


# Astroparticule

## 2/3


Nathalie PALANQUE-DELABROUILLE  
CEA-Saclay  
Bénodet, novembre 2017

# Astroparticule

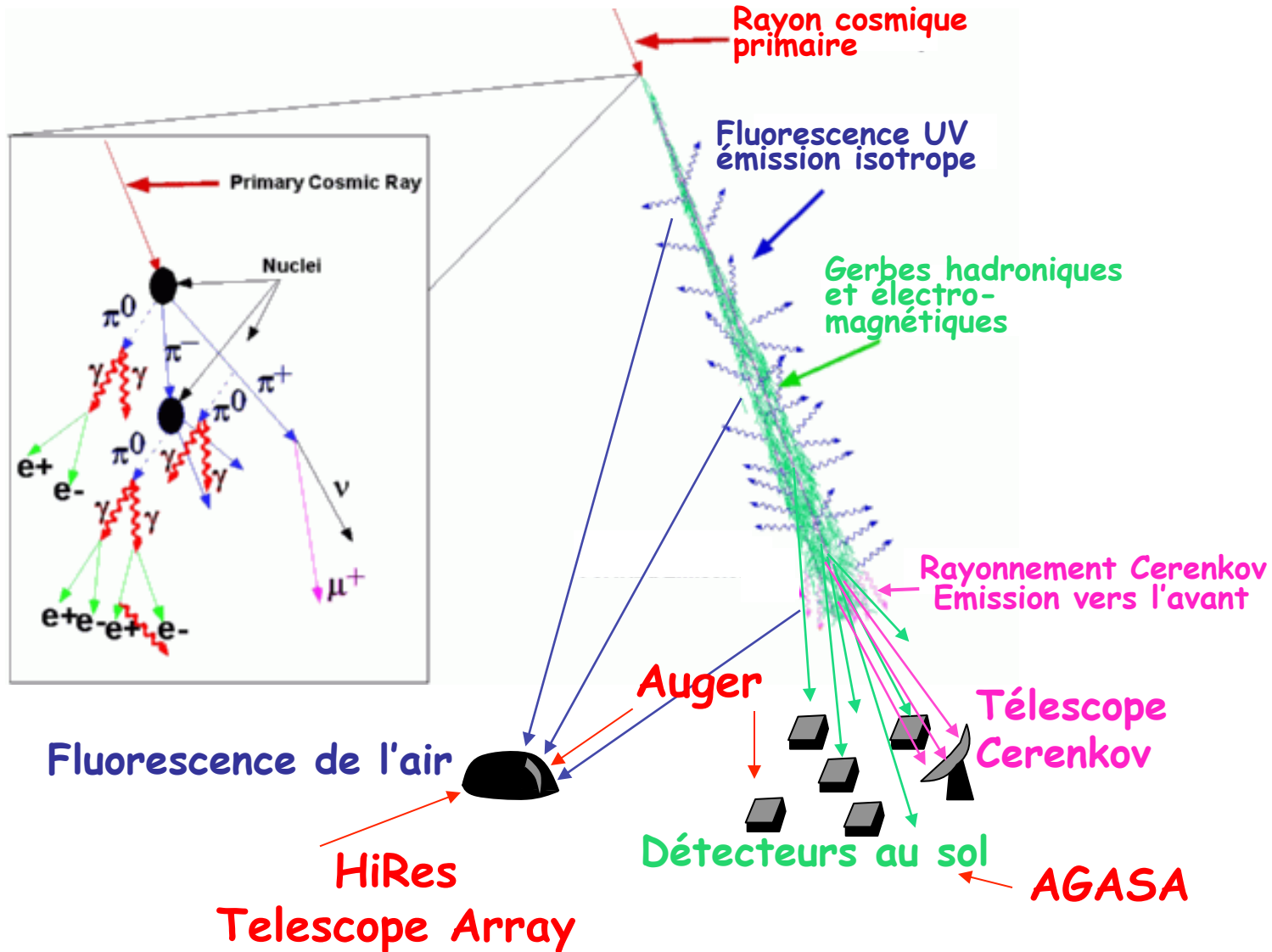
- 1) Approche multi-messagers  
Rayons cosmiques (historique, propriétés)
-  2) Rayons cosmiques (état des lieux, derniers résultats)  
Sursauts gamma  
Ondes gravitationnelles
- 3) Neutrinos
  - Astronomie neutrino
  - Neutrinos et cosmologie

# 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



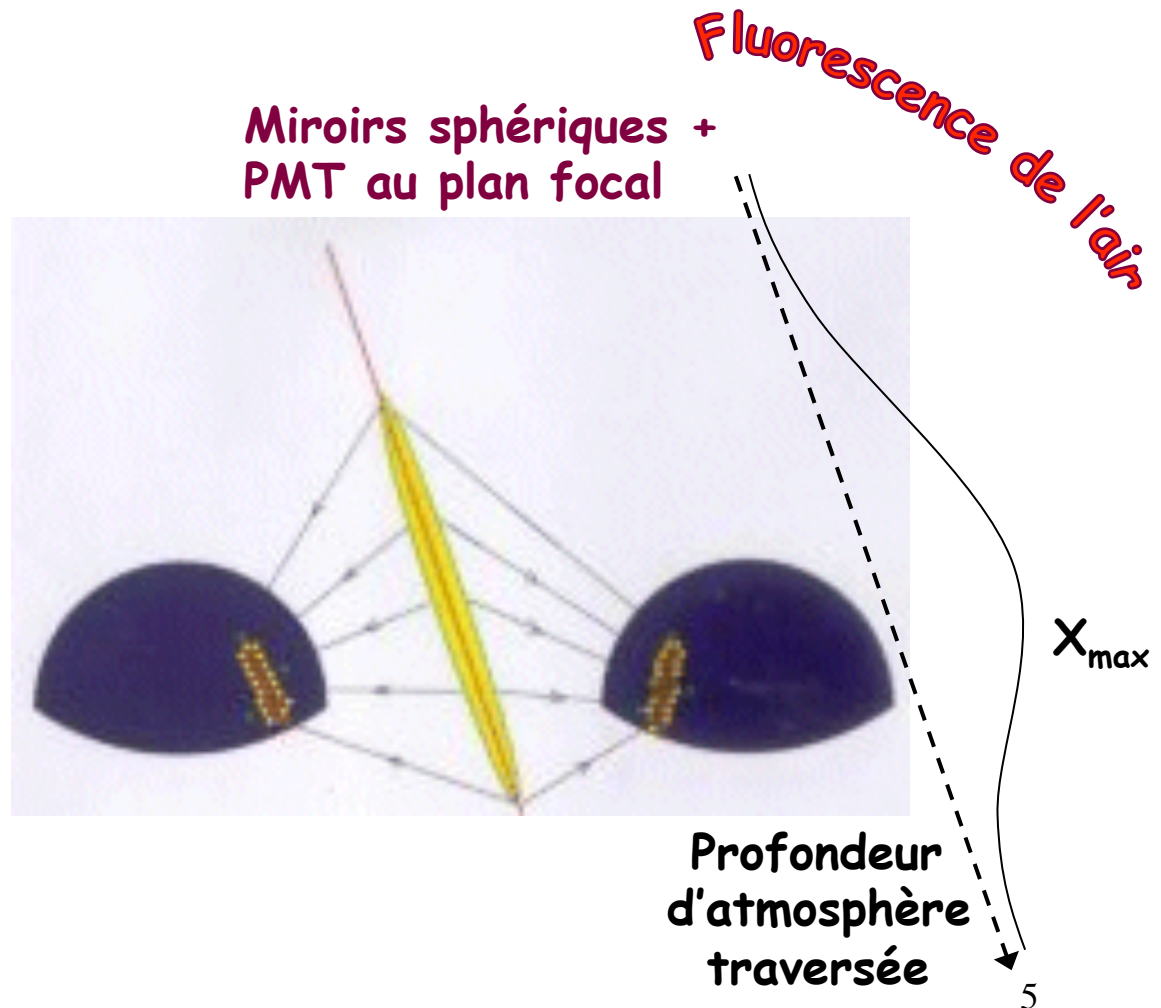


# Techniques de détection

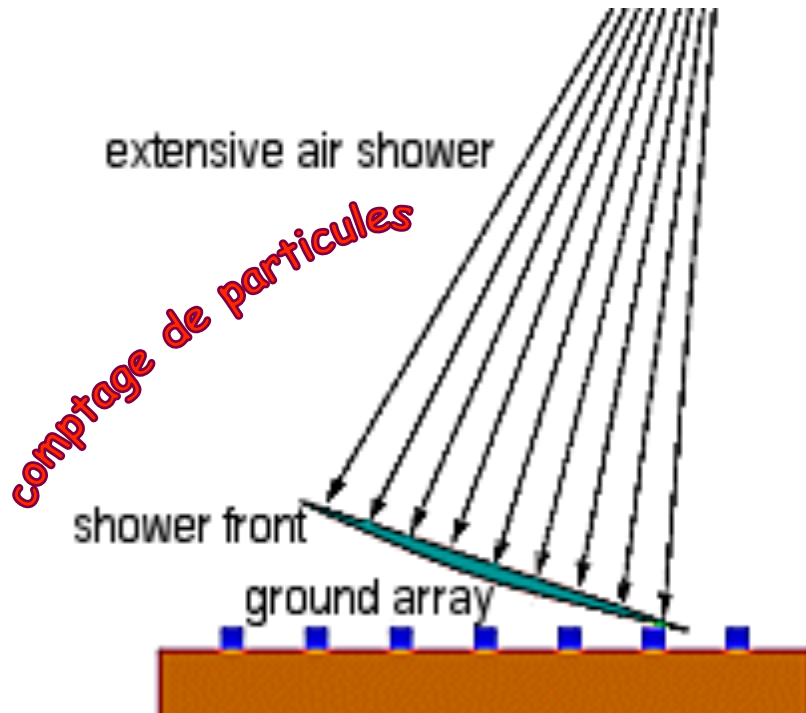
Lumière UV,  
uniquement  
par nuits claires  
et sans lune  
(~10%)

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

Energie: largeur  
de la gerbe



# Techniques de détection

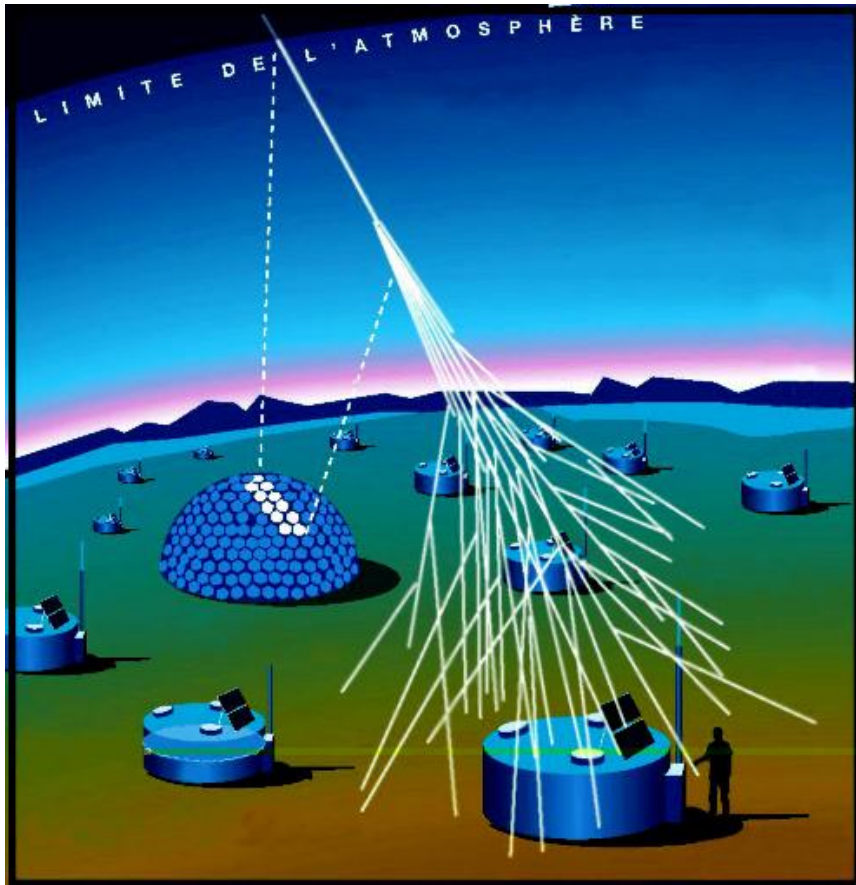


**Trajectoire** déterminée  
à partir des temps d'arrivée  
du front d'onde  
sur détecteurs au sol

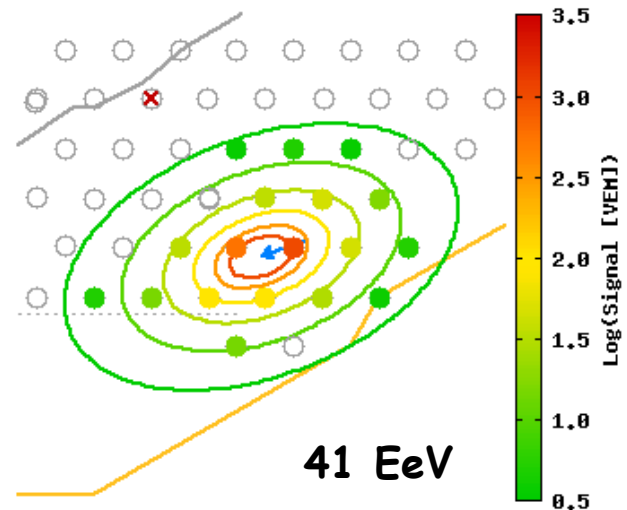
**Energie** déterminée  
à partir des comptages



# AUGER



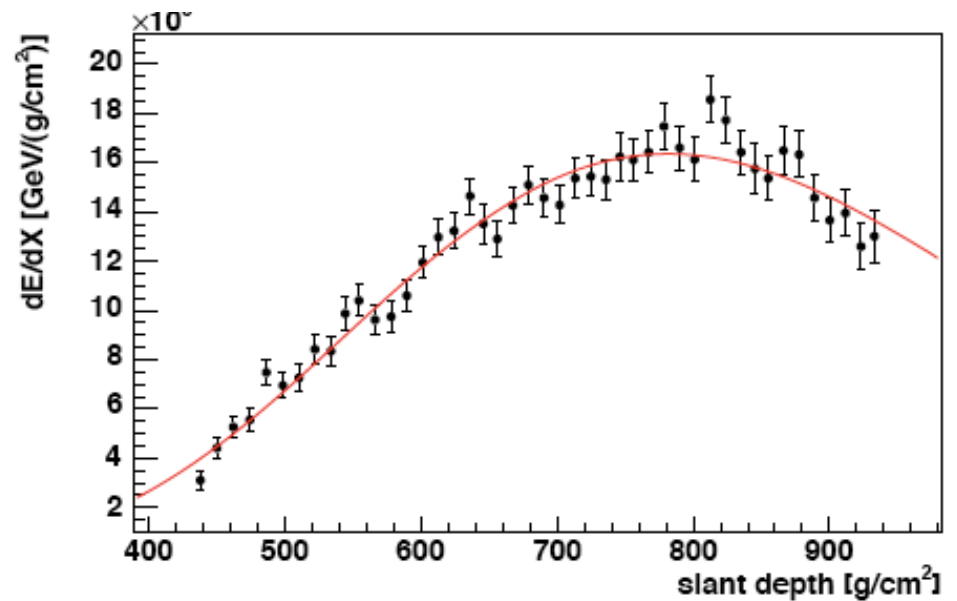
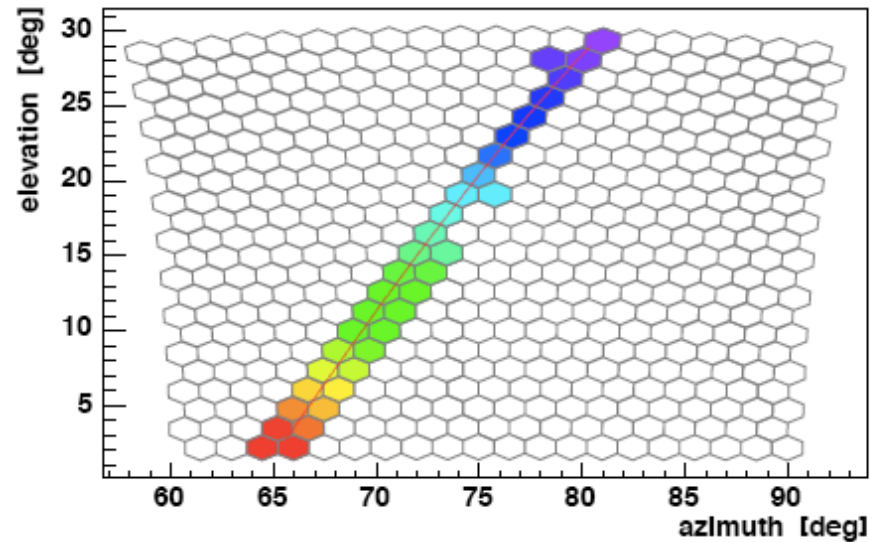
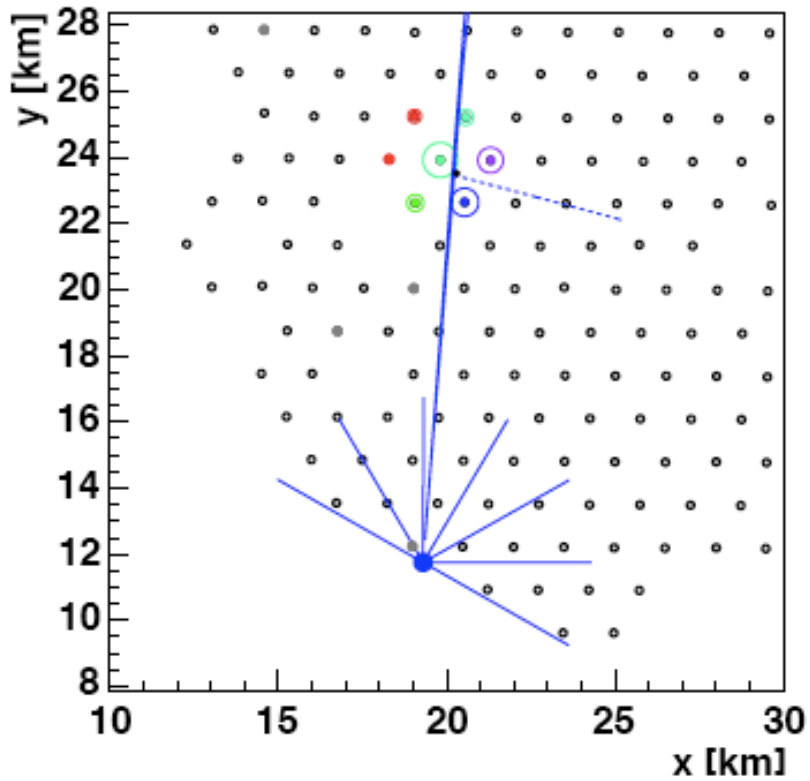
- > million d'événements enregistrés
- $E_{\max} \sim 1 \cdot 10^{20} \text{ eV}$





