

Compte rendu de la conférence du mardi 2 juin 2020 « sur les ondes gravitationnelles »

Organisation : conférence organisée par **l'Institut d'Astrophysique de Paris (IAP)**.
Crise sanitaire et confinement obligent, nous avons réalisé une conférence numérique.

Lieu - Horaire : nous pouvions suivre en direct cette conférence sur Internet via YouTube, en cliquant sur le lien que voici : <https://www.youtube.com/watch?v=PHGmoZg6I5Y>
Nous pouvions interagir, poser des questions etc....
- mardi 2 juin 2020 - De 18h30 à 20h00

Participation : 79 internautes étaient connectés en « live ».

Thème et Intervenants :



Cette conférence a été animée par **Robert MOCHKOVITCH (IAP)-Directeur de Recherche au CNRS** et transmise via YouTube par **Jean Mouette**.

- **« Contreparties électromagnétiques des événements gravitationnels : « sursauts γ , rémanence, kilonovae ». Que faut-il attendre des futures campagnes d'observation LIGO/Virgo ? »**

Déroulement de la soirée : Compte-rendu non relu par le conférencier et n'engageant que son rédacteur.

Robert MOCHKOVITCH : commence en montrant l'image ci-dessous de **deux étoiles à neutrons qui fusionnent**.

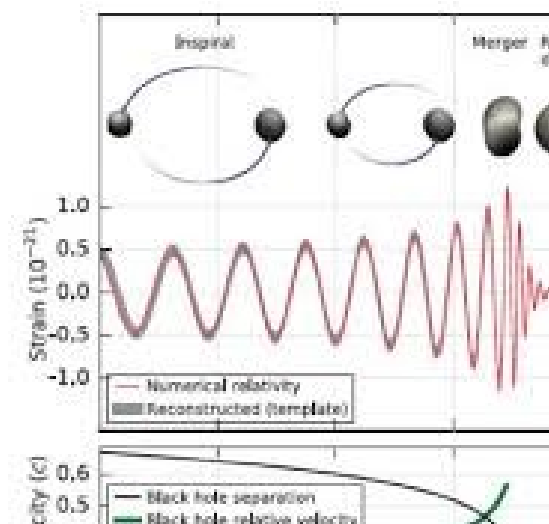


Les deux boules blanches qui sont en train de fusionner sont deux **étoiles à neutrons**. Cet événement a produit deux jets : le **sursaut γ** qui est le jet axial et **la kilonova** qui est le jet s'échappant de l'équateur. Tout cela va être détaillé dans notre exposé. On devine aussi un quadrillage de l'image qui se veut une **représentation de l'espace-temps**. Au centre, il va se former un **trou noir** dans cette zone extrêmement perturbée.

L'ère des ondes gravitationnelles :

Une quête de 100ans :

- **1916 : prédiction des ondes gravitationnelles par Einstein**
- **1962 – 1967 : premiers concepts de détecteur interférométrique (en URSS et aux USA)**. On mesure ainsi des différences de temps de parcours de la lumière entre les deux bras de l'interféromètre.
- **14 septembre 2015 : la première détection**. Quand l'Onde Gravitationnelle passe, elle affecte la propagation de la lumière, il y aura des différences de temps de parcours et cela va modifier les franges d'interférences quand les deux faisceaux se recombinent. Le principe est simple, pas la réalisation car il faut arriver à **mesurer des déplacements 10 milliards de fois plus petits que la longueur d'onde de la lumière (ici de l'Infrarouge de longueur d'onde de 1 micron)**



On voit ci-contre les **deux trous noirs qui se rapprochent** peu à peu, de masses respectives : 36 et 29 Masses solaires.

L'amplitude des oscillations augmente au fur et à mesure de la rotation de plus en plus rapide, **ce qui fait augmenter la fréquence** et, au moment de la **coalescence** (jonction et fusion des deux trous noirs), il y a **création d'un « chirp » (ou « gazouillis »)** caractéristique de l'Onde Gravitationnelle formée. Il se forme en final un trou noir de masse plus importante.

Les premières détections O1 et O2 (Observing runs 1 et 2) :

Des doubles trous noirs et une **double d'étoiles à neutrons GW 170817 à 40 Mégaparsec (Mps)**. Rappelons qu'un parsec représente une distance de 3,26 Années-Lumière soit environ $3,1 \times 10^{16}$ m.

Unités de longueur et distance en astronomie

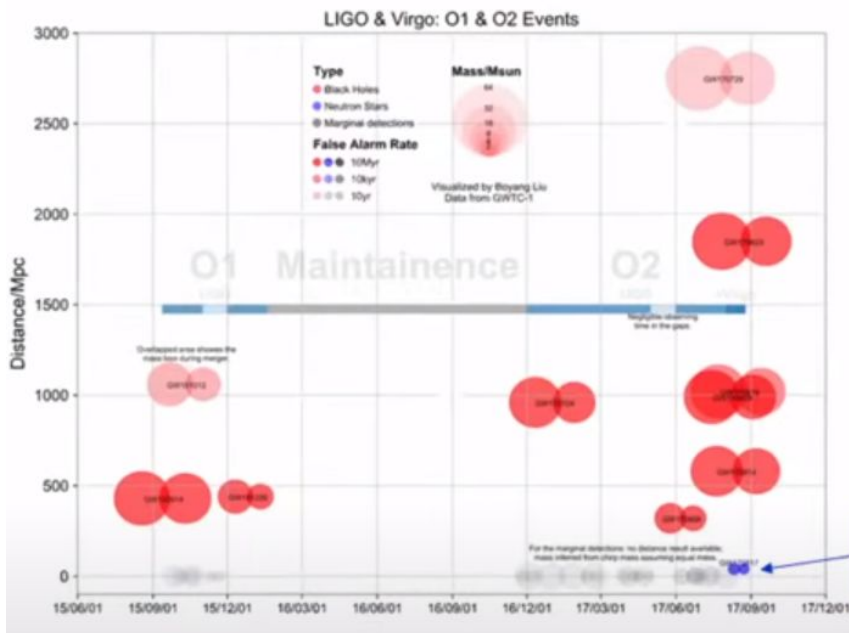
	Unité	m	UA	AL	pc
m	mètre	1			
UA	demi-grand axe de l'orbite terrestre	$1.5 \cdot 10^8$	1		
AL	année de lumière	$9.5 \cdot 10^{15}$	63 000	1	
pc	$1 \text{ pc} \equiv 1 \text{ UA}$	$3.1 \cdot 10^{16}$	206 000	3.26	1

m = mètre

UA = Unité Astronomique

AL = Année-Lumière

pc = parsec (UA par seconde d'arc)

