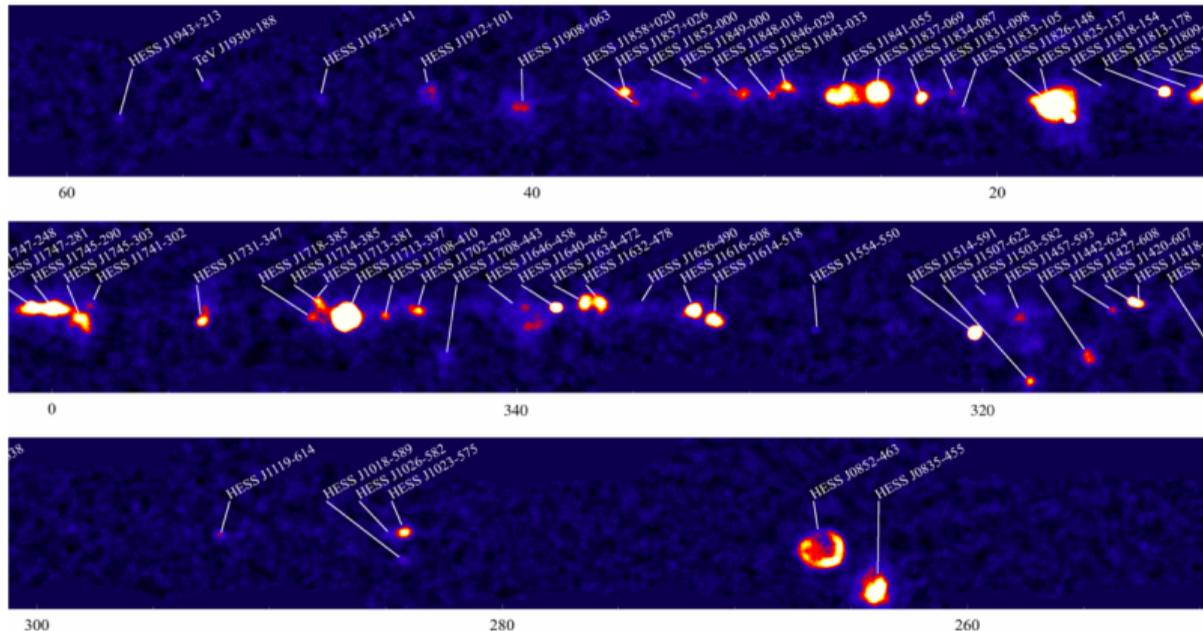
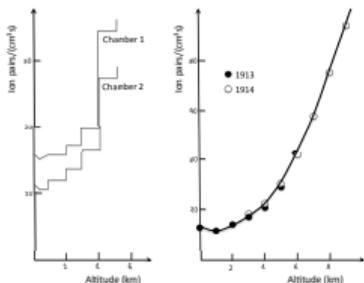


Neutrinos & autres Messagers - La "Cosmic-Ray" Connection

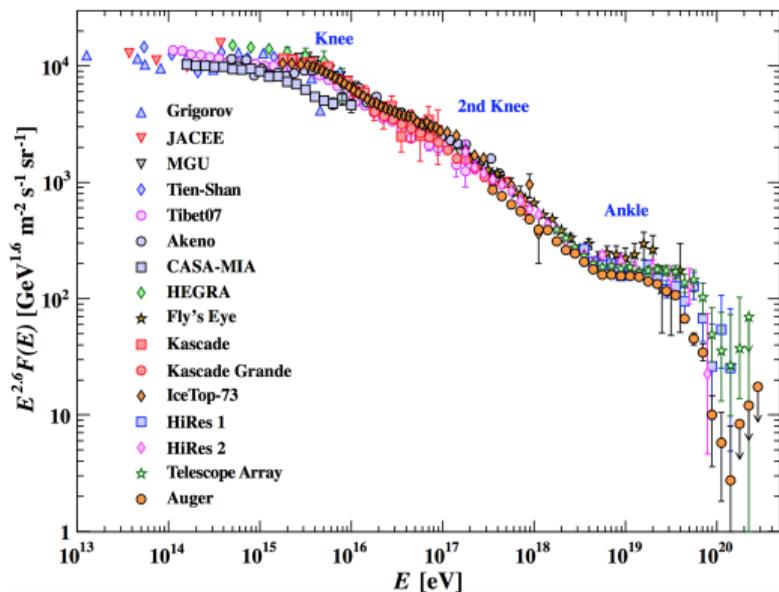
De Victor HESS au Télescope HESS : des sources γ de haute énergie...

ou hadrons : $p/A + p/\gamma \rightarrow \pi^0 \quad \pi^\pm ?$

Leptons : $eB \rightarrow \gamma, \gamma + e \rightarrow \gamma_{\text{Haute Energie}}$

$\gamma \gamma \quad \mu \nu_\mu \rightarrow \nu_\mu \nu_e e$

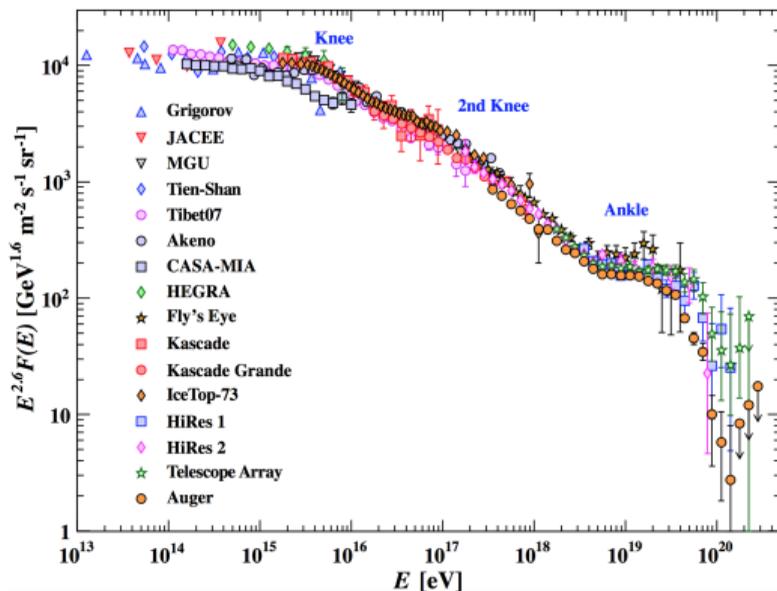
Neutrinos & autres Messagers - La "Cosmic-Ray" Connection



Un « rayonnement » hadronique

- 98% de protons et noyaux légers \rightarrow 100 J !
- **Neutrinos de haute énergie garantis !**

Neutrinos & autres Messagers - La "Cosmic-Ray" Connection



Un « rayonnement » hadronique

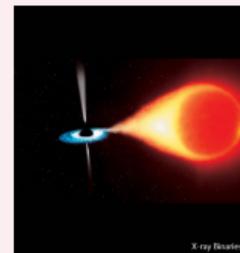
- 98% de protons et noyaux légers → 100 J !
- Neutrinos de haute énergie garantis !

Des sources compactes

- **Extra-Galactiques :**
⇒ Noyaux Actifs de Galaxies, Gamma-Ray Bursts

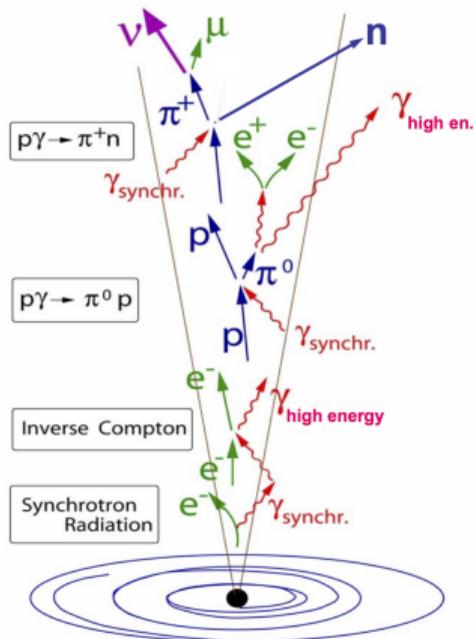


- **Galactiques :**
⇒ Restes de Supernovae, Microquasars...



