

**Atelier Cosmax
“Astronomie Gamma” et
“Les trous noirs vus avec des rayons gamma”**

**Benoit Lott, CENBG
lott@cenbg.in2p3.fr**



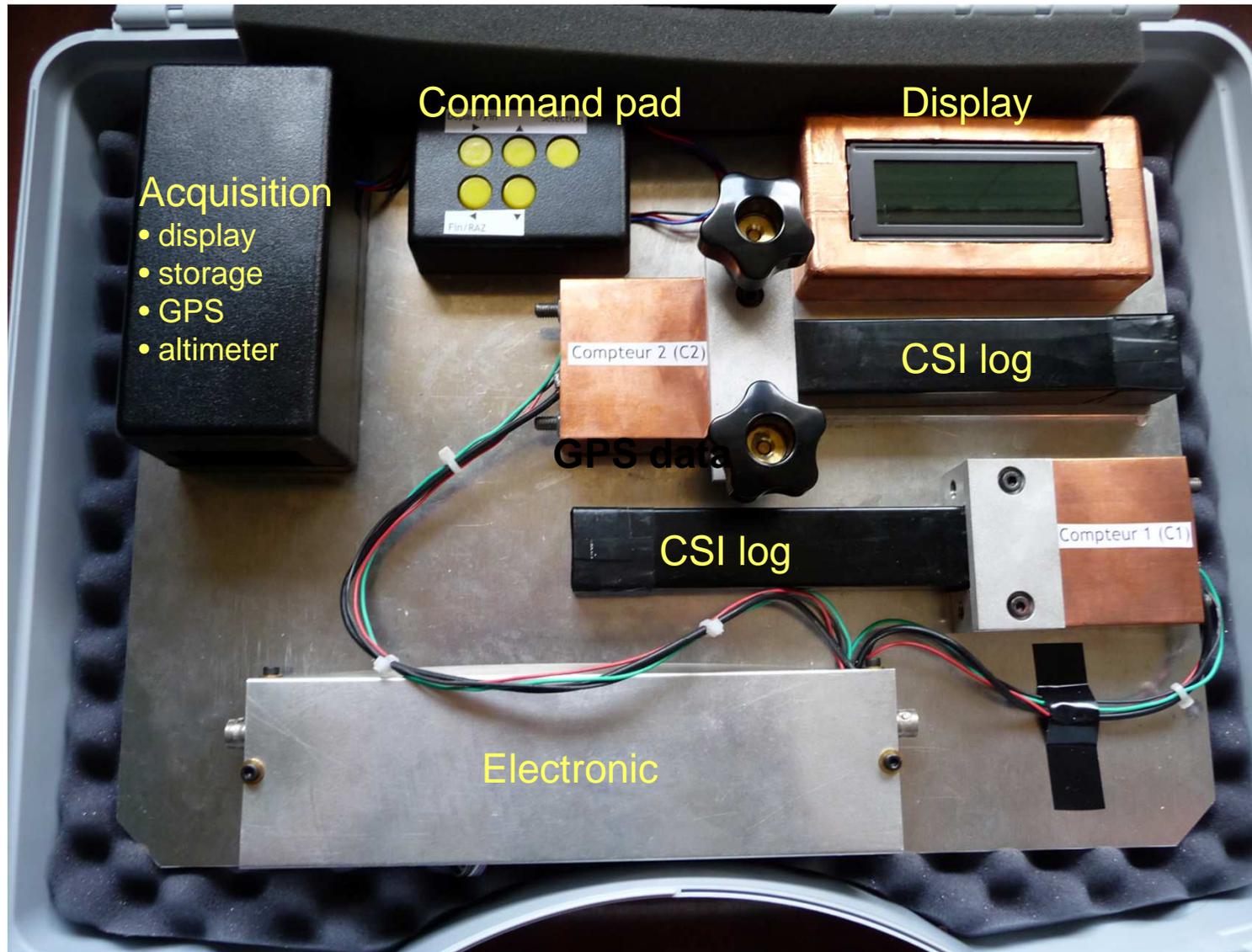
Plan

- **Introduction à l'astronomie gamma**
- **Introduction sur les trous noirs**
- **Quasars, sursauts gamma**
- **Le télescope Fermi-LAT**
- **Cosmax**
- **Masterclasse sur les trous noirs**
- **Le catalogue de Messier**
- **Le projet Startrack**



Les Rayons Cosmiques

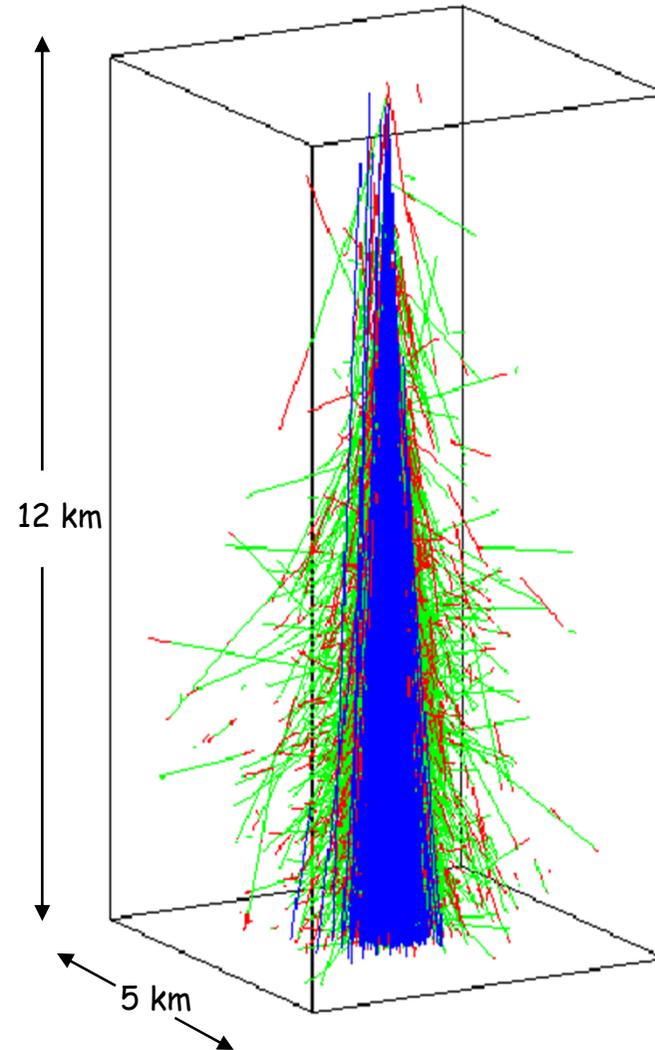
La mallette COSMIX



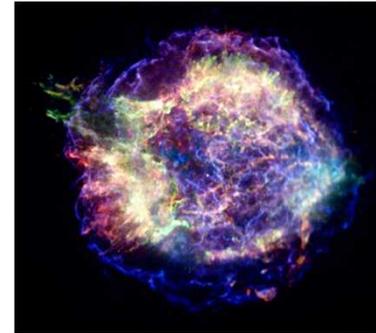
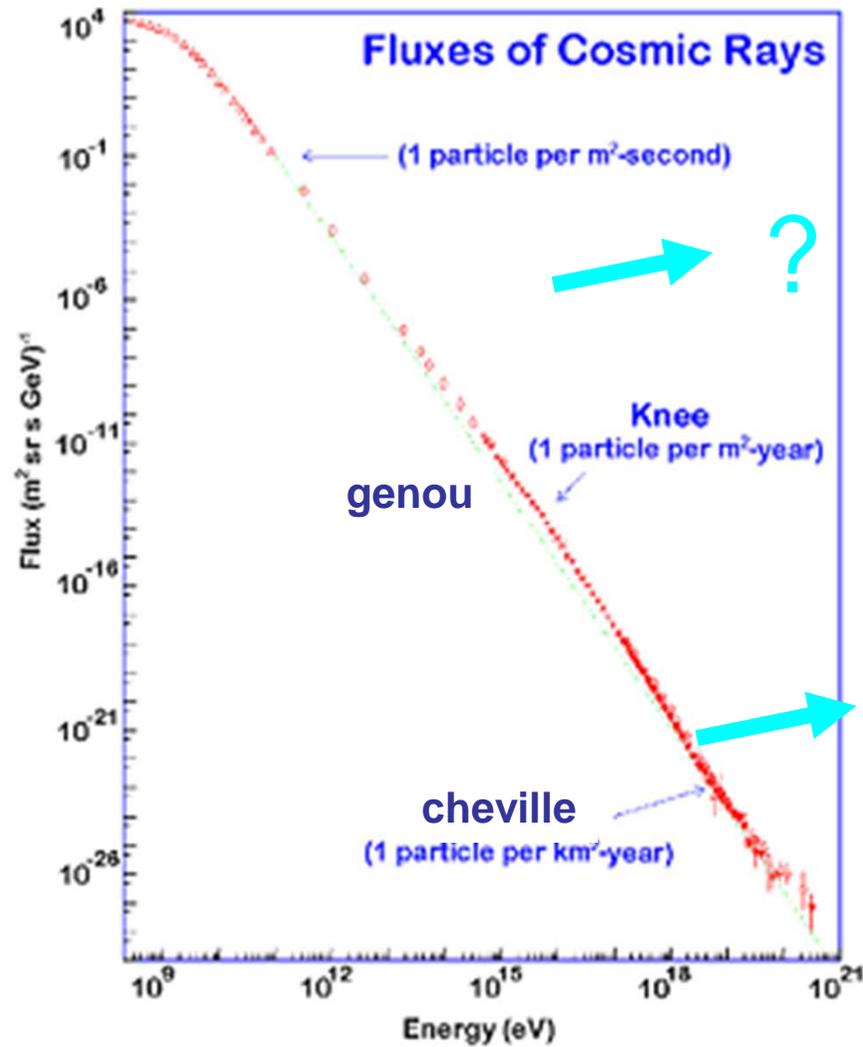
Renseignements: Nicolas Arnaud narnaud@lal.in2p3.fr

Cosmic rays

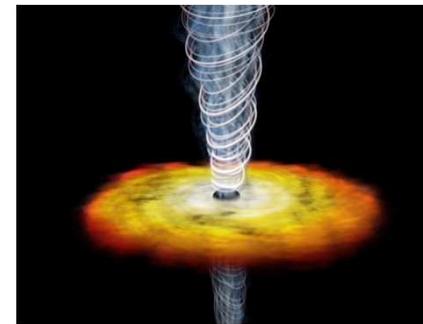
- discovered in 1912 (V. Hess)
- composition: mostly protons
- isotropic!!! Can't be used for astronomy!
- discovery of positron (1932), muon (1937), pion (1947)
- up to 10^{20} eV
- at least two different origins



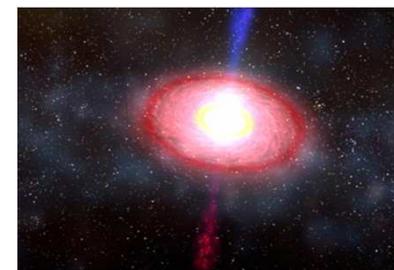
L'origine des rayons cosmiques



Restes de supernova



Noyaux Actifs De Galaxie



Sursauts gamma

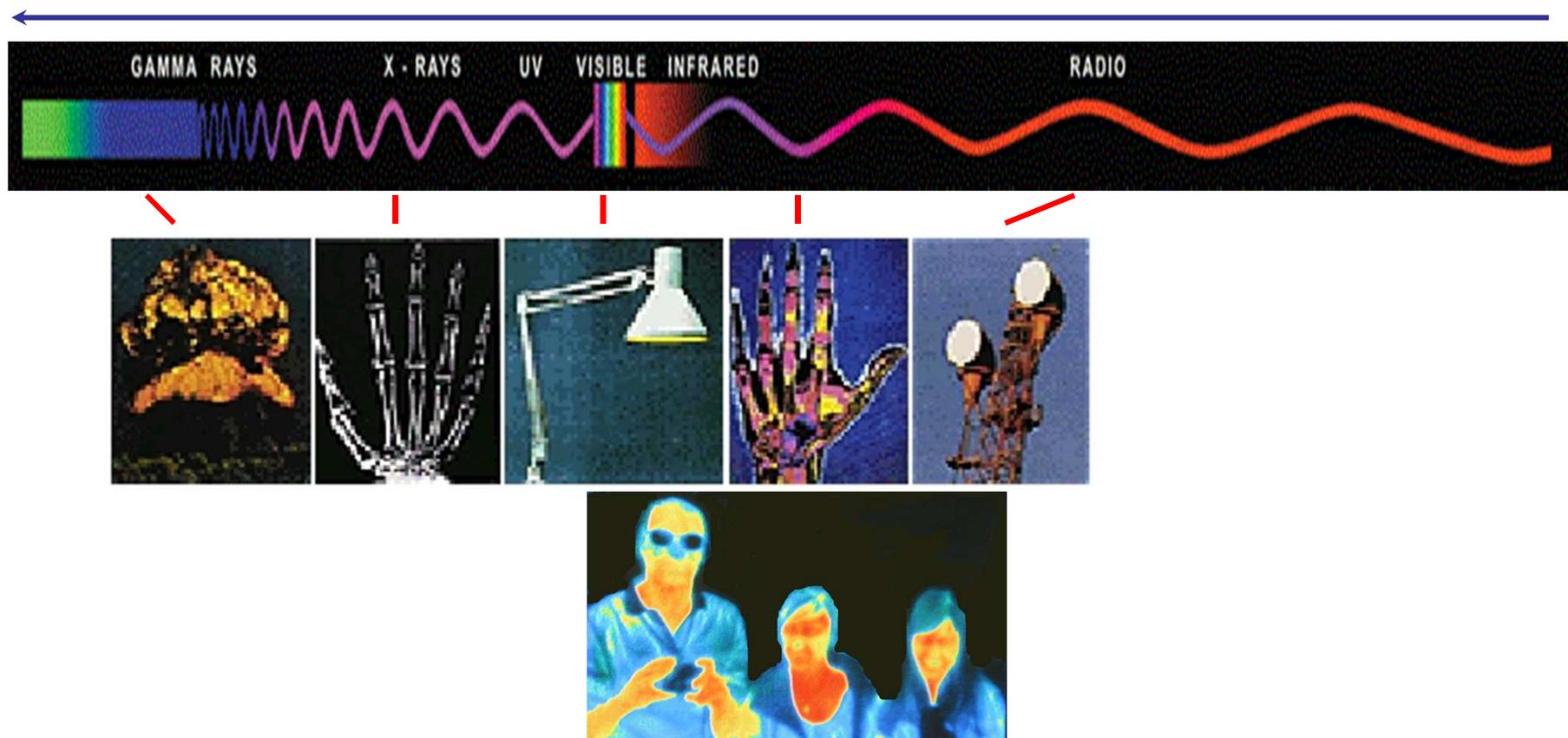
*Introduction à
l'Astronomie Gamma*

Le spectre électromagnétique

3 notions équivalentes: fréquence, longueur d'onde, énergie

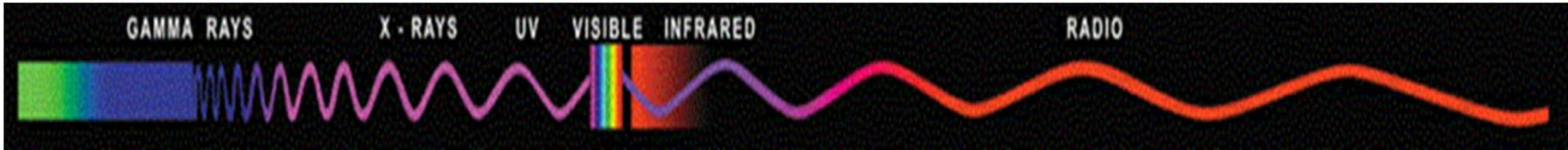
$$E = h\nu = hc/\lambda$$

E et ν augmentent, λ diminue



L'astronomie gamma et les accélérateurs cosmiques

Dans les objets de l'astronomie gamma, les *particules* (électrons ou protons) sont *accélérées* à de très hautes énergies (TeV et au-delà).



Ces *particules* émettent des *rayonnements*, dont **des rayons gamma** en interagissant avec

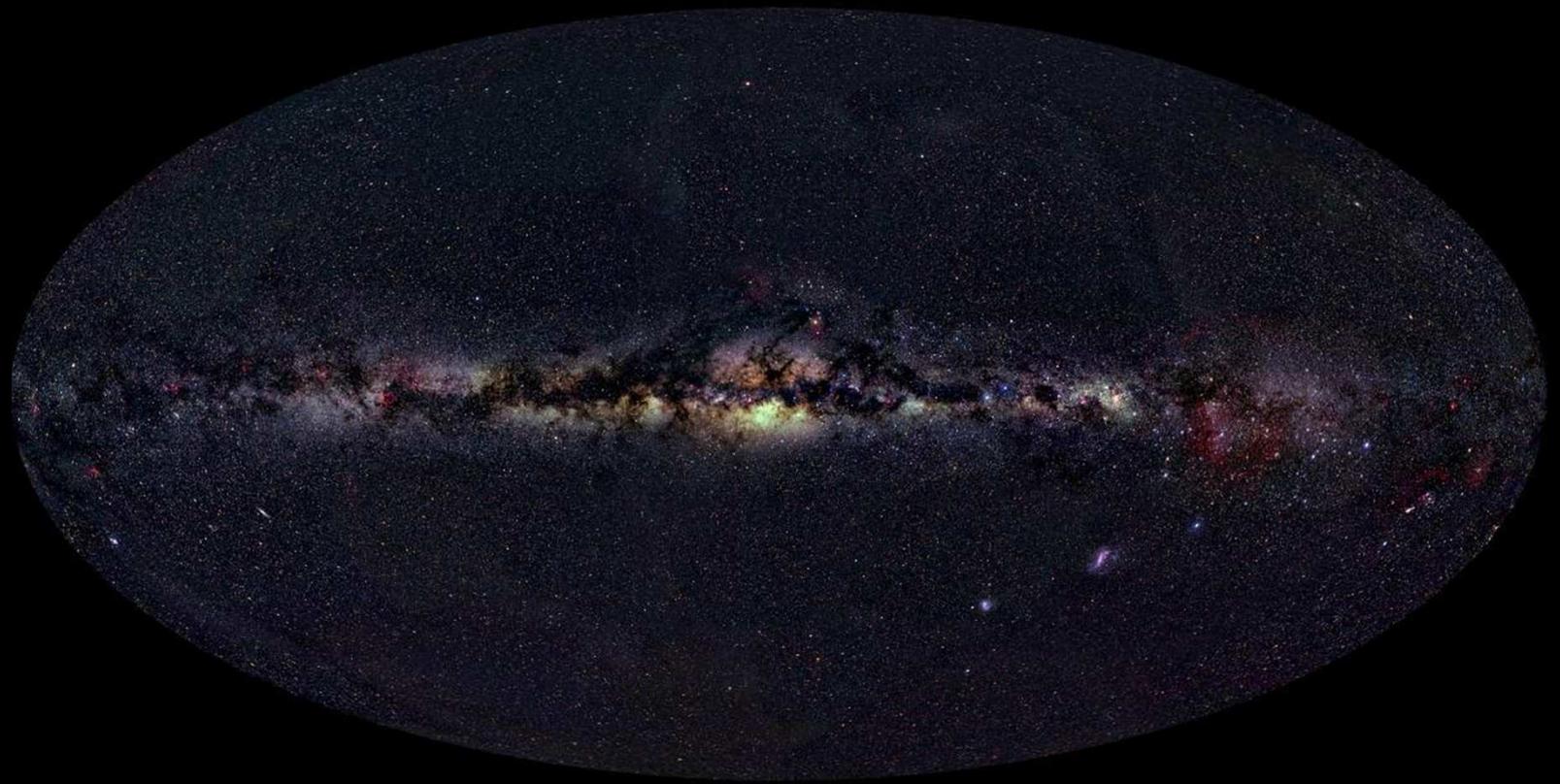
- la matière,
- d'autres rayonnements
- des champs magnétiques.

