbf{n}}_a)} [h_{ij}^{\text{TT}}(t, \mathbf{x} = 0) - h_{ij}^{\text{TT}}(t - \tau_a, \mathbf{x}_a)]$$

Respuesta de los PTAs al SGWB

$$\langle z_a(t) z_b(t) \rangle = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} df S_h(f) \int \frac{d^2 \hat{\mathbf{n}}}{4\pi} \sum_{A=+, \times} F_a^A(\hat{\mathbf{n}}) F_b^A(\hat{\mathbf{n}})$$

$$F_a^A(\hat{\mathbf{n}}) = \frac{n_a^i n_a^j e_{ij}^A(\hat{\mathbf{n}})}{2(1 + \hat{\mathbf{n}} \cdot \hat{\mathbf{n}}_a)}$$

$$\langle z_a(t) z_b(t) \rangle = C(\theta_{ab}) \int_0^{\infty} df S_h(f)$$



Señal de ondas gravitatorias a partir de correlaciones

Para extraer la señal de GW se utiliza la variables R_a , los residuos temporales del púlsar a medidos con respecto a un tiempo de referencia $t=0$.

$$R_a(t) = \int_0^t dt' z_a(t')$$

$$s_a(t) = R_a(t) + n_a(t)$$

$$\begin{aligned} \langle s_a(t)s_b(t) \rangle &= \langle R_a(t)R_b(t) \rangle + \langle R_a(t)n_b(t) \rangle \\ &\quad + \langle n_a(t)R_b(t) \rangle + \langle n_a(t)n_b(t) \rangle \end{aligned}$$

$$\langle s_a(t)s_b(t) \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T dt s_a(t)s_b(t)$$

12-2023

Where are NANOGrav's big black holes?

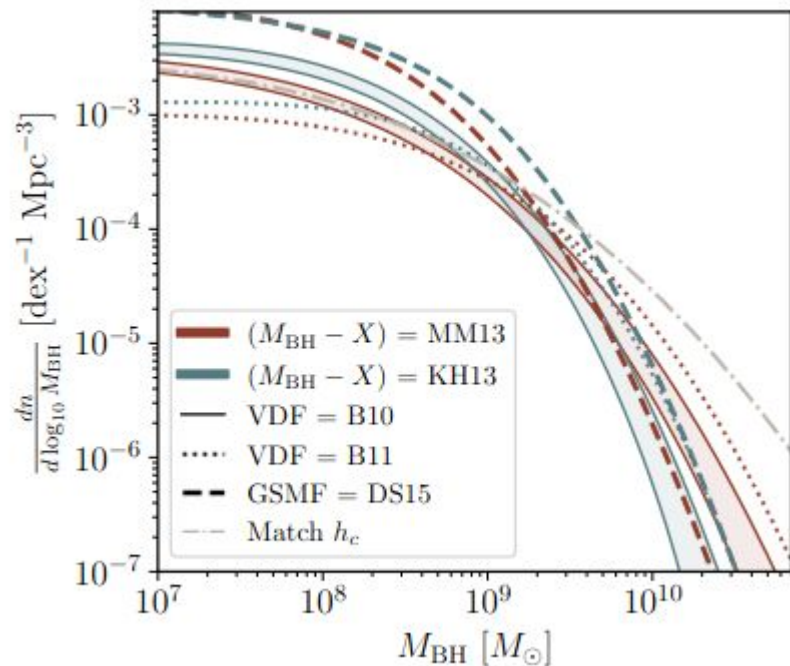
Gabriela Sato-Polito,^{1,*} Matias Zaldarriaga,¹ and Eliot Quataert²

FIG. 1. SMBH mass function computed from a combination of VDFs and GSMF with local scaling relations reported in the literature. The VDFs correspond to Refs. [35] and [36] (B10 and B11, respectively), the GSMF is given in [37] (DS15), while the adopted scaling relations are presented in Refs. [11] and [12] (KH13 and MM13, respectively). For the sake of visual clarity, we have omitted the error bands of most SMBH mass functions in the plot, and show only for the B10 VDF result since it corresponds to our fiducial choice. The grey dashdotted line shows an example of a SMBH mass function that matches the characteristic strain observed by PTAs, computed by increasing the intrinsic scatter to $\epsilon_0 = 0.62$.

12-2023

Where are NANOGrav's big black holes?