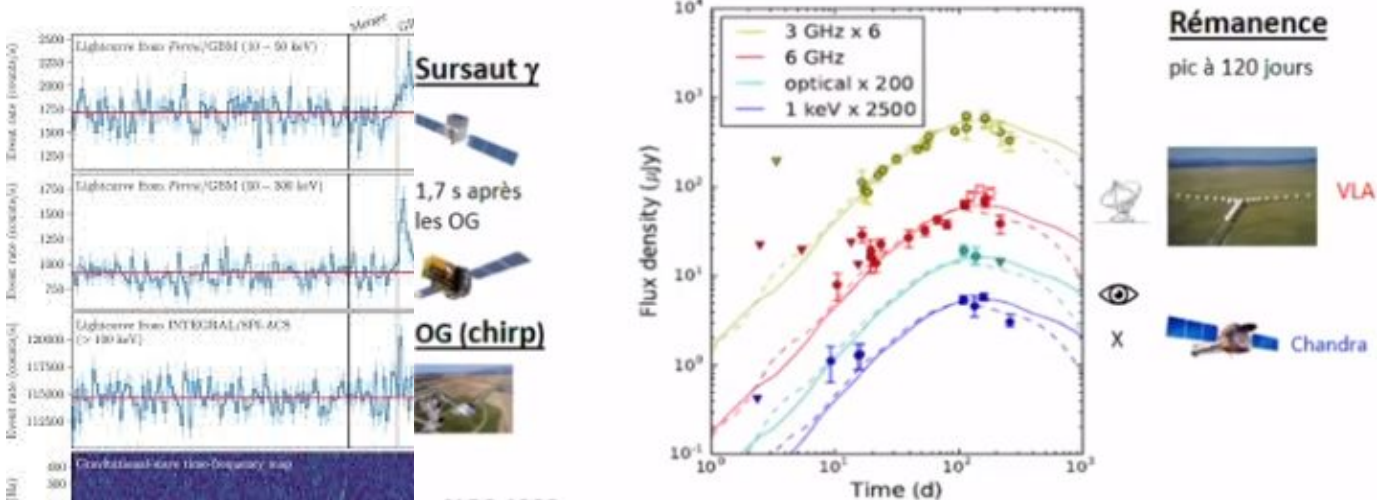


On voit ci-contre **en rouge les doubles trous noirs** : ils sont moins nombreux en absolu mais observables à plus grande distance. Ils dominent largement l'échantillon observé.

A priori, il n'y a pas de contrepartie électromagnétique attendue dans ce cas (un trou noir n'émet pas de lumière)

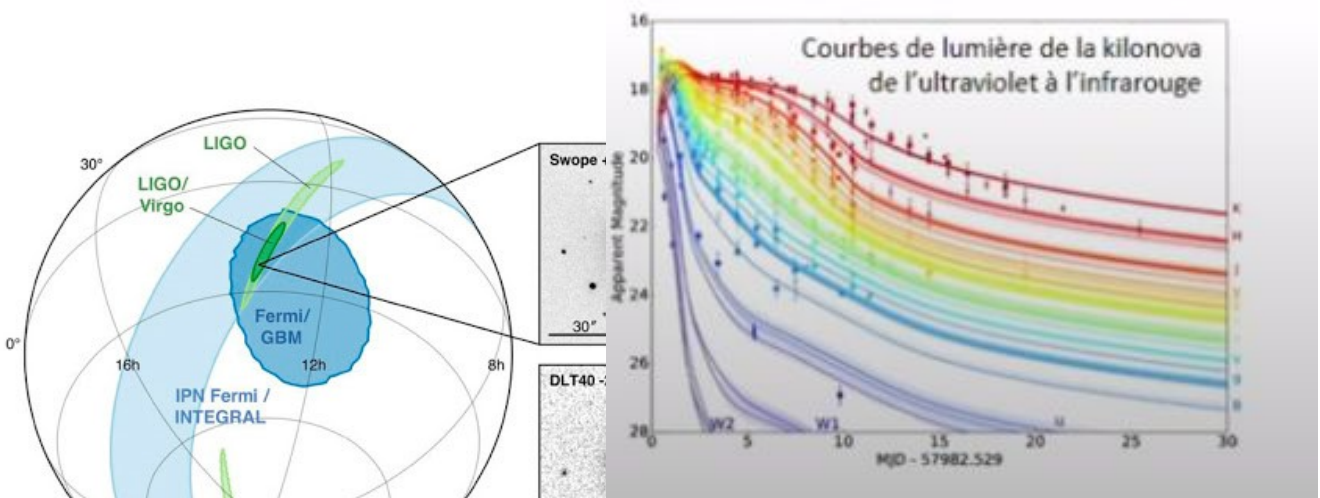
En bleu, en bas à droite, ce sont les deux étoiles à neutrons qui fusionnent

L'évènement historique de collision des deux étoiles à neutrons datent du 17 août 2017 (d'où GW 170817). Dans ce cas, contrairement aux trous noirs, on peut observer un rayonnement lumineux.



Les images ont été obtenues par triangulation avec 3 détecteurs éloignés (dont Virgo en Italie)

Découverte d'une kilonova dans NGC 4993 (Galaxie Lenticulaire) 11 heures après l'Onde Gravitationnelle :



Question d'un participant : comprend-on pourquoi les sursauts γ arrivent plus tard que l'Onde Gravitationnelle ?

