



# Le GdR « PCHE »

ou comment structurer le domaine de  
l'Astrophysique des Hautes Energies en France

# Avril 2000 : le projet de création

Un tout nouveau Groupement de Recherche sur les Phénomènes Cosmiques de Haute Energie est proposé

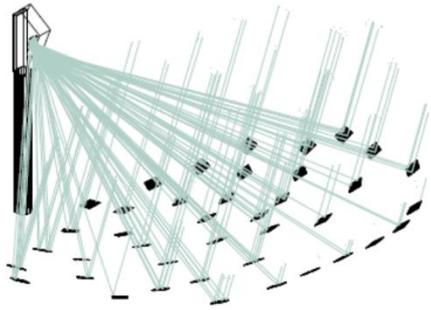
+ de 32 équipes et de 148 chercheurs au départ

**CNRS/IN2P3** : CENBG-Bordeaux, CSNSM-Orsay, CPPM-Marseille, ISN-Grenoble, IReS-Strasbourg et GPHE-Mulhouse, LAL-Orsay, LAPP-Annecy, LPNHE-P6&7, LPNHE-X, PCC-Collège de France

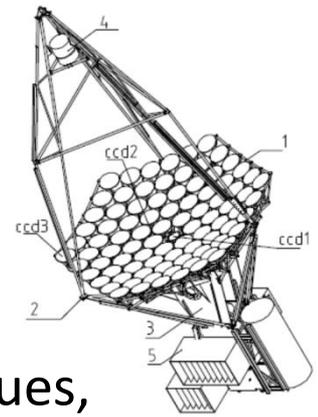
**CEA/DSM/DAPNIA** : SPP, SAp

**CNRS/INSU** : CESR-Toulouse, DARC-Meudon, DAEC-Meudon, DEMIRM, IAP, LAS, Obs. Marseille, Besançon, Bordeaux, Grenoble et Strasbourg

**CNRS/SPM** : CPT-X, CPT-Marseille, DARC-Meudon, LPT-LAPP-Annecy, LPT-Orsay, MPT-Tours, PMT-Montpellier



# Les acquis



- **50's** : radioastronomie, processus d'émissions non-thermiques, synchrotron de la nébuleuse du Crabe, gerbes de particules dans l'atmosphère
- **60's** : physique spatiale, 1<sup>ère</sup> source X « Sco-X1 », astronomie gamma spatiale avec OSOIII
- **70's** : missions spatiales gamma SAS-II et COS-B, avancées théoriques sur les sources radio, galaxies actives, SNR et pulsars
- **80's** : progrès détecteurs, regain d'intérêt pour les RC de très hautes énergies (CASA-MIA, expérience du Frejus), astronomie gamma au sol (Whipple aux US, ASGAT et THEMISTOCLE en France), détection de la nébuleuse du Crabe au TeV
- **90's** : moisson de résultats avec les missions spatiales SIGMA et COMPTON GRO en gamma → plus de 300 sources au MeV-GeV, bond dans la connaissance des sursauts gamma (satellites X Beppo-Sax et Rossi-XTE). Petit échantillon de sources confirmées au TeV par Whipple, HEGRA, CAT et CANGAROO. Expériences CELESTE et STACEE

# La situation en 2000

Plusieurs nouveaux projets à participation française apparaissent :

- **Satellites gamma** INTEGRAL et « GLAST », apportant meilleures sensibilité, résolution angulaire et résolution spectrale
- Grand réseau HESS en **astronomie gamma au sol**, dans le sillage de CAT et de HEGRA
- ANTARES, au vu des développements des expériences Baïkal et AMANDA, pour la **détection de neutrinos** cosmiques
- Observatoire « AUGER », au vu de l'énigme posée par les **rayons cosmiques d'énergies extrêmes** ( $> 10^{20}$  eV)

# La situation en 2000

Le domaine de l'Astrophysique des Hautes Energies prend de l'**ampleur**, au **carrefour** de communautés scientifiques bien distinctes : physique des particules, laboratoires spatiaux, astrophysique, physique théorique

Le domaine est **complexe** et demande la collaboration de divers spécialistes

Il est en **évolution** rapide, avec de nombreux engagements et la perspective de **retours scientifiques** multiples et notoires

D'où la nécessité d'**unir les efforts et compétences** de plusieurs communautés et instituts

Le GdR « Phénomènes Cosmiques de Haute Energie » est né,  
dans le cadre du programme interdisciplinaire « Astroparticules »  
du CNRS !

# Périmètre du GdR et enjeux scientifiques

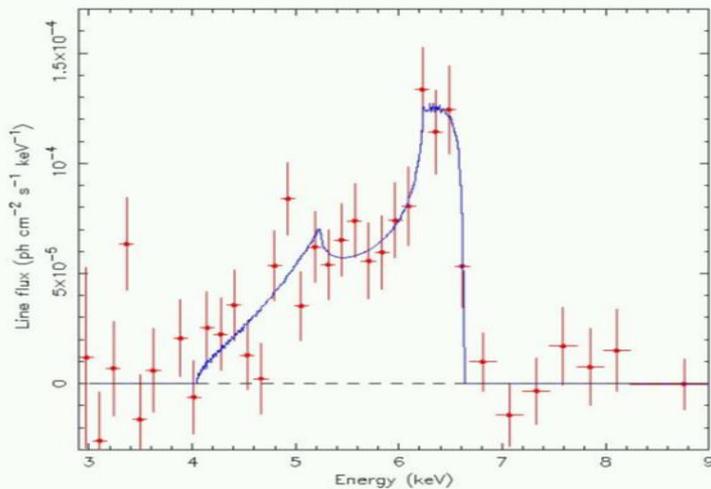
- Accrétion et environnement des objets compacts
- Jets astrophysiques (AGN et micro-quasars)
- Phénomènes explosifs
- Accélération de particules
- Rayonnement cosmique d'énergie extrême
- Astrophysique relativiste
- Particules cosmiques exotiques