Les rayons gamma ne peuvent être produits que par des particules de grande énergie. Leur détection permet d'étudier *les accélérateurs cosmiques de Univers*:

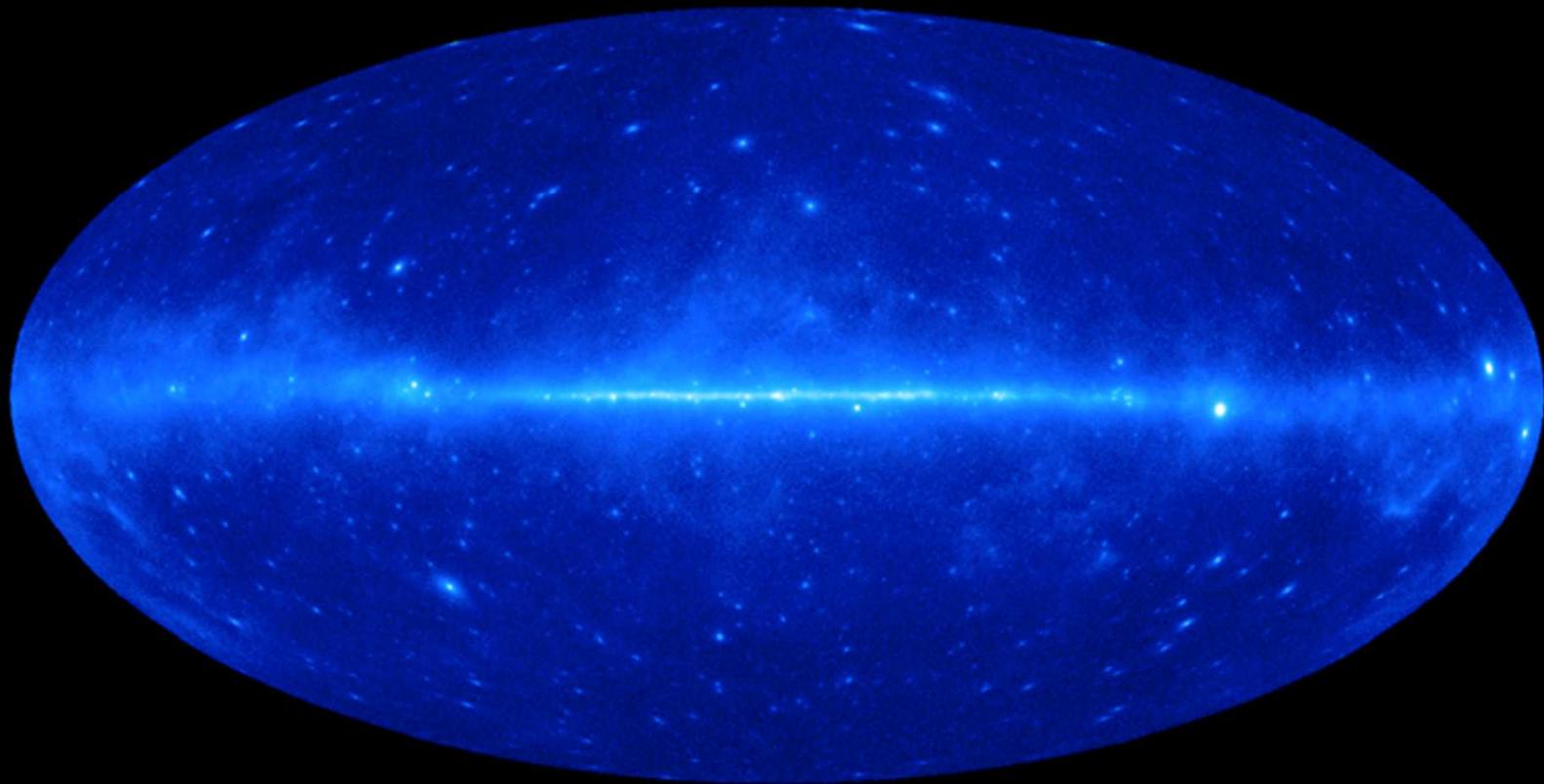
- des noyaux actifs de galaxie (très variables dans le temps)
- des sursauts gamma (des explosions qui durent quelques secondes)
- des pulsars
- des restes de supernovae, dont certains accélèrent les rayons cosmiques bombardant la Terre.

Astronomie gamma (2)

- **Les rayons gamma n'atteignent pas le sol: il faut un télescope embarqué sur un satellite pour les détecter.**
- **Le rayonnement est tellement ténu que l'on détecte un « grain de lumière » (un photon) à la fois.**
- **Les photons gamma sont rares. Ex. Vela**



© 2000, Axel Mellinger



Credit: Fermi Large Area Telescope Collaboration

Fermi Large Area Telescope 2FGL catalog

○ AGN ✦ AGN-Blazar

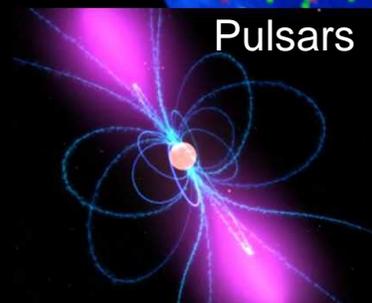
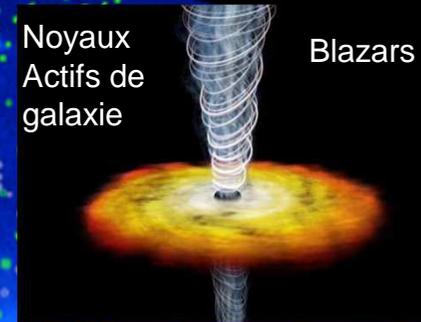
□ AGN-Non Blazar

× Galaxy

* Starburst Galaxy

◇ Radio Galaxy

+ Seyfert Galaxy



○ Unassociated

◻ Possible Association with SNR and PWN



* Nova

× PSR

○ PWN

◇ PSR w/PWN

□ SNR

◇ Globular Cluster

+ HMB

1873 sources with $TS > 25$

The Fermi collaboration, Nolan, P. L. et al. 2012, ApJS, 199, 31

Publication de 2012 la plus citée en Astrophysique

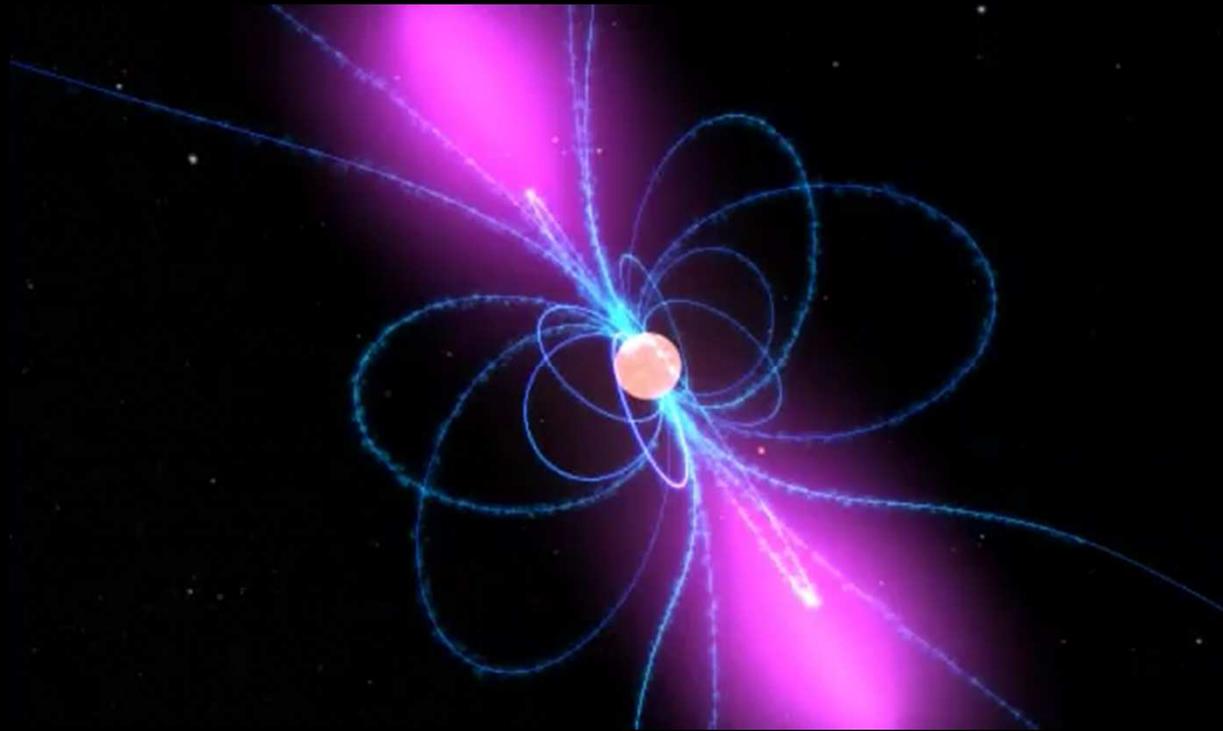
Credit: Fermi Large Area Telescope Collaboration

Pulsars

“Pulsating star”: fast-spinning neutron star (up to 30 rotations/s)
Collapsed-core of an exploded massive star (supernova)

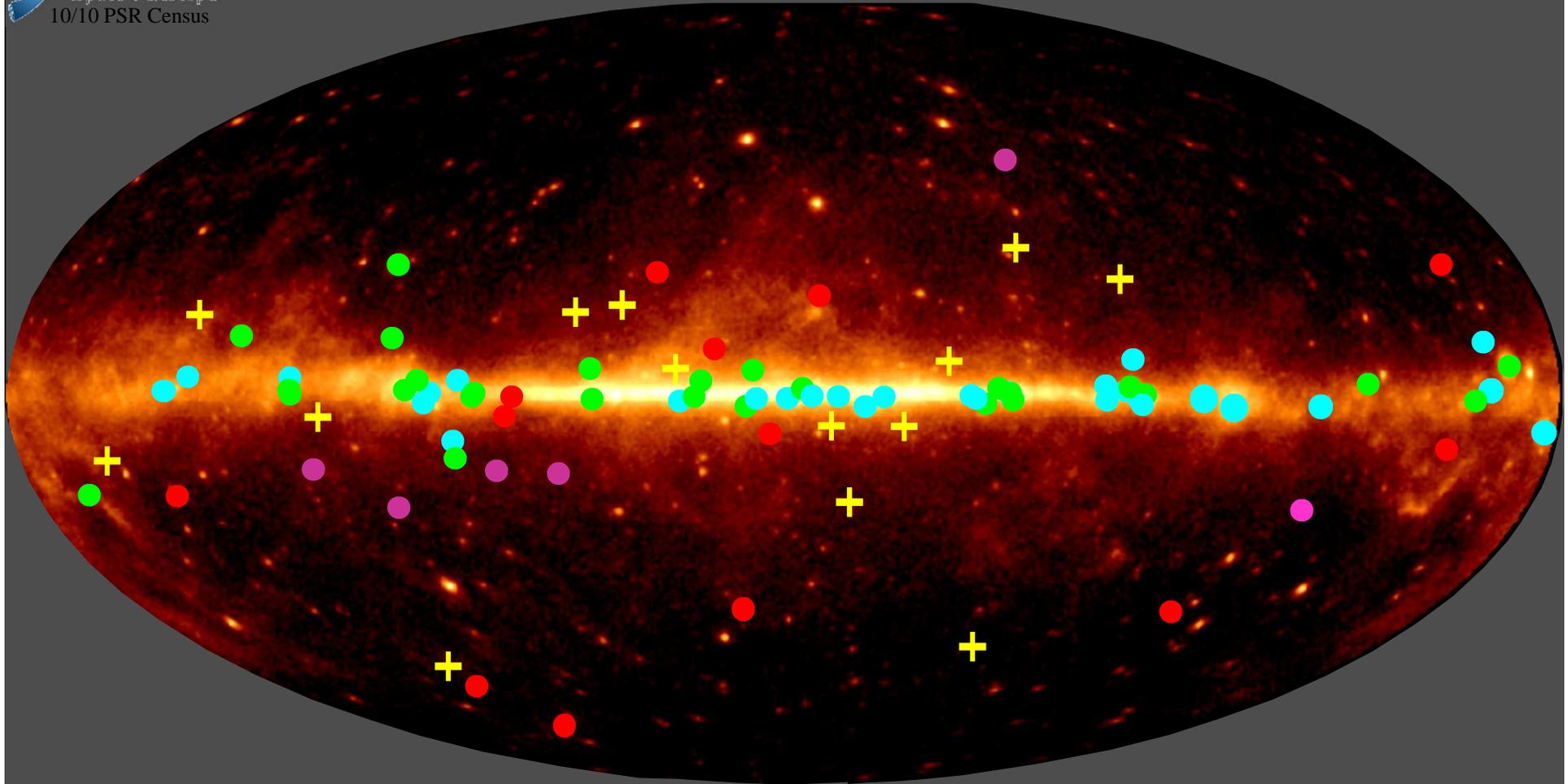
>150 detected by Fermi

$p+e \rightarrow n+\nu_e$ $M \sim M_{\text{soleil}}$ $R \sim 10 \text{ km}$ $d \sim 10^{15}$ $B = 10^{12} \text{ G}$



The LAT Pulsar Sky

Pulses at 1/10th
Real Rate



30 Young Radio-selected

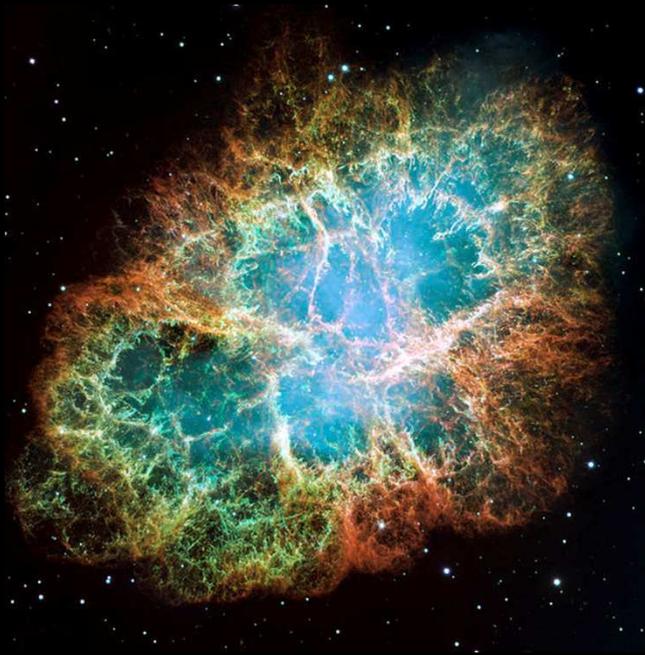
13 MSP Radio-selected

25 Young γ -selected

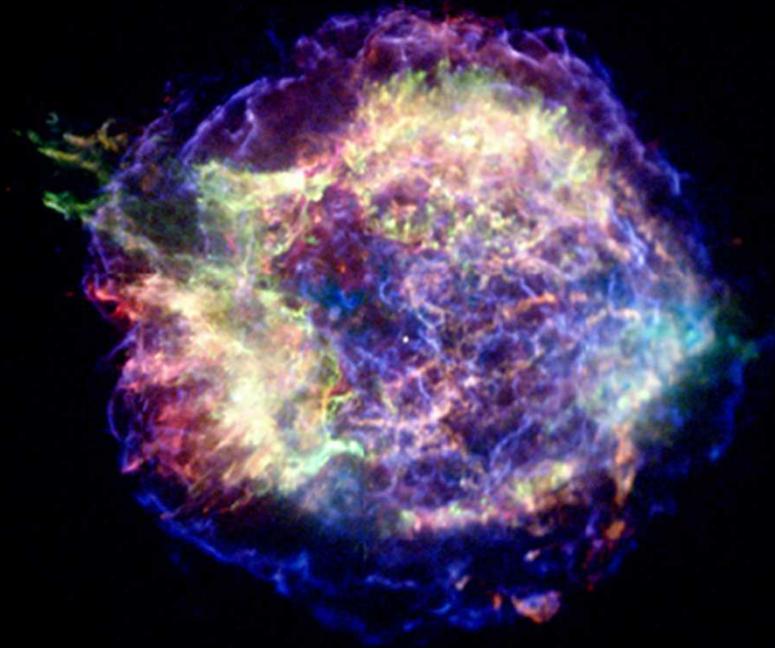
6 γ -sel MSP γ /R pulse

14 γ -sel MSP R pulse

Restes de Supernova



Crab nebula (Hubble)

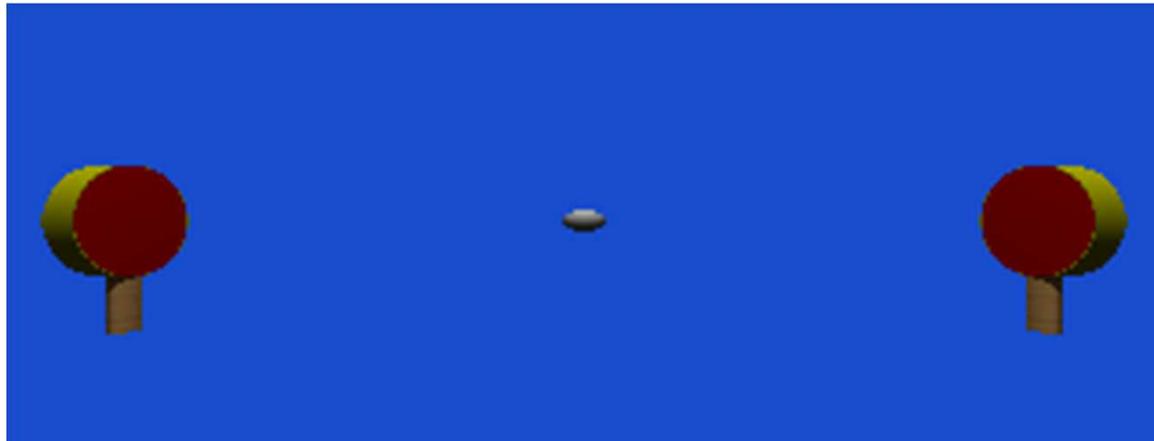


Cassiopeia A (Chandra)

« Fermi acceleration »

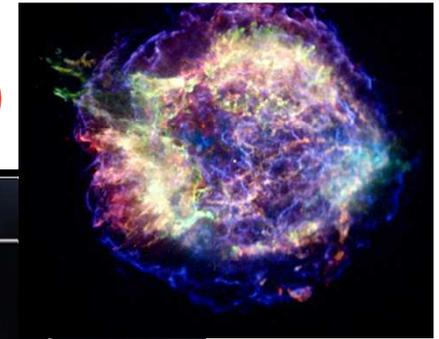


« Fermi acceleration »



This process provides a power-law energy distribution for the accelerated particles (« non-collisional » process): $N(E) \propto E^{-\alpha}$

Restes de supernova (en coquille)