Réponse de Robert MOCHKOVITCH : on a fait une hypothèse, l'Onde Gravitationnelle part du cœur de l'objet et donne le temps zéro. Il se produit un jet de matière presque à la vitesse de la lumière et, au bout d'un temps, il produit des photons γ . Le jet va un peu moins vite que la lumière, cela fait prendre du retard aux photons γ .

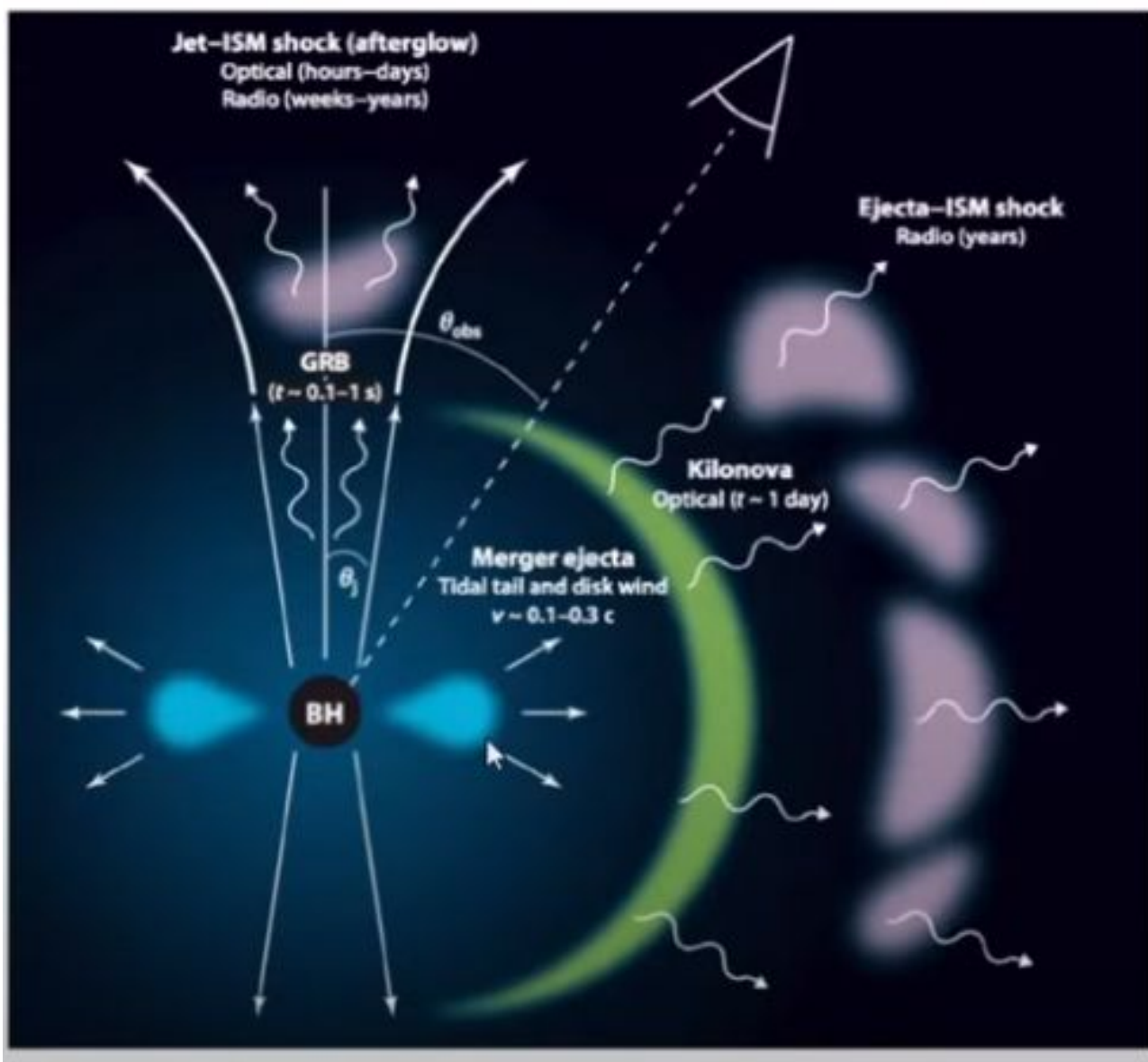
Question d'un participant : ce décalage existe-t-il pour tous les évènements rencontrés ?

Réponse de Robert MOCHKOVITCH : on a seulement observé un tel évènement une seule fois (la première fois, d'où le nom d'évènement historique) : un sursaut γ issu d'un signal gravitationnel. Il n'y a pas encore eu de nouveaux évènements similaires depuis.

Robert MOCHKOVITCH poursuit son exposé : sur le schéma plus haut, on observe la **rémanence** qui est essentiellement l'**onde de choc générée dans le milieu environnant**. On voit sur le graphique, les courbes de lumière de cette rémanence.

Interpréter les observations :

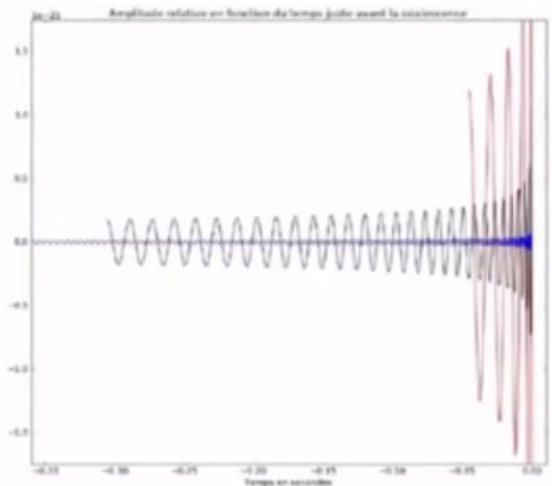
- Le schéma général



On voit en bas à gauche le **résultat de la fusion des deux étoiles à neutrons**, avec le **trou noir formé** (BH = Black Hole) entouré d'un disque de matière, le **jet vertical de matière** envoyée dans l'axe de rotation du système. Dans la région centrale de ce jet on a la plus grande densité d'énergie et il se produit le **sursaut γ brillant**. Un peu de matière éjectée va donner (arc de cercle vert à droite) **la kilonova** un peu plus tard puis l'énergie libérée donne un bang que l'on appelle **la rémanence** (ISM shock complètement à droite).