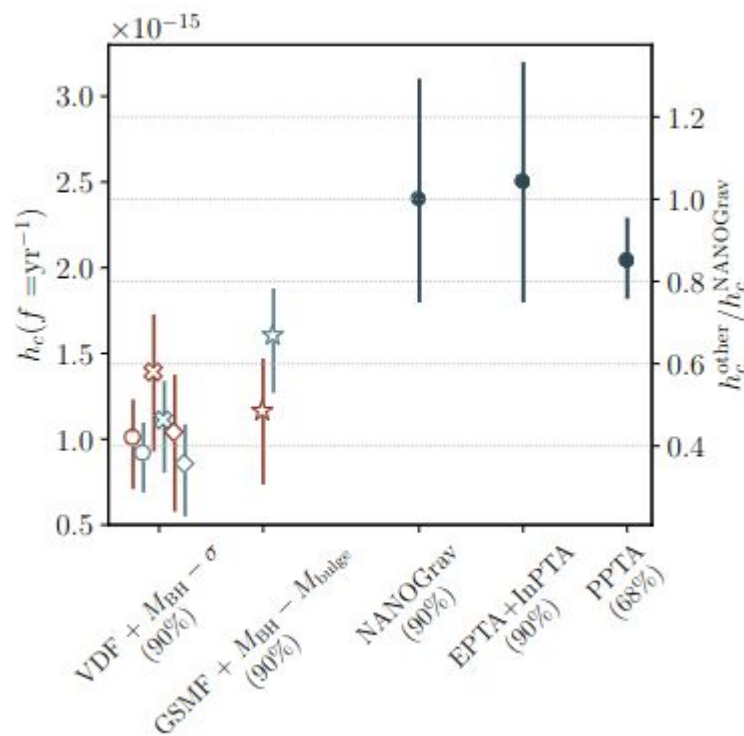
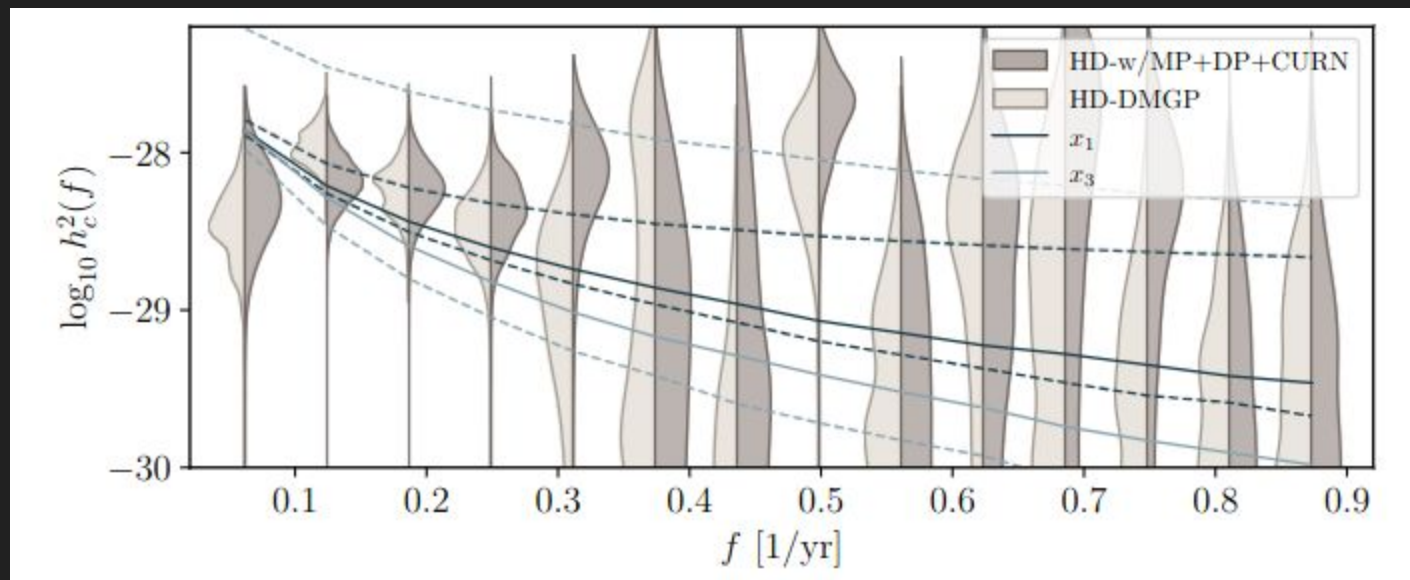
Gabriela Sato-Polito,^{1,*} Matias Zaldarriaga,¹ and Eliot Quataert²