# 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°
$\Delta$ impact	80 m	400 m	35 m
$\Delta E / E$	18%	15%	5%

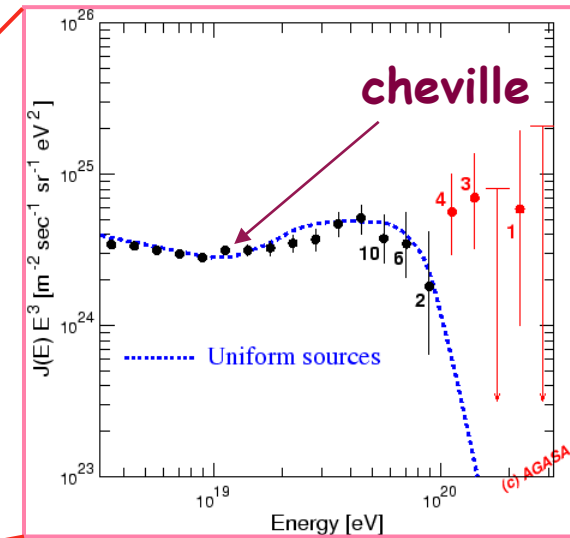
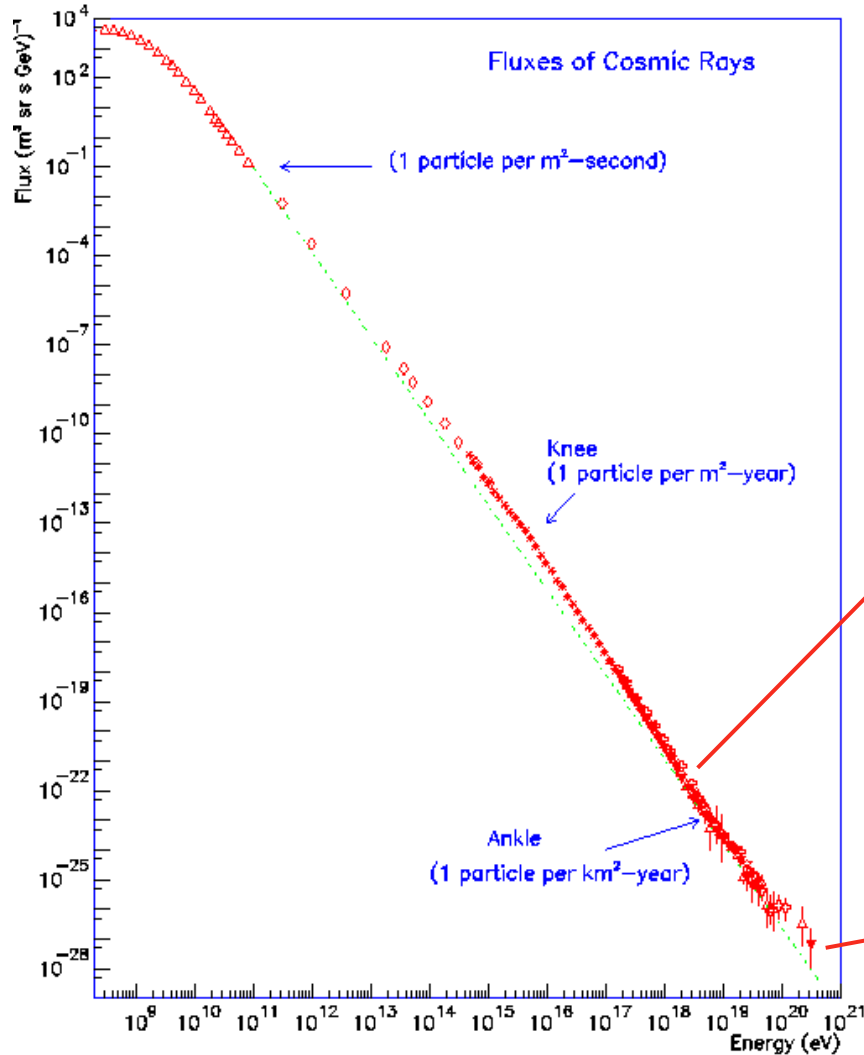
$10^{20}$ eV	détecteur de surface	détecteur de fluorescence	hybride
$\Delta\theta$	1°	1°	0,4°
$\Delta$ impact	40 m	400 m	30 m
$\Delta E / E$	7%	10%	3%

# Astroparticule

## 2/3

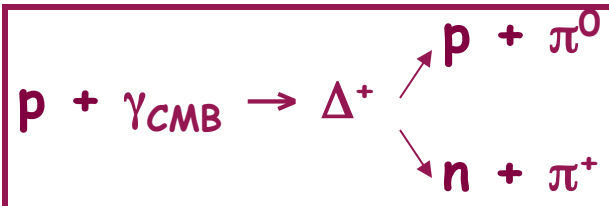
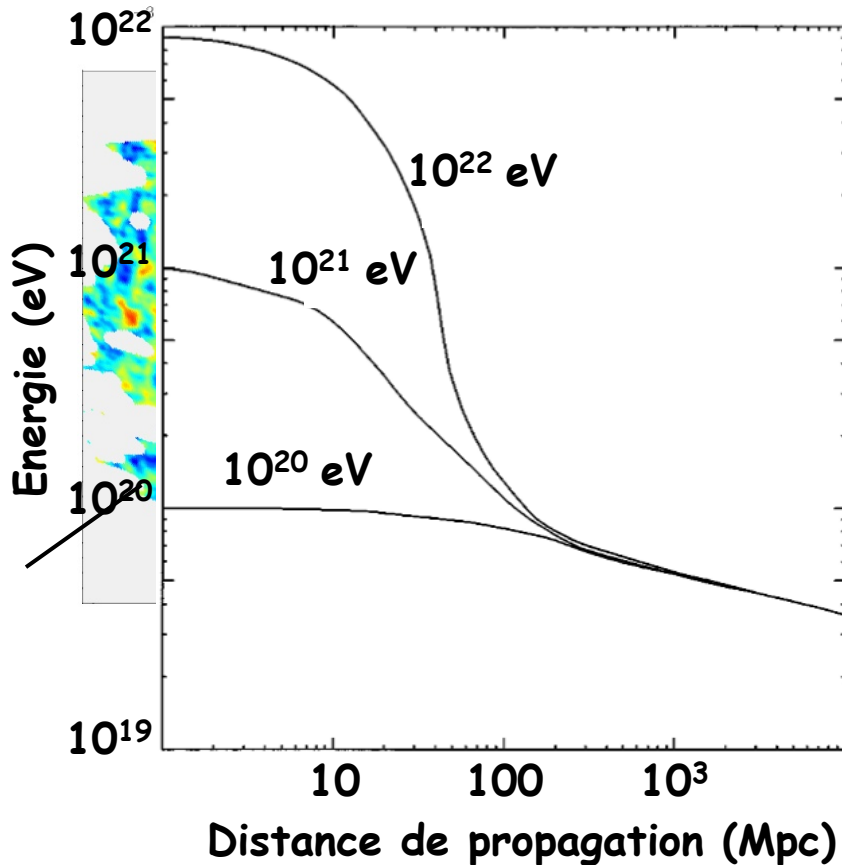
- Rayons cosmiques: techniques de détection
- • Etat des lieux (Auger, Telescope Array):  
Fin du spectre (UHECR)  
Origine galactique / extra-galactique  
Sources
- Univers extrême et trous noirs
- Photons haute énergie et sursauts gamma
- Ondes gravitationnelles

# La « fin » du spectre





# GZK (Greisen Zatsepin Kuzmin) cut-off



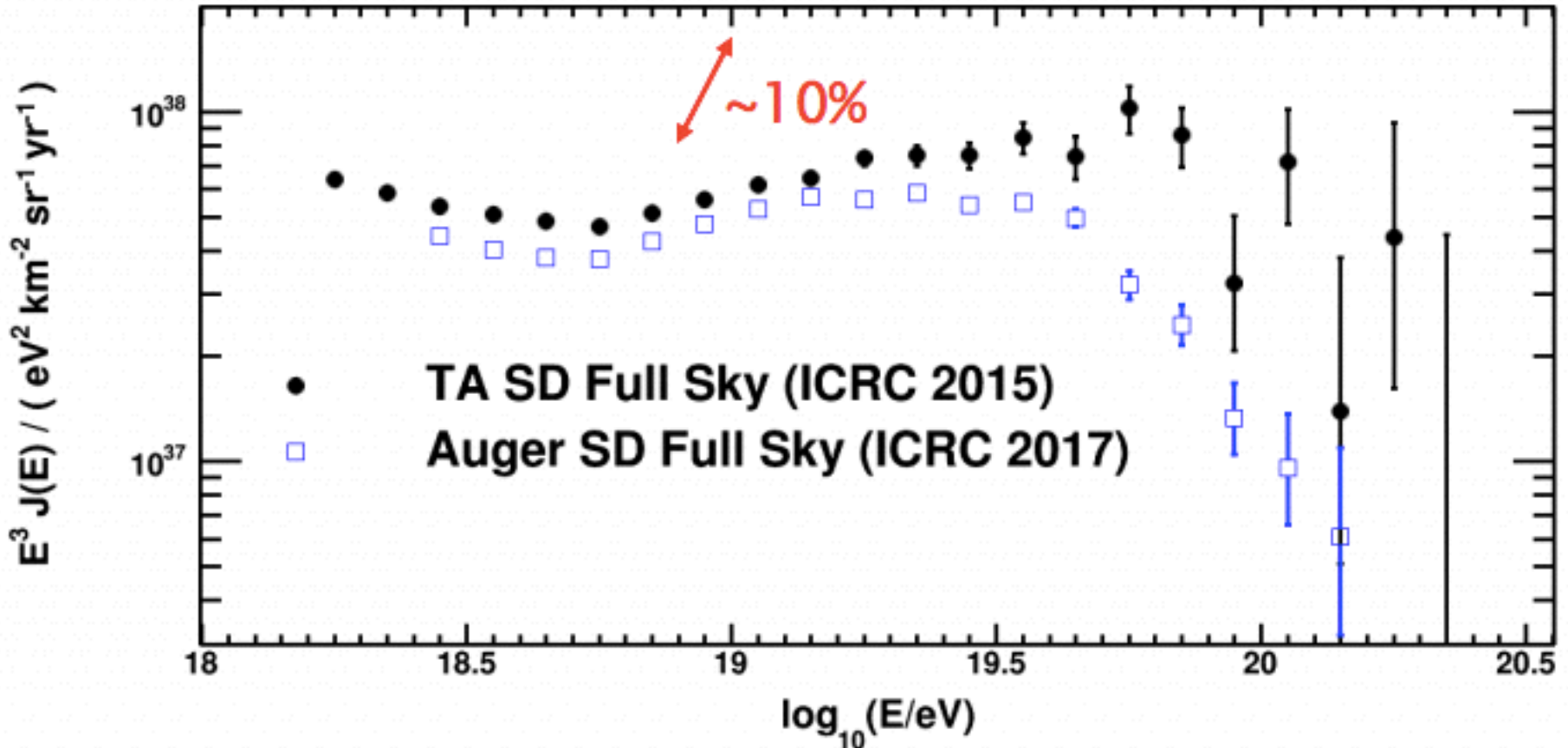
Processus possible  
énergétiquement ( $>5 \times 10^{19}$  eV)



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

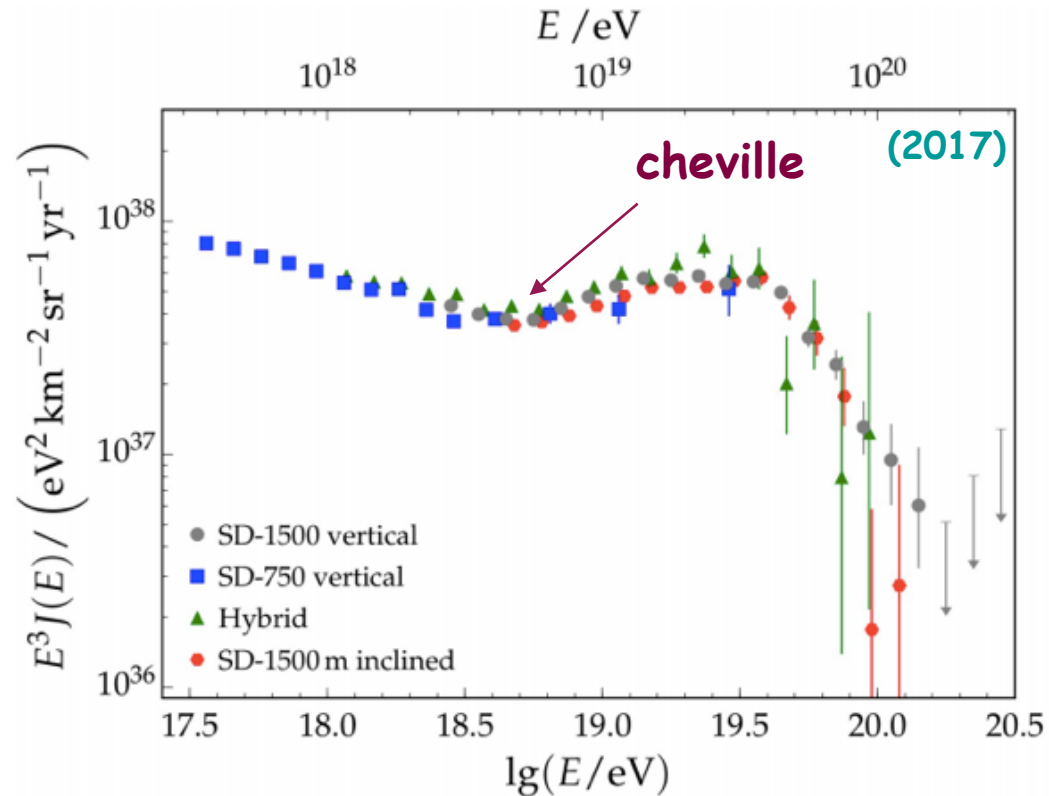
4 lots indépendants

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

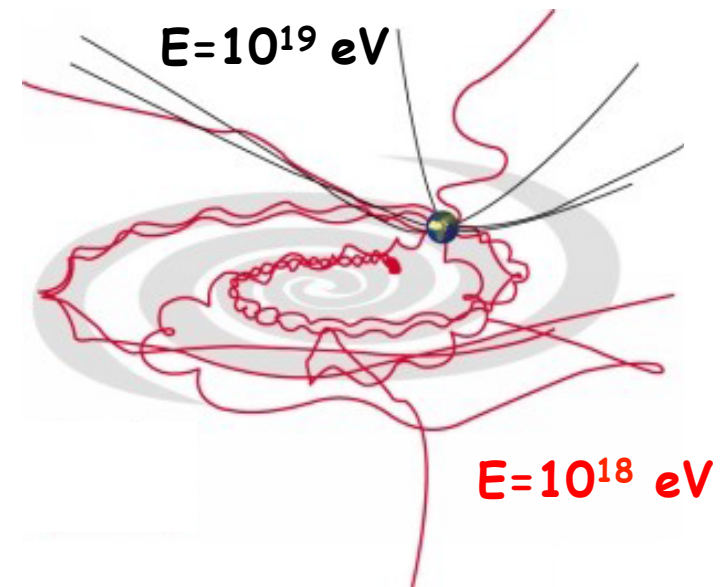
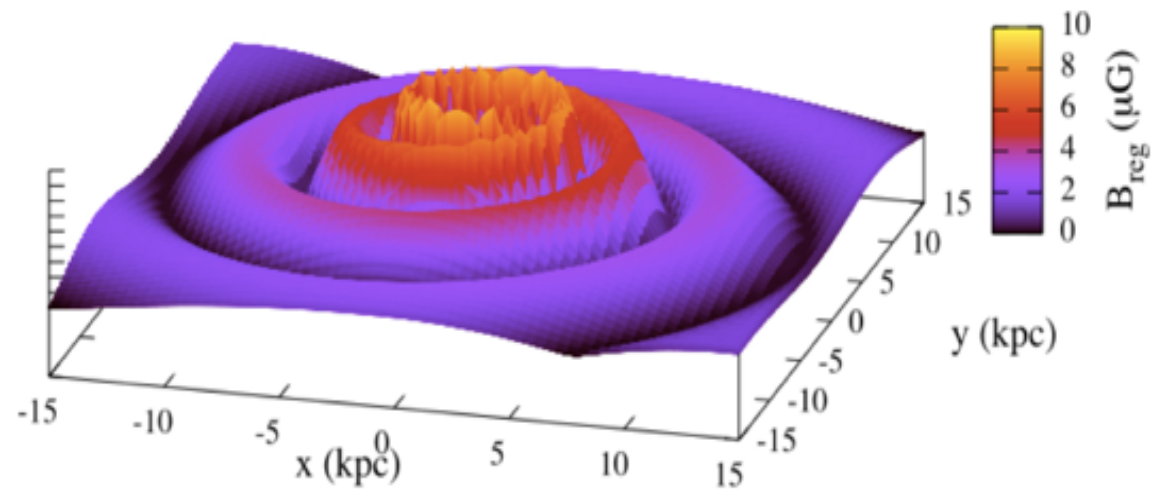
⇒ Rayons cosmiques issus  
de sources lointaines

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

⇒  $E_{\max}$  atteint?



