

Astroparticule

2/3

Nathalie PALANQUE-DELABROUILLE
CEA-Saclay
Bénodet, novembre 2017

Astroparticule

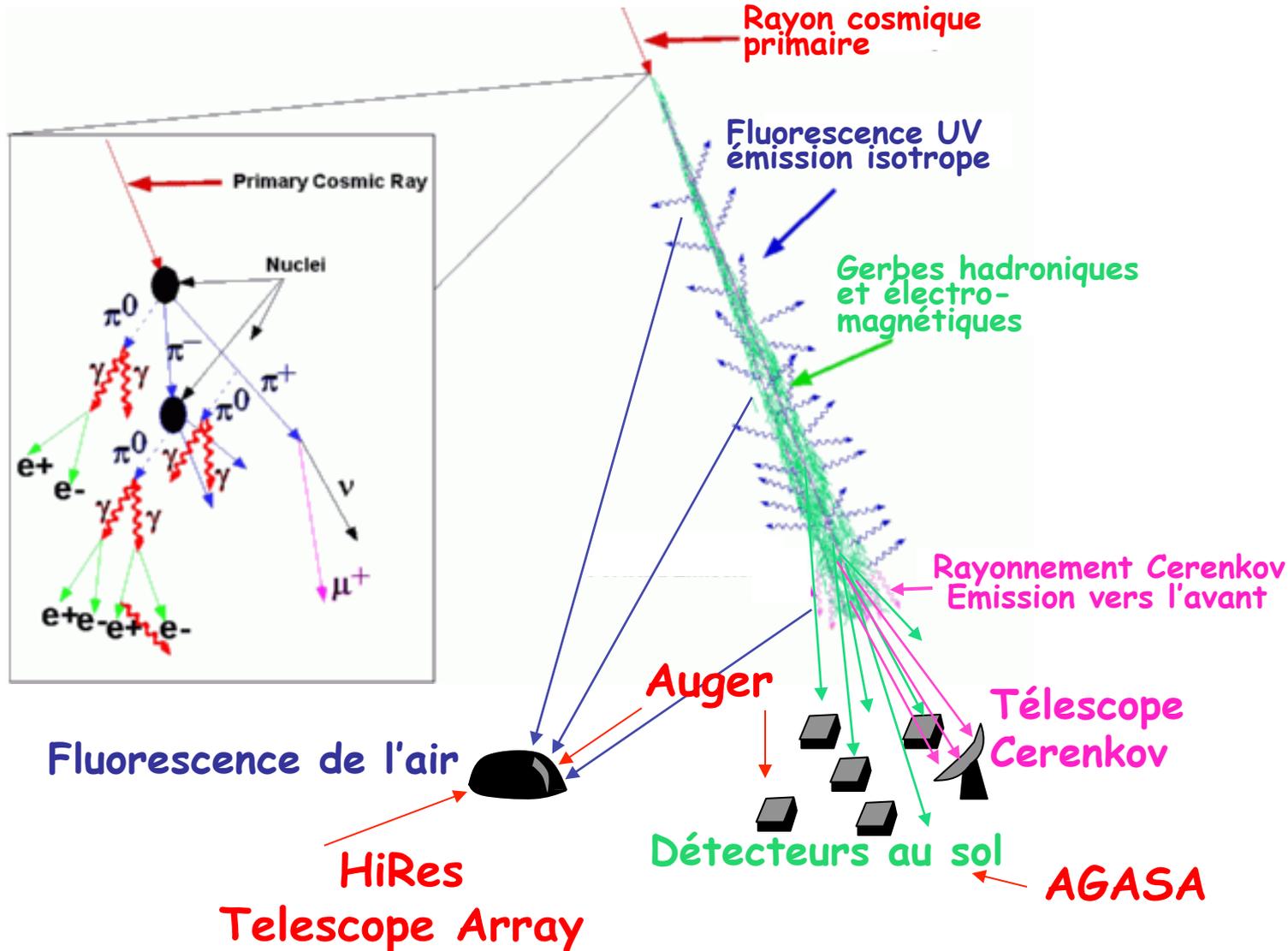
- 1) Approche multi-messagers
Rayons cosmiques (historique, propriétés)
-  2) Rayons cosmiques (état des lieux, derniers résultats)
Sursauts gamma
Ondes gravitationnelles
- 3) Neutrinos
 - Astronomie neutrino
 - Neutrinos et cosmologie

Astroparticule

2/3

- 
- Rayons cosmiques: techniques de détection
 - Etat des lieux (Auger, Telescope Array)
Fin du spectre (UHECR)
Origine galactique / extra-galactique
Sources
 - Univers extrême et trous noirs
 - Photons haute énergie et sursauts gamma
 - Ondes gravitationnelles

Techniques de détection



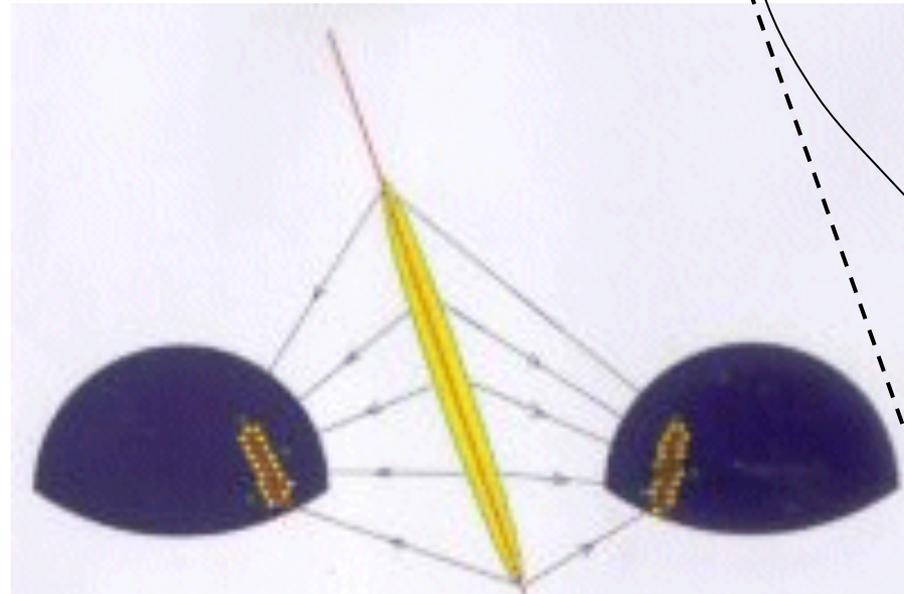
Techniques de détection

Lumière UV,
uniquement
par nuits claires
et sans lune
(~10%)

Trajectoire à partir de
géométrie + timing
ou
mode dual (mieux)

Energie: largeur
de la gerbe

Miroirs sphériques +
PMT au plan focal

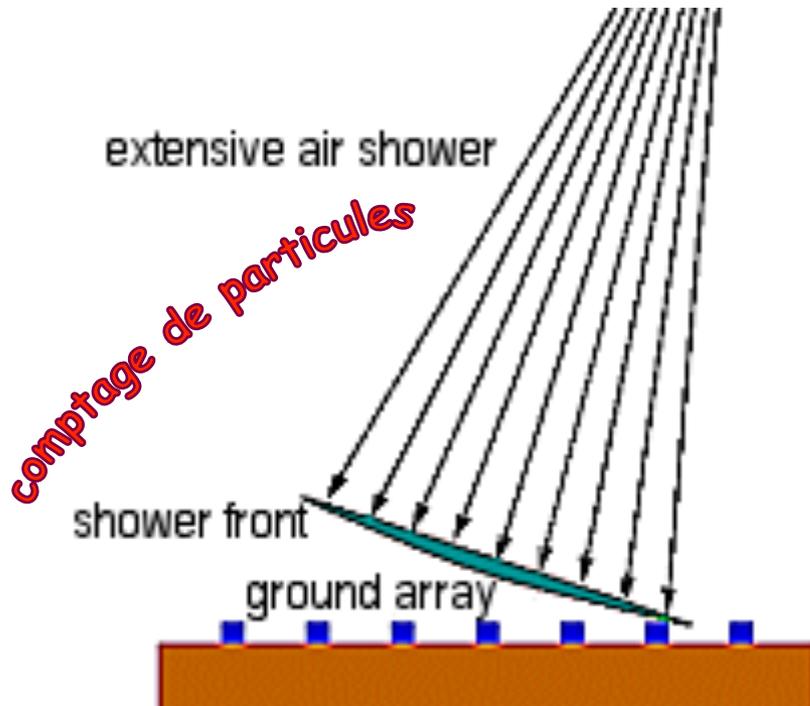


Fluorescence de l'air

X_{\max}

Profondeur
d'atmosphère
traversée

Techniques de détection



Trajectoire déterminée
à partir des temps d'arrivée
du front d'onde
sur détecteurs au sol

Energie déterminée
à partir des comptages

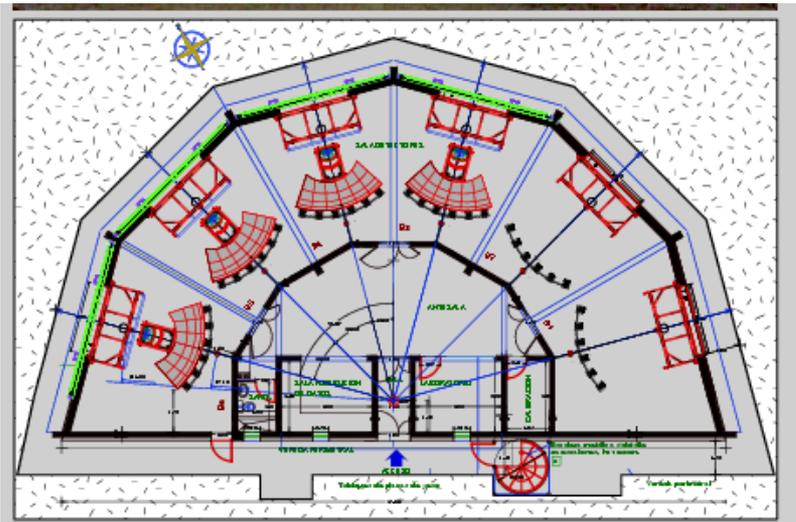
AUGER

Fluorescence de l'air + détecteurs au sol

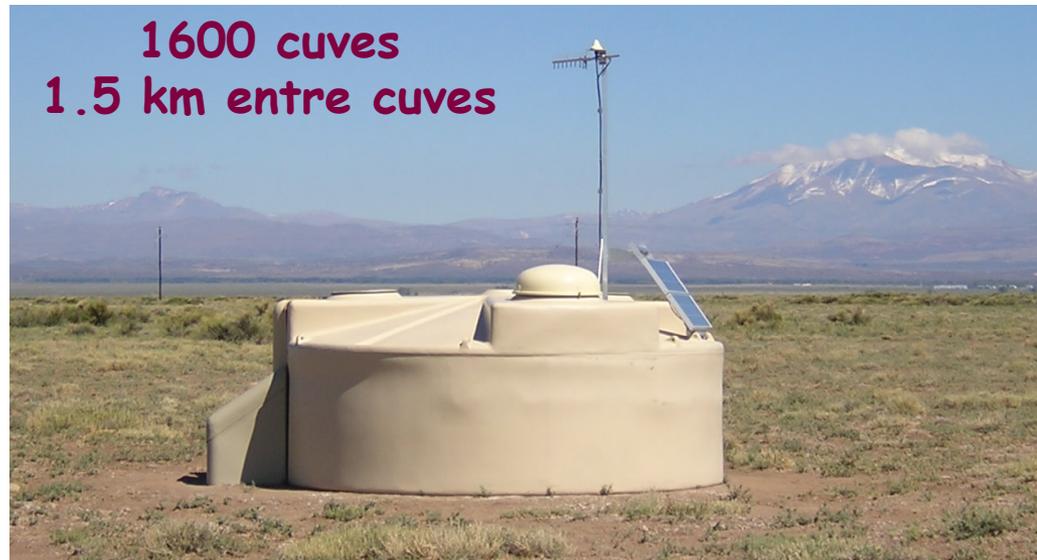
→ INTERCALIBRATION

sur 3000 km² en Argentine

4 stations de
téléscopes pour la fluorescence



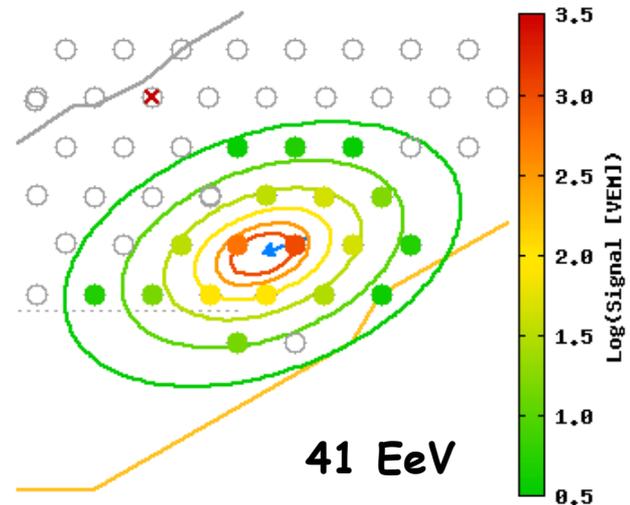
1600 cuvas
1.5 km entre cuvas



AUGER

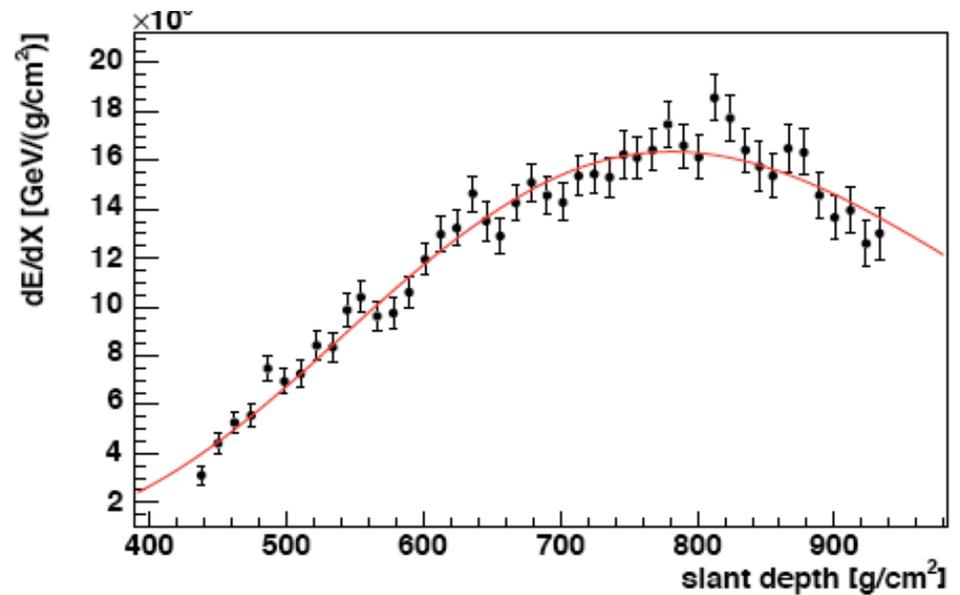
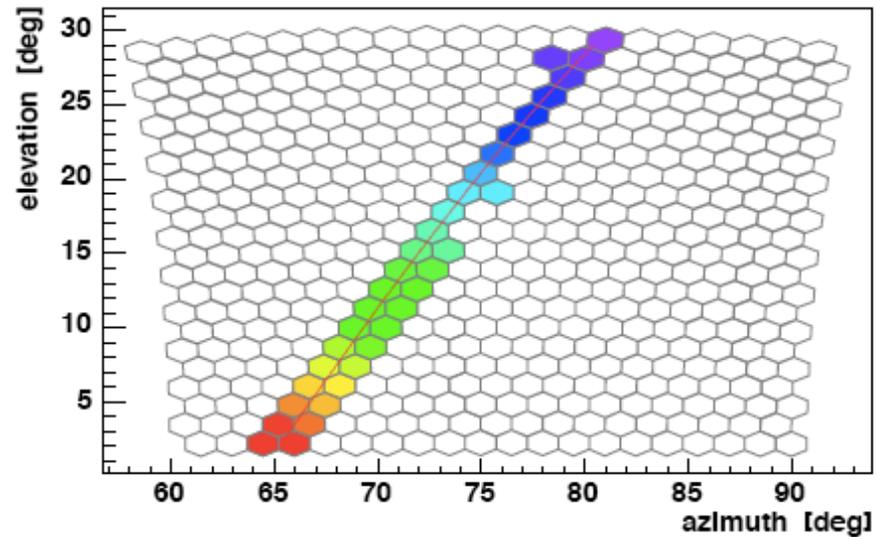
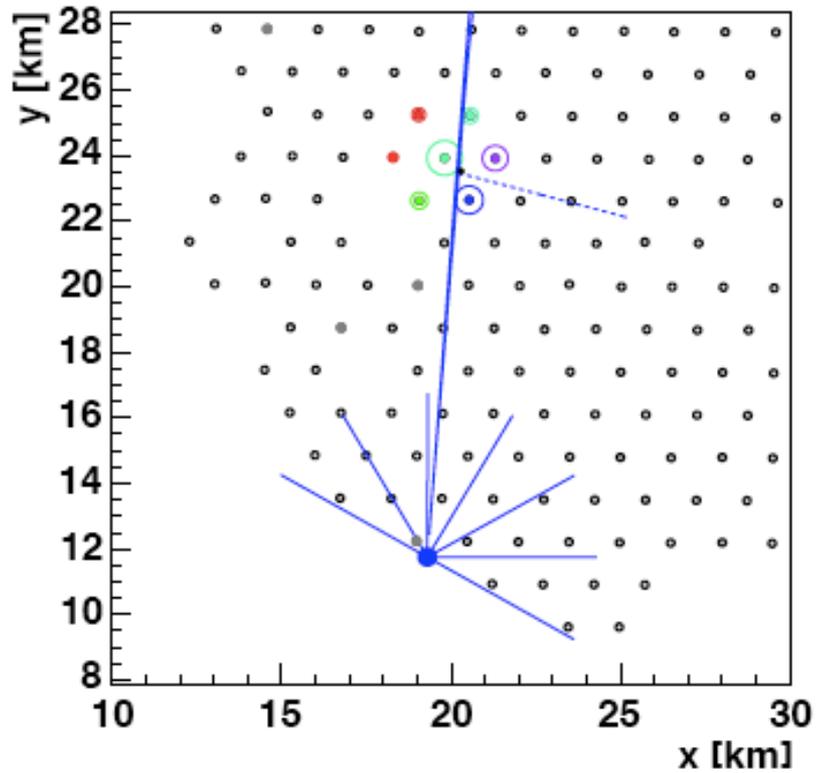


- > million d'événements enregistrés
- $E_{\max} \sim 1 \cdot 10^{20} \text{ eV}$



AUGER

événement hybride
 $\theta = 30^\circ$, $E \sim 8 \text{ EeV}$



AUGER

10^{19} eV	détecteur de surface	détecteur de fluorescence	hybride
$\Delta\theta$	2°	1°	0,4°
Δ impact	80 m	400 m	35 m
$\Delta E / E$	18%	15%	5%

