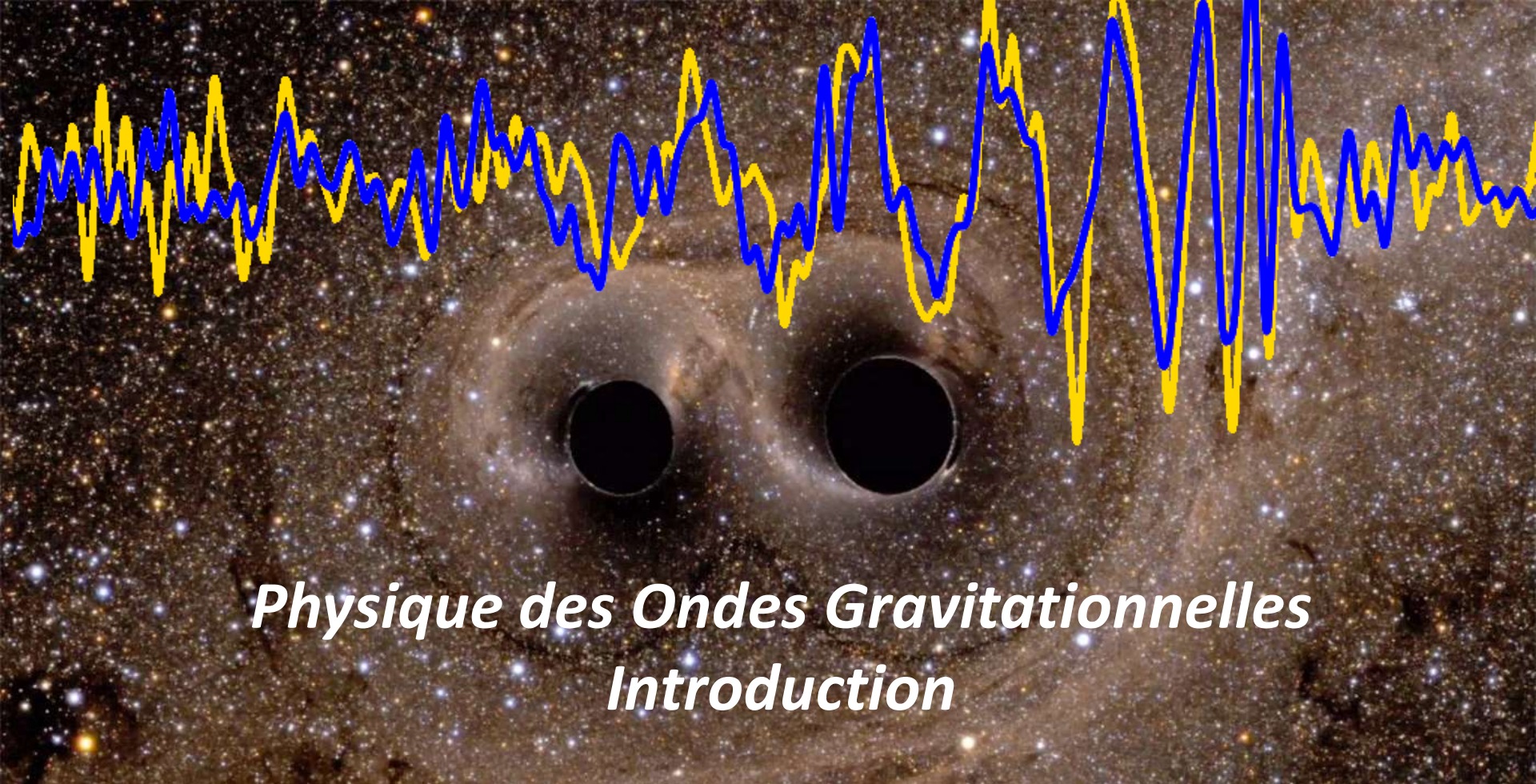




Physique des Ondes Gravitationnelles

Introduction



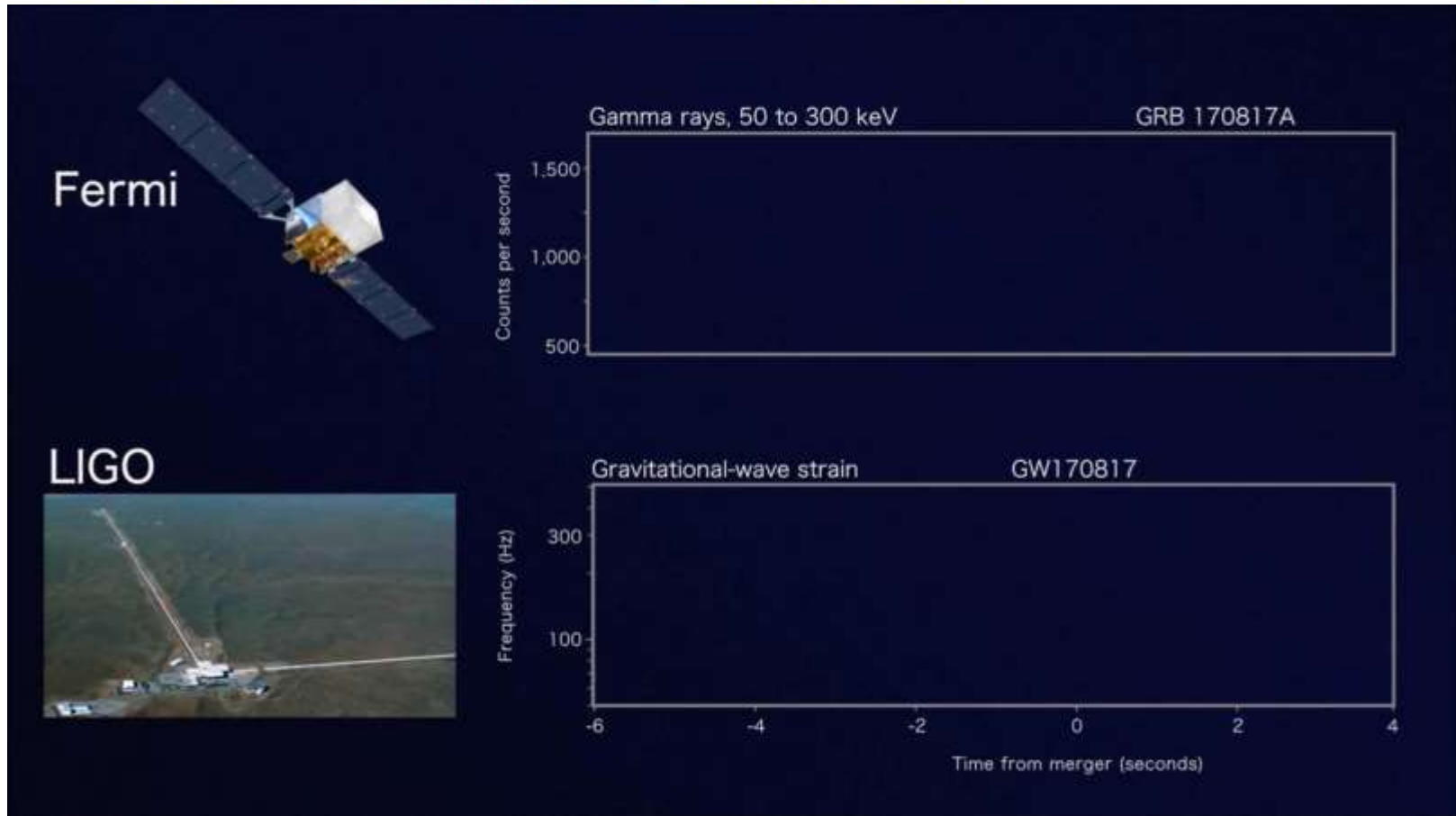
Gianpietro Cagnoli
gianpietro.cagnoli@univ-lyon1.fr



17-18 août 2017 : 12 heures extraordinaires

Jeudi 17 août 2017, 14h41 heure de Paris

- Signaux enregistrés avec un écart de deux secondes
 - LIGO (ondes gravitationnelles)
 - Instrument GBM (sursauts gamma) du satellite Fermi



1)

Plus tard le même jour ...

- 19h55

→ Localisation LIGO-Virgo

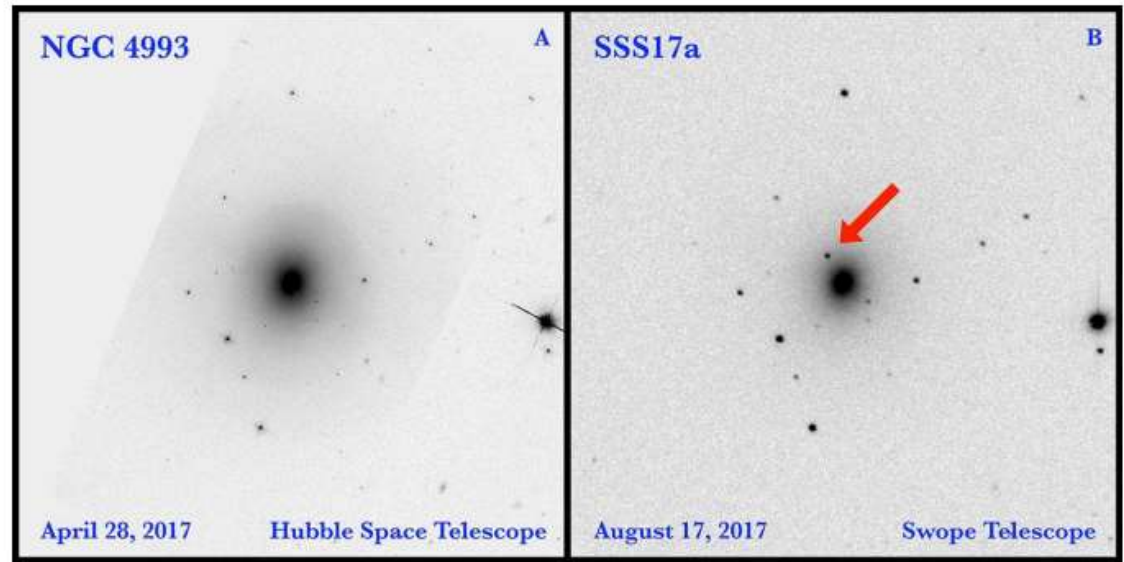
- Position dans le ciel :
28 degrés carrés
- Estimation de la distance
de la source



17¹⁾

La nuit suivante ...

