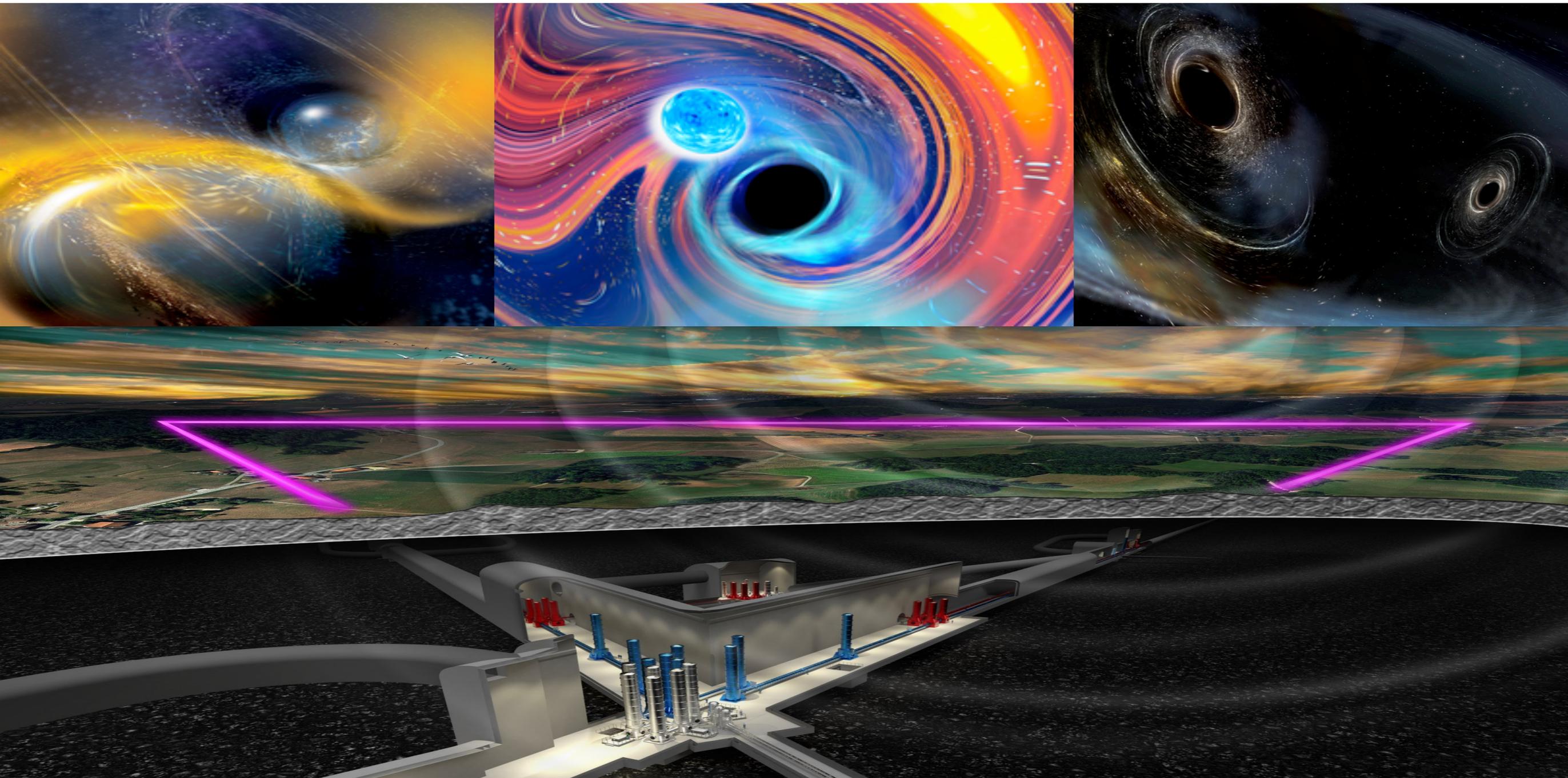


La physique des ondes gravitationnelles



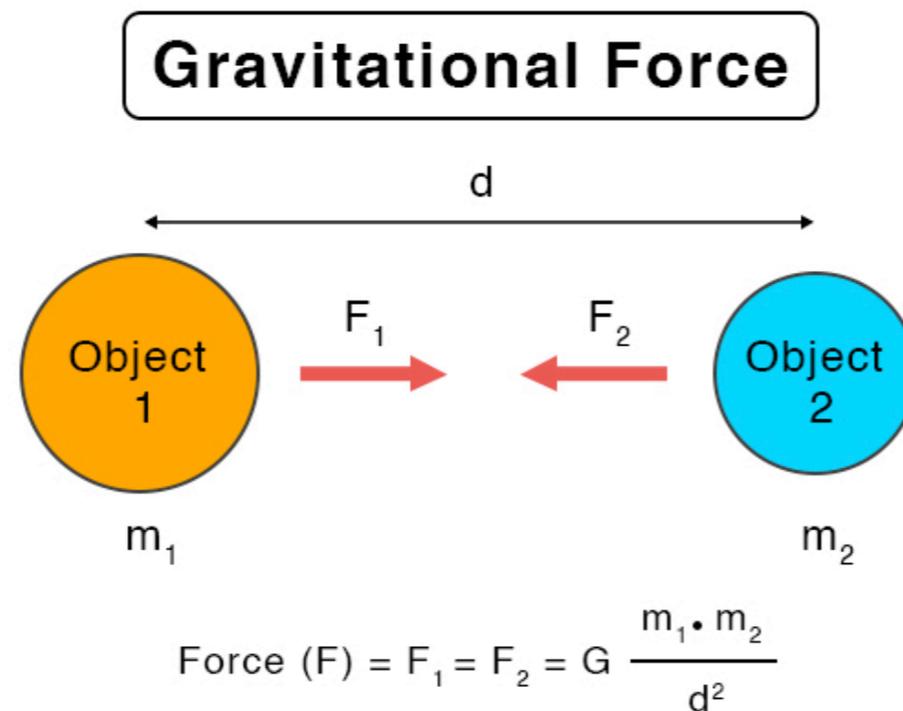
Ed Porter
APC/CNRS

ET France Meets Industry, APC Paris, 23 March 2023



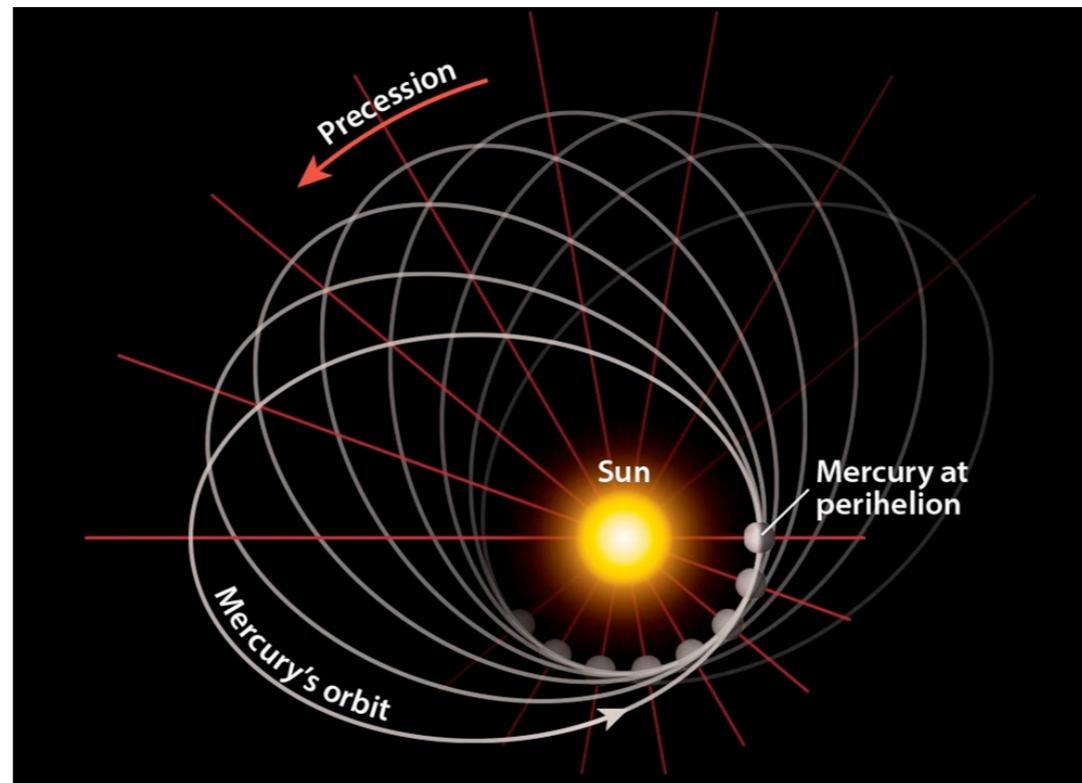
Que sont les ondes gravitationnelles ?