⇒ Jets de matière, chocs

Neutrinos & autres Messagers - La "Cosmic-Ray" Connection

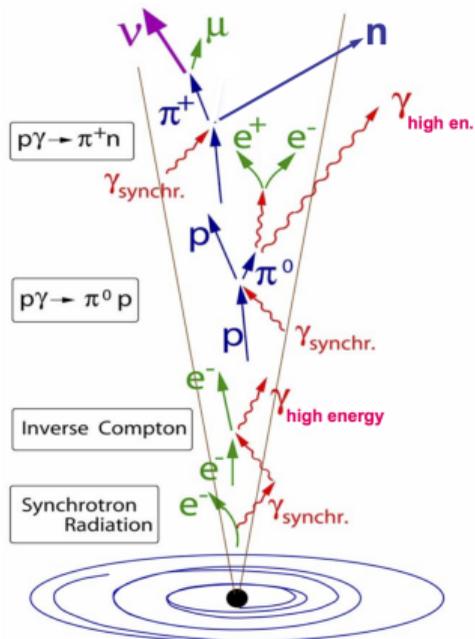


[\leftarrow U. Katz, Prog. Part. Nucl. Phys. 67 (2012) 651-704]

Astronomie avec des neutrinos

- ν signalent processus hadroniques
- Flux ν dépend du rapport p/e

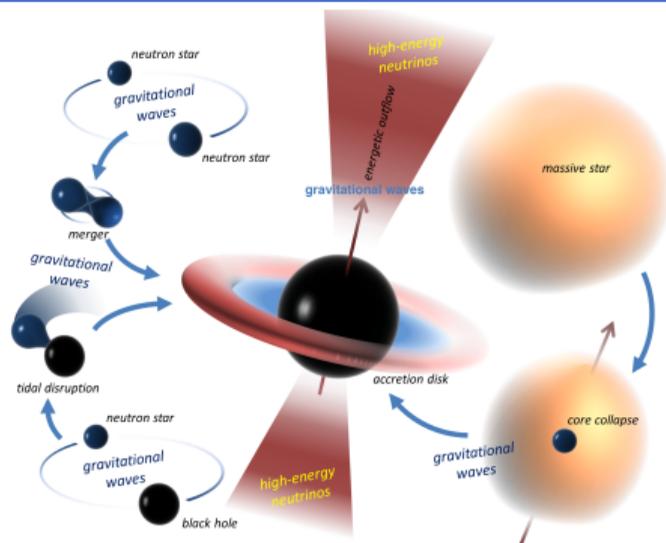
Neutrinos & autres Messagers - La "Cosmic-Ray" Connection



[↔ U. Katz, Prog. Part. Nucl. Phys. 67 (2012) 651-704]

Astronomie avec des neutrinos

- ν signalent processus hadroniques
- Flux ν dépend du rapport p/e

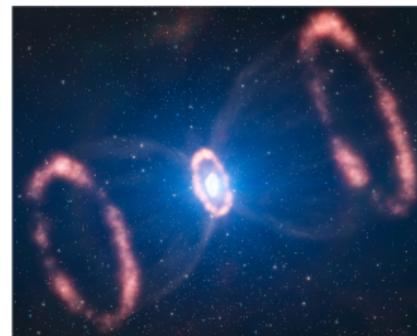
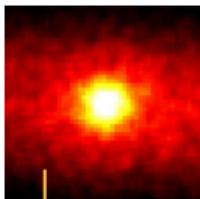


[↔ I. Bartos et al., Class. Quantum Grav. 30 (2013) 123001]

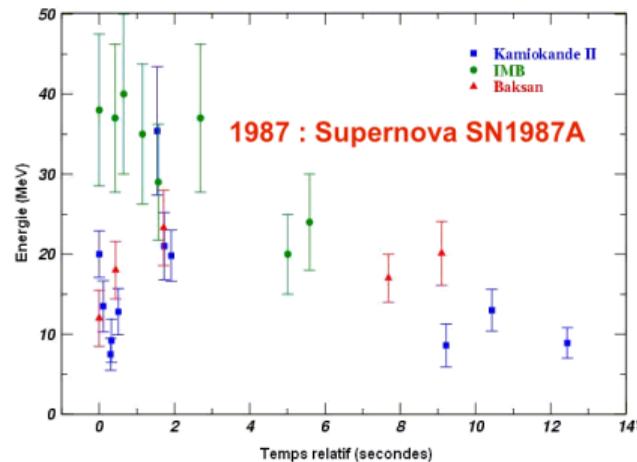
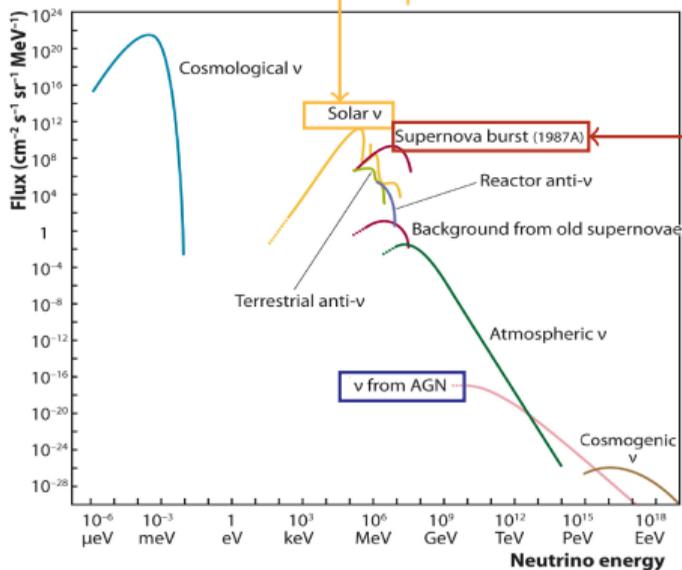
Astronomie gravitationnelle

- $P \propto \text{asymétrie}^2 \times \text{compacité}^2 \times \text{vitesse}^6$
 \Rightarrow Sources de HEN!

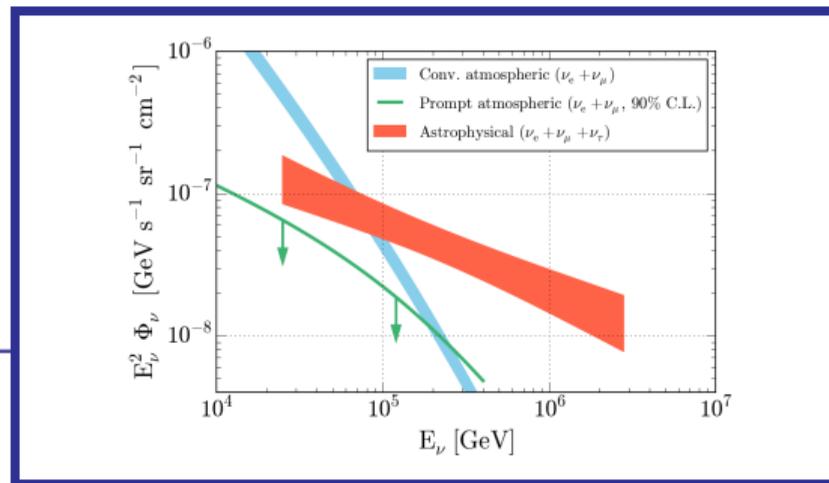
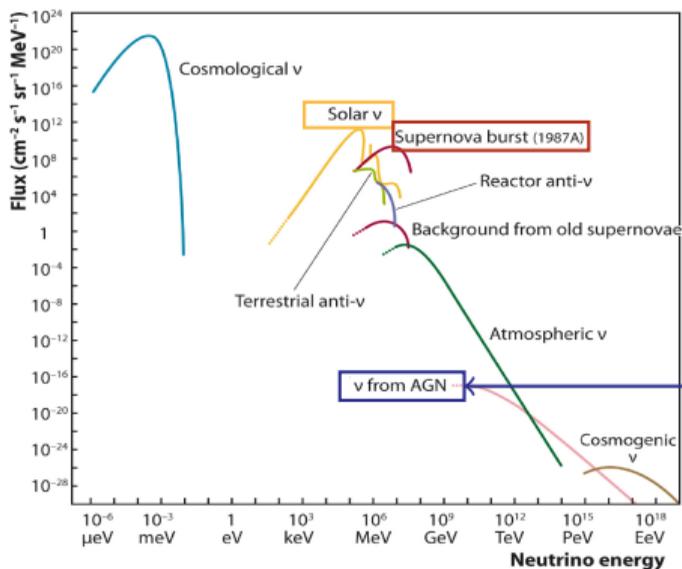
Neutrinos de basse énergie : Soleil et Supernovae



