

Implication des mesures sur les ondes gravitationnelles en physique, astrophysique et cosmologie

Damir Buskulic



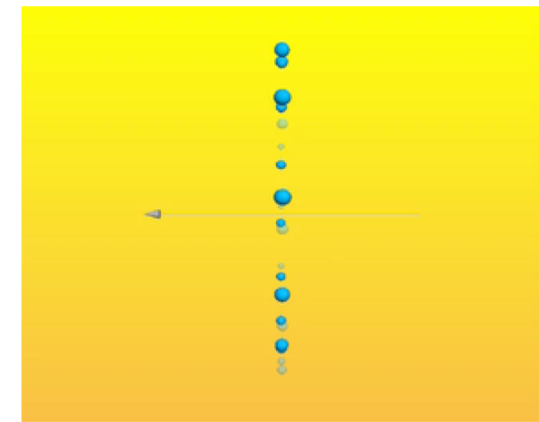
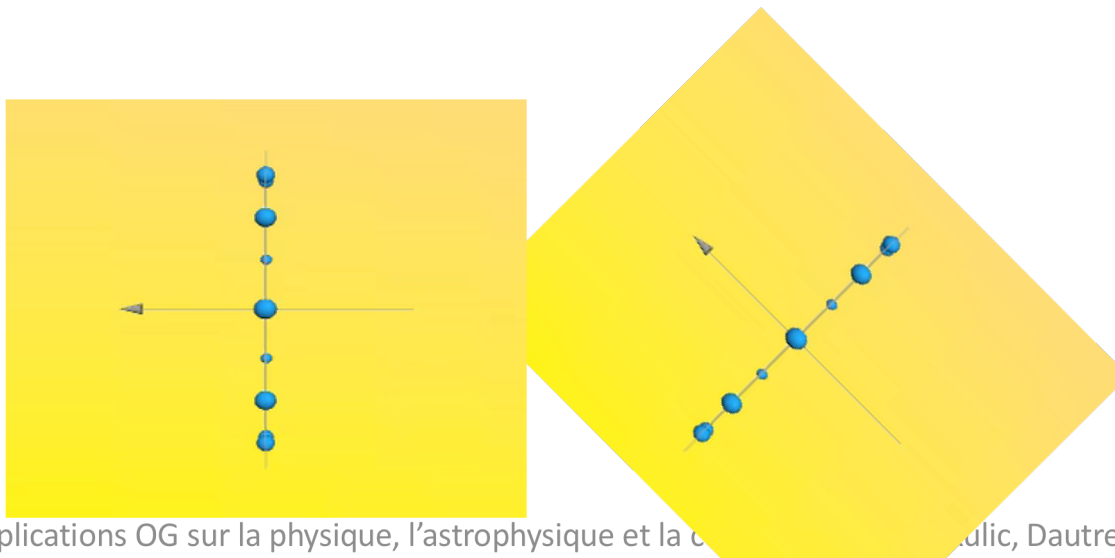
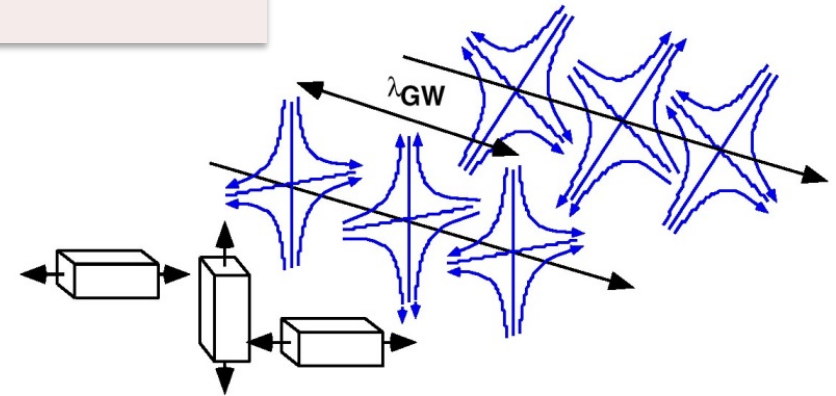
Dautreppe 2018

5 décembre 2018

Ondes gravitationnelles en RG

$$h_{\mu\nu} = A_{\mu\nu} \cdot e^{-i(\vec{k} \cdot \vec{x} - \omega \cdot t)}$$

- ▶ Dans le vide
 - ▶ Onde plane
 - ▶ Célérité = c (idem lumière)
- ▶ 2 polarisations
 - ▶ Tournées à 45° l'une par rapport à l'autre
- ▶ Effet sur un ensemble de masses « test » (libres)

