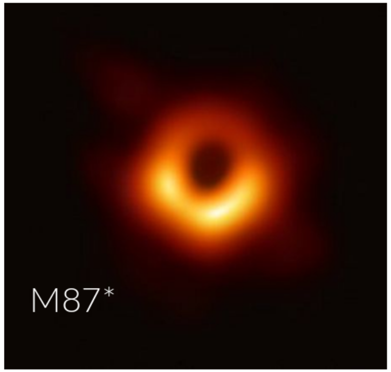
Gravitational wave astronomy today

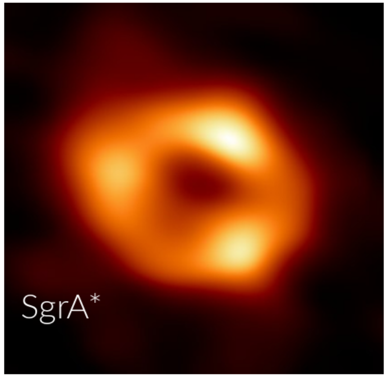
Eric Chassande-Mottin

AstroParticule et Cosmologie (APC)
CNRS Université Paris Cité

LIGO VIRGO KAGRA

Prelude on black holes



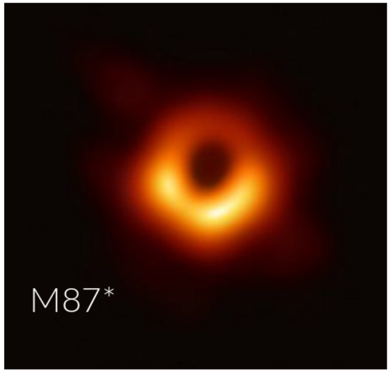


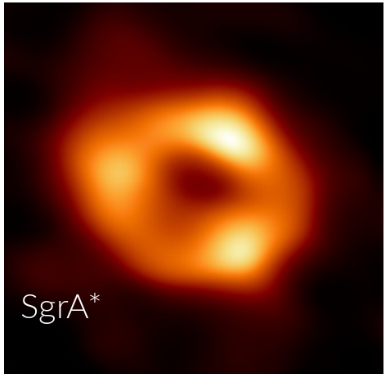
Event Horizon Telescope observes supermassive black holes

$M \sim 10^6 - 10^9\ M_{sun}$

Thank you Shiro!

Prelude on black holes



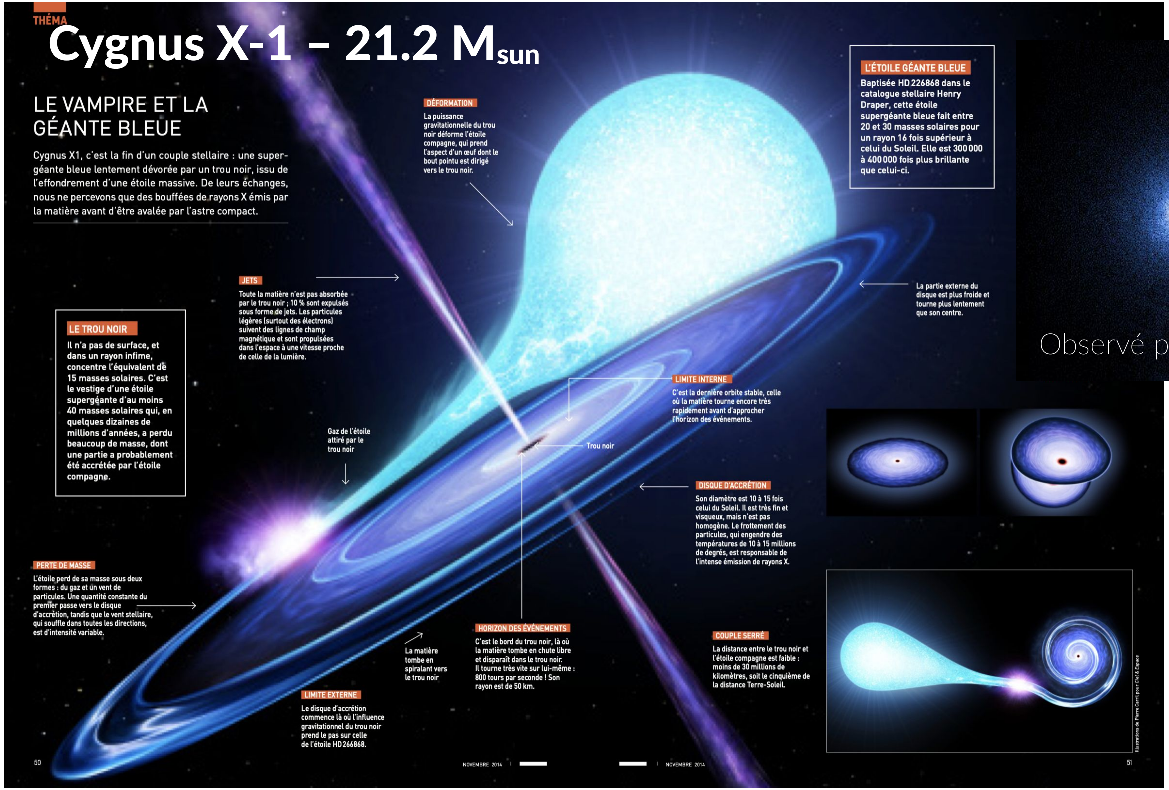


Event Horizon Telescope observes supermassive black holes

$M \sim 10^6 - 10^9 \, M_{sun}$

Muse - Supermassive Black Hole Link to Youtube

Prelude on black holes



THÉMA

Cygnus X-1 – 21.2 M_{sun}

LE VAMPIRE ET LA GÉANTE BLEUE

Cygnus X1, c'est la fin d'un couple stellaire : une supergéante bleue lentement dévorée par un trou noir, issu de l'effondrement d'une étoile massive. De leurs échanges, nous ne percevons que des bouffées de rayons X émis par la matière avant d'être avalée par l'astre compact.

LE TROU NOIR
Il n'a pas de surface, et dans un rayon infime, concentre l'équivalent de 15 masses solaires. C'est le vestige d'une étoile supergéante d'au moins 40 masses solaires qui, en quelques dizaines de millions d'années, a perdu beaucoup de masse, dont une partie a probablement été accrétée par l'étoile compagne.

DÉFORMATION
La puissance gravitationnelle du trou noir déforme l'étoile compagne, qui prend l'aspect d'un œuf dont le bout pointu est dirigé vers le trou noir.

JETS
Toute la matière n'est pas absorbée par le trou noir ; 10 % sont expulsés sous forme de jets. Les particules légères (surtout des électrons) suivent des lignes de champ magnétique et sont propulsées dans l'espace à une vitesse proche de celle de la lumière.