1968-2001 ⇒ Super-Kamiokande



Neutrinos de haute énergie : origine des rayons cosmiques

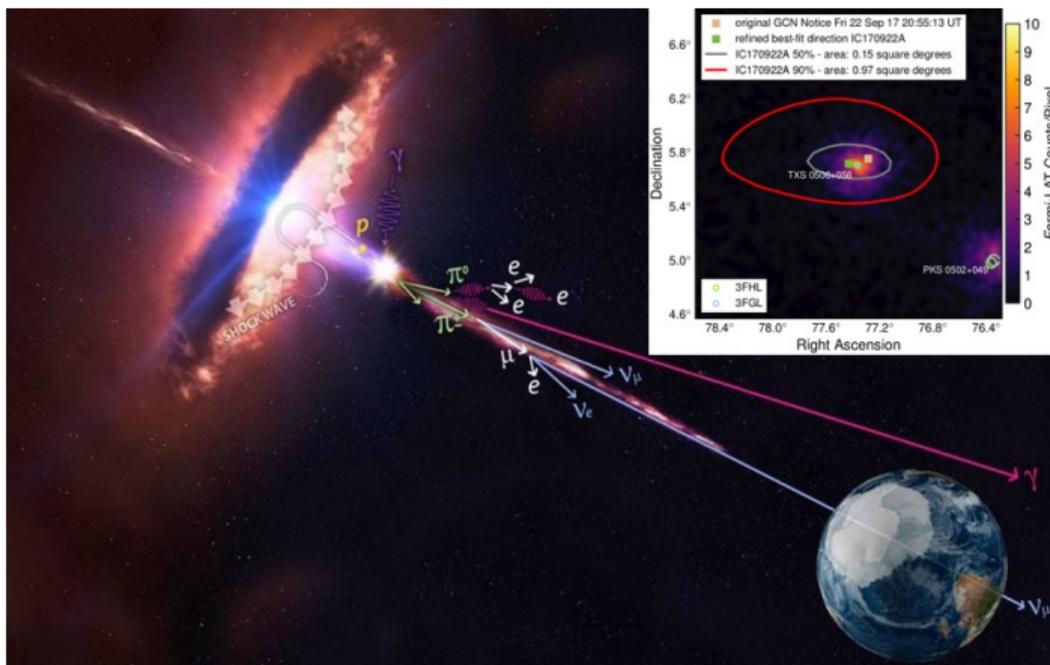


Découverte d'ICECUBE- 2013

$$\text{Flux diffus astrophysique } \Phi_\nu = 6.7_{-1.2}^{+1.1} \times 10^{-18} \left(\frac{E_\nu}{10^5 \text{ GeV}} \right)^{-2.5 \pm 0.09} / \text{GeV/cm}^2 / \text{s/sr}$$

[↔ IceCube, Astrophysical Journal 809 (2015) 98]

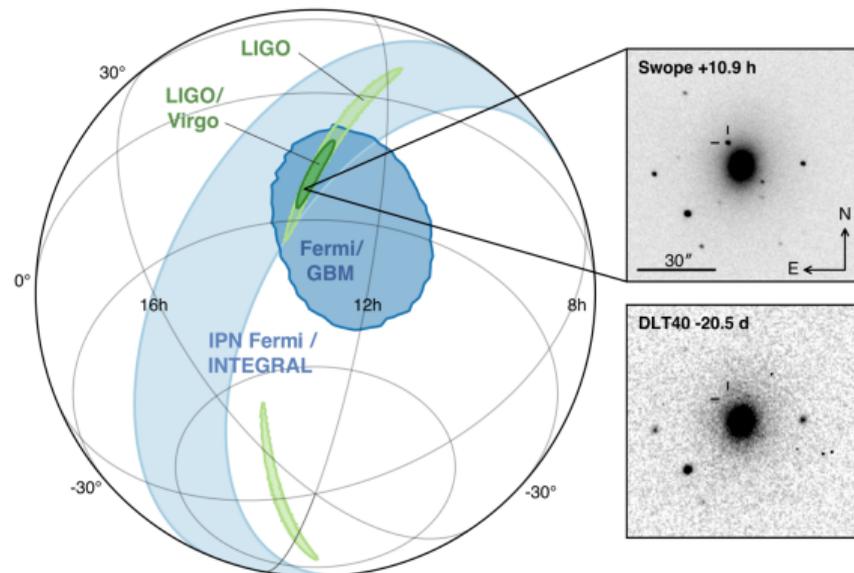
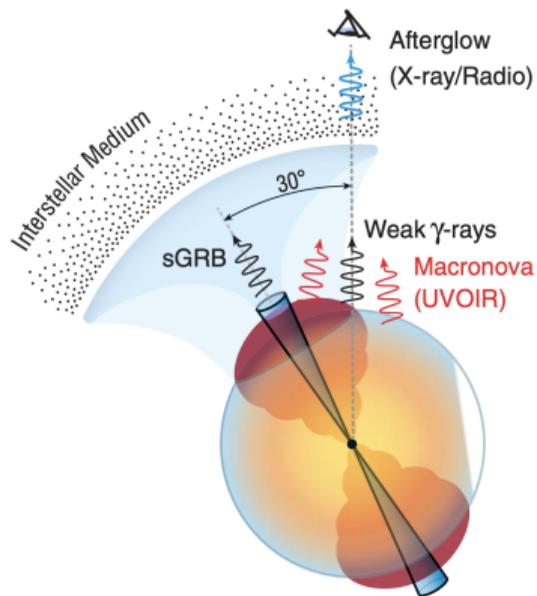
Connection Neutrinos - Photons - Ondes Gravitationnelles



2017 - Connection établie entre Photons & Neutrinos...

...grâce au Blazar TXS0506+056 (Fermi-LAT, MAGIC)

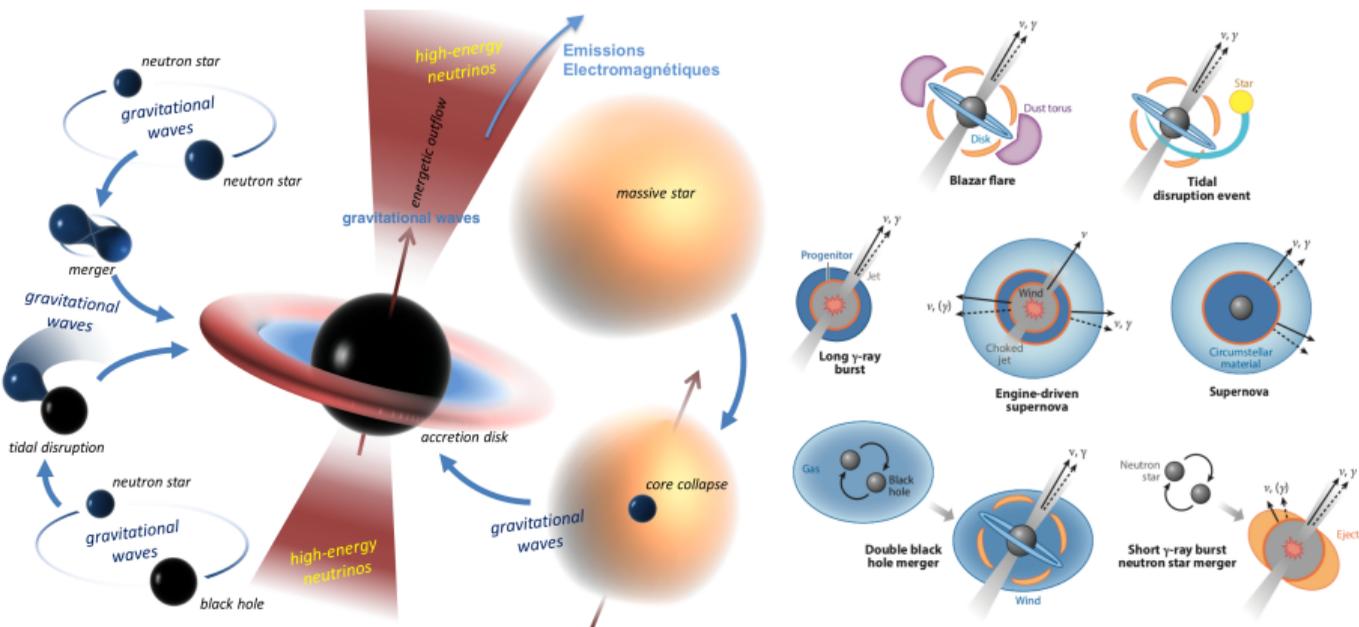
Connection Neutrinos - Photons - Ondes Gravitationnelles



2017 - Connection établie entre Photons & Ondes Gravitationnelles

...grâce à GW170817

Astronomie Multimessagers - comprendre les Rayonnements Cosmiques



Lexique

- GRB = Gamma-Ray Burst (Sursaut Gamma)
- AGN = Noyau Actif de Galaxie (Blazar)
- TDE = Evénement de Rupture par Effet de marée (TDE)

Comprendre le Rayonnement Cosmique

- Relier l'Effondrement/Fusion à la production du jet : **GWHEN** [GW - Ondes Gravitationnelles / HEN - Neutrinos de Haute Energie]
- Relier la dynamique du jet à la production de HEN : **HENEM** - [HEN - Neutrinos de Haute Energie / EM - ElectroMagnétiques (Radio \rightarrow γ)]