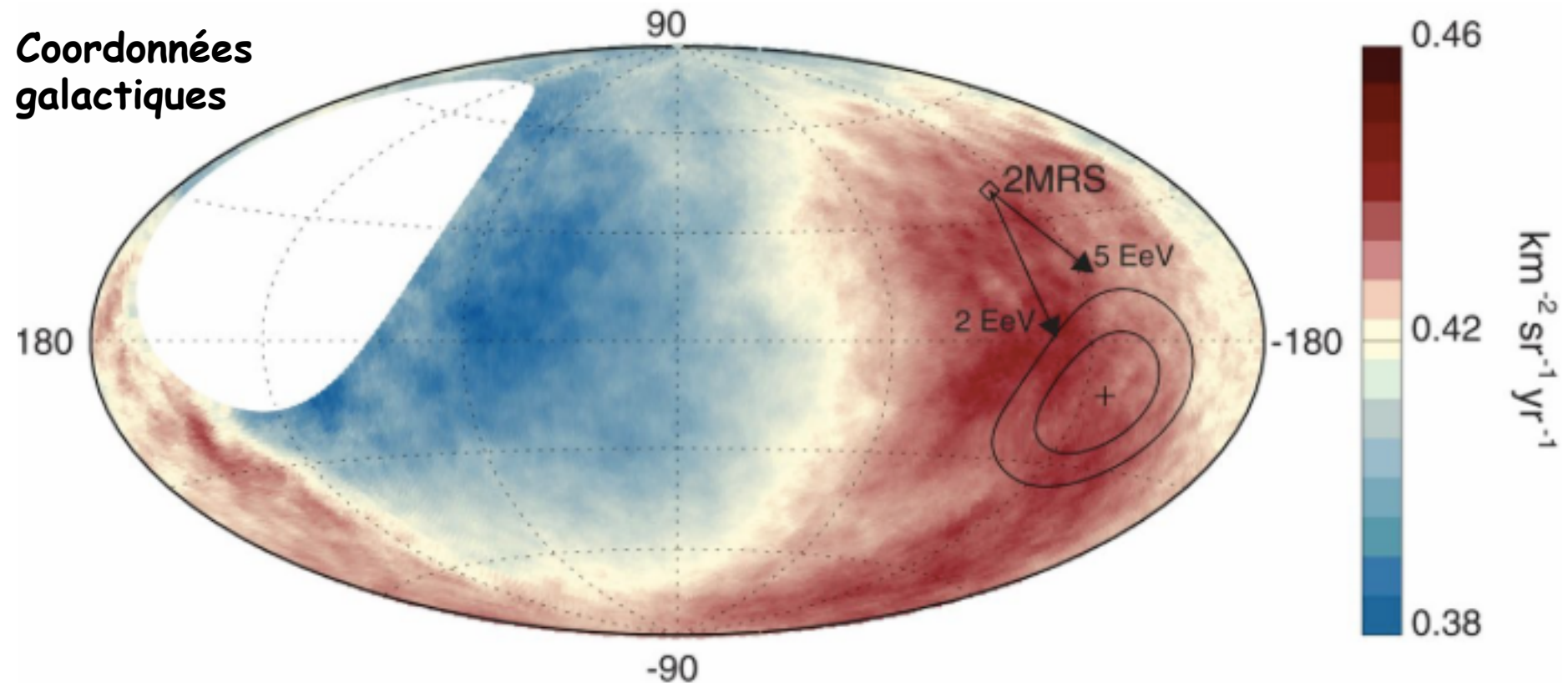
# AUGER - origine des UHECR



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



# AUGER - origine des UHECR



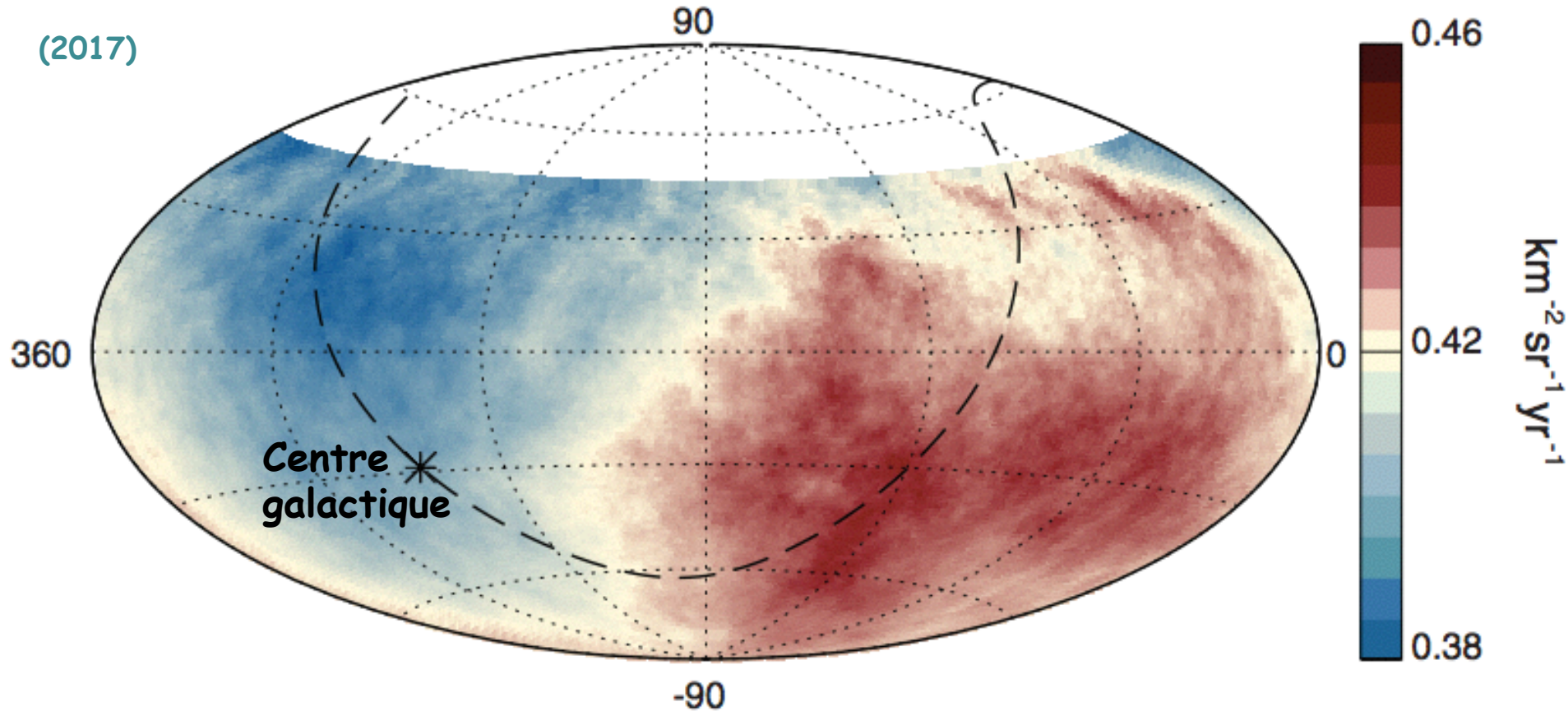
$E > 8 \cdot 10^{18} \text{ eV}$ , anisotropie à  $5.2\sigma$ , incompatible Voie Lactée

Indication origine extra-galactique

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

# AUGER - origine des UHECR

(2017)

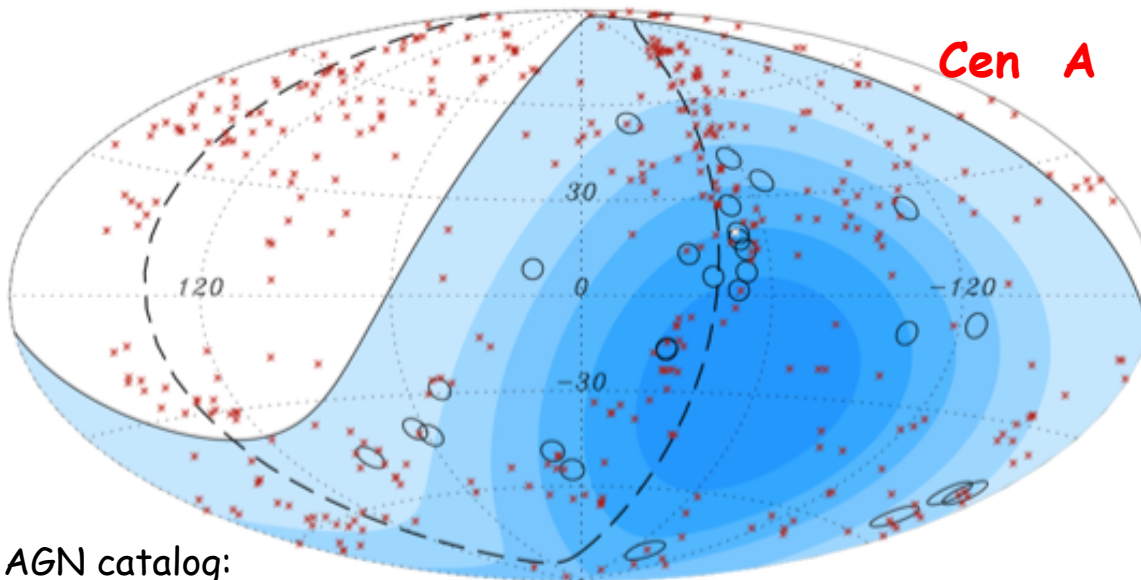


$E > 8 \cdot 10^{18}$  eV, anisotropie à  $5.2\sigma$ , incompatible Voie Lactée

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 $3^\circ$	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  $\gamma$  extra-galactique
  - Hypothèse: flux UHECR  $\propto$  flux (non-thermique) photons  $\gamma$
- ⇒ Recherche de corrélations avec catalogues (Fermi-LAT)  
restreints à  $d < 250$  Mpc



# AUGER - origine des UHECR



**AGN**  
**Correlation à  $2.7\sigma$**   
**Fraction anisotropie = 7%**



**Galaxie à forte formation stellaire**  
**Correlation à  $4.0\sigma$**   
**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

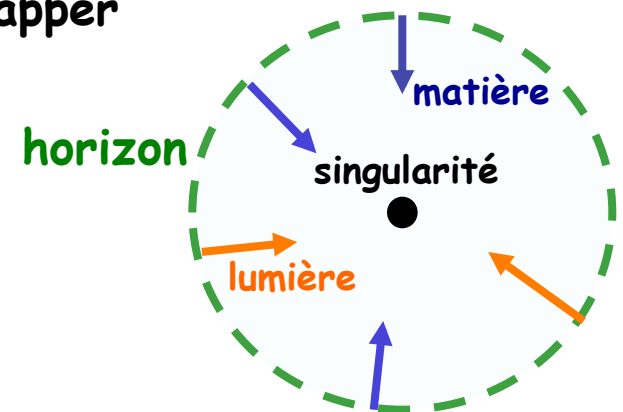
$$E_T = E_G + K < 0$$

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

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

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

rayon de Schwarzschild  $R_S$



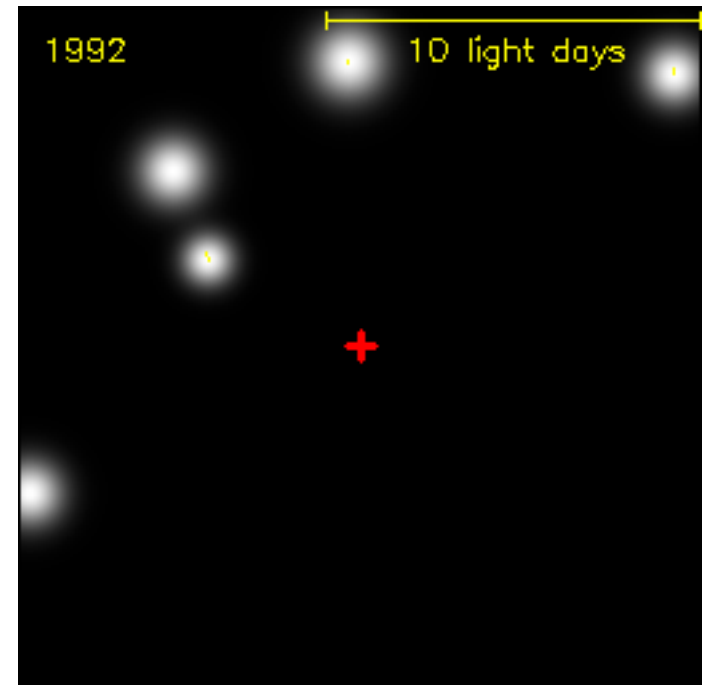
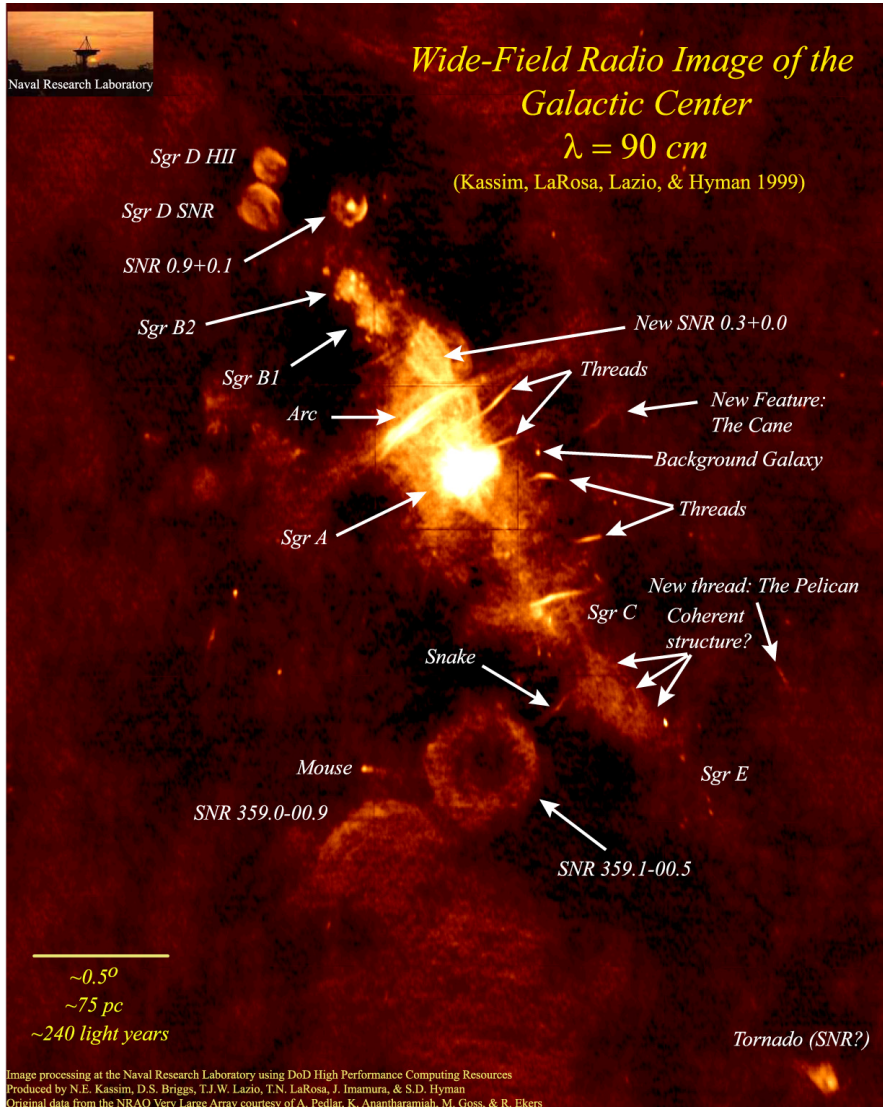
$R_S = 3$  km pour le Soleil

$R < R_S$  : 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<sub>soleil-pluton</sub>