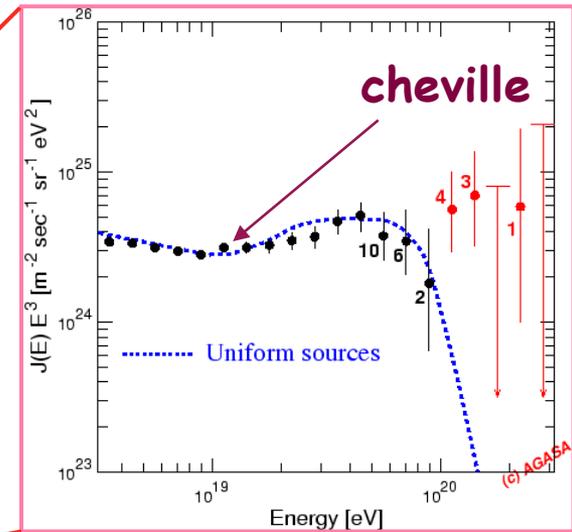
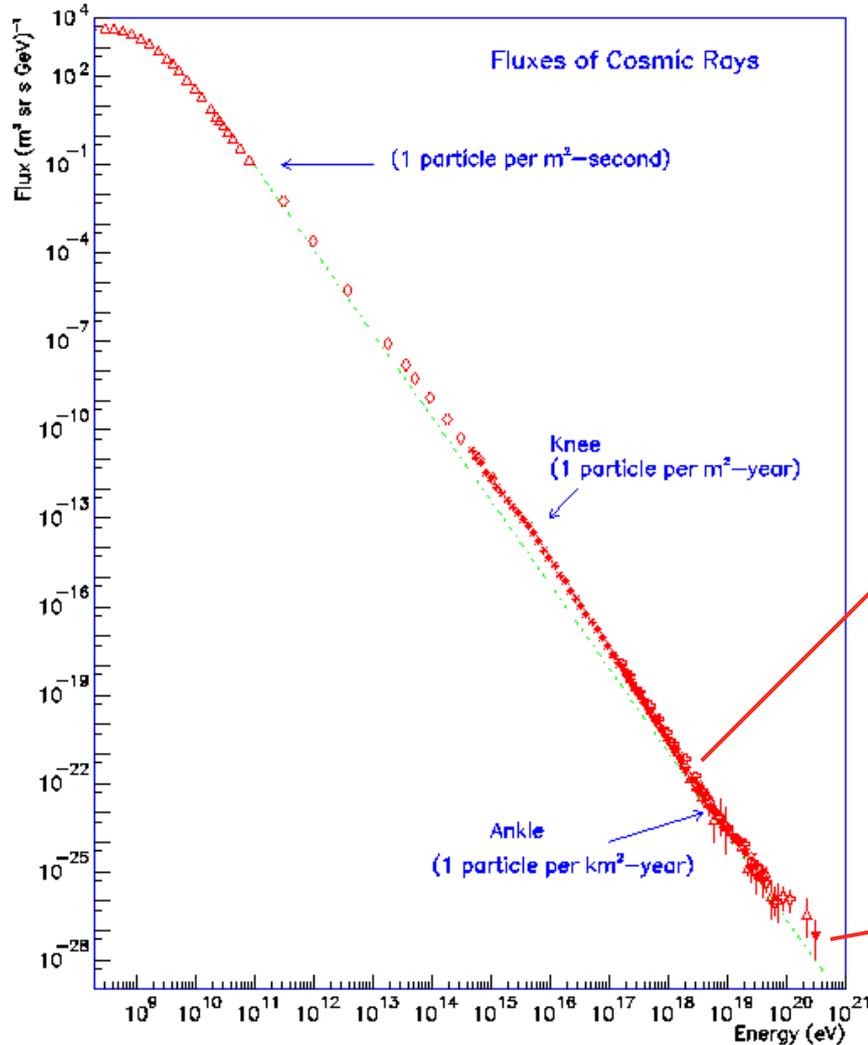
10^{20} eV	détecteur de surface	détecteur de fluorescence	hybride
$\Delta\theta$	1°	1°	0,4°
Δ impact	40 m	400 m	30 m
$\Delta E / E$	7%	10%	3%

Astroparticule

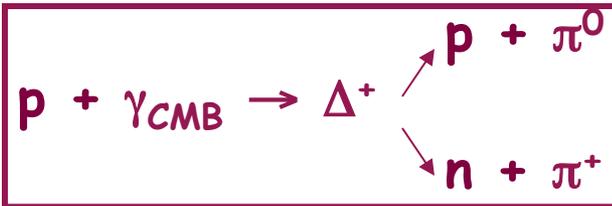
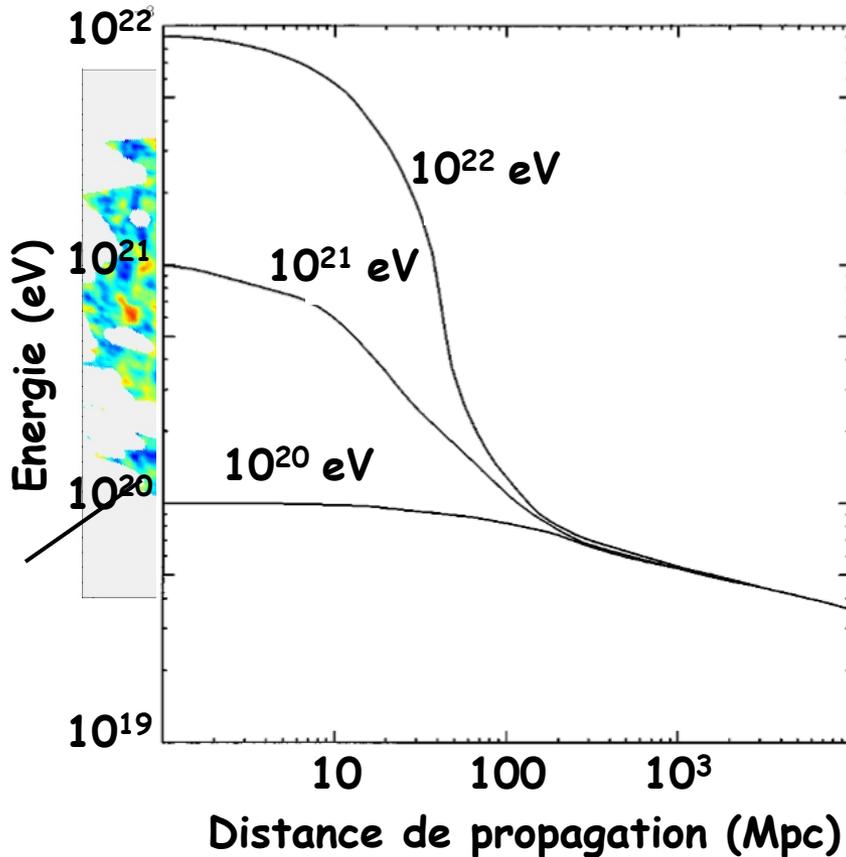
2/3

- Rayons cosmiques: techniques de détection
- • Etat des lieux (Auger, Telescope Array):
Fin du spectre (UHECR)
Origine galactique / extra-galactique
Sources
- Univers extrême et trous noirs
- Photons haute énergie et sursauts gamma
- Ondes gravitationnelles

La « fin » du spectre



GZK (Greisen Zatsepin Kuzmin) cut-off



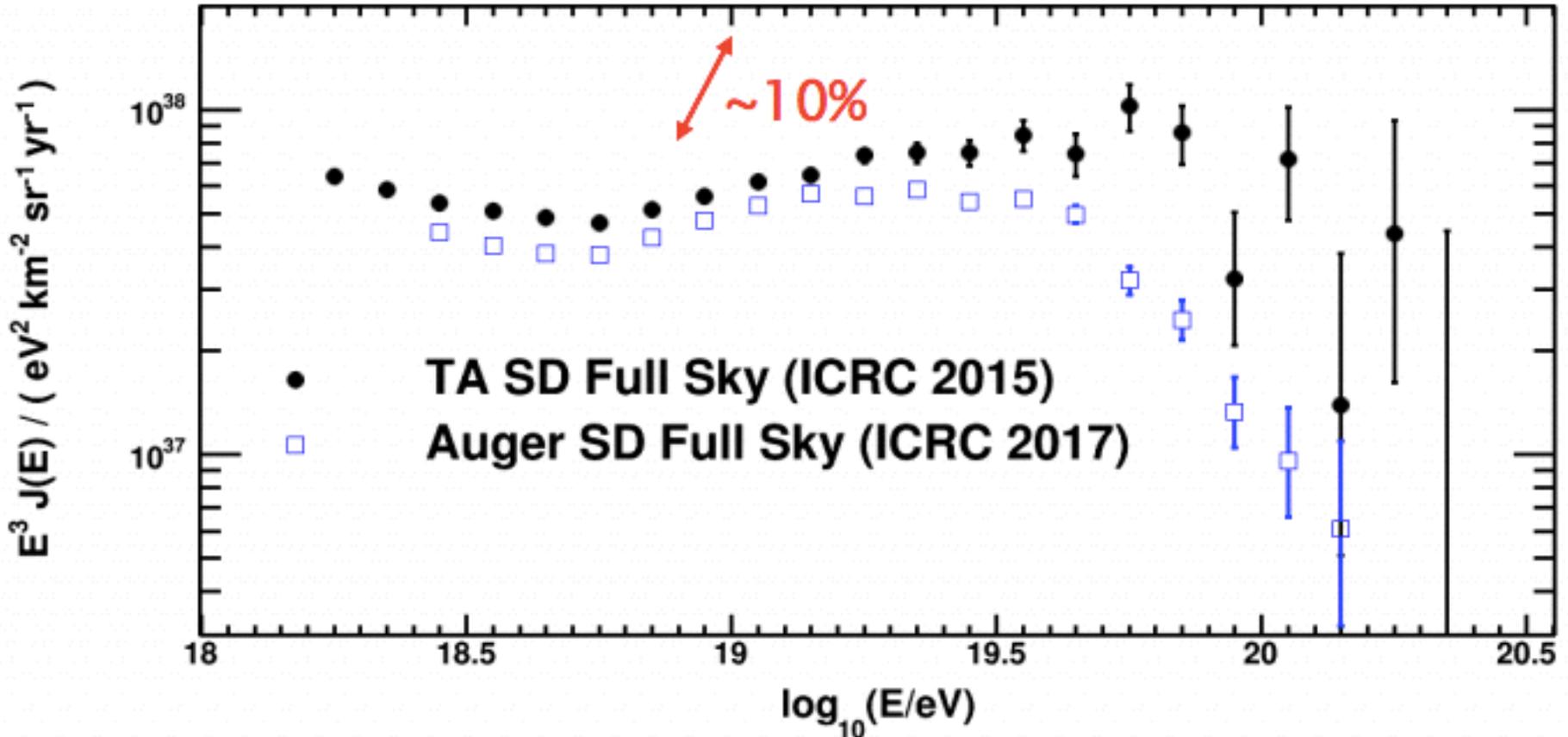
Processus possible
énergétiquement ($>5 \times 10^{19}$ eV)



Univers **opaque** aux rayons cosmiques

Sources avec $E > E_{\text{GZK}}$ sont à
 $d < 100$ Mpc (amas local)

Spectre UHE



Essentiel du désaccord: modélisation des gerbes

AUGER - spectre UHE

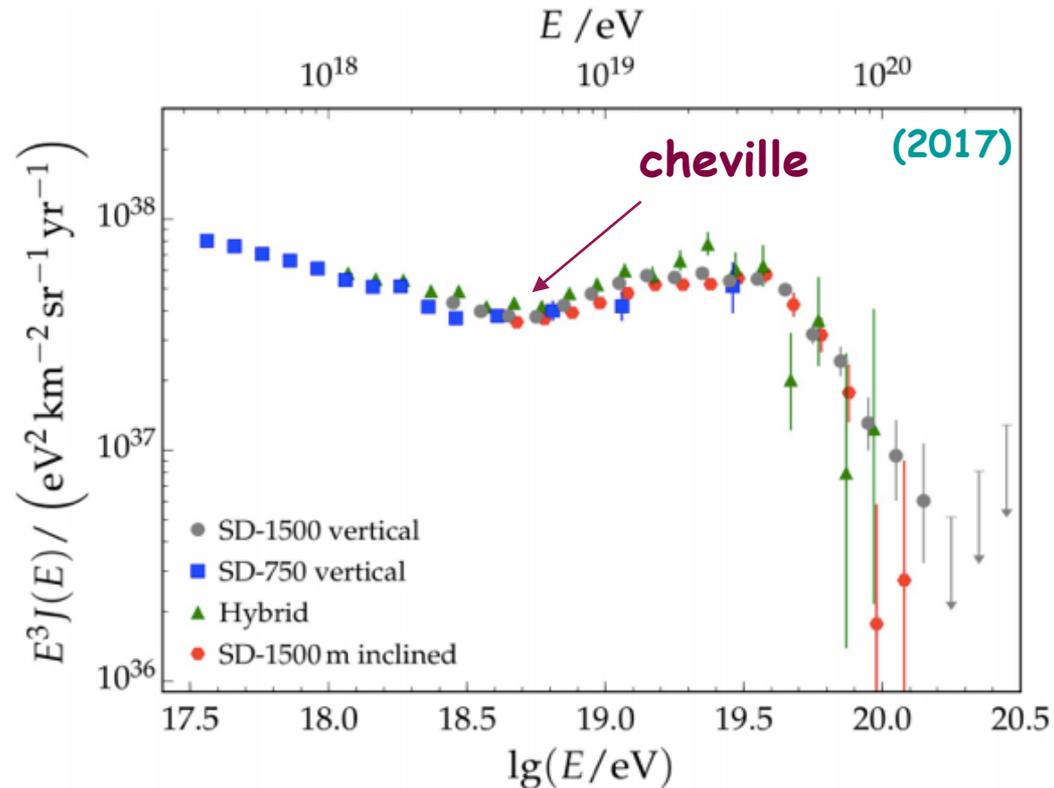
4 lots indépendants

1/ Coupure GZK confirmée
(spectre plat au delà de $4 \cdot 10^{19}$ eV
exclu $> 6\sigma$)

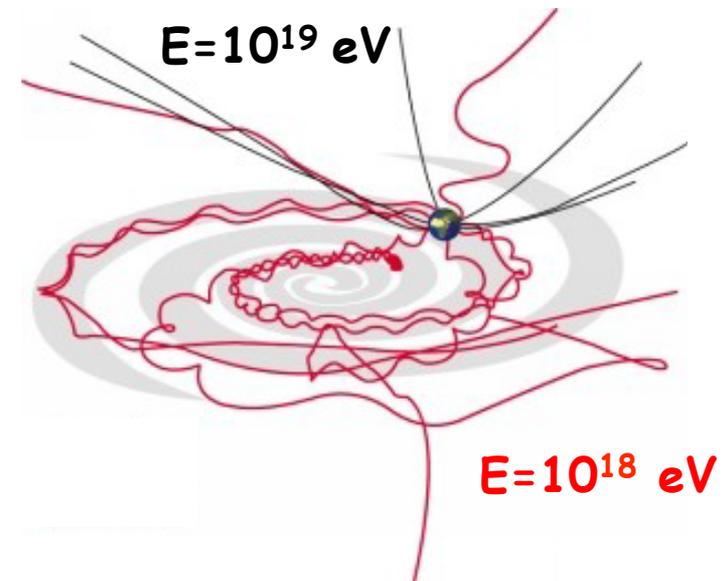
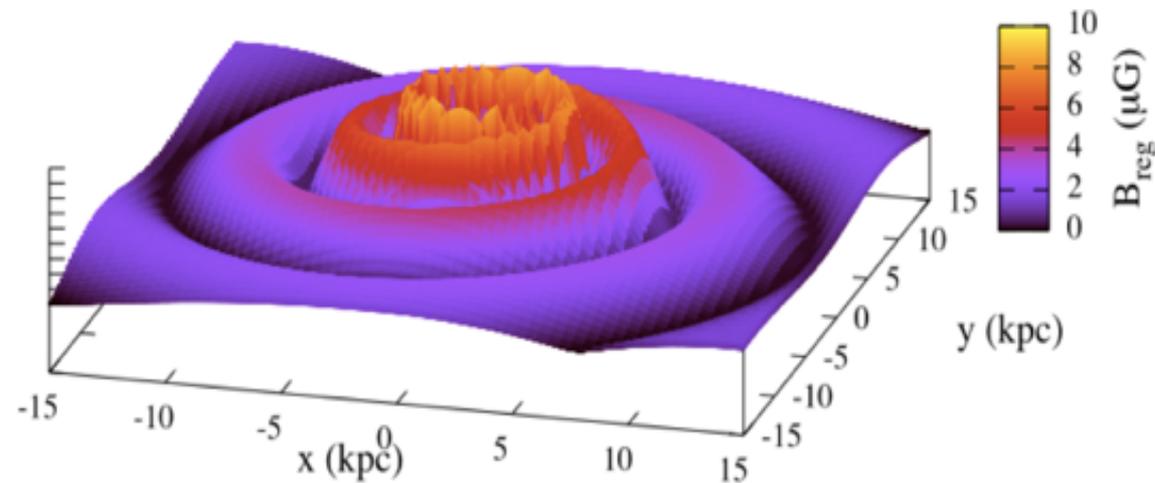
⇒ Rayons cosmiques issus
de sources lointaines

2/ Indication de changement
de composition ($Z \nearrow$ à 10^{19} eV)

⇒ E_{\max} atteint?

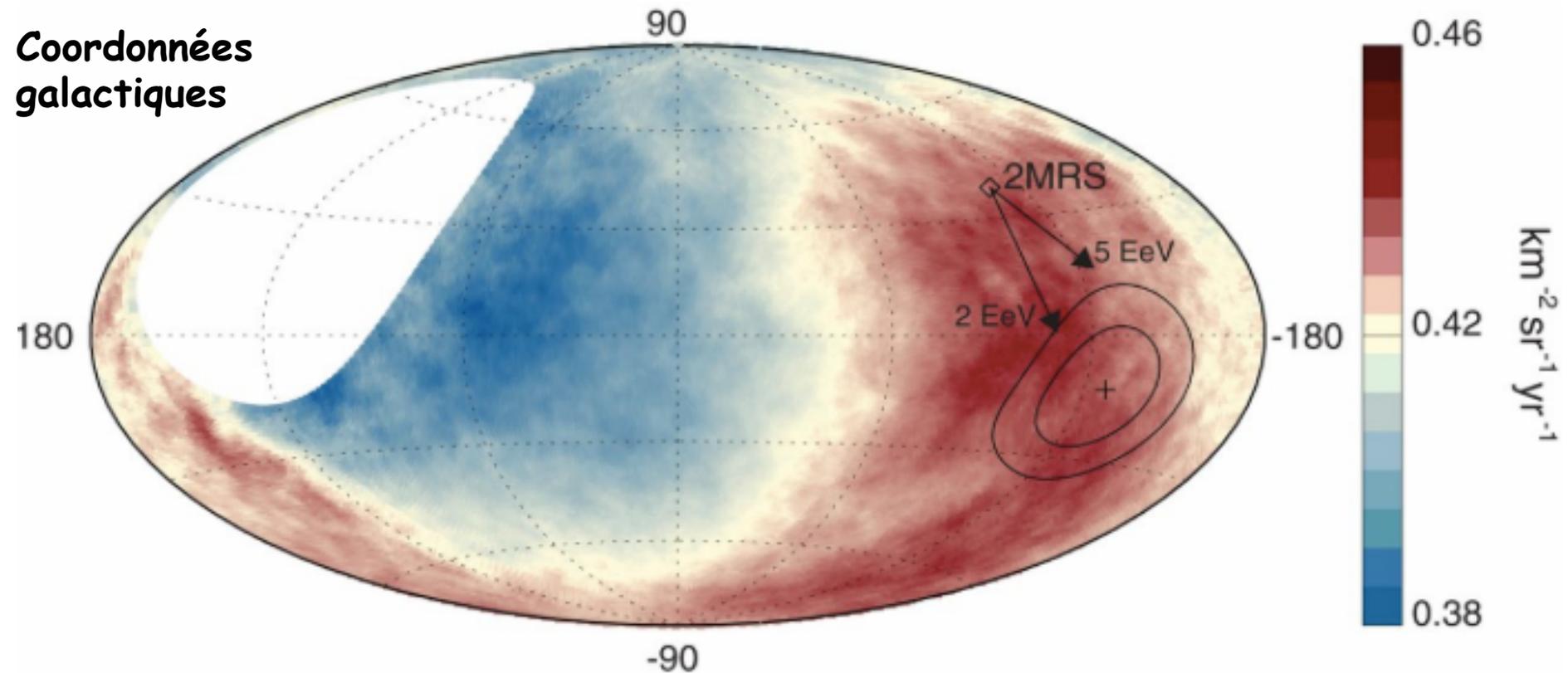


AUGER - origine des UHECR



Galactiques \Rightarrow fortes anisotropies associées à Voie Lactée
Extra-galactiques \Rightarrow inhomogénéités corrélées
avec grandes structures locales