Gaz de l'étoile attiré par le trou noir

L'ÉTOILE GÉANTE BLEUE
Baptisée HD 226868 dans le catalogue stellaire Henry Draper, cette étoile supergéante bleue fait entre 20 et 30 masses solaires pour un rayon 16 fois supérieur à celui du Soleil. Elle est 300 000 à 400 000 fois plus brillante que celui-ci.

La partie externe du disque est plus froide et tourne plus lentement que son centre.

LIMITE INTERNE
C'est la dernière orbite stable, celle où la matière tourne encore très rapidement avant d'approcher l'horizon des événements.

Trou noir

DISQUE D'ACCRÉTION
Son diamètre est 10 à 15 fois celui du Soleil. Il est très fin et visqueux, mais n'est pas homogène. Le frottement des particules, qui engendre des températures de 10 à 15 millions de degrés, est responsable de l'intense émission de rayons X.

PERTE DE MASSE
L'étoile perd de sa masse sous deux formes : du gaz et un vent de particules. Une quantité constante du premier passe vers le disque d'accrétion, tandis que le vent stellaire, qui souffle dans toutes les directions, est d'intensité variable.

La matière tombe en spiralant vers le trou noir

HORIZON DES ÉVÉNEMENTS
C'est le bord du trou noir, là où la matière tombe en chute libre et disparaît dans le trou noir. Il tourne très vite sur lui-même : 800 tours par seconde ! Son rayon est de 50 km.

LIMITE EXTERNE
Le disque d'accrétion commence là où l'influence gravitationnel du trou noir prend le pas sur celle de l'étoile HD 266868.

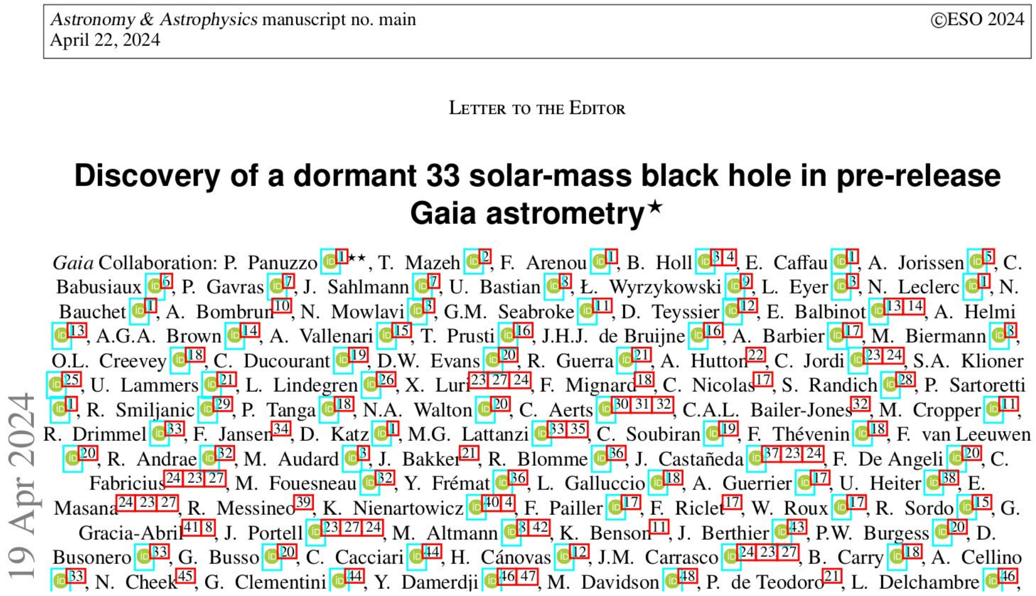
COUPLE SERRÉ
La distance entre le trou noir et l'étoile compagne est faible : moins de 30 millions de kilomètres, soit le cinquième de la distance Terre-Soleil.

Illustrations de Pierre Carril pour *Ciel & Espace*

50 NOVEMBRE 2014 | | NOVEMBRE 2014 51

Prelude on black holes

Gaia BH 3 – 32.7 M_{sun}



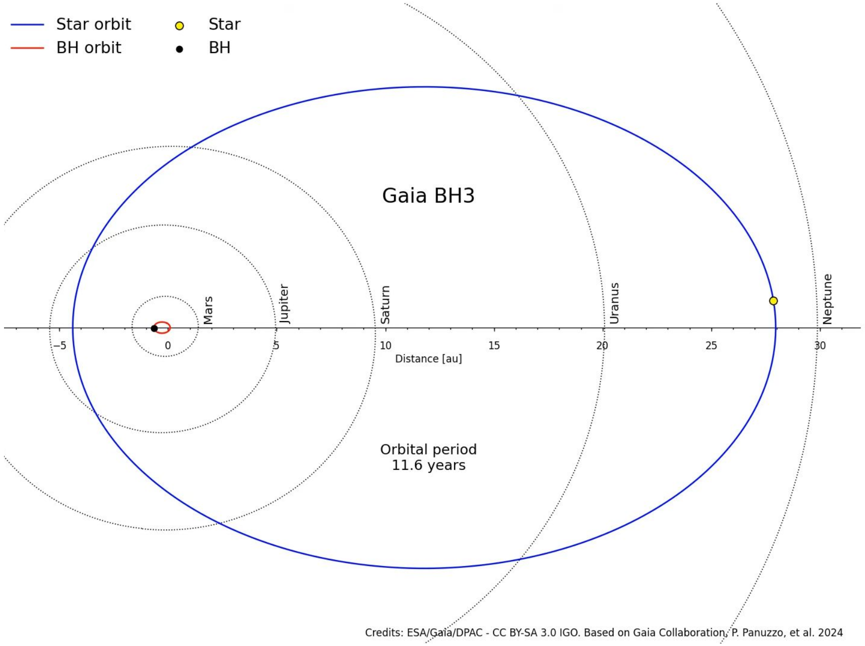
Astronomy & Astrophysics manuscript no. main ©ESO 2024
April 22, 2024

Letter to the Editor

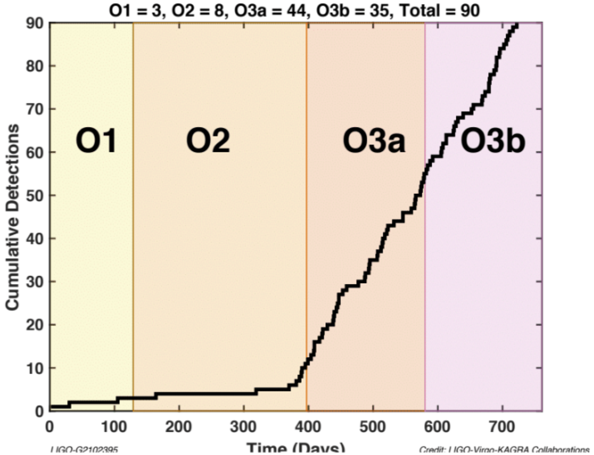
Discovery of a dormant 33 solar-mass black hole in pre-release Gaia astrometry★