Interpréter les observations :

- Le signal gravitationnel

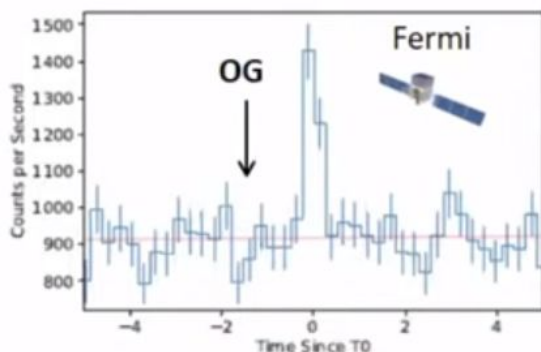


Sur le schéma des oscillations ci-dessus à droite, on voit à l'extrémité droite les oscillations en rouge que donneraient deux trous noirs massifs. Pour les deux étoiles à neutrons, le signal est la courbe bleue, d'amplitude plus faible mais qui augmente au fur et à mesure que les étoiles se rapprochent.

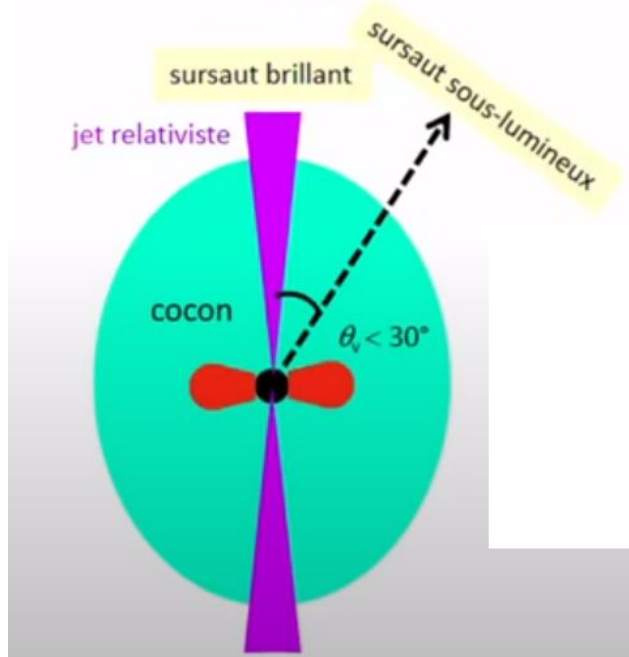
On a vu ainsi **3000 cycles avec une augmentation de la fréquence de 30 Hz à 1000 Hz.**

- Les masses des composantes sont de **1,2 et 1,4 Masses solaires**
- L'angle de vue (angle avec la perpendiculaire au plan de l'orbite) est **$< 30^\circ$**
- La distance **$D = 40$ Mpc** est en accord avec la distance de la **Galaxie NGC 4993**
- Le signal post-coalescence est trop faible, il n'y a pas d'information sur l'objet résultant : Etoile à Neutrons ou Trou Noir

- Le sursaut gamma (détecté par Fermi)



- Il démarre **1,5 seconde** après le signal OG
- Il dure **environ 1 seconde**
- Les **Photons ont une énergie > 100 keV** sont bien des photons γ
- Le signal est **sous-lumineux par 4 à 5 ordres de grandeur** en comparaison des sursauts γ « classiques »



Le **premier sursaut γ « vu de côté »** est un **sursaut hors-axe** possible mais faible.

Mécanisme ? Deux hypothèses de modèles :

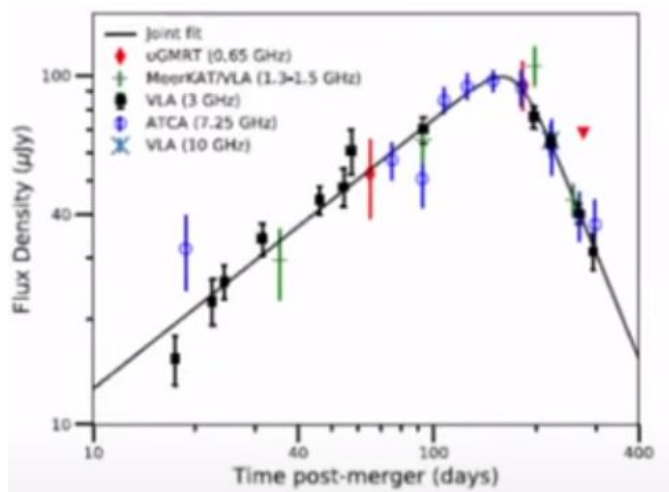
- Similaire aux sursauts classiques mais avec moins d'énergie et une vitesse moins relativiste
- Différent des sursauts classiques : il n'y a pas de jet mais un « flash de surface » (shock breakout).

Interpréter les observations :

La rémanence

Elle provient de l'énergie dissipée par l'onde de choc qui se propage dans le milieu extérieur tout en étant progressivement freinée (« bang lumineux »).

Elle est observée dans de très nombreux sursauts mais ici elle est d'évolution atypique en raison du point de vue hors-axe du jet et de la focalisation relativiste du rayonnement.



La rémanence radio :

- Elle est maximum à 120 jours
- Elle décroît rapidement après le maximum
- Son mouvement propre est mesuré en VLBI
 - Son expansion est relativiste
- Son évolution est similaire en rayons X (Chandra)

- On reçoit d'abord l'émission provenant de la matière le long de la ligne de visée, puis peu à peu, à la suite du ralentissement de la matière, celle des régions plus centrales et plus énergétiques.
- Le pic correspond au moment où l'axe du jet devient accessible « tomographie angulaire » de l'éjecta.