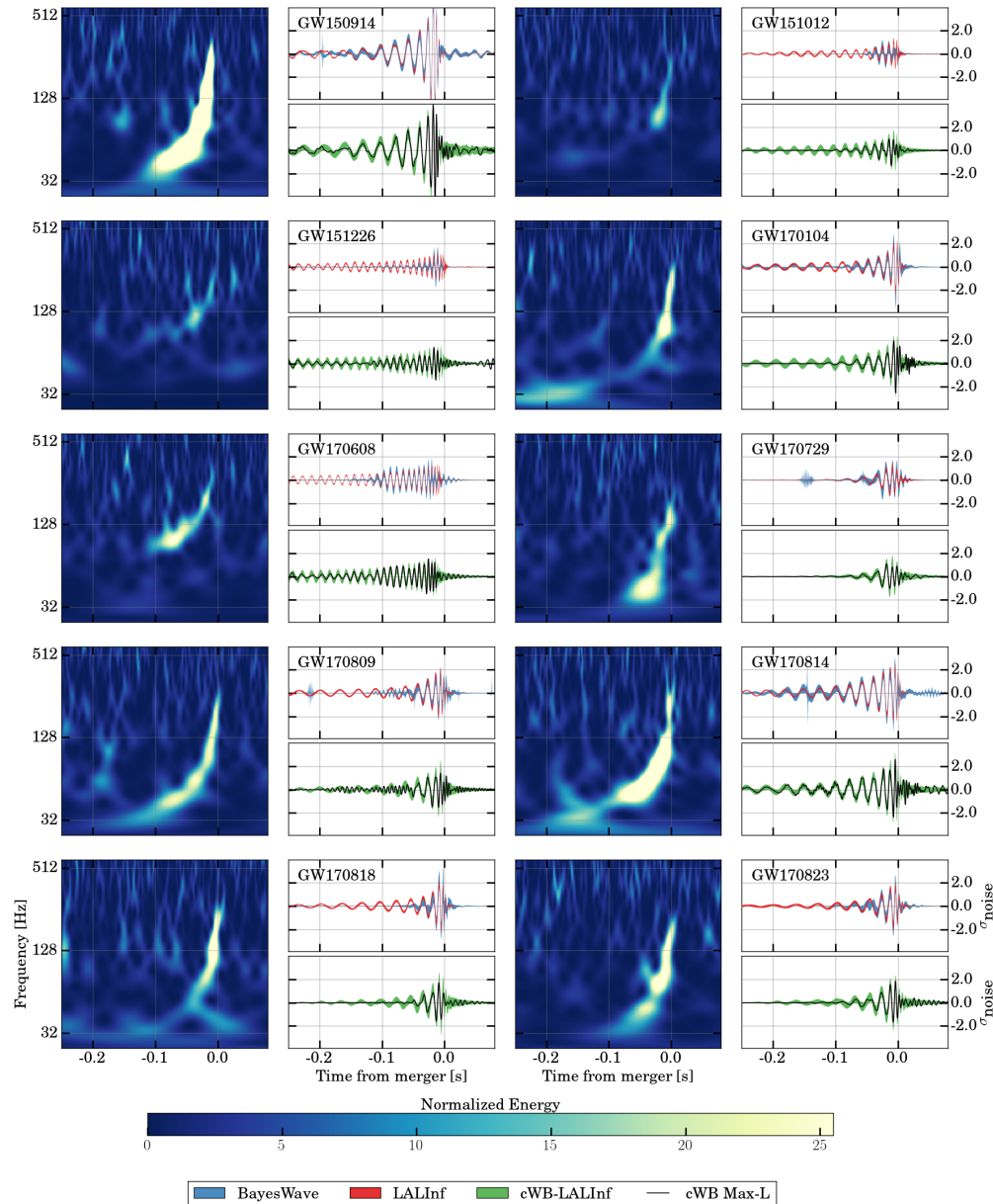


$$h_{\mu\nu} = h_+(t - z/c) + h_x(t - z/c)$$



Les trous noirs détectés et la physique/astrophysique associée

Catalogue des détections TN binaires dans les runs O1 et O2



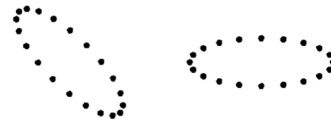
« La » première détection, GW150914, prix Nobel pour Weiss, Barish et Thorne, a ouvert la nouvelle ère de l'astronomie gravitationnelle

Certains tests impossibles sans Virgo !