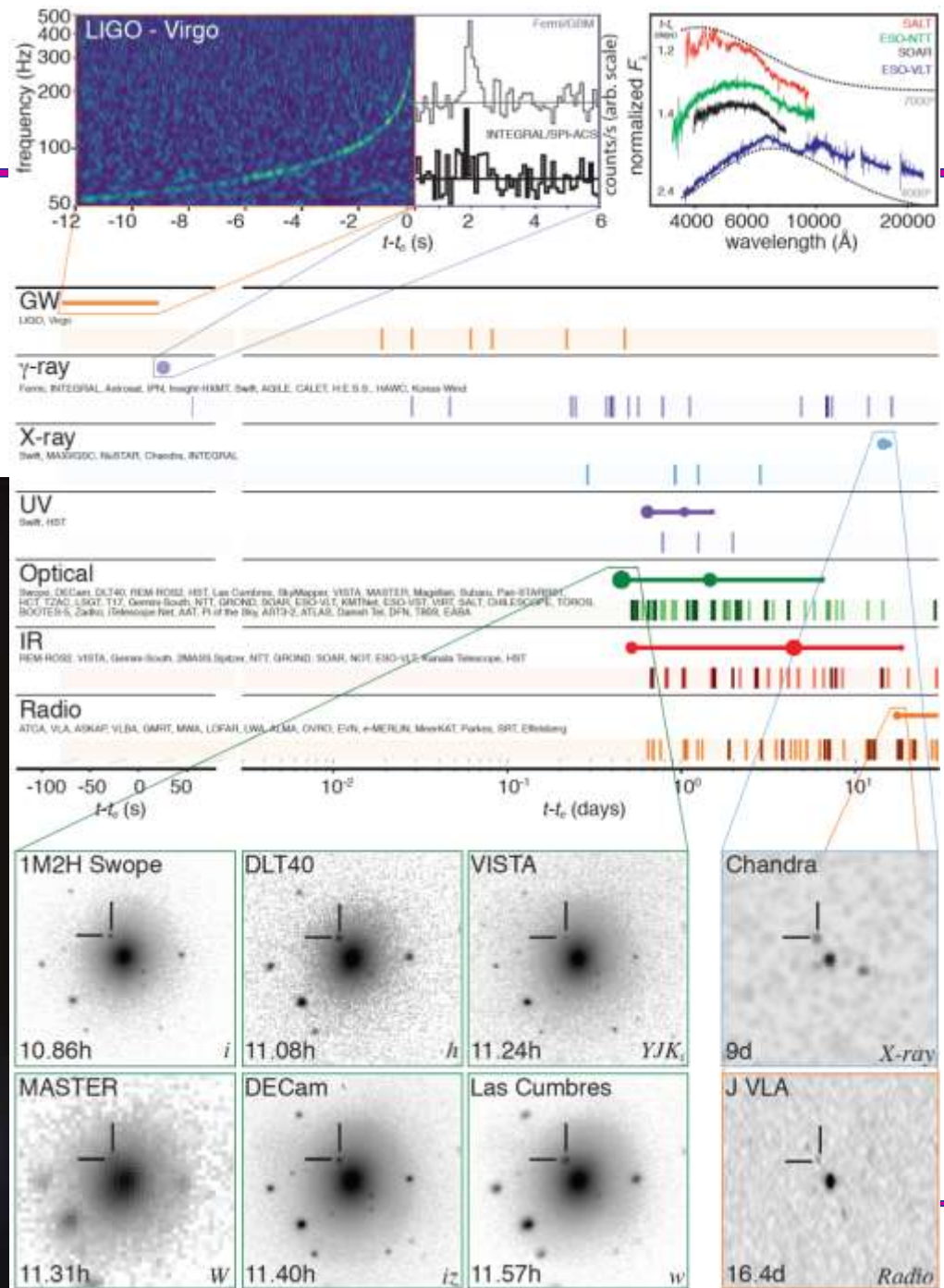
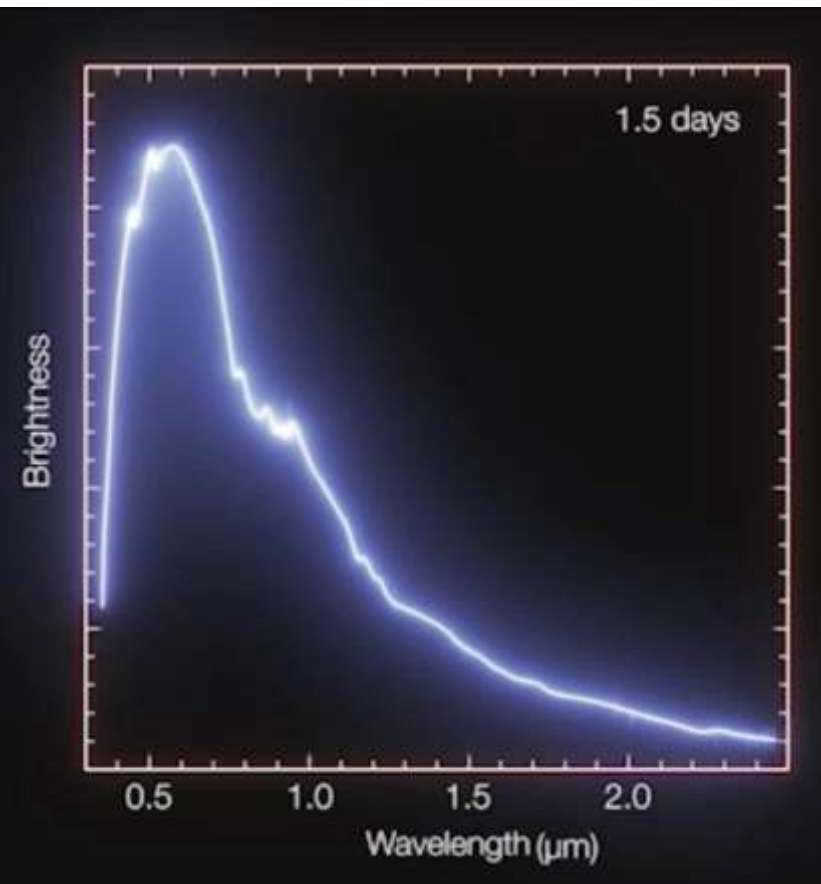
- 18/08/2017
01h33 heure de Paris
- Découverte de la
contrepartie optique
à l'aide du
télescope SWOPE
au Chili



18¹⁾

Astronomie multi-messagers

- Ondes gravitationnelles, sursauts gamma, l'ensemble du spectre électromagnétique



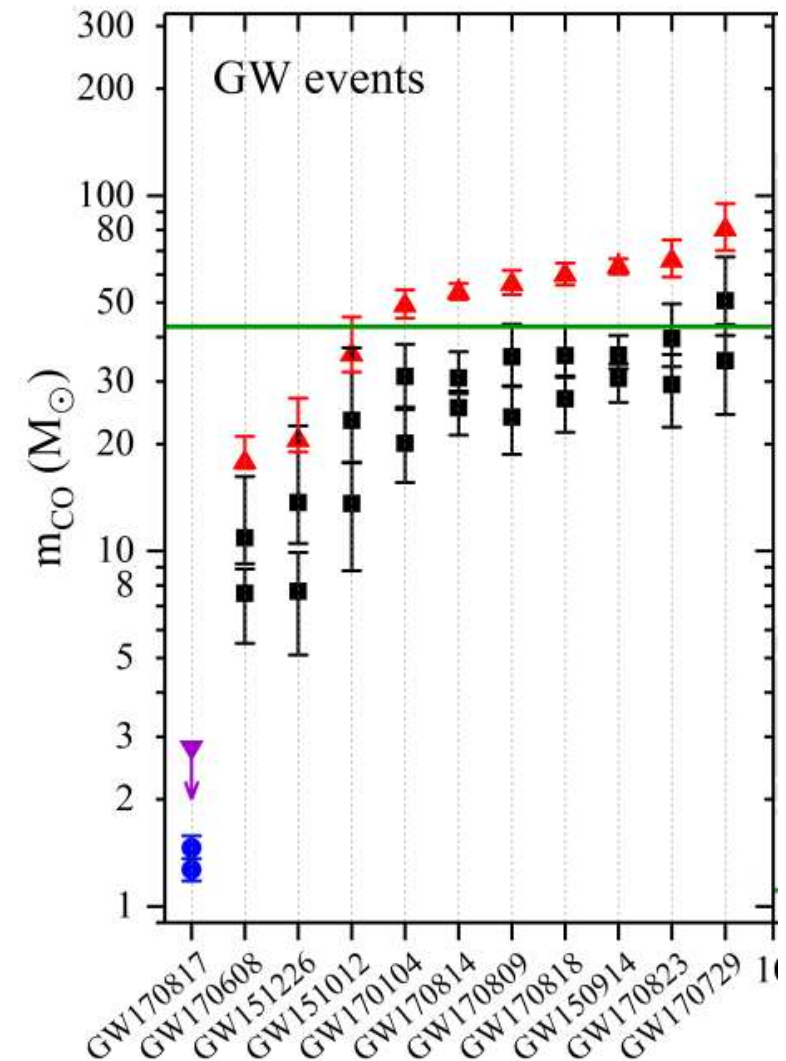
Une nouvelle science est née: L'Astronomie Multi-Messenger

Campagnes de prise de données O1 et O2

- 4 + 9 mois

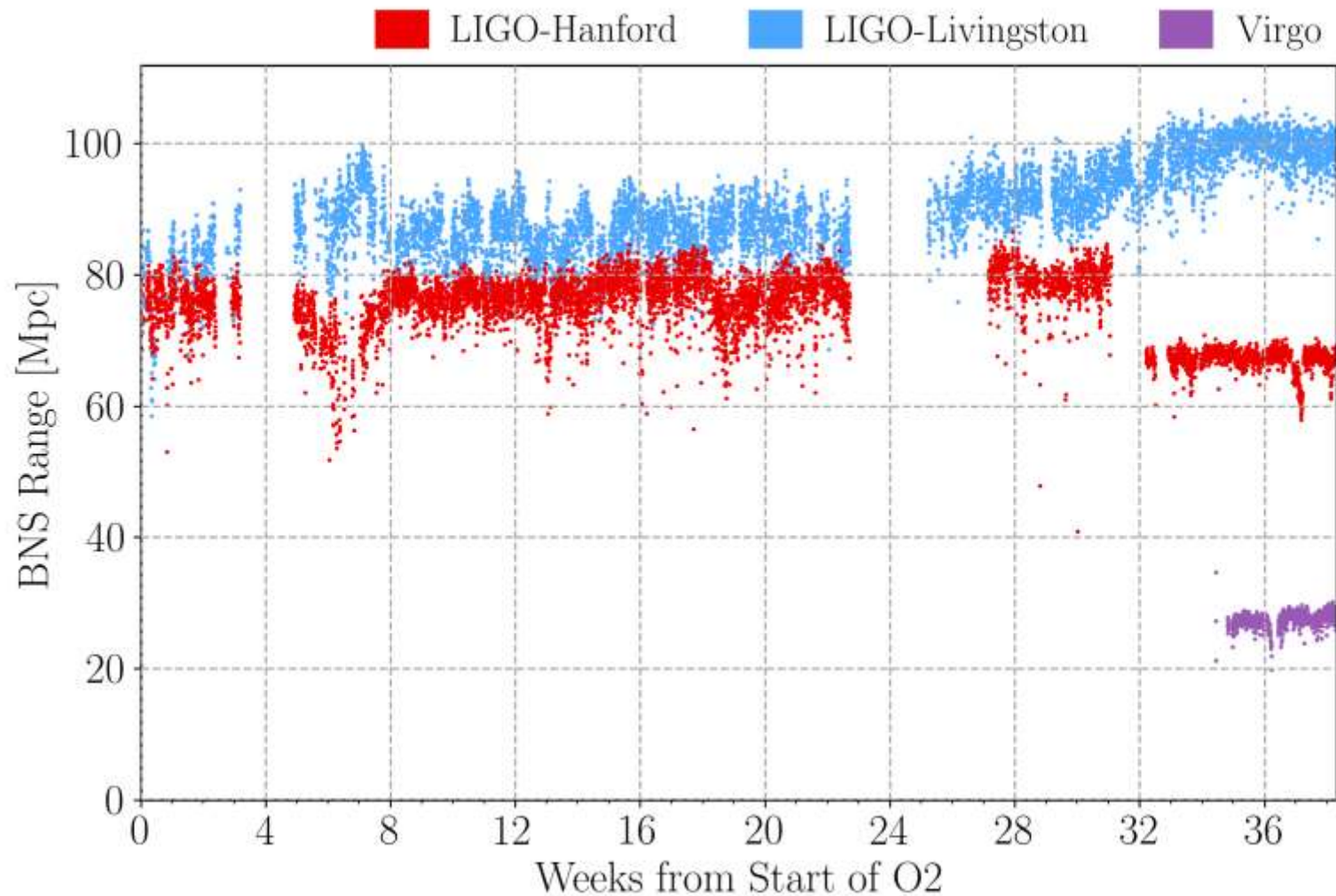


- Ils sont produits par fusion de corps massifs
 - ◆ 10 binaires de trous noirs
 - ◆ 1 binaire d'étoiles de neutrons