→ **trou noir supermassif !**

# Trous noirs



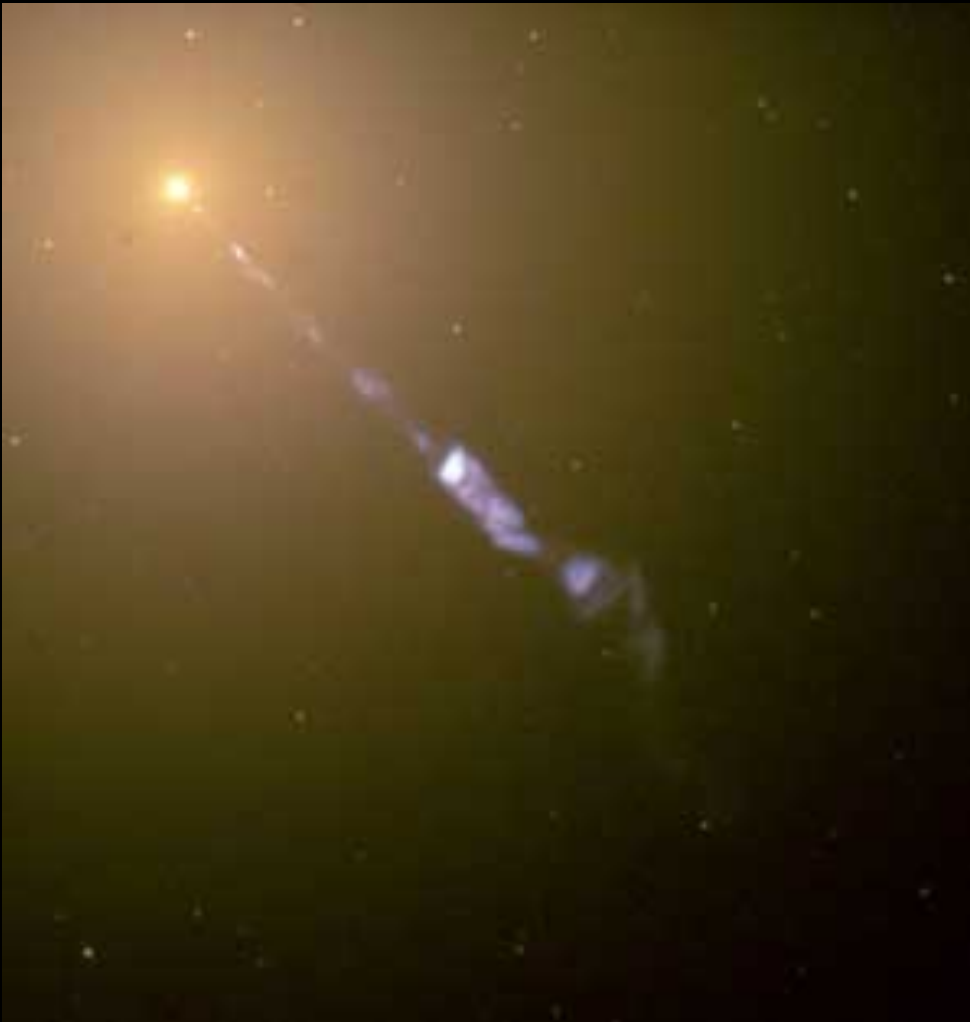
Ground



HST • WFPC2

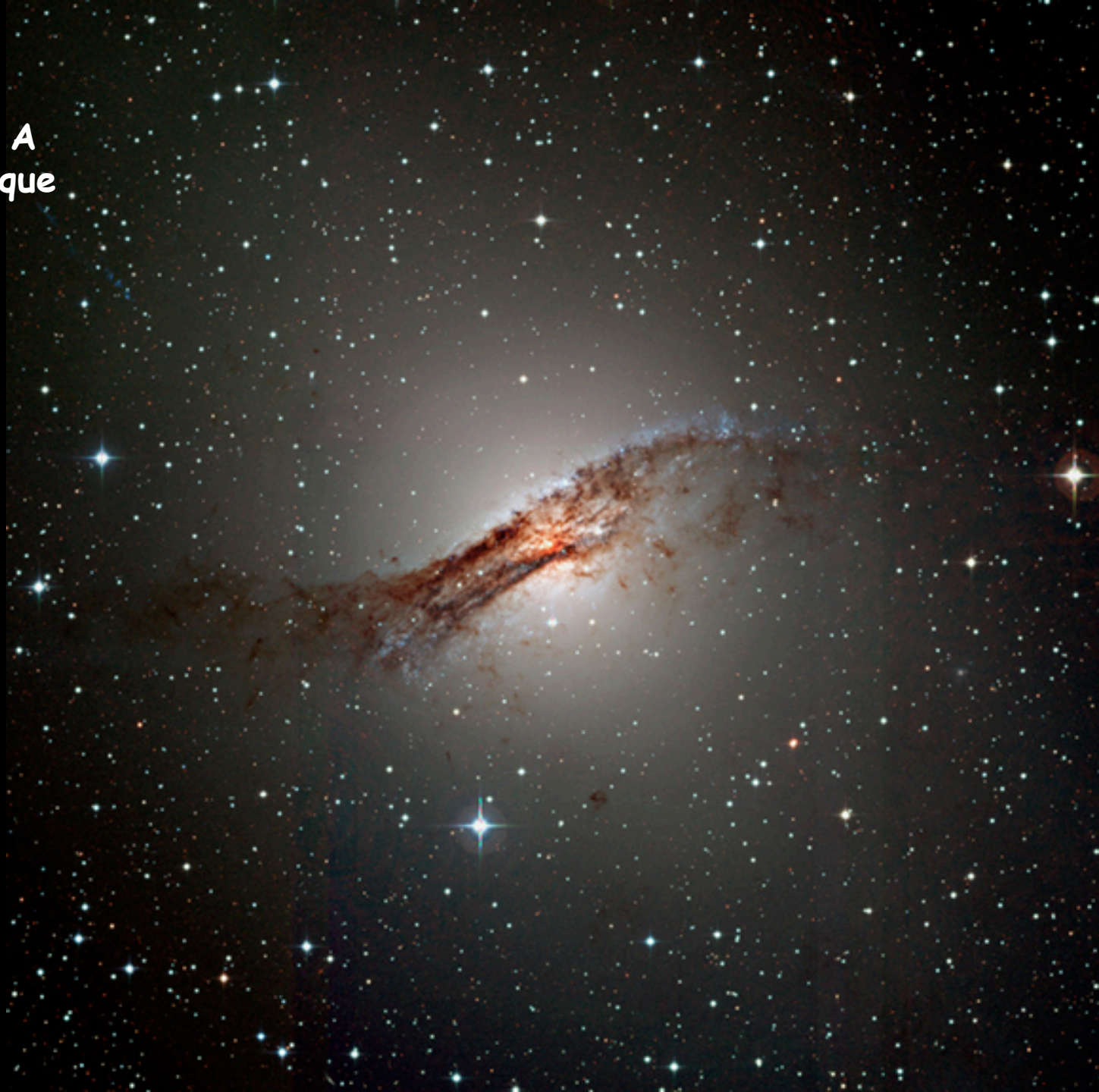


# Trous noirs

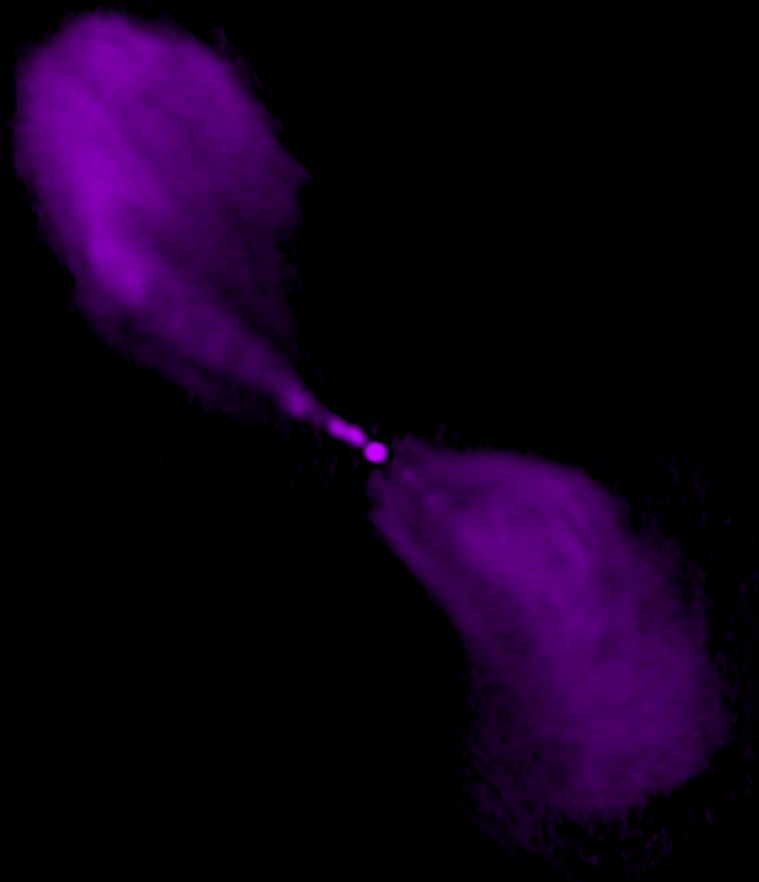


**M87 :**  
**des jets de matière**

Cen A  
optique



Cen A  
radio



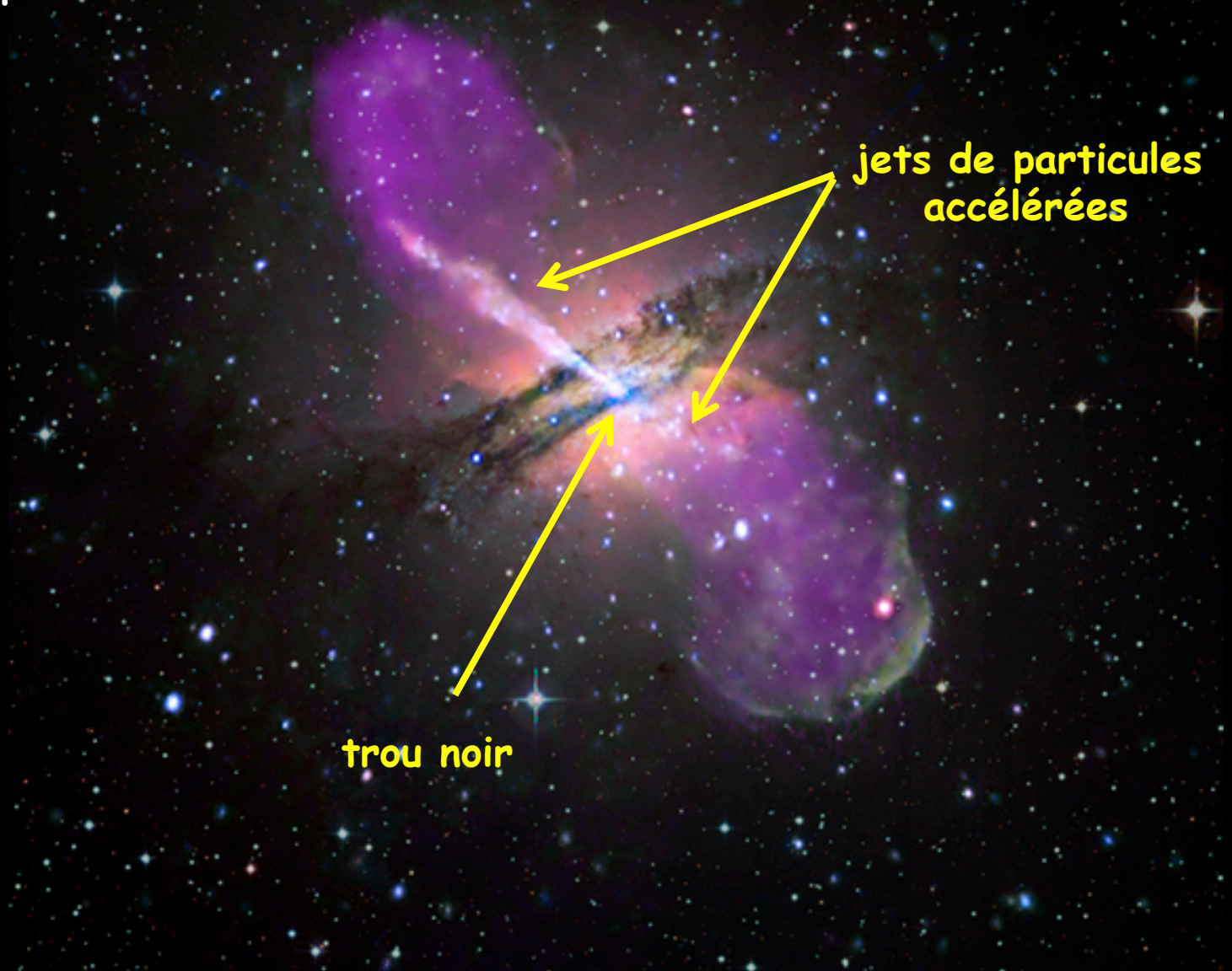
Cen A  
rayons X





Cen A  
composité

Source des rayons cosmiques  
de ultra haute énergie ?



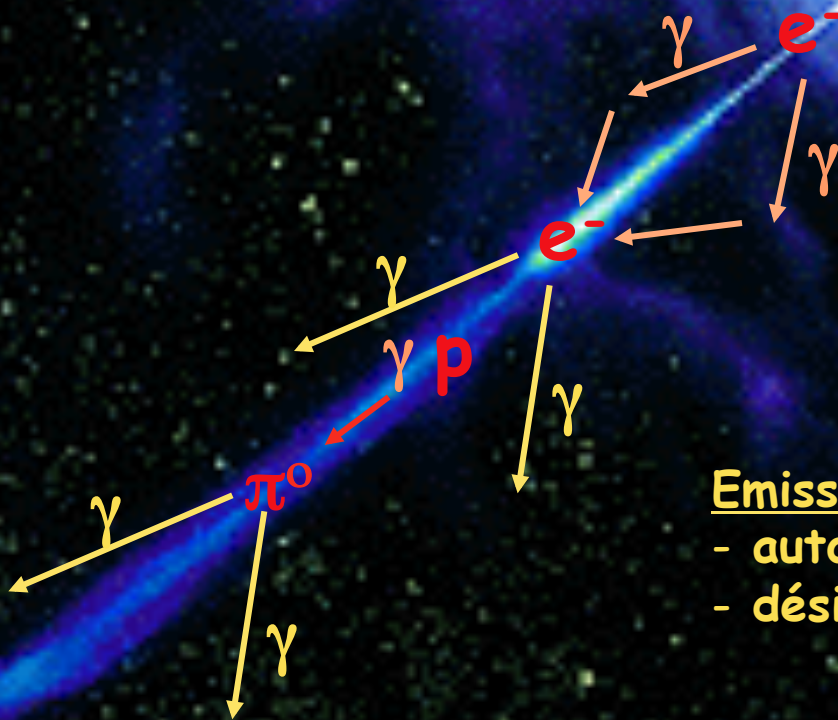
jets de particules  
accélérées

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 and pinkish jets of accelerated particles extend outwards from the center, labeled 'jets de particules accélérées'. The background is filled with numerous stars of various colors, including blue, white, and red, set against a dark cosmic space.

# Blazars

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



Emission haute énergie (rayons  $\gamma$ ):

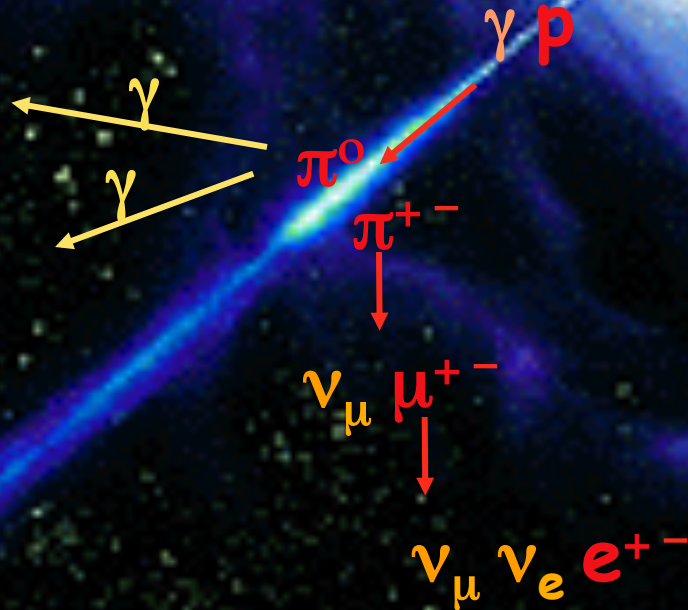
- auto-compton (electromagnétique) ?
- désintégration  $\pi^0$  (hadronique) ?



# Blazars

Emission haute énergie (rayons  $\gamma$ ):

- ~~auto-compton (electromagnétique) ?~~
- désintégration  $\pi^0$  (hadronique) ?




Sources de  $\nu$   
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

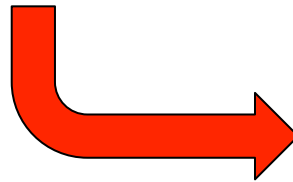


# Autres messagers?

*particules chargées  
protons, noyaux*

Confirmations indépendantes?

Autres preuves, autres approches



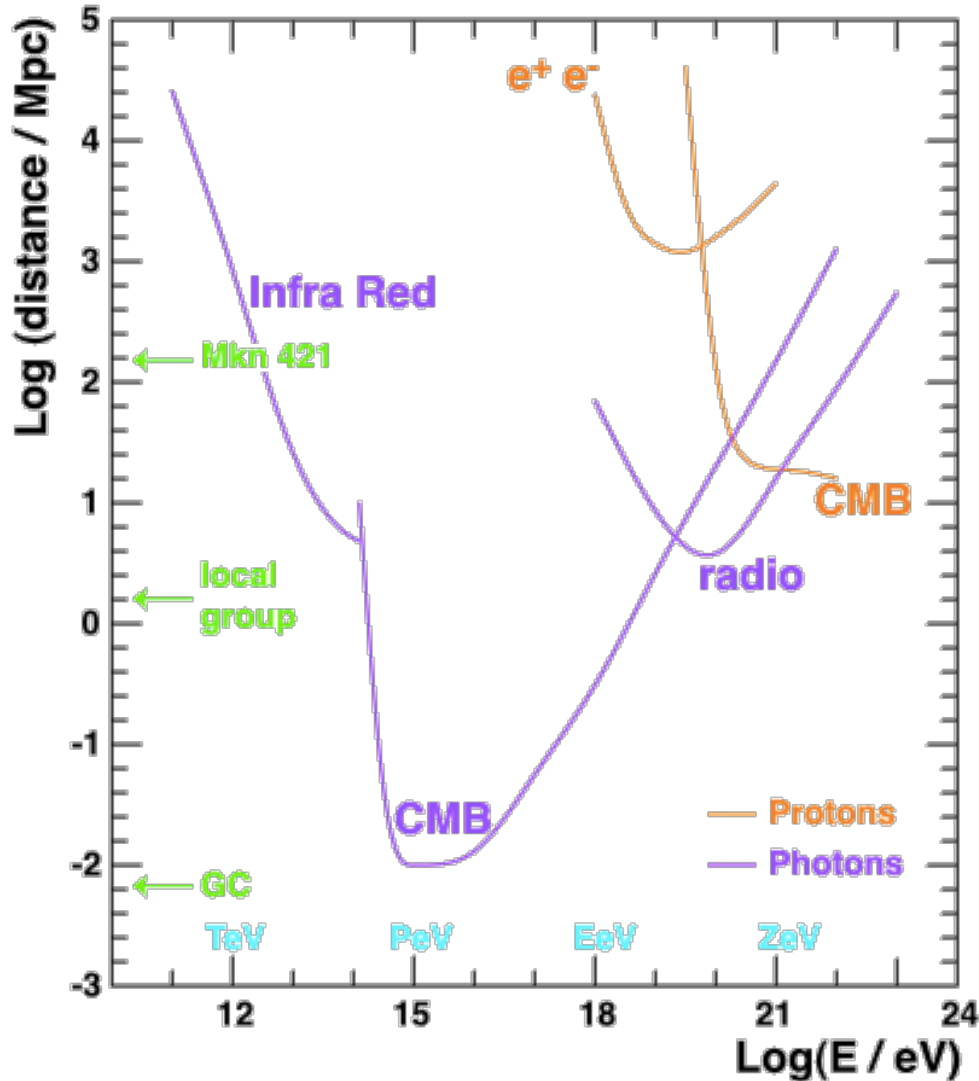
**autres  
messagers**

*photons  
de haute  
énergie*

*ondes gravitationnelles*

*neutrinos*

# « Horizon » Gamma



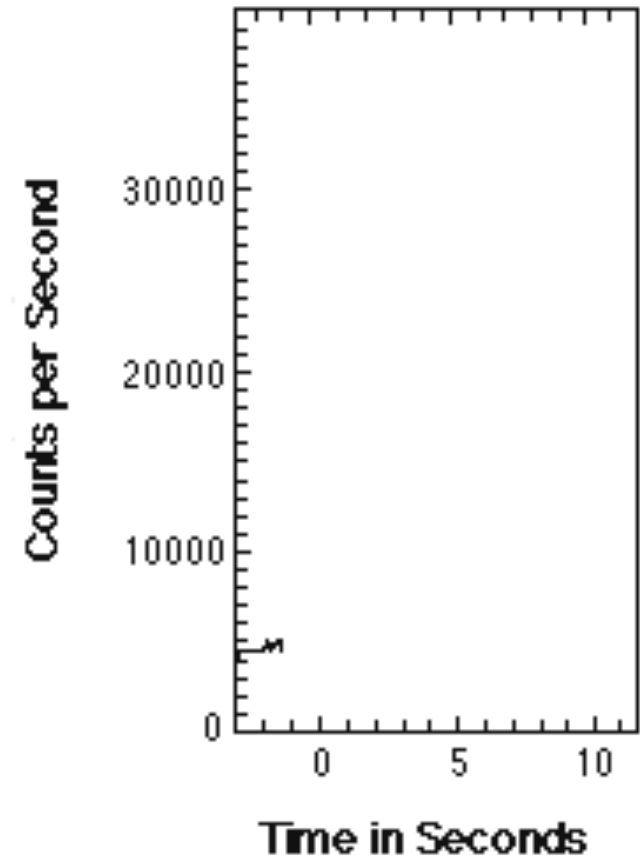
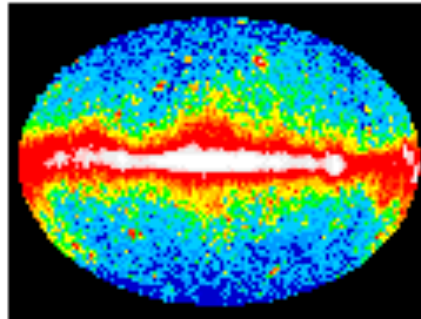
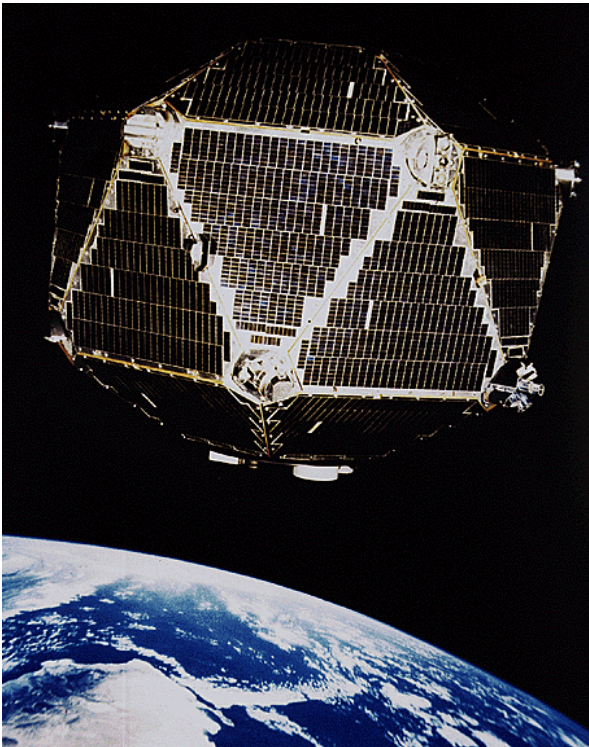
coupure GZK

Absence  
de sources  
extragalactiques aux  
plus hautes énergies

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

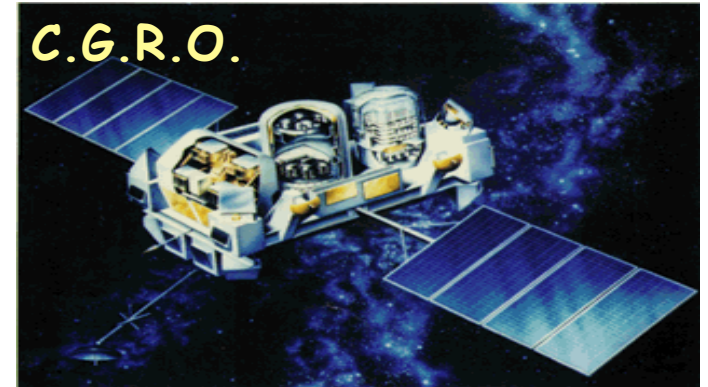
# Sursauts Gamma (GRB)