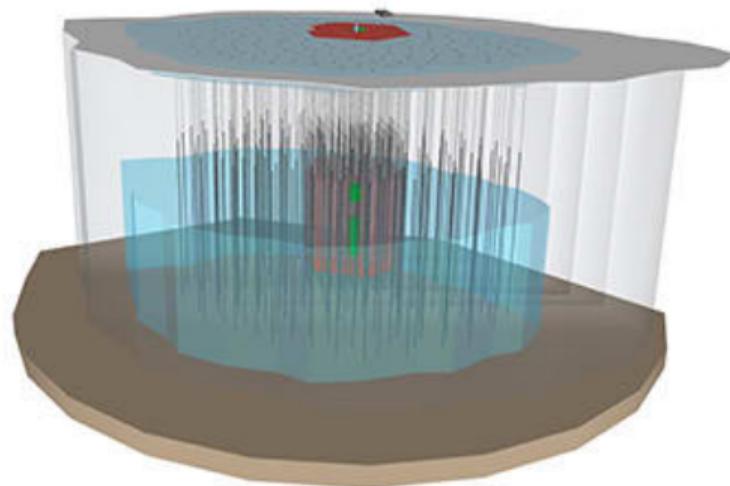
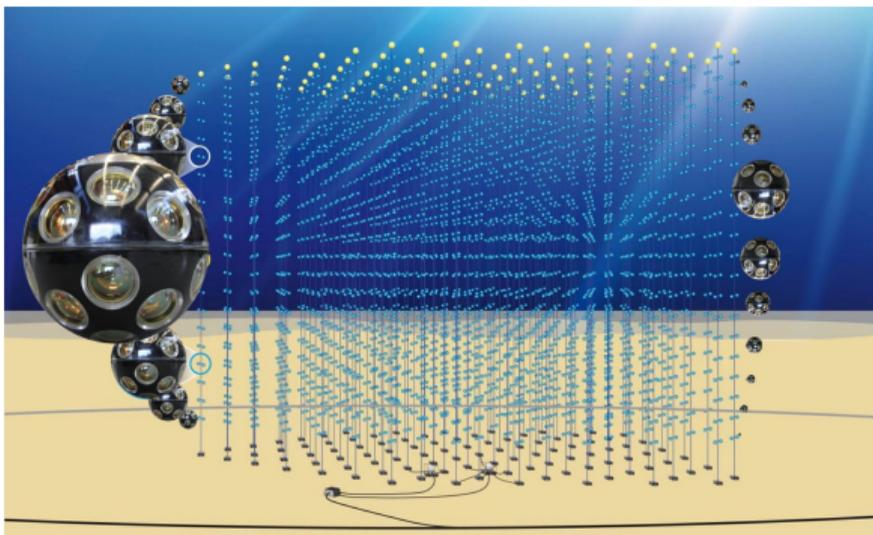
Les Télescopes à Neutrinos : ANTARES, KM3NET, ICECUBE



Télescopes à Neutrinos en Europe et ailleurs

- En Méditerranée : ANTARES (2008-2022), KM3NET en construction (ORCA, ARCA)
- ICECUBE en Antarctique

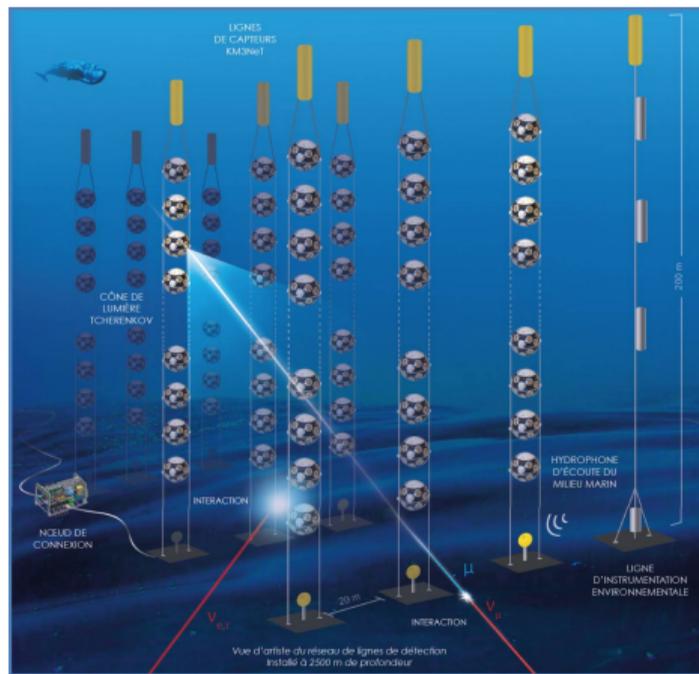
Les Télescopes à Neutrinos : ANTARES, KM3NET, ICECUBE



Des instruments gigantesques

- But : instrumenter plusieurs km^3 de milieu transparent

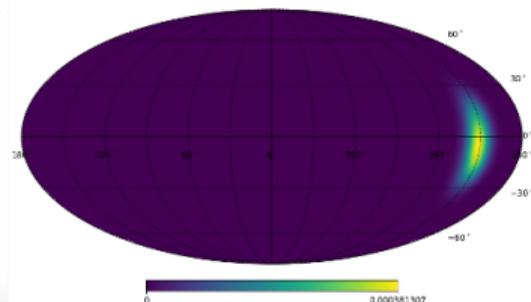
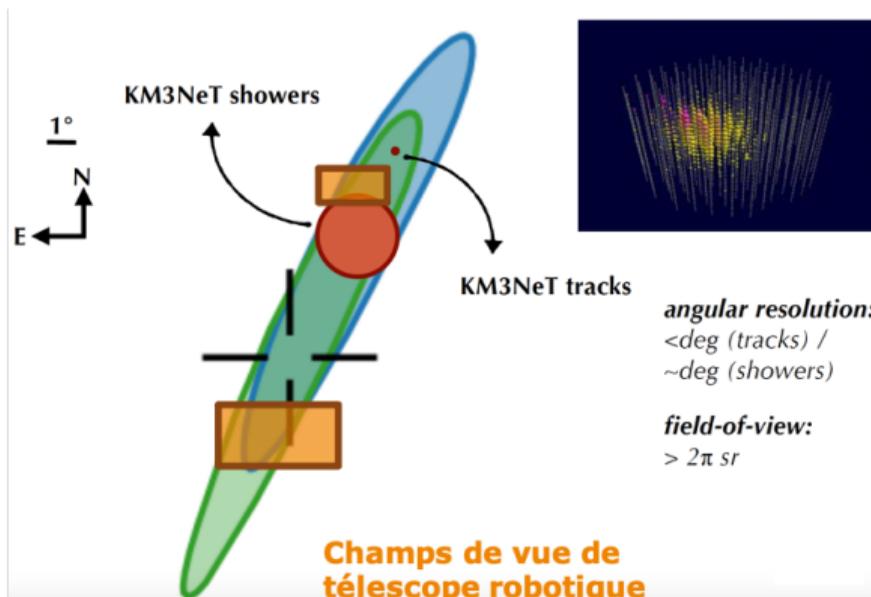
Les Télescopes à Neutrinos : ANTARES, KM3NET, ICECUBE



Des télescopes particuliers

- Couvrent environ la moitié du ciel, voir plus - fonction de l'énergie
- Une résolution angulaire \approx deg qui dépend du type de neutrino

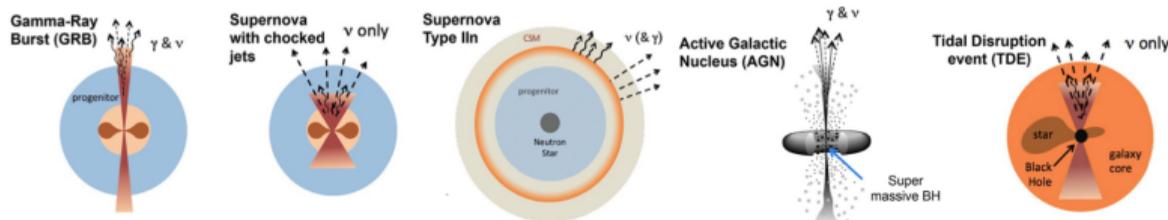
Les Télescopes à Neutrinos : ANTARES, KM3NET, ICECUBE



Des événements particuliers

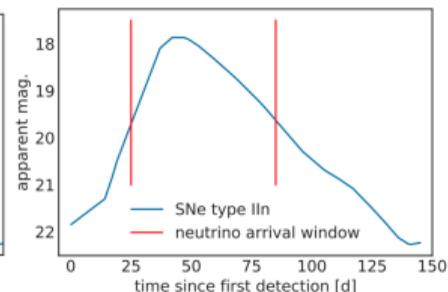
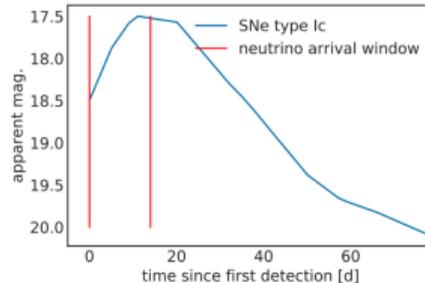
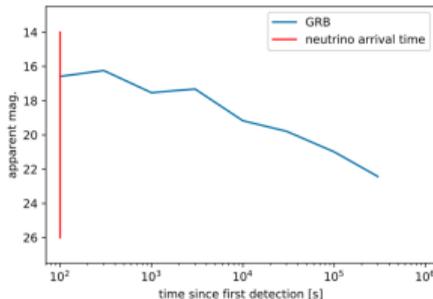
- Localisation meilleure qu'avec les Ondes Gravitationnelles
- Télescopes Grands Champs ou multiples "petits" télescopes

Une grande diversité des sources...