AUGER - origine des UHECR



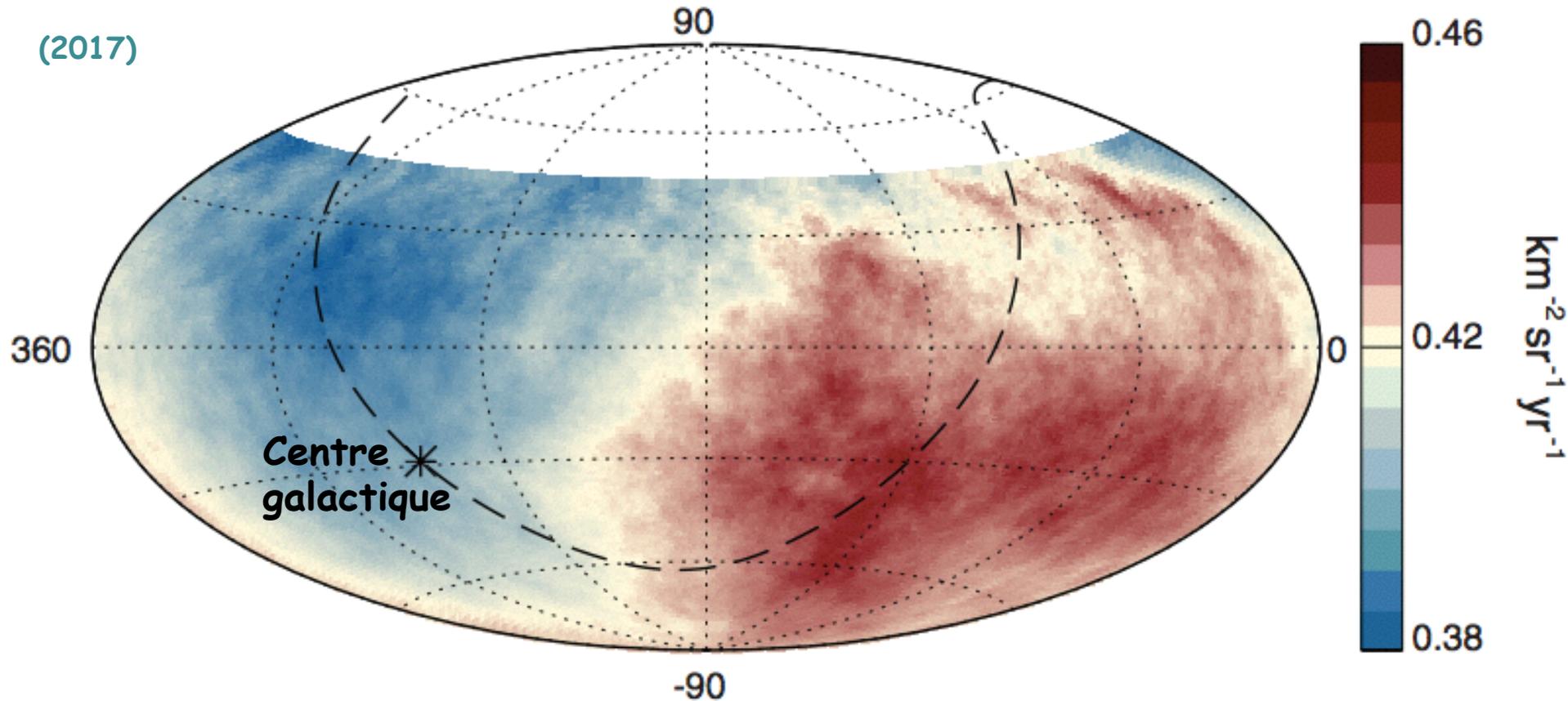
$E > 8 \cdot 10^{18} \text{ eV}$, anisotropie à 5.2σ , incompatible Voie Lactée

Indication origine extra-galactique

Signal à confirmer avec Telescope Array (Nord) pour 100% du ciel

AUGER - origine des UHECR

(2017)

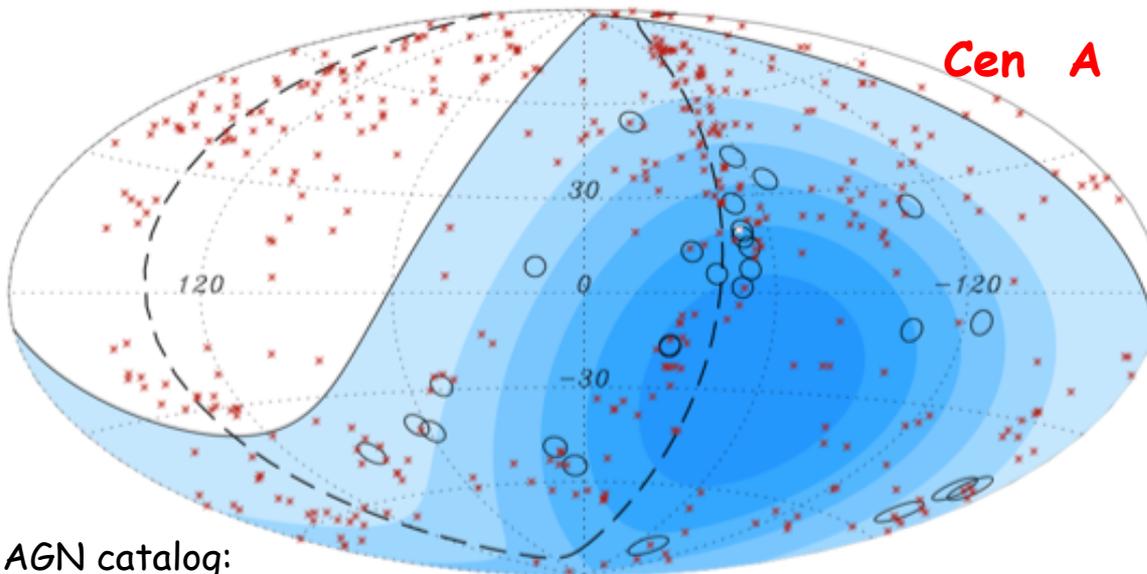


$E > 8 \cdot 10^{18}$ eV, anisotropie à 5.2σ , incompatible Voie Lactée

Indication origine extra-galactique

Signal à confirmer avec Telescope Array (Nord) pour 100% du ciel

AUGER - origine des UHECR



Bonne résolution angulaire
($< 1^\circ$)

⇒ **Etude des anisotropies**

○ Evts $E > 57 \text{ EeV}$

× AGNs $d < 71 \text{ Mpc}$

AGN catalog:
Véron-Céty and Véron, *A&A* 2006, 455 773

Number $E > 57 \text{ EeV}$	Number correlated within 3°	Expected if isotropy
27	20	5.6

Abraham et al., [arXiv:0712.2843](https://arxiv.org/abs/0712.2843)

2007: premiers indices de
correlation des UHECR
avec **sources astronomiques**

... mais non confirmés ...

2014: Correlation de 28%
pour 21% (isotropie)

[\[arXiv:1411:6111\]](https://arxiv.org/abs/1411.6111)

AUGER - origine des UHECR



- Contribution principale au flux γ extra-galactique
 - Hypothèse: flux UHECR \propto flux (non-thermique) photons γ
- ⇒ Recherche de corrélations avec catalogues (Fermi-LAT)
restreints à $d < 250$ Mpc

AUGER - origine des UHECR



AGN
Correlation à 2.7σ
Fraction anisotropie = 7%

Galaxie à forte formation stellaire
Correlation à 4.0σ
Fraction anisotropie = 10%

Petite indication de corrélation, à confirmer

Astroparticule

2/3

- Rayons cosmiques: techniques de détection
- Etat des lieux (Auger, Telescope Array):
Fin du spectre (UHECR)
Origine galactique / extra-galactique
Sources
- • Univers extrême et trous noirs
- Photons haute énergie et sursauts gamma
- Ondes gravitationnelles

Trous noirs

Approche en mécanique classique du trou noir

Rien (pas même la lumière) ne peut s'échapper

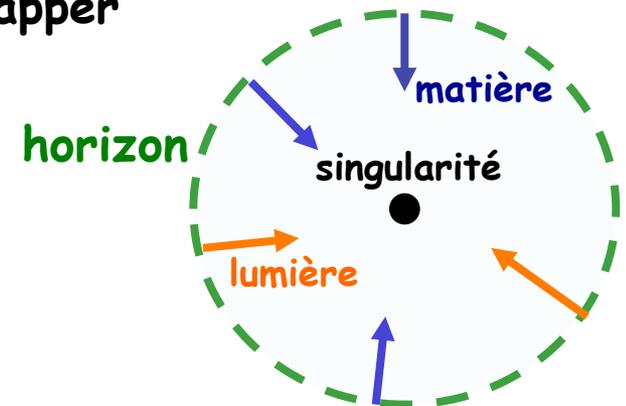
$$E_T = E_G + K < 0$$

$$-\frac{GMm}{r} + \frac{1}{2}mv^2 < 0$$

$$-\frac{2GM}{r} + c^2 < 0$$

$$r < \frac{2GM}{c^2}$$

rayon de Schwarzschild R_S

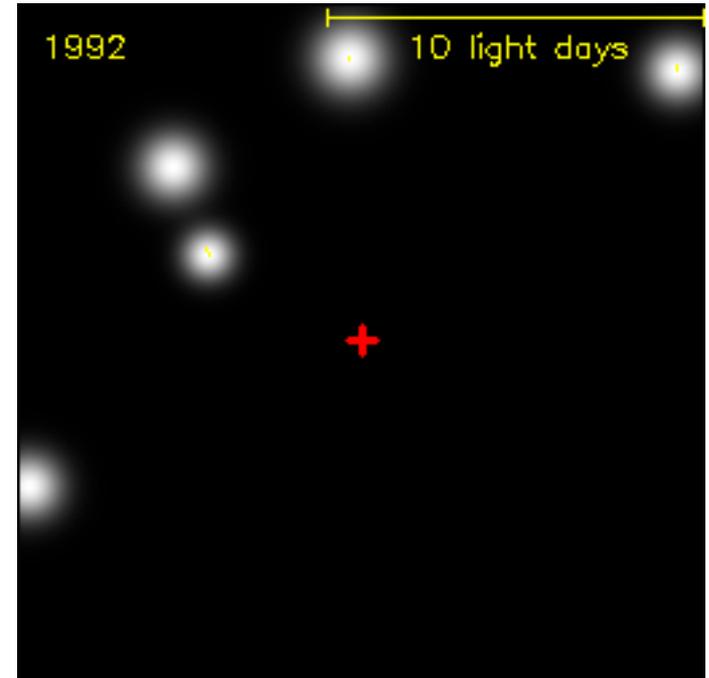
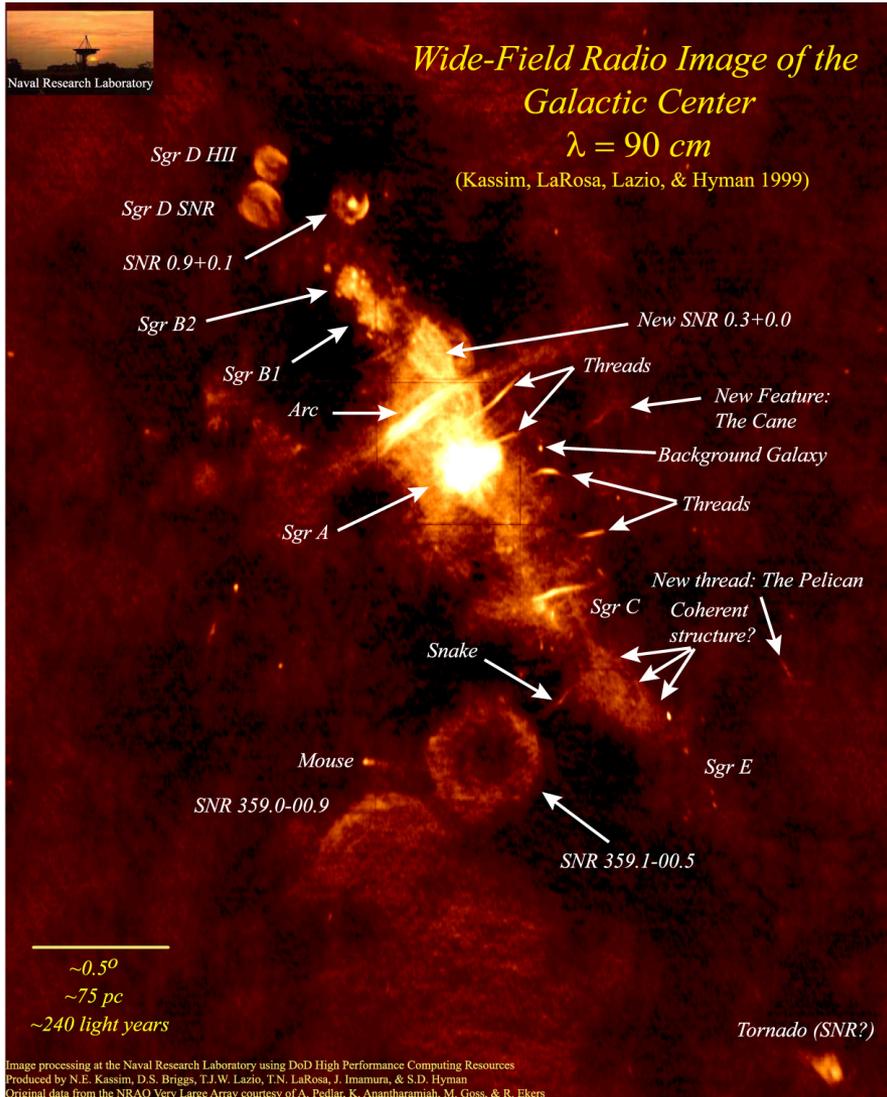


$R_S = 3$ km pour le Soleil

$R < R_S$: étoile s'effondre en un état de densité d'énergie infinie

(Oppenheimer et Snyder, 1939)

Trou noir dans la Voie lactée



orbites planétaires → **3 millions Mo**
 dans rayon < 124 u.a. = 3 d_{soleil-pluton}

→ **trou noir supermassif !**

Trous noirs



Ground



HST • WFPC2

Trous noirs

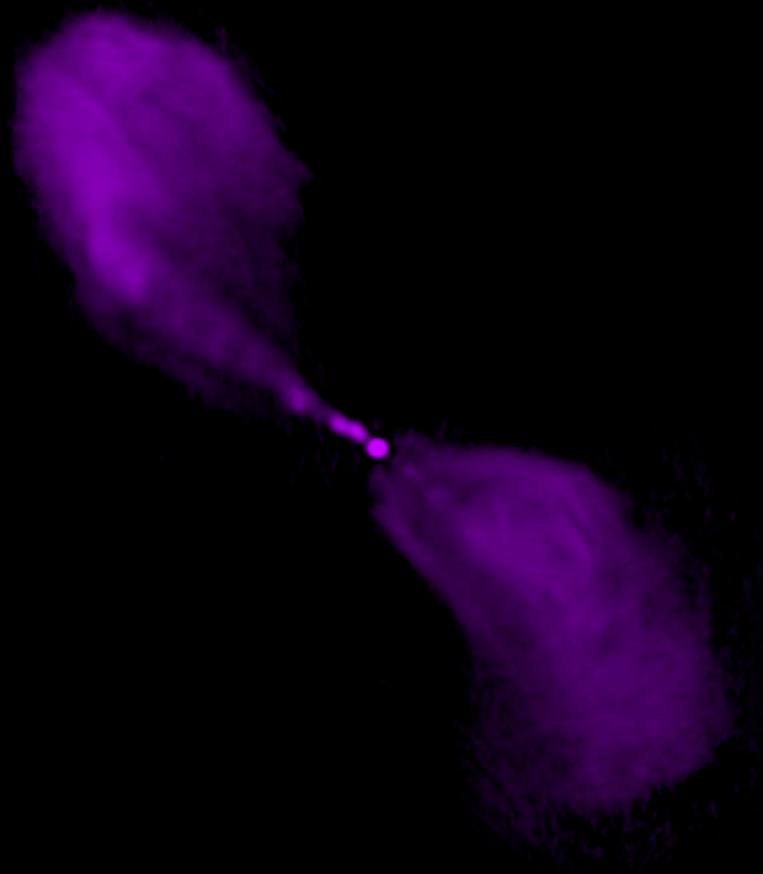


M87 :
des jets de matière

Cen A
optique



Cen A
radio

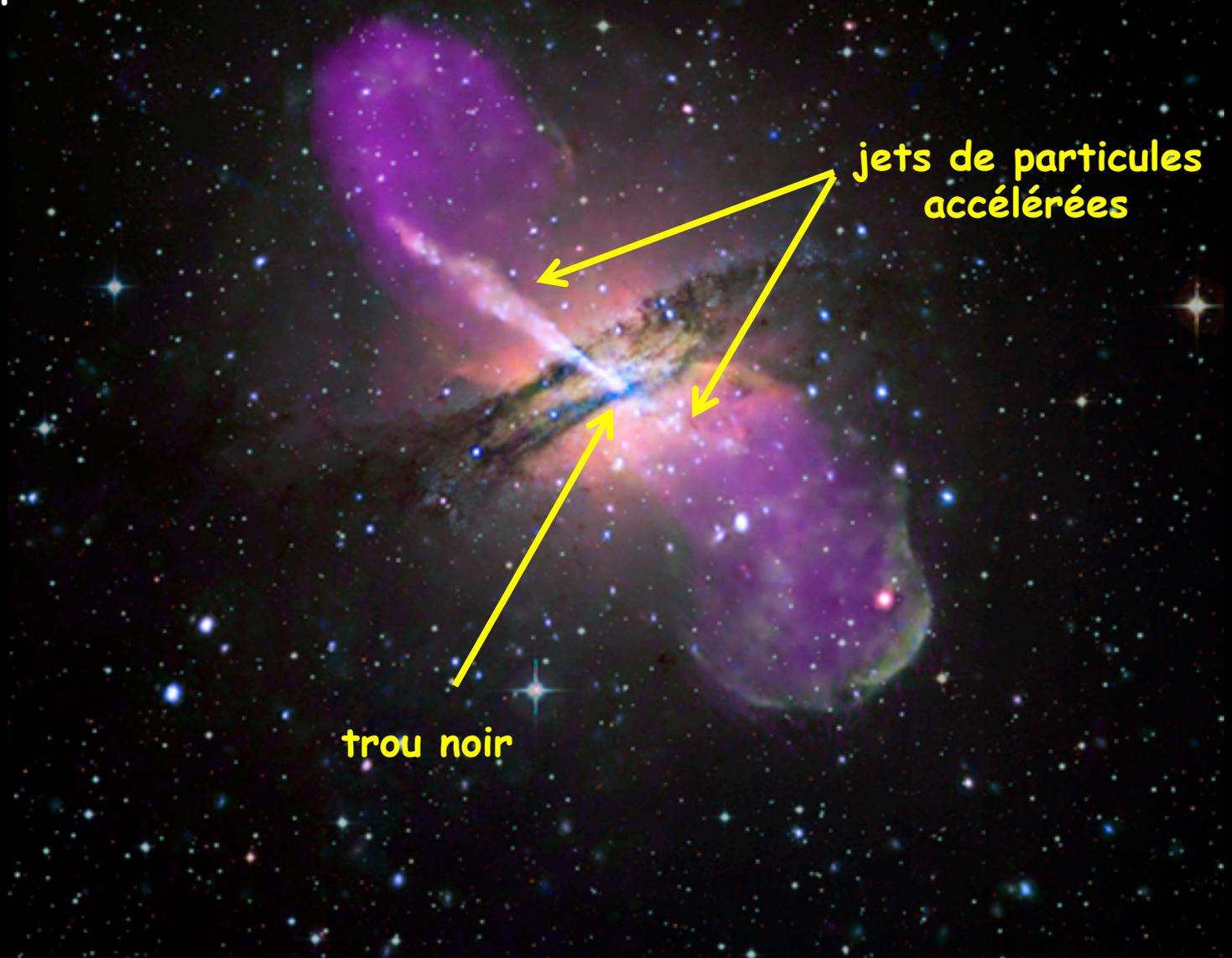


Cen A
rayons X



Cen A
composité

Source des rayons cosmiques
de ultra haute énergie ?