# Les enjeux scientifiques

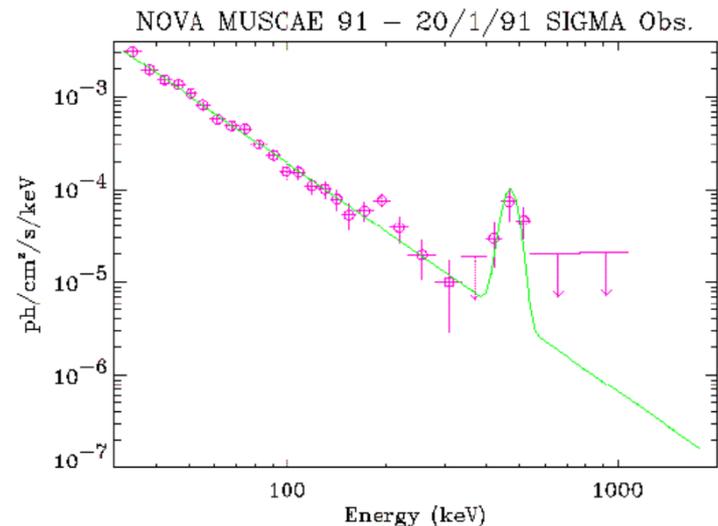
- **Accrétion et environnement des objets compacts**

Naines blanches, étoiles à neutrons et trous noirs

Analyse des raies du fer autour d'un AGN avec ASCA. Asymétrie par décalage gravitationnel et Doppler relativiste à  $3-10 R_s$  (1995). A tester avec Chandra et XMM



Spectre de nova X à trou noir avec Sigma. Possible raie d'annihilation  $e^+e^-$  à 473 keV, décalage gravitationnel par TN de  $3.1 M_\odot$  (1996). Tests TN et régimes d'accrétion



# Les enjeux scientifiques

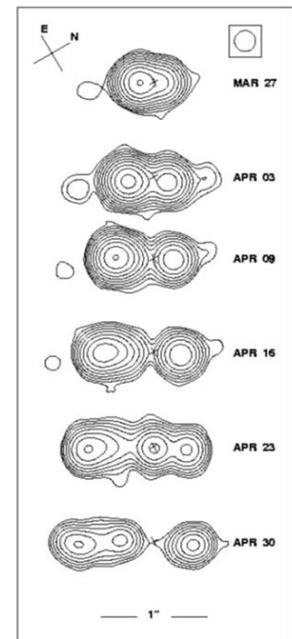
- **Jets astrophysiques des AGN et des micro-quasars)**

Les AGN de type « blazars » viennent d'être identifiés comme sources détectées au TeV

Les jets de microquasars apparaissent comme des modèles réduits des jets d'AGN bien cartographiés depuis les 80's

Modèles de jets, formation, collimation, instabilités, chocs ... à l'origine de l'accélération des particules et des rayonnements

Vitesses superluminiques  
dans le microquasar  
GRS 1915+115 (1994)



# Les enjeux scientifiques

- **Phénomènes explosifs**

Phases explosives de divers types d'étoiles (novae, supernovae, sursauts gamma) et leurs conséquences (restes de SN).

Emission gamma du  $^{44}\text{Ti}$  à 1.15 MeV aperçue par COMPTEL, à étudier comme traceur d'anciennes SN avec INTEGRAL.

Catalogue EGRET  $\rightarrow$   $\sim 10\%$  de  $E_{\text{SN}}$  est dans les particules accélérées  $\rightarrow$  SNR forts émetteurs gamma : décroissance des  $\pi_0$  issus des interactions p-p et raies gamma nucléaires à explorer

# Les enjeux scientifiques

- **Phénomènes explosifs**

Rebondissement dans l'énigme des sursauts gamma.

Identification des GRB courts ( $\sim 0.1$  s) et longs ( $\sim 10$  s).

Succès du modèle de la boule de feu (1992)

Nombreuses questions ouvertes : collimation ? Processus leptonique versus hadronique ? Émission d'UHERC et neutrinos (chocs internes ou externes) ?

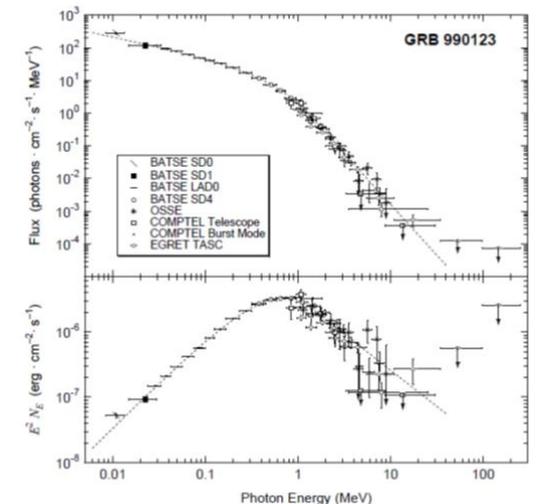
Origine des GRB ??

Tests par étude multi-spectrale des afterglows

Coalescence et émission d'O.G. probable

(VIRGO)

Flux et puissance de GRB 990123  
avec Compton GRO (1999)



# Les enjeux scientifiques

- **Accélération de particules**

Les processus de Fermi doivent être considérés dans un régime d'efficacité extrême pour atteindre les énergies ultimes

Nécessite des développements théoriques nouveaux :  
processus de Fermi dans chocs relativistes ou perturbations  
MHD relativistes,  
ou nouveaux processus d'accélération à imaginer

# Les enjeux scientifiques

- **Rayonnement cosmique d'énergie extrême**

Recherche de l'origine des rayons cosmiques aux énergies extrêmes par AUGER et les projets de télescopes à neutrinos

Enigme des UHECR d'origine extragalactique : coupure GZK au-delà de  $5 \times 10^{19}$  eV par interaction des  $p^+$  avec le fond cosmologique à 2.7K. Aucun  $p^+$  d'énergie supérieure ne peut provenir de plus de 100 Mpc (1994). Quelle origine ?

→ AGN et sources radio extragalactiques, GRB, nébuleuses de pulsars, défauts topologiques, grandes structures cosmologiques ?

# Les enjeux scientifiques

- **Astrophysique relativiste**

Un réel besoin d'avancées théoriques importantes

Electrodynamique des trous noirs en rotation, en lien avec leur environnement

Recherche d'une description self-consistante de la magnétosphère des pulsars, et modélisation des vents et des nébuleuses associées.