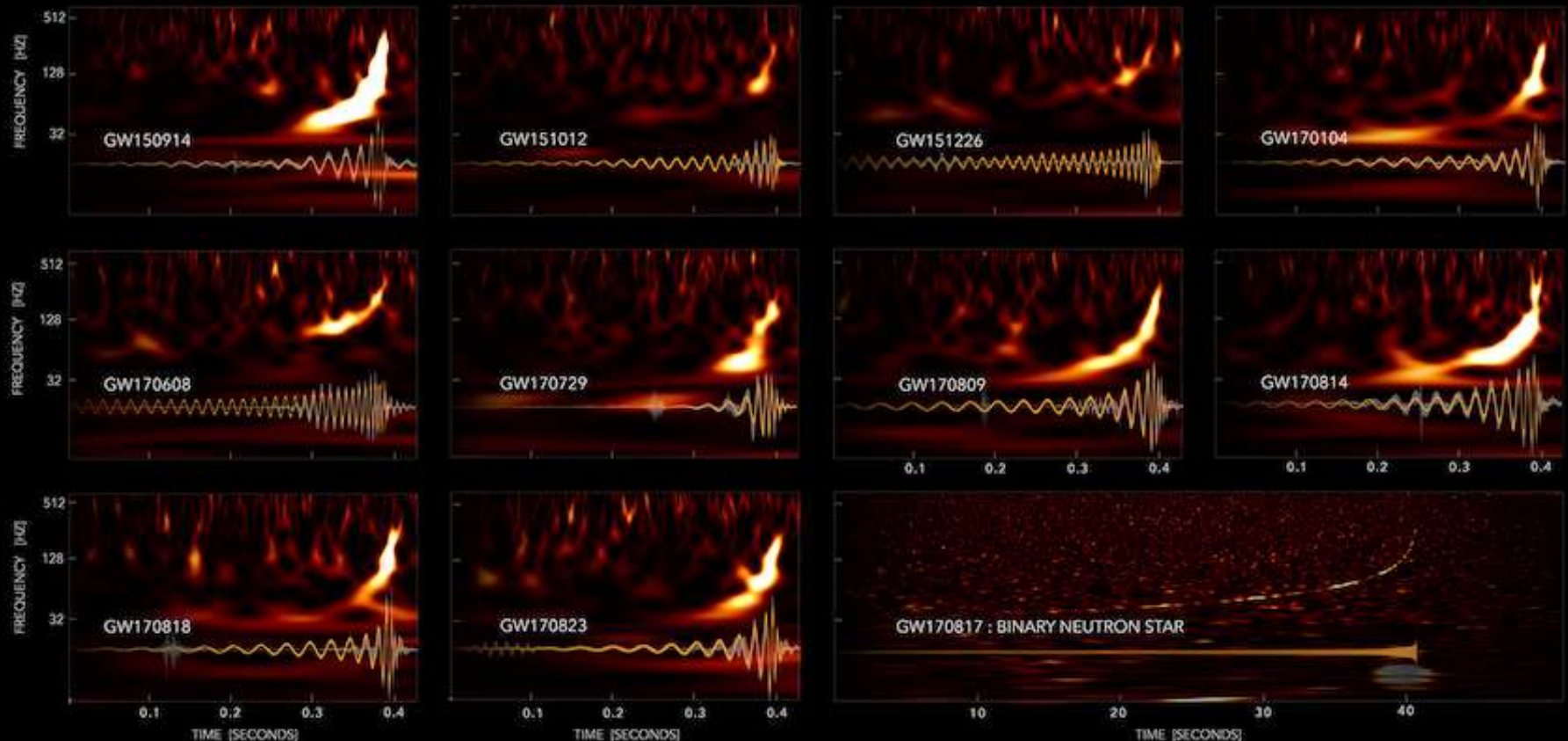
2)

La performance des 3 détecteurs en O2



Le signaux

GRAVITATIONAL-WAVE TRANSIENT CATALOG-1



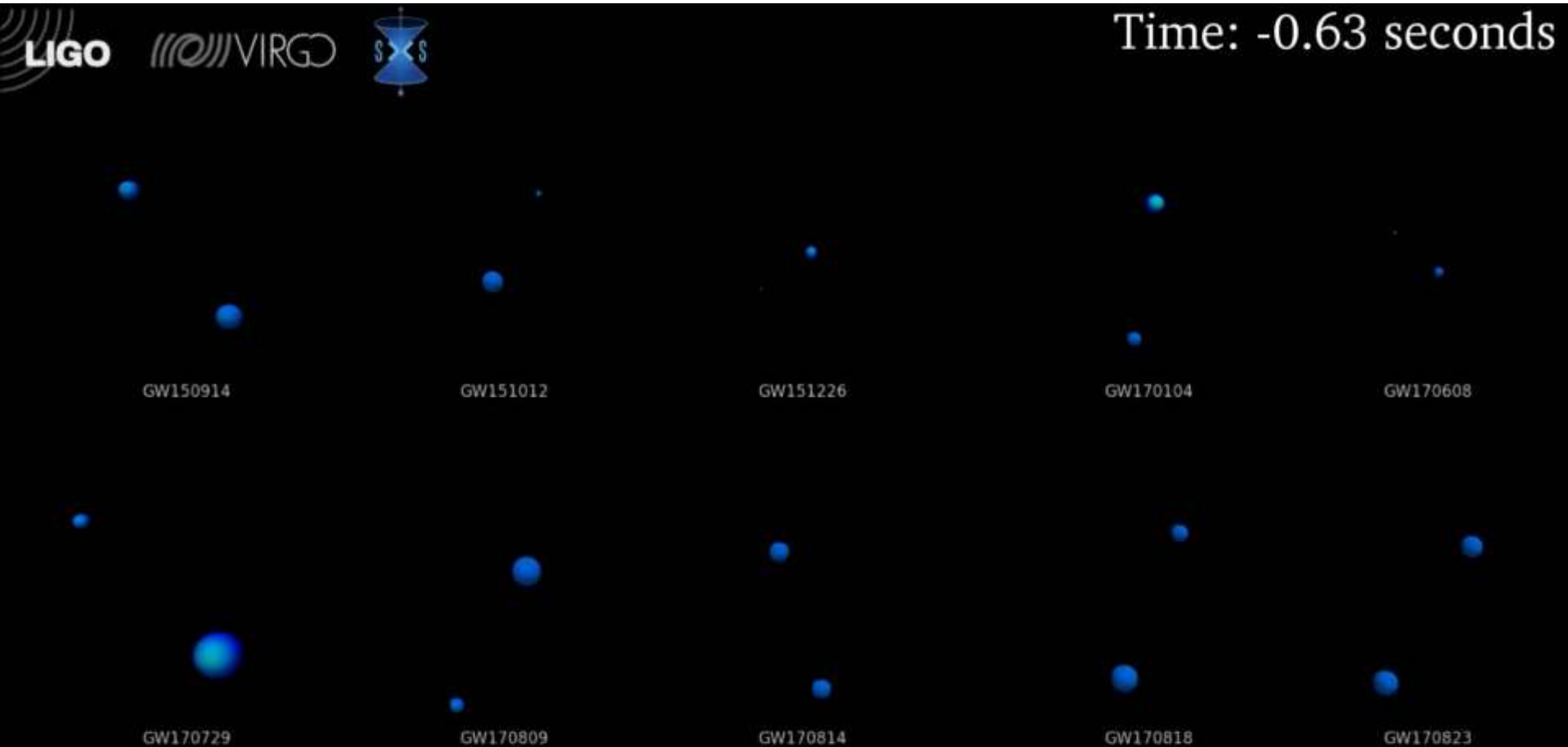
LIGO-VIRGO DATA: [HTTPS://DOI.ORG/10.7935/G2H3-4H423](https://doi.org/10.7935/g2h3-4h423)

WAVELET (UNMODELED)

EINSTEIN'S THEORY

IMAGE CREDIT: S. GHONGE, K. JANI | GEORGIA TECH

A nice cartoon !