- **1684: Newton formule la loi de la gravité universelle:**
 - La gravité est une force d'attraction entre deux corps



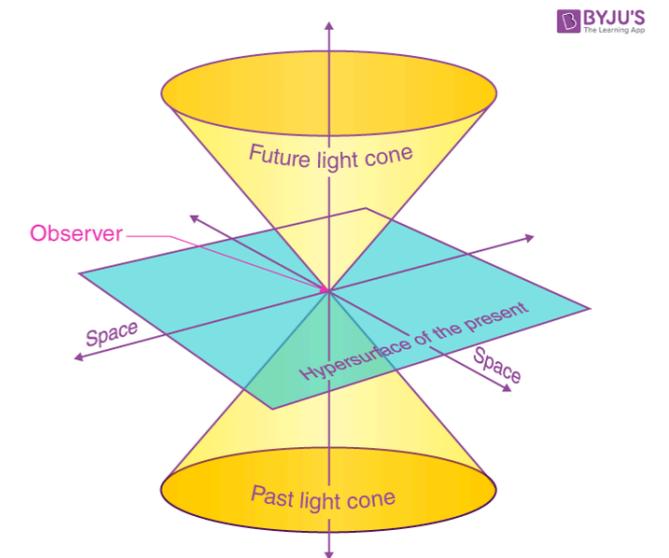
Que sont les ondes gravitationnelles ?

- 1684: Newton formule la loi de la gravité universelle:
- **1859: Le Verrier observe une avancée du périhélie de Mercure:**
 - inexplicquée par la théorie de Newton



Que sont les ondes gravitationnelles ?

- 1684: Newton formule la loi de la gravité universelle:
- 1859: Le Verrier observe une avancée du périhélie de Mercure:
- **1905: Einstein formule la relativité restreinte:**
 - Les lois de la physique ont la même forme dans tous les référentiels galiléens
 - La vitesse de la lumière dans le vide a la même valeur dans tous les référentiels galiléens
 - sans gravité incluse



Que sont les ondes gravitationnelles ?

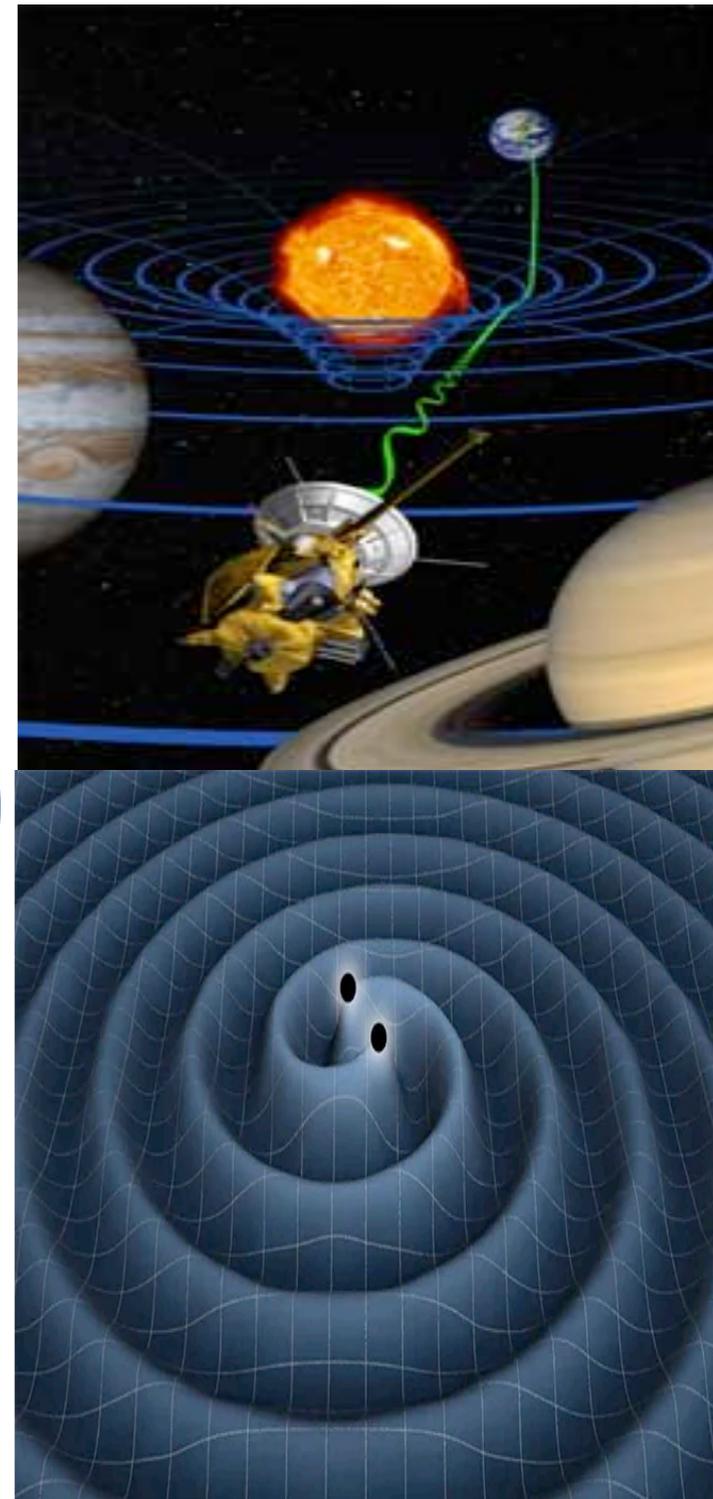
- 1684: Newton formule la loi de la gravité universelle:
- 1859: Le Verrier observe une avancée du périhélie de Mercure:
- 1905: Einstein formule la relativité restreinte:
- **1915: Einstein formule la relativité générale:**
 - théorie relativiste de la gravité

Que sont les ondes gravitationnelles ?

- **La relativité générale:**

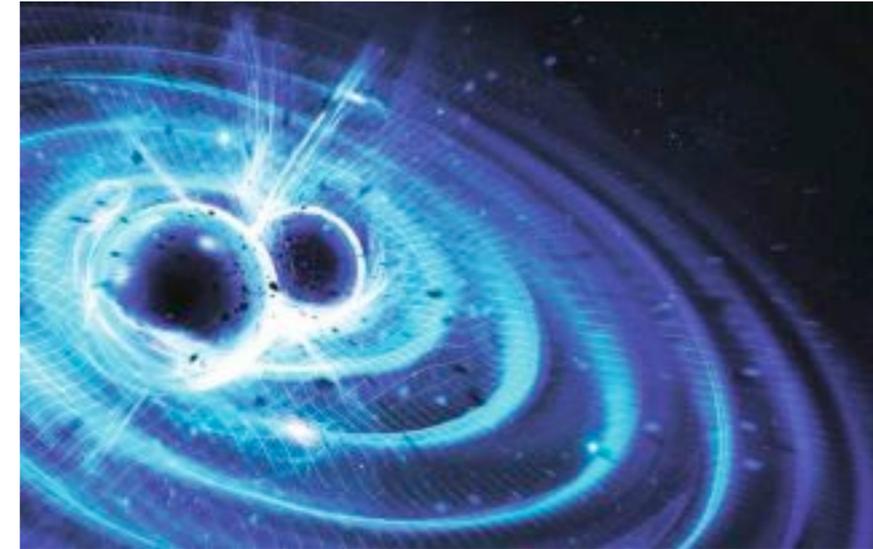
- espace et temps = espace-temps
- la gravité est la manifestation de la courbure de l'espace-temps
- Des événements violents ou des accélérations massives peuvent provoquer des oscillations de la courbure de l'espace-temps

- Prédictions:
 - la déviation des positions apparentes des étoiles par le Soleil (1919 A. Eddington)
 - prédit une rotation lente de l'ellipse de révolution de Mercure
 - La gravitation doit ralentir le temps mesuré à distance, modifiant ainsi les fréquences et les longueurs d'onde des rayonnements reçus et émis à distance (1954 Pound & Rebka)
 - lentilles gravitationnelles (1979 Walsh, Carswell, Weylmann)
 - ondes gravitationnelles [...]