Performances en terme d'accélération de particules

Développement de l'étude des plasmas relativistes, encore peu étudiés mais indispensables pour décrire les PCHE : instabilités, chocs, perturbations magnétiques, accélération de particules en régime relativiste ...

Rayonnement des défauts topologiques ?

# Les enjeux scientifiques

- **Particules cosmiques exotiques**

Les théories de supersymétrie prédisent de nouvelles particules, dont le neutralino

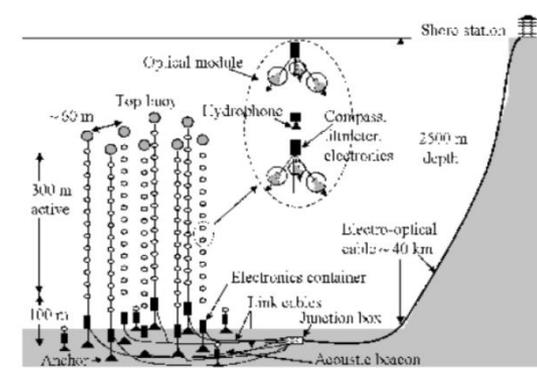
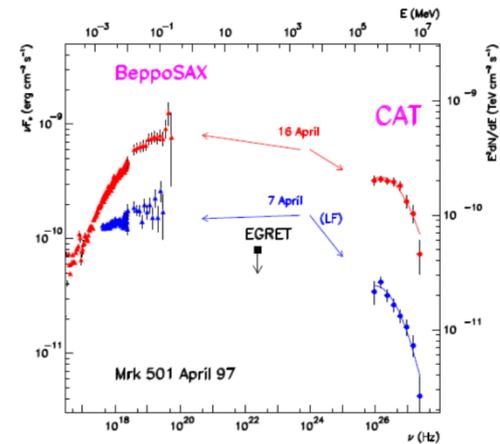
Neutralinos d'origine cosmologique = candidats naturels pour expliquer la matière cachée de l'univers

S'annihilent mutuellement si assez concentrées, produisant gammas et neutrinos dont le spectre peut être prédit

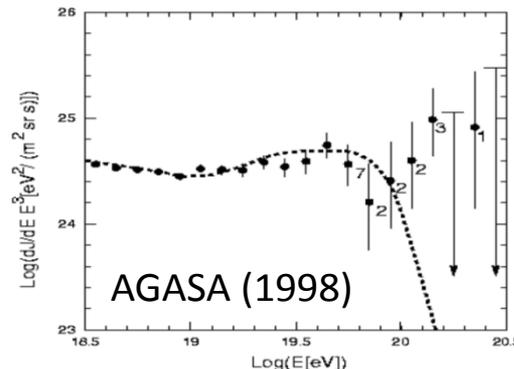
Objectif majeur de détection des neutrinos des WIMPs par les futurs télescopes à neutrinos comme ANTARES, ou des antiparticules par AMS

Recherche de rayonnement gamma provenant de concentrations possibles de neutralinos par le projet HESS

# Instruments et perspectives du GdR



- Astronomie gamma en satellite et au sol : INTEGRAL, GLAST, HESS
- Suivis multi-longueurs d'onde
- Astronomie des neutrinos : ANTARES, avec des défis techniques considérables
- Composition des rayons cosmiques et antiparticules : AMS
- Gerbes cosmiques d'énergies extrêmes : observatoire AUGER
- Puis, détecteur d'ondes gravit., Virgo



# Feuille de route du GdR « PCHE » et son devenir

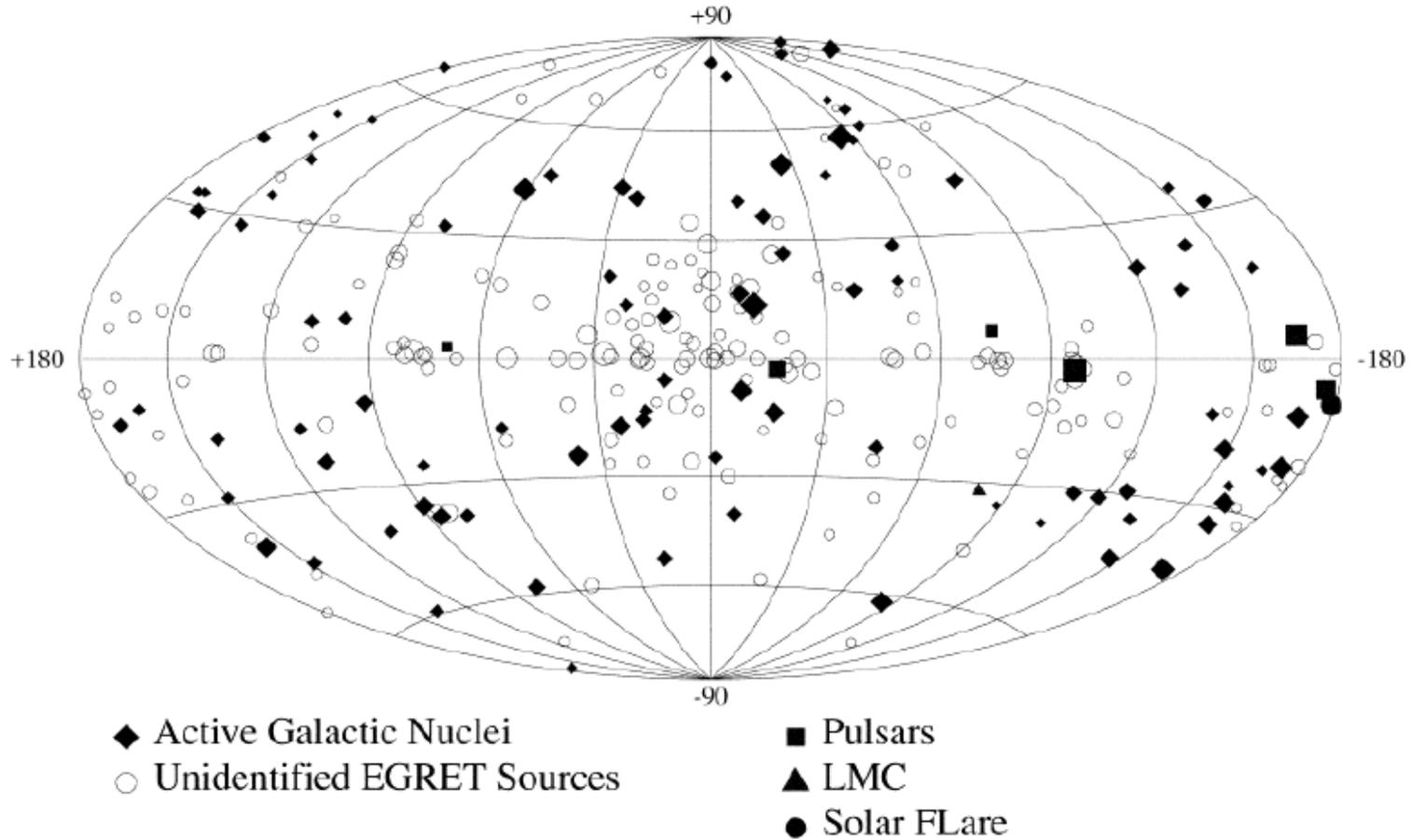
- Soutien à la communauté HE
  - Suivi des expériences et évaluation
  - Définition des stratégies d'observation
  - Organisation d'ateliers et écoles, animation scientifique du domaine
  - Prospective
- 
- En 2003 : plus de 300 chercheurs en France
  - GdR maintenu pendant 12 ans, renouvelé deux fois
- 
- Transformé en Programme National « PNHE » en 2012, structuré autour des thèmes :  
univers comme laboratoire,  
objets compacts et environnement,  
phénomènes explosifs,  
rayons cosmiques,  
nouveaux messagers