Tests de la polarisation de l'onde gravitationnelle

- ▶ Relativité Générale

- ▶ Deux modes de polarisation



- ▶ Théories métriques générales de la gravité

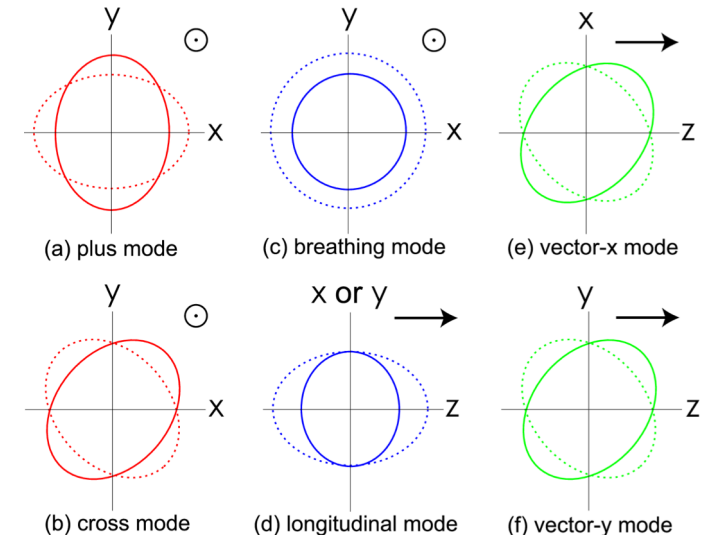
- ▶ 6 modes possibles

- ▶ Nouveaux tests possibles avec GW170814

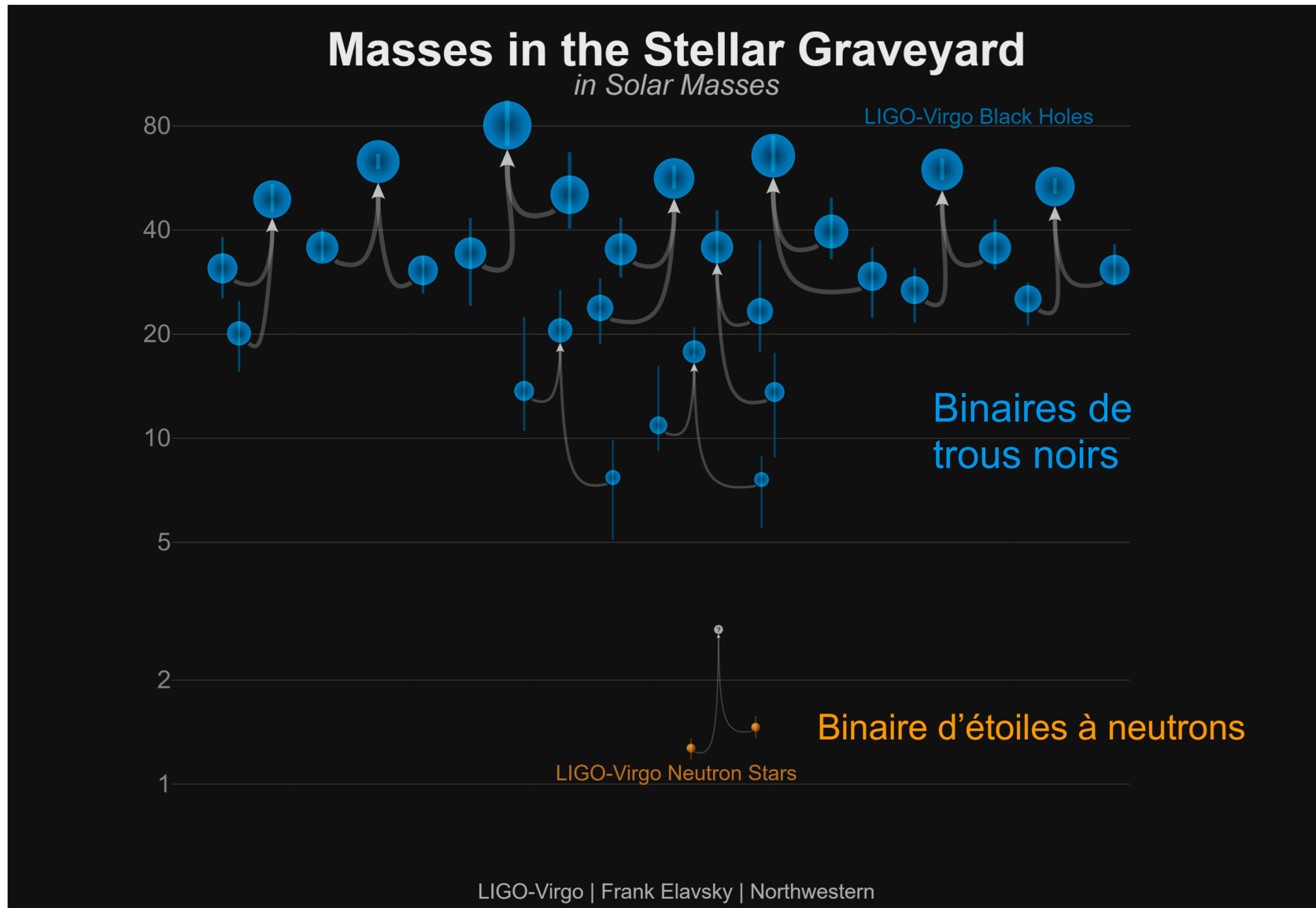
- ▶ Événement avec les deux détecteurs LIGO + Virgo
- ▶ Un interféromètre est sensible à la projection sur le mode « + » (vu localement)
- ▶ Plusieurs détecteurs avec différentes orientations
 - ▶ Etude de la polarisation de l'OG

- ▶ **Résultat : les modes « + » et « x » purs sont favorisés par rapport aux polarisations scalaires/vecteur pures**

- ▶ Pas encore testé les mélanges



Masses des binaires d'objets compacts



Taux de coalescence des binaires de TN

- ▶ Catalogue de 10 événements détectés pendant les runs O1 et O2
- ▶ Taux de coalescence estimé

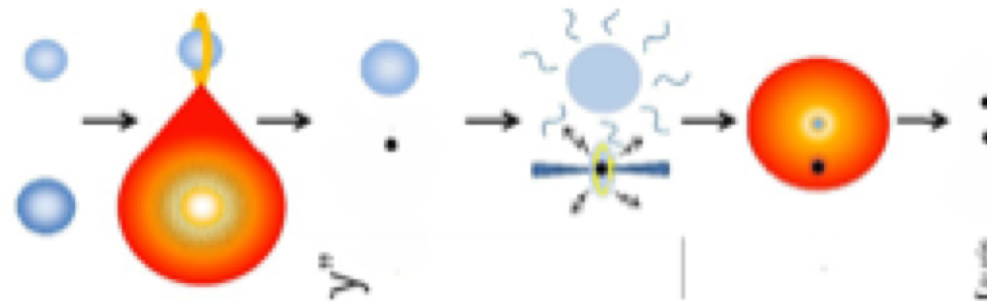
$$R = 52.9^{+55.6}_{-27.0} \text{ Gpc}^{-3} \text{ yr}^{-1}$$

- ▶ Marginalisation sur les incertitudes liées à la population de binaires de trous noirs
 - ▶ Distribution intrinsèque de masses
 - ▶ Distribution de spins
 - ▶ Evolution en fonction du redshift
- ▶ Le résultat devrait s'améliorer avec l'augmentation de la taille du catalogue

Implications en astrophysique

Formation et origine de la binaire de trous noirs

- ▶ Formation « dans le champ »
 - ▶ Evolution d'une binaire d'étoiles massives
 - ▶ Modèles : spins des TN devraient être alignés

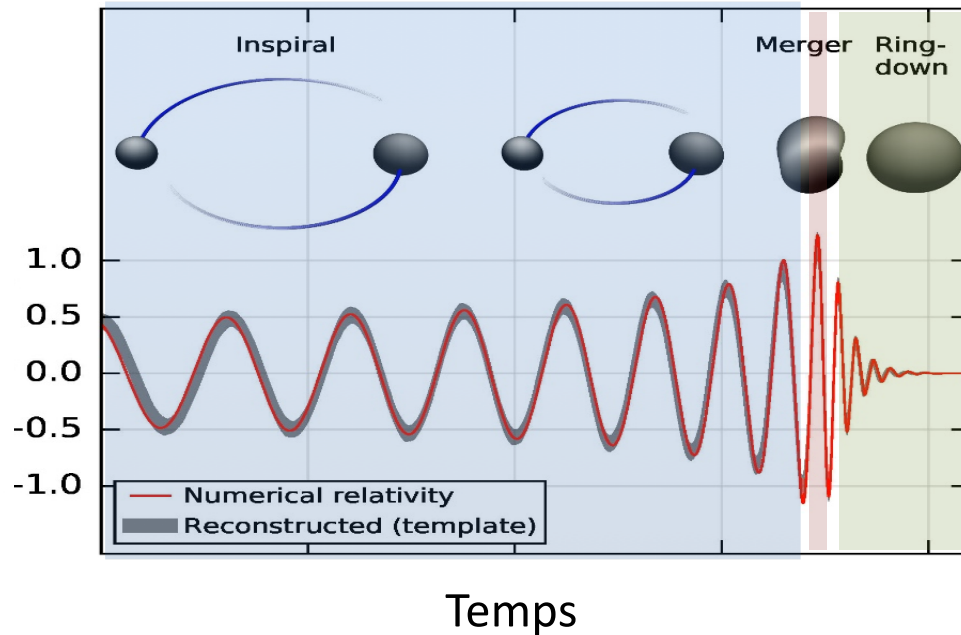


- ▶ Capture dans un environnement dense (amas globulaire)
 - ▶ Interaction à trois corps, l'un d'entre eux est éjecté
 - ▶ Spins désalignés
 - ▶ Semble favorisé par les données