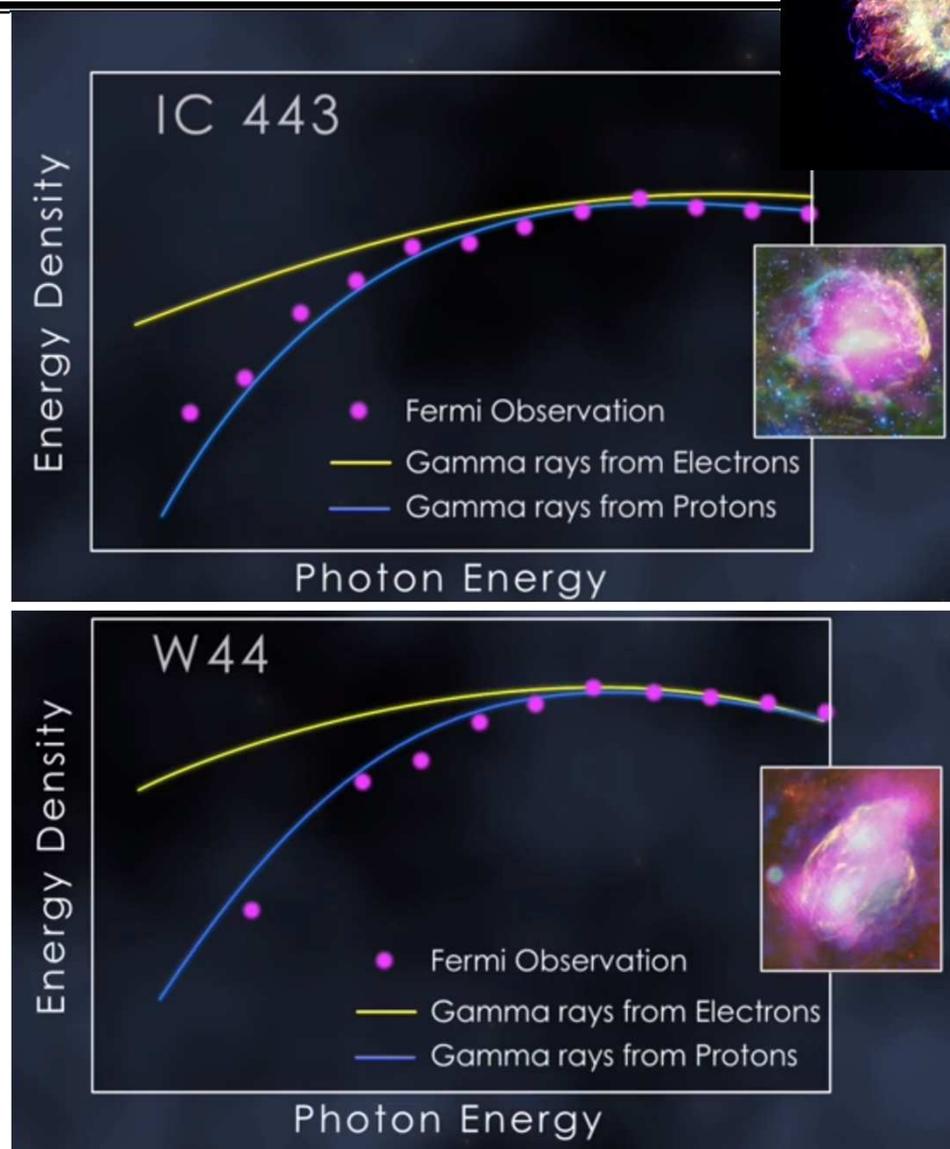


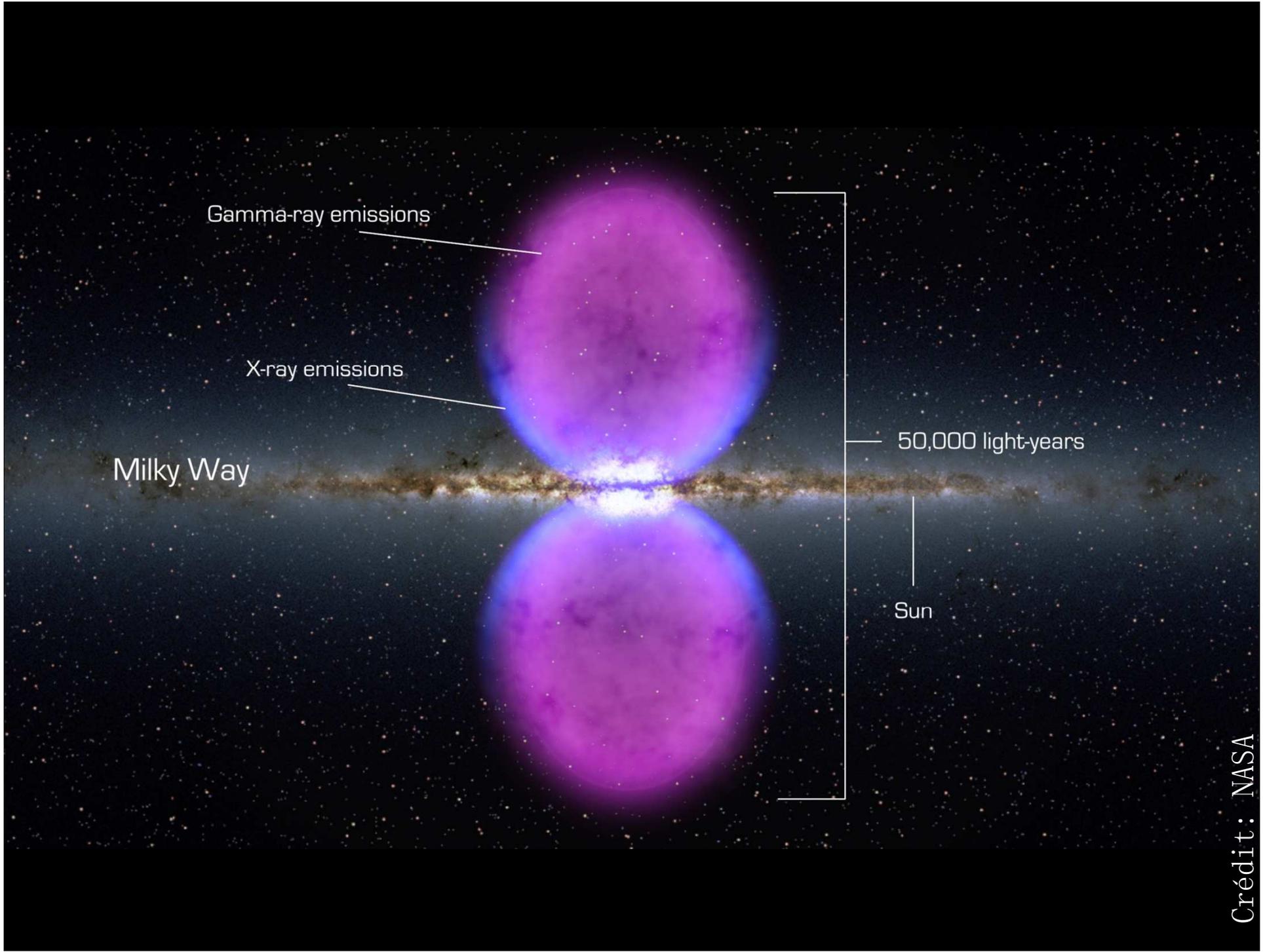
Sites supposés d'accélération
des rayons cosmiques
Galactiques

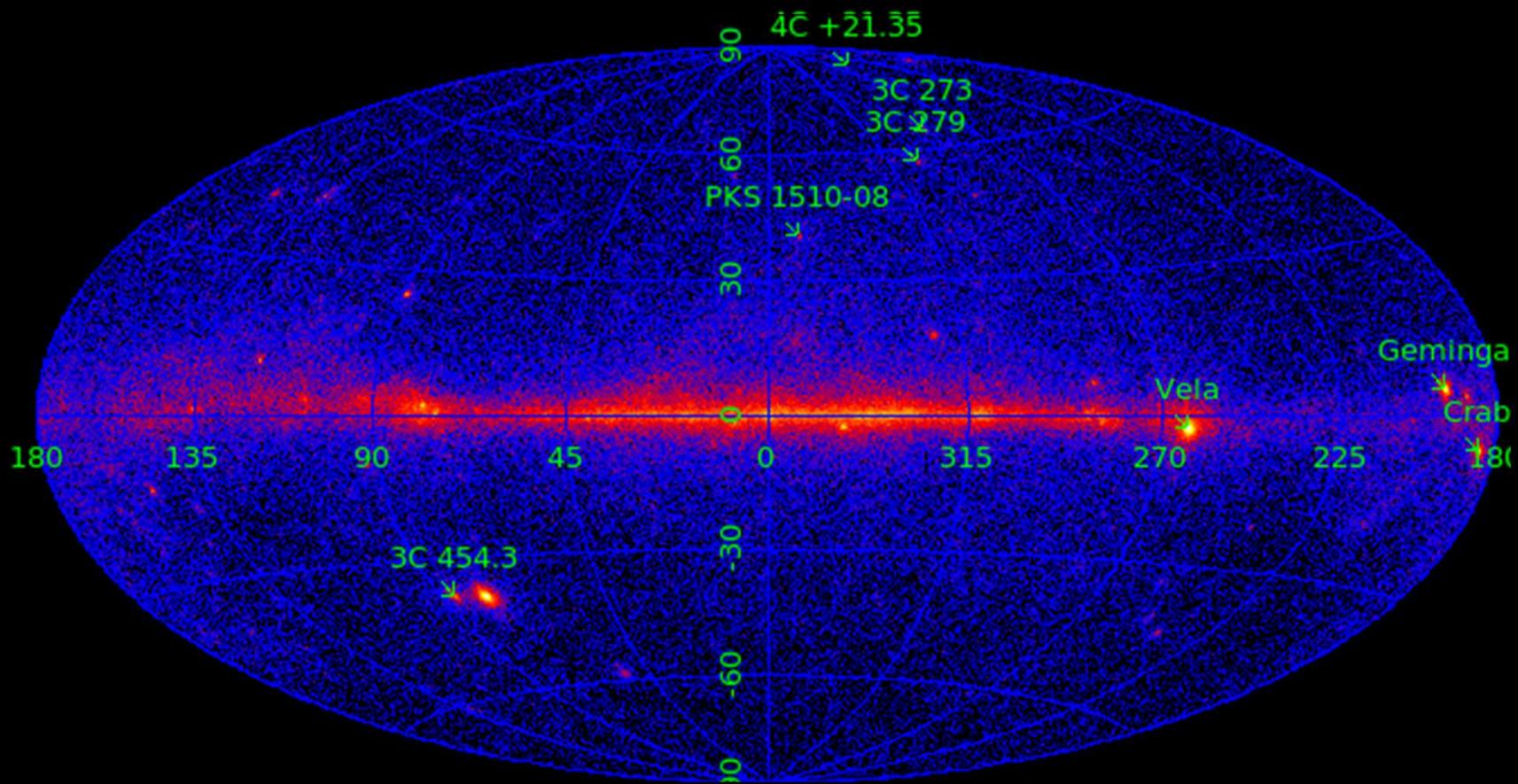
Émetteurs en gamma
→ accélérateurs cosmiques
mais électrons ou protons?

Spectres gamma de Fermi
→ protons!

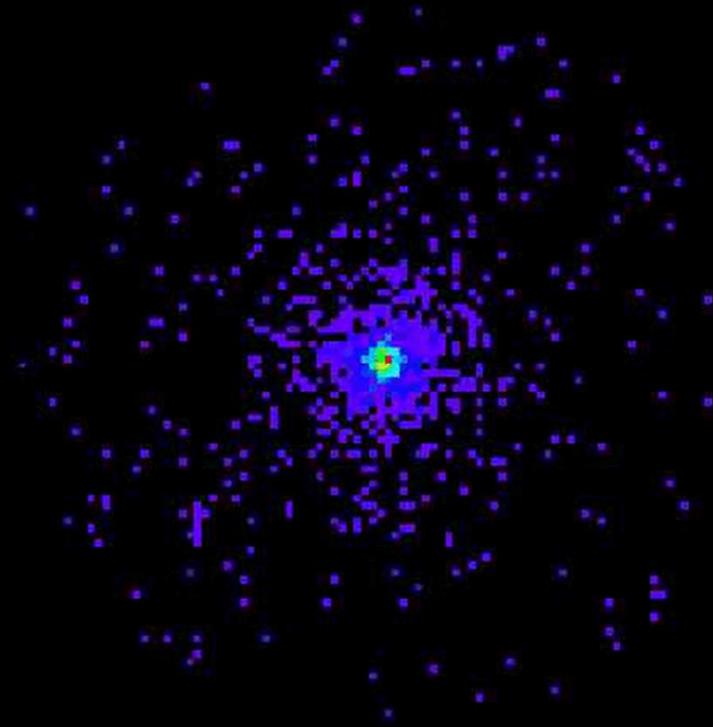
Un des 10 résultats
scientifiques majeurs de
2013 pour la revue
Science.

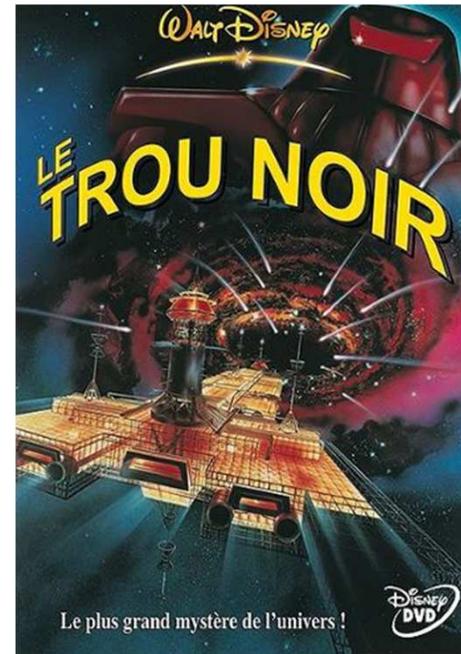




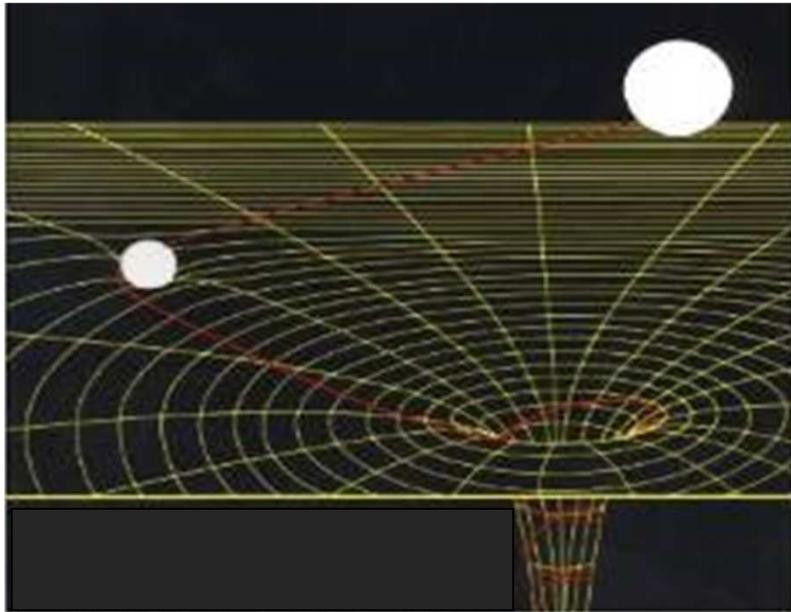


**Un quasar: un trou noir
supermassif à l'œuvre
(données Fermi-LAT 3C 454.3)**





Introduction sur les trous noirs



Rappel sur l'énergie



Energie totale d'un objet dans un puits de potentiel gravitationnel de masse M , à une distance R du centre.

$$E = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{GMm}{R}$$

Si $E \geq 0$:

$$E = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{GMm}{R} = \frac{1}{2}mv_{\infty}^2$$

Si $E = 0$: $v = \sqrt{\frac{2GM}{R}}$

Vitesse d'évasion (ou de libération): à communiquer à un objet situé sur la surface d'un corps céleste (R) pour qu'il parvienne à l'infini = *Vitesse de chute libre d'un objet venant de l'infini s'écrasant sur la surface d'un corps céleste.*

Ces vitesses (égales) ne dépendent que du rapport M/R .

Vitesse d'évasion



Vitesse d'évasion pour un objet massif:

$$v = \sqrt{\frac{2GM}{R}}$$

Terre: $v =$



Bodies	Mass (earth)	Mean Radius (km)	Escape velocity (km/s)
Mercury	0.055	2440	4.25
Venus	0.815	6052	10.36
Earth	1	6371	11.18
Moon	0.0123	1737	2.38
Mars	0.107	3389	5.02
Ceres	0.00015	476	1.85
Palas	0.000035	544	0.32
Vesta	0.000043	525	0.36
Jupiter	317.8	69911	59.5
Saturn	95.15	58232	35.5
Uranus	14.53	25362	21.3
Neptune	17.14	24622	23.5
Soleil	333000	696342	617.7
Sirius B	335000	5850	5200
Neutron star	1000000	10	200000



Définition



Ce que ce n'est pas:



Définition



Ce que c'est:

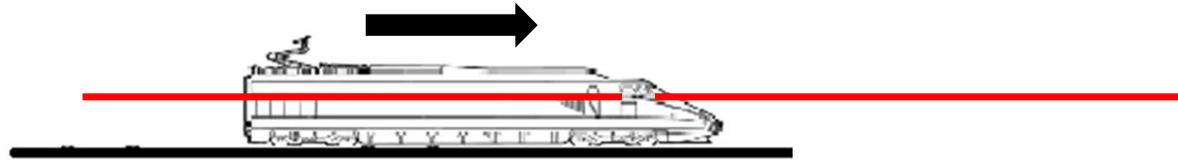
Région de l'espace dotée d'un champ gravitationnel si intense qu'aucun rayonnement n'en peut sortir. (Larousse en ligne)

Corps céleste très dense dont la force de gravité est si intense que même la lumière ne peut s'en échapper.

Vitesse d'évasion, $v = \sqrt{\frac{2GM}{R}}$, égale à la vitesse de la lumière

Terme inventé en 1967 par Wheeler. Avant: Corps de Schwarzschild.

La Relativité Restreinte (1905)



Constance de la vitesse de la lumière → a des conséquences sur la mesure de temps et d'espace et sur la notion de simultanéité «*de temps et d'espaces*»

$$\Delta t = \frac{2d}{c}$$



$$\Delta t' = \frac{2d'}{c}$$

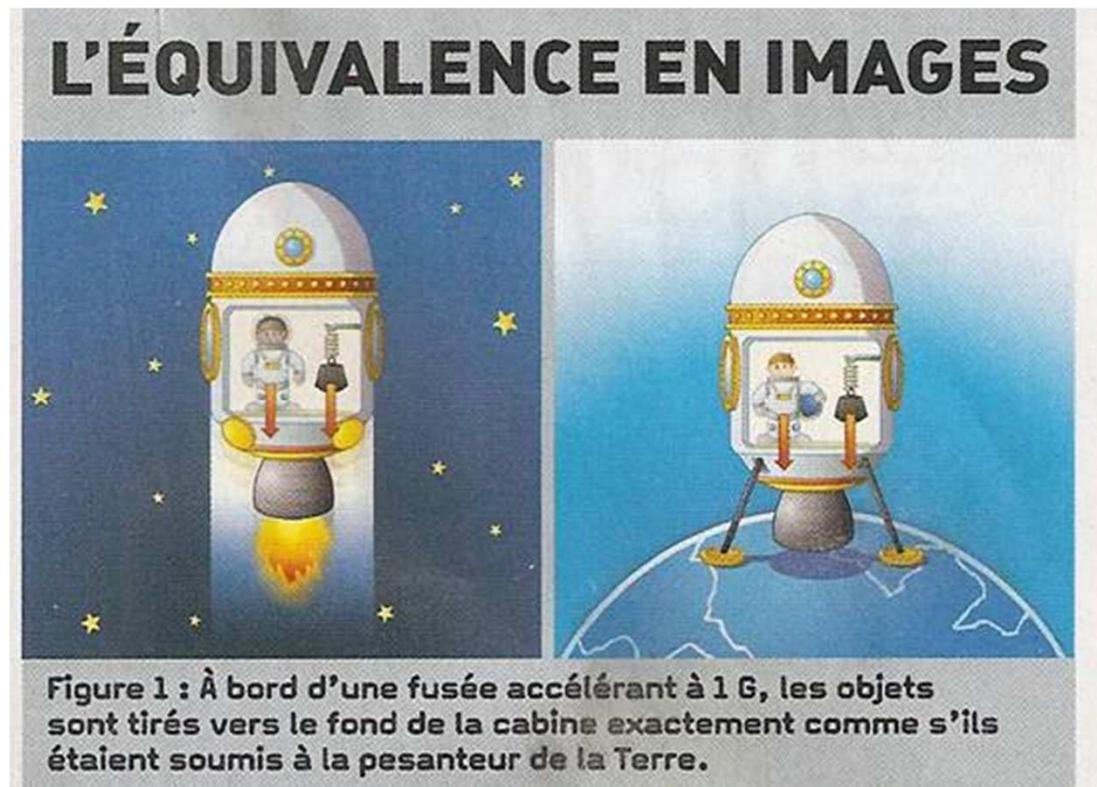
le cas de la mécanique classique de Newton!

Le Principe d'Equivalence (1)



« Dans un ascenseur qui accélère vers le haut, on a l'impression de peser plus.
En chute libre, on a l'impression de ne plus rien peser. »

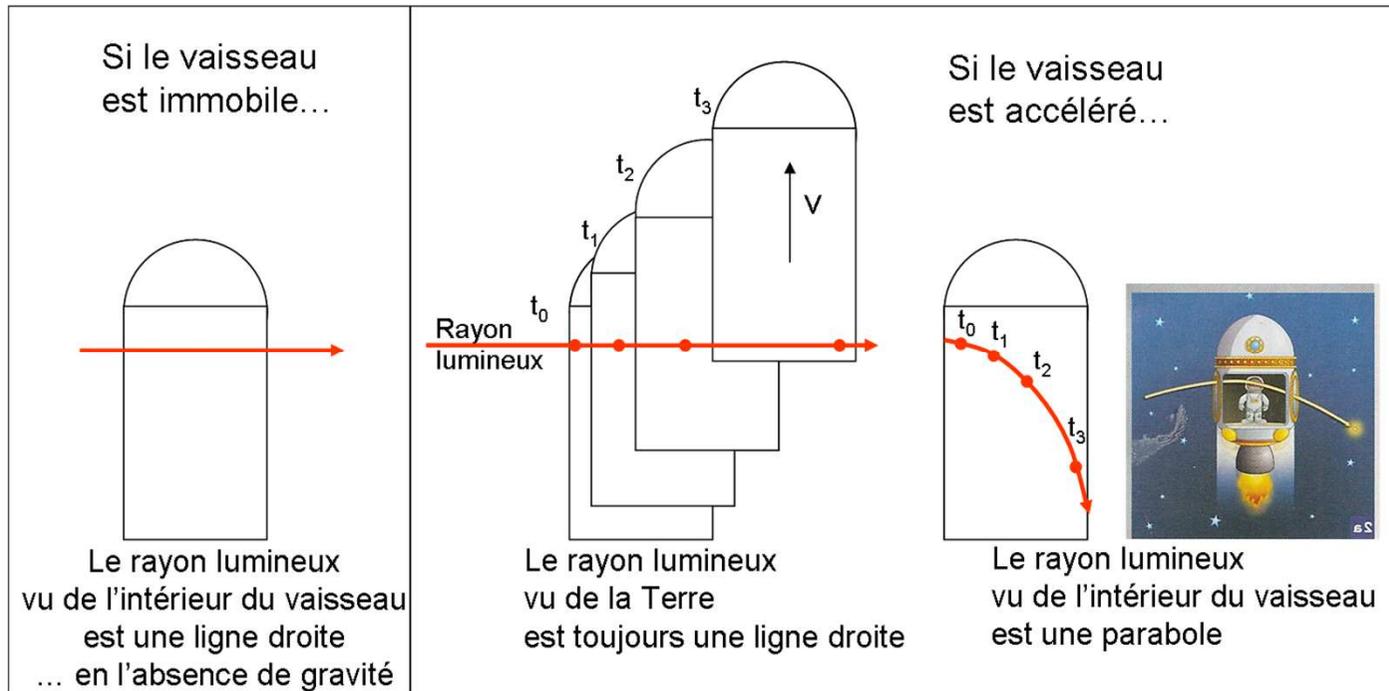
Observation: La gravité a le même effet qu'une accélération continue.