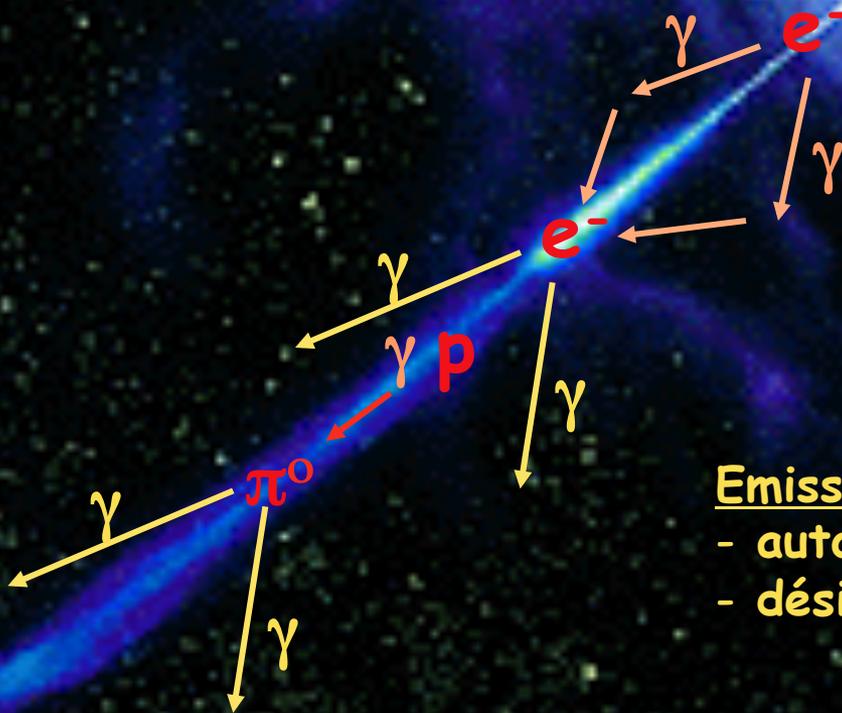
jets de particules
accélérées

trou noir

The image shows a composite of the Cen A galaxy system. At the center, a bright blue-white point is labeled 'trou noir' (black hole). Two prominent, purple, lobed structures extending outwards are labeled 'jets de particules accélérées' (accelerated particle jets). The background is a dense field of stars, with some appearing as bright white points and others as fainter blue or red dots.

Blazars

Emission basse énergie (rayons X) :
émission synchrotron des e^- du jet



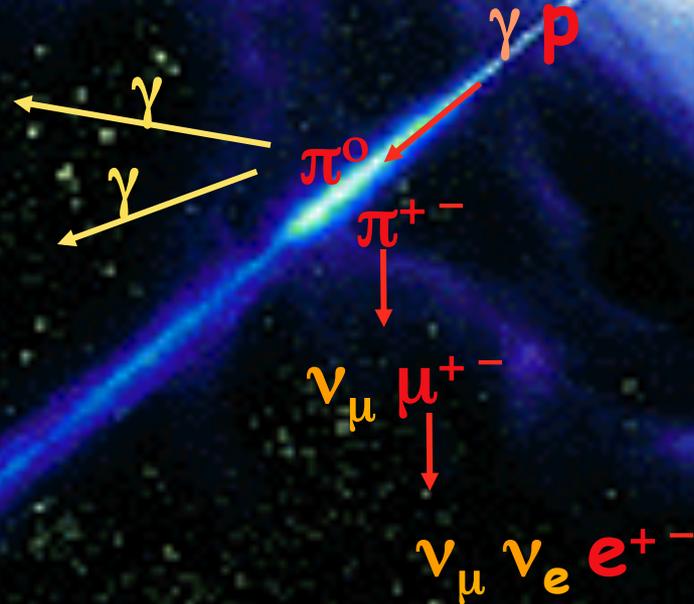
Emission haute énergie (rayons γ):

- auto-compton (electromagnétique) ?
- désintégration π^0 (hadronique) ?

Blazars

Emission haute énergie (rayons γ):

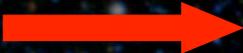
- ~~auto-compton (electromagnétique) ?~~
- désintégration π^0 (hadronique) ?



Sources de ν
de haute énergie !

Astroparticule

2/3

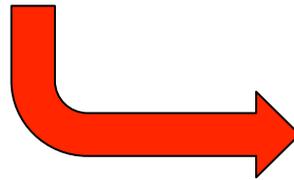
- Rayons cosmiques: techniques de détection
- Etat des lieux (Auger, Telescope Array):
Fin du spectre (UHECR)
Origine galactique / extra-galactique
Sources
- Univers extrême et trous noirs
-  Photons haute énergie et sursauts gamma
- Ondes gravitationnelles

Autres messagers?

particules chargées
protons, noyaux

Confirmations indépendantes?

Autres preuves, autres approches



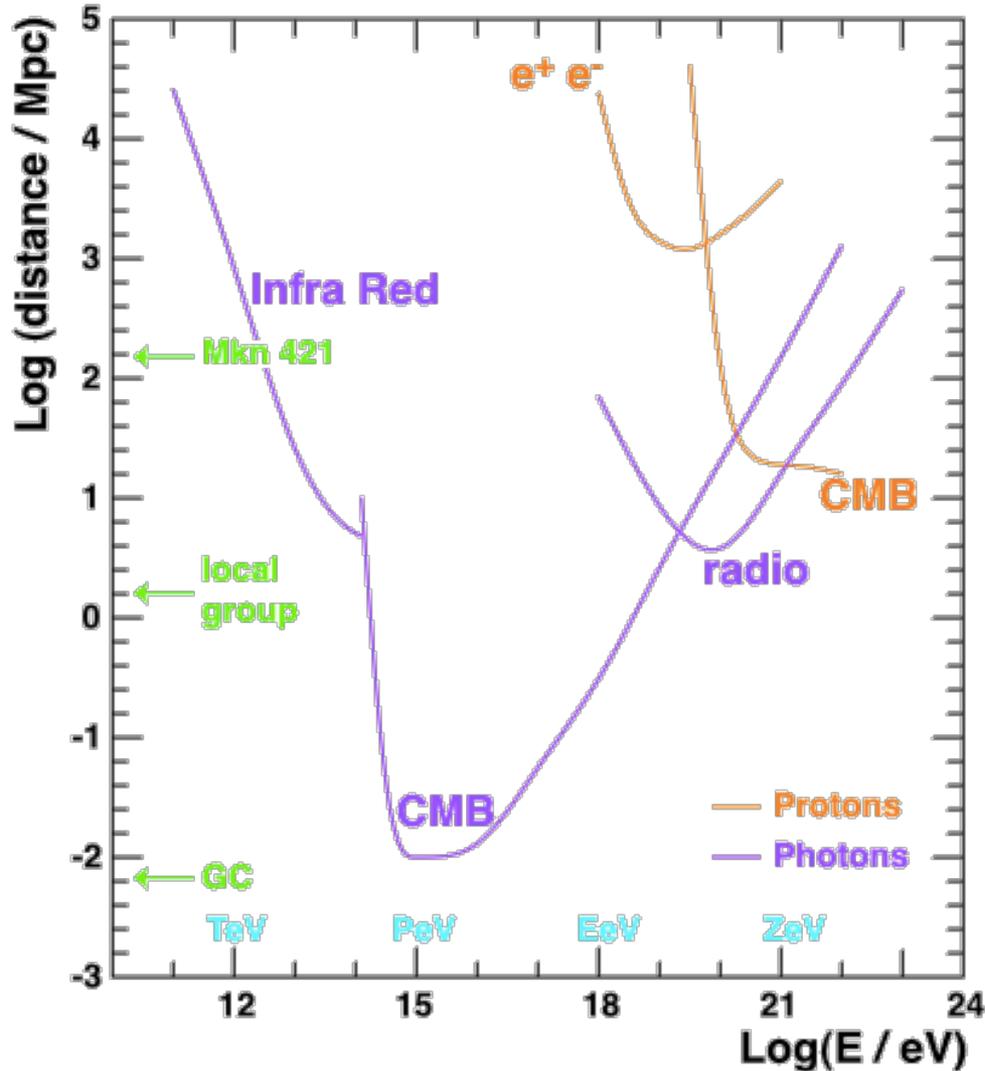
**autres
messagers**

photons
de haute
énergie

ondes gravitationnelles

neutrinos

« Horizon » Gamma



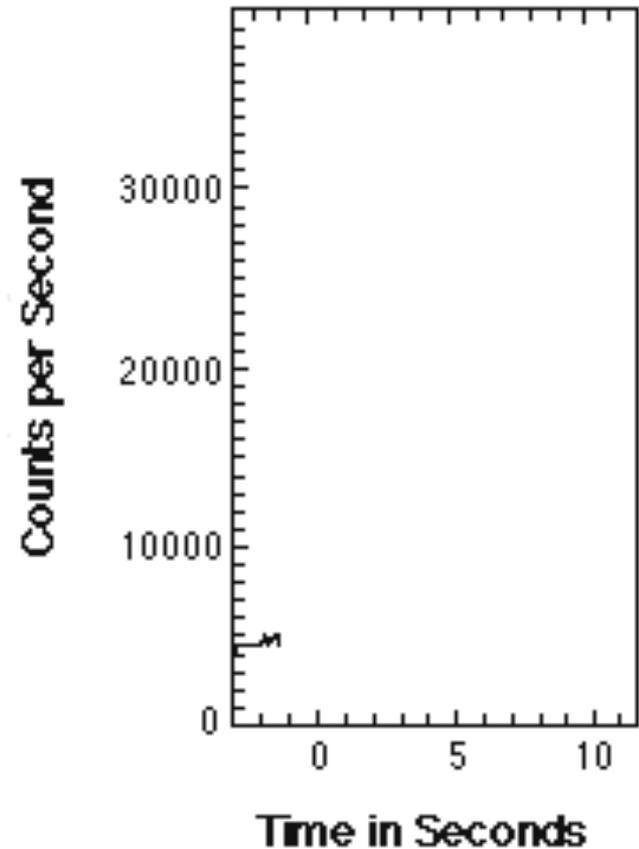
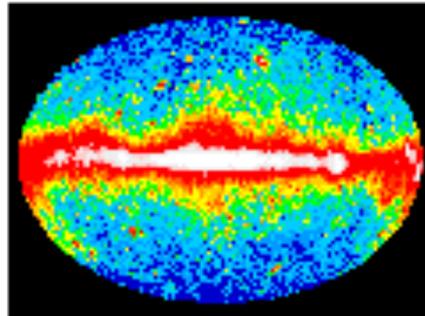
coupure GZK

Absence
de sources
extragalactiques aux
plus hautes énergies

$E > \text{TeV}$
→ limité au groupe local

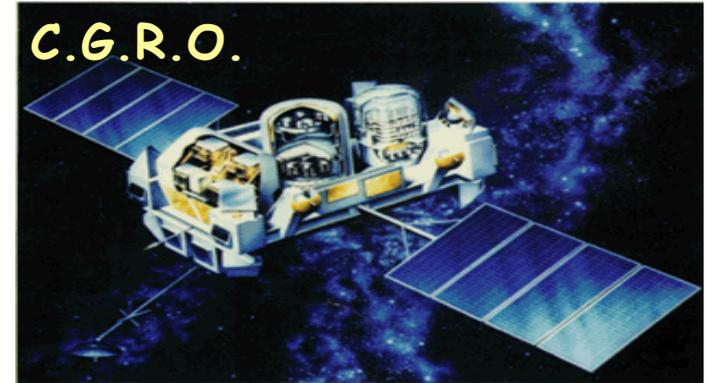
Sursauts Gamma (GRB)

1967 Découverte fortuite par les satellites VELA
d'émission spontanée de rayons gamma (16 events),
Publication en **1973**



Gamma ray bursts (GRB)

1991 Observation avec les satellites
C.G.R.O (EGRET, BATSE...)
& BeppoSAX



objets les plus brillants de l'univers, émettant surtout à haute E
 10^{44} à 10^{47} J $\sim 1 M_{\odot}c^2$

→ émission collimatée ?

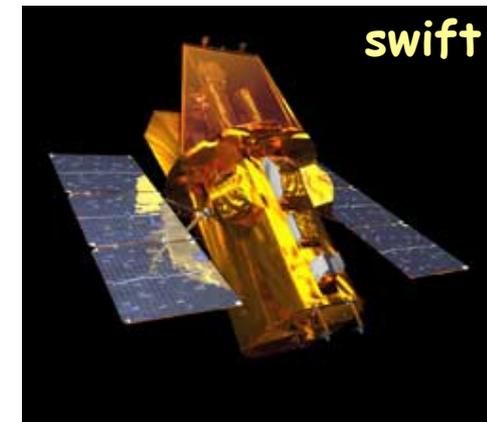
Δt de 10ms à quelques secondes

ΔL (en 10ms) = $c\Delta t = 30\,000$ km $\ll R_{\text{soleil}}$

→ région compacte

→ trous noirs, étoiles à neutrons

aujourd'hui >5000 sursauts toujours mal compris...



Localisation des sursauts

Long débat, mais

Isotropie

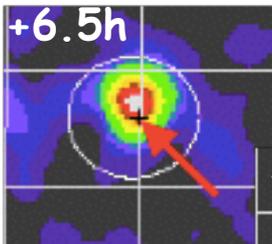
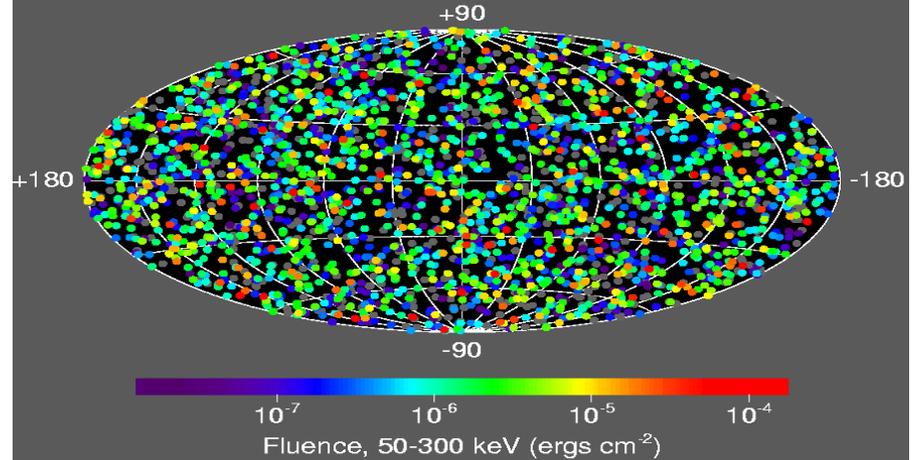
+

Contreparties optiques

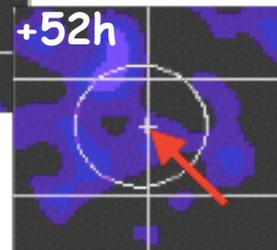
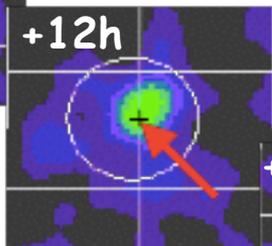


Phénomènes cosmologiques
($z = 0.43$ à 6.3)

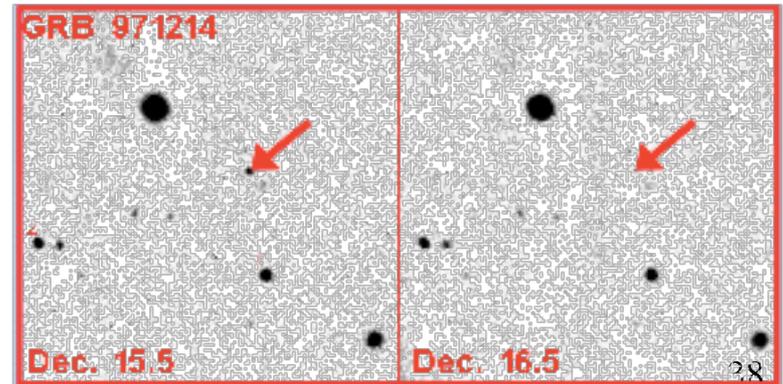
2704 BATSE Gamma-Ray Bursts



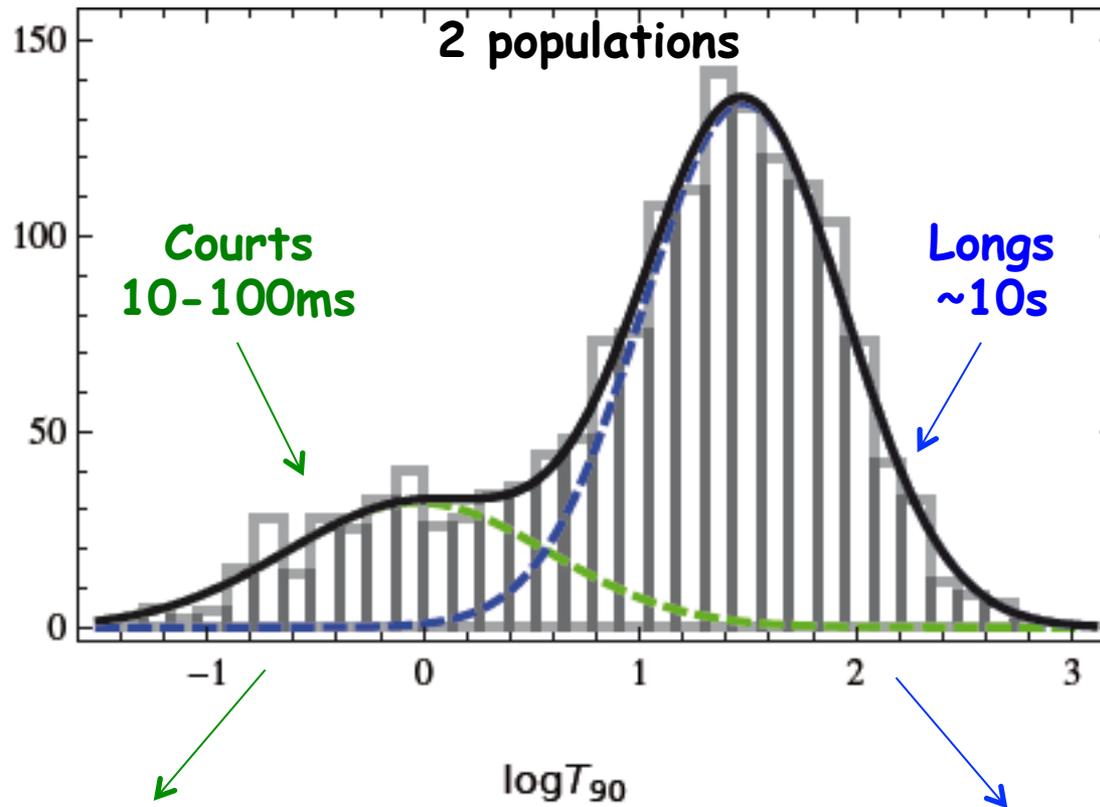
Contrepartie
ultérieure
en
rayons X



Contrepartie optique



Origine des sursauts



Toutes galaxies
Objet compact (causalité)
Kilonova (merger NS-NS ou NS-BH) ?