...et de leurs signaux

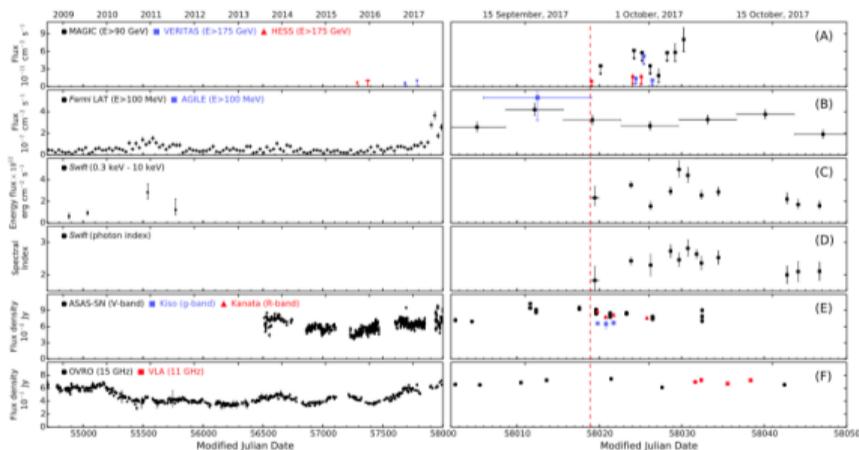
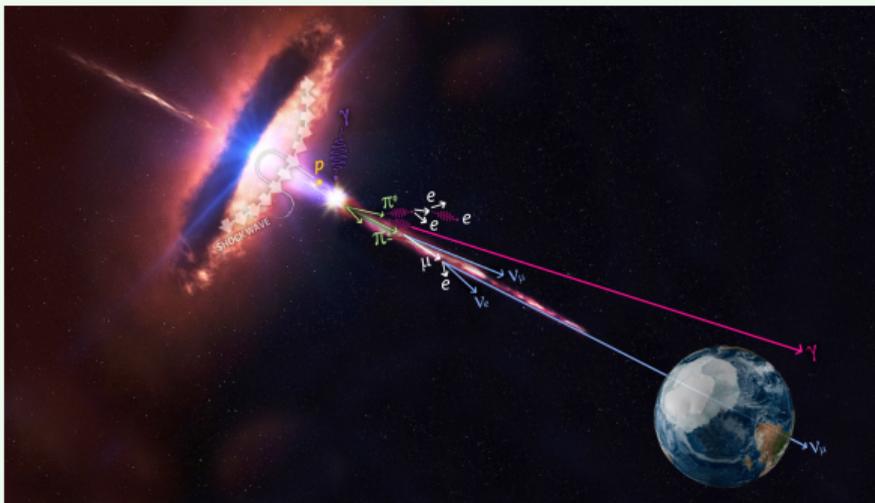
- Courte durée - "à la GRB" - courbe de lumière décroissante, qq heures
- Durée intermédiaire - SNIc, Kilonova - qq semaines
- Durée longue - SNIIn, TDE, AGN - qq mois



AGNs ?

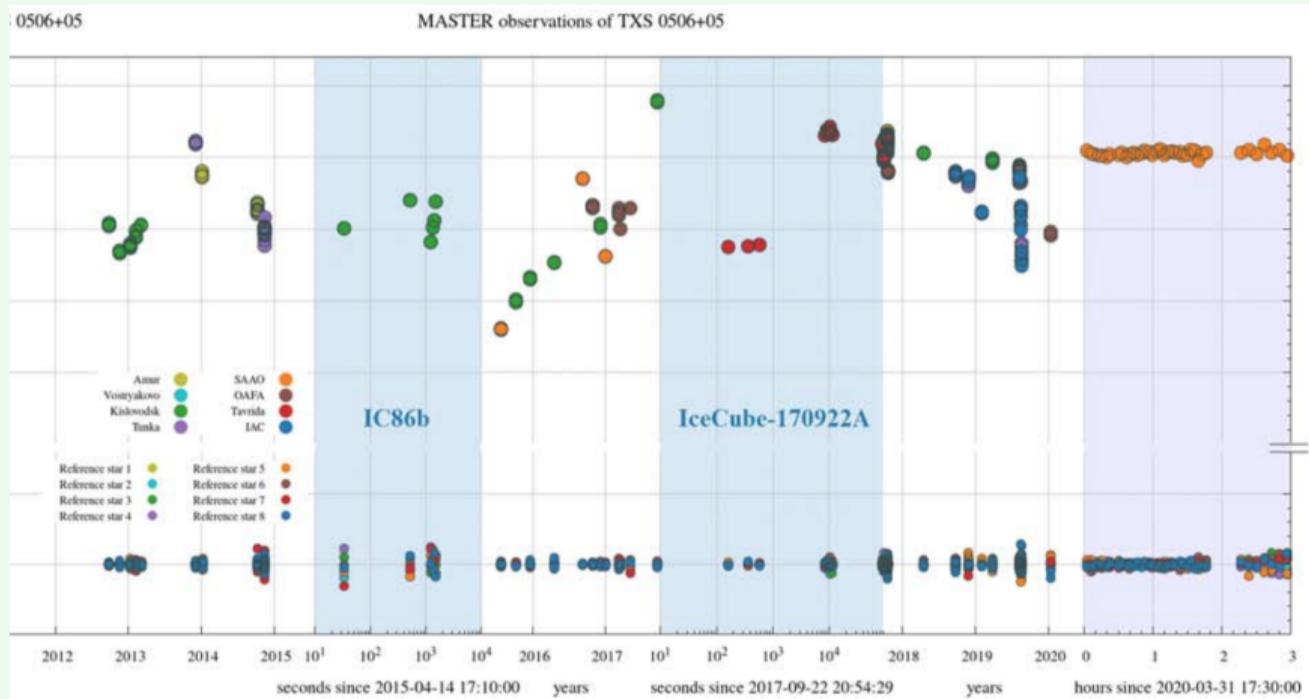


AGNs - TXS0506+056



Multi-messenger observations of a flaring blazar coincident with high-energy neutrino IceCube-170922A (IceCube et al, 2018)

AGNs ?

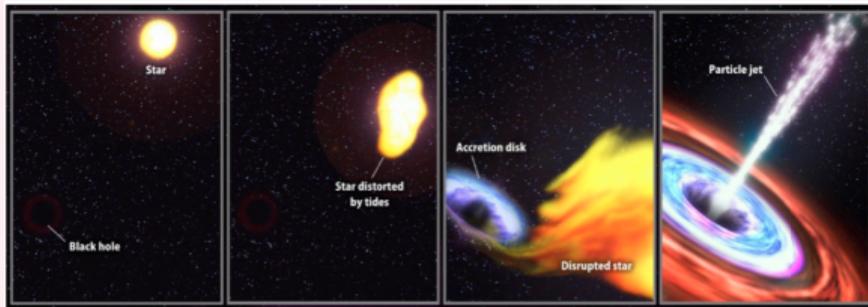
AGNs - TXS0506+056 - Emission Neutrinos → *rebrightening* en optique

Optical Observations Reveal Strong Evidence for HEN Progenitor (Lipunov et al, 2020)

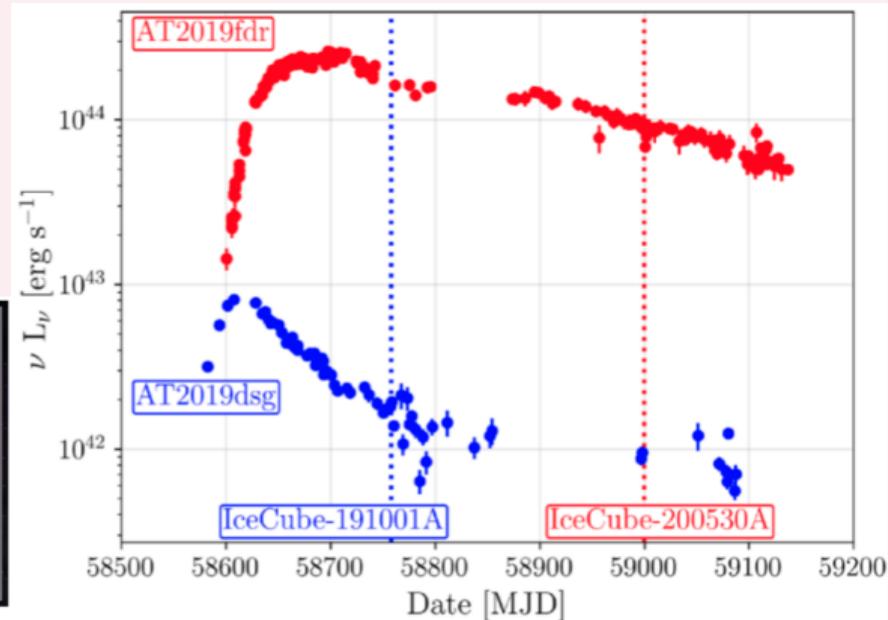
Sources possibles - Tidal Disruption Events (TDE) ?