Crédit: Sciences et Vie Junior

Principe d'équivalence: Aucune mesure physique ne permet de dire si l'on est soumis à la gravité ou bien à une accélération continue.

Le Principe d'Equivalence (2)



Crédit: Sciences et Vie Junior

La Relativité Générale (1915)



Théorie relativiste et géométrique de la gravitation (remplace Newton)

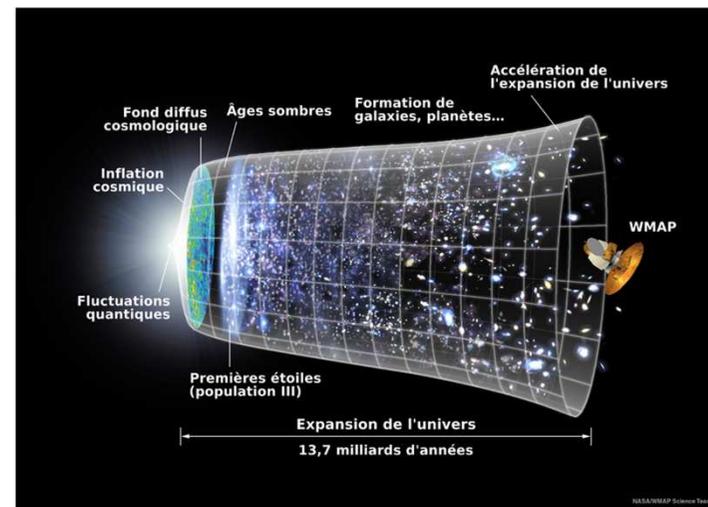
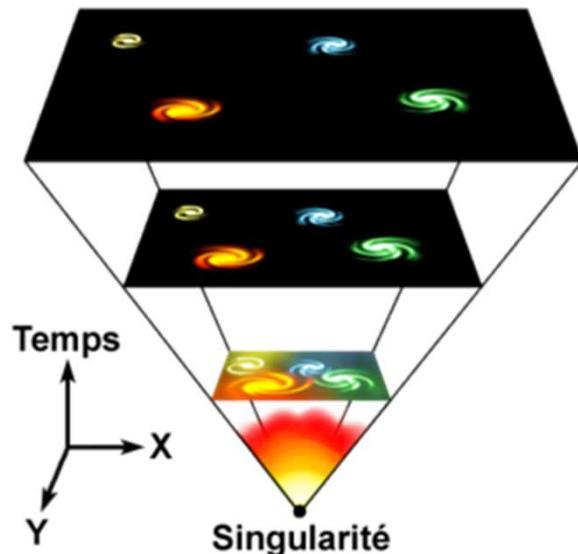
$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu} R + g_{\mu\nu} \Lambda = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

**Equation de champ d'Einstein
(1915)**

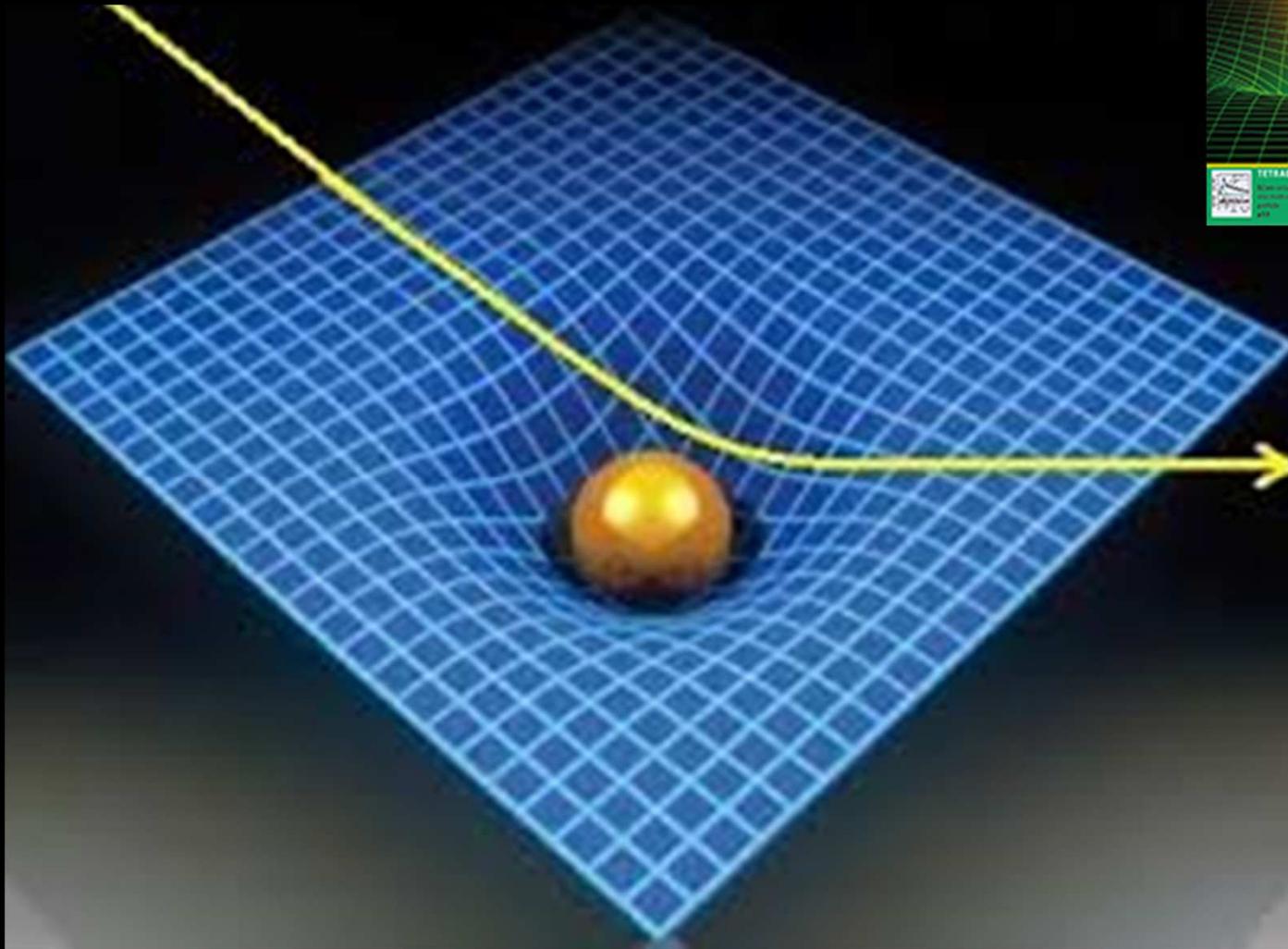
courbure de l'espace-temps densité d'énergie (incluant la masse)

« L'espace-temps dit à la matière comment se déplacer; la matière dit à l'espace-temps comment se courber. » Wheeler

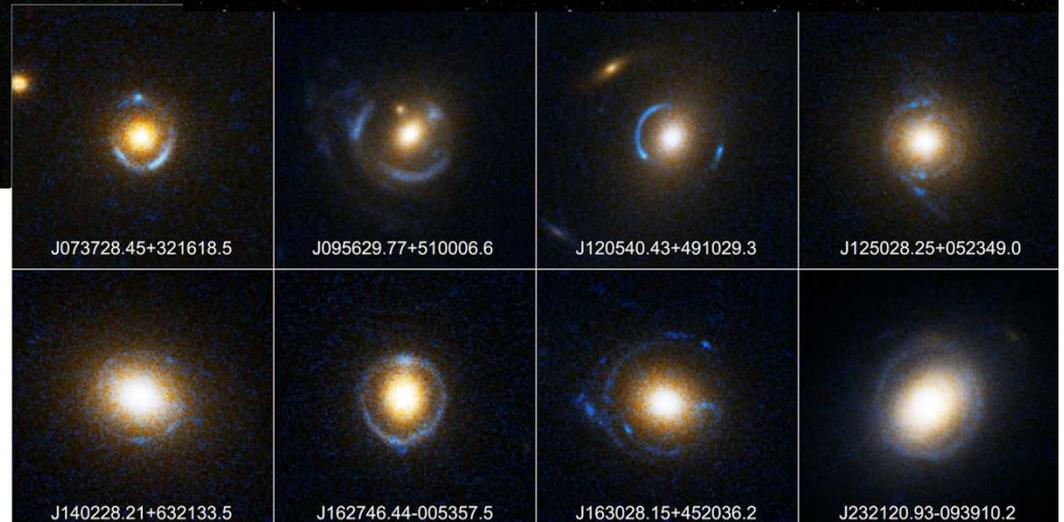
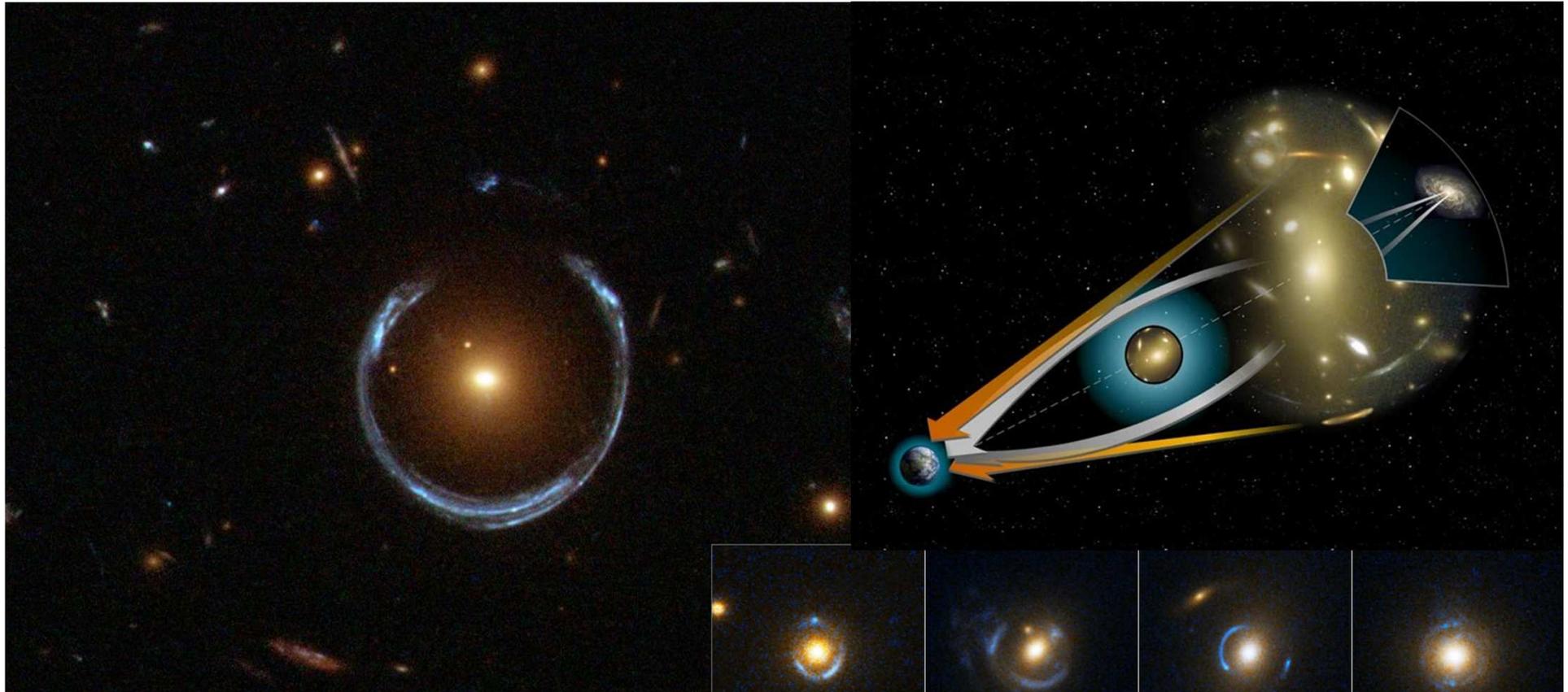
Cette équation décrit l'évolution de l'Univers après le Big Bang ainsi que le comportement de l'espace et du temps autour de tout corps massif.



Courbure de l'espace-temps

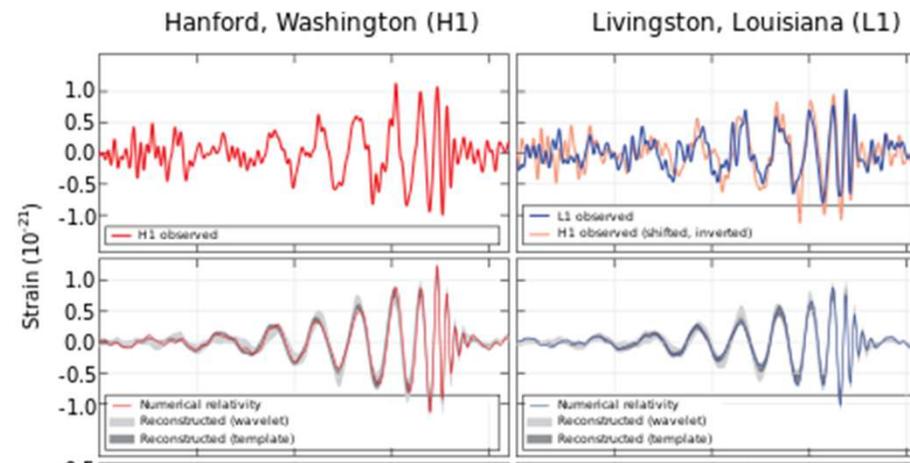
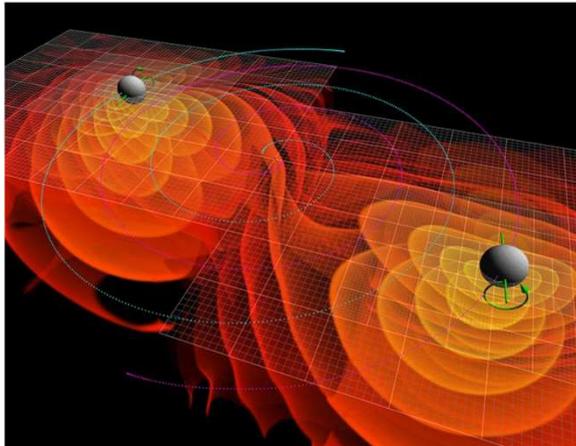
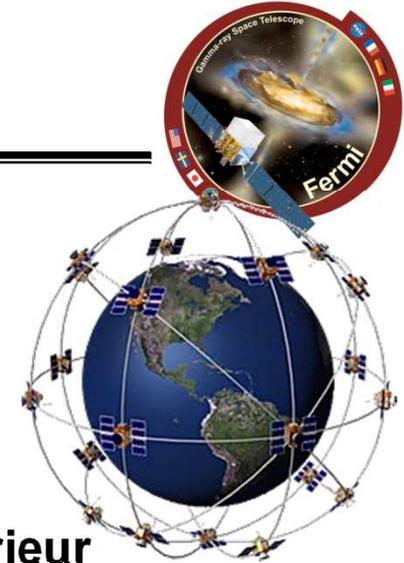


Anneaux d'Einstein: lentilles gravitationnelles



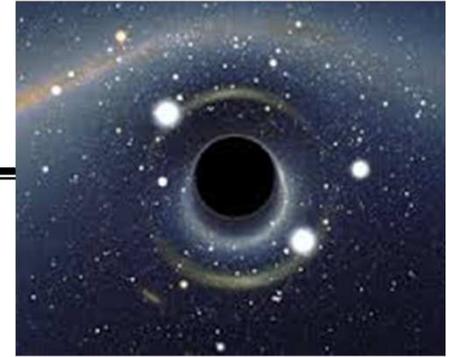
La Relativité Générale (1915)

- Temps s'écoule plus lentement près d'un corps massif
Ex: correction pour le GPS, satellites orbitant à 20000 km d'altitude.
- La lumière émise à proximité d'un corps massif vers l'extérieur perd de l'énergie: décalage d'Einstein ou gravitationnel (« vers le rouge »).
- Des ondes de déformation de l'espace-temps peuvent se propager: ondes gravitationnelles.





Le Trou Noir

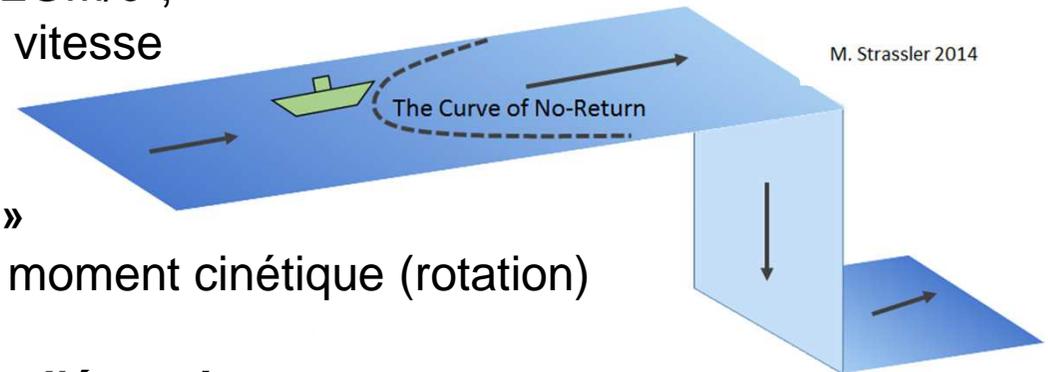


1915: **Solution de Schwarzschild** faisant apparaître l'horizon et la singularité centrale, mais la réalité du trou noir n'est apparue que 40 ans après.

Doutes d'Einstein sur la transposition de cette solution dans le monde réel...

Singularité centrale: centre du trou noir, de taille nulle et de densité infinie.

Horizon (rayon de Schwarzschild, $R_S = 2GM/c^2$, 3 km pour 1 M_\odot): limite de non-retour, vitesse d'évasion=c



« **Un trou noir n'a pas de chevelure** »

- Seuls Paramètres: Masse, charge, moment cinétique (rotation)

Très grande efficacité de production d'énergie

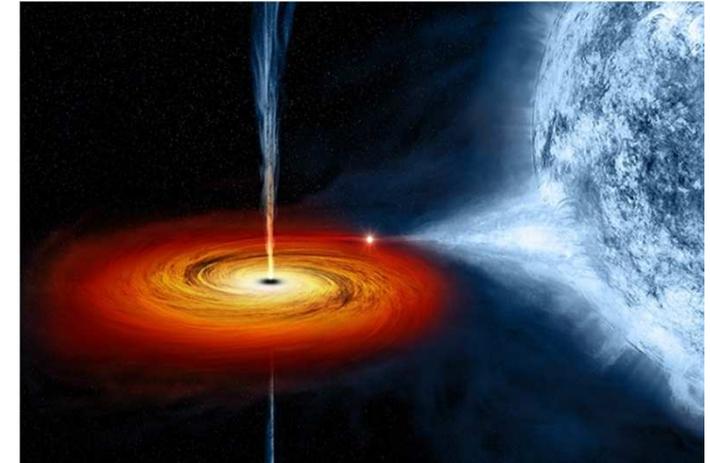
jusqu'à 42% de mc^2 (0.7% pour l'énergie nucléaire dans le soleil)

Rayonnement de Hawking (évaporation): émission (très faible, $T \sim 1/M$) de rayonnement thermique → « paradoxe de l'information »

Des trous noirs de toutes les tailles



- **Micro trous noirs** (primordiaux): produits dans le Big Bang, mais se sont « évaporés » depuis, jamais détectés pour l'instant, produits sur accélérateurs?
- **Trous noirs de masse stellaire**: ex: binaires X, sursauts gamma, détection GW par LIGO
- **Trous noirs supermassifs** (10^6 - $10^{10} M_{\odot}$).



Trous noirs stellaires



LO1 « pression de dégénérescence » des électrons
→ naine blanche

« pression de dégénérescence » des neutrons
→ étoile à neutrons

aucun phénomène connu permettant d'éviter
l'effondrement → trou noir!