Les paramètres physiques des 11 binaires

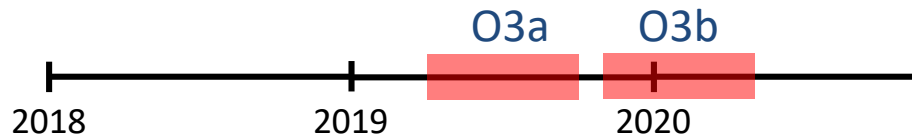
Event	$m_1/M_\odot$	$m_2/M_\odot$	$M/M_\odot$	χ_{eff}	$M_f/M_\odot$	a_f	$E_{\text{rad}}/(M_\odot c^2)$	$\ell_{\text{peak}}/(\text{erg s}^{-1})$	d_L/Mpc	z	$\Delta\Omega/\text{deg}^2$
GW150914	$35.6^{+4.8}_{-3.0}$	$30.6^{+3.0}_{-4.4}$	$28.6^{+1.6}_{-1.5}$	$-0.01^{+0.12}_{-0.13}$	$63.1^{+3.3}_{-3.0}$	$0.69^{+0.05}_{-0.04}$	$3.1^{+0.4}_{-0.4}$	$3.6^{+0.4}_{-0.4} \times 10^{56}$	430^{+150}_{-170}	$0.09^{+0.03}_{-0.03}$	180
GW151012	$23.3^{+14.0}_{-5.5}$	$13.6^{+4.1}_{-4.8}$	$15.2^{+2.0}_{-1.1}$	$0.04^{+0.28}_{-0.19}$	$35.7^{+9.9}_{-3.8}$	$0.67^{+0.13}_{-0.11}$	$1.5^{+0.5}_{-0.5}$	$3.2^{+0.8}_{-1.7} \times 10^{56}$	1060^{+540}_{-480}	$0.21^{+0.09}_{-0.09}$	1555
GW151226	$13.7^{+8.8}_{-3.2}$	$7.7^{+2.2}_{-2.6}$	$8.9^{+0.3}_{-0.3}$	$0.18^{+0.20}_{-0.12}$	$20.5^{+6.4}_{-1.5}$	$0.74^{+0.07}_{-0.05}$	$1.0^{+0.1}_{-0.2}$	$3.4^{+0.7}_{-1.7} \times 10^{56}$	440^{+180}_{-190}	$0.09^{+0.04}_{-0.04}$	1033
GW170104	$31.0^{+7.2}_{-5.6}$	$20.1^{+4.9}_{-4.5}$	$21.5^{+2.1}_{-1.7}$	$-0.04^{+0.17}_{-0.20}$	$49.1^{+5.2}_{-3.9}$	$0.66^{+0.08}_{-0.10}$	$2.2^{+0.5}_{-0.5}$	$3.3^{+0.6}_{-0.9} \times 10^{56}$	960^{+430}_{-410}	$0.19^{+0.07}_{-0.08}$	924
GW170608	$10.9^{+5.3}_{-1.7}$	$7.6^{+1.3}_{-2.1}$	$7.9^{+0.2}_{-0.2}$	$0.03^{+0.19}_{-0.07}$	$17.8^{+3.2}_{-0.7}$	$0.69^{+0.04}_{-0.04}$	$0.9^{+0.05}_{-0.1}$	$3.5^{+0.4}_{-1.3} \times 10^{56}$	320^{+120}_{-110}	$0.07^{+0.02}_{-0.02}$	396
GW170729	$50.6^{+16.6}_{-10.2}$	$34.3^{+9.1}_{-10.1}$	$35.7^{+6.5}_{-4.7}$	$0.36^{+0.21}_{-0.25}$	$80.3^{+14.6}_{-10.2}$	$0.81^{+0.07}_{-0.13}$	$4.8^{+1.7}_{-1.7}$	$4.2^{+0.9}_{-1.5} \times 10^{56}$	2750^{+1350}_{-1320}	$0.48^{+0.19}_{-0.20}$	1033
GW170809	$35.2^{+8.3}_{-6.0}$	$23.8^{+5.2}_{-5.1}$	$25.0^{+2.1}_{-1.6}$	$0.07^{+0.16}_{-0.16}$	$56.4^{+5.2}_{-3.7}$	$0.70^{+0.08}_{-0.09}$	$2.7^{+0.6}_{-0.6}$	$3.5^{+0.6}_{-0.9} \times 10^{56}$	990^{+320}_{-380}	$0.20^{+0.05}_{-0.07}$	340
GW170814	$30.7^{+5.7}_{-3.0}$	$25.3^{+2.9}_{-4.1}$	$24.2^{+1.4}_{-1.1}$	$0.07^{+0.12}_{-0.11}$	$53.4^{+3.2}_{-2.4}$	$0.72^{+0.07}_{-0.05}$	$2.7^{+0.4}_{-0.3}$	$3.7^{+0.4}_{-0.5} \times 10^{56}$	580^{+160}_{-210}	$0.12^{+0.03}_{-0.04}$	87
GW170817	$1.46^{+0.12}_{-0.10}$	$1.27^{+0.09}_{-0.09}$	$1.186^{+0.001}_{-0.001}$	$0.00^{+0.02}_{-0.01}$	≤ 2.8	≤ 0.89	≥ 0.04	$\geq 0.1 \times 10^{56}$	40^{+10}_{-10}	$0.01^{+0.00}_{-0.00}$	16
GW170818	$35.5^{+7.5}_{-4.7}$	$26.8^{+4.3}_{-5.2}$	$26.7^{+2.1}_{-1.7}$	$-0.09^{+0.18}_{-0.21}$	$59.8^{+4.8}_{-3.8}$	$0.67^{+0.07}_{-0.08}$	$2.7^{+0.5}_{-0.5}$	$3.4^{+0.5}_{-0.7} \times 10^{56}$	1020^{+430}_{-360}	$0.20^{+0.07}_{-0.07}$	39
GW170823	$39.6^{+10.0}_{-6.6}$	$29.4^{+6.3}_{-7.1}$	$29.3^{+4.2}_{-3.2}$	$0.08^{+0.20}_{-0.22}$	$65.6^{+9.4}_{-6.6}$	$0.71^{+0.08}_{-0.10}$	$3.3^{+0.9}_{-0.8}$	$3.6^{+0.6}_{-0.9} \times 10^{56}$	1850^{+840}_{-840}	$0.34^{+0.13}_{-0.14}$	1651

TABLE III. Selected source parameters of the eleven confident detections. We report median values with 90% credible intervals that include statistical errors, and systematic errors from averaging the results of two waveform models for BBHs. For GW170817 credible intervals and statistical errors are shown for IMRPhenomPv2NRT with low spin prior, while the sky area was computed from TaylorF2 samples. The redshift for NGC 4993 from [92] and its associated uncertainties were used to calculate source frame masses for GW170817. For BBH events the redshift was calculated from the luminosity distance and assumed cosmology as discussed in Appendix B. The columns show source frame component masses m_i and chirp mass M , dimensionless effective aligned spin χ_{eff} , final source frame mass M_f , final spin a_f , radiated energy E_{rad} , peak luminosity ℓ_{peak} , luminosity distance d_L , redshift z and sky localization $\Delta\Omega$. The sky localization is the area of the 90% credible region. For GW170817 we give conservative bounds on parameters of the final remnant discussed in Sec. V E.

3)

Campagne de prise de données O3

- En cours

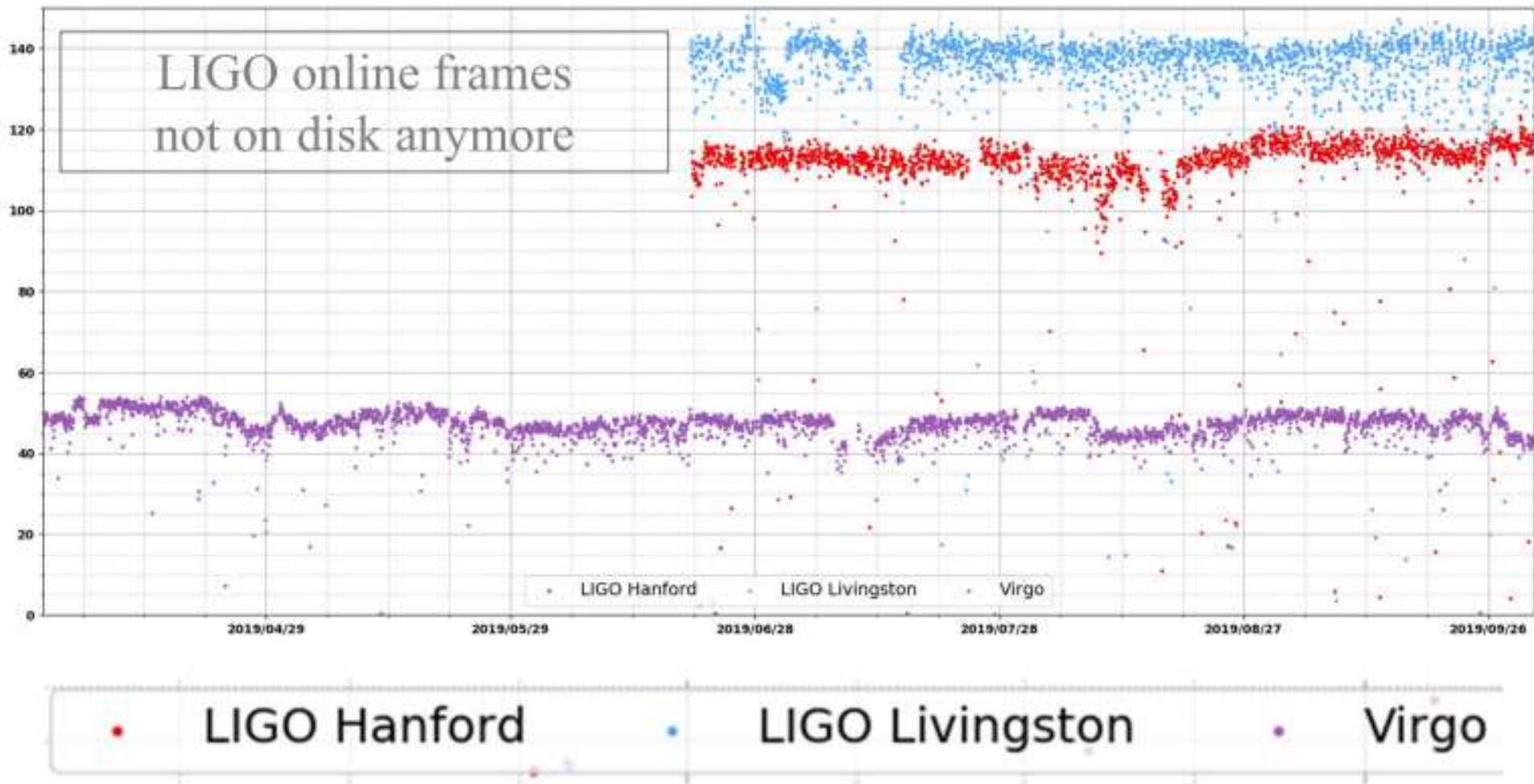


- Un site web utile!

- ◆ <https://gracedb.ligo.org/superevents/public/O3/>
- ◆ 56 sources toutes confondues

S190510g	Terrestrial (58%), BNS (42%)	May 10, 2019 02:59:39 UTC	GCN Circulars Notices VOE		1 per 3.5872 years
S190503bf	BBH (96%), MassGap (3%)	May 3, 2019 18:54:04 UTC	GCN Circulars Notices VOE		1 per 19.368 years
S190426c	BNS (49%), MassGap (24%), Terrestrial (14%), NSBH (13%)	April 26, 2019 15:21:55 UTC	GCN Circulars Notices VOE		1 per 1.6276 years
S190425z	BNS (>99%)	April 25, 2019 08:18:05 UTC	GCN Circulars Notices VOE		1 per 69834 years
S190421ar	BBH (97%), Terrestrial (3%)	April 21, 2019 21:38:56 UTC	GCN Circulars Notices VOE		1 per 2.1285 years
S190412m	BBH (>99%)	April 12, 2019 05:30:44 UTC	GCN Circulars Notices VOE		1 per 1.883e+19 years
S190408an	BBH (>99%)	April 8, 2019 18:18:02 UTC	GCN Circulars Notices VOE		1 per 1.1273e+10 years