Interpréter les observations :

La kilonova



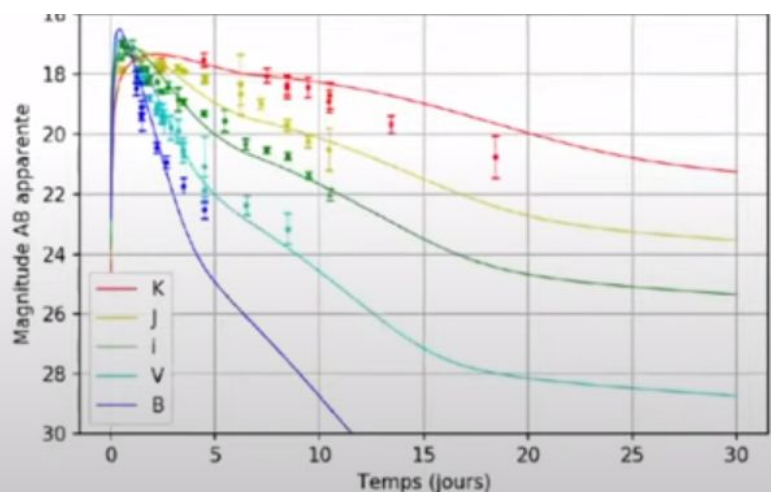
- Elle est de **magnitude 17 (au pic)** à une **distance de 40 Mpc**
- Sa **luminosité est de cent millions de fois la Lumière du soleil**, soit environ celle de **mille novae**

Quelques centièmes de masse solaire sont éjectés lors de la coalescence : ces éléments sont très riches en neutrons

- **Le chauffage** se fait par **radioactivité β** ($n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$)
- Le refroidissement et la transparence croissante se font par expansion :

- **KiloNova rouge** : ejecta équatorial très opaque
- **KiloNova bleue** : ejecta polaire, moins opaque

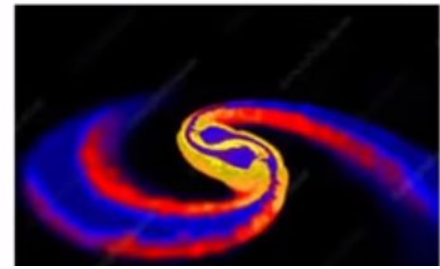
La magnitude varie suivant l'angle de vue (elle est plus brillante aux pôles)



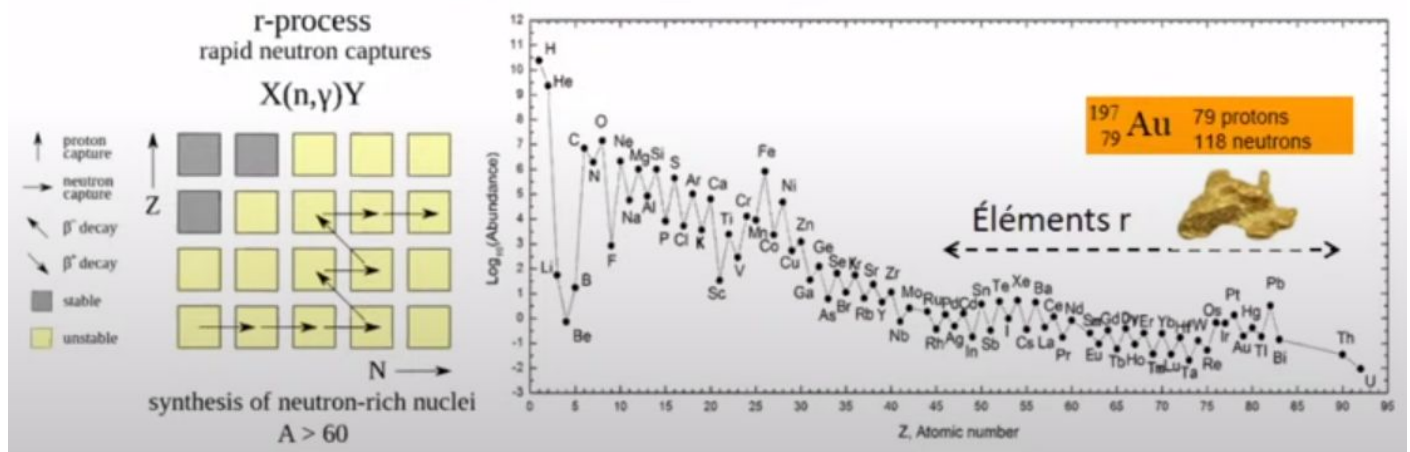
Les kilonovae sources des éléments r ?

Les **Éléments r** : sont riches en neutrons (le r symbolise des captures rapides) ; ils sont très peu abondants
Ces éléments r sont représentés en couleur violette-claire dans le tableau de Mendeleïev ci-dessous :

Tableau de Mendeleïev coloré par processus de synthèse. Les éléments r sont en violet clair.



Matière éjectée d'une kilonova

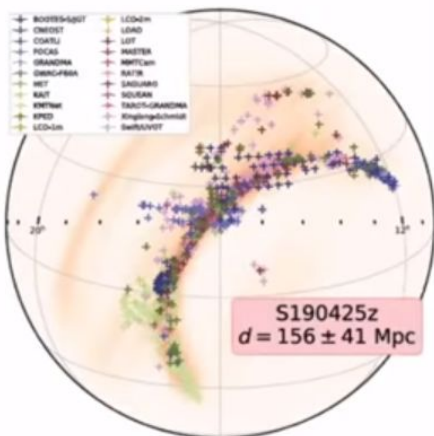


L'or (symbole Au) avec 79 protons et 118 neutrons, fait partie de ces éléments r.