Galaxies à forte formation stellaire
Associations supernova type II
(effondrement étoile massive)

Astroparticule

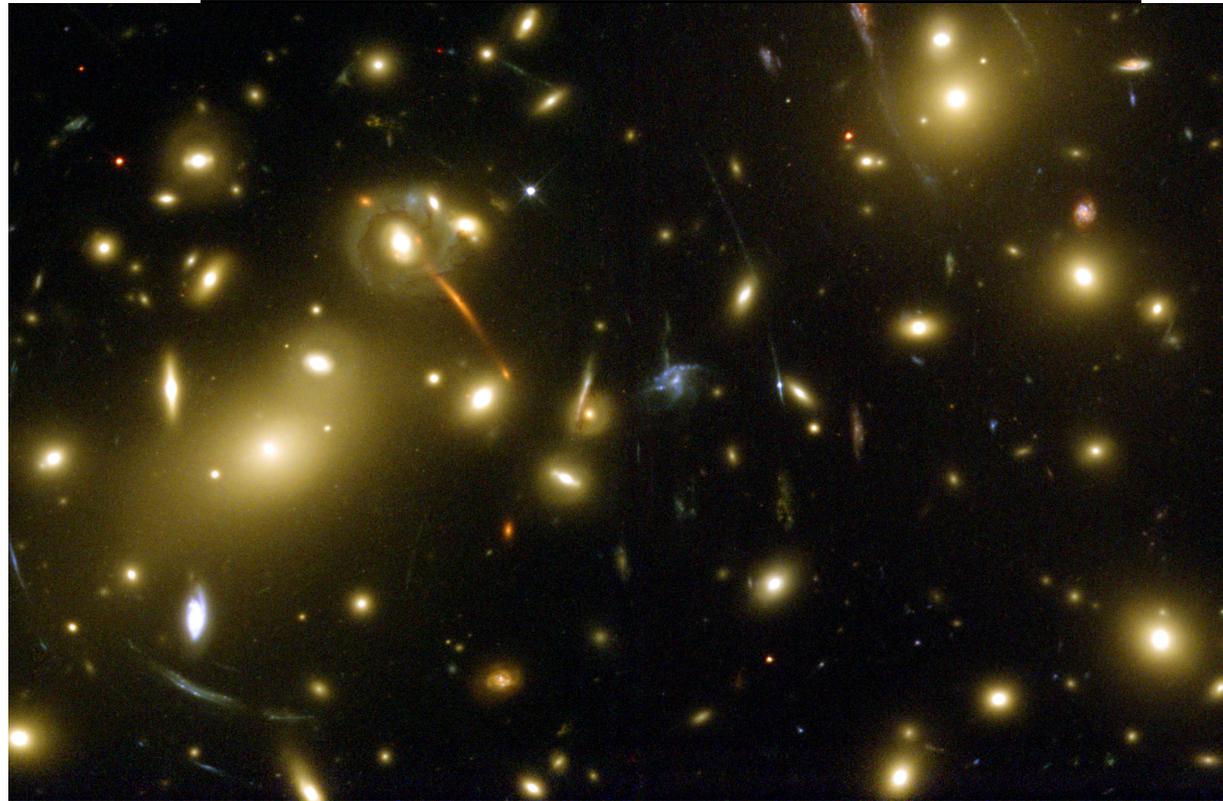
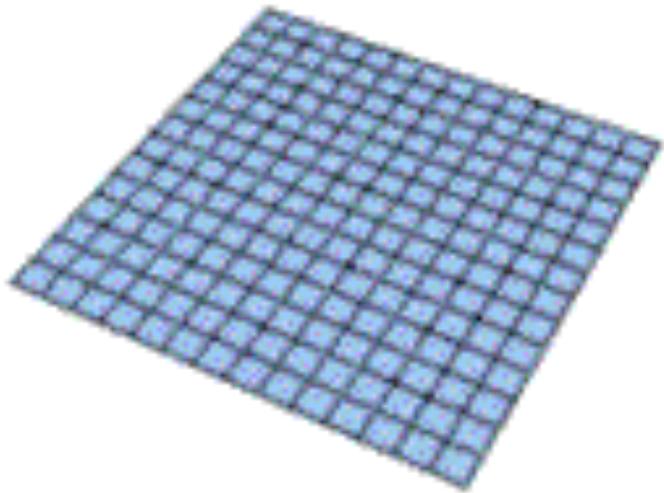
2/3

- Rayons cosmiques: techniques de détection
- Etat des lieux (Auger, Telescope Array):
Fin du spectre (UHECR)
Origine galactique / extra-galactique
Sources
- Univers extrême et trous noirs
- Photons haute énergie et sursauts gamma
- Ondes gravitationnelles

Gravitation et espace-temps

Un espace-temps courbe (\neq relat. restreinte)

Force de gravitation
→ courbure de l'espace



Ondes gravitationnelles

relativité générale → ondes gravitationnelles

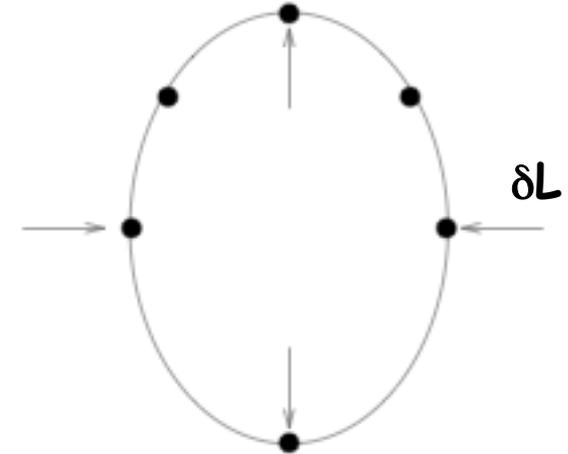
- prédiction dès 1918
- Un siècle avant première détection *Pourquoi ?*

Ondes gravitationnelles

$$h = \delta L / L$$

Variation de longueur due à onde gravitationnelle

Longueur totale



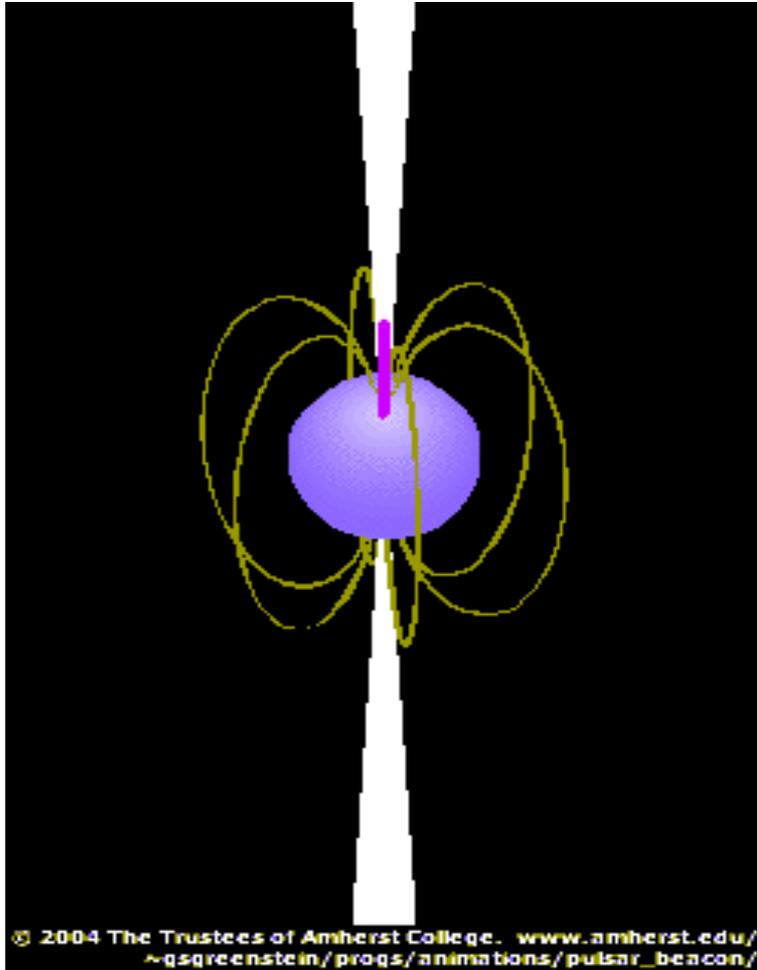
Explosion SN dans amas de la Vierge (15 Mpc):
 $h \sim 10^{-21}$ à 10^{-24}

Système de deux trous noirs:
 $h \sim 10^{-22}$ à 10^{-23}

Pour $L_{\text{terre-soleil}} = 150 \cdot 10^6 \text{ km} \rightarrow \delta L \sim 0,15 \text{ nm} - 0,00015 \text{ nm}$

Taille d'un atome

Hulse et Taylor



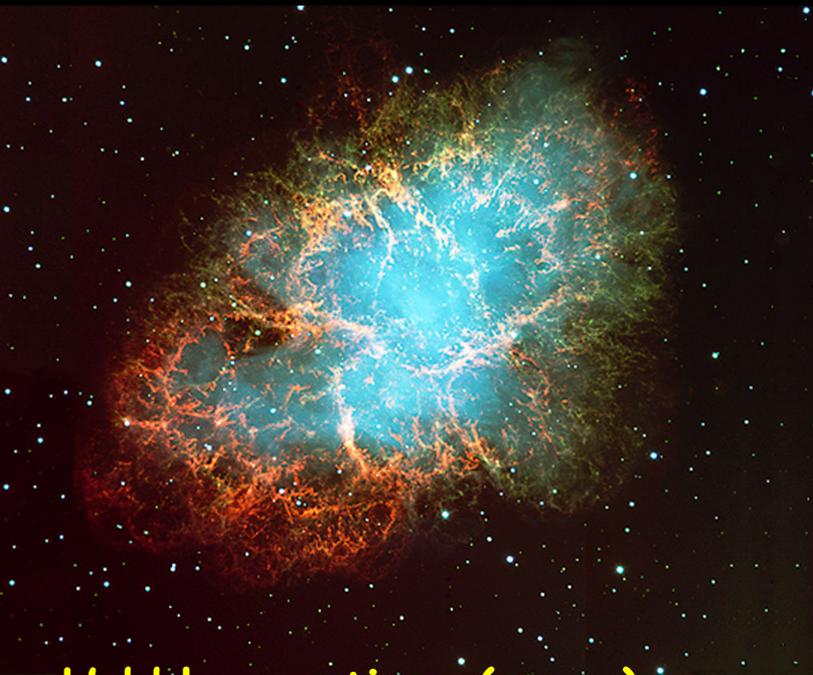
Pulsar 1913+16 découvert en 1974

Période du faisceau radio

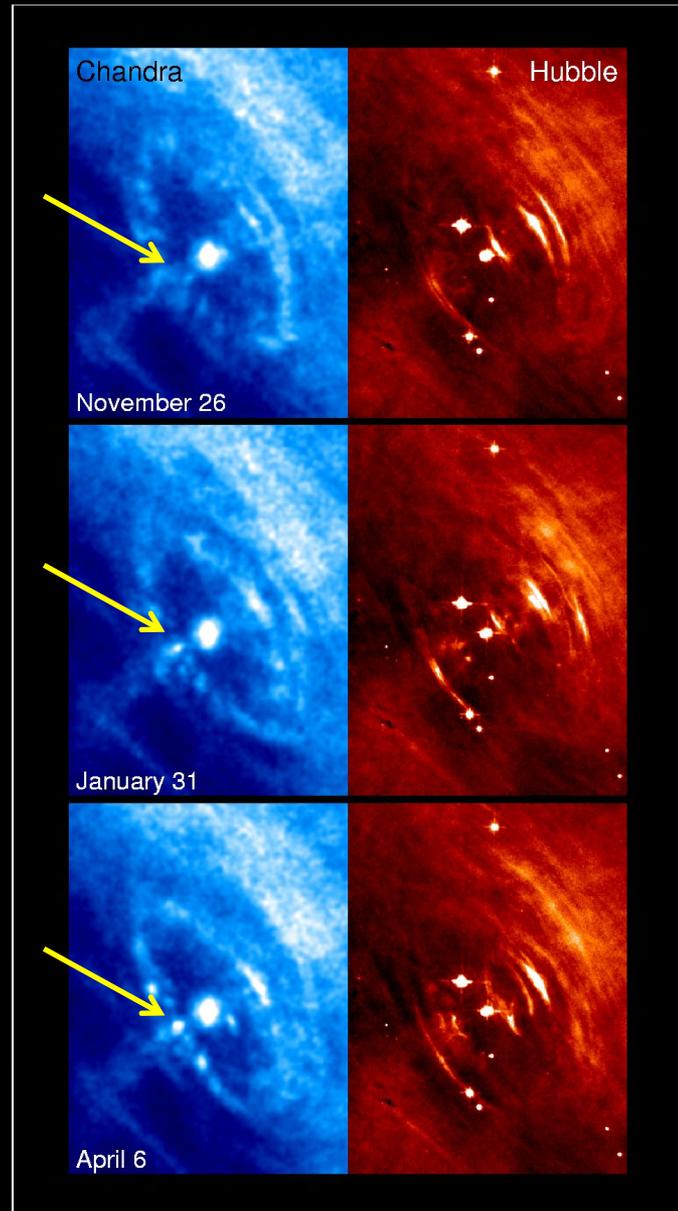
$T = 59 \text{ ms}$

précision meilleure que horloges atomiques!

Pulsar du Crabe

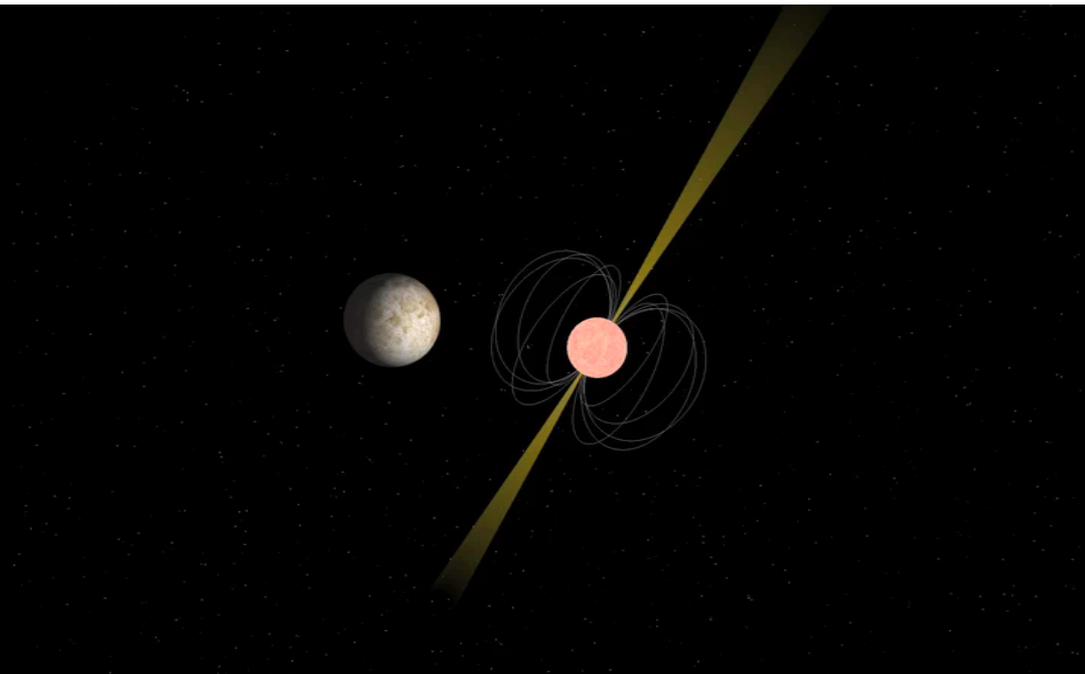


Hubble - optique (rouge)
Chandra - rayons X (bleu)

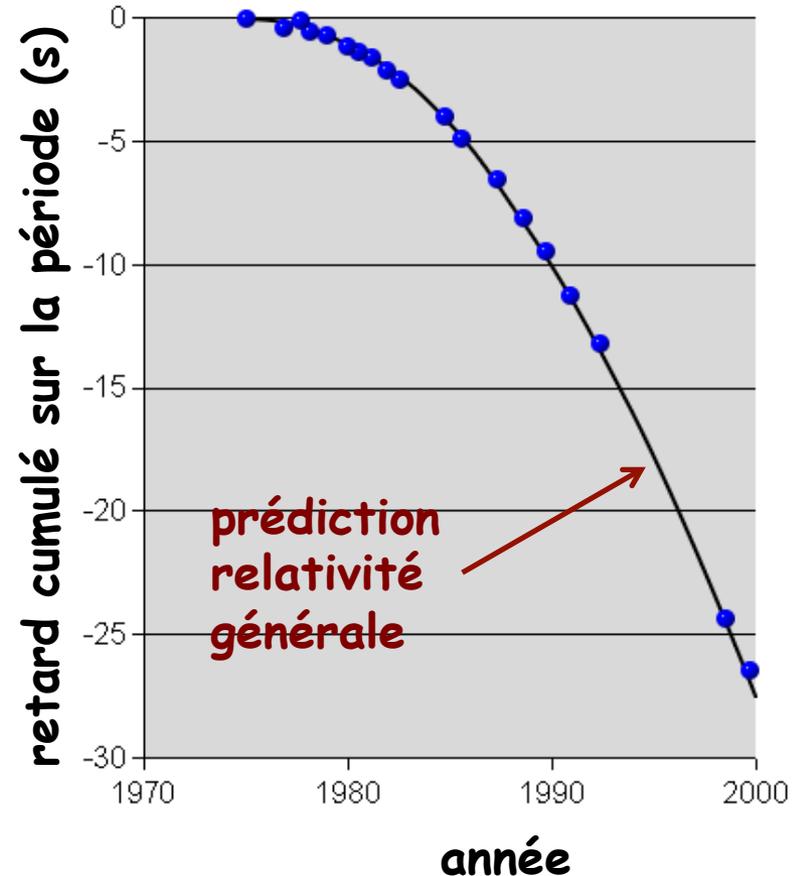


Hulse et Taylor

Pulsar 1913+16 :
perturbation périodique $T \sim 8$ h
→ compagnon



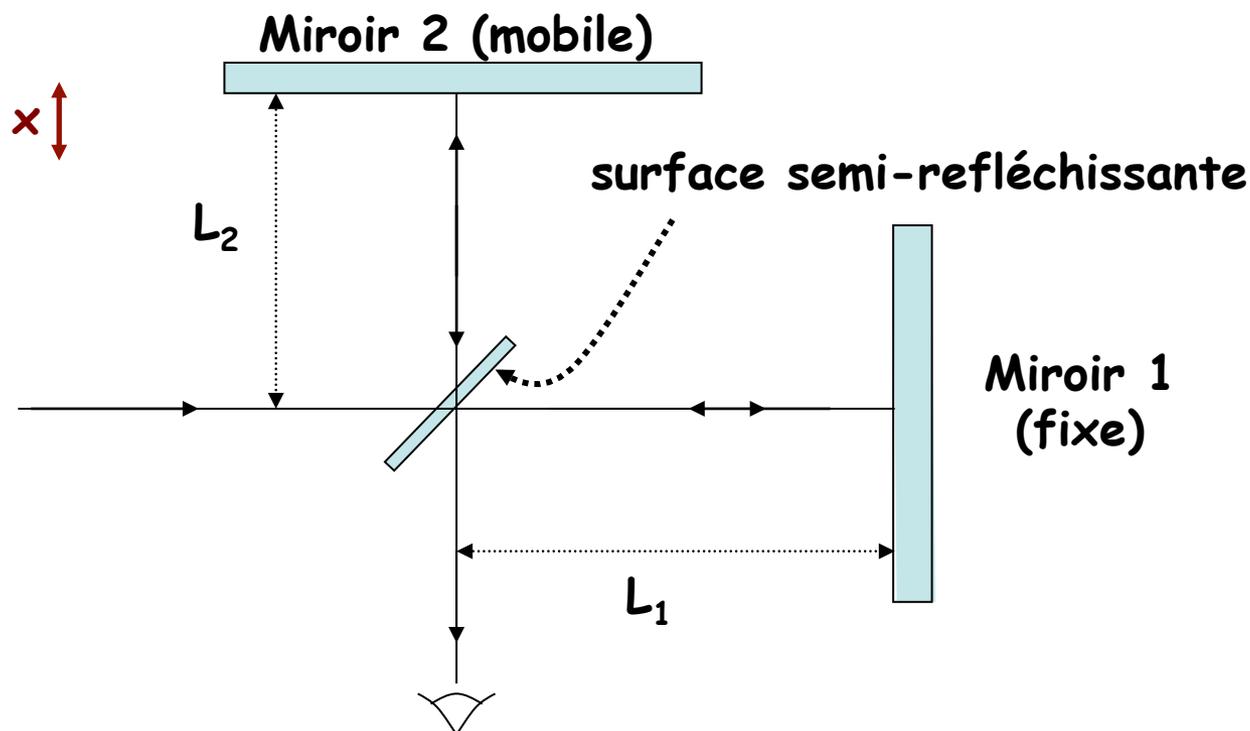
→ Prix Nobel 1993



$\Delta T = 76 \cdot 10^{-6}$ s/an, $\Delta a = -3,5$ m/an
coalescence dans 300.000.000 ans