**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 ?

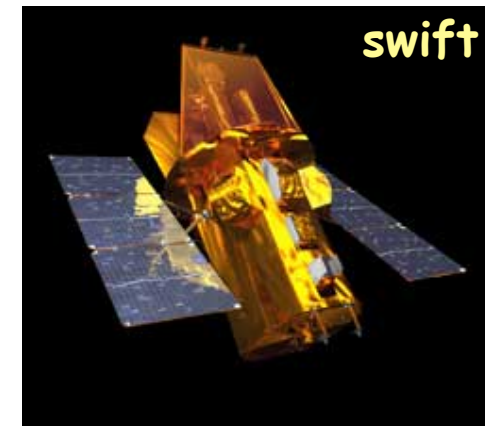
$\Delta t$  de 10ms à quelques secondes

$\Delta L$  (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

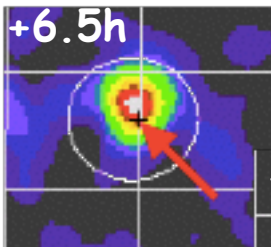
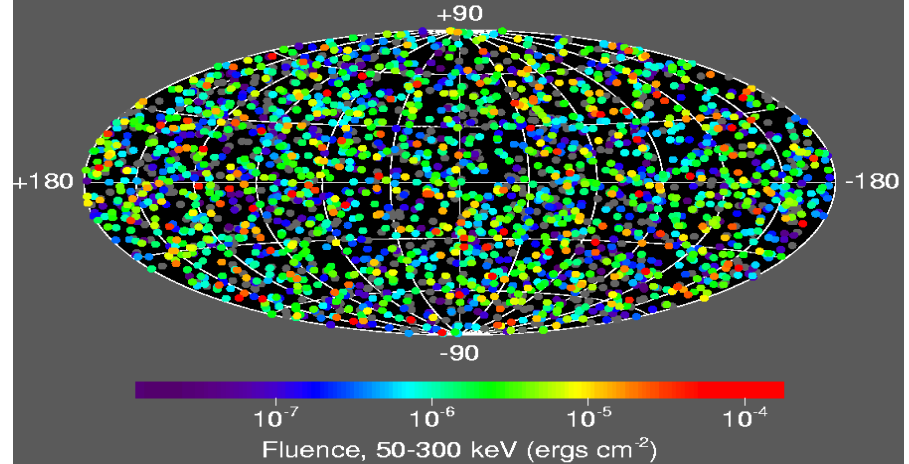
+

Contreparties optiques

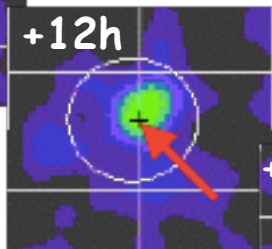


Phénomènes cosmologiques  
( $z = 0.43$  à  $6.3$ )

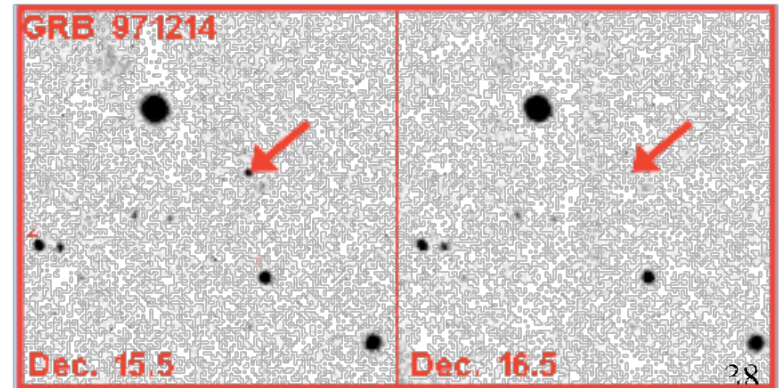
2704 BATSE Gamma-Ray Bursts



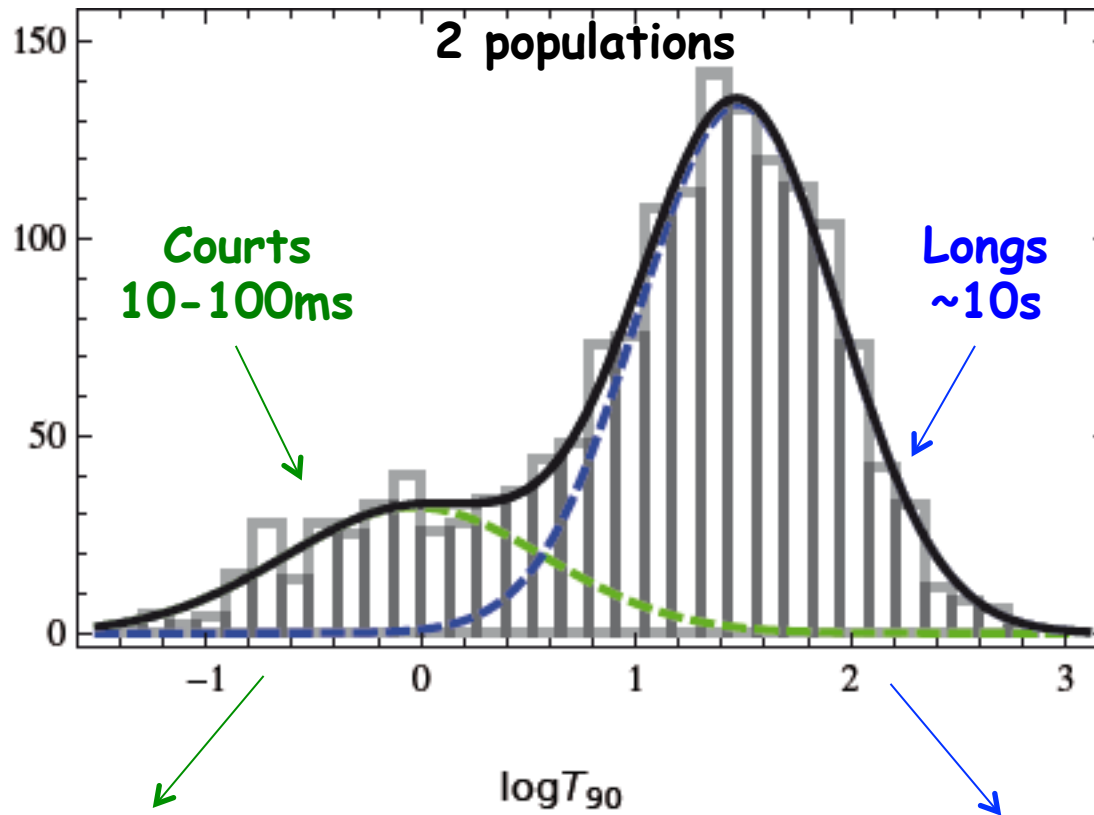
Contrepartie  
ultérieure  
en  
rayons X



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

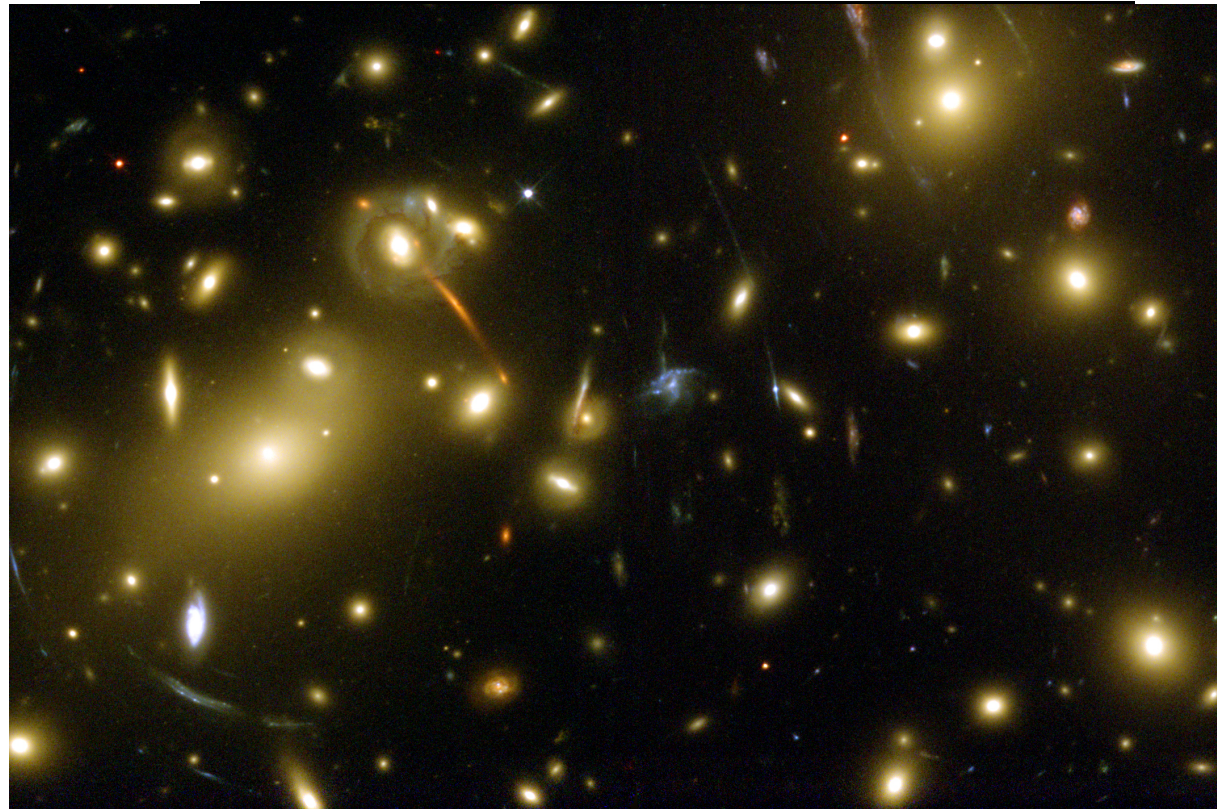
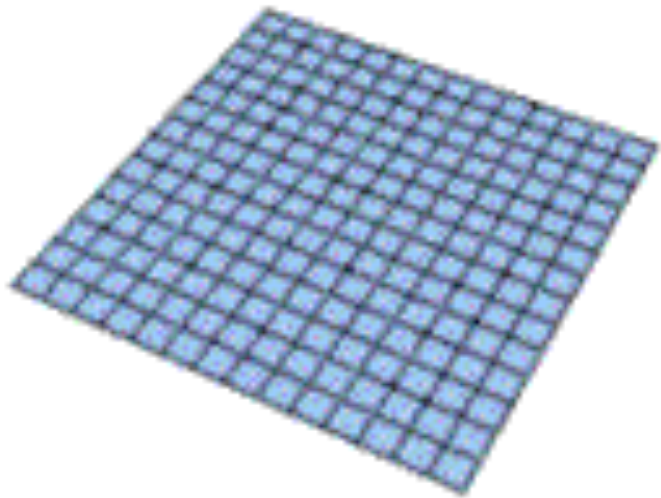
- Rayons cosmiques: techniques de détection
- Etat des lieux (Auger, Telescope Array):  
Fin du spectre (UHECR)  
Origine galactique / extra-galactique  
Sources
- Univers extrême et trous noirs
- Photons haute énergie et sursauts gamma
- Ondes gravitationnelles



# Gravitation et espace-temps

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

Force de gravitation  
→ courbure de l'espace





# Ondes gravitationnelles

relativité générale → ondes gravitationnelles

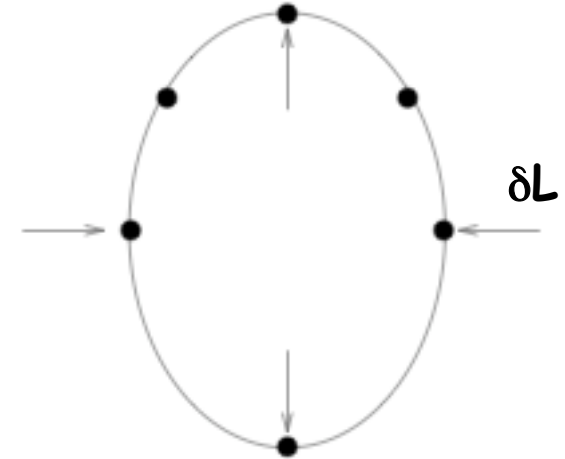
- prédiction dès 1918
- Un siècle avant première détection *Pourquoi ?*

# Ondes gravitationnelles

$$h = \delta L / L$$

Variation de longueur due à onde gravitationnelle

Longueur totale



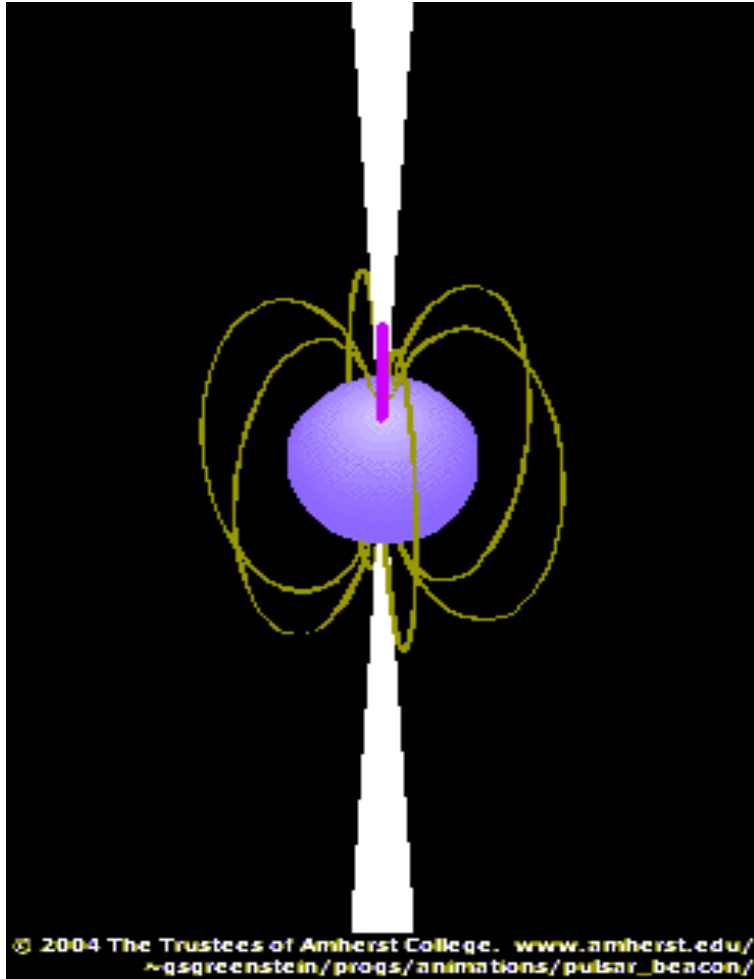
Explosion SN dans amas de la Vierge (15 Mpc):  
 $h \sim 10^{-21}$  à  $10^{-24}$

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

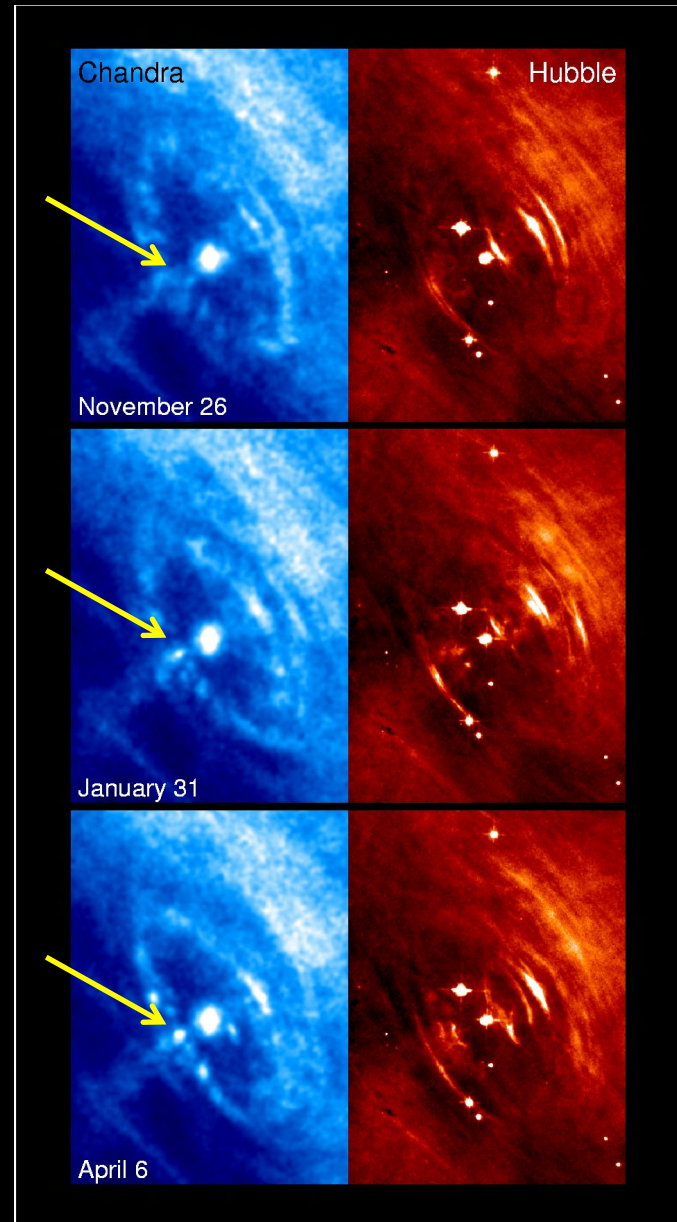
$T = 59 \text{ ms}$

précision meilleure que horloges atomiques!