TDE & AT2019dsg



Credit: NASA



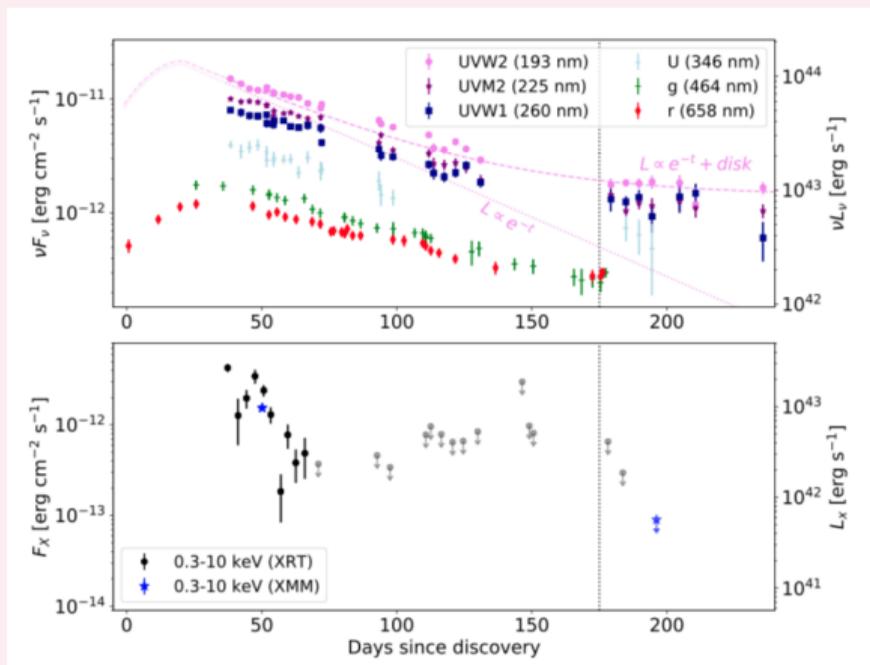
A tidal disruption event coincident with a high-energy neutrino (R. Stein et al, Nature 2021)

Neutrinos from tidal disruption events (R. Stein, 12/2020)

Sources possibles - Tidal Disruption Events (TDE) ?



TDE & AT2019dsg

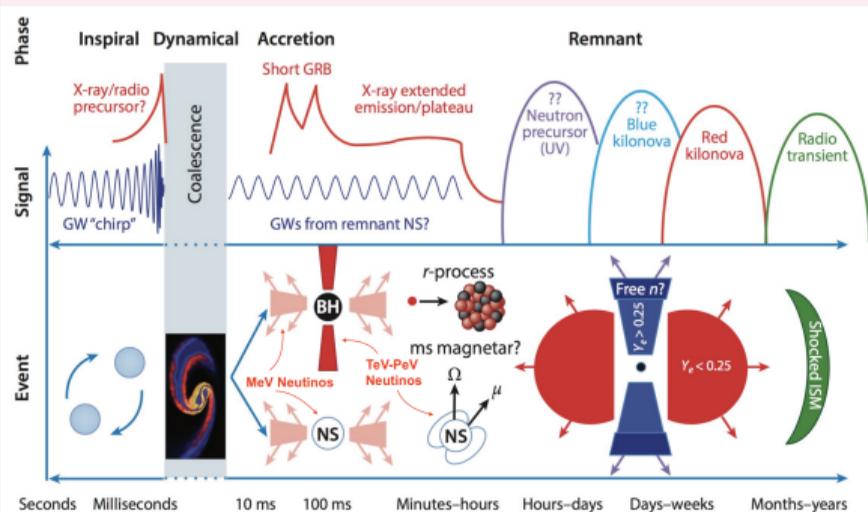
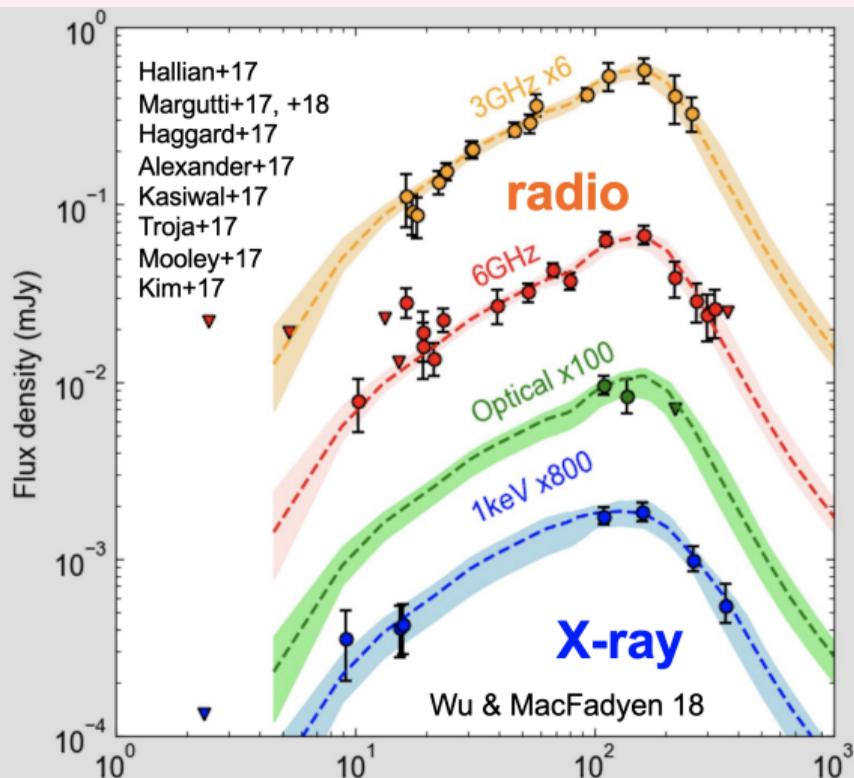


A tidal disruption event coincident with a high-energy neutrino (R. Stein et al, 2021)

Des sources de type GRBs ?



Emissions Electromagnetiques & Multimessagers



Alertes Neutrinos avec AMON/IceCube/KM3NeT



Alertes existantes - Publiques

- Alertes "Gold" : 12/an, > 50% astrophysique - *latest* : 24/06/2022 - **Observé \approx 1/mois**
- Alertes "Bronze" : 16/an, > 30% astrophysique - *latest* : 28/09/2022 - **Observé \approx 1.3/mois**

Autres Alertes Publiques

- NU_EM : 2-4/an HAWC-ICECUBE + 2-4/an Fermi-ANTARES (seulement position + rayon 90%)
 ⇒ *latest* : 28/07/2022 (IceCube - HAWC) - **Observé \approx 0.7/mois**
- ICECUBE Cascades : 8/an, > 85% astrophysique (avec carte FITS)
 ⇒ *latest* : 03/09/2022 - **Observé \approx 0.5/mois**

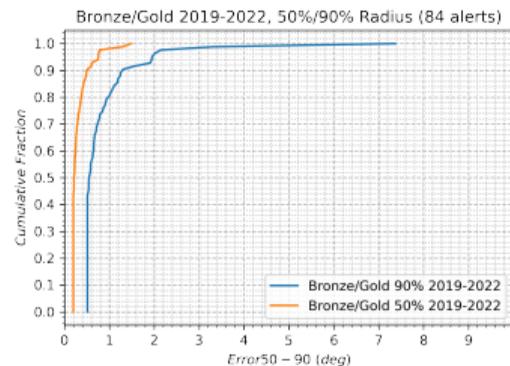
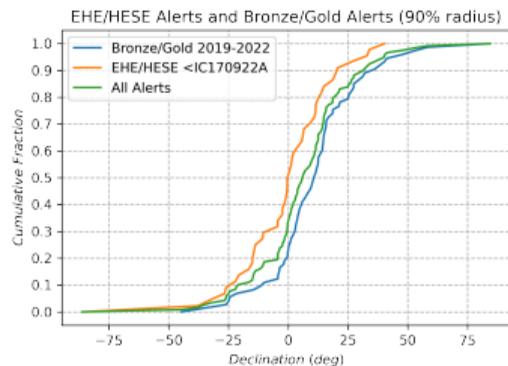
Alertes Possibles - Privées

- Alertes OFU (Optique/X) : jets GRB/SN, Nord, multiplets 2 evts en 100s $\Delta\Omega < 3.5^\circ$ (ROTSE, PTF, Swift)
- GFU (γ -ray) : clusters autour de sources sélectionnées (MAGIC, VERITAS)

Contenu des Alertes IceCube(/KM3NeT) (2023)

- Position + incertitude - $\lesssim 1^\circ \rightarrow 10^\circ$ (Traces) / 20° (Cascades)
- *Signalitude* + Taux de Fausses Alarmes + Energie

Les Alertes Neutrinos sont-elles suivies ?



Décembre 2021-Juin 2022, essentiellement pas de suivi (public) !

1- 11 alertes Gold [5/11 avec contreparties possibles ?]