La performance des 3 détecteurs en O3



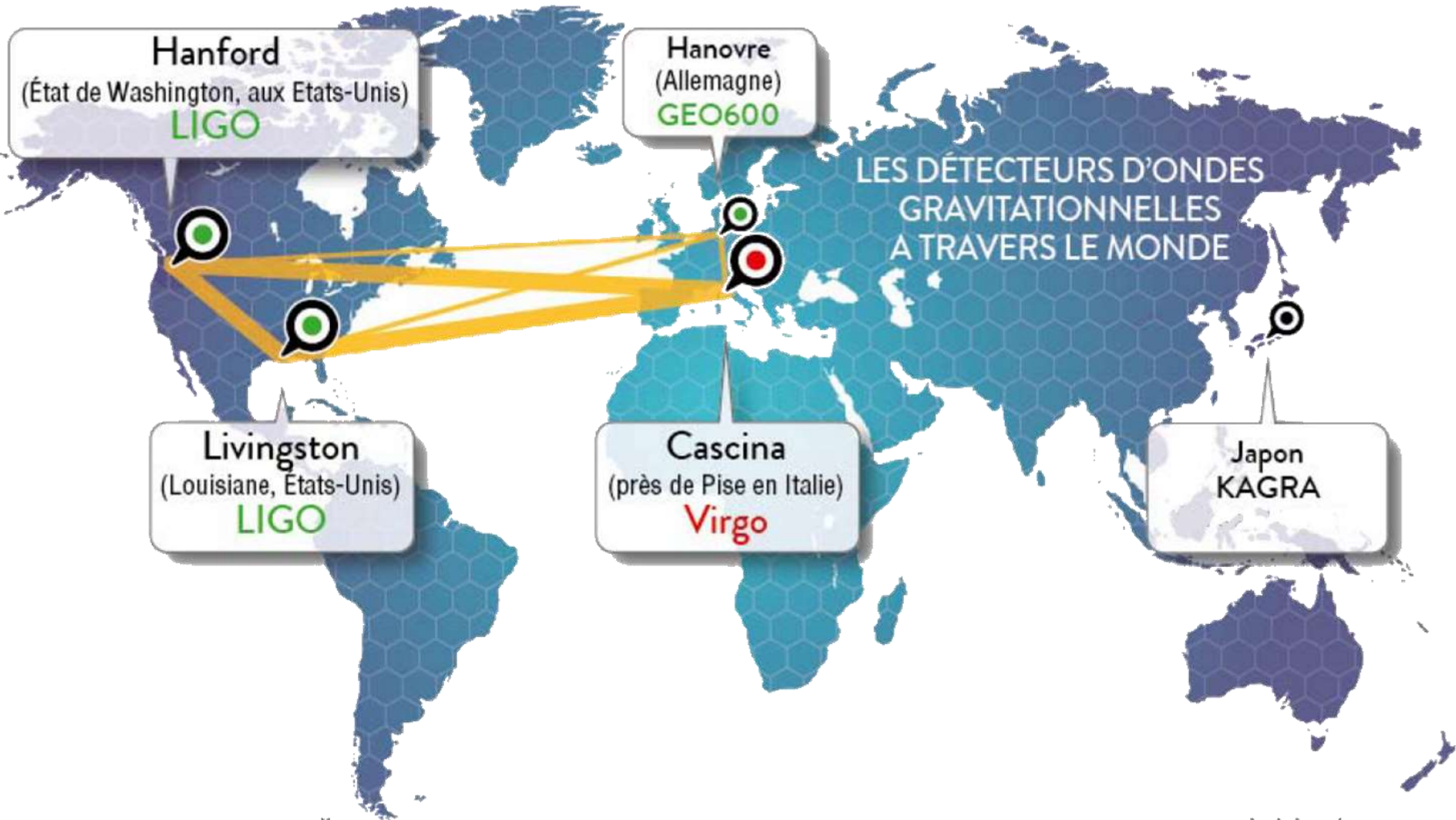
Les signaux de O3a

Event	M_1 ($M_\odot$)	M_2 ($M_\odot$)	m_1 ($M_\odot$)	m_2 ($M_\odot$)	χ_{off}	D_L (Gpc)	z	M_c ($M_\odot$)	χ_T	$\Delta\Omega$ (deg ²)	SNR
GW190408.181802	42.9 ^{+1.1} _{-2.9}	18.3 ^{+1.8} _{-1.2}	24.5 ^{+5.1} _{-3.4}	18.3 ^{+2.3} _{-3.5}	-0.03 ^{+0.13} _{-0.19}	1.58 ^{+0.40} _{-0.58}	0.30 ^{+0.08} _{-0.10}	41.0 ^{+3.8} _{-2.7}	0.67 ^{+0.06} _{-0.07}	140	15.3 ^{+0.2} _{-0.3}
GW190412	38.4 ^{+3.8} _{-3.7}	13.3 ^{+0.4} _{-0.3}	30.0 ^{+4.7} _{-5.1}	8.3 ^{+1.6} _{-0.9}	0.25 ^{+0.68} _{-0.11}	0.74 ^{+0.14} _{-0.17}	0.15 ^{+0.03} _{-0.03}	37.3 ^{+3.9} _{-3.9}	0.67 ^{+0.03} _{-0.06}	21	18.9 ^{+0.2} _{-0.3}
GW190413.052954	56.9 ^{+13.1} _{-8.9}	24.0 ^{+5.4} _{-3.7}	33.4 ^{+12.4} _{-7.4}	23.4 ^{+6.7} _{-6.3}	0.01 ^{+0.29} _{-0.33}	4.16 ^{+2.41} _{-1.8}	0.66 ^{+0.39} _{-0.27}	54.3 ^{+12.4} _{-8.4}	0.69 ^{+0.12} _{-0.13}	1400	8.9 ^{+0.4} _{-0.8}
GW190413.134308	76.1 ^{+15.9} _{-10.6}	31.9 ^{+7.3} _{-4.6}	45.4 ^{+13.6} _{-9.6}	30.9 ^{+10.2} _{-9.6}	-0.01 ^{+0.2} _{-0.2}	5.15 ^{+2.44} _{-2.34}	0.80 ^{+0.3} _{-0.3}	72.8 ^{+15.2} _{-10.3}	0.69 ^{+0.10} _{-0.12}	520	10.0 ^{+0.2} _{-0.5}
GW190421.213856	71.8 ^{+12.5} _{-8.6}	30.7 ^{+5.5} _{-3.9}	40.6 ^{+10.4} _{-6.6}	31.4 ^{+7.3} _{-8.2}	-0.05 ^{+0.23} _{-0.26}	3.15 ^{+1.42} _{-1.42}	0.53 ^{+0.15} _{-0.21}	68.6 ^{+11.7} _{-8.1}	0.68 ^{+0.10} _{-0.13}	1000	10.7 ^{+0.2} _{-0.4}
GW190424.180648	70.7 ^{+13.4} _{-9.8}	30.3 ^{+5.7} _{-4.2}	39.5 ^{+10.9} _{-6.9}	31.0 ^{+7.4} _{-7.3}	0.15 ^{+0.22} _{-0.22}	2.55 ^{+1.54} _{-1.33}	0.45 ^{+0.22} _{-0.21}	67.1 ^{+12.5} _{-9.2}	0.75 ^{+0.08} _{-0.09}	26000	10.4 ^{+0.2} _{-0.4}
GW190425	3.4 ^{+0.3} _{-0.1}	1.44 ^{+0.02} _{-0.02}	2.0 ^{+0.6} _{-0.3}	1.4 ^{+0.3} _{-0.3}	0.06 ^{+0.11} _{-0.05}	0.16 ^{+0.07} _{-0.07}	0.03 ^{+0.01} _{-0.02}	—	—	9900	12.4 ^{+0.3} _{-0.4}
GW190426.152155	7.2 ^{+3.5} _{-1.5}	2.41 ^{+0.08} _{-0.08}	5.7 ^{+4.0} _{-2.3}	1.5 ^{+0.8} _{-0.5}	-0.03 ^{+0.33} _{-0.30}	0.38 ^{+0.19} _{-0.16}	0.08 ^{+0.04} _{-0.03}	—	—	1400	8.7 ^{+0.5} _{-0.6}
GW190503.185404	71.3 ^{+9.3} _{-13.5}	30.1 ^{+4.2} _{-4.0}	42.9 ^{+9.2} _{-7.8}	28.5 ^{+7.3} _{-7.9}	-0.02 ^{+0.20} _{-0.20}	1.52 ^{+0.71} _{-0.68}	0.29 ^{+0.11} _{-0.11}	68.2 ^{+9.7} _{-7.5}	0.67 ^{+0.09} _{-0.12}	94	12.4 ^{+0.2} _{-0.3}
GW190512.180714	35.6 ^{+3.9} _{-3.4}	14.5 ^{+1.3} _{-1.0}	23.0 ^{+5.2} _{-5.7}	12.5 ^{+3.5} _{-2.5}	0.03 ^{+0.13} _{-0.13}	1.49 ^{+0.53} _{-0.59}	0.28 ^{+0.09} _{-0.10}	34.2 ^{+3.9} _{-3.4}	0.65 ^{+0.07} _{-0.07}	230	12.2 ^{+0.2} _{-0.4}
GW190513.205428	53.6 ^{+8.6} _{-5.9}	21.5 ^{+3.6} _{-1.9}	35.3 ^{+9.6} _{-9.0}	18.1 ^{+7.3} _{-4.2}	0.12 ^{+0.29} _{-0.18}	2.16 ^{+0.94} _{-0.89}	0.39 ^{+0.14} _{-0.13}	51.3 ^{+8.1} _{-5.8}	0.69 ^{+0.14} _{-0.12}	490	12.9 ^{+0.3} _{-0.4}
GW190514.065416	64.2 ^{+10.6} _{-9.6}	27.4 ^{+6.9} _{-4.3}	36.9 ^{+13.4} _{-7.3}	27.5 ^{+5.2} _{-7.7}	-0.16 ^{+0.28} _{-0.32}	4.93 ^{+2.70} _{-2.41}	0.77 ^{+0.34} _{-0.33}	61.6 ^{+10.6} _{-9.2}	0.64 ^{+0.11} _{-0.14}	2400	8.2 ^{+0.3} _{-0.6}
GW190517.055101	61.9 ^{+10.0} _{-9.6}	26.0 ^{+4.2} _{-4.0}	36.4 ^{+11.8} _{-7.8}	24.8 ^{+6.9} _{-7.1}	0.53 ^{+0.20} _{-0.19}	2.11 ^{+1.79} _{-1.08}	0.38 ^{+0.26} _{-0.19}	57.8 ^{+9.4} _{-9.1}	0.87 ^{+0.05} _{-0.07}	460	10.7 ^{+0.4} _{-0.6}
GW190519.153544	104.2 ^{+14.5} _{-13.5}	43.5 ^{+6.8} _{-6.1}	64.5 ^{+11.3} _{-9.5}	39.9 ^{+11.0} _{-10.1}	0.33 ^{+0.19} _{-0.22}	2.85 ^{+2.02} _{-1.11}	0.49 ^{+0.27} _{-0.12}	98.7 ^{+13.5} _{-14.2}	0.80 ^{+0.07} _{-0.07}	770	15.6 ^{+0.2} _{-0.3}
GW190521	157.9 ^{+37.4} _{-29.5}	66.9 ^{+15.3} _{-17.5}	91.4 ^{+29.3} _{-20.1}	66.8 ^{+20.7} _{-20.1}	0.06 ^{+0.31} _{-0.37}	4.53 ^{+2.30} _{-2.30}	0.72 ^{+0.29} _{-0.29}	150.3 ^{+36.8} _{-20.4}	0.73 ^{+0.11} _{-0.14}	940	14.2 ^{+0.3} _{-0.3}
GW190521.074359	74.4 ^{+4.8} _{-4.6}	31.9 ^{+5.1} _{-2.1}	42.1 ^{+4.9} _{-6.2}	9.4 ^{+1.8} _{-1.2}	0.09 ^{+0.10} _{-0.13}	1.28 ^{+0.38} _{-0.57}	0.25 ^{+0.08} _{-0.10}	70.7 ^{+4.4} _{-4.2}	0.72 ^{+0.05} _{-0.07}	500	25.8 ^{+0.1} _{-0.2}
GW190527.092055	58.5 ^{+27.9} _{-10.6}	24.2 ^{+11.9} _{-4.4}	36.2 ^{+19.1} _{-9.5}	22.8 ^{+12.7} _{-8.1}	0.13 ^{+0.29} _{-0.28}	3.10 ^{+4.85} _{-1.64}	0.53 ^{+0.61} _{-0.25}	55.9 ^{+26.2} _{-10.1}	0.73 ^{+0.12} _{-0.16}	3800	8.1 ^{+0.4} _{-0.4}
GW190602.175927	114.1 ^{+18.5} _{-15.7}	48.3 ^{+8.6} _{-8.0}	67.2 ^{+16.0} _{-12.6}	47.4 ^{+13.4} _{-10.6}	0.10 ^{+0.25} _{-0.25}	2.99 ^{+2.02} _{-1.26}	0.51 ^{+0.27} _{-0.19}	108.8 ^{+17.2} _{-14.8}	0.71 ^{+0.10} _{-0.13}	720	12.8 ^{+0.2} _{-0.3}
GW190620.030421	90.1 ^{+17.3} _{-12.1}	37.5 ^{+7.8} _{-5.7}	55.4 ^{+15.8} _{-12.0}	35.0 ^{+11.6} _{-11.4}	0.34 ^{+0.21} _{-0.25}	3.16 ^{+1.67} _{-1.43}	0.54 ^{+0.22} _{-0.21}	85.4 ^{+15.9} _{-11.4}	0.80 ^{+0.08} _{-0.14}	6700	12.1 ^{+0.3} _{-0.5}