# La science en marche

- Des grandes questions fondamentales (et difficiles) énoncées dès 2000, beaucoup sont bien mieux cernées mais encore ouvertes : origine des **rayons cosmiques** et identification de sources, nature de la **matière noire**, influences réciproques entre **objets compacts et environnement**, pleine compréhension des **phénomènes explosifs**
- De nombreuses réponses plus spécifiques, vaste enrichissement des connaissances, maturité du domaine, nouvelles questions
- **Plusieurs grandes avancées remarquables** : détection directe d'ondes gravitationnelles et preuve de l'existence des trous noirs, confirmation de la coupure GZK, découverte de trous noirs de masse intermédiaire, obtention de données nombreuses et de qualité aux hautes et très hautes énergies et d'échantillons statistiques ...

# Sources ponctuelles du 3<sup>ème</sup> catalogue d'EGRET



# Résultats de Fermi

10 keV – 300 GeV

National Aeronautics and Space Administration



## FERMI'S GAMMA-RAY COSMOS

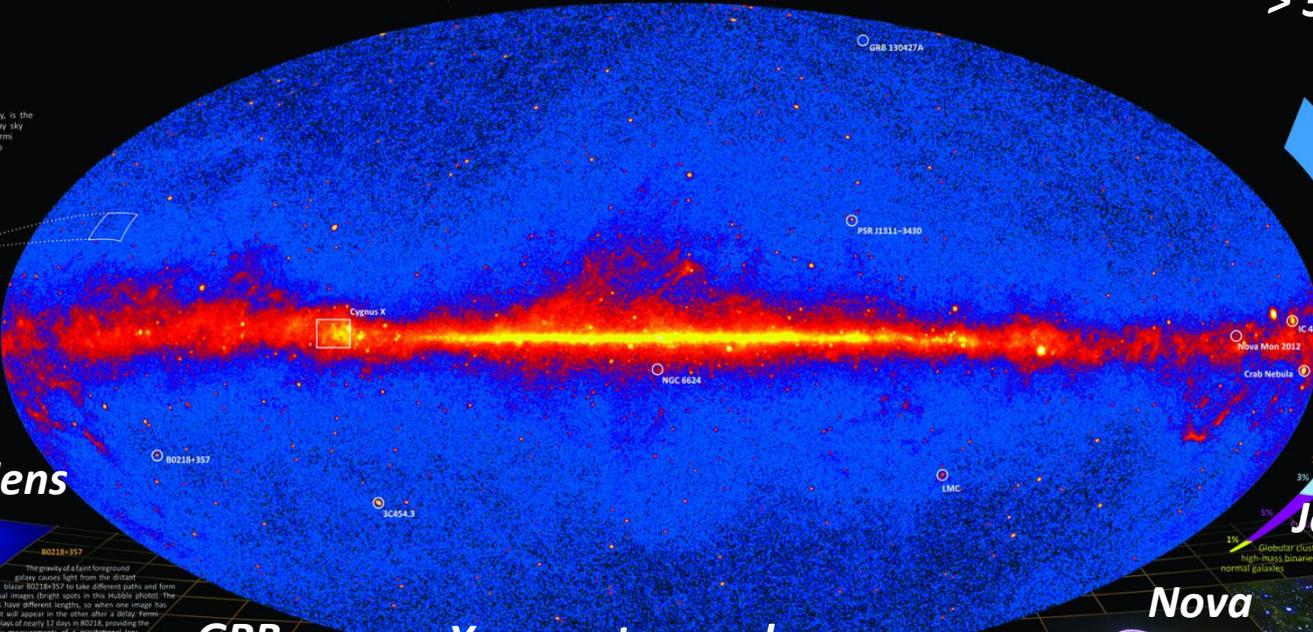
> 3000 sources

### Fermi Six-year Sky Map

This all-sky view, centered on our Milky Way Galaxy, is the deepest and best-resolved portrait of the gamma-ray sky to date. It incorporates observations by NASA's Fermi Gamma-ray Space Telescope from August 2008 to August 2014 at energies greater than 1 billion electronvolts (GeV). For comparison, the energy of visible light falls between 2 and 3 electronvolts. Lighter shades indicate stronger emission.

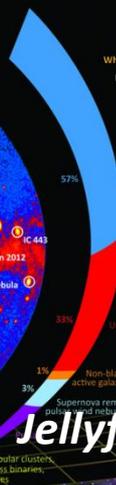
NASA/DOE/Fermi LAT Collaboration

The gamma-ray sky isn't dark even far away from bright sources. Some of this radiation arrives close to home, when high-velocity protons (cosmic rays) interact with interstellar gas and starlight. Much of the emission originates far beyond our galaxy and is thought to be the collective glow of sources too faint to detect directly.