La recherche de contreparties électromagnétiques dans O3 (3 télescopes agissant par triangulation)

(O3 est la séquence d'observation qui a démarré le 1^{er} avril 2019, arrêtée en mars 2020 à cause du Covid-19)

Cette séquence est une meilleure candidate à l'observation de la fusion de deux Etoiles à Neutrons (car elle observe 4 fois plus loin que l'évènement du 17 août 2017)

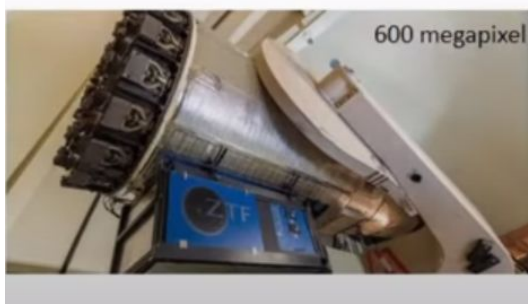
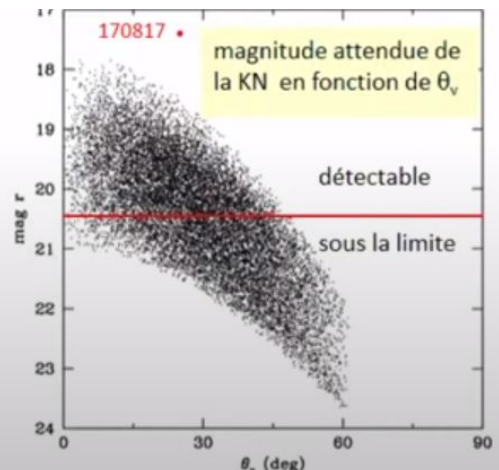


Recherche de la kilonova (pas de sursaut γ détecté) :

La boîte d'erreur est énorme : 7500 deg^2 (Télescopes Livingstone + Virgo)
Malgré tout assez bien couverte par les télescopes ZTF (40%)

- 70 candidats mais aucune kilonova n'a encore été trouvée
- Pas dans la boîte d'erreur ou plus faible qu'une magnitude de 20,5

Ci-dessous : modèle de population montrant la magnitude en fonction de l'angle de vue



Question d'un participant : les Ondes Gravitationnelles émises sont-elles à symétrie sphérique ?

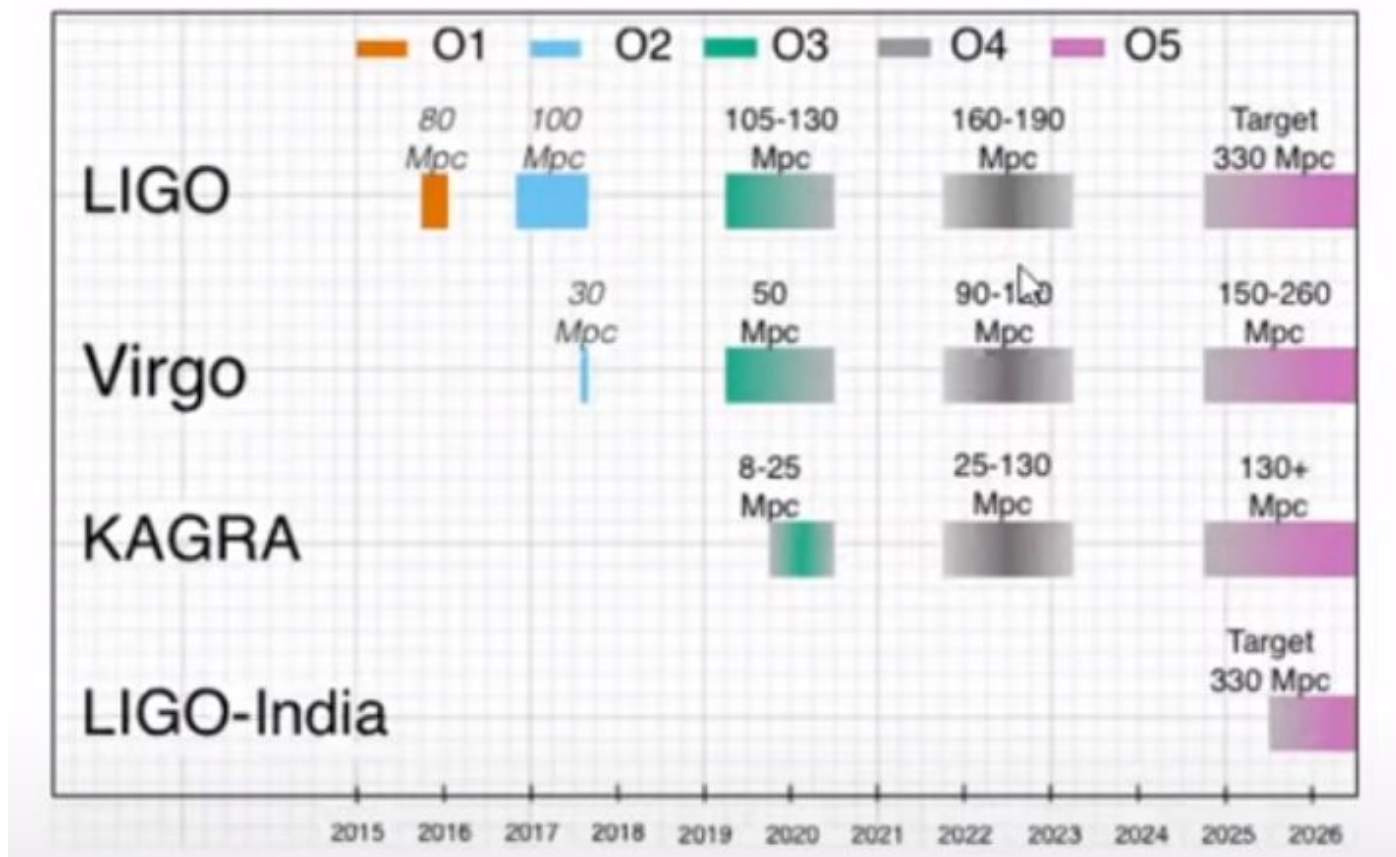
Réponse de Robert MOCHKOVITCH : non, le sursaut γ brillant est très focalisé dans un angle de quelques degrés et n'est pas à symétrie sphérique. La rémanence est un peu moins directionnelle. La kilonova a un peu de symétrie sphérique. Les Ondes Gravitationnelles sont les moins directionnelles.