Détection des ondes gravitationnelles

Interférométrie



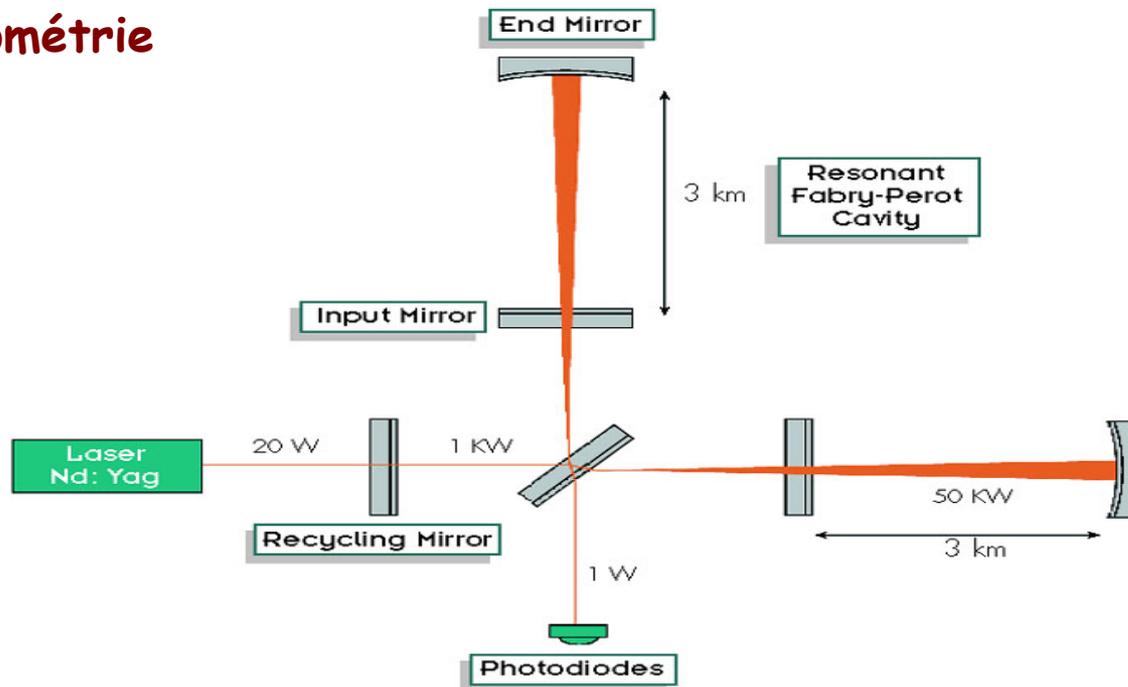
performance actuelle:
 $\delta L \sim 10^{-15} \text{ m}$ (noyau d'atome)

$$x = m \lambda / 2$$

Pour $h = 10^{-21}$ faut détecteur avec $L =$ milliers de km

Détection des ondes gravitationnelles

Interférométrie



Miroir de recyclage:

$$L = 3 \text{ km} \rightarrow L \text{ effectif} = 3000 \text{ km}$$

Virgo (Pise)



Premier événement (annonce: 14/09/15) !

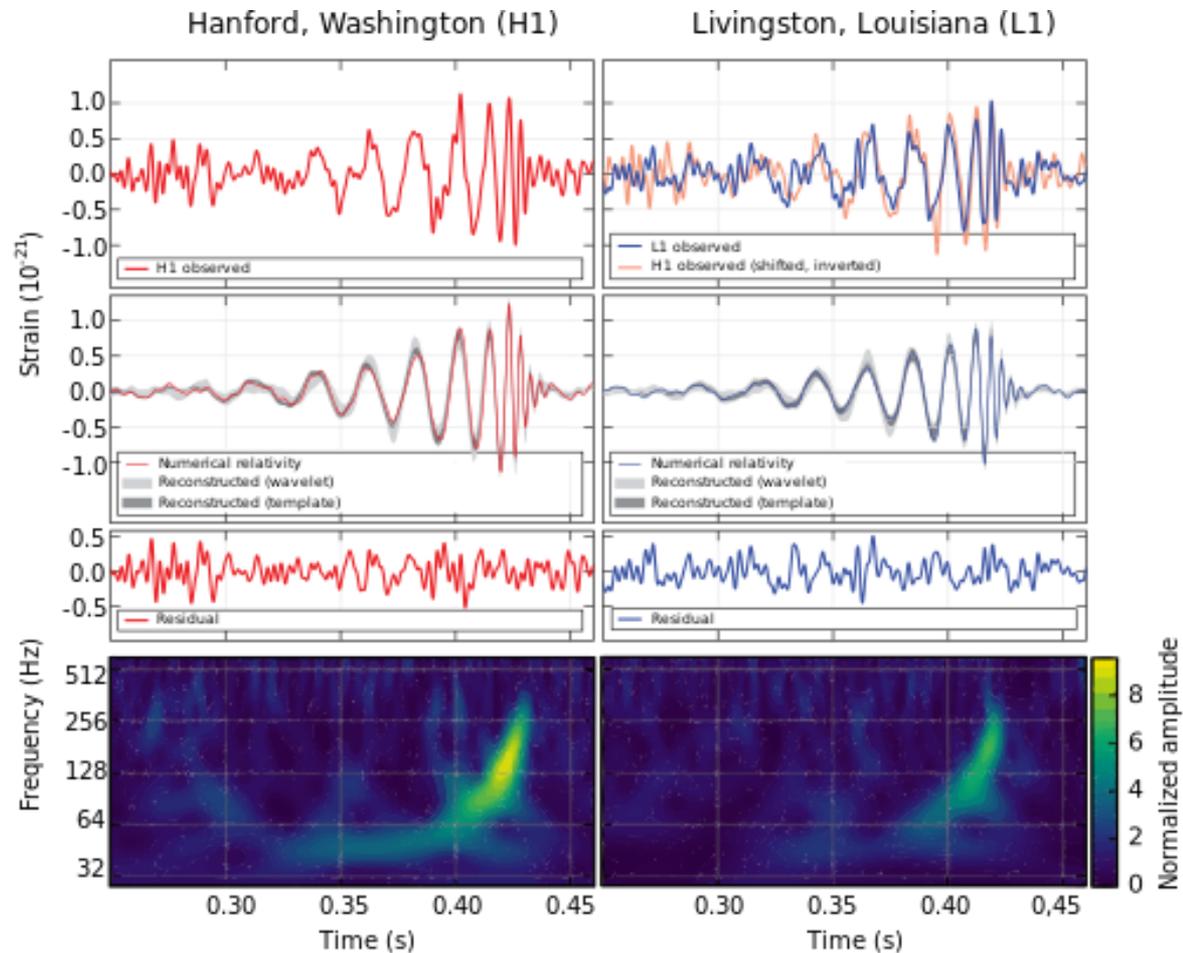
Systeme binaire
de 2 trous noirs

$30 M_{\text{sun}} + 35 M_{\text{sun}}$

= $62 M_{\text{sun}}$ (trou noir)
+ $3 M_{\text{sun}}$ (ondes grav.)

$d = 440 \text{ Mpc}$, soit $z=0.09$
(à partir de amplitude)

Prouve existence de
- Ondes gravitationnelles
- Trous noirs de $30 M_{\text{sun}}$



Durée de l'événement $\sim 0.1 \text{ s}$ ⁵⁰

Événement LIGO-VIRGO (14/08/17)



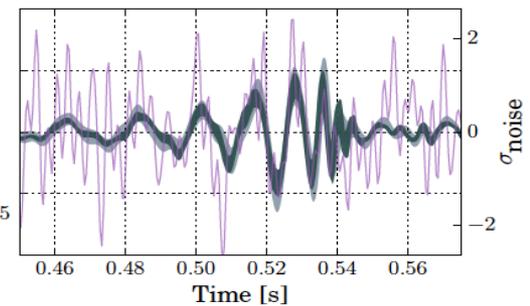
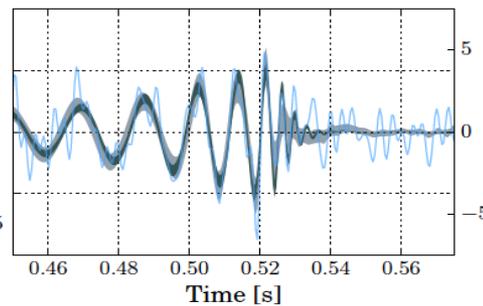
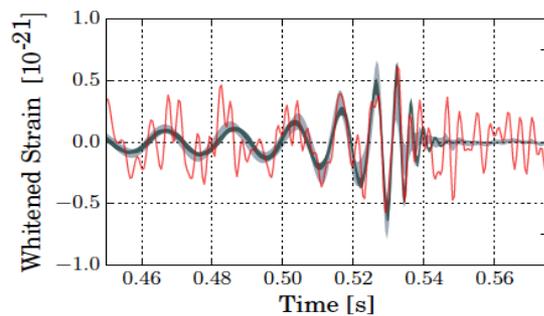
Observation à 3 détecteurs
de GW 170814 (BH+BH)



LIGO Hanford

LIGO Livingston

Virgo



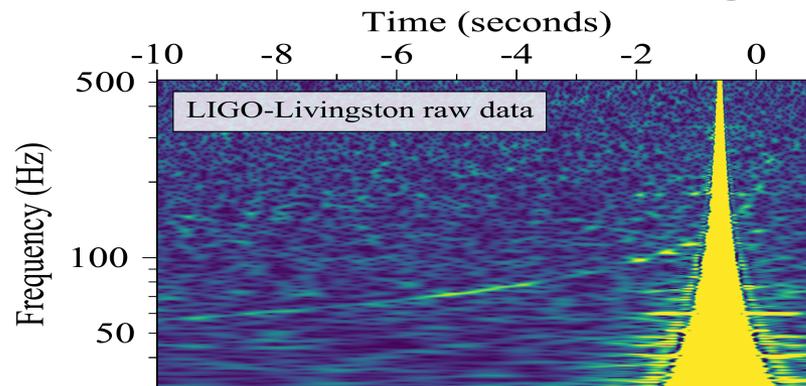
Premier événement multi-messenger

(17/08/17) !

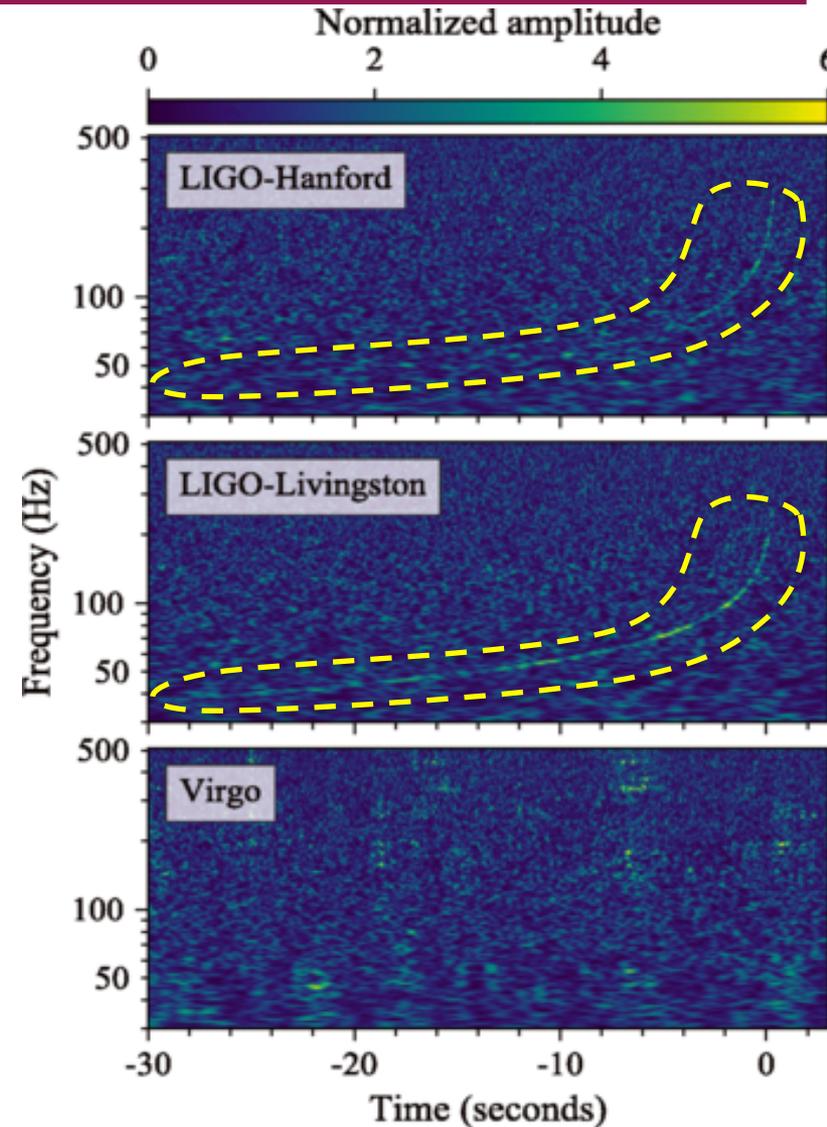
GW 170817

Alerte automatique

- 1 détecteur (H)
+ retrouvé dans 2è détecteur (glitch)



- Signal intense et long
- **Alerte LIGO-VIRGO à 13h21**
40min seulement après événement



Premier événement multi-messenger

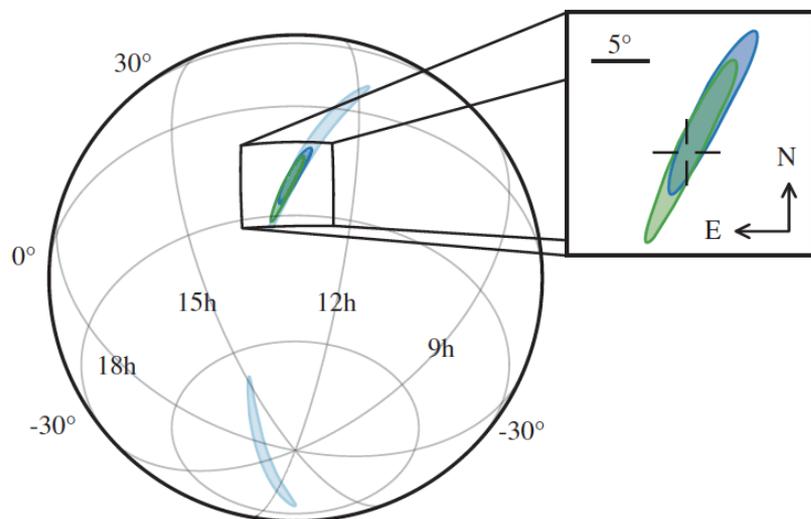
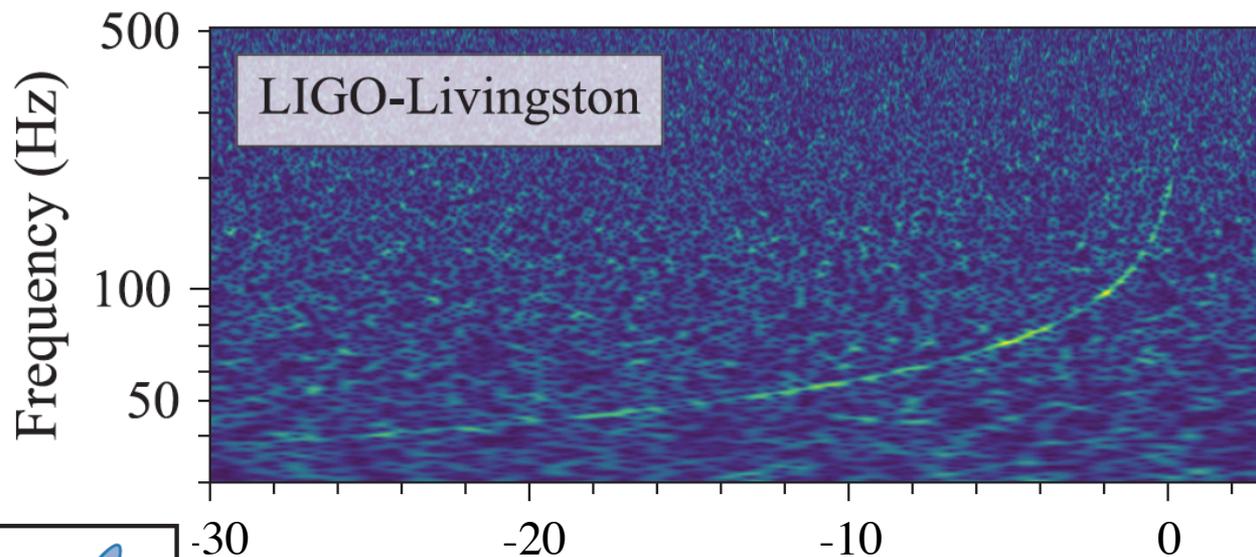
(17/08/17) !