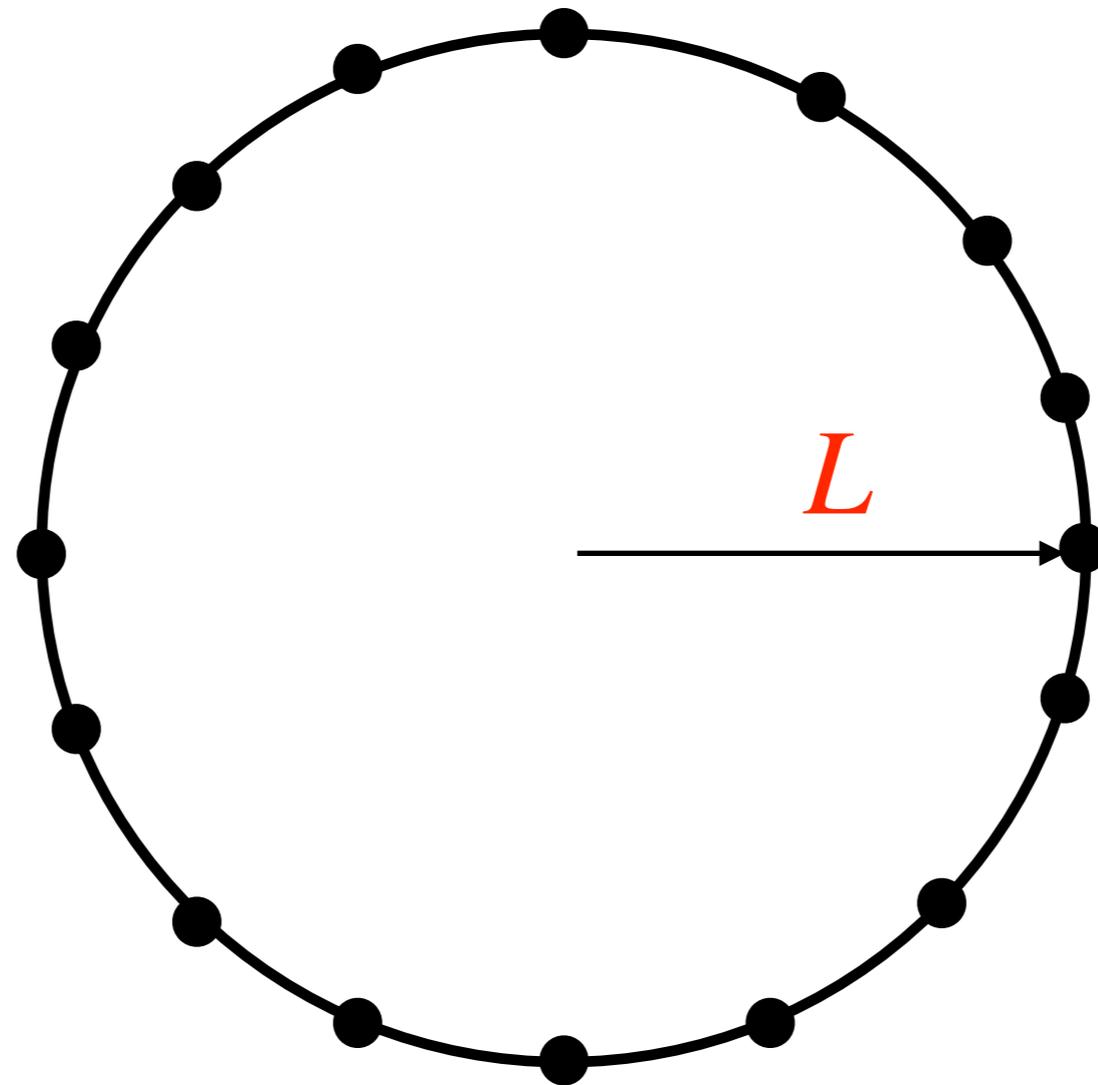
Que sont les ondes gravitationnelles ?

- **Les ondes gravitationnelles:**
 - se propagent à la vitesse de la lumière
 - ont deux polarisations (comme les photons)
 - sont très faibles
 - interagissent faiblement avec la matière



Que sont les ondes gravitationnelles ?

anneau de particules en chute libre sans perturbation



Que sont les ondes gravitationnelles ?

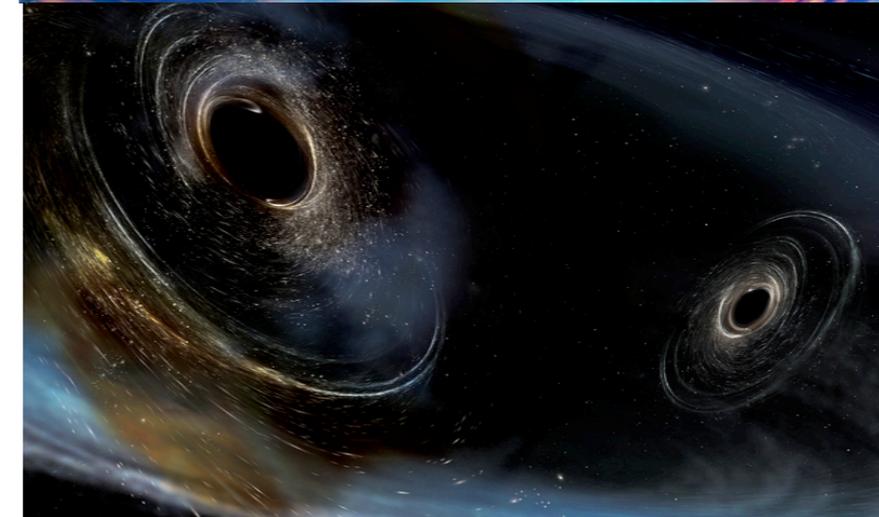
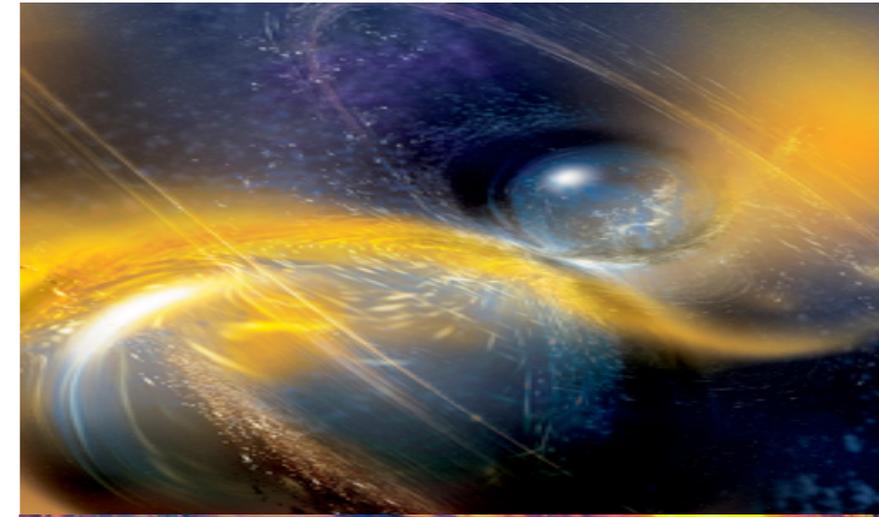
anneau de particules en chute libre pendant le passage des OG