### What Has Fermi Found?

Fermi's Large Area Telescope (LAT) has cataloged more than 3,000 discrete gamma-ray sources. The graph at left shows a breakdown of these discoveries. Blazars – active galaxies powered by supermassive black holes – constitute the single largest class. Nearly a third of sources are unassociated with objects seen at any other wavelength, and their natures remain unknown.



### Gravitational lens



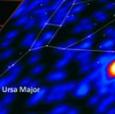
The gravity of a faint foreground galaxy causes light from the distant blazar B0218+357 to take different paths and form dual images, bright spots in thisubble galaxy. The paths have different lengths, so when one image has a flare, it will appear in the other after a delay. Fermi detected delays of nearly 12 days in B0218, providing the first gamma-ray measurements of a gravitational lens.

**GRB**  
On April 27, 2013, a blast of light from a dying star in a distant galaxy became the focus of attention around the world. The explosion, known as a gamma-ray burst and designated GRB 130427A, was detected by Fermi for about 20 hours. The burst included a 95 GeV gamma ray, the most energetic light yet detected from a GRB.

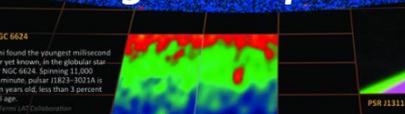
**Cygnus X**  
Monster stars in a region called Cygnus X carve out cavities in the interstellar gas. The stars' powerful outflows collide, forming shock waves that can accelerate protons to high energies. These particles eventually "tilde" gas or starlight, producing gamma rays.

**3C 454.3**  
In December 2009, 3C 454.3 was briefly the brightest object in the gamma-ray sky. The gamma rays come from a jet powered by matter falling toward the galaxy's supermassive black hole. In this case, we're looking almost right down the barrel of the jet, which means the blazar can be especially bright despite lying 7 billion light-years away.

### GRB



### Youngest ms pulsar



Fermi found the youngest millisecond pulsar yet known in the globular star cluster NGC 6624. Spinning 11,000 times a minute, pulsar PSR 11311-3430 is 25 million years old, less than 3 percent the typical age.

**LMC**  
Fermi sees gamma rays from star-forming regions like 3D Doradus in the Large Magellanic Cloud (LMC). More stars are forming in this "star factory" than in any similar location in the Milky Way, leading to intense gamma-ray emission.

**Fermi Bubbles**  
Fermi data revealed vast gamma-ray bubbles extending tens of thousands of light years from the Milky Way's plane. The Fermi Bubbles may be related to past activity of the supermassive black hole at our galaxy's heart.

### Nova

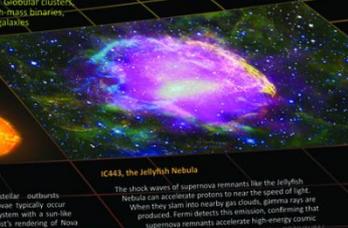


Fermi observations prove that stellar outbursts called novae and gamma rays, though typically occur in different systems with a sun-like star, Fermi's renditions of Nova gamma rays likely arise from colliding shock waves in the rapidly expanding gas cloud.

**Crab Nebula**  
The Crab Nebula, a young supernova remnant, is a complex of particles, stripped material, and magnetic fields. Fermi's observations of the Crab Nebula provide a new perspective on the physical processes that accelerate particles to account for the blazar, scientists say. Electrons near the pulsar must be accelerated to energies a thousand billion (10<sup>11</sup>) times greater than visible light.

**IC 443, the Jellyfish Nebula**  
The shock waves of supernova remnants like the Jellyfish Nebula can accelerate protons to near the speed of light. When they slam into nearby gas clouds, gamma rays are produced. Fermi detects this emission, confirming that supernova remnants accelerate high-energy cosmic rays.

### Jellyfish nebula



**Black widow pulsar**  
Gamma-ray pulsar PSR 11311-3430 and its slowly evaporating companion are shown in this artist's rendering. The material often blocks the pulsar's radio beam.

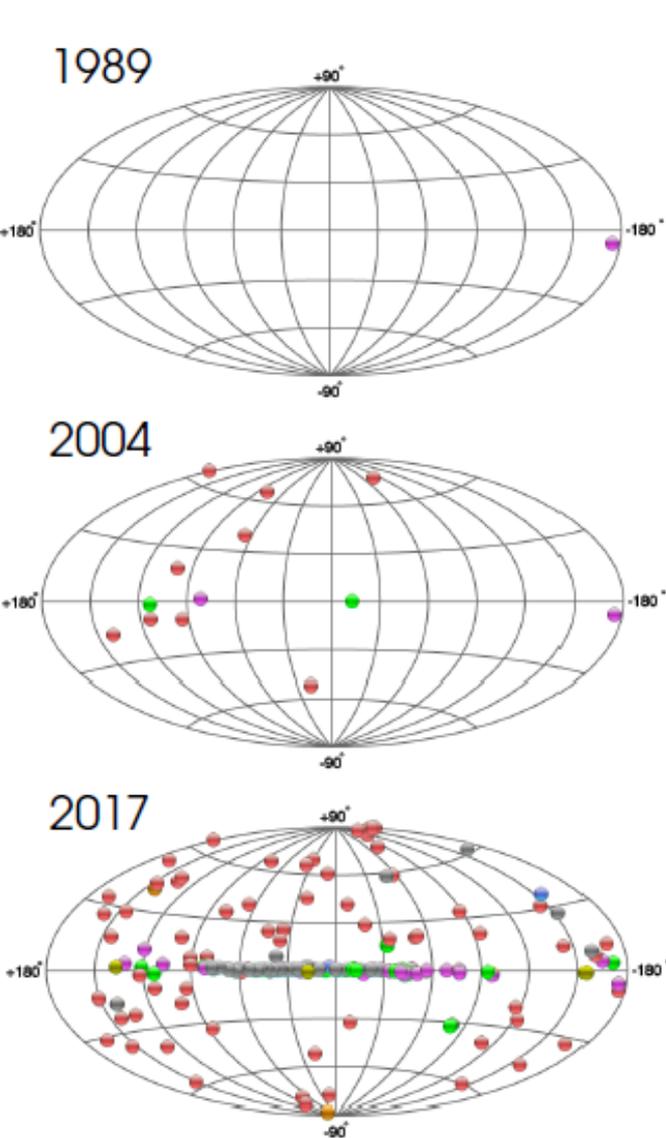
**Galactic bubbles**  
Galactic plane emission removed for clarity. The Fermi Bubbles may be related to past activity of the supermassive black hole at our galaxy's heart.