# Pulsar du Crabe



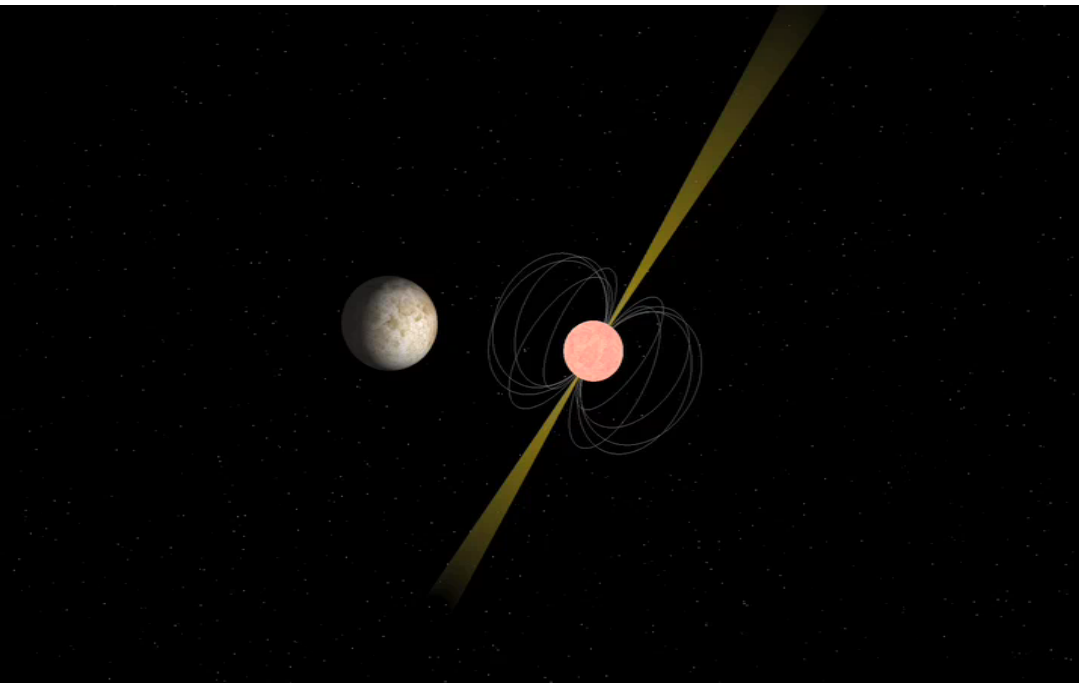
Hubble - optique (rouge)  
Chandra - rayons X (bleu)



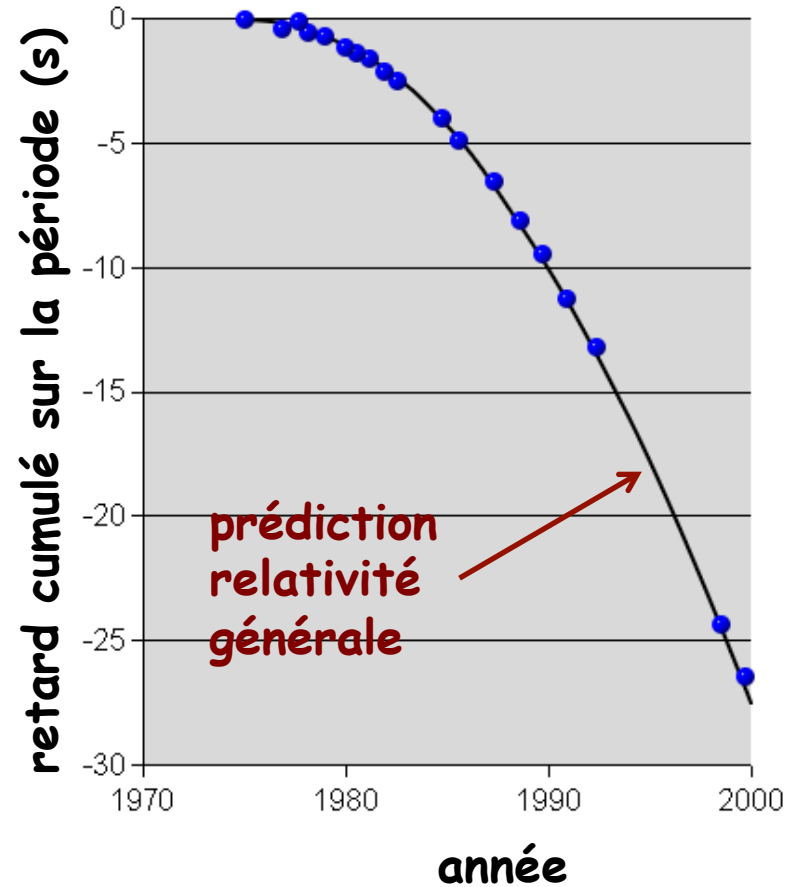


# Hulse et Taylor

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



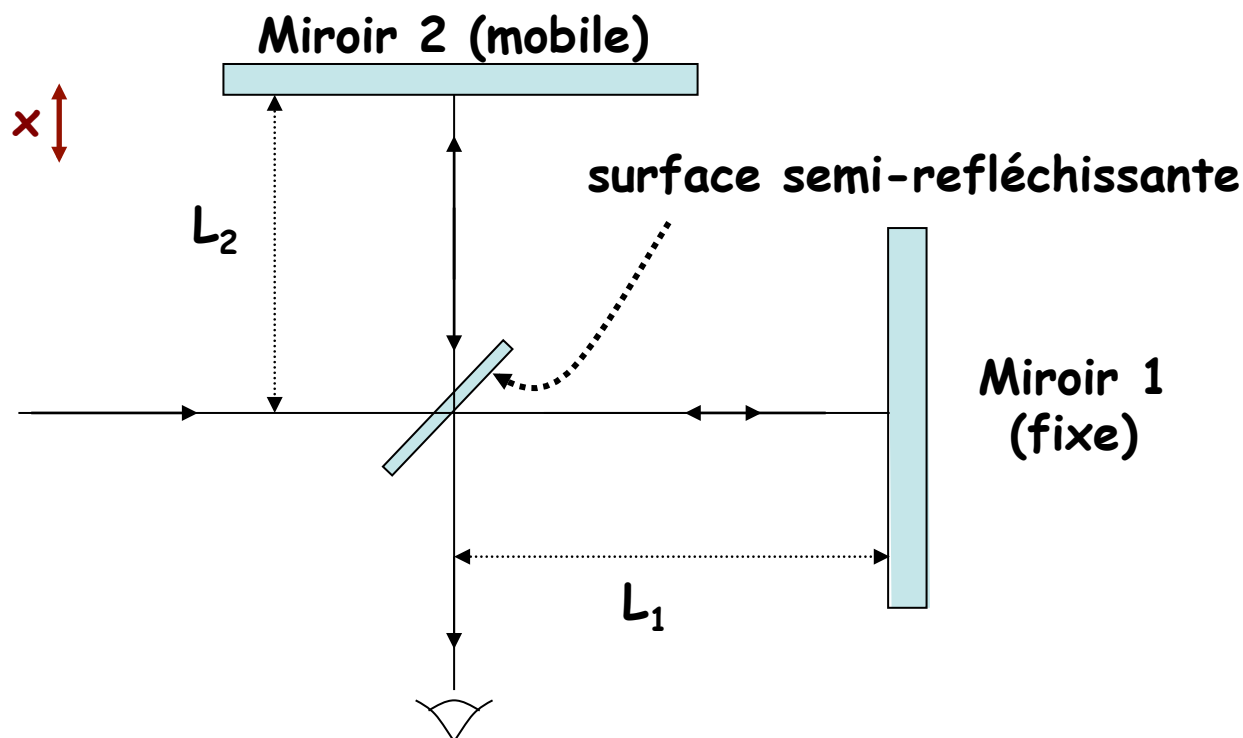
→ Prix Nobel 1993



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

# Détection des ondes gravitationnelles

## Interférométrie



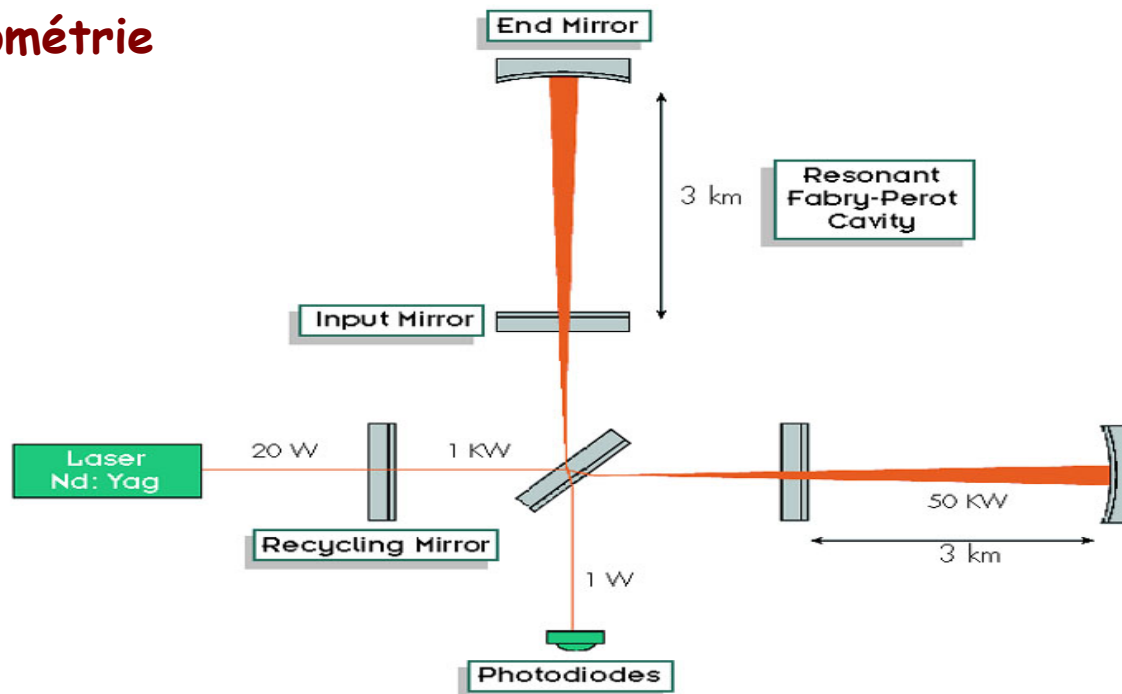
performance actuelle:  
 $\delta L \sim 10^{-15}$  m (noyau d'atome)

$$x = m \lambda / 2$$

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) !

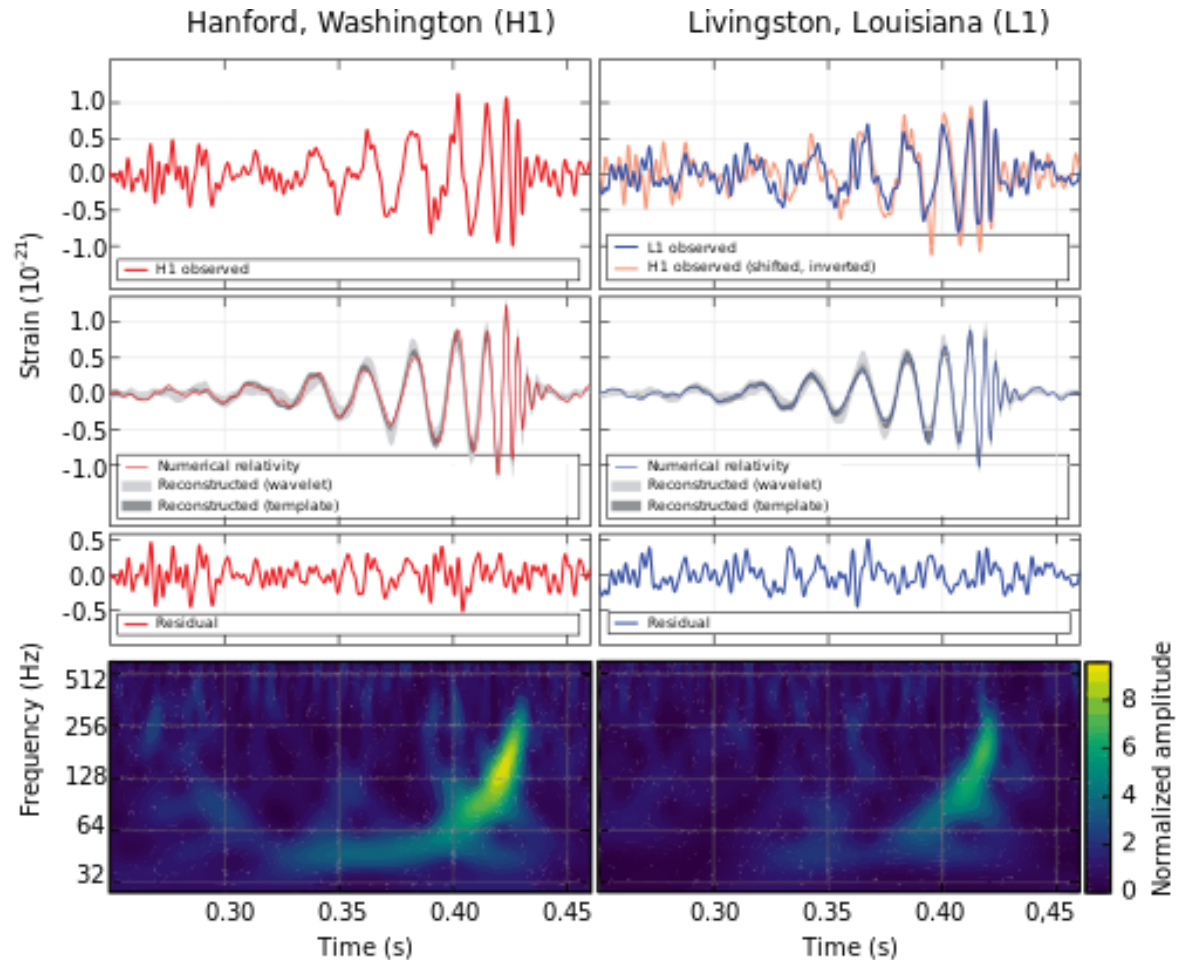
Systeme binaire  
de 2 trous noirs

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

=  $62 M_{\text{sun}}$  (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  $\sim 0.1 \text{ s}$  <sup>50</sup>

# Événement LIGO-VIRGO (14/08/17)



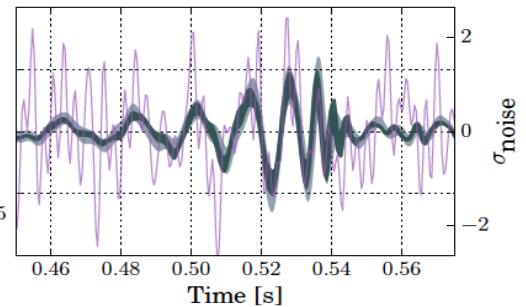
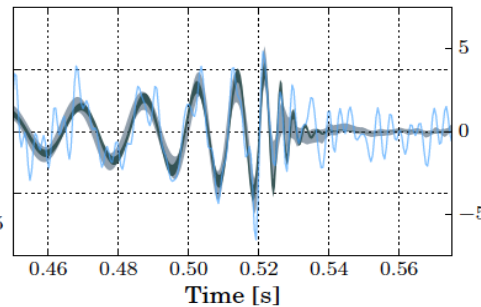
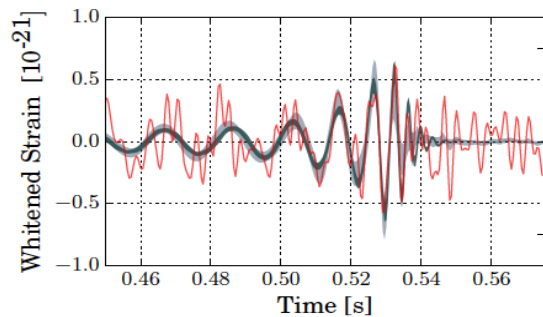
Observation à 3 détecteurs  
de GW 170814 (BH+BH)



LIGO Hanford

LIGO Livingston

Virgo



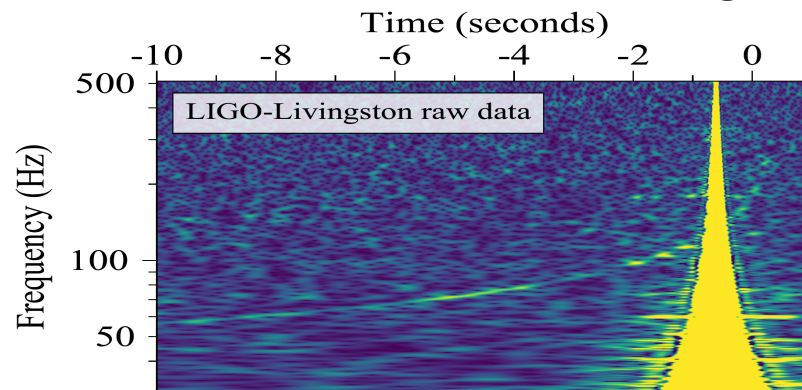
# Premier événement multi-messenger

(17/08/17) !

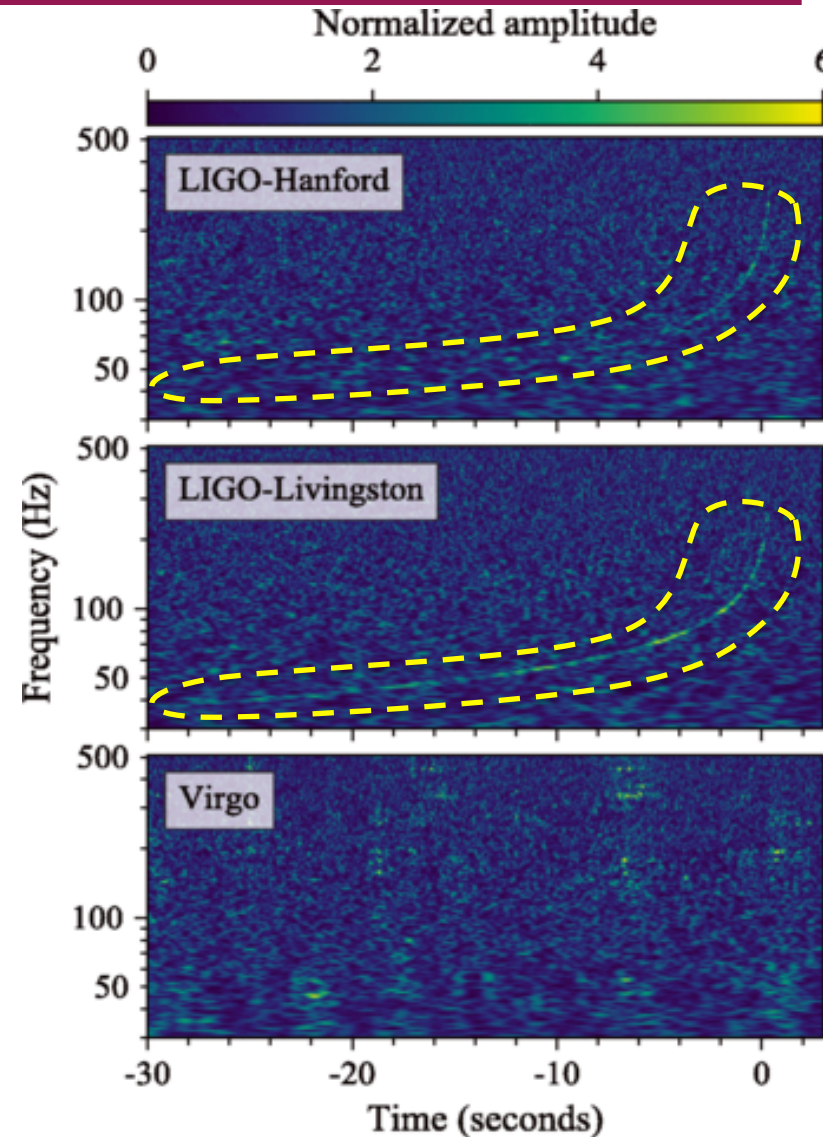
## GW 170817

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

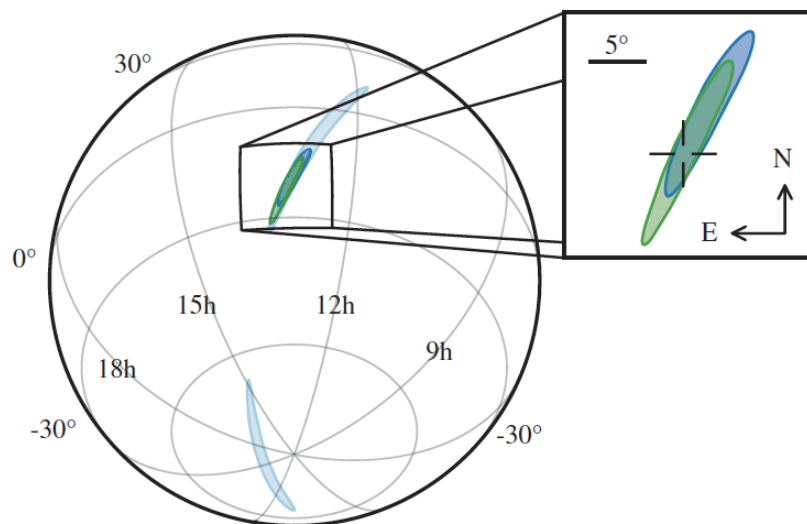
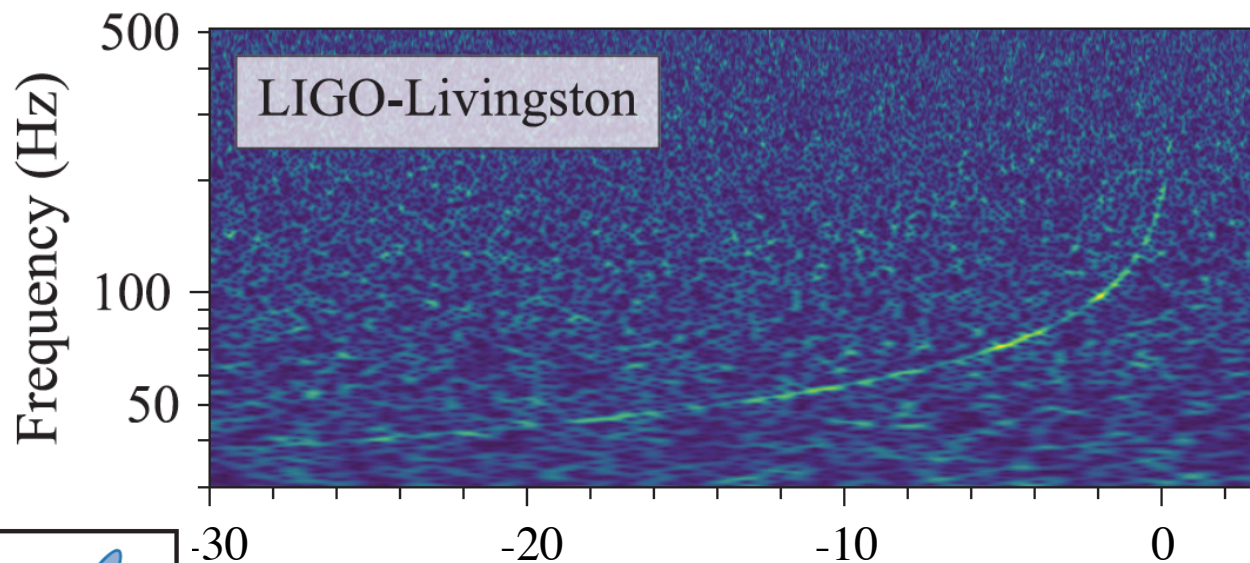
(17/08/17) !