Binaire d'étoiles à neutrons

$M_{\text{tot}} \sim 3 M_{\text{sun}}$

Durée ~ 100 s

$d \sim 40$ Mpc



Fonctionnement simultané
LIGO (x2) + VIRGO

→ localisation à $\sim 30 \text{ deg}^2$ (vs. 200 deg^2)

Premier événement multi-messager

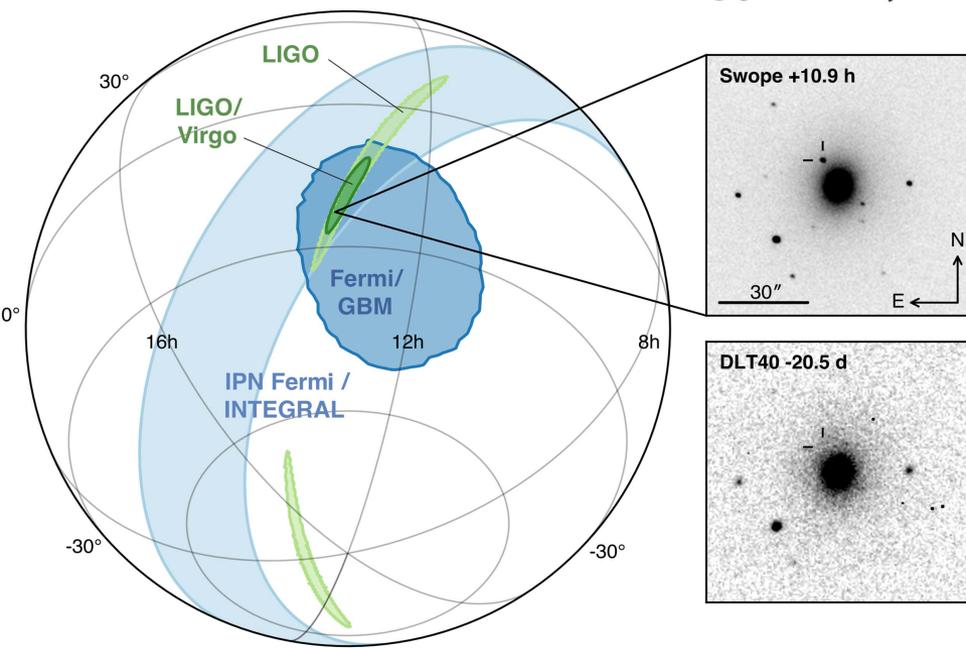
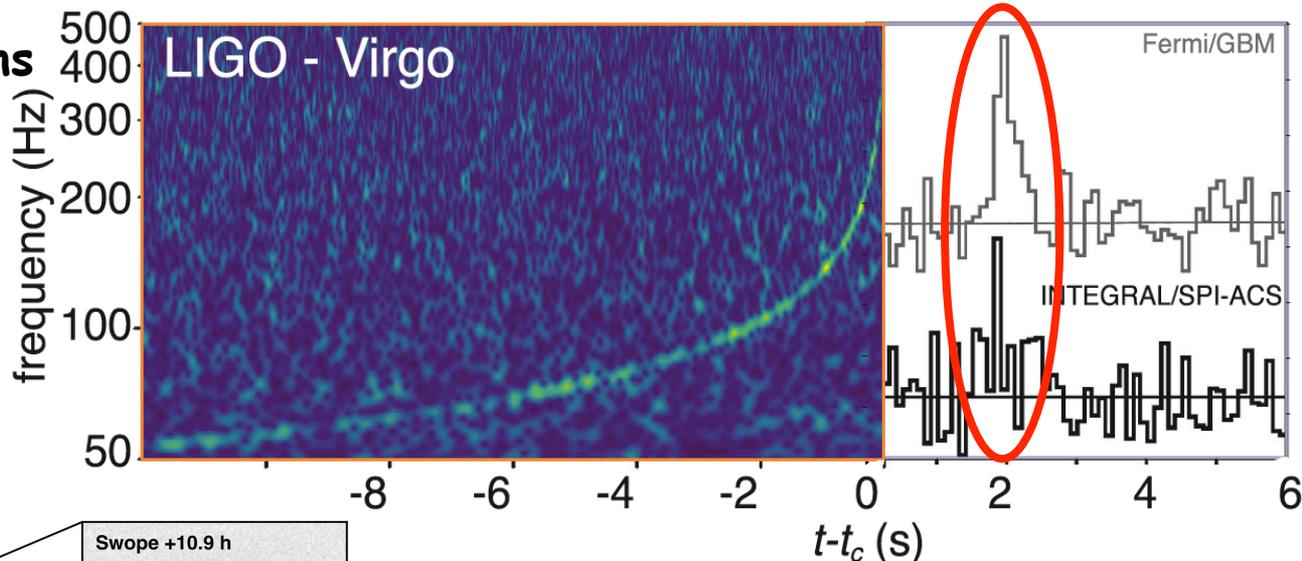
(17/08/17) !

Binaire d'étoiles à neutrons

$M_{\text{tot}} \sim 3 M_{\text{sun}}$

Durée ~ 100 s

$d \sim 40$ Mpc



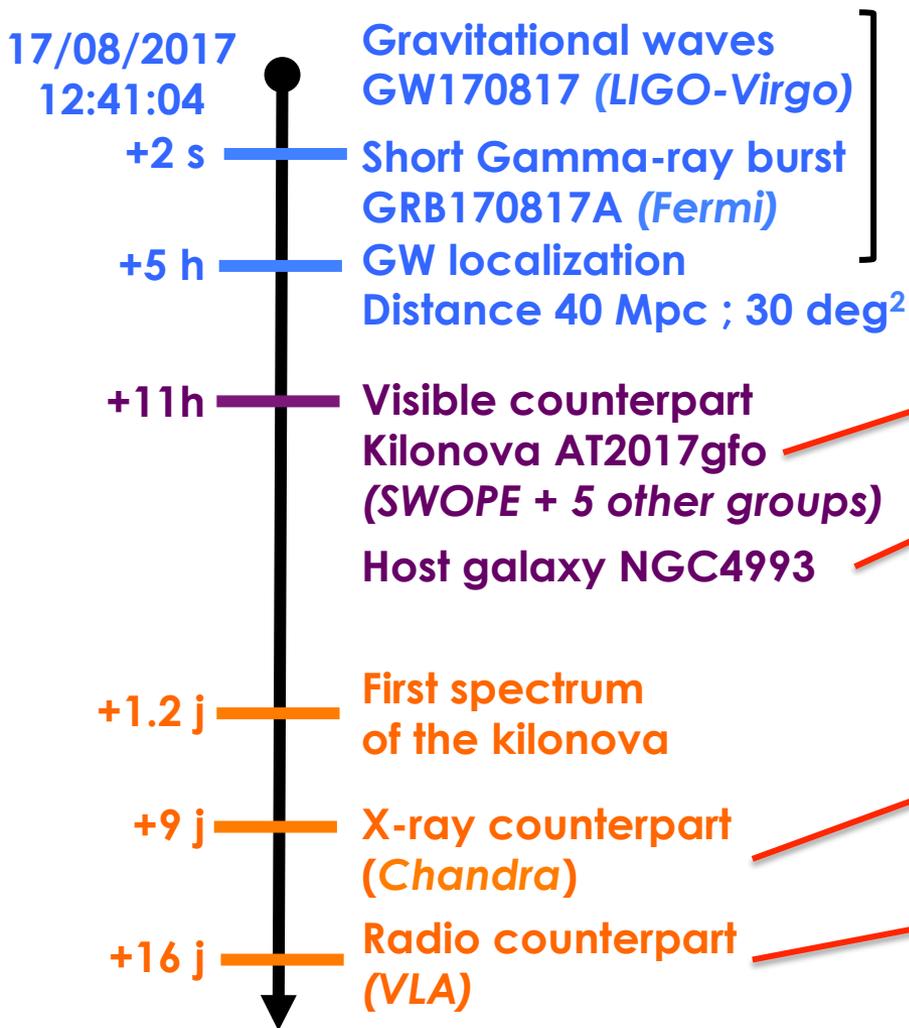
Détection gamma (indépendante)
 $\Delta t = 1.7$ s ! Durée de quelques ms

+ optique (dans zone)
par plusieurs télescopes, en $\Delta t \sim 11$ h
→ dans galaxie NGC 4993 à 40 Mpc
Visible plusieurs semaines

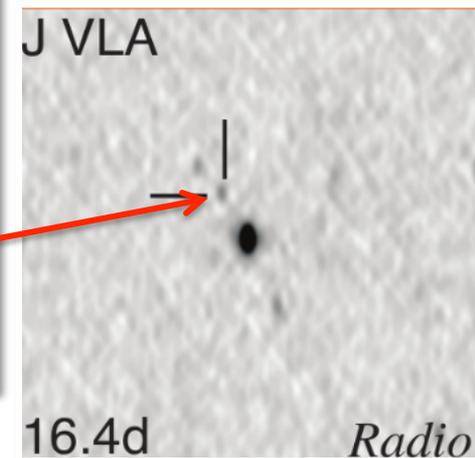
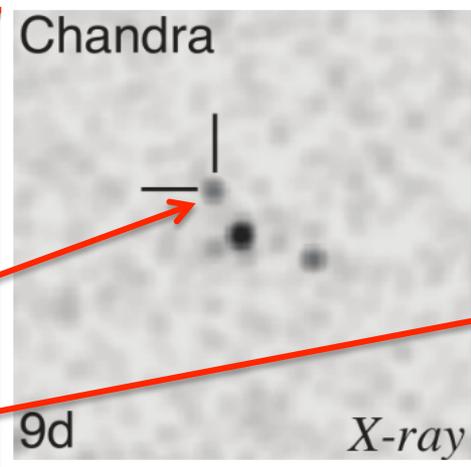
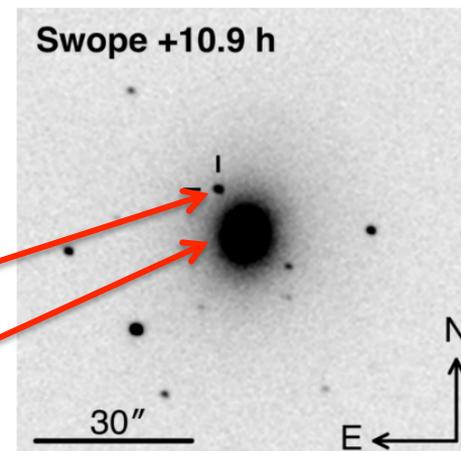
X et radio (après 9 jours)

Premier événement multi-messager

(17/08/17) !



Alertes automatiques



Premier événement multi-messenger

(17/08/17) !

Ondes gravitationnelles

- ⇒ Masses
- ⇒ binaire étoiles à neutrons (NS-NS)



Contrepartie γ

- ⇒ confirmation que (NS-NS) engendrent des GRB courts

Courbe de lumière optique

- ⇒ confirmation que (NS-NS) engendrent kilonova
- ⇒ Identification de production d'or de l'univers !
(r-process dans environnement riche en neutrons)



Note: 1.7s entre onde grav. et γ après $d=40\text{Mpc}$

- ⇒ vitesse ondes gravitationnelles $\sim c$
- ⇒ exclusion de nombreux modèles de gravité modifiée

Détecteurs terrestres

$\nu > 30 \text{ Hz}$

causalité $\rightarrow L_{\text{MAX}} (\text{source}) = c/\nu < 10^4 \text{ km}$

étoile à neutrons
trou noir stellaire

donc limité

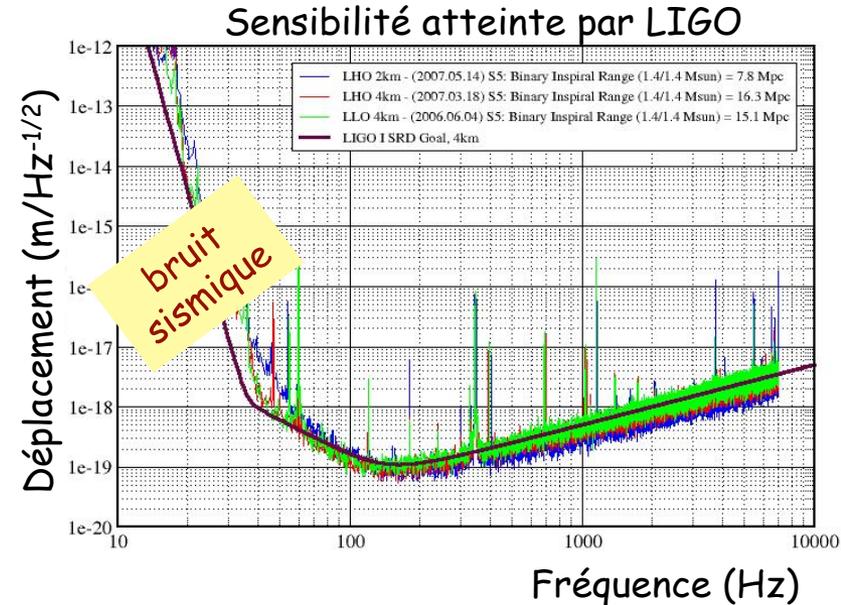
- aux astres les plus compacts
- aux phénomènes peu fréquents

pour couvrir

- coalescence de trous-noirs massifs ($10^3 M_{\odot}$)
- naines blanches

\rightarrow freq. plus basse

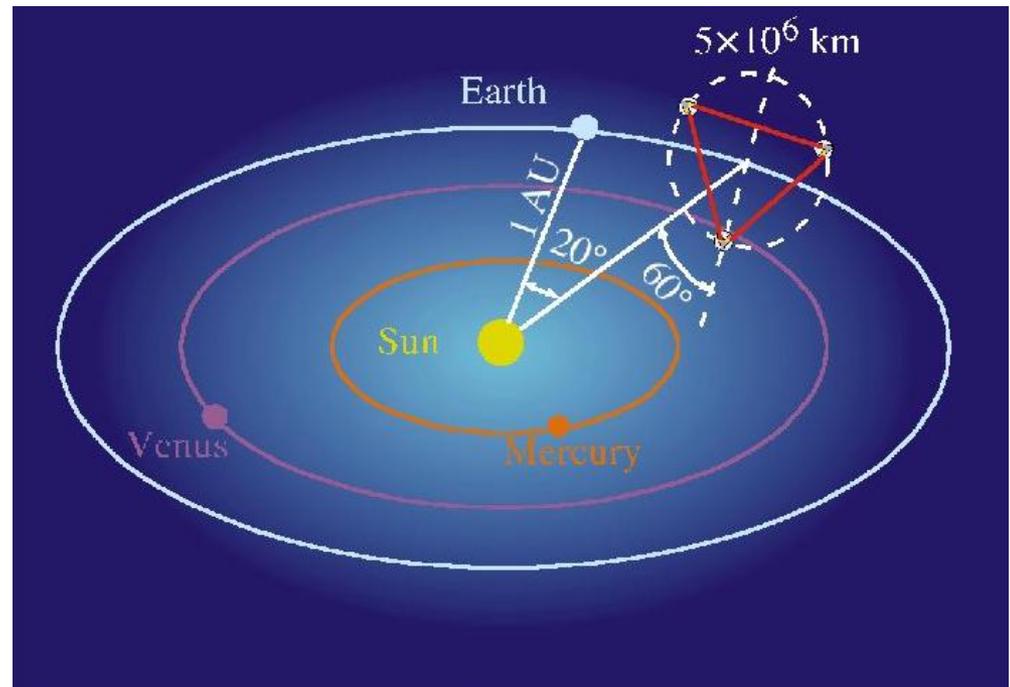
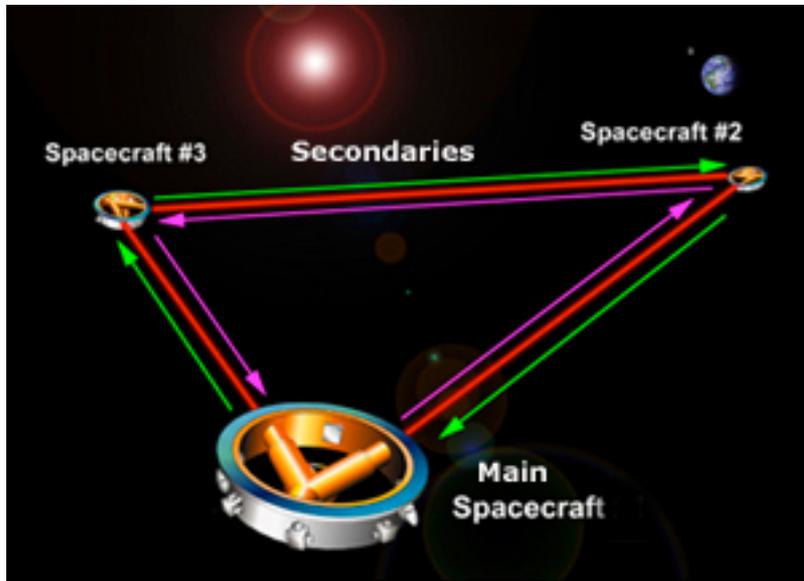
\rightarrow dans l'espace !



LISA

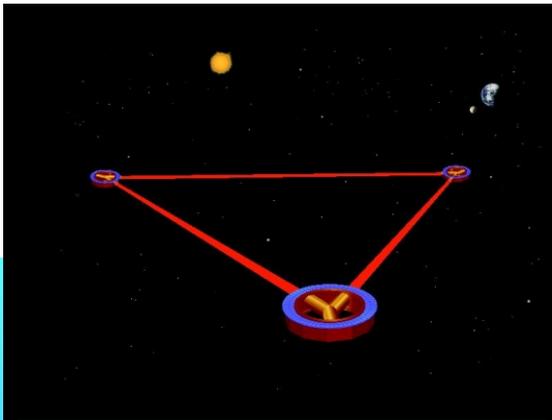
Selectionné par l'ESA en juillet 2017

L = 5 millions km

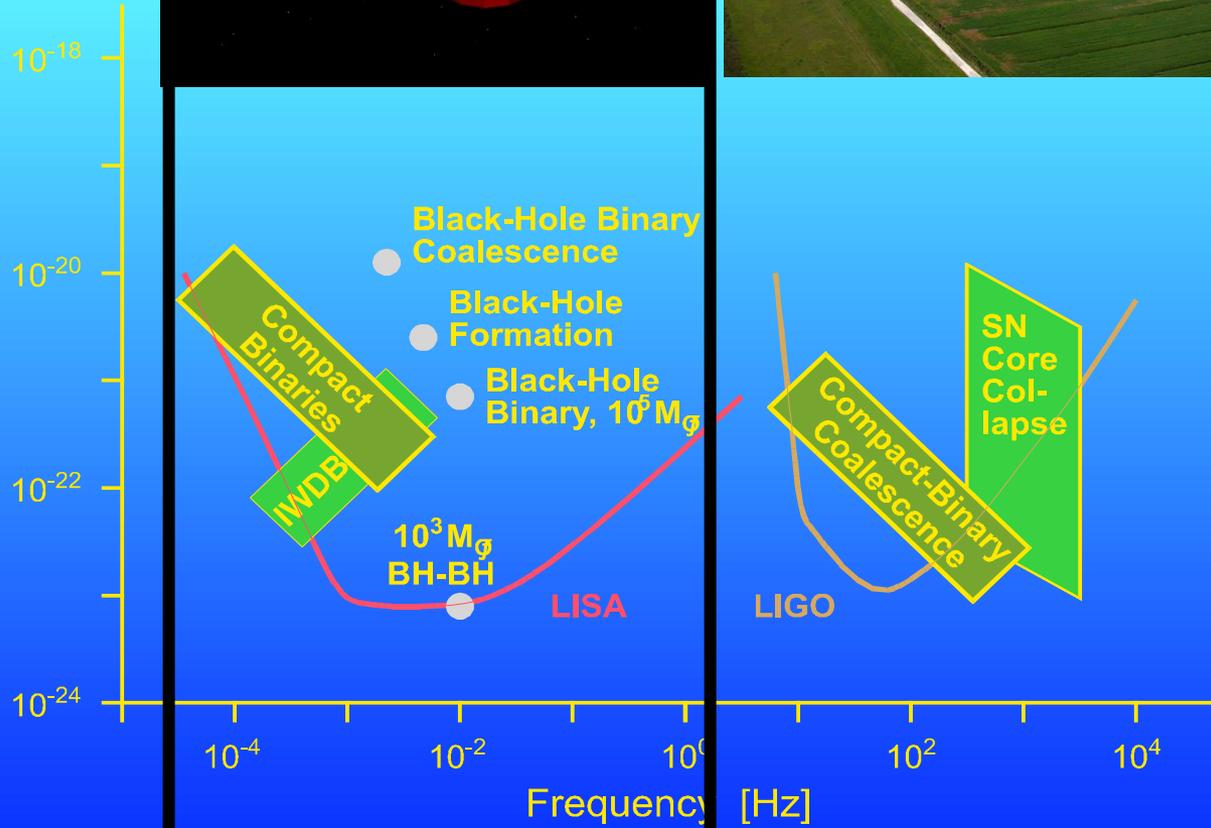


LISA pathfinder (terminé en juillet 2017):
Démonstrateur de sensibilité (masses tests en chute libre, pour LISA)

À suivre...