The fate of a star depends on its mass (size not t

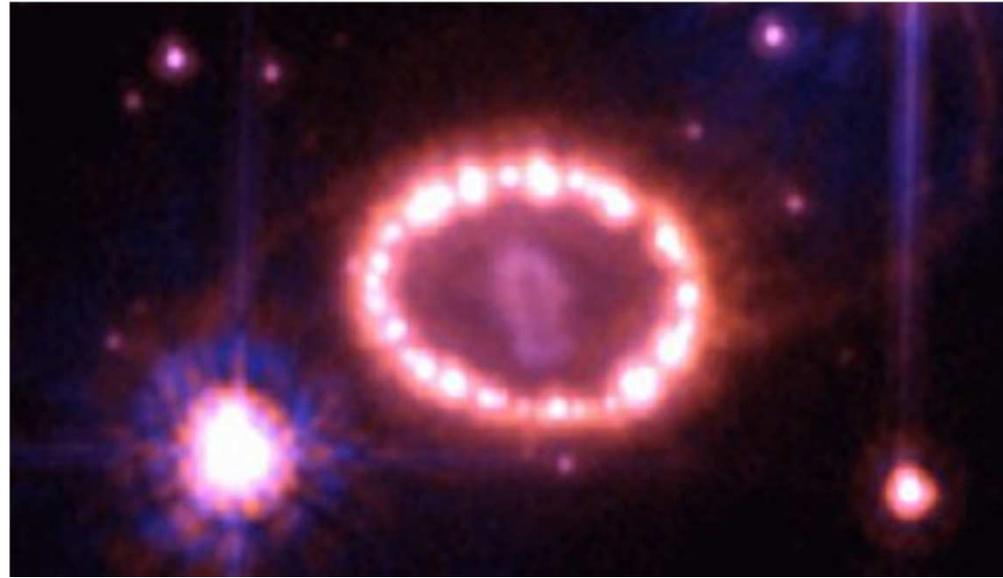


Estimation: qq dizaines de millions de trous noirs dans la Voie Lactée
Une vingtaine de trous noirs connus (système binaires)

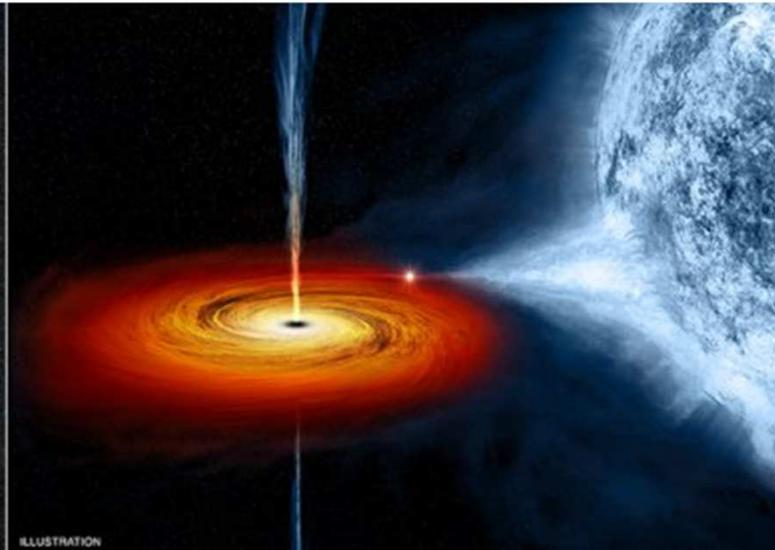
Deux candidats de trous noirs stellaires



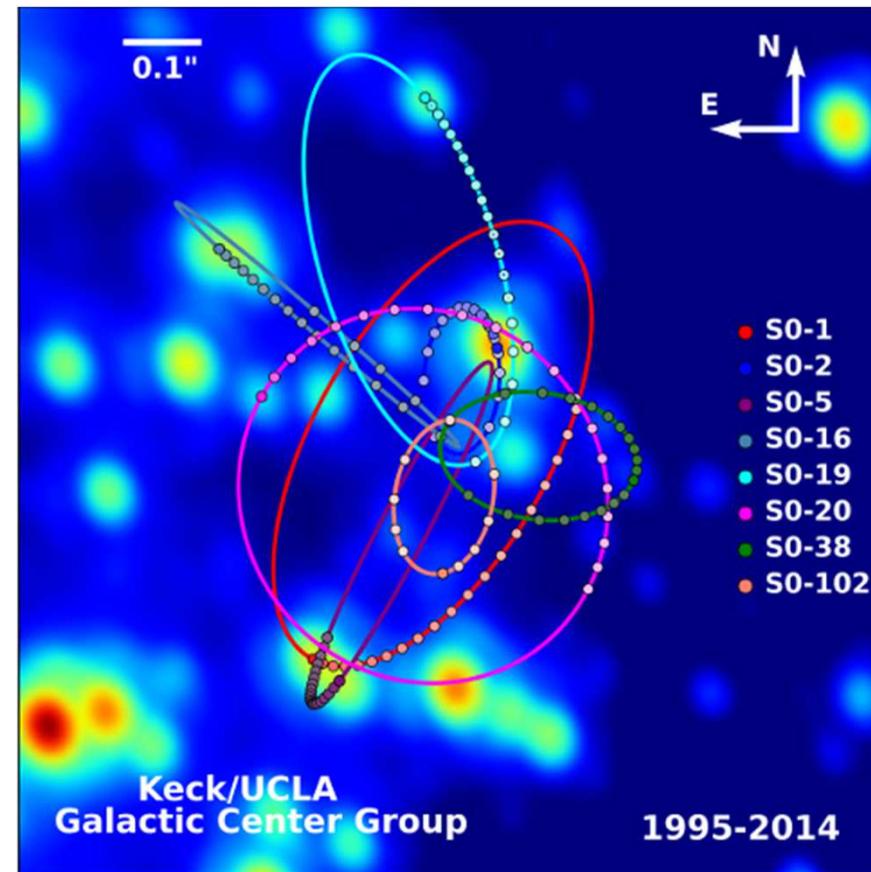
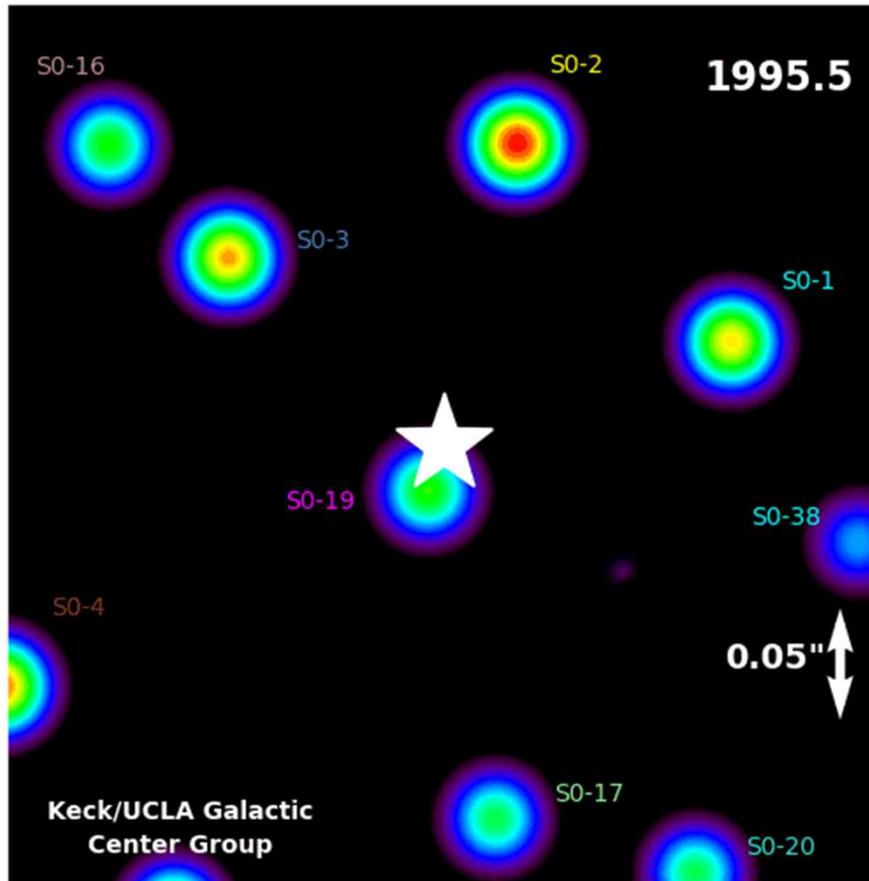
SN1987A



Cygnus-X1 ($\sim 9M_{\odot}$)



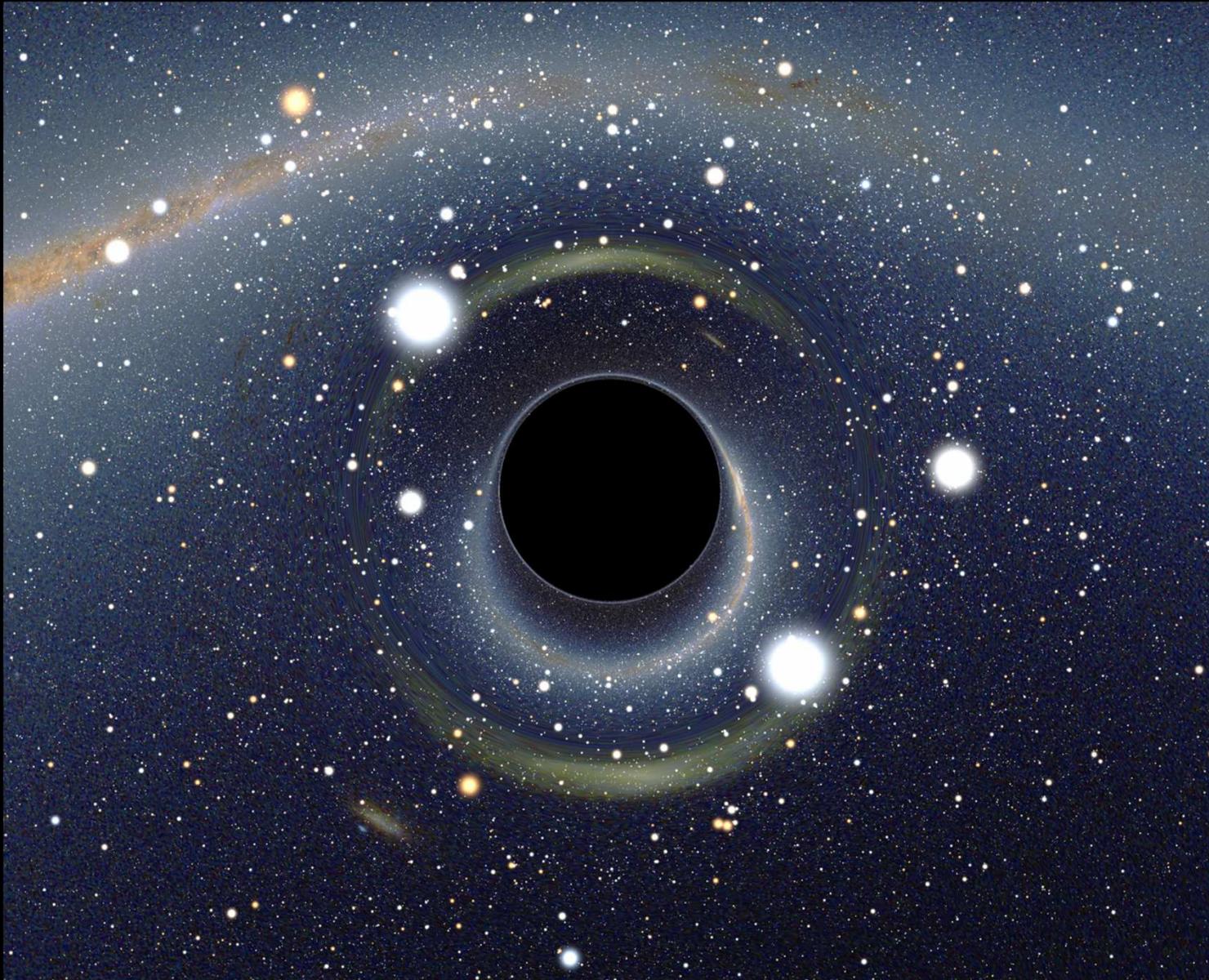
Le trou noir Sagittaire A*



Un aspirateur? Non!

Des étoiles orbitent autour du trou noir central de la Voie Lactée sans être aspirées. C'est leur vitesse latérale qui empêche leur chute.

A quoi ressemble un trou noir vu de près?



Crédit: Alain Riazuelo

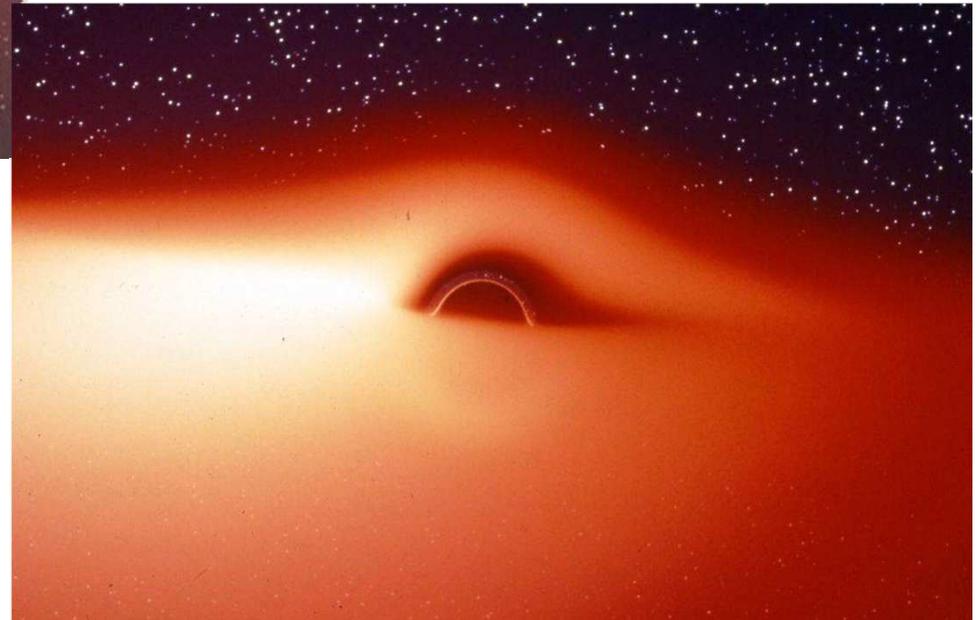
A quoi ressemble un trou noir vu de près?



Trou noir accrétant (Crédit J. P. Luminet, 1979)



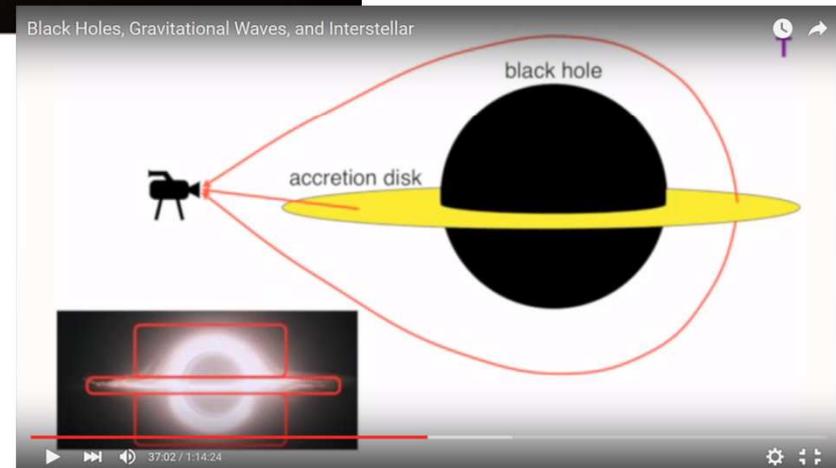
(Crédit J. P. Luminet, J.A. Marck)



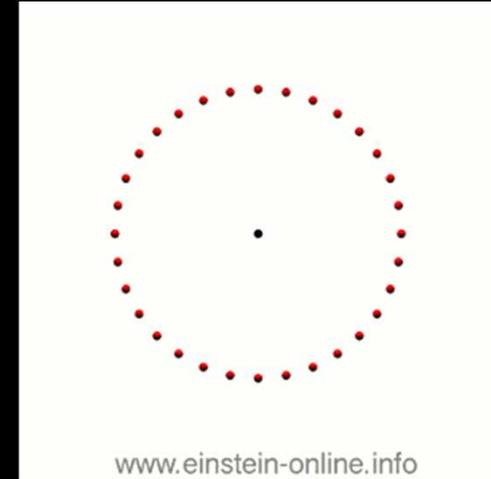
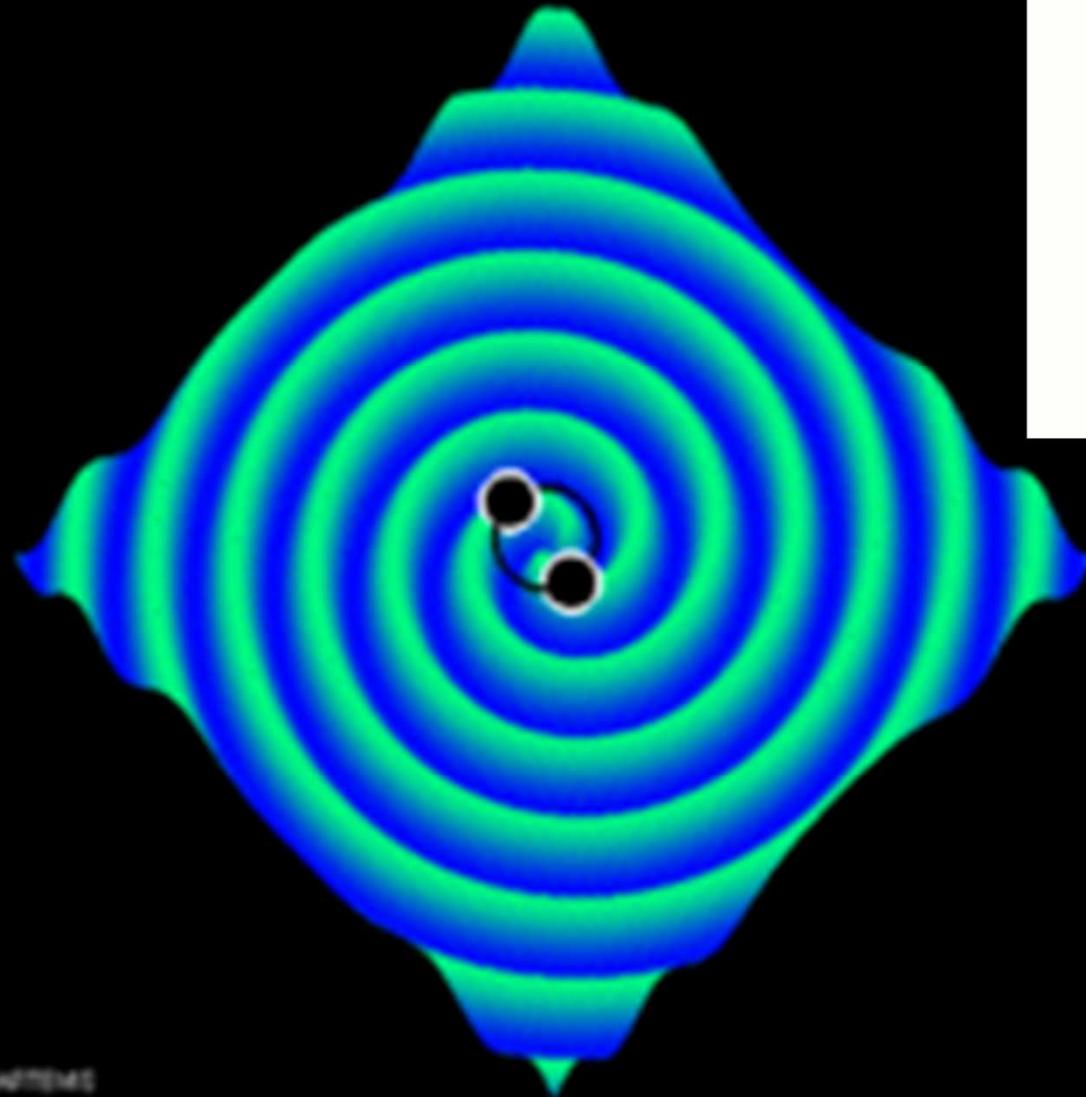
A quoi ressemble un trou noir vu de près?