**Galactic bubbles**  
Galactic plane emission removed for clarity. The Fermi Bubbles may be related to past activity of the supermassive black hole at our galaxy's heart.

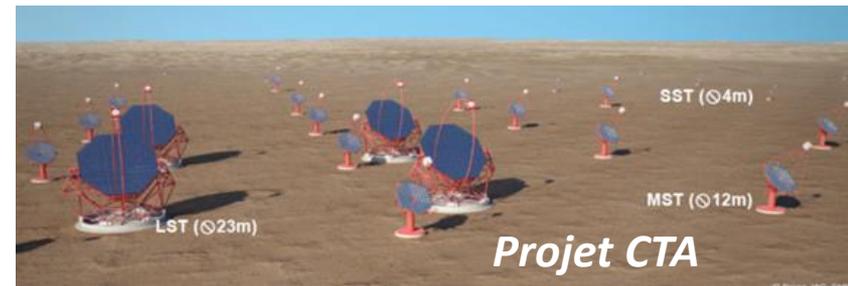
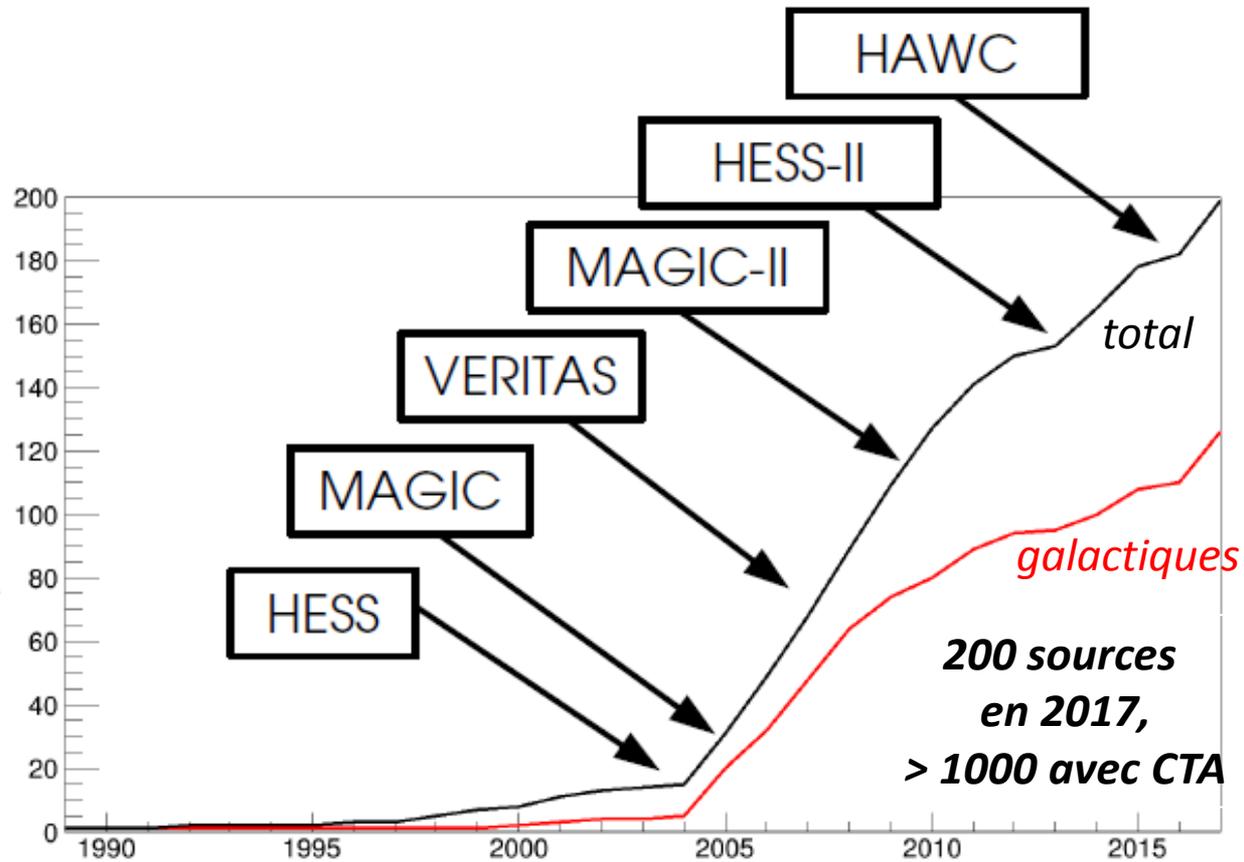


# Résultats aux très hautes énergies

50 GeV – 20 TeV



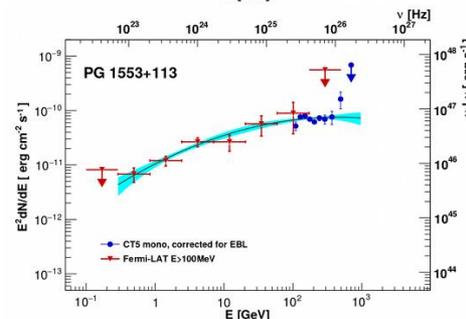
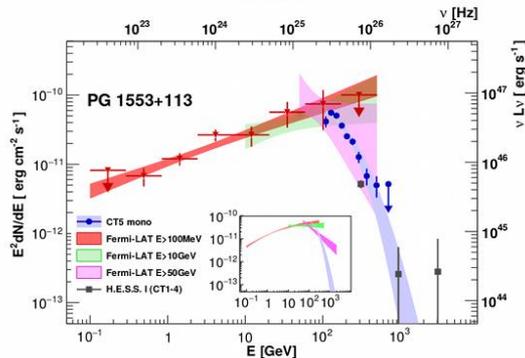
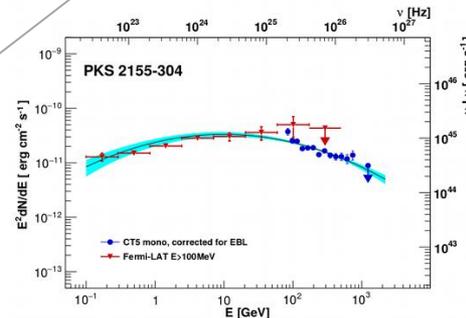
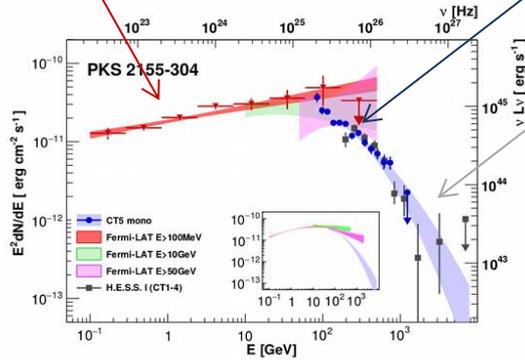
TeVCat