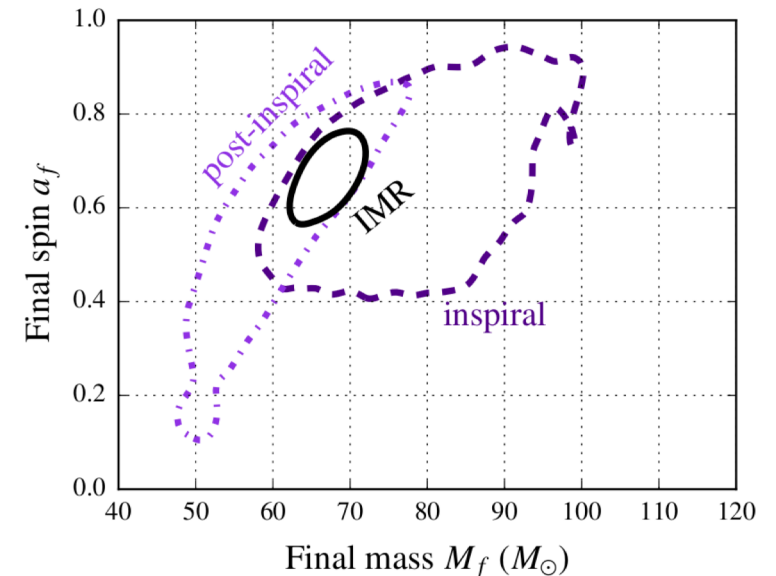


Tests de la Relativité Générale

► Test de cohérence de la forme d'onde

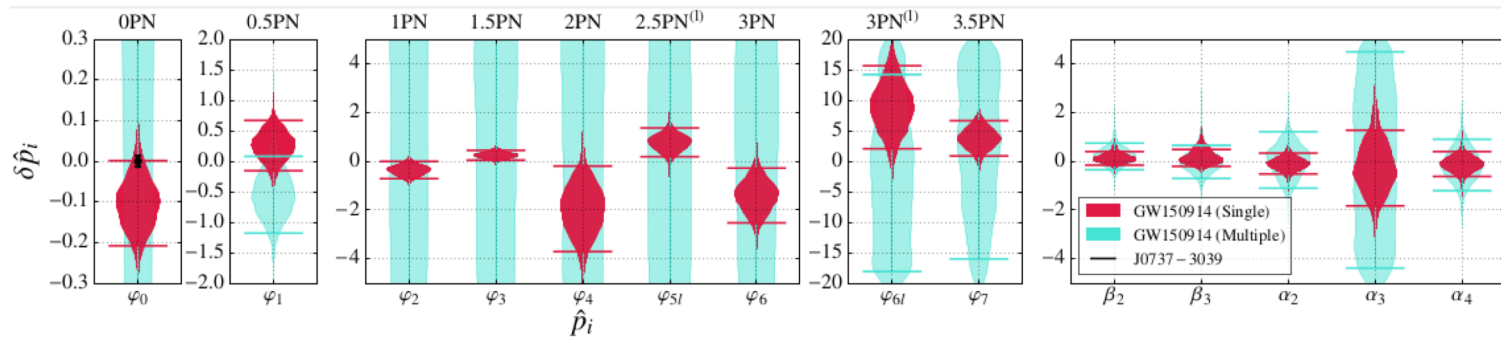


- IMR = Inspiral-Merger-Ringdown
- Estime et compare les masses et spins finals avec
 - La phase spiralante seule
 - La phase de relaxation seule
 - Toute la forme d'onde