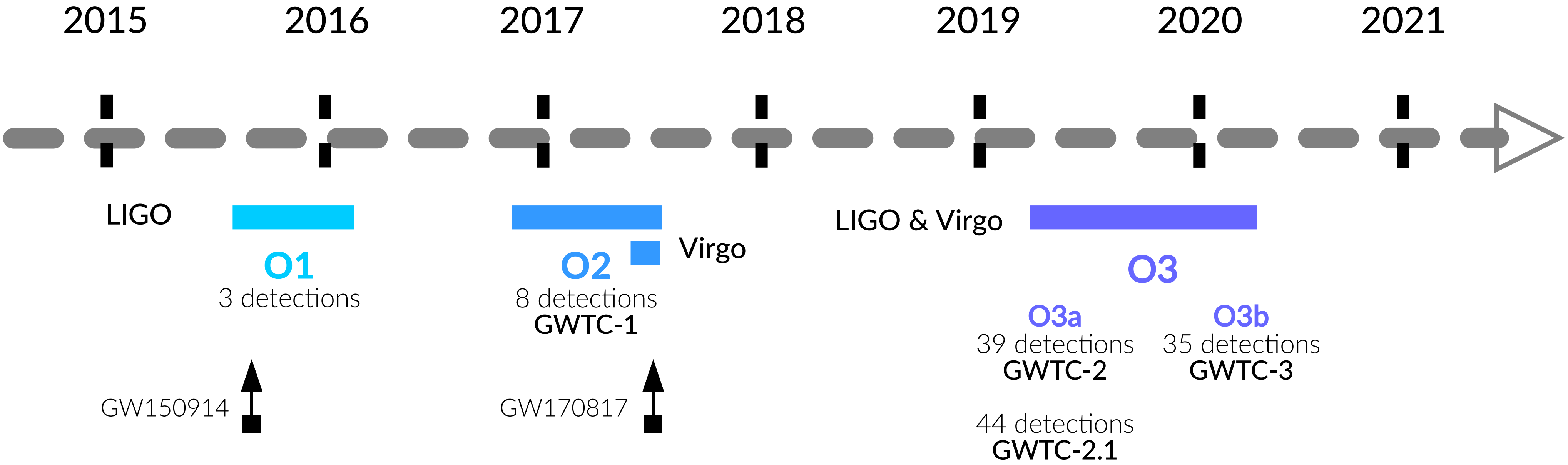
Gaia Collaboration: P. Panuzzo[1]★★, T. Mazeh[2], F. Arenou[1], B. Holl[3,4], E. Caffau[1], A. Jorissen[5], C. Babusiaux[6], P. Gavras[7], J. Sahlmann[7], U. Bastian[8], Ł. Wyrzykowski[9], L. Eyer[3], N. Leclerc[1], N. Bauchet[1], A. Bombrun[10], N. Mowlavi[3], G.M. Seabroke[11], D. Teyssier[12], E. Balbinot[13,14], A. Helmi[13], A.G.A. Brown[14], A. Vallenari[15], T. Prusti[16], J.H.J. de Bruijne[16], A. Barbier[17], M. Biermann[8], O.L. Creevey[18], C. Ducourant[19], D.W. Evans[20], R. Guerra[21], A. Hutton[22], C. Jordi[23,24], S.A. Klioner[25], U. Lammers[21], L. Lindegren[26], X. Luri[23,27,24], F. Mignard[18], C. Nicolas[17], S. Randich[28], P. Sartoretti[1], R. Smiljanic[29], P. Tanga[18], N.A. Walton[20], C. Aerts[30,31,32], C.A.L. Bailer-Jones[32], M. Cropper[11], R. Drimmel[33], F. Jansen[34], D. Katz[1], M.G. Lattanzi[33,35], C. Soubiran[19], F. Thévenin[18], F. van Leeuwen[20], R. Andrae[32], M. Audard[3], J. Bakker[21], R. Blomme[36], J. Castañeda[37,23,24], F. De Angeli[20], C. Fabricius[24,23,27], M. Fouesneau[32], Y. Frémat[36], L. Galluccio[18], A. Guerrier[17], U. Heiter[38], E. Masana[24,23,27], R. Messineo[39], K. Nienartowicz[40,4], F. Pailler[17], F. Riclet[17], W. Roux[17], R. Sordo[15], G. Gracia-Abril[41,8], J. Portell[23,27,24], M. Altmann[8,42], K. Benson[11], J. Berthier[43], P.W. Burgess[20], D. Busonero[33], G. Busso[20], C. Cacciari[44], H. Cánovas[12], J.M. Carrasco[24,23,27], B. Carry[18], A. Cellino[33], N. Cheek[45], G. Clementini[44], Y. Damerdji[46,47], M. Davidson[48], P. de Teodoro[21], L. Delchambre[46],