$$\frac{\Delta L}{L} \sim h = 10^{-21}$$

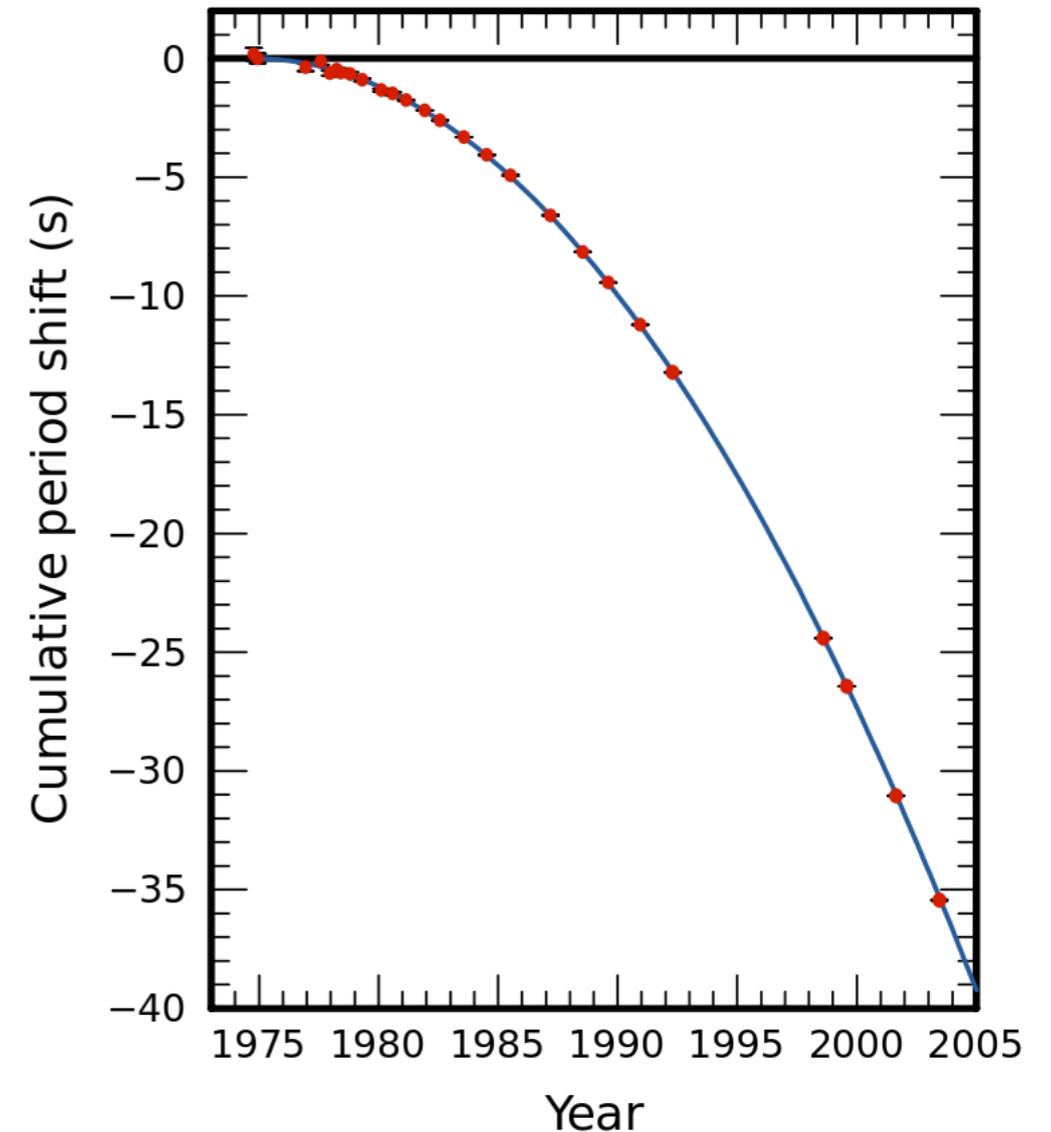
Que sont les ondes gravitationnelles ?

- **Sources des OG pour ET:**
 - binaires des étoiles à neutrons
 - étoiles à neutrons + trou noir
 - binaires des trous noirs



Détection indirecte

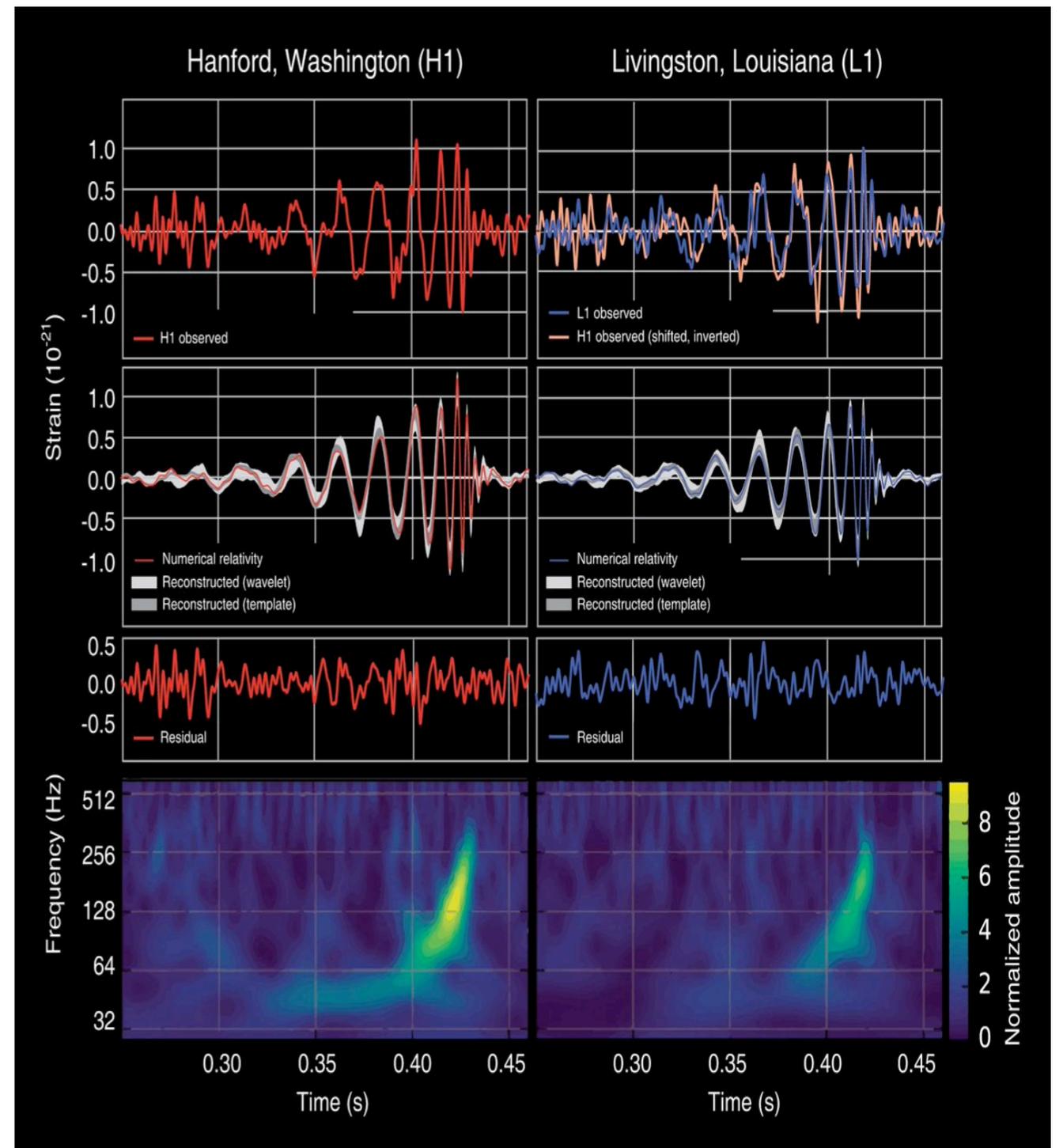
- **1974: Hulse & Taylor:**
 - Observation d'un pulsar binaire
 - Einstein a prédit que l'orbite d'un système binaire se dégraderait par l'émission d'OGs
 - des observations (points rouges) correspondent à la prédiction de la RG (ligne bleue)