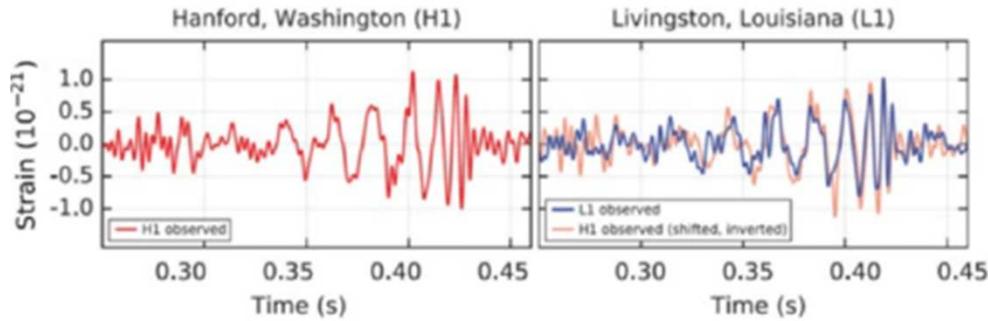
« Gargantua » dans le film « Interstellar »



Ondes gravitationnelles



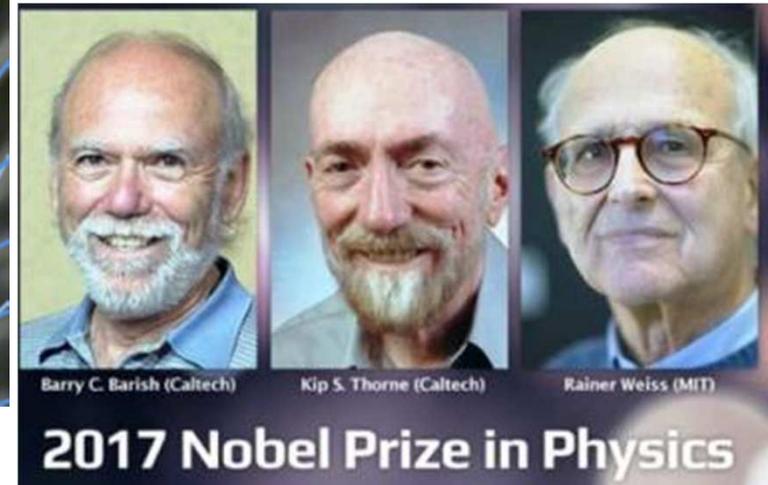
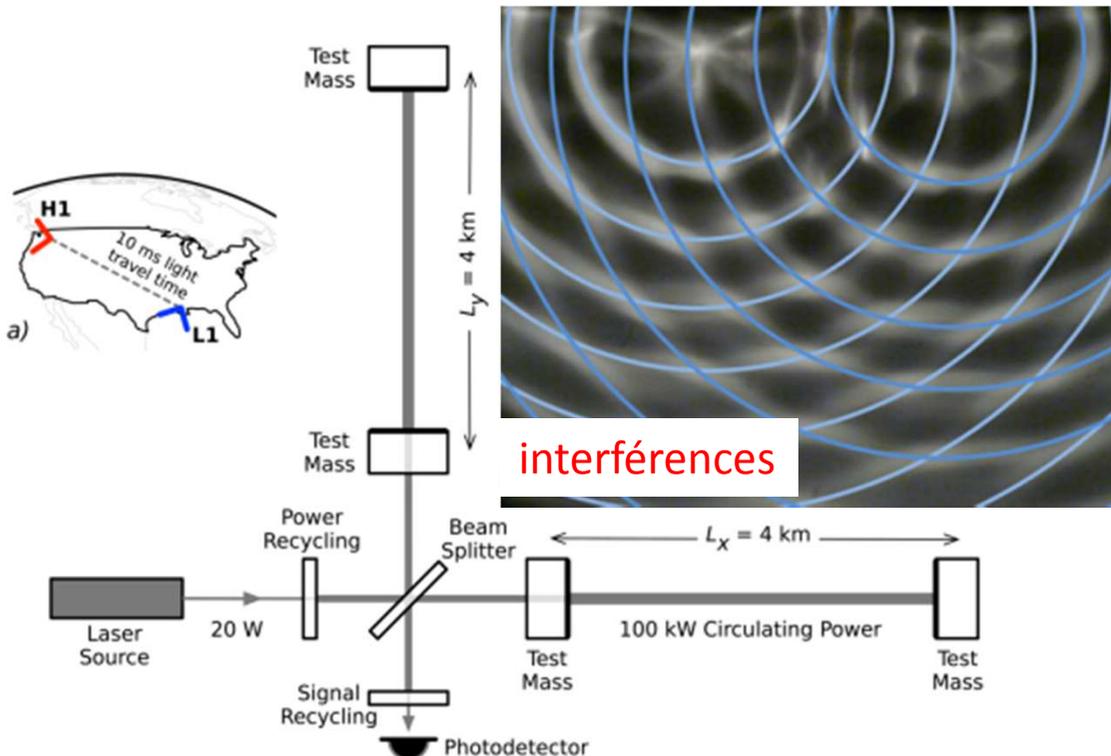
GW150914



Amplitude: $\Delta L/L \sim 10^{-21}$

14 Septembre 2015: détection de la fusion de deux trous noirs de 36 et 29 masses solaires (M_{\odot}) en un trou noir de 62 M_{\odot} à $1.3 \cdot 10^9$ al.

Energie libérée en ondes gravitationnelles: $3 M_{\odot} c^2$

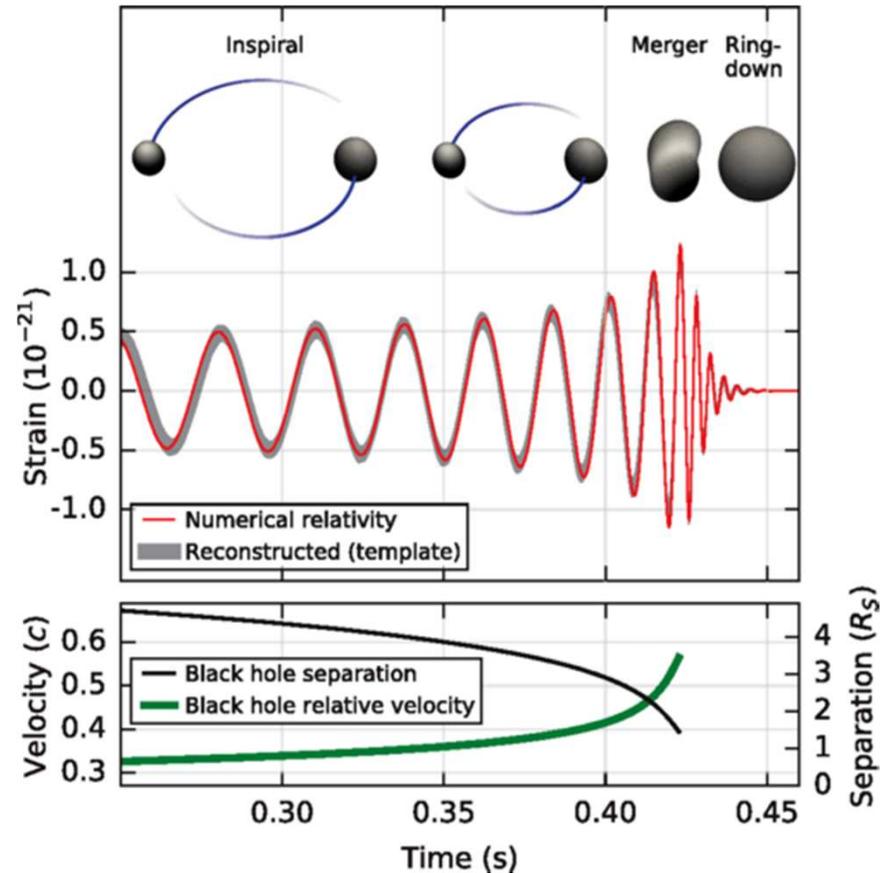
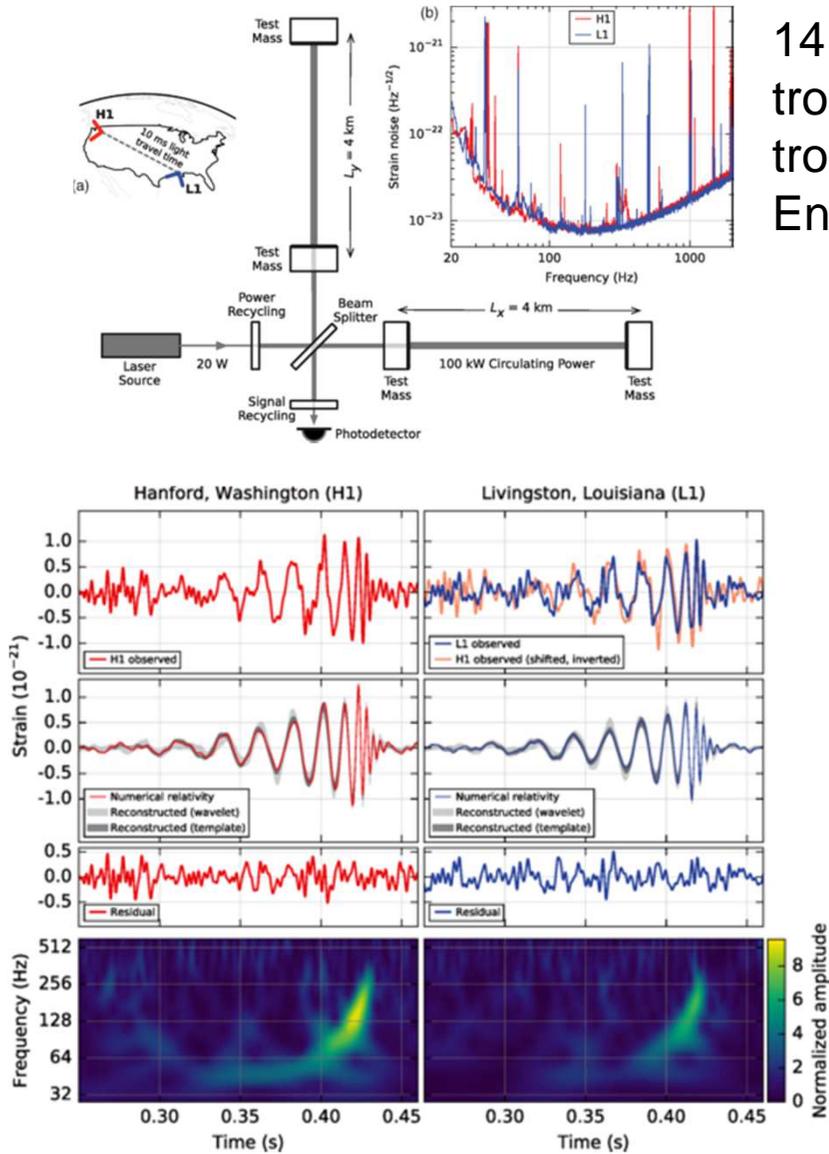




Première détection directe des ondes gravitationnelles par LIGO



14 Septembre 2015: détection de la fusion de deux trous noirs de 36 et 29 masses solaires (M_{\odot}) en un trou noir de 62 M_{\odot} à $1.3 \cdot 10^9$ al.
 Energie libérée en ondes gravitationnelles: $3 M_{\odot} c^2$





Quasars, blazars et sursauts gamma

Jet optique de M87 (Curtiss, 1918)



Hubble heritage

Galaxies, galaxies actives, quasars



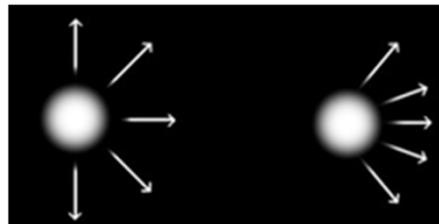
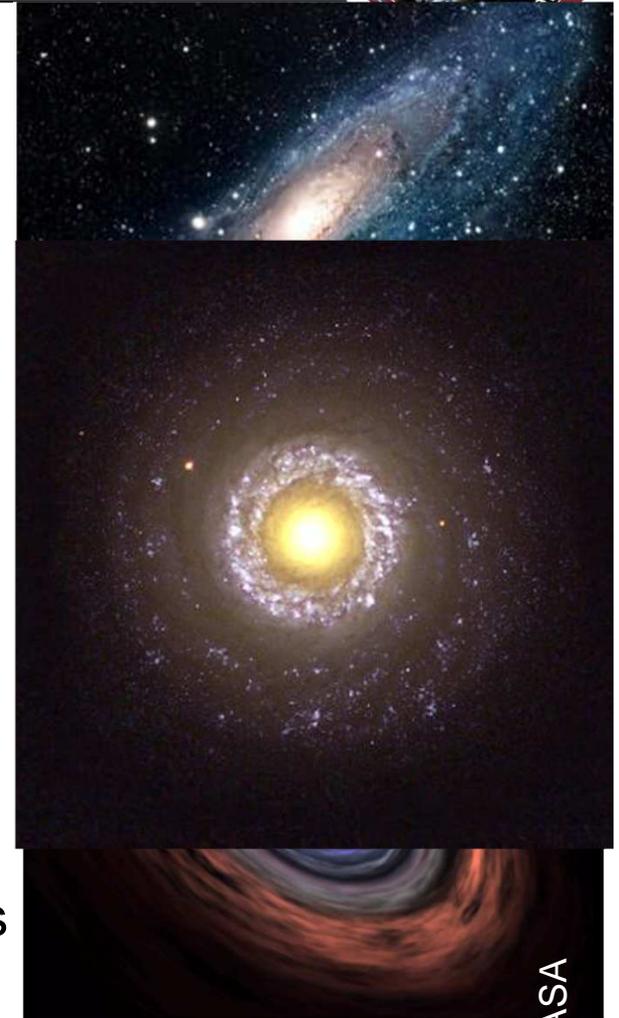
Galaxie:

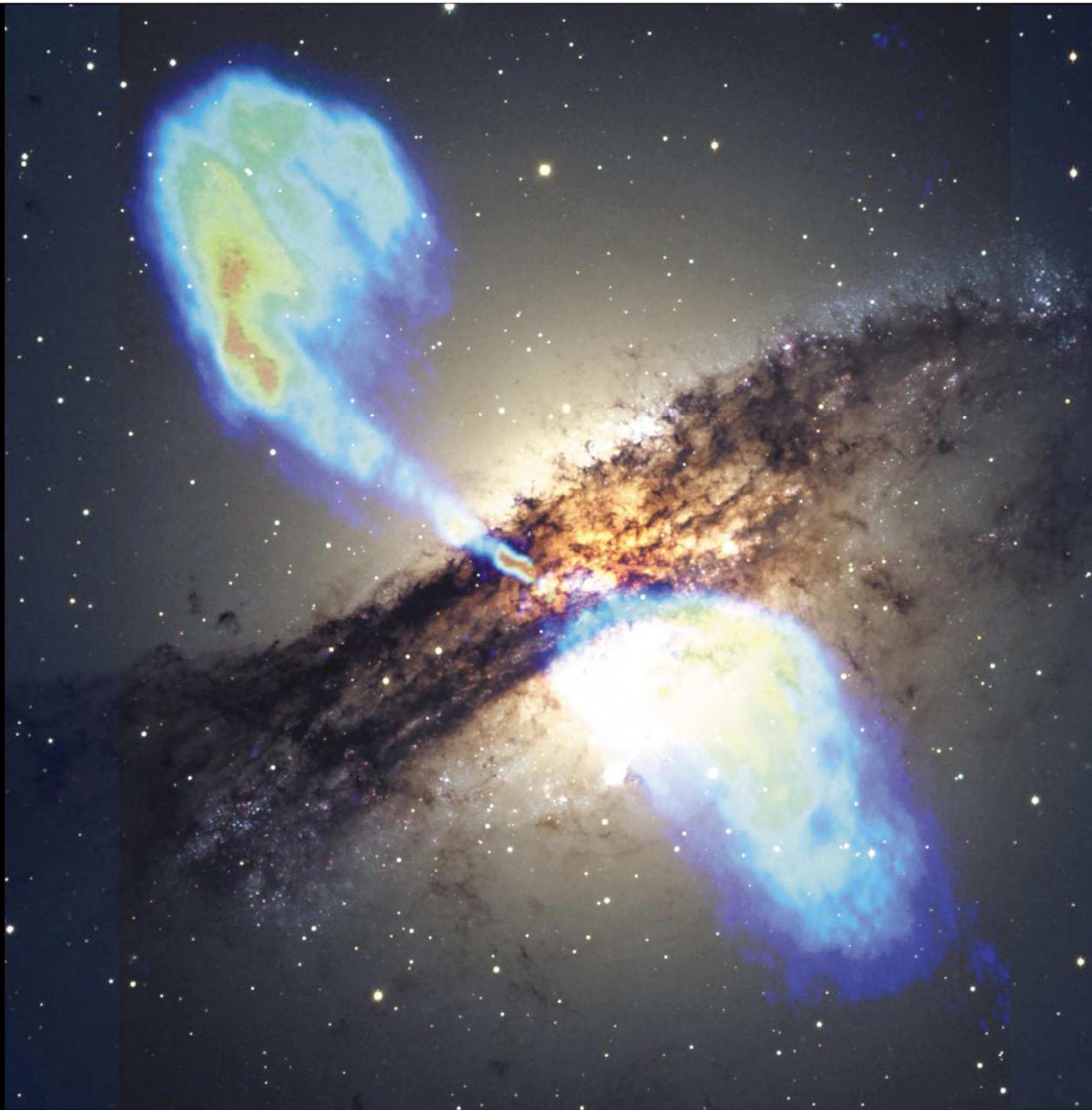
Groupe de centaines de milliards d'étoiles
Environ 100 milliards de galaxies dans
l'Univers

Galaxie active: galaxie très lumineuse en son centre
Trou noir « supermassif » attirant de la matière (gaz,
poussière) d'un disque qui l'entoure: **quasar**

Une partie de la matière peut être éjectée via un jet
très rapide que l'on peut détecter en ondes radio:
radiogalaxies

Blazar: radiogalaxie dont le jet est dirigé vers la
Terre. Amplification de la luminosité et de l'énergie des
rayonnements



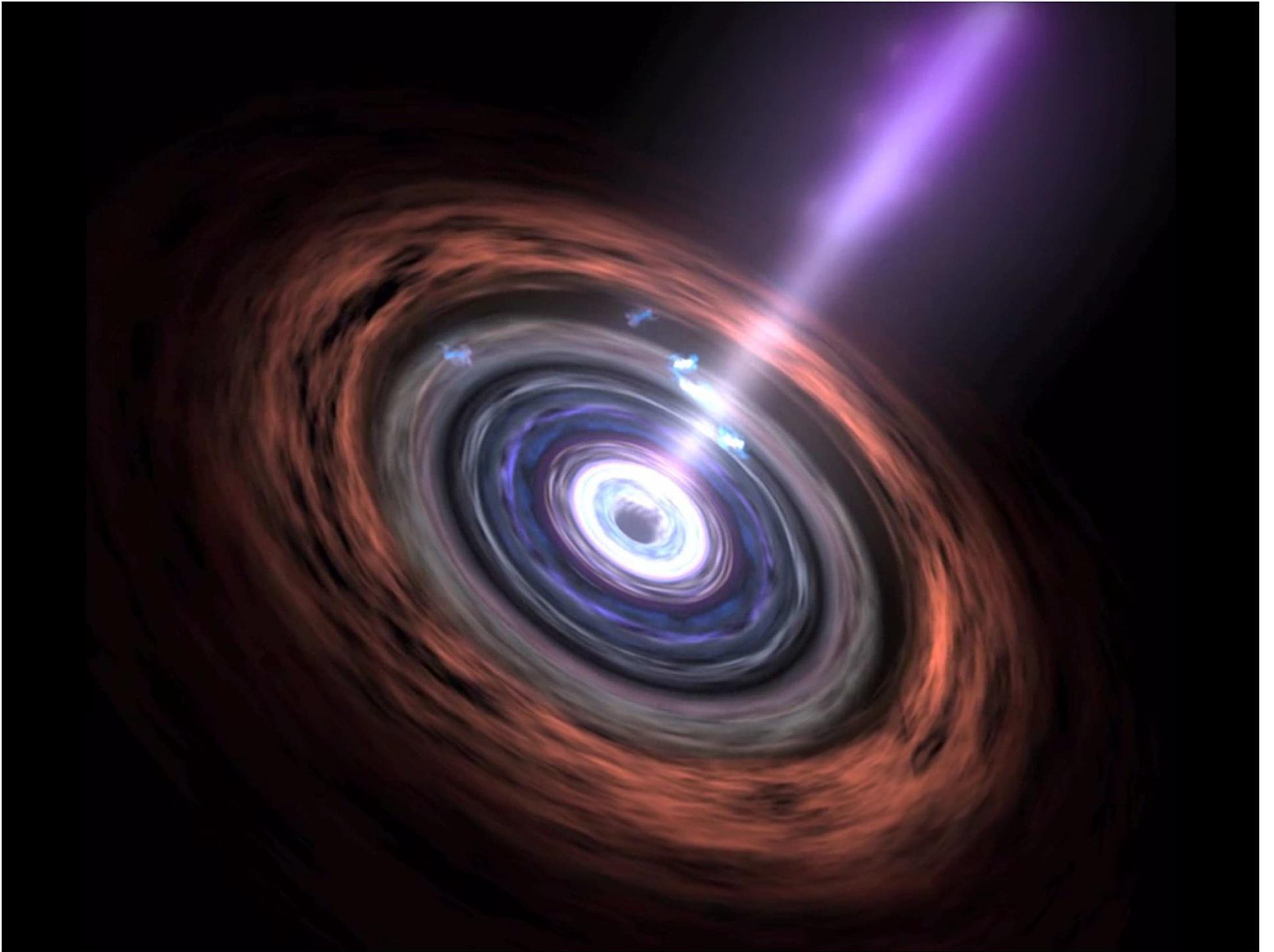


Centaurus A Radio Galaxy (VLT KUEYEN + FORS2)