GW190630.185205	58.8 ^{+4.7} _{-4.8}	24.8 ^{+2.1} _{-2.0}	35.0 ^{+6.9} _{-5.7}	23.6 ^{+5.2} _{-3.3}	0.10 ^{+0.12} _{-0.13}	0.93 ^{+0.56} _{-0.40}	0.19 ^{+0.10} _{-0.07}	56.1 ^{+4.5} _{-4.6}	0.70 ^{+0.06} _{-0.07}	1300	15.6 ^{+0.2} _{-0.3}
GW190701.203306	94.1 ^{+31.0} _{-9.3}	40.2 ^{+5.2} _{-4.7}	53.6 ^{+11.7} _{-7.8}	40.8 ^{+8.3} _{-11.5}	-0.06 ^{+0.23} _{-0.28}	2.14 ^{+0.79} _{-0.73}	0.38 ^{+0.12} _{-0.12}	90.0 ^{+10.8} _{-8.6}	0.67 ^{+0.08} _{-0.12}	45	11.3 ^{+0.2} _{-0.4}
GW190706.222641	101.6 ^{+17.9} _{-13.5}	42.0 ^{+8.4} _{-6.2}	64.0 ^{+15.2} _{-15.2}	38.5 ^{+12.5} _{-12.4}	0.32 ^{+0.19} _{-0.19}	5.07 ^{+1.57} _{-2.13}	0.79 ^{+0.3} _{-0.3}	96.3 ^{+16.7} _{-13.3}	0.80 ^{+0.08} _{-0.17}	610	12.6 ^{+0.2} _{-0.4}
GW190707.093326	20.0 ^{+1.9} _{-1.3}	8.5 ^{+0.6} _{-0.4}	11.5 ^{+3.3} _{-1.7}	8.4 ^{+1.4} _{-1.6}	-0.05 ^{+0.10} _{-0.08}	0.80 ^{+0.37} _{-0.38}	0.16 ^{+0.07} _{-0.07}	19.2 ^{+1.9} _{-1.3}	0.66 ^{+0.03} _{-0.04}	1300	13.3 ^{+0.2} _{-0.4}
GW190708.232457	30.8 ^{+2.5} _{-1.8}	13.1 ^{+0.8} _{-0.6}	17.5 ^{+4.7} _{-2.3}	13.1 ^{+2.0} _{-2.7}	0.02 ^{+0.10} _{-0.08}	0.90 ^{+0.33} _{-0.40}	0.18 ^{+0.06} _{-0.07}	29.4 ^{+2.5} _{-1.7}	0.69 ^{+0.04} _{-0.04}	14000	13.1 ^{+0.2} _{-0.3}
GW190719.215514	55.8 ^{+26.3} _{-10.0}	22.7 ^{+5.9} _{-3.7}	35.2 ^{+10.9} _{-8.9}	20.2 ^{+8.1} _{-6.3}	0.35 ^{+0.28} _{-0.32}	4.61 ^{+2.84} _{-3.17}	0.73 ^{+0.35} _{-0.30}	52.9 ^{+15.0} _{-9.5}	0.80 ^{+0.10} _{-0.16}	2300	8.3 ^{+0.3} _{-1.0}
GW190720.000836	21.3 ^{+4.3} _{-2.3}	8.9 ^{+0.5} _{-0.8}	13.3 ^{+0.8} _{-3.0}	7.8 ^{+2.2} _{-2.2}	0.18 ^{+0.14} _{-0.12}	0.81 ^{+0.71} _{-0.33}	0.16 ^{+0.12} _{-0.08}	20.3 ^{+4.5} _{-2.3}	0.72 ^{+0.06} _{-0.05}	510	11.0 ^{+0.3} _{-0.8}
GW190727.060333	65.8 ^{+10.9} _{-7.4}	28.1 ^{+4.9} _{-3.4}	37.2 ^{+9.4} _{-5.9}	28.8 ^{+6.6} _{-7.9}	0.12 ^{+0.26} _{-0.25}	3.60 ^{+1.56} _{-1.53}	0.60 ^{+0.30} _{-0.22}	62.6 ^{+10.2} _{-7.0}	0.73 ^{+0.10} _{-0.10}	860	11.9 ^{+0.3} _{-0.5}
GW190728.064510	20.5 ^{+4.5} _{-1.3}	8.6 ^{+0.5} _{-0.3}	12.2 ^{+7.1} _{-2.2}	8.1 ^{+1.7} _{-2.6}	0.12 ^{+0.10} _{-0.07}	0.89 ^{+0.25} _{-0.37}	0.18 ^{+0.05} _{-0.07}	19.5 ^{+1.6} _{-1.3}	0.71 ^{+0.04} _{-0.04}	410	13.6 ^{+0.2} _{-0.4}
GW190731.140936	67.1 ^{+15.3} _{-10.2}	28.4 ^{+6.8} _{-4.5}	39.3 ^{+11.8} _{-8.2}	28.0 ^{+8.9} _{-8.4}	0.08 ^{+0.24} _{-0.24}	3.97 ^{+2.56} _{-2.67}	0.65 ^{+0.32} _{-0.30}	63.9 ^{+14.4} _{-9.8}	0.71 ^{+0.10} _{-0.12}	3000	8.6 ^{+0.2} _{-0.5}
GW190803.022701	62.7 ^{+11.8} _{-9.9}	26.7 ^{+5.2} _{-3.8}	36.1 ^{+10.2} _{-6.7}	26.7 ^{+7.1} _{-7.6}	-0.01 ^{+0.25} _{-0.20}	3.69 ^{+2.04} _{-1.69}	0.61 ^{+0.26} _{-0.24}	59.9 ^{+11.2} _{-7.9}	0.69 ^{+0.10} _{-0.11}	1500	8.6 ^{+0.3} _{-0.5}
GW190814	25.8 ^{+1.0} _{-0.9}	6.09 ^{+0.06} _{-0.06}	23.2 ^{+1.1} _{-1.0}	2.59 ^{+0.08} _{-0.09}	0.00 ^{+0.06} _{-0.06}	0.24 ^{+0.04} _{-0.05}	0.05 ^{+0.009} _{-0.010}	25.6 ^{+1.0} _{-0.9}	0.28 ^{+0.02} _{-0.02}	19	24.9 ^{+0.1} _{-0.2}
GW190828.063405	57.5 ^{+7.5} _{-4.4}	24.8 ^{+3.3} _{-2.0}	31.8 ^{+5.8} _{-3.9}	25.9 ^{+4.4} _{-4.6}	0.19 ^{+0.15} _{-0.16}	2.22 ^{+0.53} _{-0.65}	0.40 ^{+0.09} _{-0.15}	54.5 ^{+6.9} _{-4.0}	0.76 ^{+0.06} _{-0.07}	520	16.2 ^{+0.2} _{-0.3}
GW190828.065509	34.1 ^{+5.3} _{-4.5}	13.3 ^{+1.2} _{-0.9}	23.8 ^{+7.2} _{-7.0}	10.2 ^{+3.3} _{-2.1}	0.08 ^{+0.16} _{-0.16}	1.66 ^{+0.63} _{-0.63}	0.31 ^{+0.10} _{-0.10}	32.9 ^{+5.7} _{-4.5}	0.65 ^{+0.09} _{-0.08}	640	10.0 ^{+0.3} _{-0.5}
GW190909.114149	71.2 ^{+54.3} _{-15.0}	29.5 ^{+17.5} _{-6.3}	43.2 ^{+50.7} _{-12.2}	27.6 ^{+13.0} _{-10.9}	-0.03 ^{+0.44} _{-0.36}	4.77 ^{+3.70} _{-2.86}	0.75 ^{+0.45} _{-0.37}	68.3 ^{+32.5} _{-14.4}	0.68 ^{+0.16} _{-0.16}	4200	8.1 ^{+0.4} _{-0.7}
GW190910.112807	78.7 ^{+9.5} _{-9.0}	33.9 ^{+4.3} _{-3.9}	43.5 ^{+7.0} _{-6.2}	35.1 ^{+6.3} _{-6.0}	0.02 ^{+0.19} _{-0.18}	1.57 ^{+1.07} _{-0.64}	0.29 ^{+0.17} _{-0.11}	75.0 ^{+8.7} _{-8.5}	0.70 ^{+0.08} _{-0.07}	10000	14.1 ^{+0.2} _{-0.3}
GW190915.235702	59.5 ^{+7.5} _{-6.2}	25.1 ^{+3.1} _{-2.6}	34.9 ^{+9.5} _{-6.2}	24.4 ^{+3.5} _{-4.0}	0.03 ^{+0.19} _{-0.24}	1.70 ^{+0.71} _{-0.64}	0.32 ^{+0.11} _{-0.11}	56.8 ^{+7.1} _{-5.8}	0.71 ^{+0.09} _{-0.11}	380	13.6 ^{+0.2} _{-0.3}
GW190924.021846	13.9 ^{+5.1} _{-0.9}	5.8 ^{+0.2} _{-0.2}	8.8 ^{+7.0} _{-2.0}	5.0 ^{+1.3} _{-1.9}	0.03 ^{+0.30} _{-0.09}	0.57 ^{+0.22} _{-0.22}	0.12 ^{+0.04} _{-0.04}	13.3 ^{+5.2} _{-1.0}	0.67 ^{+0.05} _{-0.05}	380	11.4 ^{+0.3} _{-0.4}
GW190929.012149	90.6 ^{+21.3} _{-14.1}	34.3 ^{+8.6} _{-6.5}	64.7 ^{+22.4} _{-19.9}	25.7 ^{+14.4} _{-9.7}	0.03 ^{+0.27} _{-0.27}	3.68 ^{+2.94} _{-1.68}	0.61 ^{+0.38} _{-0.24}	87.5 ^{+20.1} _{-14.1}	0.64 ^{+0.17} _{-0.17}	1800	9.8 ^{+0.8} _{-0.6}
GW190930.133541	20.3 ^{+9.0} _{-1.5}	8.5 ^{+0.5} _{-0.5}	12.3 ^{+12.5} _{-2.3}	7.8 ^{+1.7} _{-3.3}	0.14 ^{+0.31} _{-0.13}	0.78 ^{+0.37} _{-0.33}	0.16 ^{+0.07} _{-0.06}	19.3 ^{+9.3} _{-1.5}	0.72 ^{+0.07} _{-0.06}	1800	9.5 ^{+0.3} _{-0.5}

39 events

5)