- ⇒ 2 avec 0 suivi optique (excepté MASTER) et 0 source 4FGL dans FoV, mais 4FGL activité autour - **contrepartie improbable ?**
- ⇒ 3 avec 0 suivi (excepté MASTER/ZTF) et ≥ 1 source 4FGL dans FoV, mais avec activité Blazar radio - **possible contrepartie ?**
- ⇒ 2 avec 0 suivi et 0 source 4FGL dans FoV - **pas de recherche de contrepartie**
- ⇒ 3 avec 0 suivi (GCN ou ATel), toutes avec 0/beaucoup de sources 4FGL - **pas de recherche de contrepartie**

2- 10 Alertes Bronze [5/10 avec de possibles contreparties ?]

- ⇒ 2 avec multiples ATel (optique, radio etc) - **possible contreparties**
- ⇒ 2 avec 0 rapport malgré de nouvelles sources FERMI-LAT - **possible contrepartie ?**
- ⇒ 2 avec 0 rapports despite sources 4FGL dans FoV - **pas de recherche de contrepartie**
- ⇒ 3 avec 0 rapport avec 0 sources dans FoV - **pas de recherche de contrepartie**
- ⇒ 1 avec 0 rapport malgré SNIIn découverte - **possible contrepartie pas étudiée**

Les Alertes Neutrinos sont-elles suivies ?



Décembre 2021-Juin 2022, essentiellement pas de suivi (public) !

1- 11 alertes Gold [5/11 avec contreparties possibles ?]

- ⇒ 2 avec 0 suivi optique (excepté MASTER) et 0 source 4FGL dans FoV, mais 4FGL activité autour - **contrepartie improbable ?**
- ⇒ 3 avec 0 suivi (excepté MASTER/ZTF) et ≥ 1 source 4FGL dans FoV, mais avec activité Blazar radio - **possible contrepartie ?**
- ⇒ 2 avec 0 suivi et 0 source 4FGL dans FoV - **pas de recherche de contrepartie**
- ⇒ 3 avec 0 suivi (GCN ou ATel), toutes avec 0/beaucoup de sources 4FGL - **pas de recherche de contrepartie**

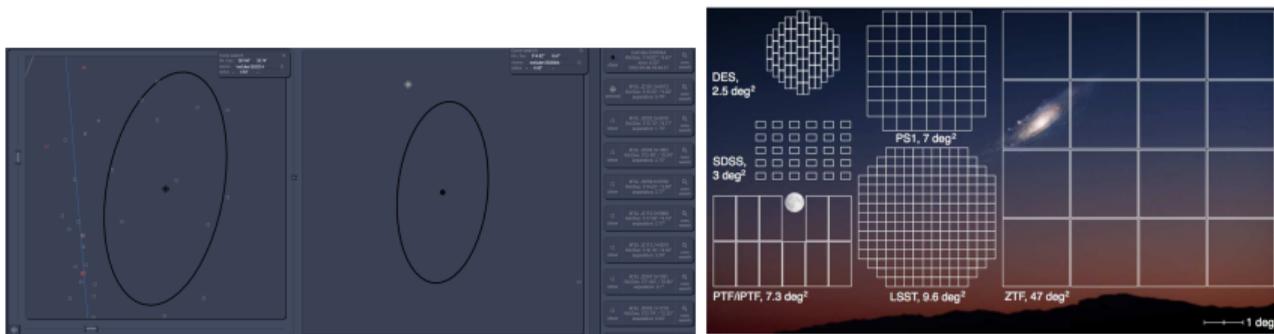
2- 10 Alertes Bronze [5/10 avec de possibles contreparties ?]

- ⇒ 2 avec multiples ATel (optique, radio etc) - **possible contreparties**
- ⇒ 2 avec 0 rapport malgré de nouvelles sources FERMI-LAT - **possible contrepartie ?**
- ⇒ 2 avec 0 rapports despite sources 4FGL dans FoV - **pas de recherche de contrepartie**
- ⇒ 3 avec 0 rapport avec 0 sources dans FoV - **pas de recherche de contrepartie**
- ⇒ 1 avec 0 rapport malgré SNIIn découverte - **possible contrepartie pas étudiée**

≈ 1.4-2 alertes/mois avec de possibles contreparties (Gold/Bronze)

+ NuEm (0.5/mois)/ Cascades (0.35/mois), sans suivi !
 ≈ 2 alertes/mois d'intérêt à suivre

Alertes Gold - Exemples d'Alertes Gold sans suivis



<https://astro-colibri.com/>

0 sources 4 FGL dans le Champ de Vue

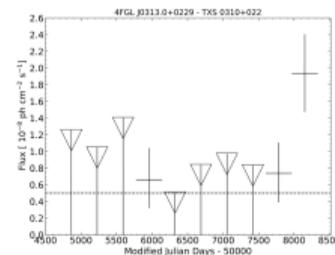
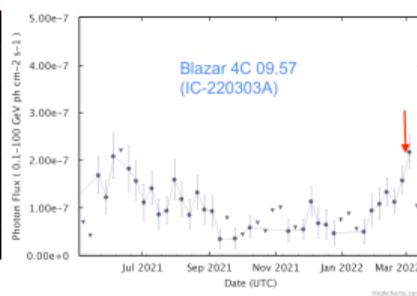
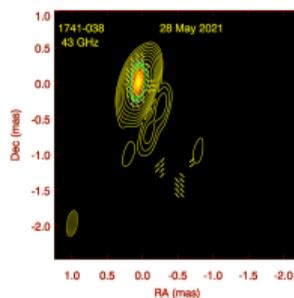
- IceCube-220202A - erreur 0.7deg, 151 TeV, FAR 1.9/an
- IceCube-220306A (fig) - erreur 0.5deg error, 413 TeV, FAR 0.4/an (plus proche à 0.8°)

Beaucoup de sources 4 FGL dans Champ de Vue

- IceCube-220221A (fig) - erreur 3.6deg error, 157 TeV, FAR 0.4/yr - 6 sources possible

Des suivis dédiés auraient été utiles !

Alertes Gold - Exemples de IceCube-220205B, 220303A, 220304A



IceCube-220205B - erreur 0.5deg, 216 TeV, FAR 0.7/an

- ATel# 15222 + # 15215 - **PKS 1741-03**, suivi radio - bas flux en 3.5-13.5mm (22-85 GHz) - cohérent ?

IceCube-220303A - erreur 1.2deg, 398 TeV, FAR 0.54/yr

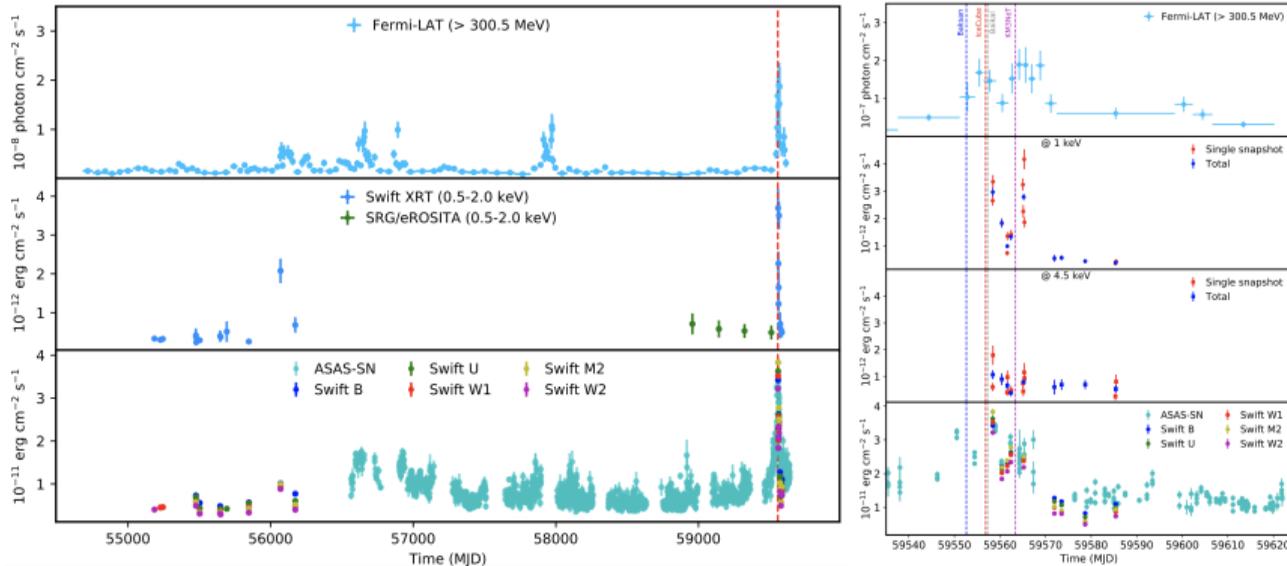
- 0 4FGL sources / MASTER - **Blazar 4C 09.57** (+ proche source 4FGL) / SWIFT/XRT - Contrepartie X ?