# Astronomie gamma aux HE et VHE



Physique des Noyaux Actifs de Galaxies (AGN) : HESS complet + Fermi fournissent la distribution en énergie spectrale autour du pic d'émission aux VHE



→ Fortes contraintes sur les modèles radiatifs  
Processus leptoniques versus hadroniques

# Environnement des TN

## Le Centre Galactique :

- Mise sur le ciel de Gravity : détection d'un sursaut de Sgr A\*, caractérisation d'étoiles
- Orbites d'étoiles observées, et simulées avec code GYOTO en champ fort
- Présence d'hydrogène moléculaire très chaud dans le parsec central
- Pulsations de l'étoile GCIRS 7: datation de l'amas stellaire nucléaire

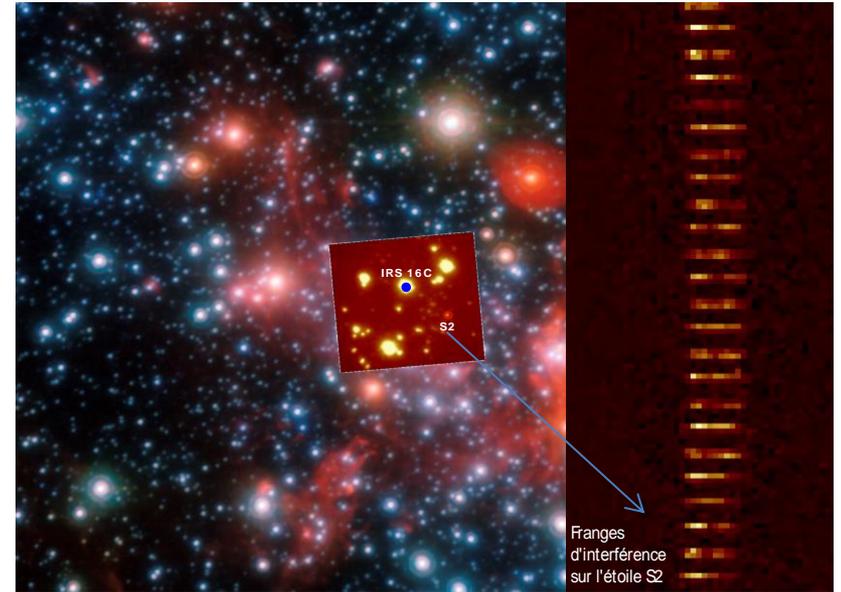
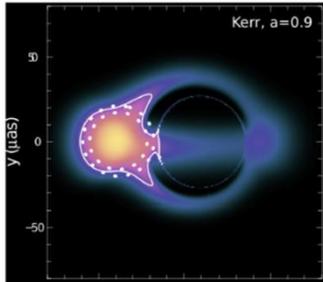
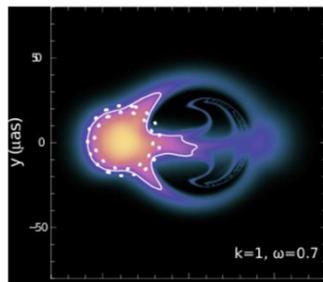


Image NACO 30''x30'' en H, K L et image par caméra de Gravity au centre en bande H  
(Clénet et al, 2017)

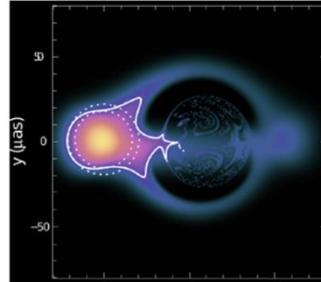
Kerr black hole  
 $a/M = 0.9$   
 $J/M^2 = 0.9$