19 Apr 2024

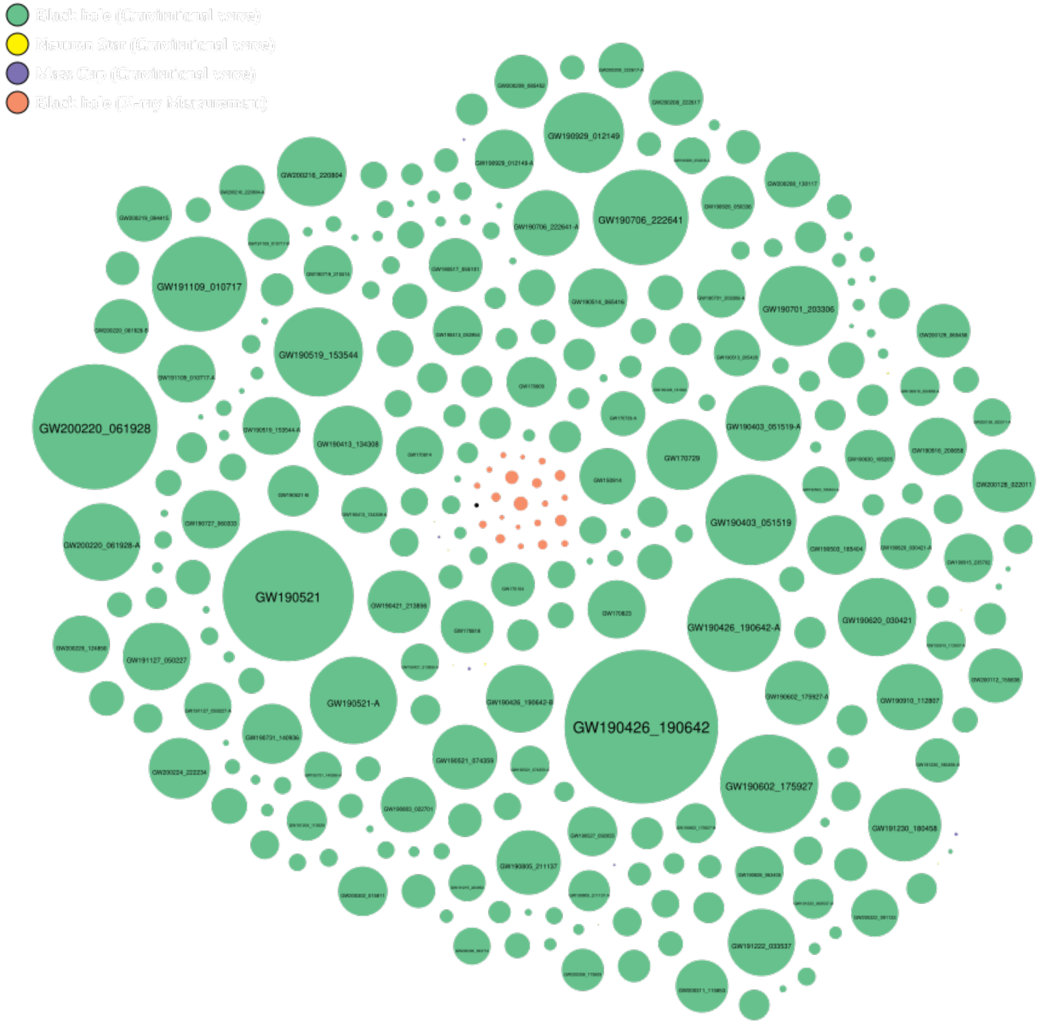


https://arxiv.org/abs/2404.10486


O1 = 3, O2 = 8, O3a = 44, O3b = 35, Total = 90
Cumulative Detections
Time (Days)
O1
O2
O3a
O3b
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
0
100
200
300
400
500
600
700
LIGO-G2102395
Credit: LIGO-Virgo-KAGRA Collaborations


2015
2016
2017
2018
2019
2020
2021
LIGO
O1
3 detections
GW150914
O2
8 detections
GWTC-1
Virgo
GW170817
LIGO & Virgo
O3
O3a
39 detections
GWTC-2
O3b
35 detections
GWTC-3
44 detections
GWTC-2.1

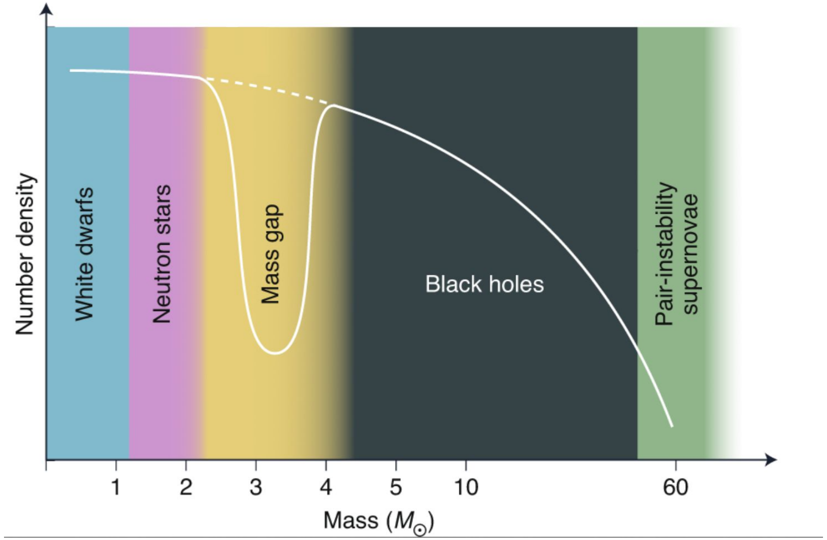
https://catalog.cardiffgravity.org/bhbubble



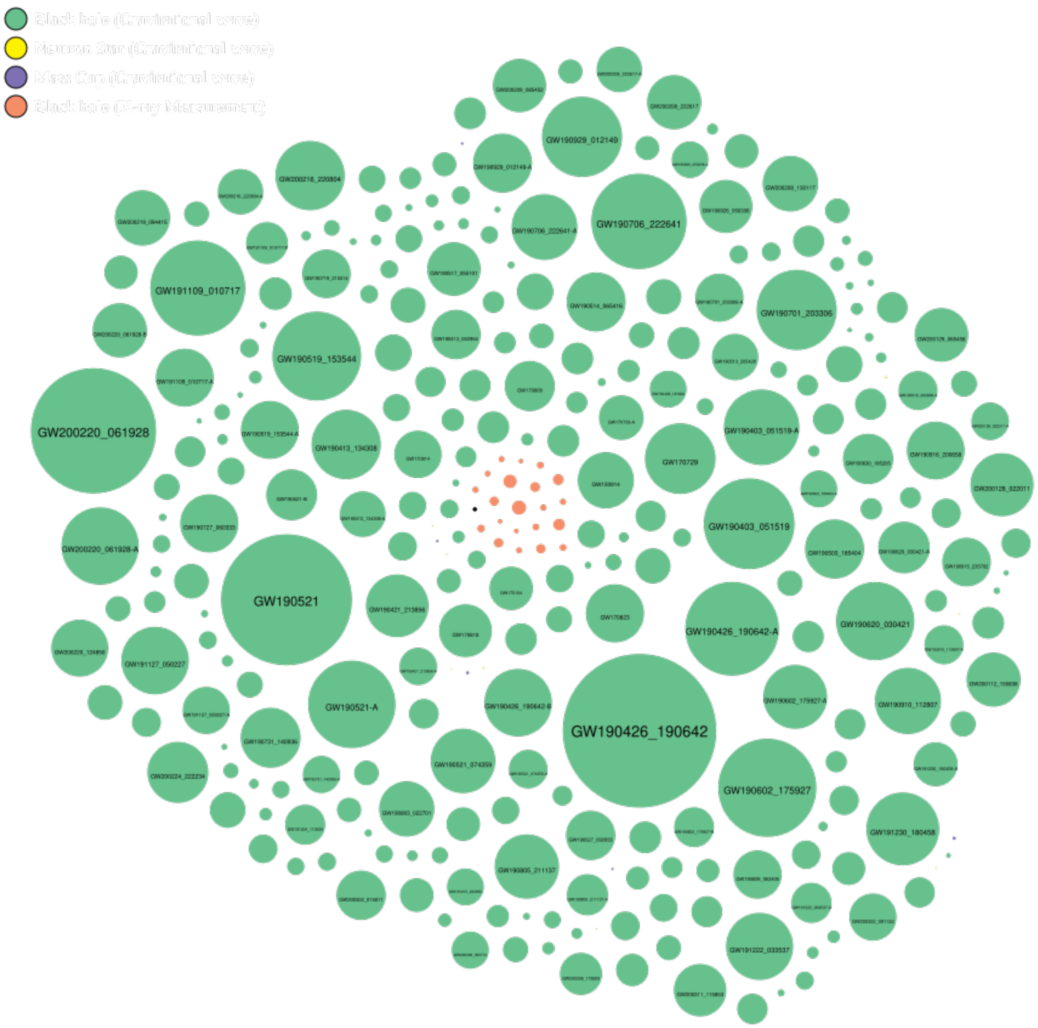
How abundant are stellar mass black holes in the Universe?