Binaire d'étoiles à neutrons

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

Durée  $\sim 100$  s

$d \sim 40$  Mpc



Fonctionnement simultané  
LIGO (x2) + VIRGO

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



# Premier événement multi-messenger

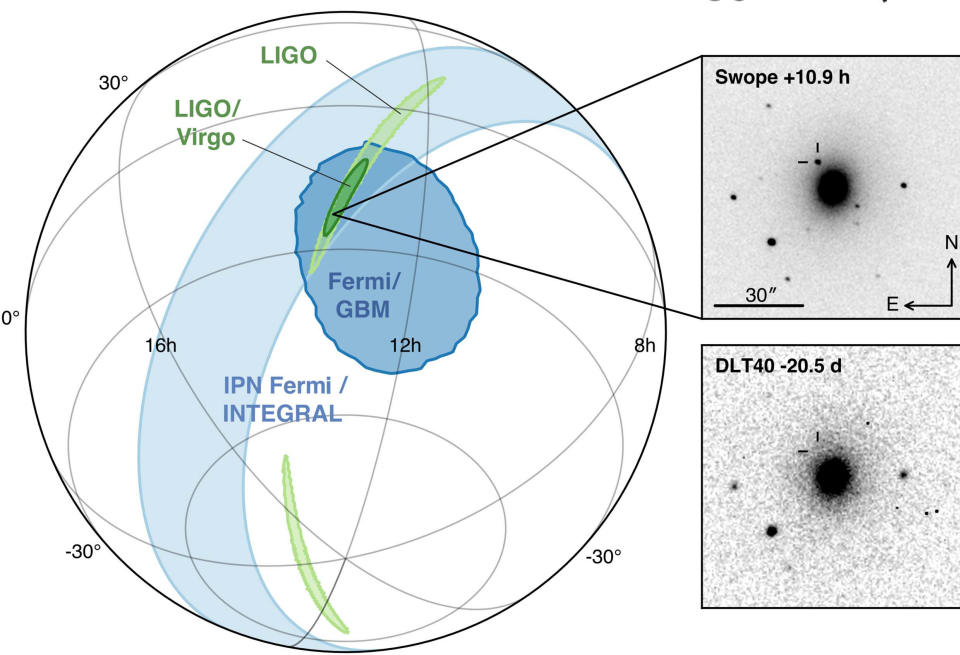
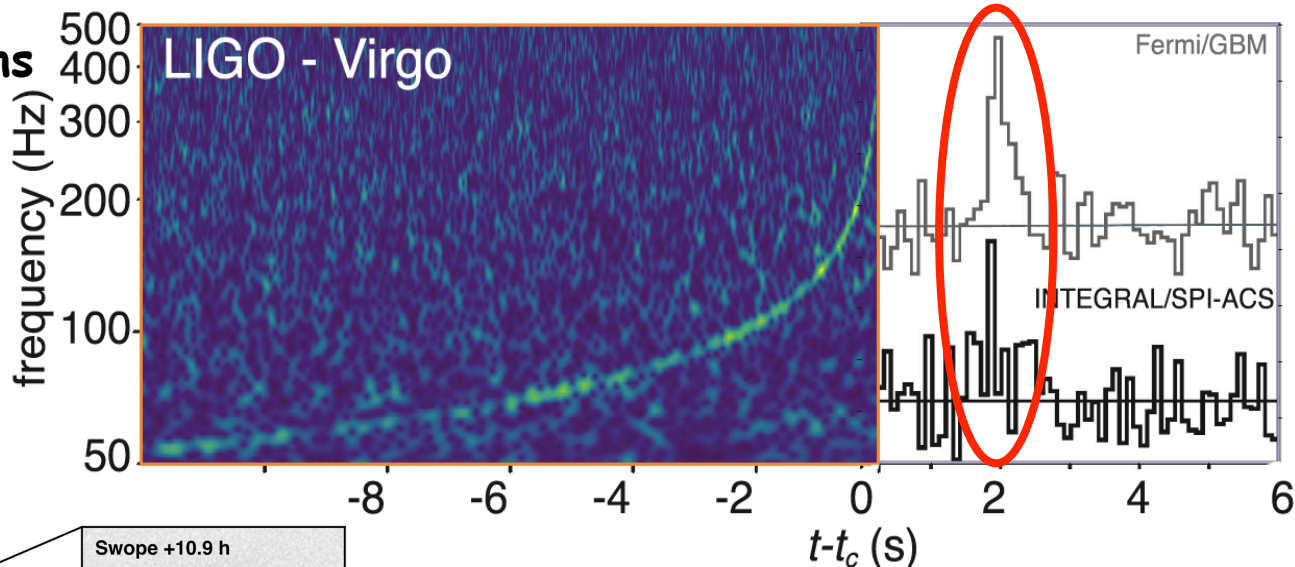
(17/08/17) !

Binaire d'étoiles à neutrons

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

Durée  $\sim 100$  s

$d \sim 40$  Mpc



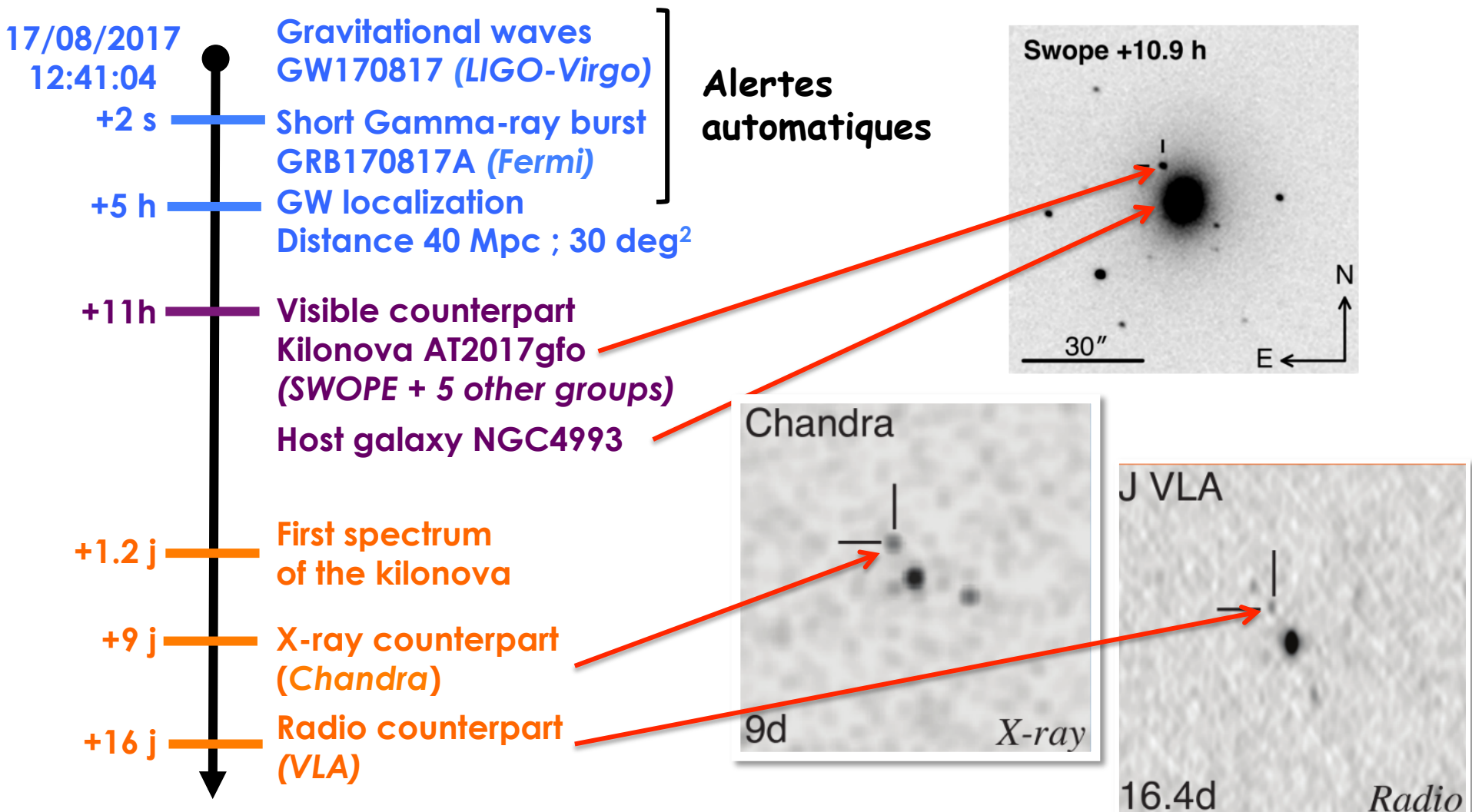
Détection gamma (indépendante)  
 $\Delta t = 1.7$  s ! Durée de quelques ms

+ 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) !



# Premier événement multi-messager

(17/08/17) !

## Ondes gravitationnelles

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



## Contrepartie $\gamma$

- ⇒ 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  $\gamma$  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

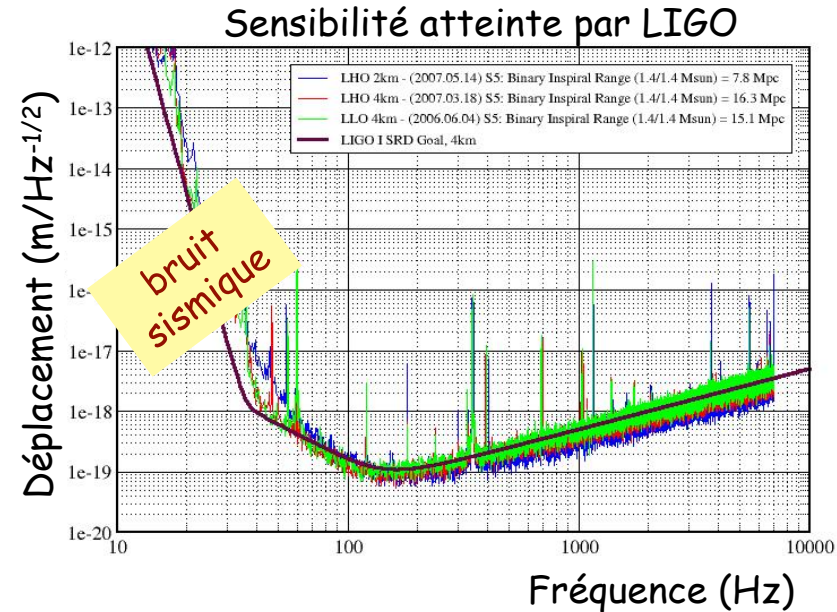
- aux astres les plus compacts
- aux phénomènes peu fréquents

pour couvrir

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

$\rightarrow$  freq. plus basse

$\rightarrow$  dans l'espace !

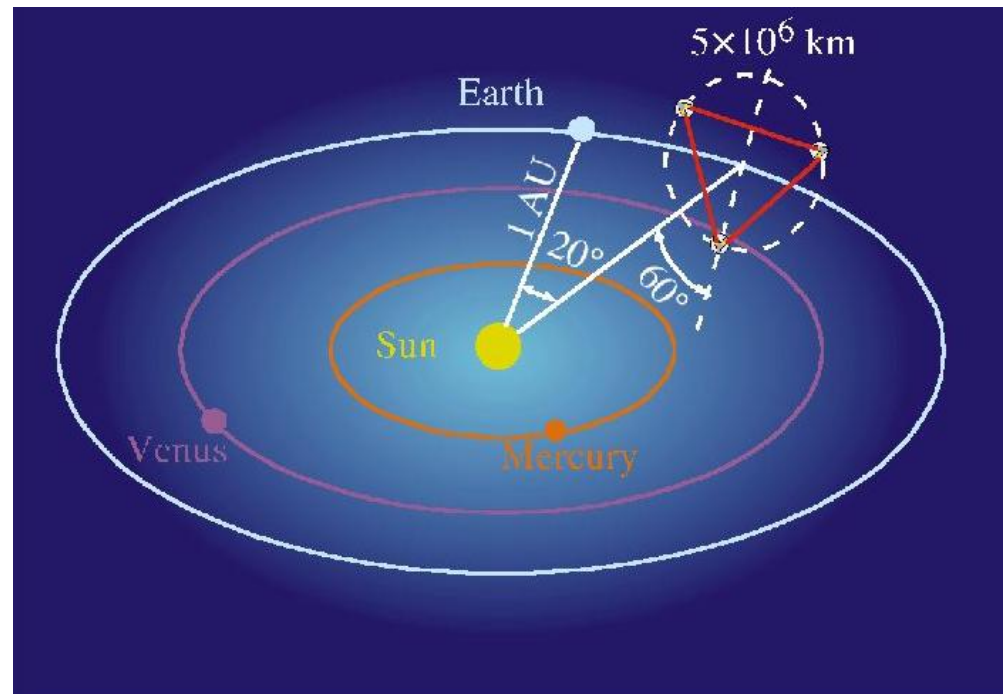
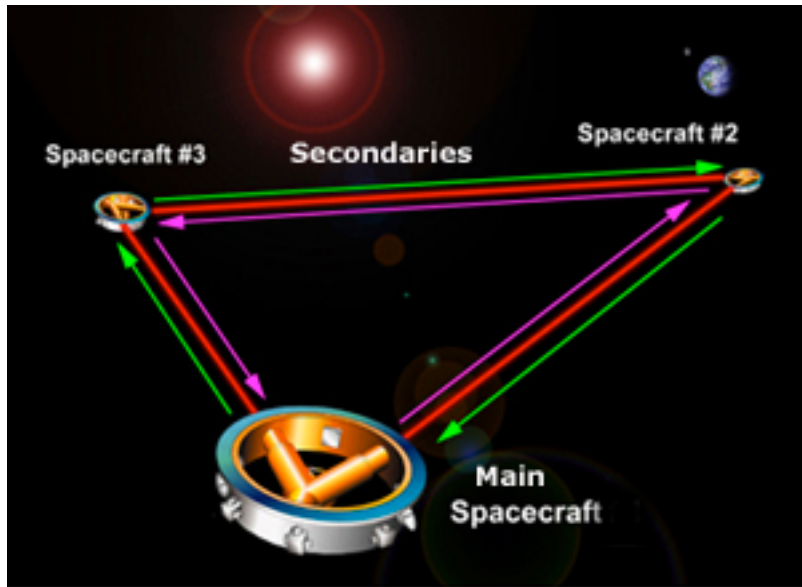




# LISA

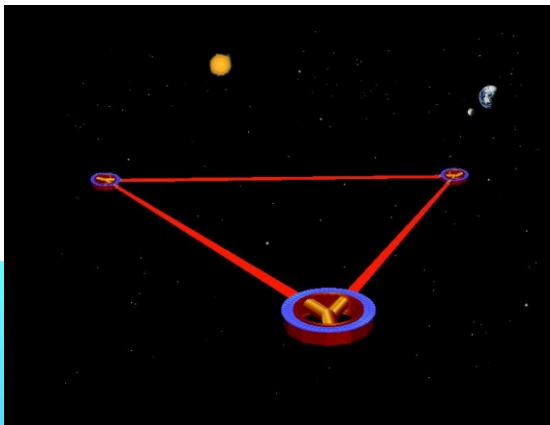
Selectionné par l'ESA en juillet 2017

L = 5 millions km

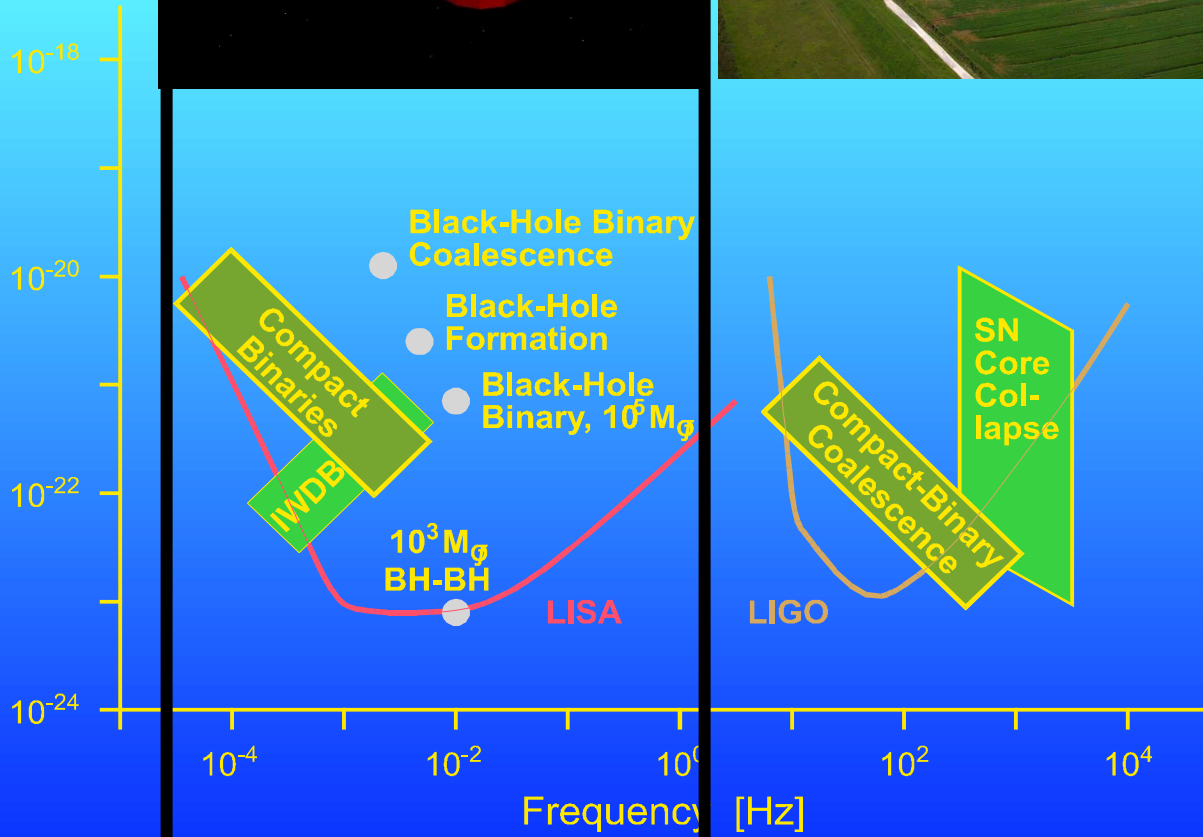


LISA pathfinder (terminé en juillet 2017):  
Démonstrateur de sensibilité (masses tests en chute libre, pour LISA)

À suivre...