ESO PR Photo 05b/00 (8 February 2000)

© European Southern Observatory

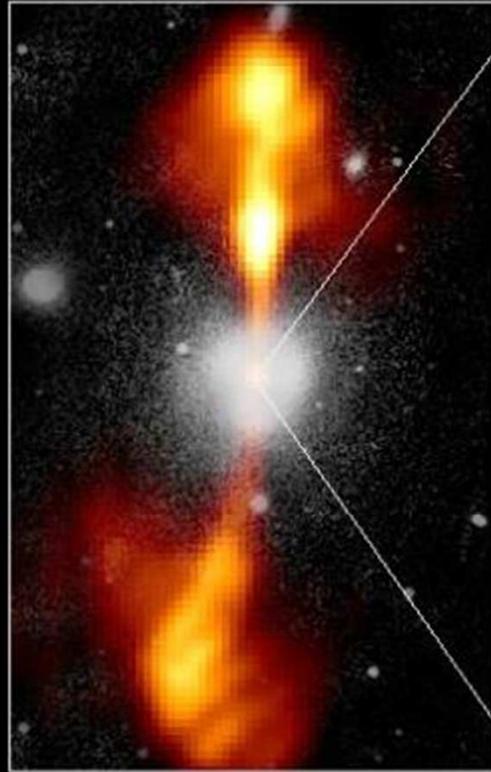




Core of Galaxy NGC 4261

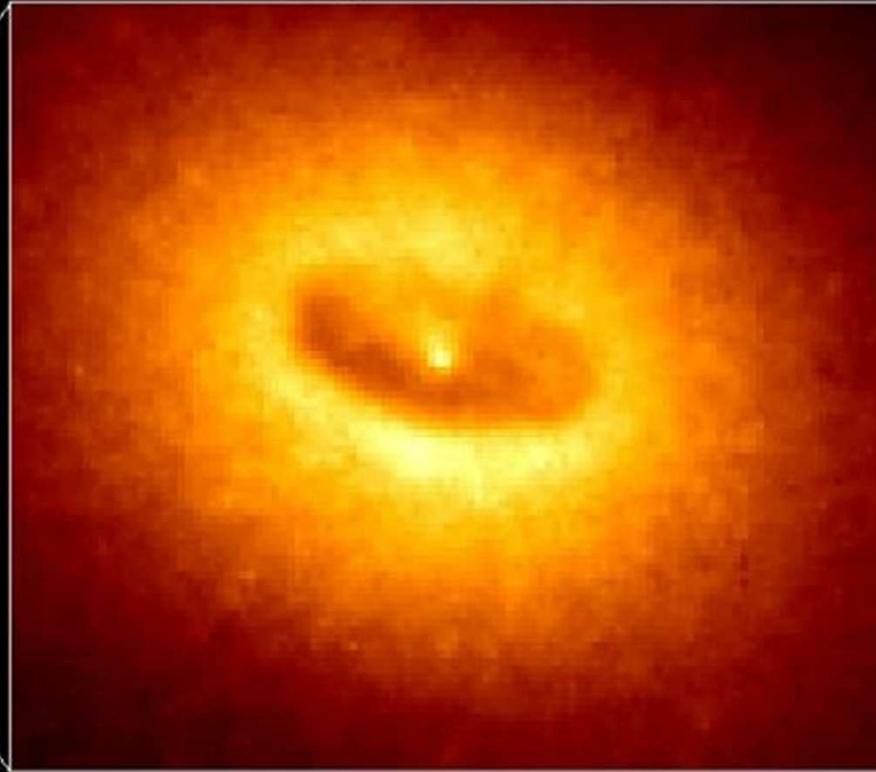
Hubble Space Telescope
Wide Field / Planetary Camera

Ground-Based Optical/Radio Image



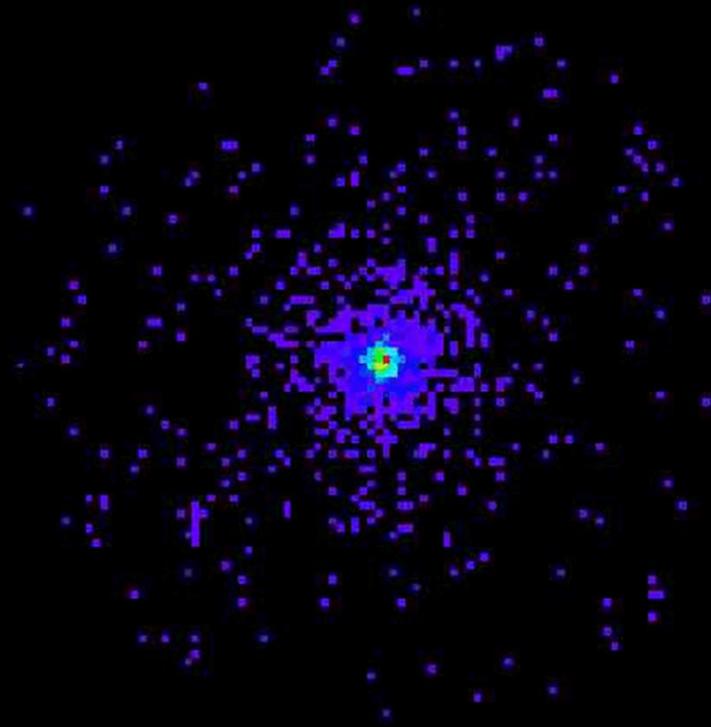
380 Arc Seconds
88,000 LIGHTYEARS

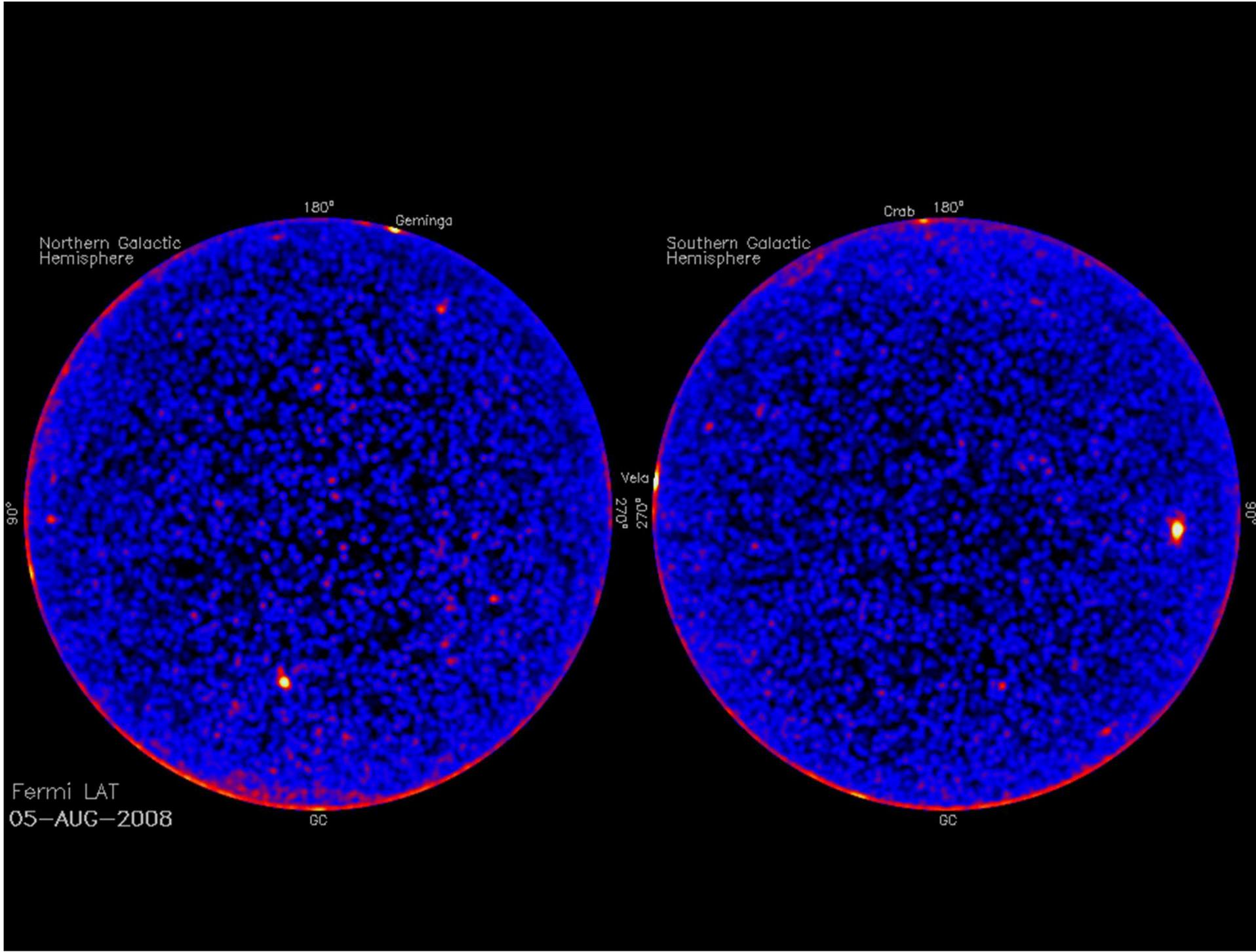
HST Image of a Gas and Dust Disk



17 Arc Seconds
400 LIGHTYEARS

**Un quasar: un trou noir
supermassif à l'œuvre
(données Fermi-LAT 3C 454.3)**

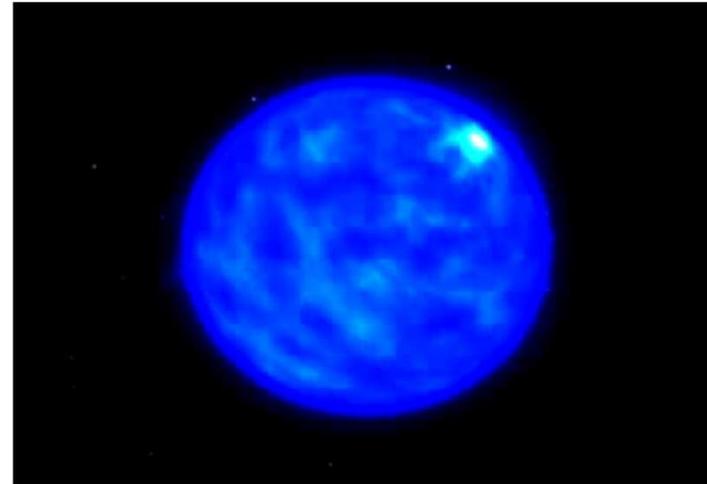
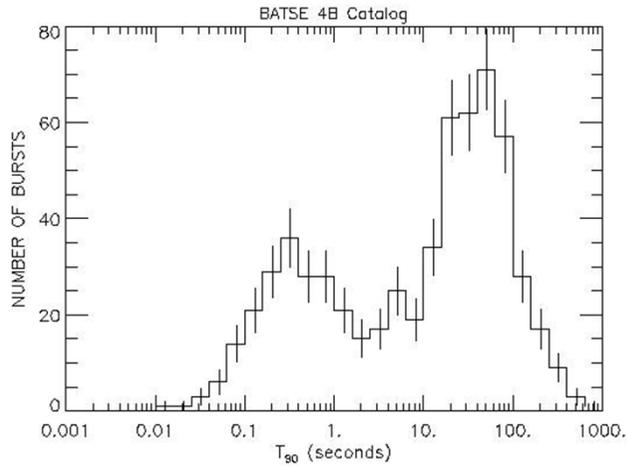




Sursauts Gamma - Gamma-ray bursts (GRB)