Un réseau de détecteurs

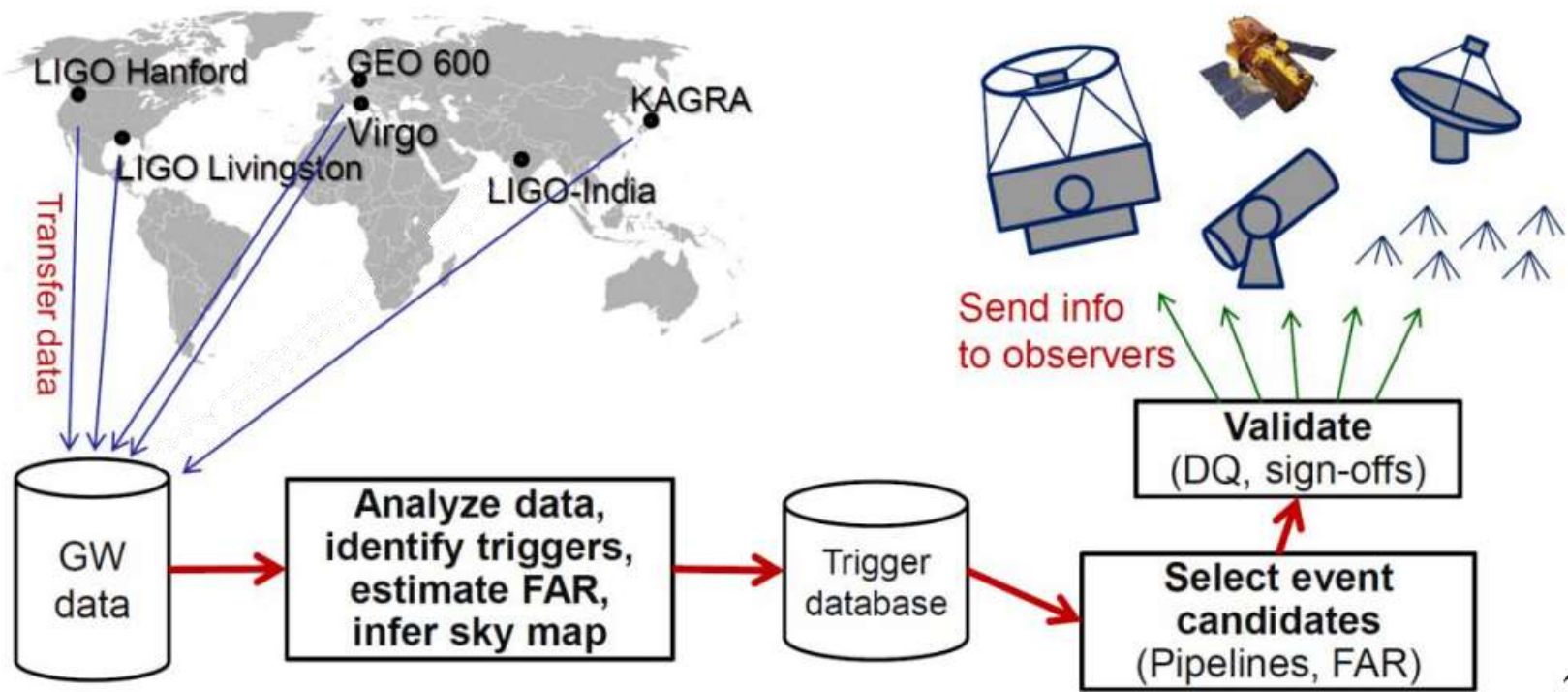


Un réseau de détecteurs



Un réseau de partenaires

- **Recherche de contreparties** au signal d'ondes gravitationnelles
 - Électromagnétiques
 - Neutrinos
 - Particules
- Des dizaines de télescopes partenaires



Les collaborations

● Virgo

- ◆ Italie (11), France (8), Espagne (3), Belgique (1), Pays-Bas (5), Germany (1), Hongrie (1), Pologne (1), Grece (1)
- ◆ ~650 membres
 - Développeurs des détecteurs
 - × Optique linéaire et non, Laser, Mécanique, Matériaux, Matière Condensée, Électronique, Optique Quantique
 - Operateurs des détecteurs
 - × Systèmes de contrôle
 - Analystes des données
 - × Développeurs des codes, Astrophysiciens
- ◆ 449 membres signent les articles de détection
 - Les étudiants sont membres de que ils commencent la thèse

Les collaborations

- LIGO (LIGO Scientific Community)
 - ◆ 18 pays, 108 institutions, ~ 1200+ chercheurs (~700 signataires des articles)



- ◆ 2 réunions par an entre LIGO, Virgo, KAGRA

4)

Un domaine en plein évolution

● LIGO et Virgo

◆ Prochaines upgrades (Advanced +)

- Prise de données prévu en 2013
- Amélioration sur l'optique (Lumière squizée), miroirs et filtrage sismique
 - × LIGO: déjà financé
 - × Virgo: en attente de l'arbitrage du CNRS et INFN

◆ Projets à longue termes

- Einstein Telescope (surtout Européen)
- Voyager (surtout Américaine)
- Cosmic Explorer (surtout Américaine)

Un domaine en plein évolution

- KAGRA

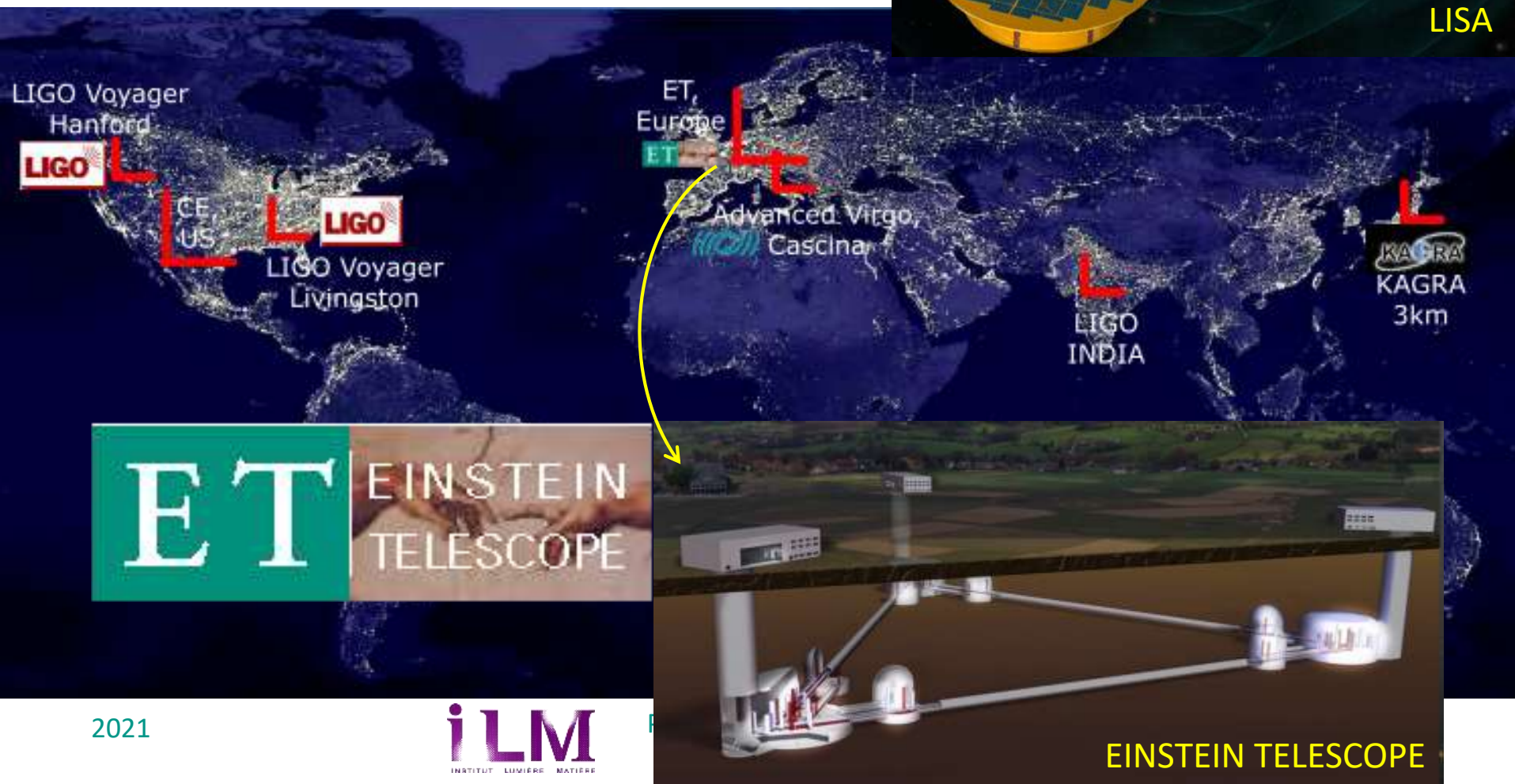
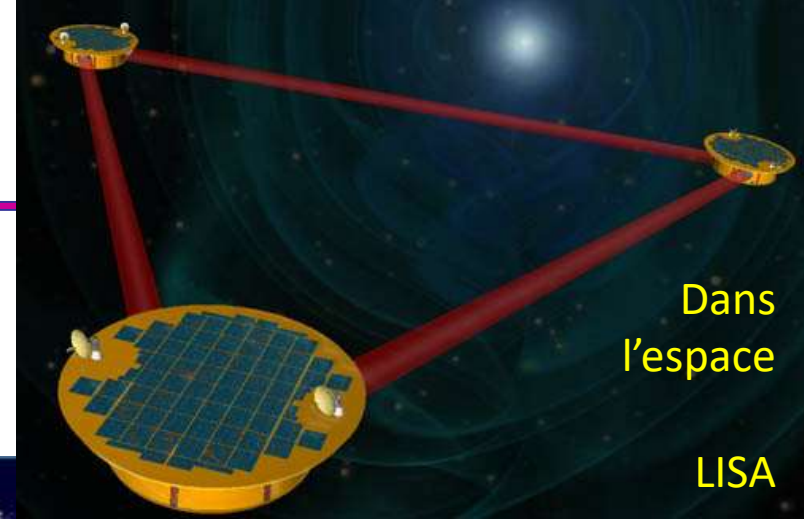
- ◆ Première détecteur cryogénique
- ◆ Prise de données: fin de O3 (2020)
- ◆ Prochaines upgrades
 - Pas encore décidé