Première détection directe

- **GW150914**

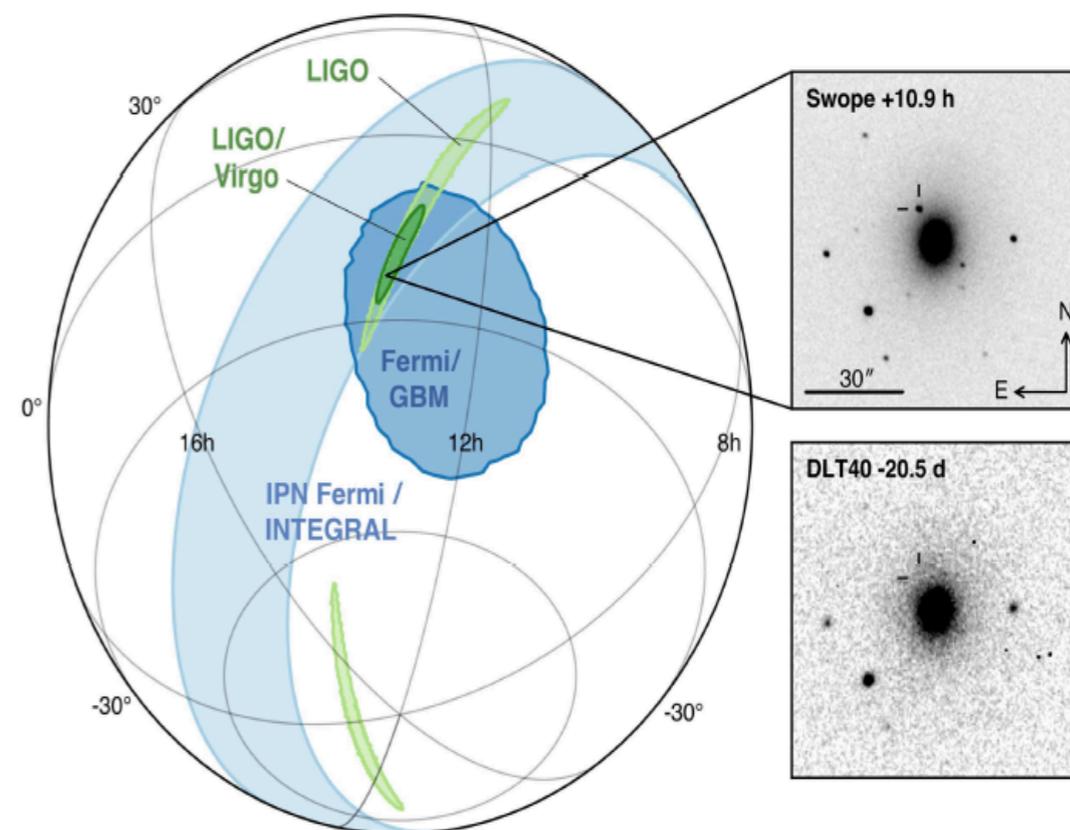
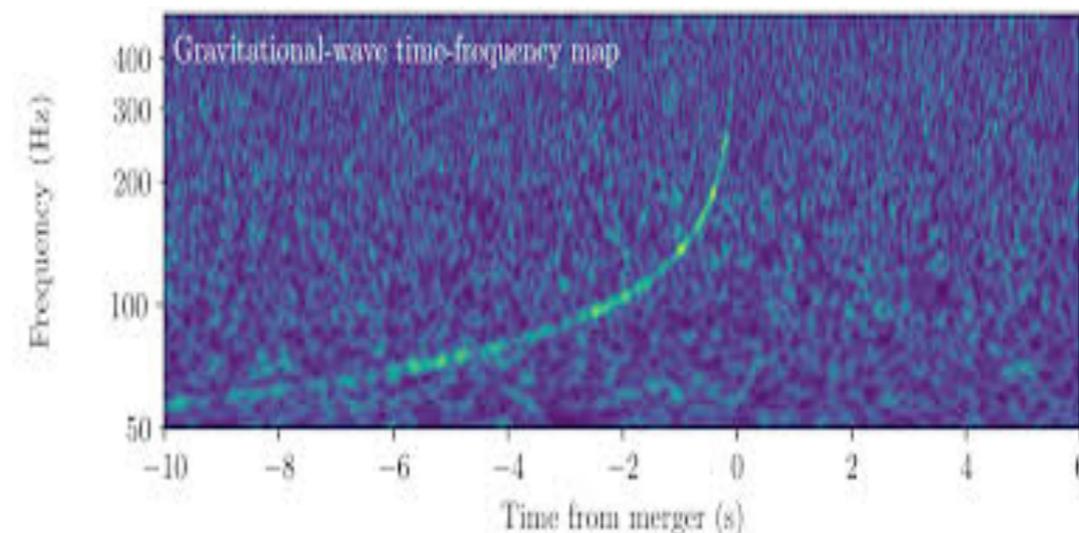
- binaires des trous noirs
- vérification finale de la RG exactement 100 ans plus tard