Robert MOCHKOVITCH poursuit son exposé :

Le futur : séquence d'observation O4 (mi-2021) et au-delà (2025 et plus) :

- (i) Sensibilité accrue impliquant plus d'Ondes Gravitationnelles (mais aussi plus lointains en moyenne)
- (ii) L'entrée en service de **KAGRA** puis de **LIGO-India** permettra une meilleure localisation.

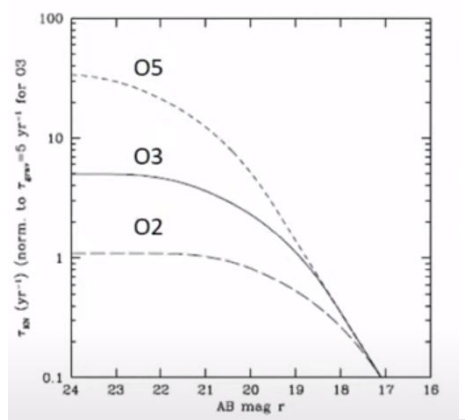
Mais (ii) peut-il (en partie) contrebalancer (i) ?



Pour chacun des 4 détecteurs ci-dessus, on voit les distances limites permettant de détecter la coalescence de deux étoiles à neutrons (en Mpc) suivant la séquence d'observation (de O1 à O5).

La kilonova : contrepartie électromagnétique a priori la plus facile à trouver :

- Son domaine est celui de la lumière visible ou proche de l'Infra-Rouge
- Elle n'est pas trop anisotrope



O2 → O3 → O4 → O5

Il y a plus en plus d'événements gravitationnels (Etoile à Neutrons + Etoile à Neutrons) : environ 1 tous les 10 jours pour O5 mais, pour autant :

- Il n'y a pas plus de kilonovae brillantes
- Il y a un gain pour les kilonovae faibles

Pour O5, il y a un événement plus brillant que **magnitude 17 tous les 12 ans** (idem pour O3). **L'évènement 170817 a donc bien été une chance inouïe !**

Magnitude 18 tous les 3 ans (idem O3)

Magnitude 19 tous les 8 mois (10 mois pour O3)

Magnitude 20 tous les 2 mois (5 mois pour O3)

Magnitude 21 toutes les 3 semaines (3 mois pour O3)

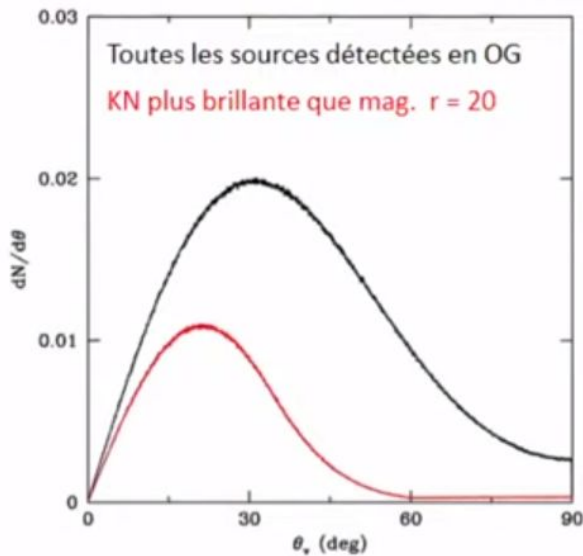
Magnitude 22 toutes les 2 semaines (3 mois pour O3)

Le problème de la détection est d'explorer vite (la kilonova décline) une grande boîte d'erreur, jusqu'à des magnitudes de plus en plus faibles.

On trouve de plus en plus d'étoiles de la Galaxie hôte par pixel à mesure que la distance augmente.

L'information capitale est la distance connue à partir des ondes gravitationnelles.

Distribution des angles de vue pour les sources détectées :



La kilonova étant plus brillante « vue par les pôles », les petits angles de vue sont favorisés.

➤ Il y a très peu de kilonovae attendues avec $\theta_v > 45^\circ$

Le pic de détection d'après la courbe ci-contre ($dN/d\theta = f(\theta_v)$) se situe à $\theta_v = 20^\circ$ pour les kilonovae, courbe rouge (et 30° pour les ondes Gravitationnelles, courbe noire)

Attention : ces résultats supposent que la kilonova 170817 était représentative de la population générale et que les modèles ne sont pas trop faux...

Il faudra de nouvelles observations pour confirmer cela.

Un outil de choix pour la recherche de la kilonova : le LSST (ou observatoire Vera Rubin) :

Le LSST (*Large Synoptic Survey Telescope*, en français « Grand Télescope d'étude synoptique ») est un télescope américain en cours d'installation au nord du Chili dont la photo est montrée ci-dessous. Il complète et améliore le ZTF (il est plus sensible) pour l'hémisphère sud (devrait démarrer début 2023).