How their mass is distributed?

How do black holes form?



https://catalog.cardiffgravity.org/bhbubble

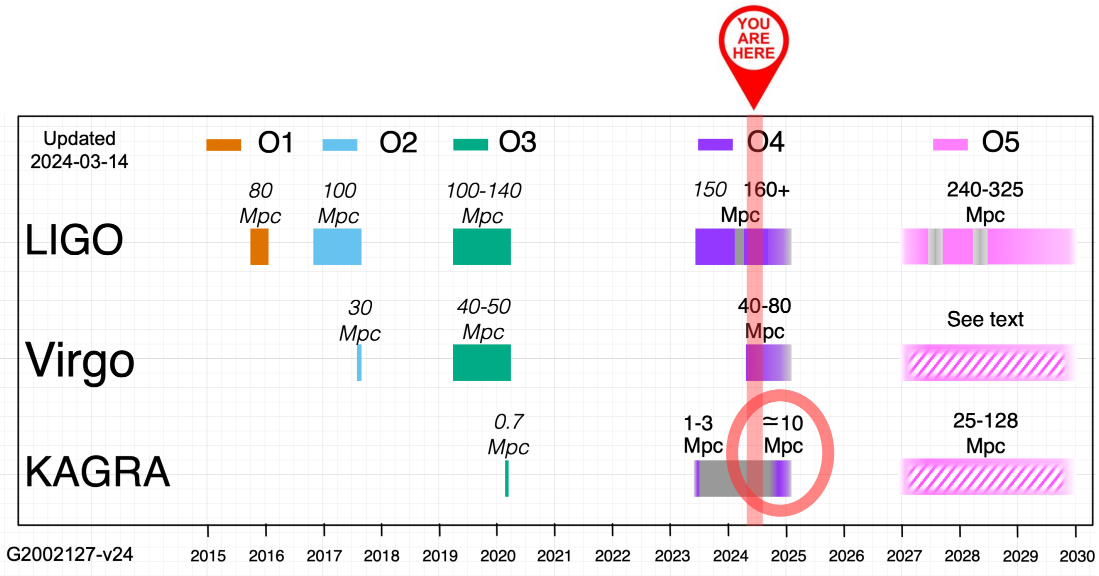


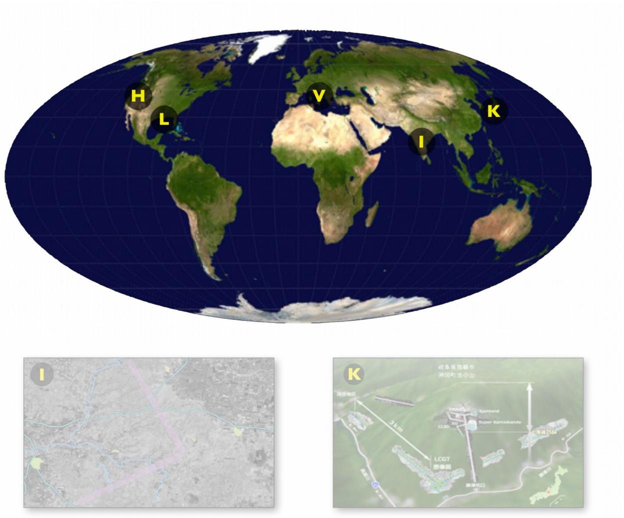
Muse - Starlight Link to Youtube

Chorus

“Our hopes and expectations
Black holes and revelations”

Science run O4

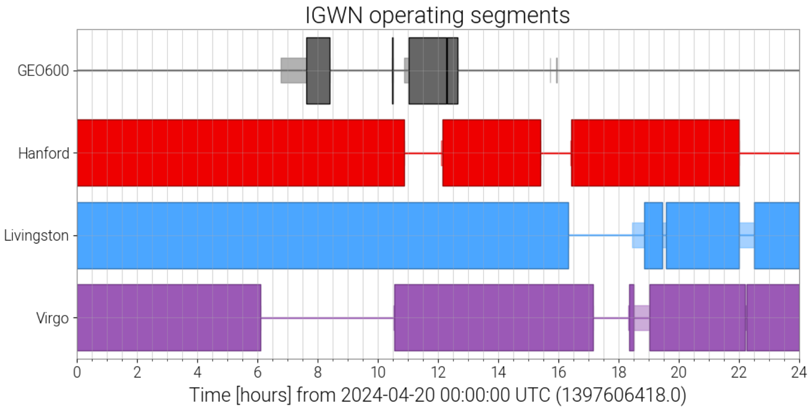


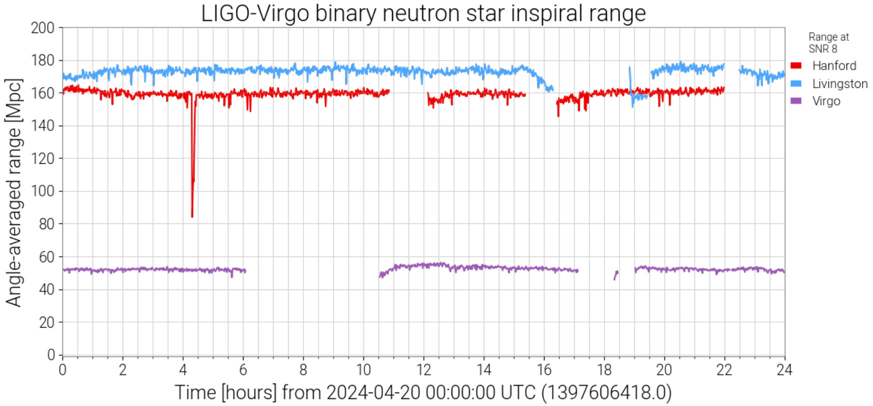


Update:

O4b will end on Jun 9 2025
O5 expected to start in Jun 2027

https://gwosc.org/detector_status

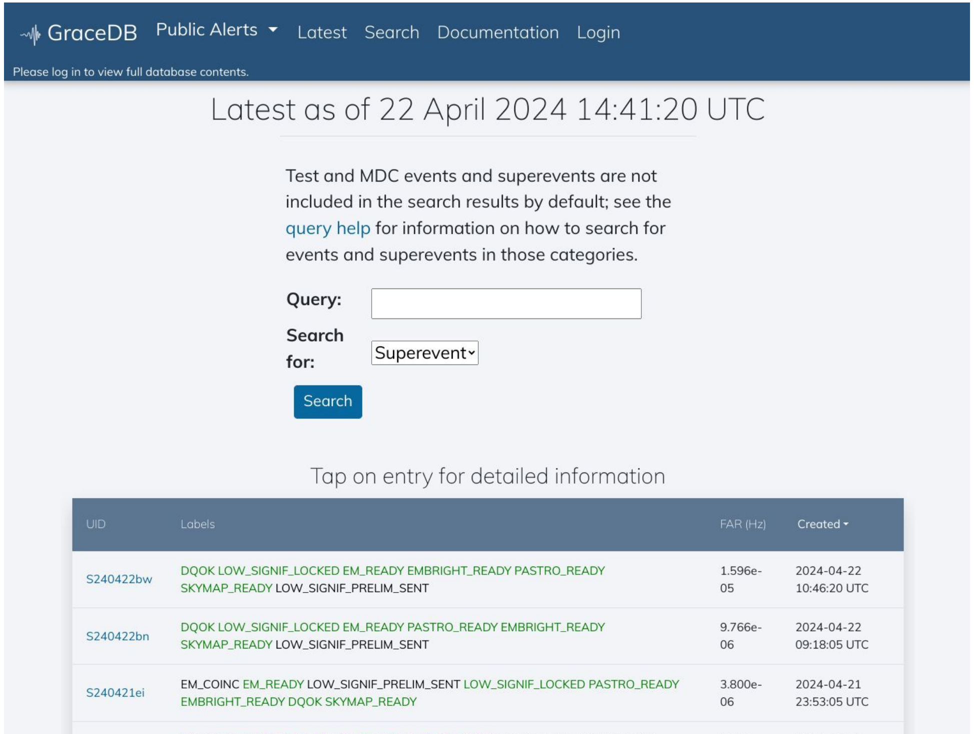




Good duty cycle > 80 %

Stable range ~ 55 Mpc

https://gracedb.ligo.org



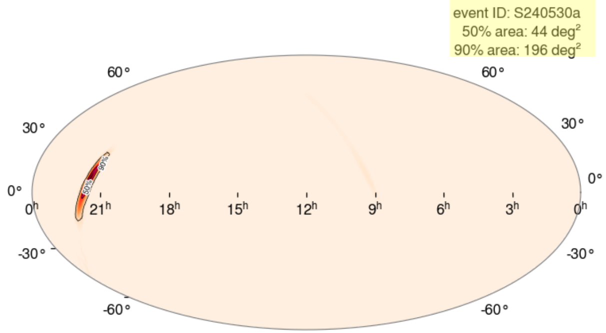
First preliminary alert with 20 to 60 sec latency

Significant detection candidates : 105
→ 3 significant alerts/week of operation

Low Significance Detection Candidates: ~2000

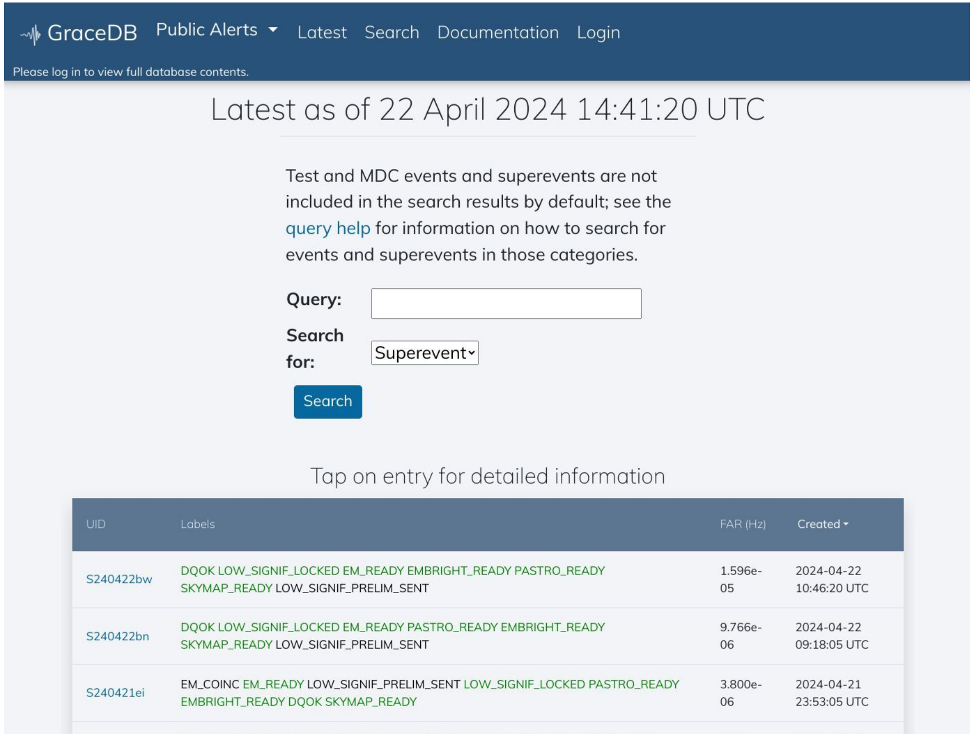
O4b: Virgo data used for localization

Example : SNR > 2.5 for V1



https://gracedb.ligo.org/superevents/S240530a/view/

https://gracedb.ligo.org



GraceDB Public Alerts Latest Search Documentation Login

Please log in to view full database contents.

Latest as of 22 April 2024 14:41:20 UTC

Test and MDC events and superevents are not included in the search results by default; see the query help for information on how to search for events and superevents in those categories.