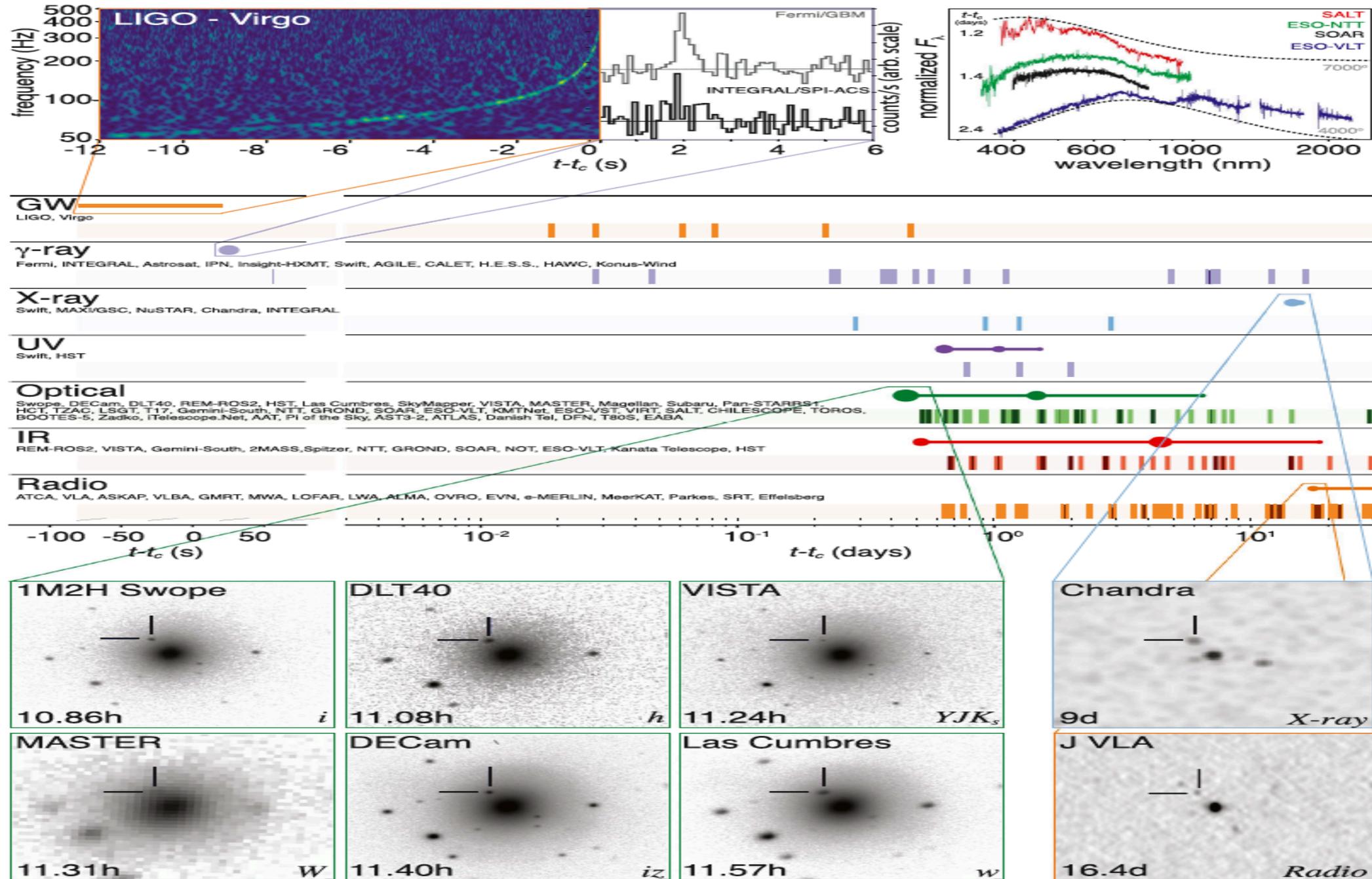
Détection la plus significative

- **GW170817**

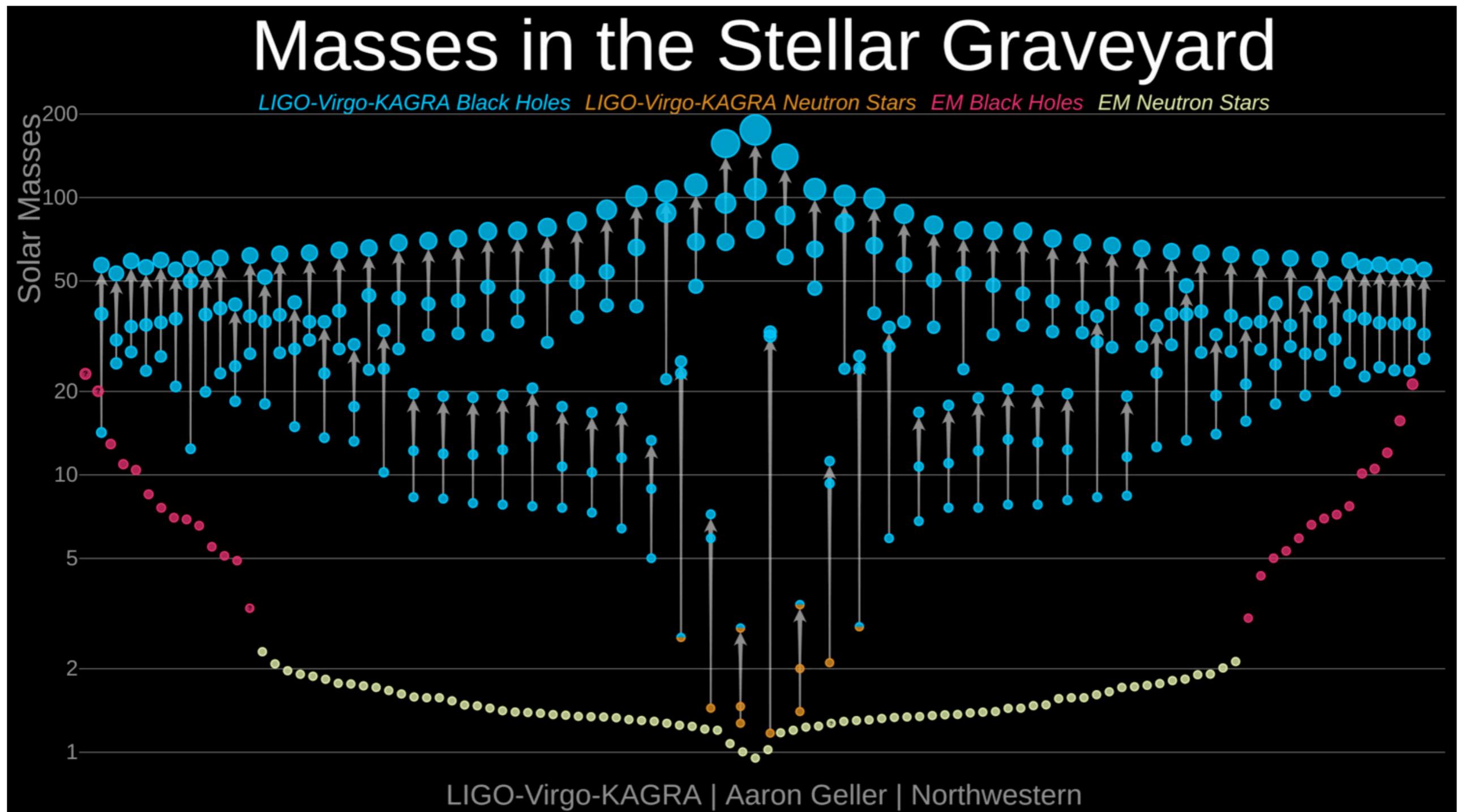
- binaires des étoiles à neutrons
- Contrepartie EM (L'article décrivant les observations multi-messagers est coécrit par près de 4 000 astronomes (environ un tiers de la communauté astronomique mondiale) de plus de 900 institutions, utilisant plus de 70 observatoires sur les 7 continents et dans l'espace.)
- des sources significatives d'éléments plus lourds que le fer, y compris l'or et le platine (autrefois attribués exclusivement aux explosions de supernova)
- vérification que les GW se propagent à la vitesse de la lumière
- a exclu de nombreuses théories alternatives de la gravité
- estimation de la constante de Hubble
- estimation de l'équation d'état nucléaire