- Son diamètre est de 8,4m
- Son champ de vue est de $3,5^\circ$ (en surface : $9,6 \text{ deg}^2$) !
- Sa caméra est de 3,2 gigapixels et pèse 3 tonnes
- Sa mission est un balayage complet du ciel + TOO (Target Of Opportunity)
- Sa magnitude limite est 24-25 en 30 secondes (il réalise 2 balayages complets du ciel en 1mn)

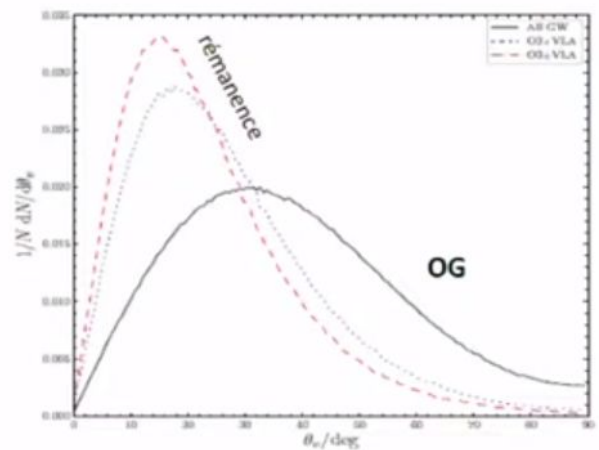
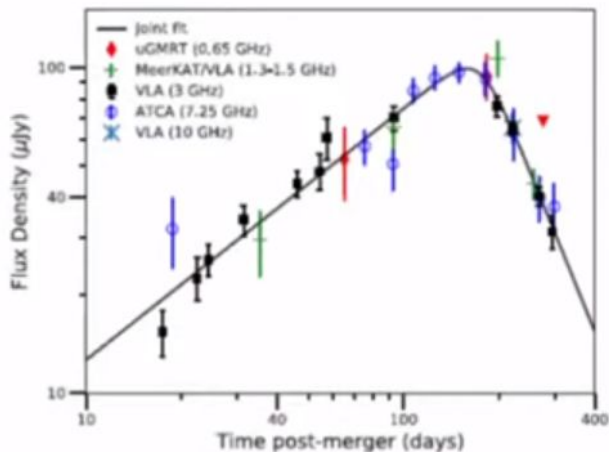
A ce niveau de flux, c'est isoler et caractériser la kilonova qui représente le vrai défi.

Mais pouvoir détecter jusqu'à des magnitudes de 21-22 serait déjà très appréciable car le suivi serait possible.

La rémanence :

Une fois la kilonova trouvée, la position de la source est connue :

D'où une recherche de la rémanence : par rayons X et par ondes radio.



Ci-dessus : distribution de l'angle de vue pour les rémanences détectées :

$$\text{Flux} \propto \theta_v^{-4.5}$$

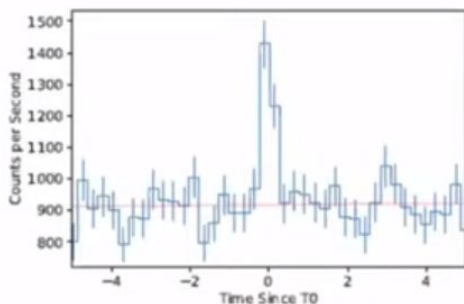
Le flux est divisé par 20 quand l'angle de vue double !

On espère l'installation du radiotélescope SKA (vue ci-contre) à l'horizon 2035.

GRB 170817 détectable jusqu'à 100 Mpc avec le VLA (230 → 730 Mpc avec SKA I, II)



Le sursaut γ :



Très forte diminution de la luminosité quand l'angle de vue augmente

$$\theta_v > \theta_j : L \propto \left(\frac{\theta_v}{\theta_j}\right)^{-8} ; D_l \propto \left(\frac{\theta_v}{\theta_j}\right)^{-4}$$

L divisée par 256, D_l divisée par 16 quand θ_v double !!

θ_v ($\theta_j=5^\circ$)	D	z
< 5°	cosmo	> 0.3
5-10°	1500 Mpc	0.3
10-15°	300 Mpc	0.07
15-20°	100 Mpc	0.02
20-25°	40 Mpc	0.01
25-30°	20 Mpc	0.005

sursaut γ détectable	$\theta_v _{\text{car.}}$
O3	7 %
O5	5 %
.....	
cosmo	0.4 %
	< 5°

Une distance D = cosmo signifie « cosmologique » et correspond à tout l'univers

Robert MOCHKOVITCH conclut son exposé :

Bienvenue dans l'ère de l'astronomie multi-messagers ! avec :

- Les **ondes gravitationnelles** détectées par (**Kagra et LIGO-India en 2026 et LISA en 2032**)
- Les **neutrinos (probable détection d'un blazar par le détecteur Chinois IceCube installé au pôle Sud)**

En astronomie, un **blazar** (en anglais : blazing quasi-stellar radiosource, que l'on peut traduire par « **source radio éclatante quasi-stellaire** ») est une source quasar très compacte associée à un trou noir supermassif situé au centre d'un noyau actif de galaxie, une source très éloignée de nous.

En 2022 : reprise des observations des Ondes Gravitationnelles avec une sensibilité 2 fois meilleure.

En 2023 : arrivée du LSST.

La mauvaise nouvelle : les nouvelles détections ne seront probablement pas aussi spectaculaires que 170817 :

- Plus loin, plus faibles, détection du sursaut γ improbable

La bonne nouvelle : étudier la diversité des comportements :

- Kilonova : différents angles de vue, variations de M_{ej} , v_{ej} , composition (kilonova dans le cas Etoile à Neutrons + Trou Noir)
- Rémanence : angle de vue ; structuration angulaire de l'éjecta :
 - rémanence « dromadaire » à une bosse ou « chameau » à deux bosses.

Des surprises ?

A suivre...

Question de Jean Mouette : On a vu la rémanence lors de l'évènement du 170817, n'y aurait-il pas, quand même, une possibilité que de tels évènements soient plus fréquents que ceux prévus dans cet exposé ?

Réponse de Robert MOCHKOVITCH : peut-être, quand on regarde les choses, on a l'impression que non : on a eu beaucoup de chance, on a vu très vite le plus brillant sursaut. Mais c'est de la statistique et tout peut arriver.

Rédacteur : Jean-Pierre BULLIARD

IESF Franche-Comté

Vice - Président des Ingénieurs INSA de Franche-Comté

Prochaines conférences de l'Institut d'Astrophysique de Paris :

- **Mardi 16 juin 2020 à 18h30 en live sur Internet avec l'Institut d'Astrophysique de Paris.**
« l'Univers froid »
- **Mardi 7 juillet 2020 à 18h30 en live sur Internet avec l'Institut d'Astrophysique de Paris.**
« la lune des astronomes, diplomate au cœur de la guerre froide »