boson star  
 $k = 1, \omega = 0.7 m/h$   
 $J/M^2 \approx 0.9$

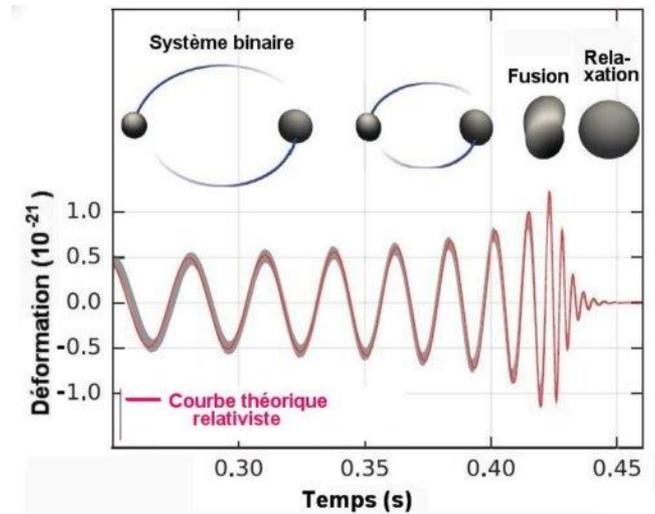
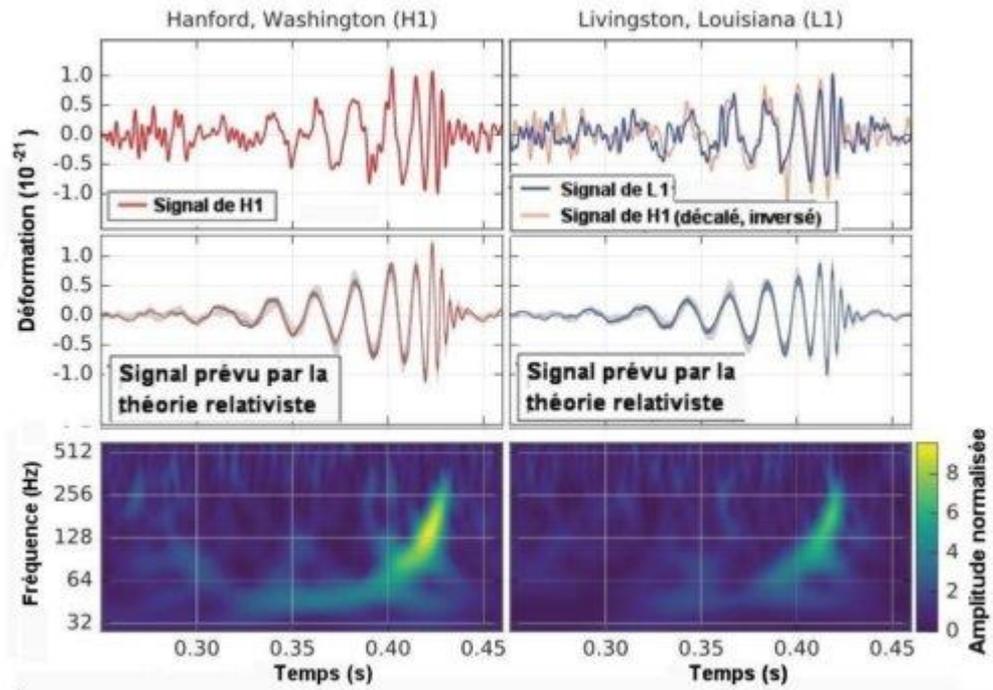


hairy black hole  
 $a/M = 0.9$   
 $J/M^2 = 0.9$

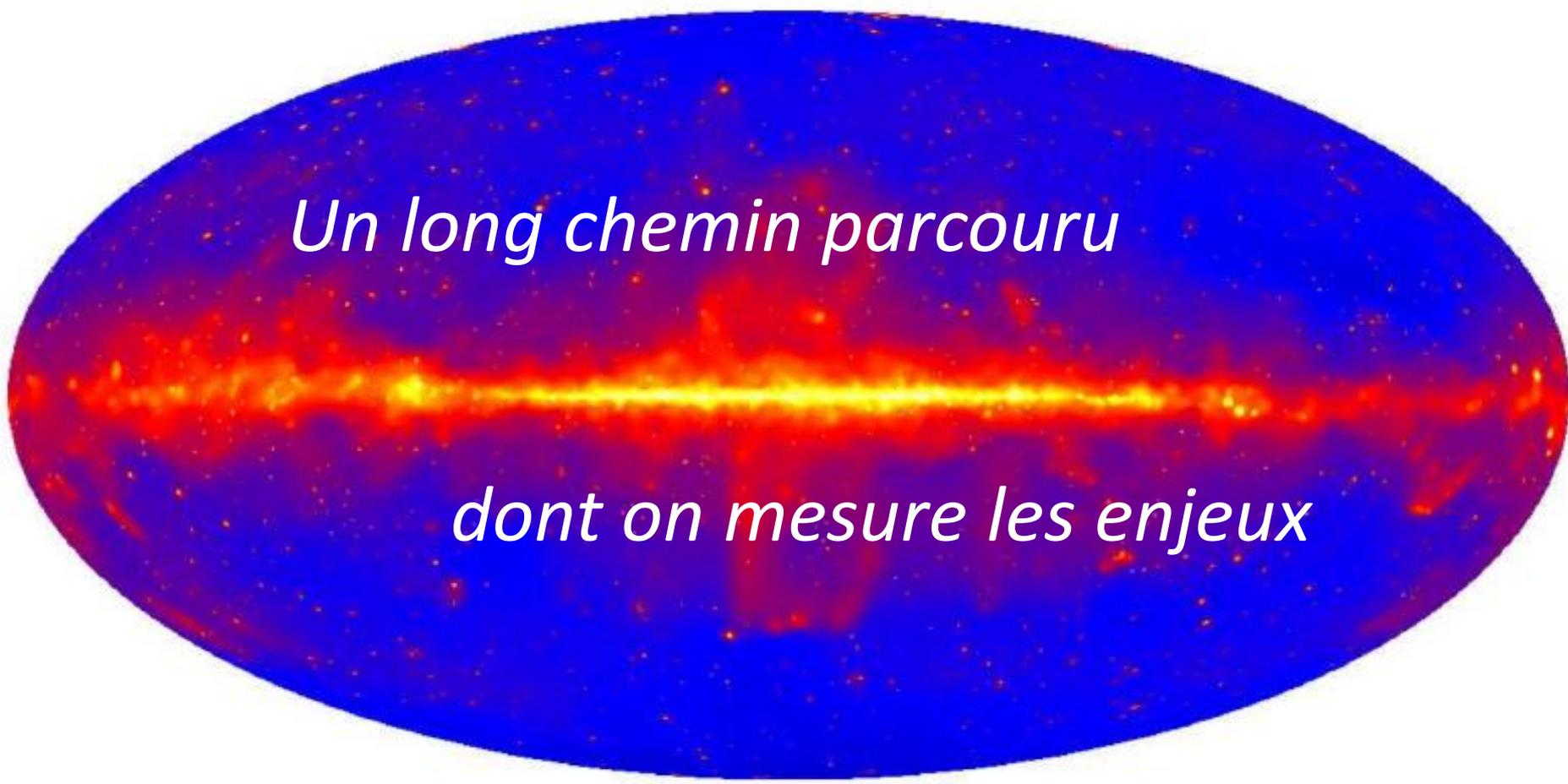


Environnement des trous noirs et alternatives aux trous noirs de Kerr  
(Vincent et al, 2016)

# 1<sup>ère</sup> détection directe d'onde gravitationnelle, et preuve directe de l'existence des trous noirs



Ouverture d'une nouvelle perspective  
sur notre univers



*Un long chemin parcouru*

*dont on mesure les enjeux*