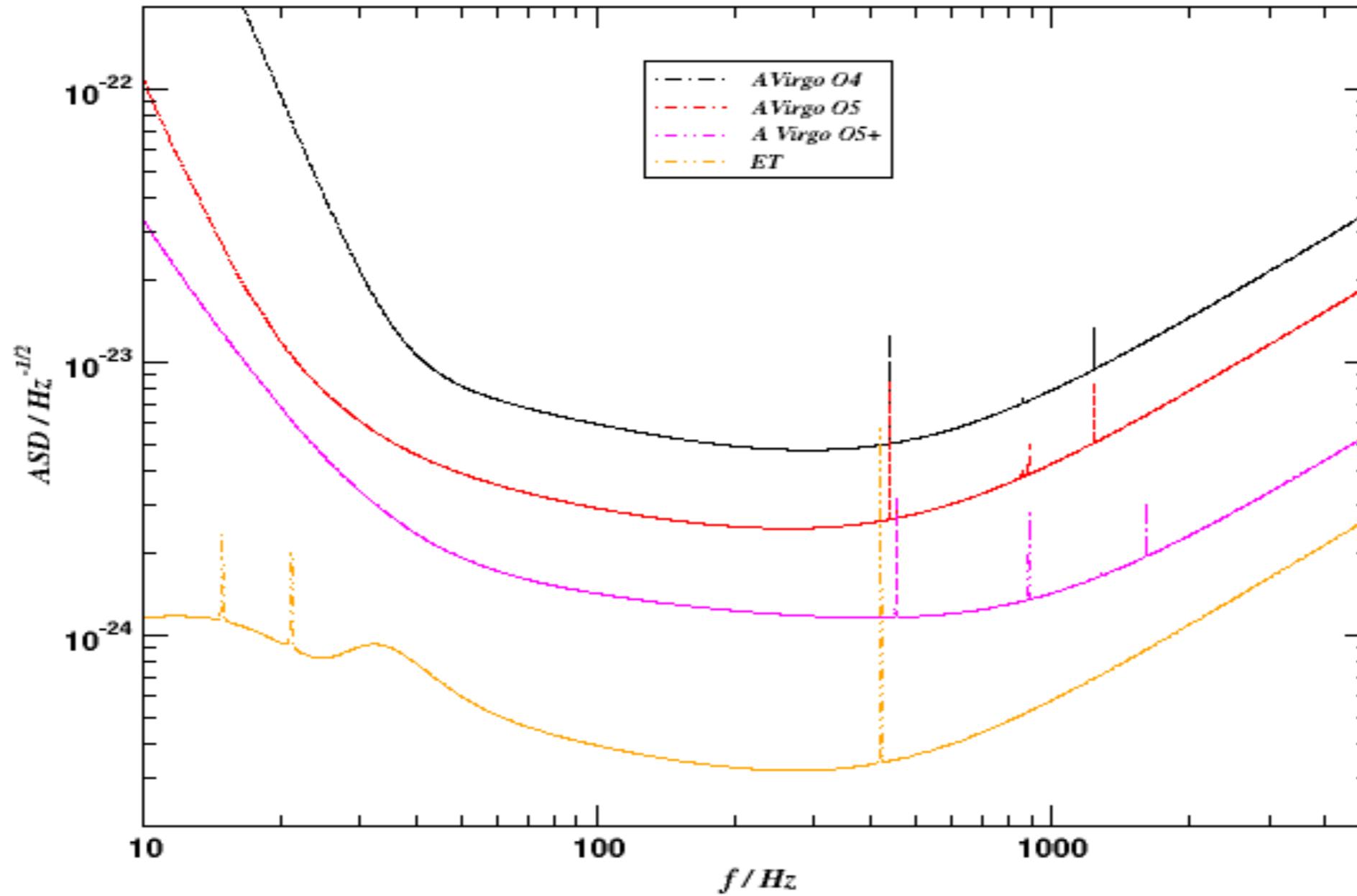
Détection la plus significative



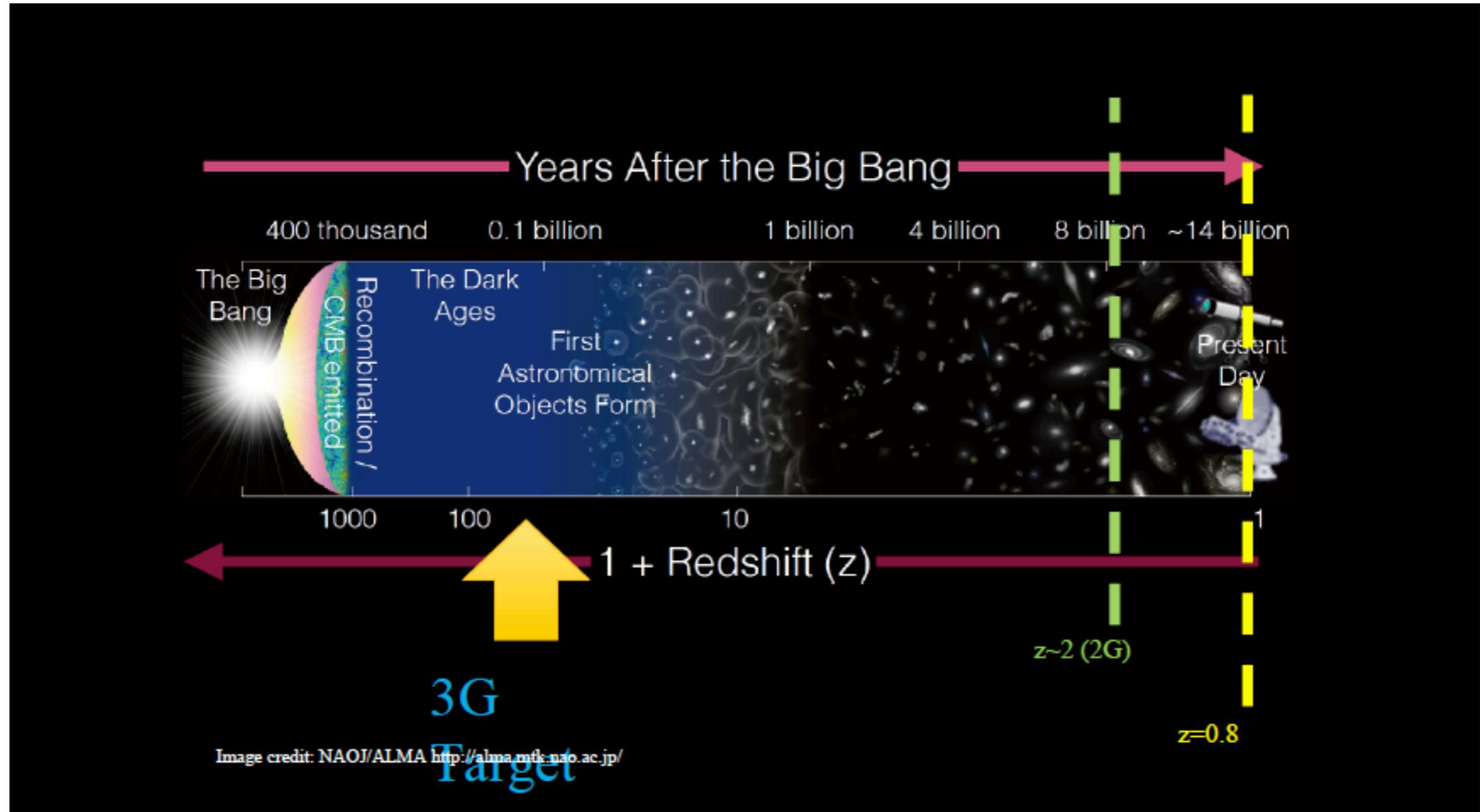
Situation actuelle avec LVK



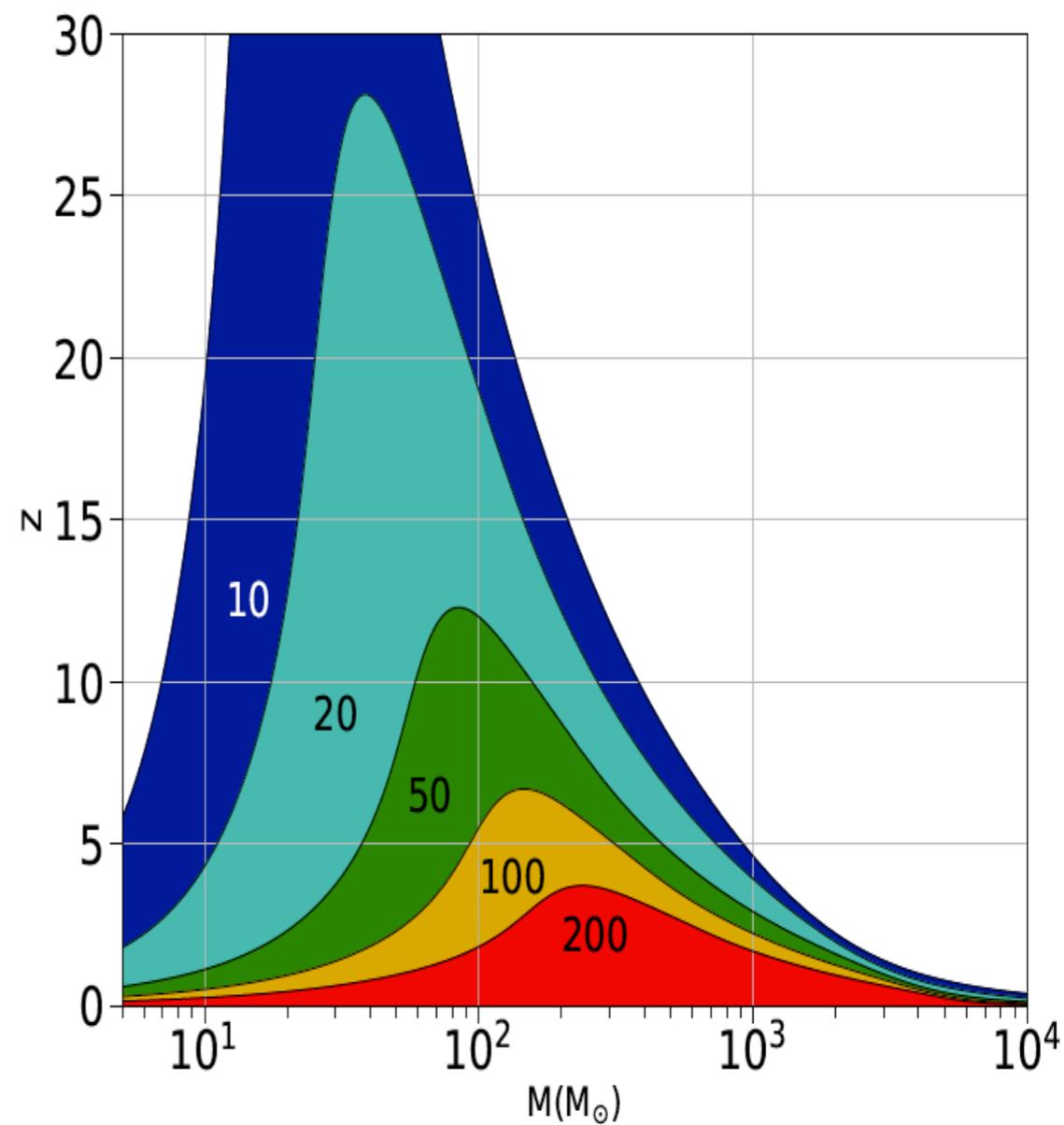
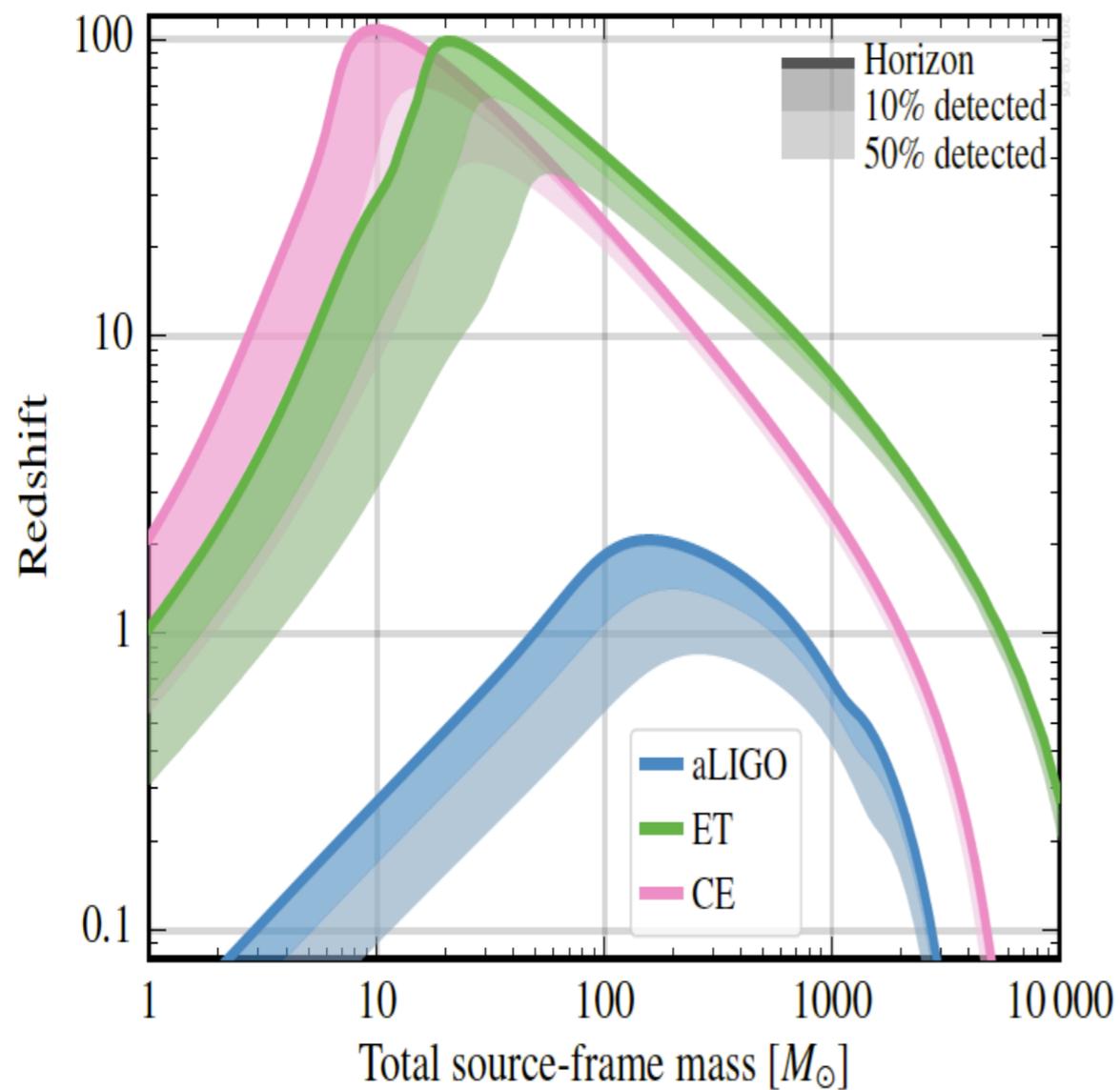
OG avec ET