Query:

Search for: Superevent

Search

Tap on entry for detailed information

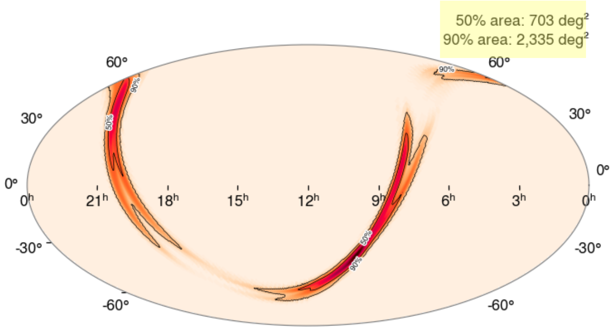
UID	Labels	FAR (Hz)	Created
S240422bw	DQOK LOW_SIGNIF_LOCKED EM_READY EMBRIGHT_READY PASTRO_READY SKYMAP_READY LOW_SIGNIF_PRELIM_SENT	1.596e-05	2024-04-22 10:46:20 UTC
S240422bn	DQOK LOW_SIGNIF_LOCKED EM_READY PASTRO_READY EMBRIGHT_READY SKYMAP_READY LOW_SIGNIF_PRELIM_SENT	9.766e-06	2024-04-22 09:18:05 UTC
S240421ei	EM_COINC EM_READY LOW_SIGNIF_PRELIM_SENT LOW_SIGNIF_LOCKED PASTRO_READY EMBRIGHT_READY DQOK SKYMAP_READY	3.800e-06	2024-04-21 23:53:05 UTC

First preliminary alert with 20 to 60 sec latency

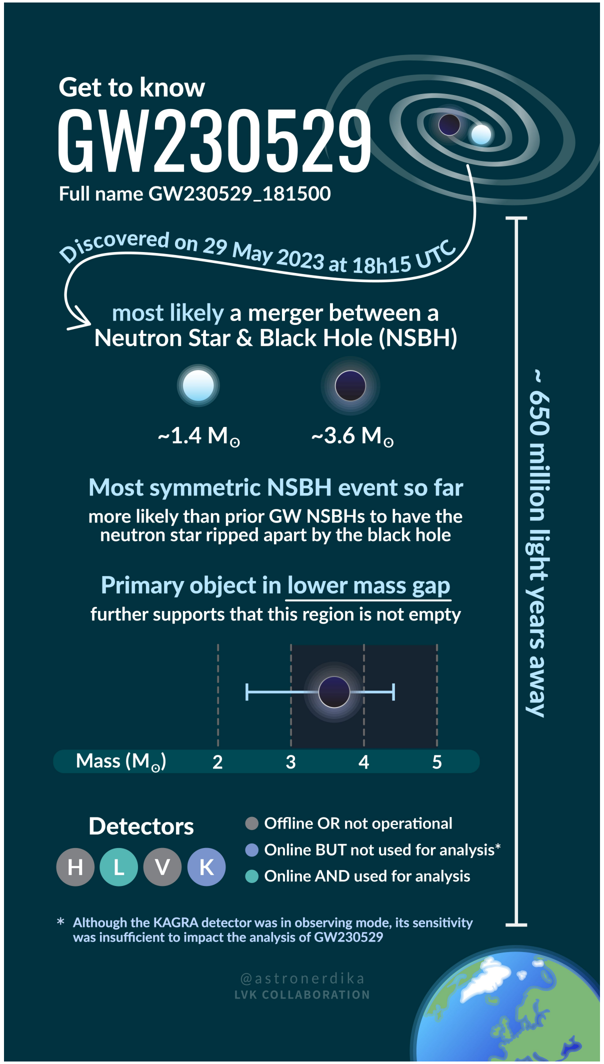
Significant detection candidates : 105
→ 3 significant alerts/week of operation