FIG. 4. Comparison between the characteristic strain predicted using galaxy scaling relations and galaxy catalogs (open symbols), and the values reported by PTA collaborations (filled dots). The left vertical axis shows the characteristic strain value at the reference frequency of $f = \text{yr}^{-1}$ for a fixed power law of $\gamma = 13/3$, while the right vertical axis shows the ratio with respect to the NANOGrav measurement. The discrepancy between the predicted and the three measured values ranges from $2\text{--}4.5\sigma$. Red open symbols correspond to the scaling relations from MM13, while blue open symbols correspond to KH13. The open circles, crosses, and diamonds use the VDF from B10, B11, and T20, respectively, while the open stars were computed using the GSMF from DS15.

The distribution of the gravitational-wave background from supermassive black holes

06-2024

Gabriela Sato-Polito^{1,*} and Matias Zaldarriaga¹



The distribution of the gravitational-wave background from supermassive black holes

06-2024

Gabriela Sato-Polito^{1,*} and Matias Zaldarriaga¹

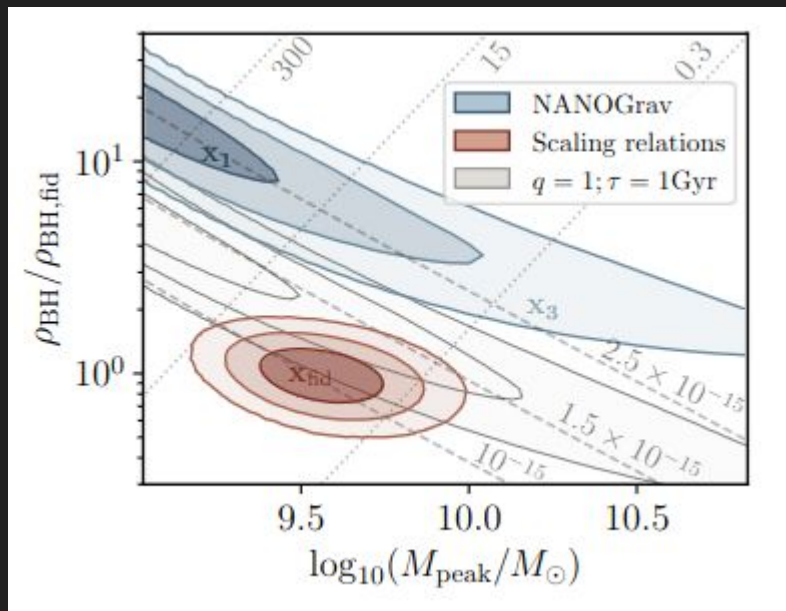


FIG. 5. Posterior distributions for the peak mass contributing to the SGWB M_{peak} and the black hole mass density ρ_{BH} relative to its fiducial value of $\rho_{\text{BH,fd}} = 4.5 \times 10^5 M_{\odot} \text{Mpc}^{-3}$. The NANOGrav results using the 15 yr Hellings-Downs correlated free spectrum, with a monopole- and dipole-correlated red noise, and common uncorrelated red noise (HD-w/MP+DP+CURN) modelled simultaneously are shown in blue, while the red contours show the values inferred from the present-day black hole mass function. The three contours show the 1-, 2-, and 3- σ regions. The grey contour corresponds to an upper limit scenario, in which all black holes are assumed to merge multiple times with equal mass partners. Results in both grey and blue make the optimistic assumption of neglecting accretion, which would only diminish the GW signal. The dashed grey lines show lines of constant characteristic strain, while the dotted lines correspond to constant characteristic number of sources.

Bibliografía

- N. Christensen, “Stochastic Gravitational Wave Backgrounds”
<https://arxiv.org/pdf/1811.08797>
- M. Maggiore, “Gravitational Waves: Volume 2: Astrophysics and Cosmology”
(Oxford, 2018)
- <https://arxiv.org/pdf/2312.06756>
- <https://arxiv.org/pdf/2406.17010>