OG avec ET



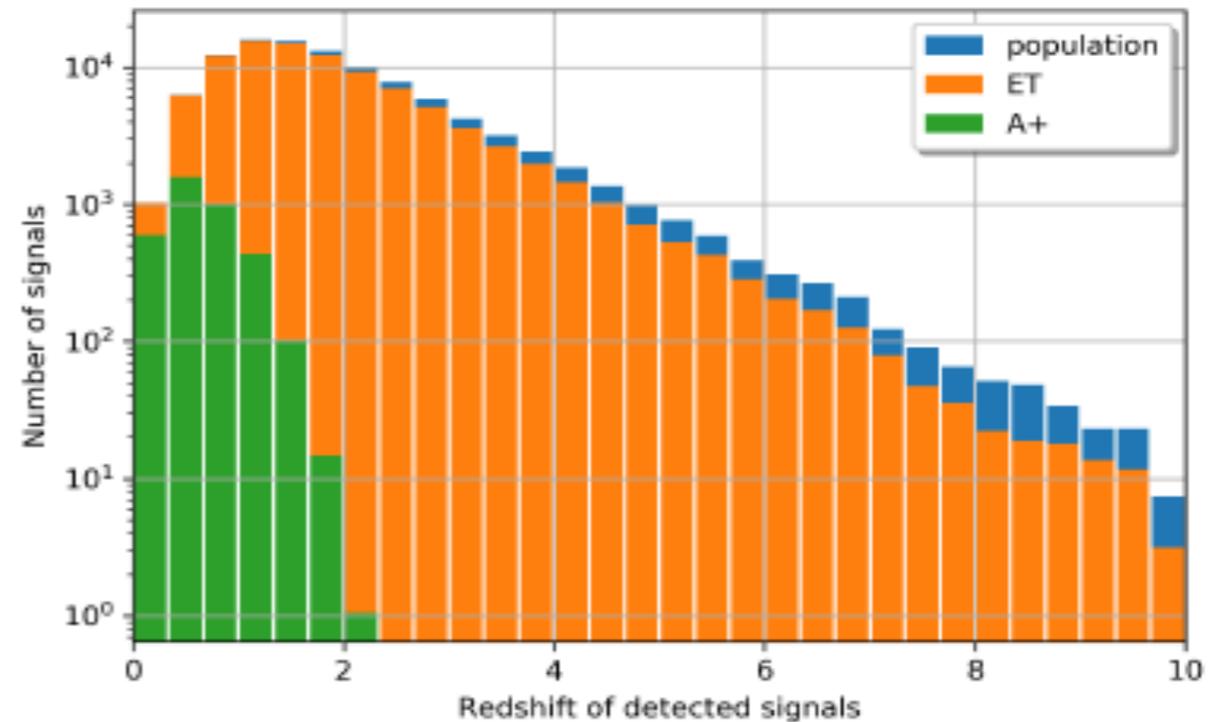
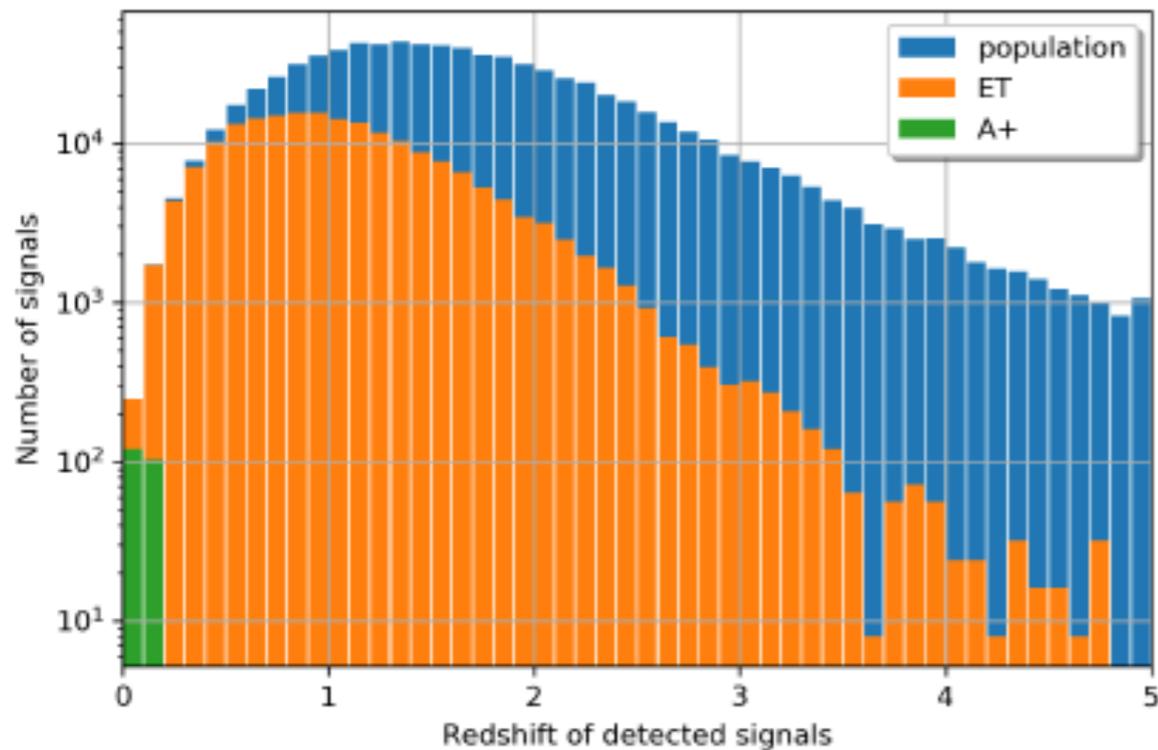
OG avec ET



OG avec ET

BINARY NEUTRON-STAR MERGERS

BINARY BLACK-HOLE MERGERS



- 10^{5-6} BBH/an jusqu'à $z = 50$
- 10^{4-5} BNS/an jusqu'à $z = 2$
- 10-100 contrepartie EM possible / an

OG avec ET

- Les données ET ne seront pas volumineuses - le stockage et le transfert ne poseront pas de problème.
- En revanche, l'exploitation scientifique des données nécessitera des quantités massives de ressources informatiques.
- Au cours des dix prochaines années, nous aurons besoin de:
 - algorithmes plus avancés basés sur l'apprentissage automatique, IA, etc.
 - l'application de technologies matérielles avancées, l'informatique distribuée, etc. (CPUs, GPUs,)



Le scénario de l'OG/EM à l'horizon 2030+



Merci!