IceCube-220304A - erreur 6.2deg, 260 TeV, FAR 0.57/yr

- Beaucoup de sources 4FGL / Flux Fermi-LAT $20\times$ **TXS0310+022** - Suivi Radio de ce Blazar, ATel# 15266

⇒ **Confirmation/Caractérisation des contreparties possibles nécessaires**

Alertes Bronzes - Exemple de IceCube-211208A



<https://arxiv.org/pdf/2204.05060.pdf>

IceCube-211208A - erreur 2.1deg, 170 TeV, FAR 1.2/an

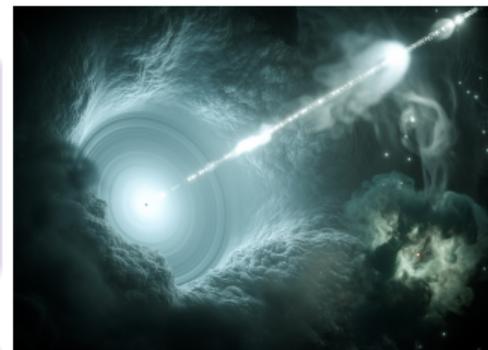
- 2 sources 4FGL possibles, dont 4FGL J0738.1+1742 - PKS 0735+178
- 13 ATels : MASTER, REM-NOT (optique, NIR), X-rays, radio
- **Monitoring long terme nécessaire pour évaluer PKS 0735+178 comme possible contrepartie**

Conclusions & Perspectives



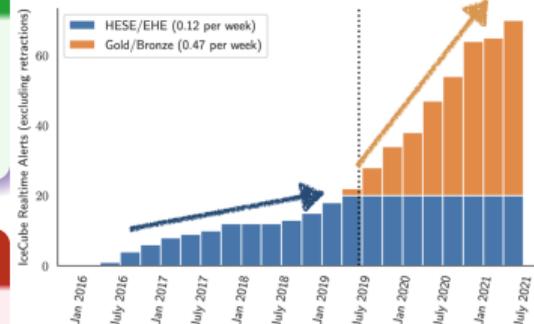
Un domaine en pleine expansion !

- **Astronomie Gravitationnelle** : nouvelles observations à partir du printemps 2023
⇒ Un horizon élargi ⇒ de nouvelles fusions d'étoiles à neutrons
- **Astronomie Neutrino de Haute Energie** : nouvelles alertes KM3NET 2023
⇒ ICECUBE continue à observer le ciel



De nouvelles découvertes en perspectives !

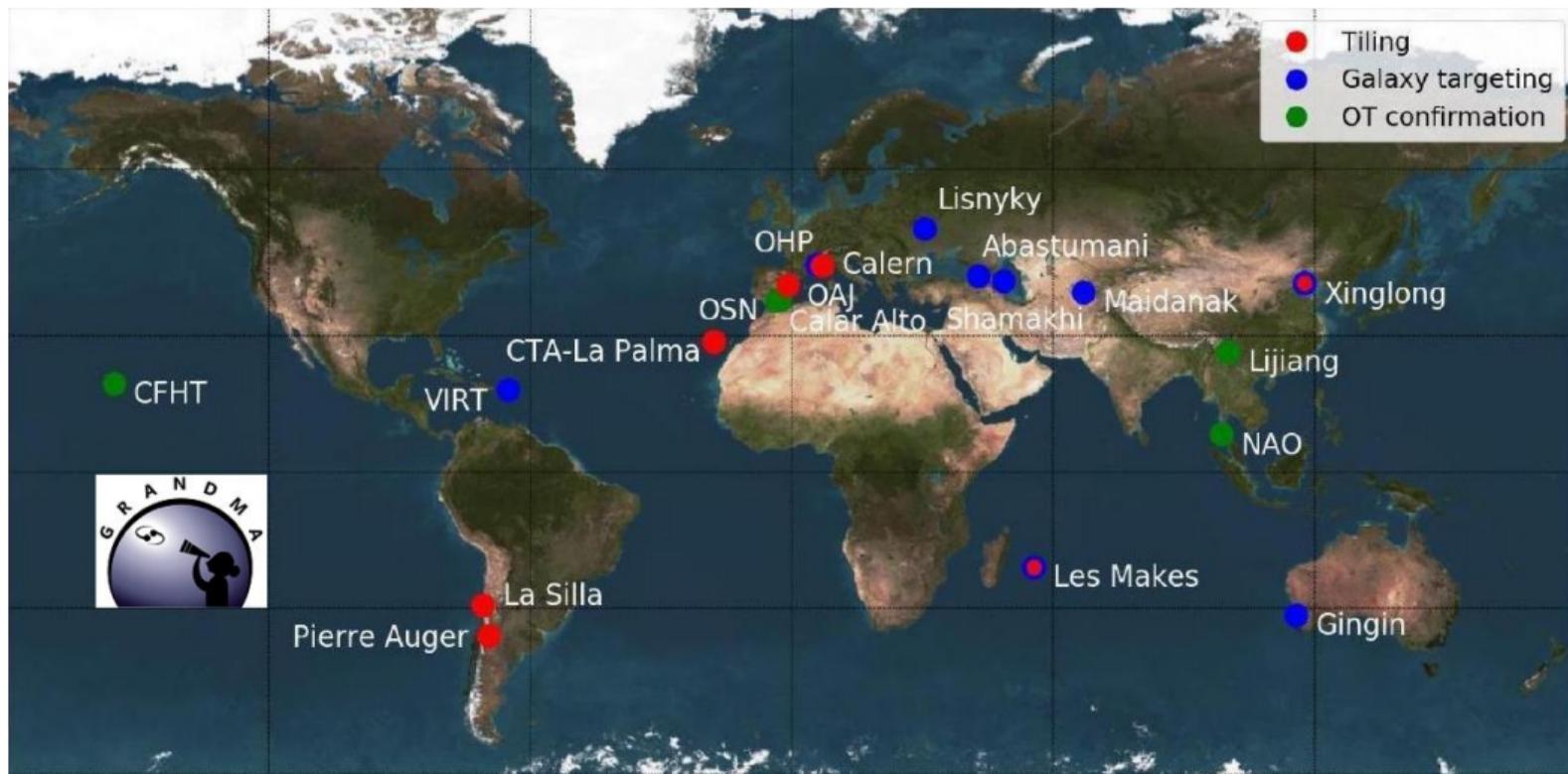
- **Connection GWEM établie** : Binaire GW170817 ⇒ Supernovae ?
- **Connection HENEM établie** : Blazar TXS0506+056 ⇒ Elargir le "bestiaire"
- **Connection GWHEN toujours manquante** + vue complète GWHENEM !



Mais aussi de petits soucis en perspectives

- **2023** : Jusqu'à 1 alerte GW/HEN par jour ⇒ Priorisation des observations ?
⇒ A ajouter aux alertes GAIA, LSST...
- **Avantage des neutrinos** ⇒ Boîte d'erreur ≪ Ondes Gravitationnelles
- **Inconvénients des neutrinos** : type/distance de la source a priori inconnue

Conclusions & Perspectives



<https://grandma.ijclab.in2p3.fr>

Conclusions & Perspectives



KILONOVA CATCHER

<https://grandma-kilonovacatcher.lal.in2p3.fr>

Apport des astronomes "amateurs" important !

- On le savait déjà !
- Coordination pas si évidente mais fructueuse

GRANDMA observations of ZTF/*Fink* transients during summer 2021 [Get access >](#)

V Alvazyan, M Almualla, S Antier, A Baransky, K Barynova, S Basa, F Bayard, S Beradze, D Berezin, M Blazek ... [Show more](#)

Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 515, Issue 4, October 2022, Pages 6007–6022, <https://doi.org/10.1093/mnras/stac2054>

Published: 25 July 2022 [Article history](#) ▼

🗨 Cite 📄 Permissions 🔄 Share ▼

ABSTRACT

We present our follow-up observations with GRANDMA of [transient](#) sources revealed by the Zwicky Transient Facility (ZTF). Over a period of six months, all ZTF alerts were examined in real time by a dedicated science module implemented in the *Fink* broker, which will be used in filtering of transients discovered by the Vera C. Rubin Observatory. In this article, we present three selection methods to identify kilonova candidates. Out of more than 35 million alerts, a hundred sources have passed our selection criteria. Six were then followed-up by GRANDMA (by both professional and amateur astronomers). The majority were finally classified either as asteroids or as supernovae events. We mobilized 37 telescopes, bringing together a large sample of images, taken under various conditions and quality. To complement the orphan kilonova candidates, we included three additional supernovae alerts to conduct further observations during summer 2021. We demonstrate the importance of the amateur astronomer community that contributed images for scientific analyses of new sources discovered in a magnitude range $r' = 17 - 19$ mag. We based our rapid kilonova classification on the decay rate of the optical source that should exceed 0.3 mag d^{-1} . GRANDMA's follow-up determined the fading rate within $1.5 \pm 1.2 \text{ d}$ post-discovery, without waiting for further observations from ZTF. No confirmed kilonovae were discovered during our observing campaign. This work will be continued in the coming months in the view of preparing for kilonova searches in the next gravitational-wave observing run O4.