Strain h



SCIENCE
OUVERTE

Seuil



NATHALIE PALANQUE-DELABROUILLE
JACQUES DELABROUILLE

Les nouveaux messagers du cosmos

Prix du livre
d'astronomie
2012

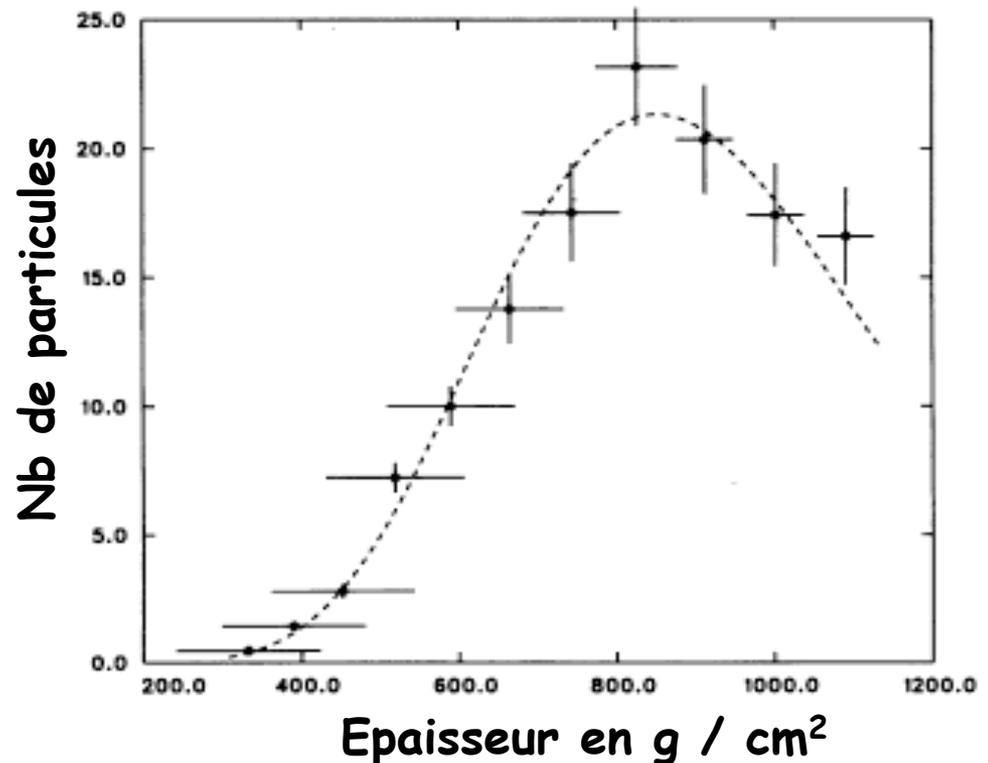
Techniques de détection

Energie: largeur de la gerbe

Nb de photo-électrons reçus
→ nb d'électrons N_e émis
selon profondeur X
d'atmosphère traversée

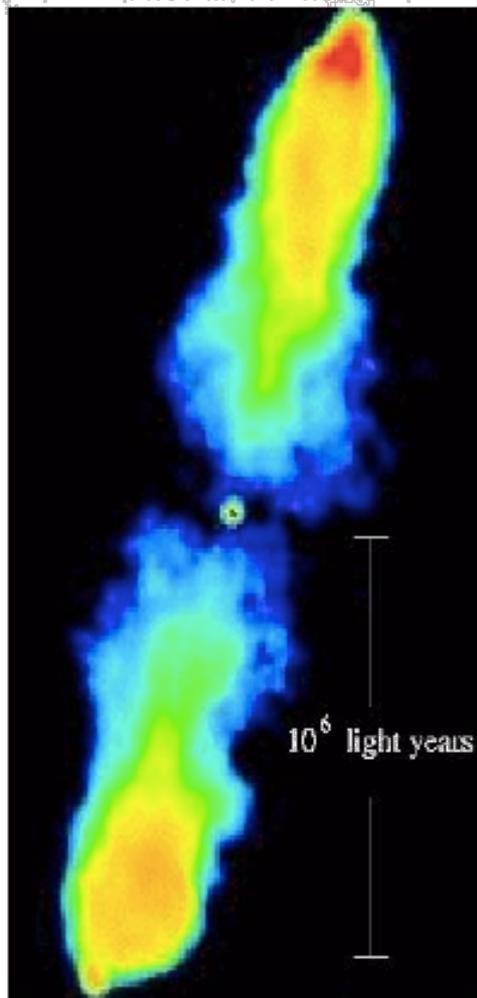
$$E_{em} = (2 \text{ MeV} / \text{g} \cdot \text{cm}^{-2}) \int N_e(X) dX$$

$E_{tot} = E_{em} (1+15\%)$
pour tenir compte de énergie
emportée par μ , ν , hadrons.

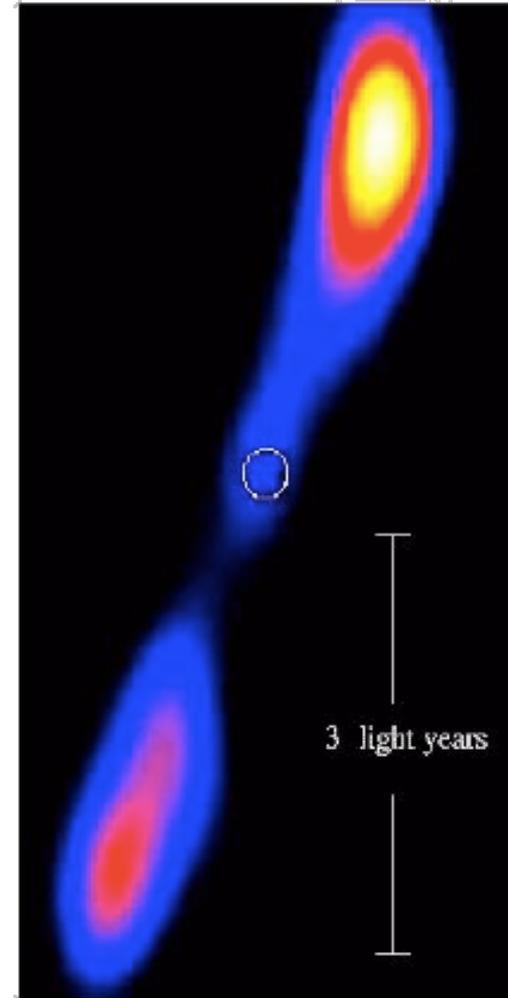


Quasars et Microquasars

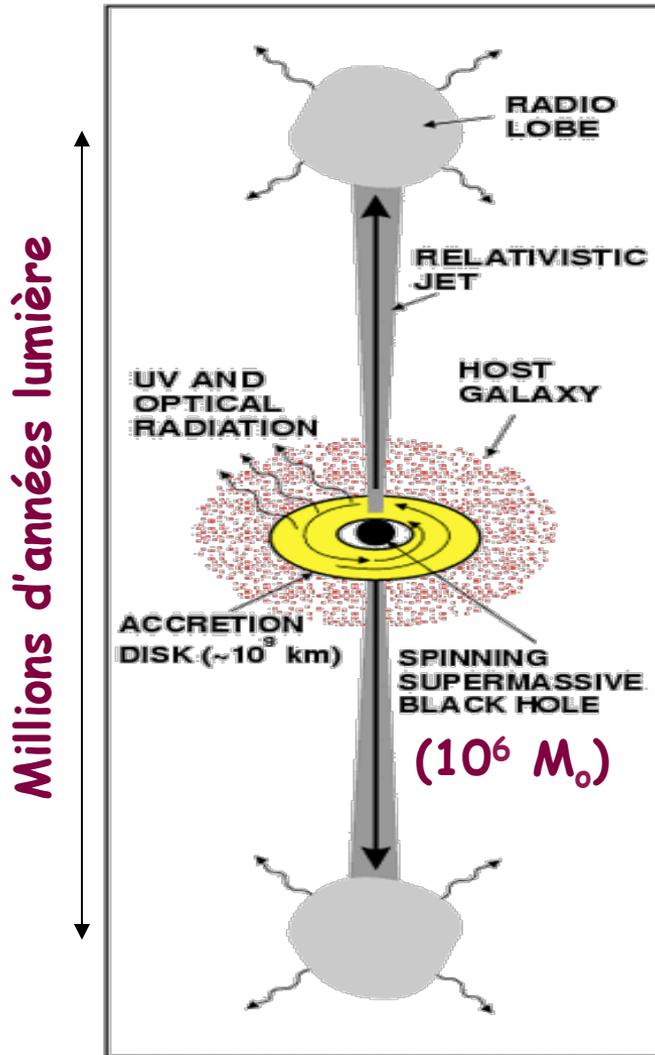
QUASAR 3C 223



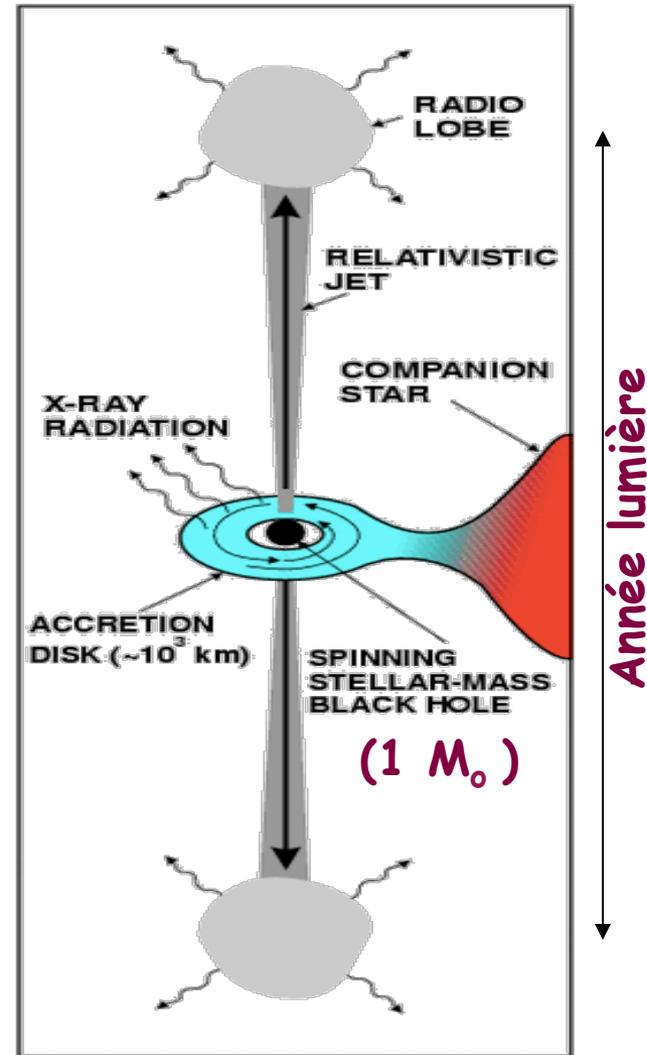
MICROQUASAR 1E1740.7-2942



QUASAR



MICROQUASAR

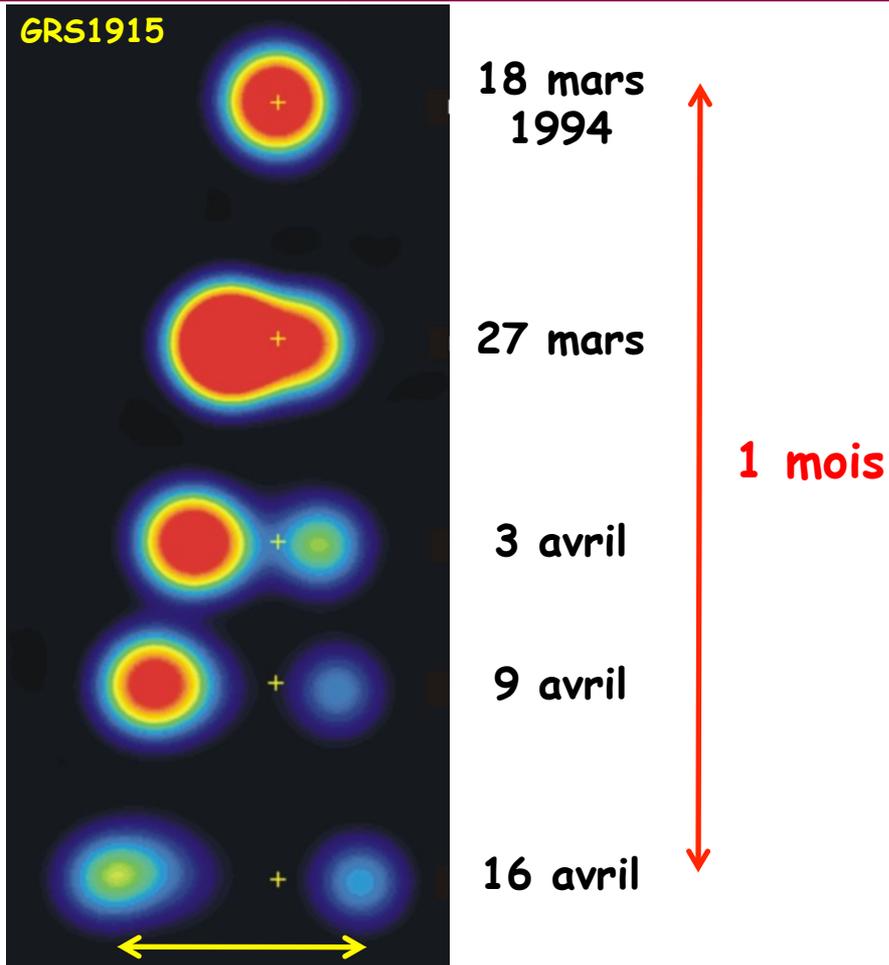


$$R \propto M_{BH}$$

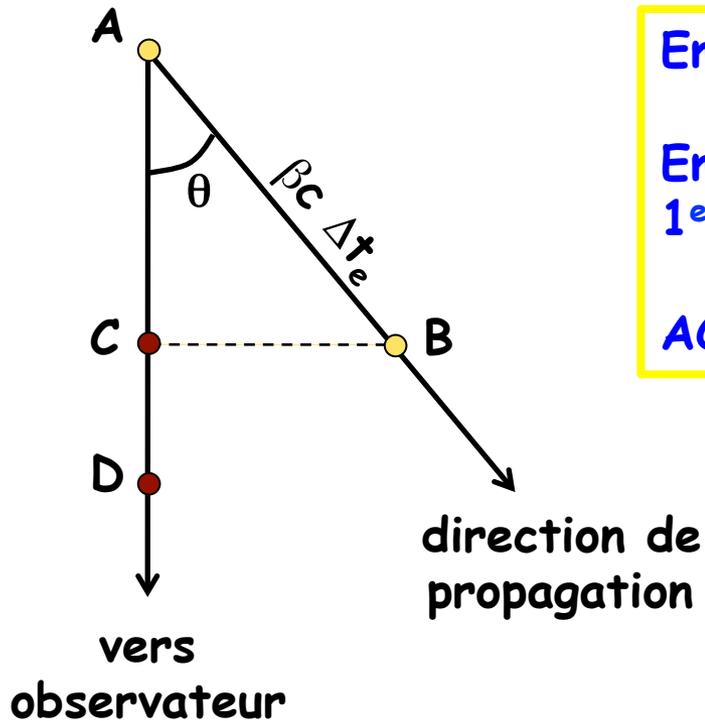
$$T \propto M_{BH}^{-1/4}$$

Mirabel & Rodriguez

Déplacements supraluminiques !?



Déplacements supraluminiques !?



Emission du 1^{er} photon en A

Emission du 2nd photon en B ($AB = \beta c \Delta t_e$)
1^{er} photon est alors en D ($AD = c \Delta t_e$)

$$AC = \beta c \Delta t_e \cos \theta$$

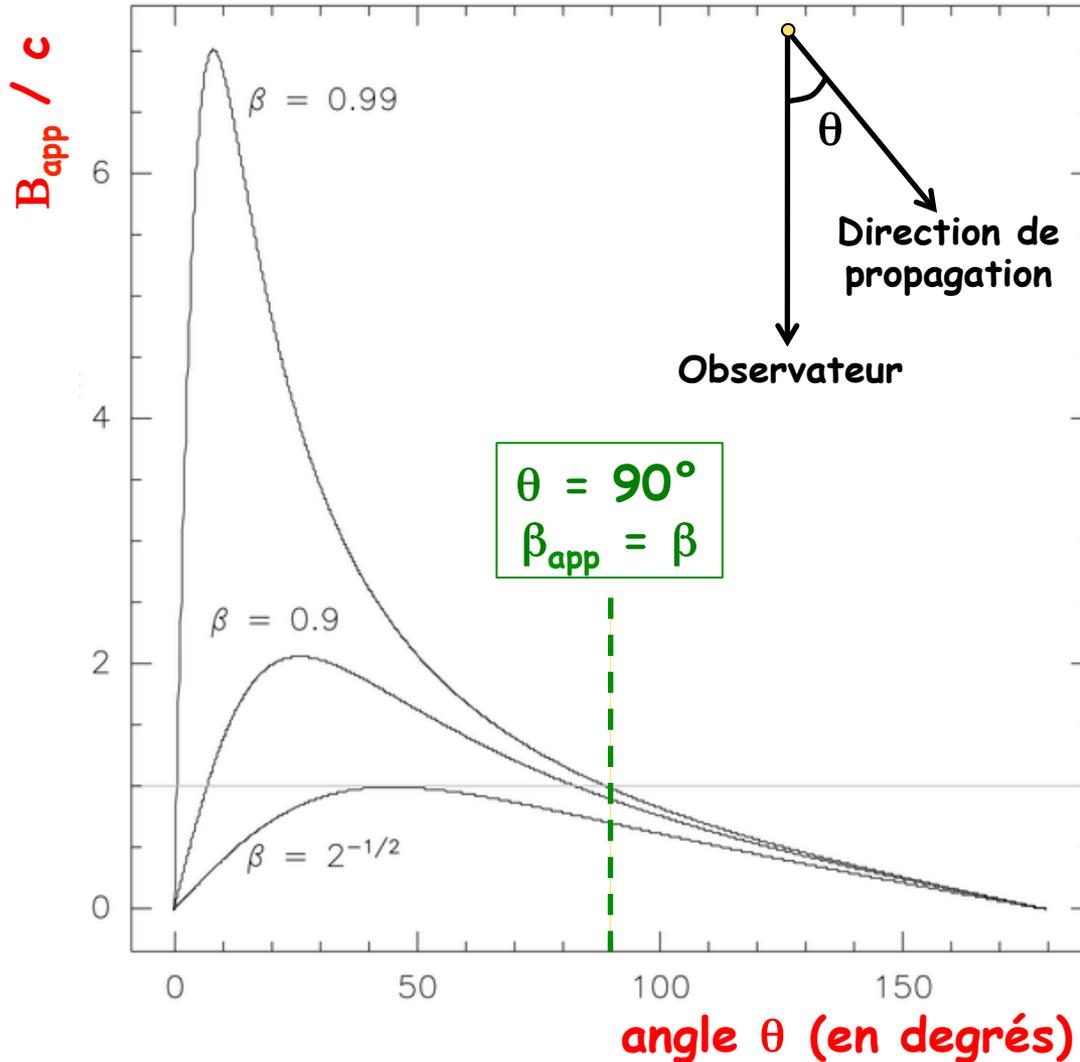
Séparation en projection sur le ciel:
 $CB = AB \sin \theta = \beta c \Delta t_e \sin \theta$

Différence entre les temps d'arrivée:
 $t_2 - t_1 = DC/c = (AD - AC)/c$
 $= \Delta t_e (1 - \beta \cos \theta)$

Vitesse apparente

$$\beta_{\text{app}} = CB / (t_2 - t_1) = \beta \sin \theta / (1 - \beta \cos \theta)$$

Déplacements supraluminiques !?



Déplacement supraluminique
APPARENT

dans certaines
configurations
(θ petit, β grand)

Markarian 421 : blazar « voisin »