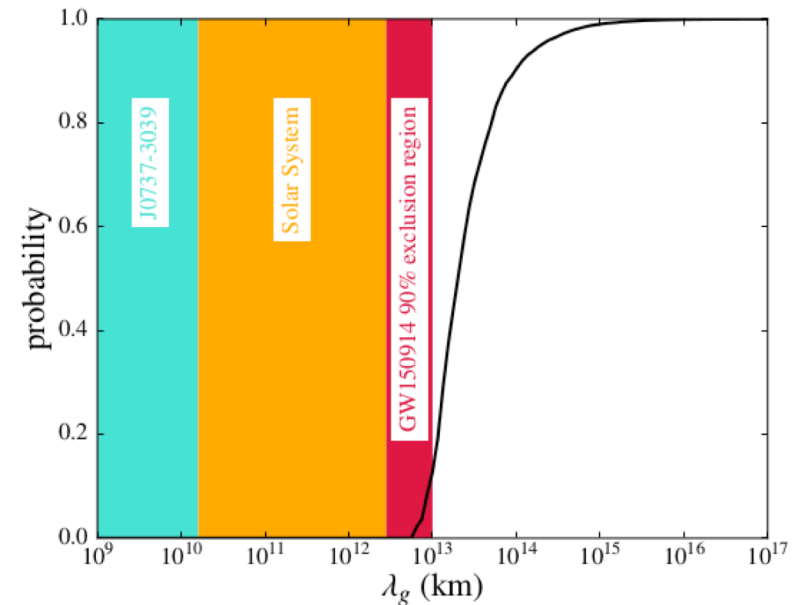
Tests de la Relativité Générale

- Recherche d'une déviation à la RG dans la forme d'onde



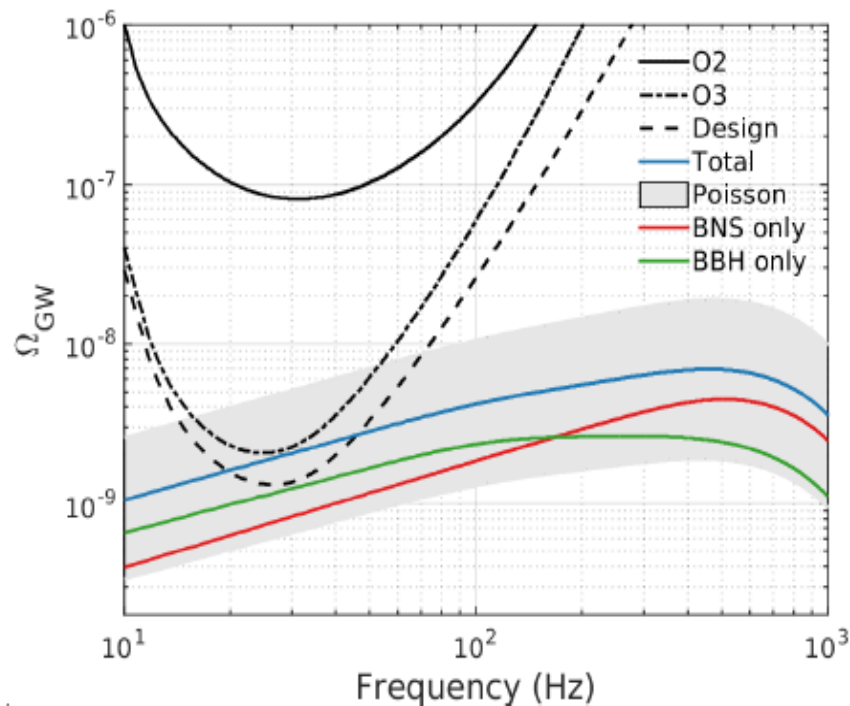
- Pas d'indication d'une déviation
- Limite sur la masse du graviton

$$m_g < 1.2 \times 10^{-22} \text{ eV}/c^2$$

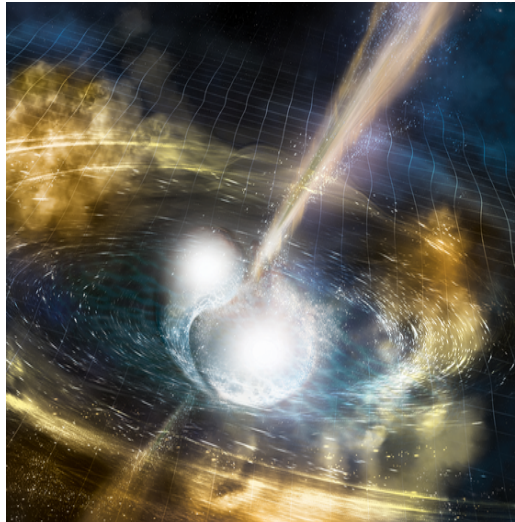


Signal stochastique d'OG

- ▶ Population de sources à grande distance
- ▶ Créent un fond stochastique d'ondes gravitationnelles
- ▶ Porte de l'information sur
 - ▶ la formation des populations d'étoiles
 - ▶ l'évolution de la métallicité
 - ▶ les paramètres moyens des sources et les scénarios d'évolution

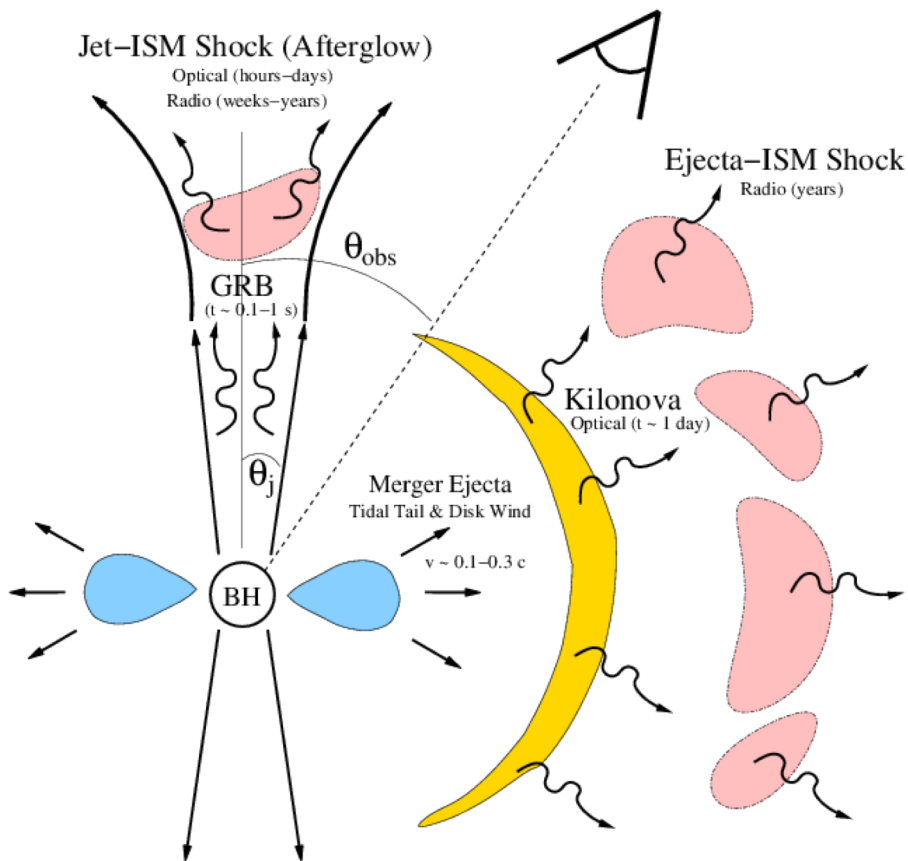


Le fond stochastique pourrait être détecté avant que les détecteurs ne parviennent à leur sensibilité de design



Conséquences de la première détection multi-messenger d'une coalescence d'étoiles à neutrons : GW170817

Contrepartie électromagnétique



▶ Sursaut Gamma court (sGRB) :

▶ Jet

- ▶ emission γ rapide
- ▶ Quelques secondes après la fusion
- ▶ Durée < 2 s
- ▶ Focalisée