- LISA

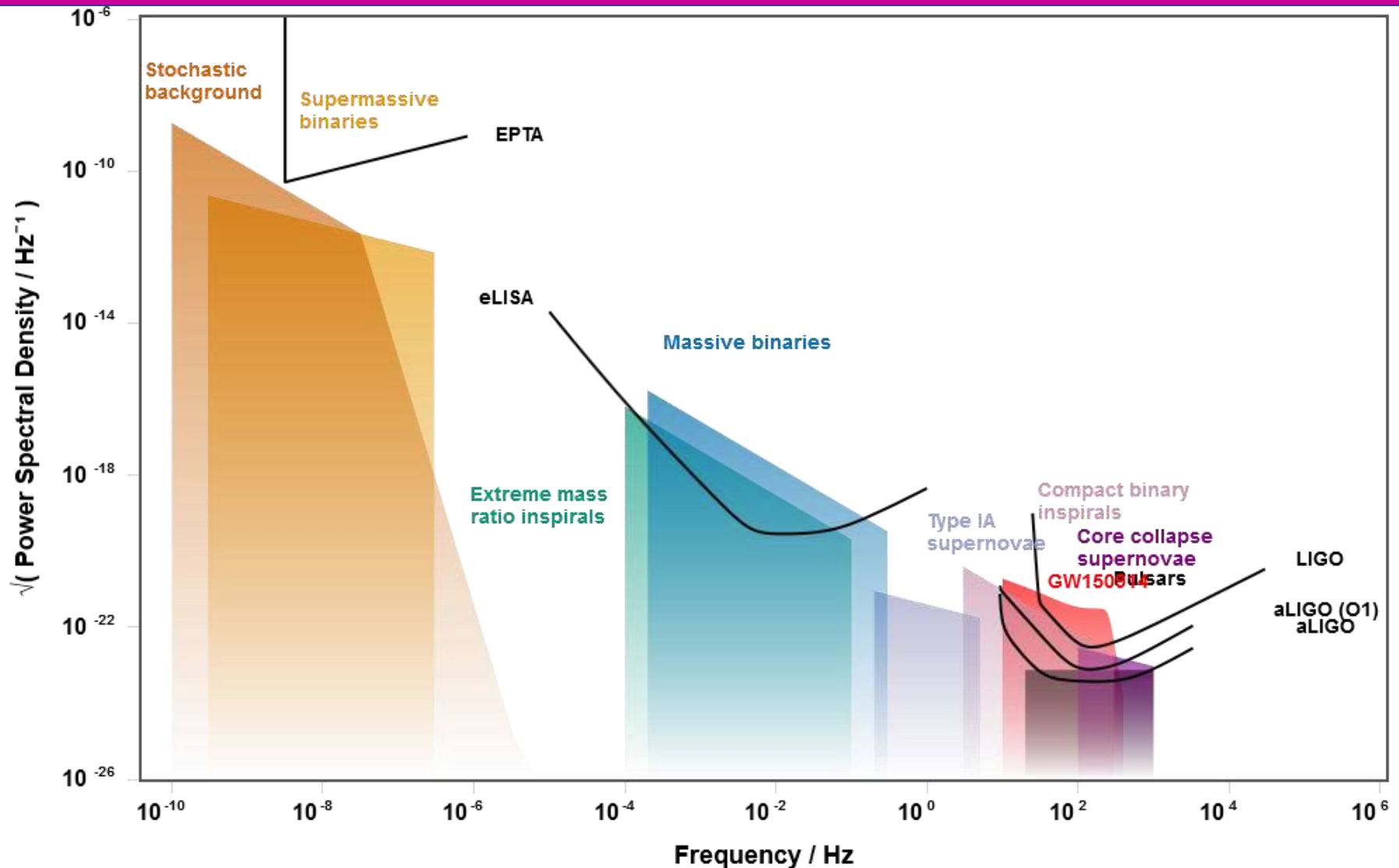
- ◆ Détecteur spatial
- ◆ Complémentarité:
très basse fréquences ($10^{-4} - 10^{-1}$ Hz)

Le future de l'Astronomie Gravitationnelle

- À l'écoute de tout l'Univers visible



La complémentarité des détecteurs



1916-2017 : un siècle de progrès

- **1916 : Prédiction des OG (Einstein)**

1957 : Conférence de Chapel Hill

- **1963 : Trous noirs de Kerr**

- **1990's : développements théoriques pour la coalescence de systèmes binaires** (Blanchet, **Damour**, Deruelle, Iyer, Will, Wiseman, etc.)
- **2000 : Idem pour le cas de systèmes binaires de 2 trous noirs** (Buonanno, **Damour**)
- **2006 : simulations de la fusion de deux trous noirs** (Baker, Lousto, Pretorius, etc.)

Théorie

Expérience

(Bondi, Feynman, Pirani, etc.)

- **1960's : premières barres de Weber**

- **1970 : premier prototype d'ITF (Forward)**
- **1972 : Etudes de faisabilité détaillées (Weiss)**
- **1974 : PSRB 1913+16 (Hulse & Taylor)**

- **Années 1980 : Prototypes (~10 m de long)** (Caltech, Garching, Glasgow, Orsay)

- **Fin des années 1980 : projets Virgo & LIGO**

- **Années 1990 : LIGO et Virgo financés**

- **2005-2011 : premières prises de données**

- **2007 : accord Virgo-LIGO – partage des données, analyses et publications communes**

- **2012 : financement des détecteurs avancés**

- **2015 : démarrage de LIGO avancé**
- **2017 : démarrage de Virgo avancé**

Découvertes !

1)

1916-2018 : un siècle de progrès

- 1916 : Prédictions des OG (Einstein)



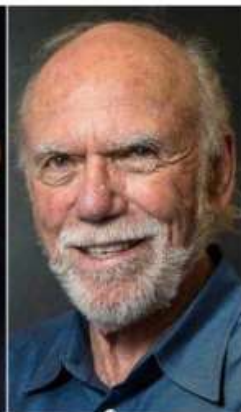
- 1963 : T



R. Weiss



K. Thorne



B. Barish



Alain Brillet



Thibaud Damour



Adalberto Giazotto
1940 - 2017



Les OG à Lyon

- iP2i (LMA)

- ◆ Réalisation des dépôts des couches optiques des très haute qualité

LMA a réalisé les miroirs de tous les interféromètres

- ◆ Métrologie des couches et substrats
- ◆ Simulation de l'interféromètre par propagation des fronts d'ondes

- ILM ÉQUIPE LUMINESCENCE - ILM - LUMIERE - PÉPÉ - SOPRANO
MATÉRIEL POUR L'ASTRONOMIE GÉOMÉTRIQUE

- ◆ Étude du bruit thermique dans les matériaux amorphes et cristallins
- ◆ Simulation du dépôt et des pertes mécaniques par Molecular Dynamics
- ◆ Développement de la technologie du saphir pour les substrats et le suspensions

- iP2i

- ◆ Analyse des données
- ◆ Fonctionnement du détecteur Virgo

Ce cours

- Objectifs

- ◆ Donner un niveau introductif sur les différents aspects de cette nouvelle science
- ◆ Rendre plus compréhensibles les articles de la collaboration LIGO/Virgo
- ◆ Permettre aux étudiants intéressés à s'orienter dans la choix des sujets de recherche

- L'évaluation

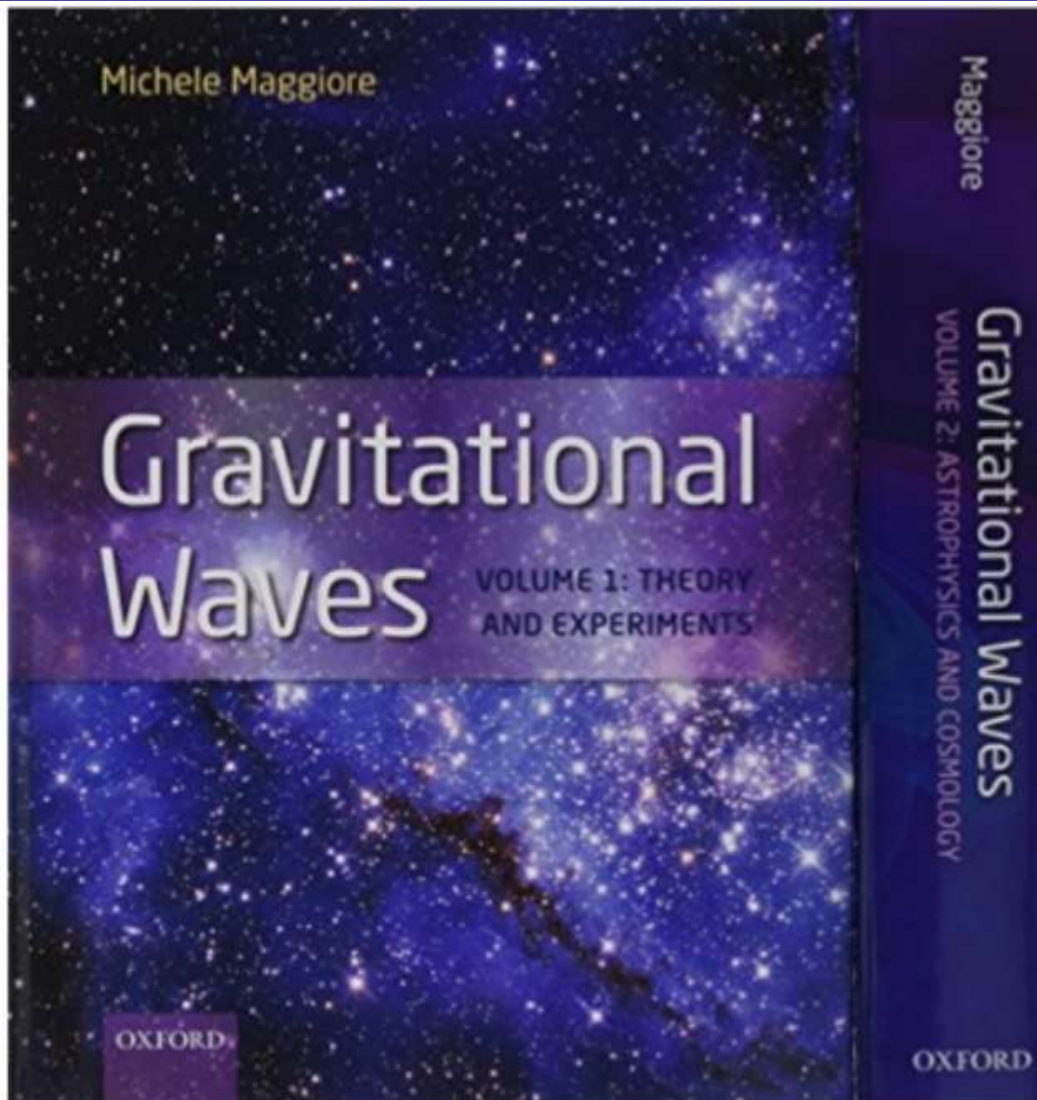
- ◆ Orale: présentation d'un article de la collaboration

Le plan du cours

<https://univ-lyon1.webex.com/meet/gianpietro.cagnoli>

	DATE	Disponibilité Gianpietro	WHAT
1	Lundi Jan 25 9h-12h		1. Introduction au domaine de l'Astronomie Gravitationnelle 2. Propriétés des OG : théorie linéaire 1
2	Lundi Fev 1 9h-12h		3. Propriétés des OG : théorie linéaire 2 4. Propriétés des OG : les sources des ondes 1
3	Lundi Fev 8 9h-12h		5. Propriétés des OG : les effets des ondes 2
	Lundi Fev 15 9h-12h	Vacances d'hiver	
4	Lundi Fev 22 9h-12h		6. Les détecteurs des OG : les interféromètres géants
5	Lundi Mar 1 9h-12h		7. Les détecteurs des OG : les bruits fondamentaux
6	Lundi Mar 8 9h-12h		8. Le problème des matériaux dans un détecteur des OG
7	Lundi Mar 15 9h-12h	Séance disponible sans programme	

Livre de texte



Crédits

- 1) Nicolas Arnaud, LAL, présentation aux étudiants M1 de Lyon à EGO
- 2) arXiv:1811.12940v2 [astro-ph.HE] 18 Dec 2018
- 3) arXiv:1811.12907v2 [astro-ph.HE] 16 Dec 2018
- 4) <https://www.ligo.org/about.php>
- 5) <https://arxiv.org/abs/2010.14527>