Low Significance Detection Candidates: ~2000

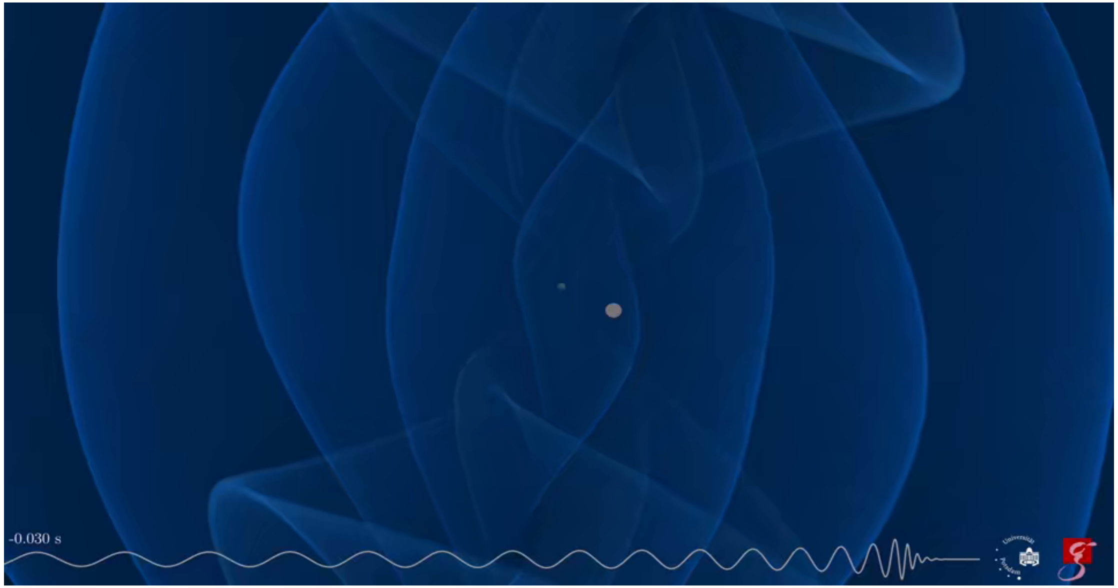
To be compared with an H1 L1 event



https://gracedb.ligo.org/superevents/S231206ca/view/

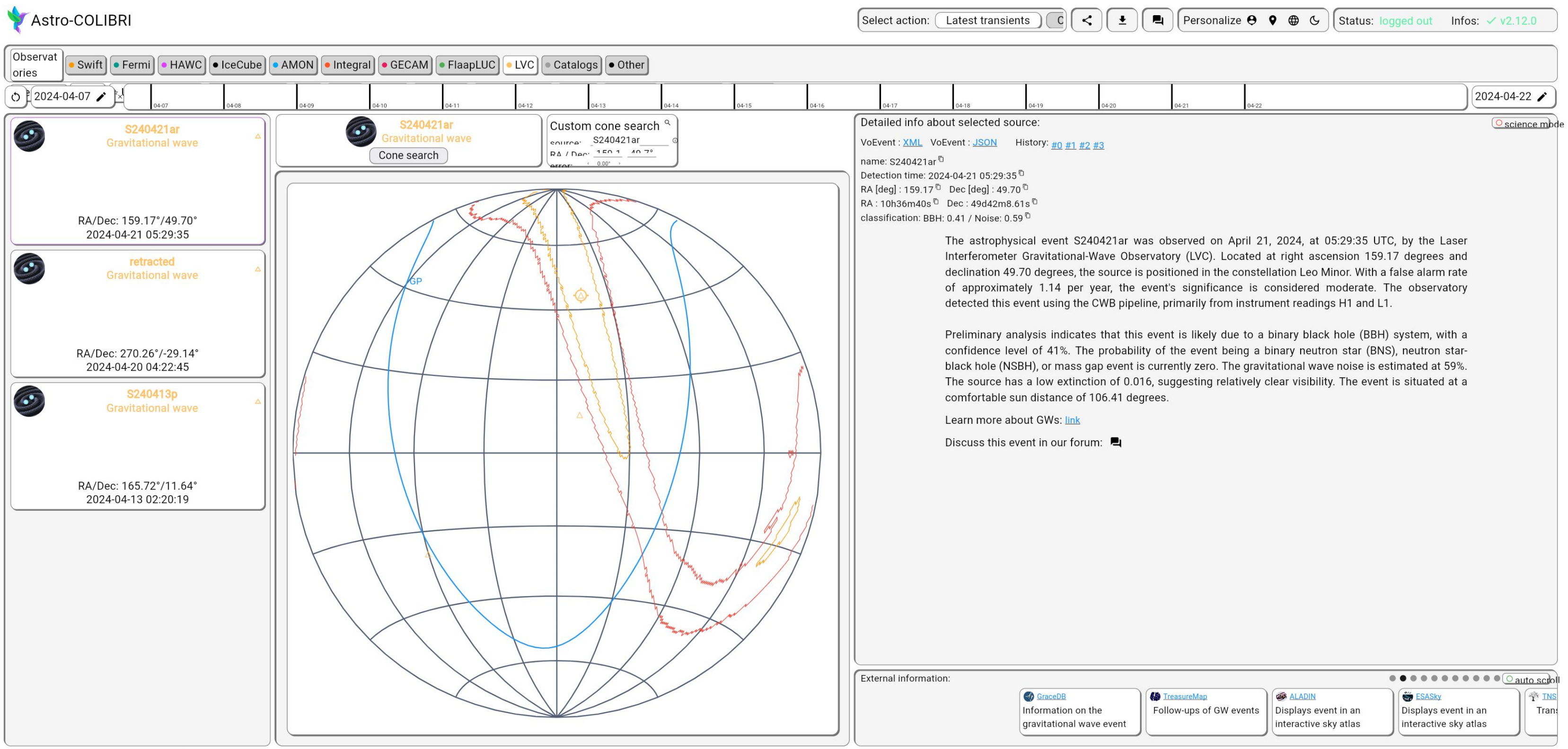


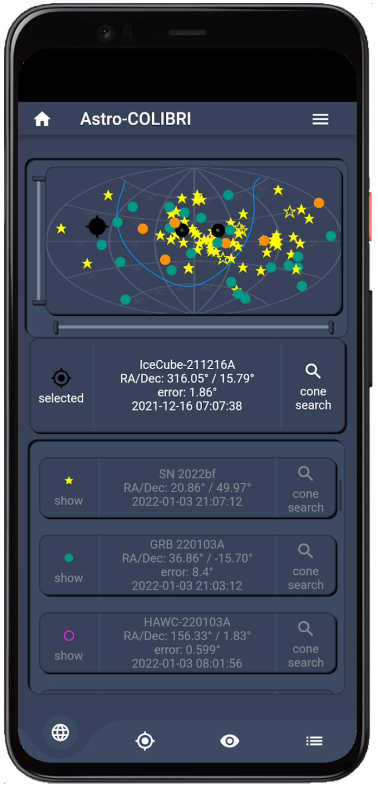
GW230529



Credits: I. Markin (Potsdam University), T. Dietrich (Potsdam University and Max Planck Institute for Gravitational Physics), H. Pfeiffer, A. Buonanno (Max Planck Institute for Gravitational Physics)

astro-colibri





Conclusions (1)

One more year of O4 till June 2025

- LIGO L1 = 180 Mpc, LIGO H1 = 160 Mpc, Virgo = 55 Mpc
- 200 more detector sources eventually ?
- Mostly BBH (but not only)
- Much better view of the BH mass distribution
- 4-detector data with LVK end of the year?
- First signs of precessing binaries (next slide)

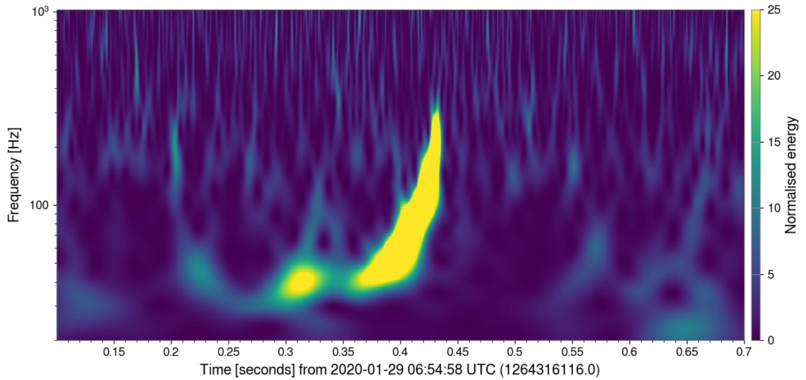
Conclusions (2)

Precession

GW200129 -- link

Hannam et al, General-relativistic precession in a black-hole binary, *Nature* 610 (2022) 7933, 652-655
https://arxiv.org/abs/2112.11300

"Here we report the measurement of strong-field precession in the LIGO–Virgo–Kagra gravitational-wave signal GW200129. The binary's orbit **precesses at a rate ten orders of magnitude faster than previous weak-field measurements** from binary pulsars. We also find that the primary black hole is probably highly spinning."



Primary mass, m_1 ($M_\odot$)	39^{+6}_{-7}
Secondary mass, m_2 ($M_\odot$)	22^{+8}_{-4}
Total mass, $M = m_1 + m_2$ ($M_\odot$)	62^{+3}_{-3}
Mass ratio, $q = m_2/m_1$	$0.6^{+0.4}_{-0.2}$
Primary spin, a_1/m_1	$0.9^{+0.1}_{-0.5}$
Primary spin tilt angle, θ_{LS_1} (rad)	$1.4^{+0.4}_{-0.5}$
Secondary spin, a_2/m_2	(undetermined)
Binary inclination, θ_{JN} (rad)	$0.5^{+0.3}_{-0.3}$
Luminosity distance, D_L (Mpc)	1000^{+200}_{-200}
Redshift, z	$0.21^{+0.03}_{-0.04}$

Table 1 Properties of the binary-black-hole source of GW200129. Source parameter measurements from our analysis of GW200129, with uncertainties at the 90% credible interval. The posterior distributions for both the secondary spin magnitude and tilt angle θ_{LS_2} are essentially flat, and for this reason we have indicated the secondary spin as "undetermined". This is expected for a signal of GW200129's strength, as explained in the main text. A naive application of our 90% credible-interval calculation gives $a_2/m_2 \in [0.05, 0.95]$ and $\cos(\theta_{LS_2}) \in [-0.93, 0.85]$, i.e., an arbitrary 90% stretch of the range of possible values.