▶ Interaction du jet avec le milieu interstellaire (ISM)

- ▶ Emission afterglow
- ▶ Quelques jours après le sursaut
- ▶ Evolution X \rightarrow radio

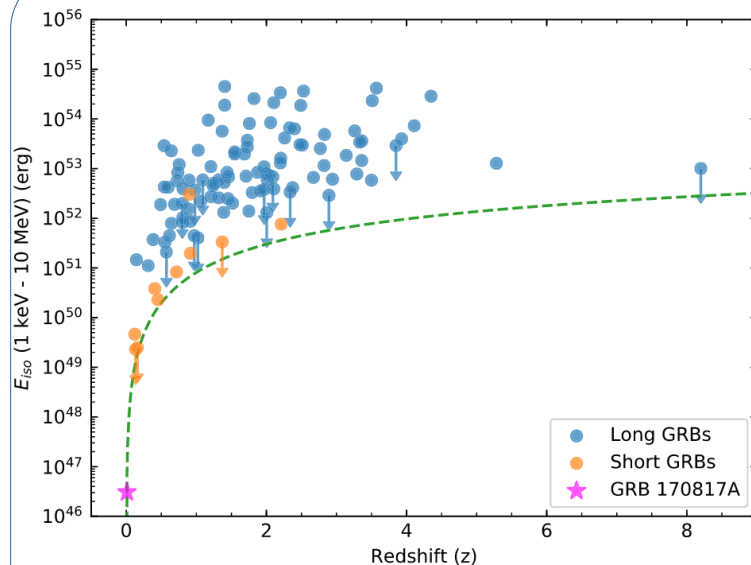
▶ Kilonova

- ▶ Conversion de la matière chaude éjectée par processus r , désintégration et émission thermique
- ▶ Emission corps noir + structures larges
- ▶ Quelques heures/jours après la fusion
- ▶ Visible en UV / optique / IR
- ▶ Evolution spectrale rapide

Nouvelles informations sur les sursauts gamma

GW170817 waveform → **loose limit on BNS viewing angle**, but degeneracy with source distance

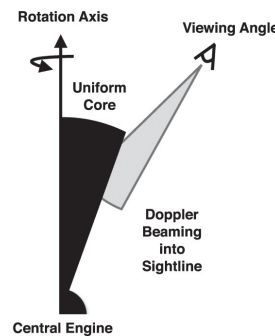
- $\Theta < 56^\circ$ from GW data alone
 - $\Theta < 36^\circ$ using the known distance to the host galaxy NGC 4993
- compatible with jet pointing towards Earth



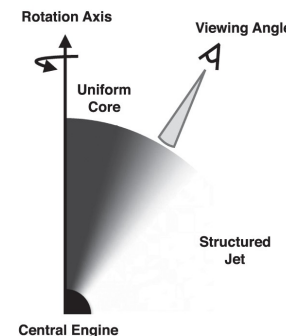
GRB170817A:

- the **closest** short GRB with know distance ($z \sim 0.008$) (previous closest, GRB061201: $z \sim 0.11$)
 - 10^2 to 10^6 times **less energetic** than other bursts
- implications/questions on the structure of the jet