Strain  $h$



SCIENCE  
OUVERTE

Seuil



NATHALIE PALANQUE-DELABROUILLE  
JACQUES DELABROUILLE

# Les nouveaux messagers du cosmos

Prix du livre  
d'astronomie  
2012



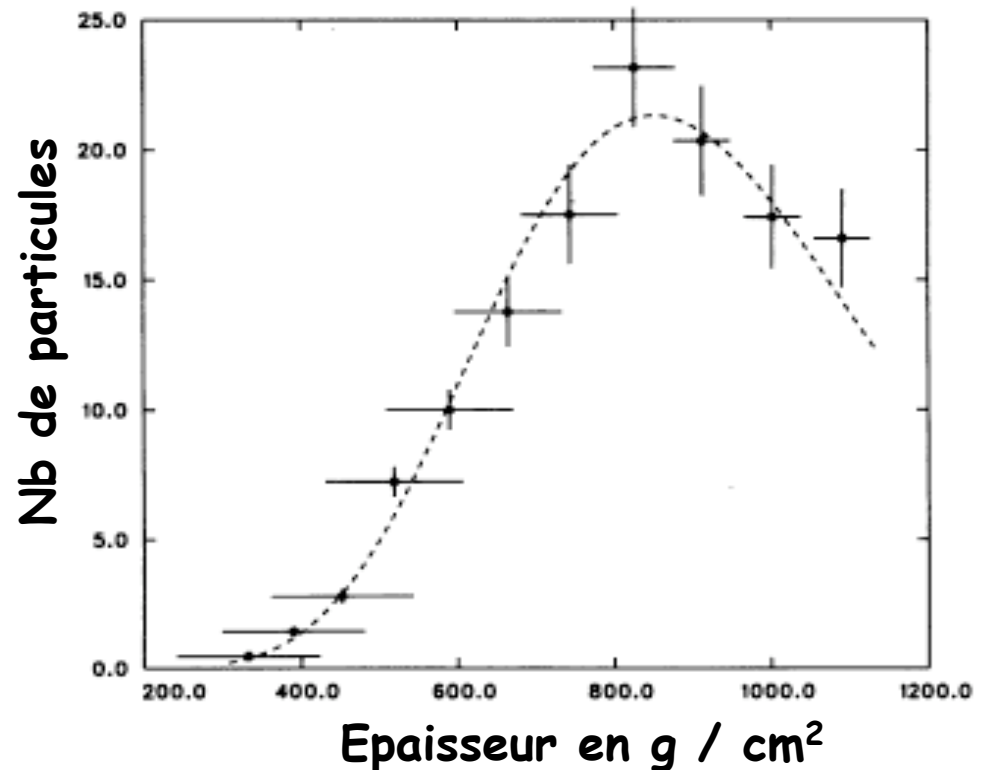
# Techniques de détection

**Energie:** largeur de la gerbe

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

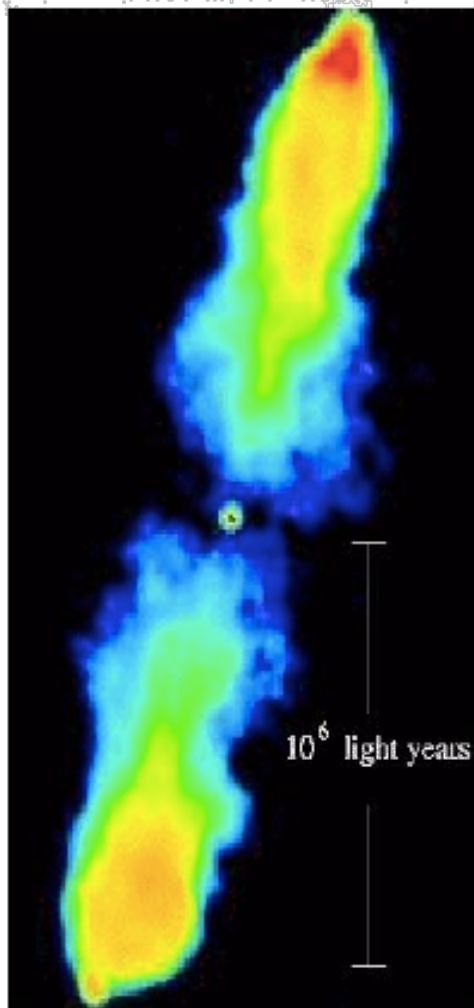
$$E_{em} = (2 \text{ MeV} / \text{g} \cdot \text{cm}^{-2}) \int N_e(X) dX$$

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

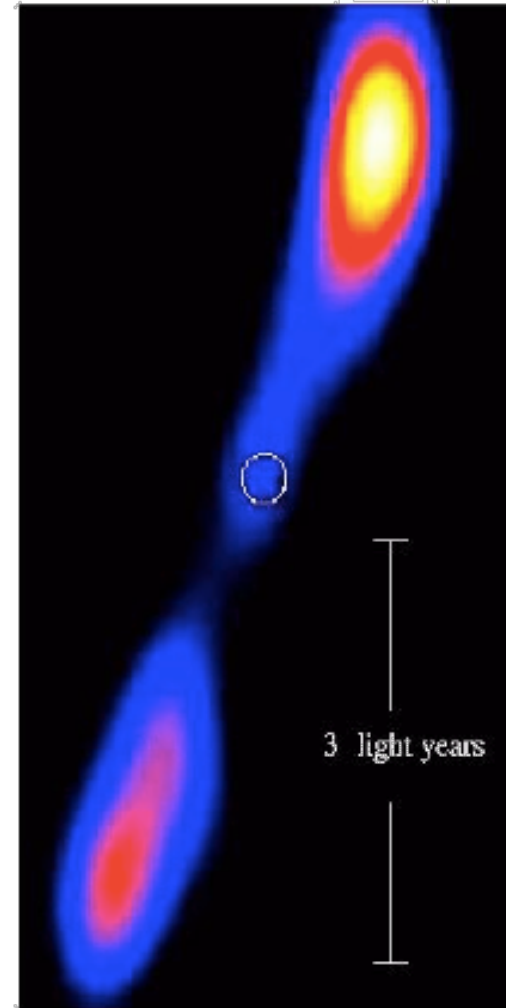


# Quasars et Microquasars

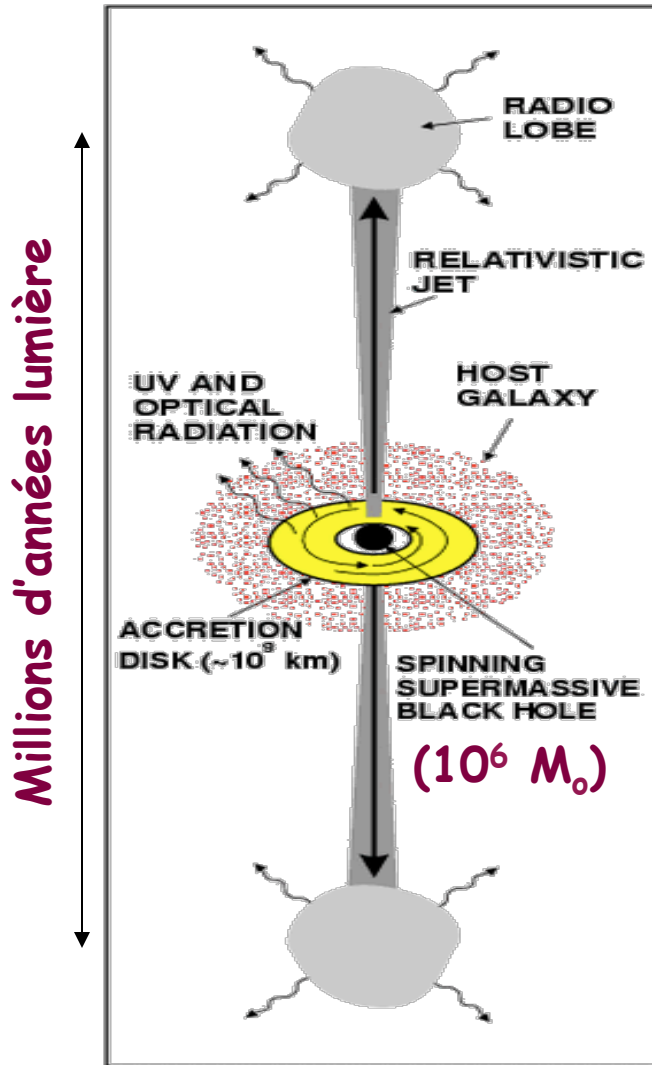
QUASAR 3C 223



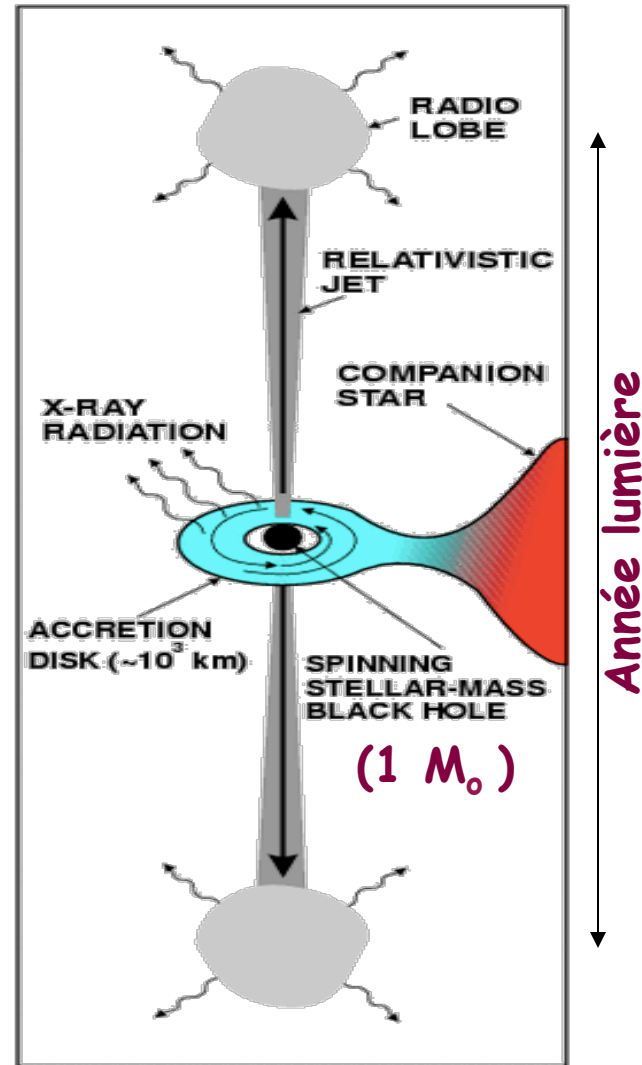
MICROQUASAR 1E1740.7-2942



# QUASAR



# MICROQUASAR

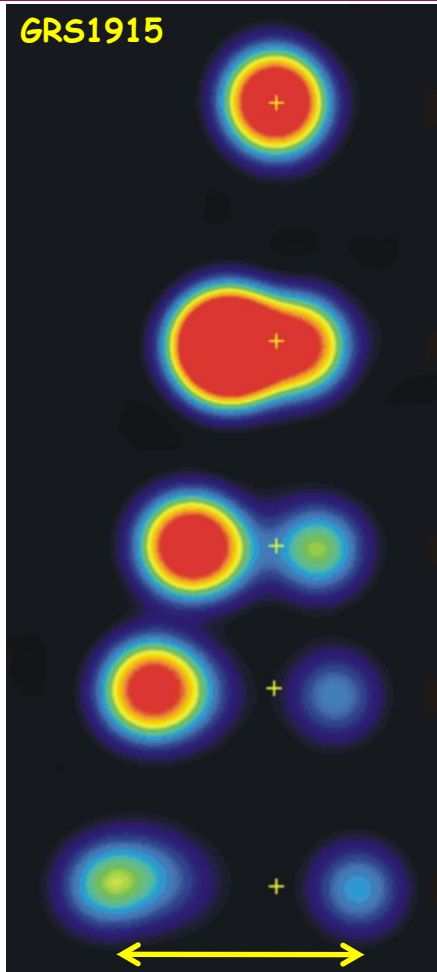


$$R \propto M_{BH}$$

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

Mirabel & Rodriguez

# Déplacements supraluminiques !?



18 mars  
1994

27 mars

3 avril

9 avril

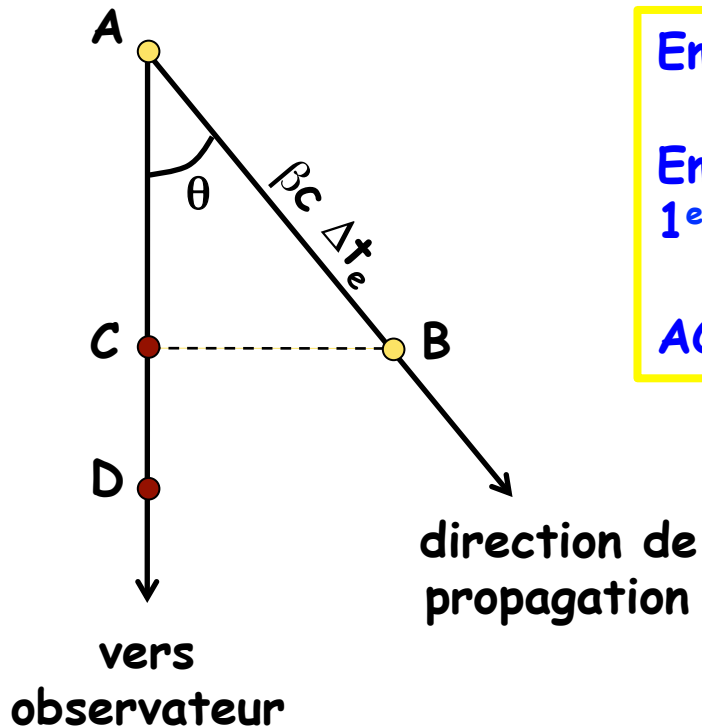
16 avril

1 mois

$10^4$  u.a. = 2 mois lumière



# Déplacements supraluminiques !?



Emission du 1<sup>er</sup> photon en A

Emission du 2<sup>nd</sup> photon en B ( $AB = \beta c \Delta t_e$ )  
1<sup>er</sup> photon est alors en D ( $AD = c \Delta t_e$ )

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

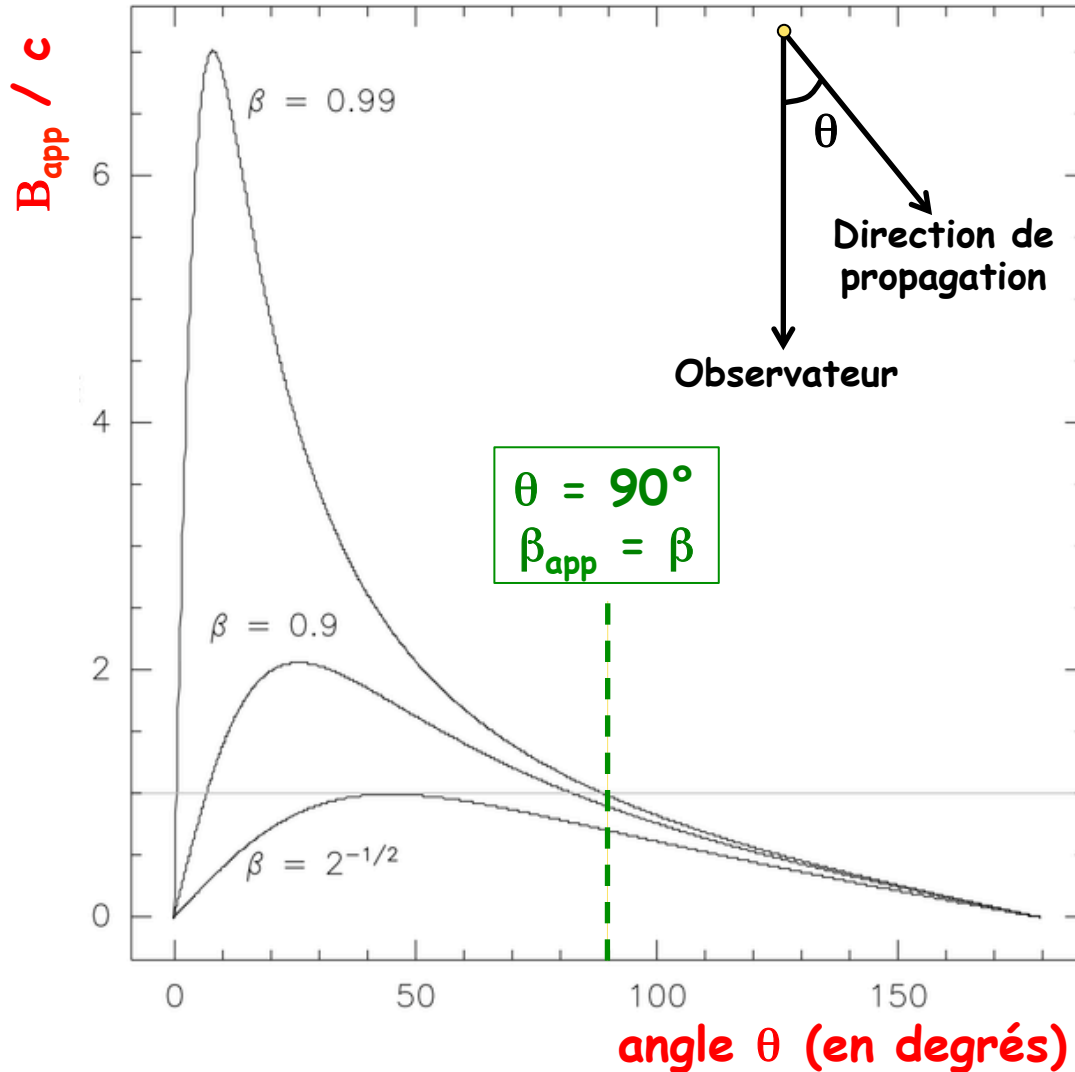
Séparation en projection sur le ciel:  
 $CB = AB \sin \theta = \beta c \Delta t_e \sin \theta$

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  
( $\theta$  petit,  $\beta$  grand)

# Markarian 421 : blazar « voisin »