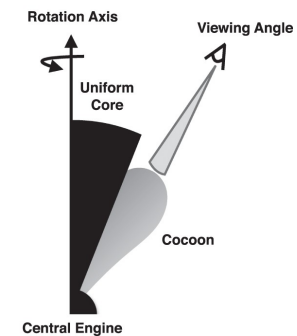
Scenario i: Uniform Top-hat Jet



Scenario ii: Structured Jet



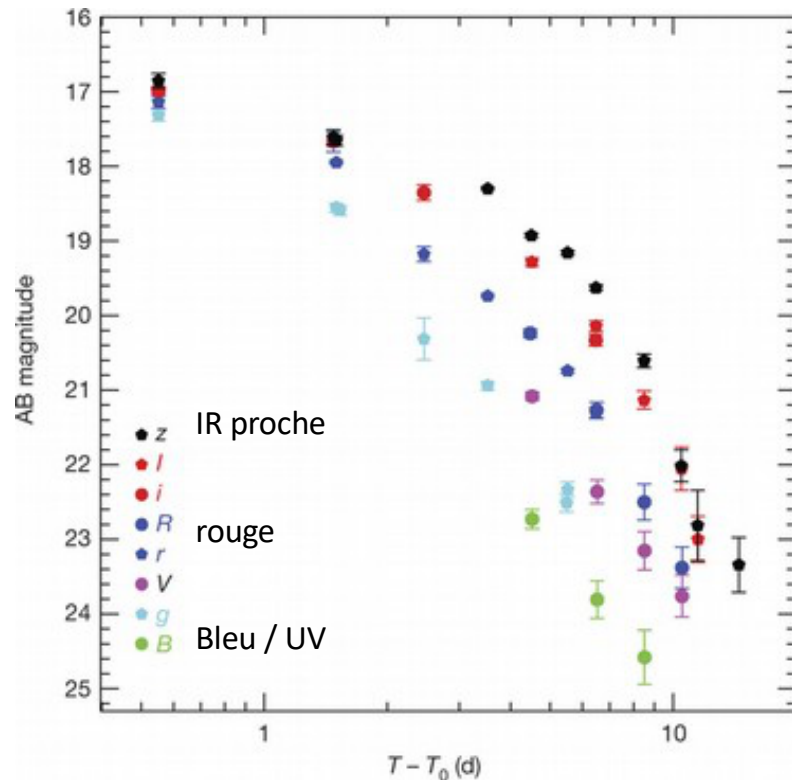
Scenario iii: Uniform Jet + Cocoon



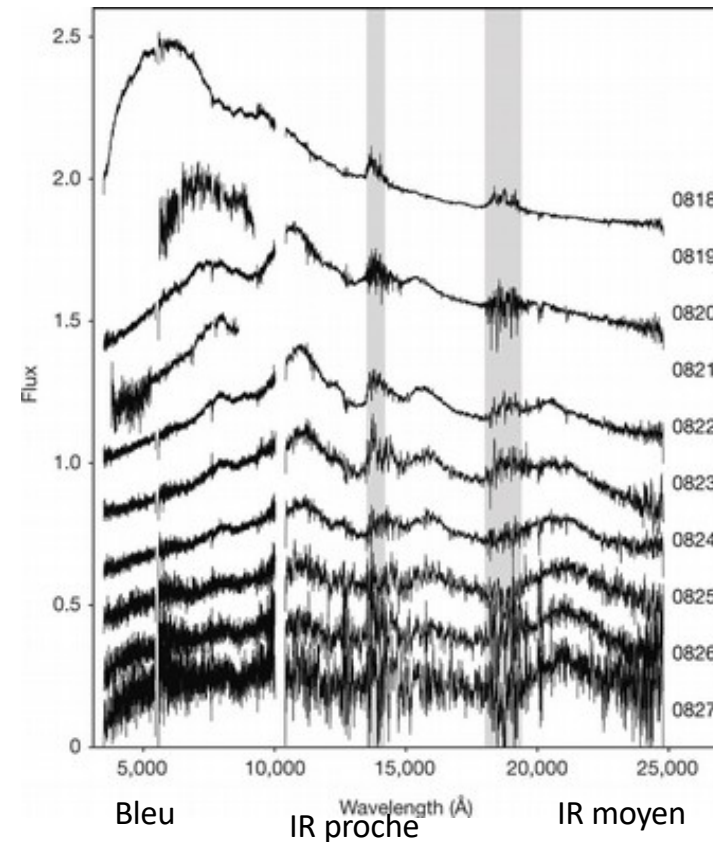
Prediction of detection rates

- higher rate than previously expected for sGRB to be seen in gamma-rays
 - 1-50 BNS mergers expected in LIGO-Virgo during run O3 (wrt previously estimated 0.04-100)
- 0.1 to 1.4 joint detections for GW and Fermi sGRB during run O3 (end 2018-2019)

Evolution du transitoire optique

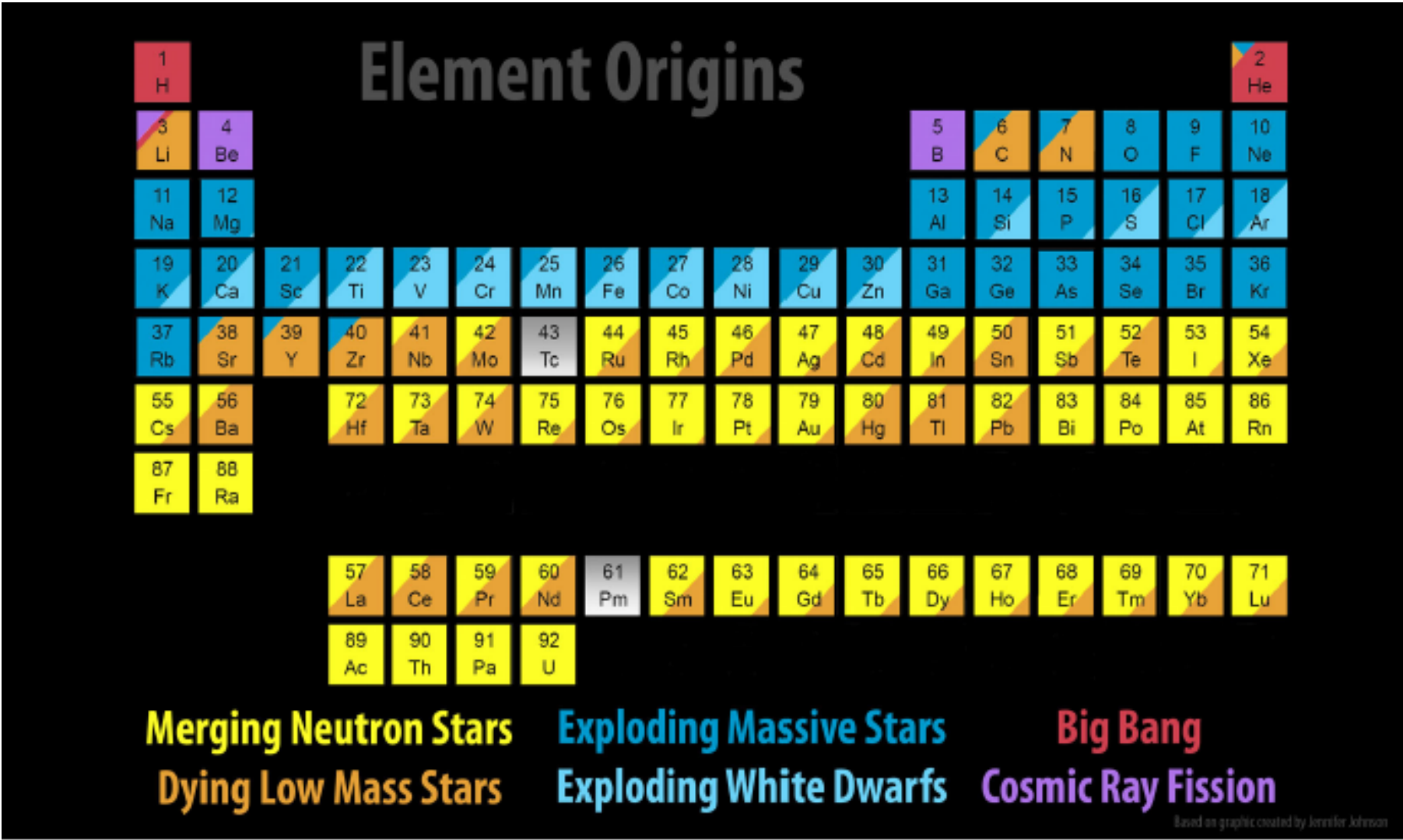


Courbes de lumière



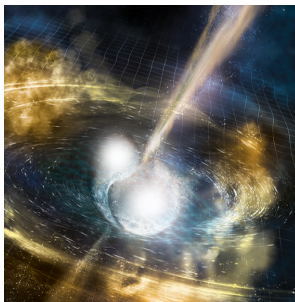
Evolution spectrale

- ▶ Bon accord avec les modèles de « kilonova » (= « macronova »)
- ▶ Première identification spectrale d'une kilonova
- ▶ Probablement la principale source d'éléments lourds dans l'univers



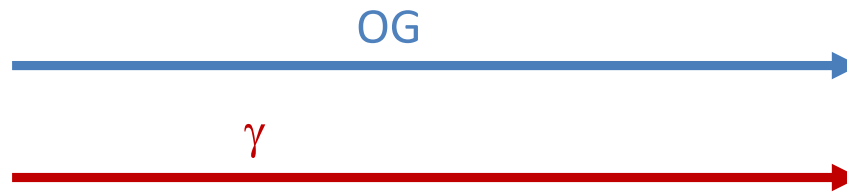
Association OG/GRB : célérité des OG

Emission durant la fusion
-> OG et γ

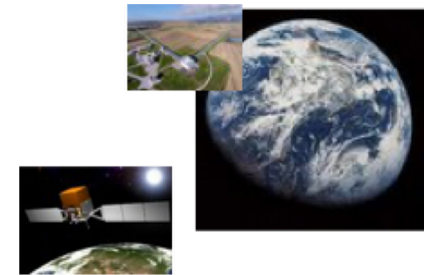


Hypothèse : les γ sont émis
entre 0 et 10 s après les OG

Propagation
Sur au moins 26 Mpc



Detection



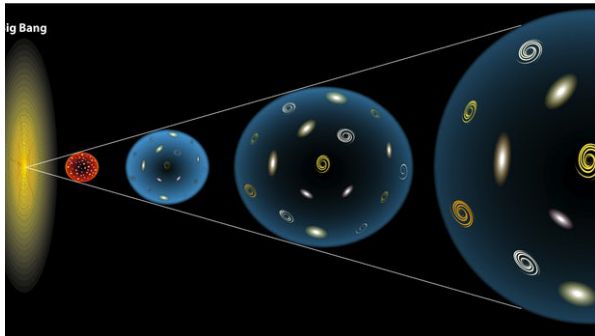
γ détectés
 1.75 ± 0.05 s après OG
provenant de la fusion

Différence entre la vitesse de propagation des OG et celle de la lumière

$$[-3 \times 10^{-15}; +7 \times 10^{-16}] \times c$$

Mesure de la constante de Hubble

H_0 = taux d'expansion de l'univers aujourd'hui



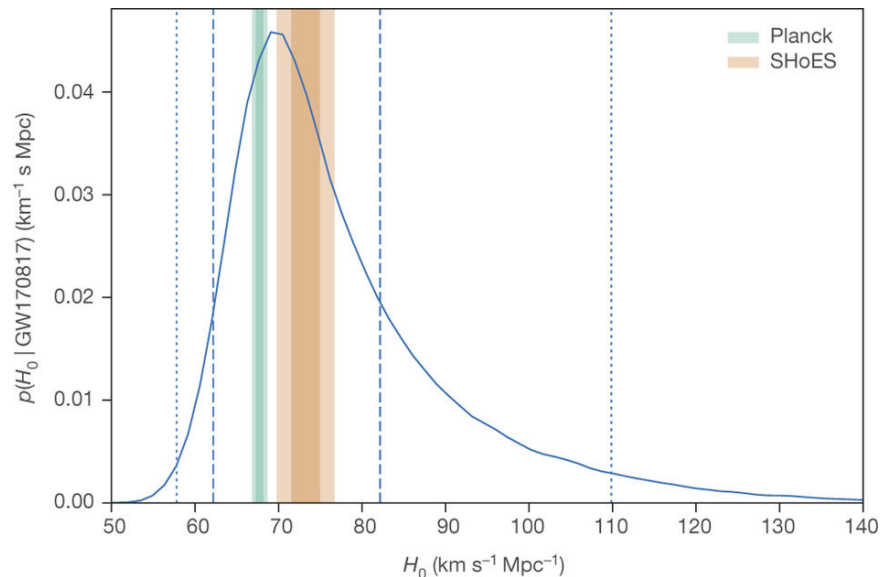
GW170817 peut être utilisé comme une "sirène" standard

$$D_{\text{luminosity}} = H_0 \times v_r$$

Estimations directe avec le signalOG :
($43.8^{+2.9}_{-6.9}$ Mpc)

Donné par le redshift de la galaxie hôte
(3017 ± 166 km/s)

$$\rightarrow H_0 = 70^{+12}_{-8} \text{ km/s Mpc}^{-1}$$

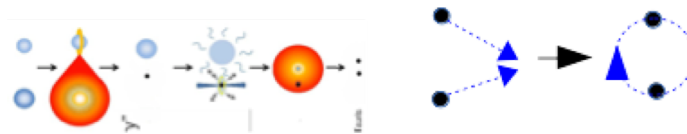


Mesure indépendante de H_0
 \rightarrow pourrait aider à résoudre la tension actuelle

Conclusion : liste non exhaustive d'études présentes et futures

▶ Astrophysique

- ▶ Formation des binaires de trous noirs / étoiles à neutrons



- ▶ GRB : origine, physique, jet beaming
- ▶ Kilonovae : modélisation
- ▶ Equation d'état (EOS) des étoiles à neutrons
- ▶ Etoile à neutron résultat d'une fusion : temps de vie long ou court ?
- ▶ Détermination de la distribution de population BNS et taux de coalescence

$$R = 1540_{-1220}^{+3200} \text{ Gpc}^{-3} \cdot \text{yr}^{-1}$$

($R < 12600 \text{ Gpc}^{-3} \cdot \text{yr}^{-1}$ from 01)

- ▶ Estimation du fond stochastique de coalescence de BNS (bruit de confusion)
 - ▶ Détection dans les prochaines années

▶ Tests RG

- ▶ Limite sur la célérité des OG (par rapport à c)
- ▶ Recherche de déviations à la RG dans la forme d'onde
- ▶ Etudes de polarisation des OG
- ▶ Nouvelles limites sur l'invariance de Lorentz
- ▶ Test du principe d'équivalence

▶ Cosmologie

- ▶ Mesure indépendante de la constante de Hubble