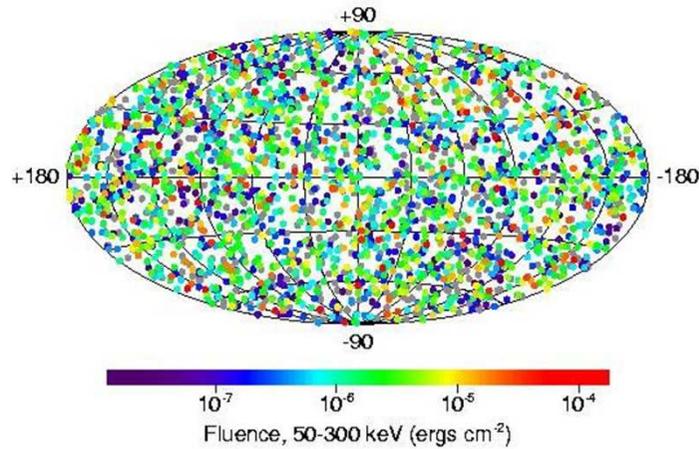


longs: hypernova/collapsar

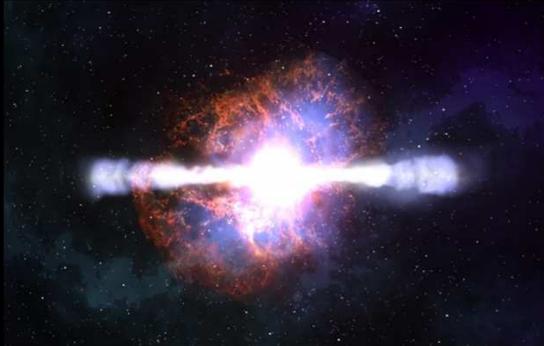


courts: coalescence d'objets compacts

2704 BATSE Gamma-Ray Bursts

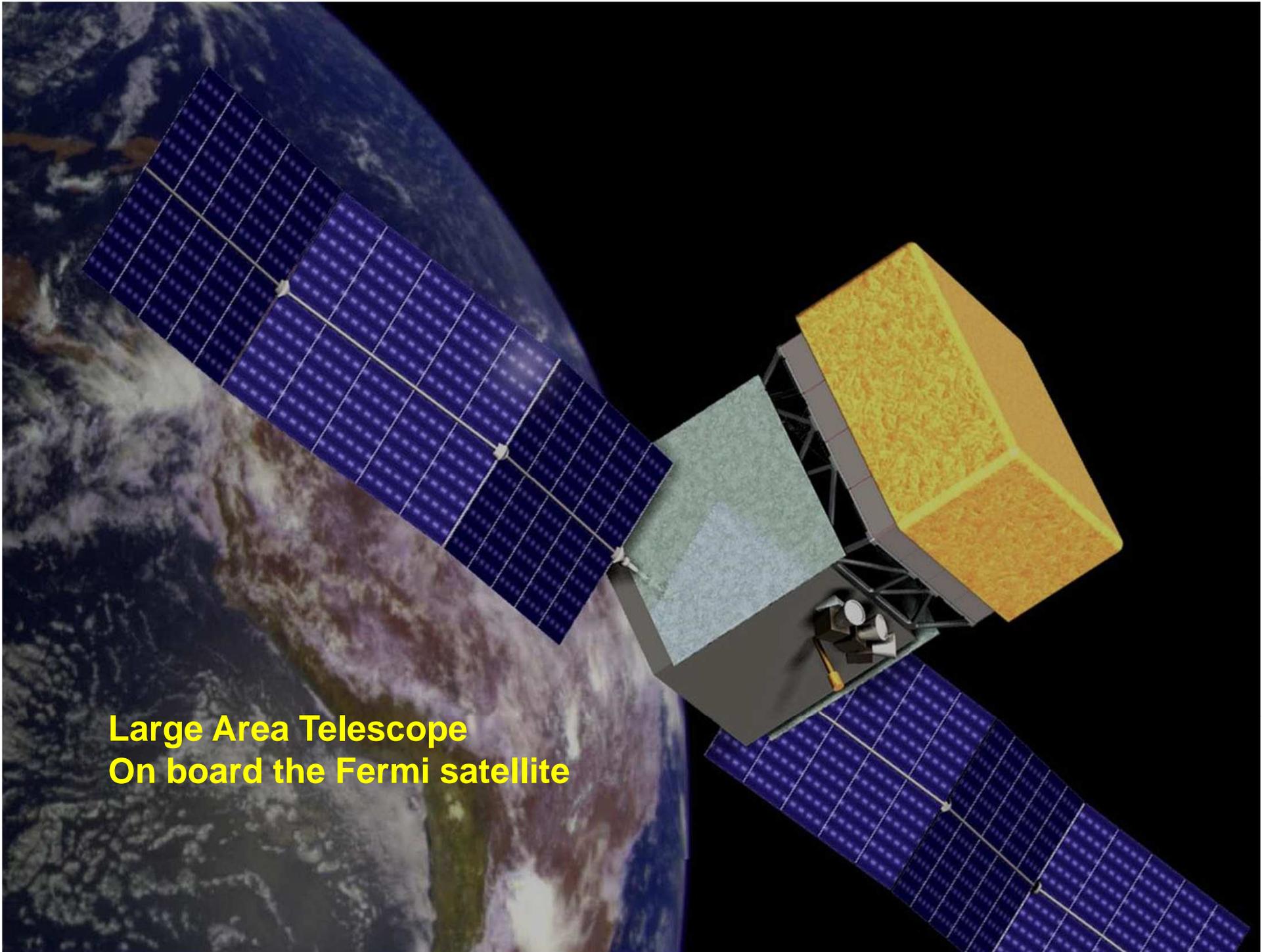


La naissance d'un trou noir: un sursaut gamma





Cosmax
*« Le ciel en rayons gamma
visible par tous »*
Masterclasse

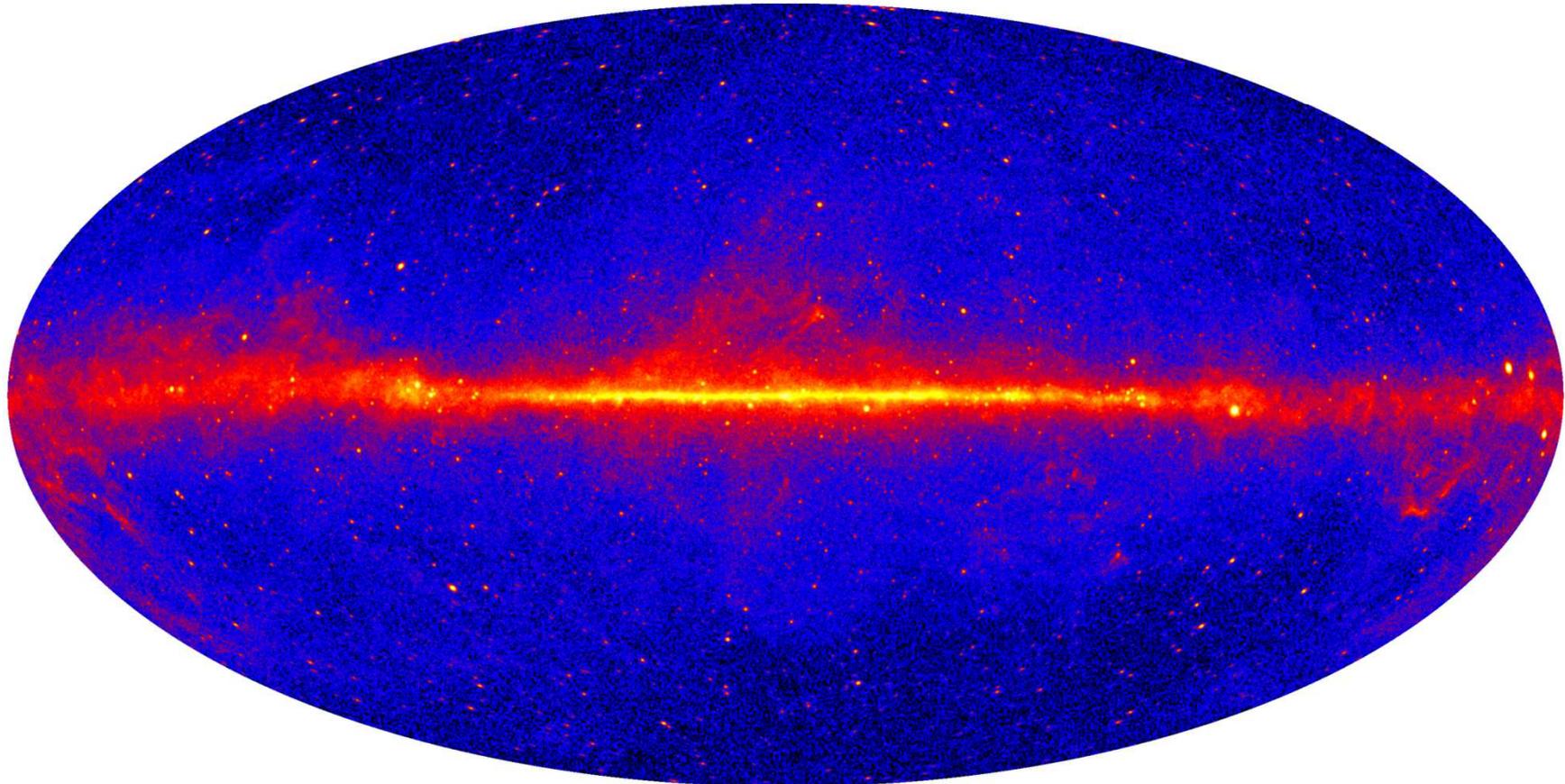


**Large Area Telescope
On board the Fermi satellite**

The sky seen by Fermi

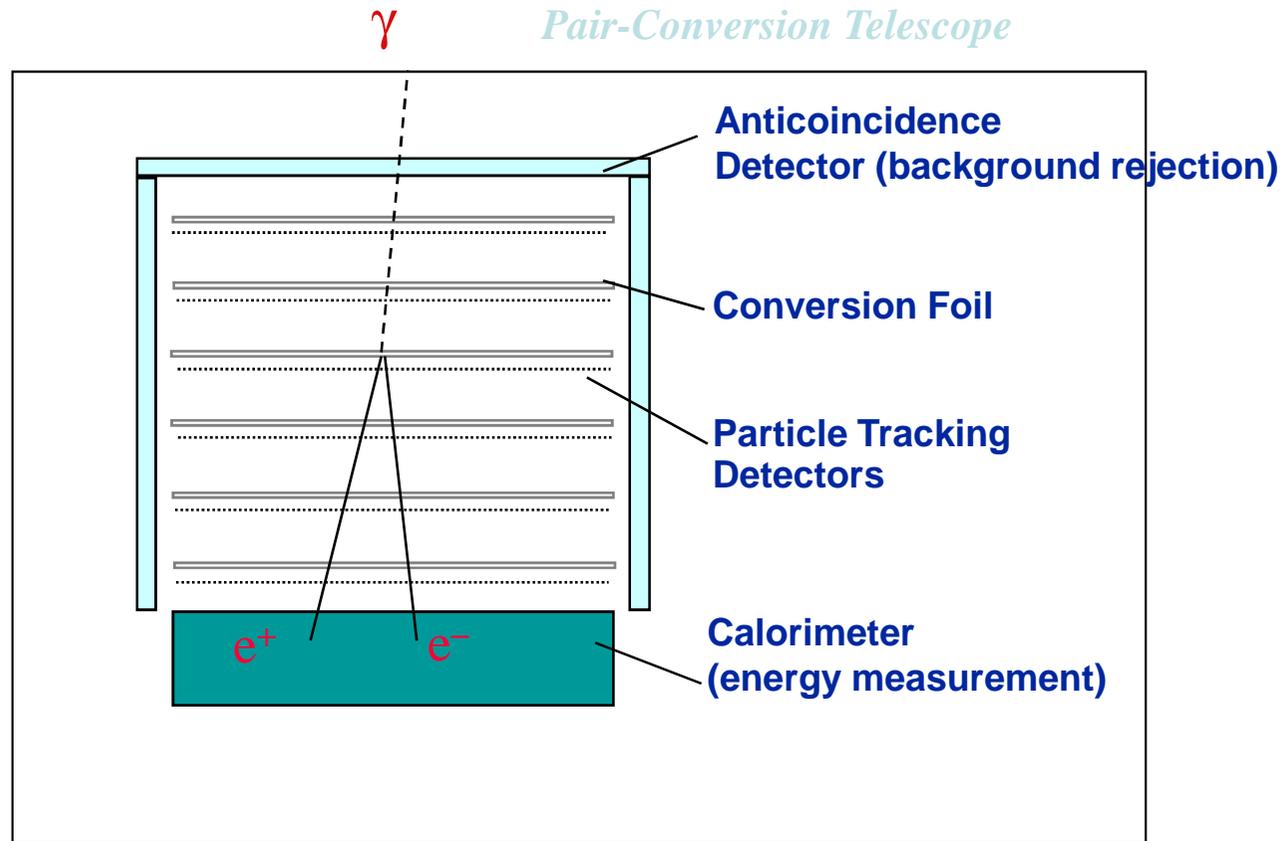


Sky map using $E > 1$ GeV photons collected in 4 years



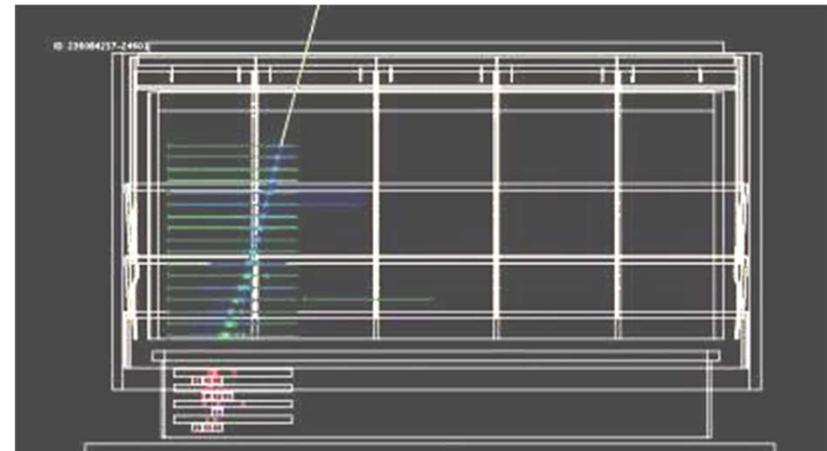
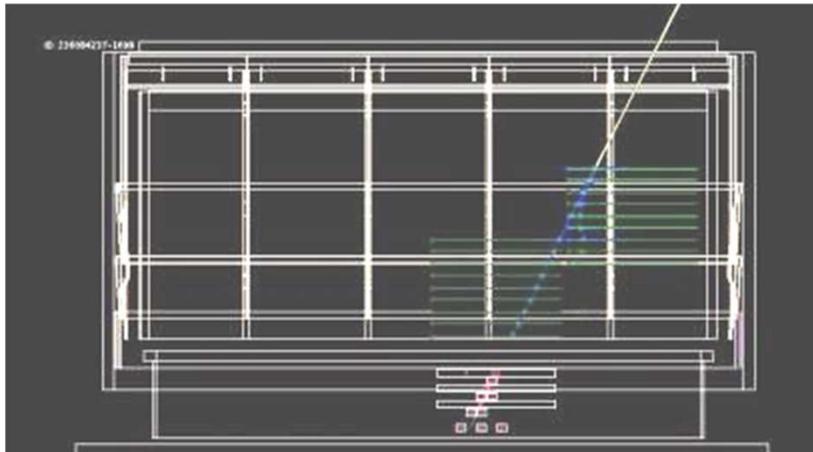
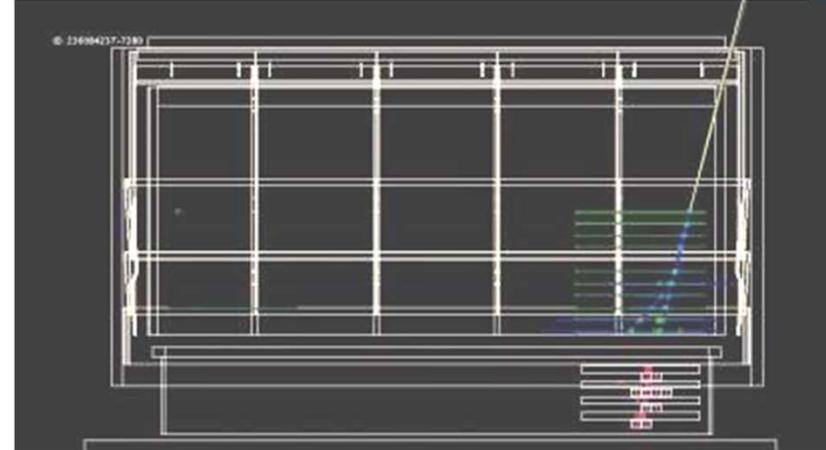
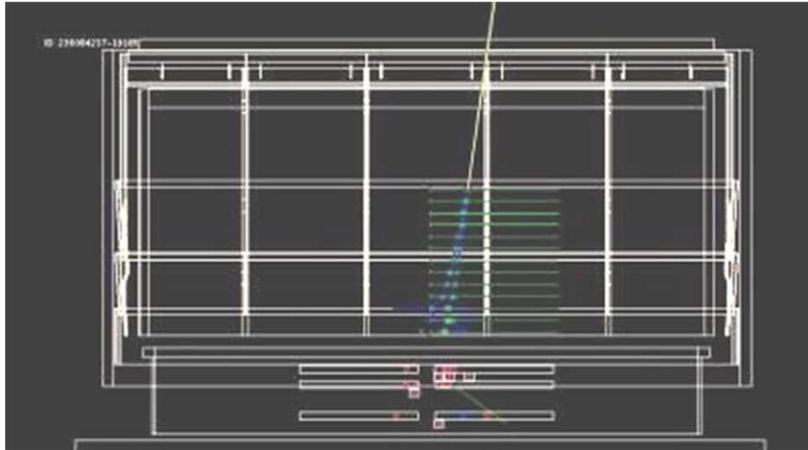
The diffuse background is made of photons coming from the interaction of cosmic rays with matter (dust, gas) present in the Milky Way. Point sources are also visible.

Le Fermi Large Area Telescope (LAT)

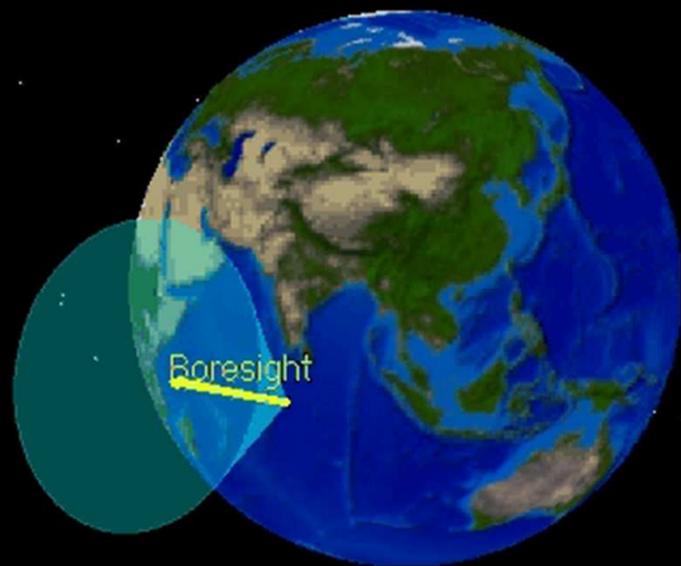


Les photons gamma interagissent avec la matière par production de paires électron-positon ($E=mc^2$). Le LAT est un détecteur de particules.

Photons gamma dans le LAT



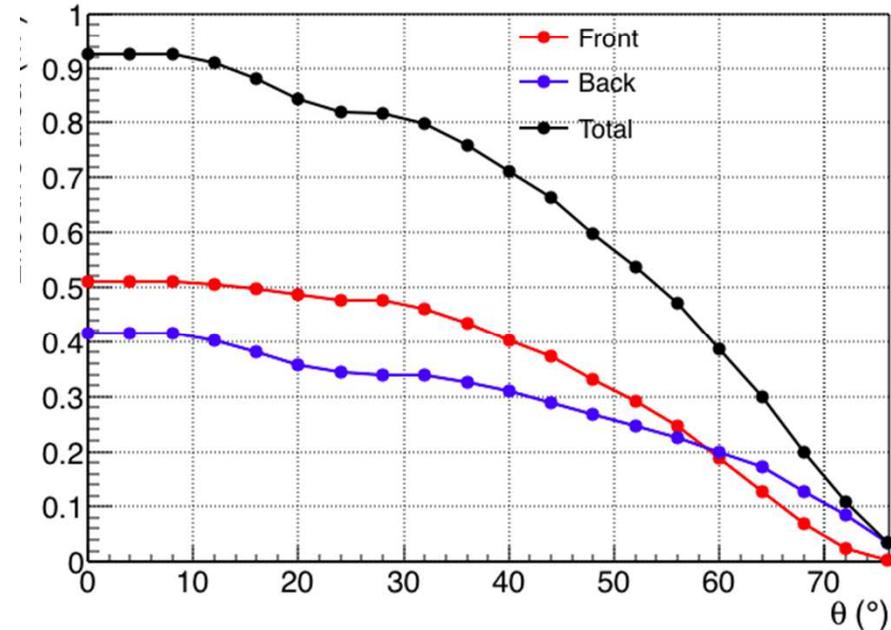
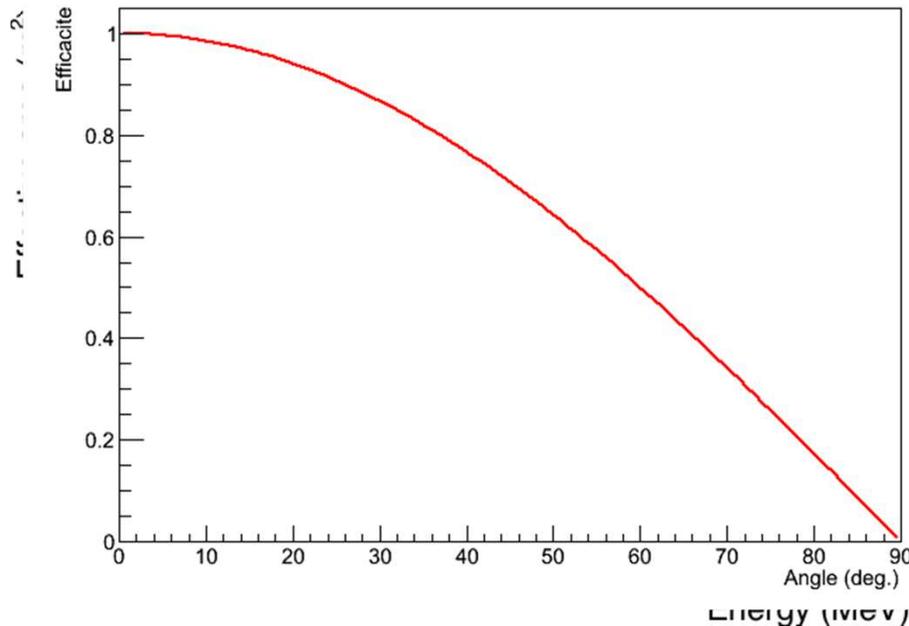
Les croix vertes indiquent les positions détectées des particules chargées, les lignes bleues indiquent les trajectoires reconstruites à partir des traces, et la ligne jaune montre la direction estimée du photon gamma. Les croix rouges indiquent les dépôts d'énergie détectés dans le calorimètre.



Performances du LAT



P8R2_SOURCE_V6 effective area at 10 GeV, averaged over ϕ



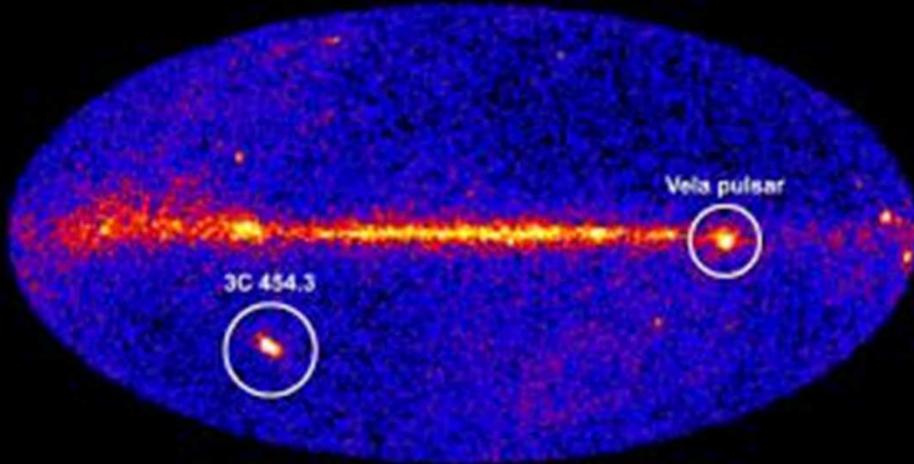
Surface de collection

Elle dépend de l'énergie (pourquoi?) et de l'angle que fait le rayon gamma avec l'axe du télescope. Si le détecteur était infiniment fin et enregistrerait toute particule qui le touchait de manière uniforme, sa surface effective varierait comme le cosinus de l'angle.

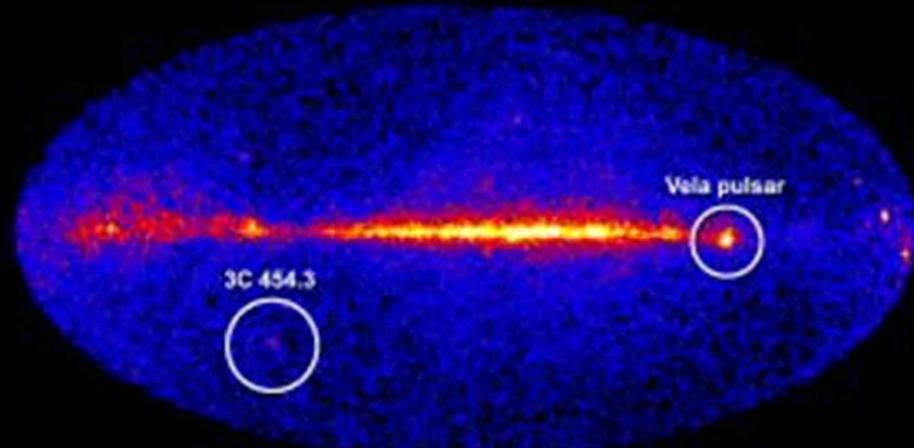
Résolution angulaire

Une source ponctuelle dans le ciel ne l'est pas dans les données. Le télescope n'est capable de mesurer la direction d'arrivée du photon qu'avec une certaine précision (« résolution angulaire »). Celle-ci est de l'ordre d'un degré à 100 MeV mais s'améliore avec l'énergie. Les sources ponctuelles apparaissent sous forme de taches plus ou moins étendues sur les cartes.

Blazar 3C 454.3's Record Flare

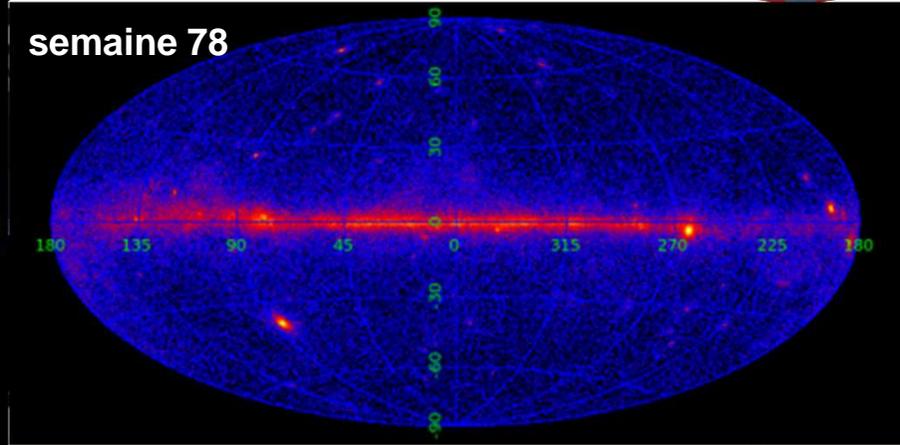


December 2, 2009



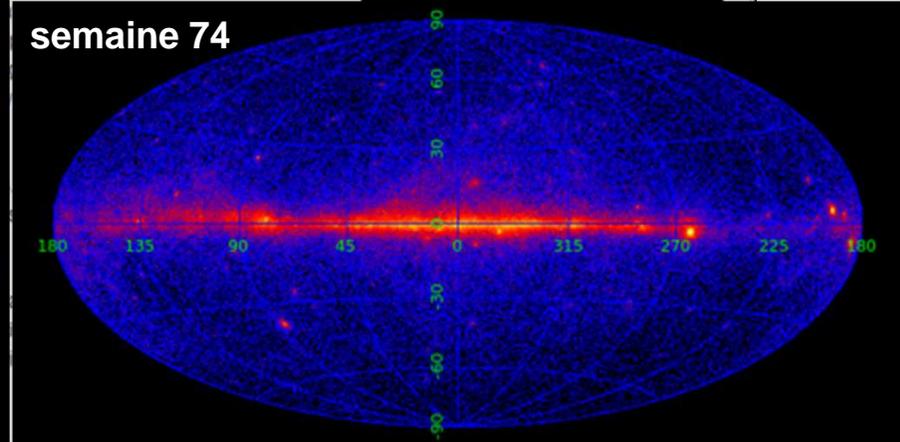
November 3, 2009

semaine 78



12.08.09

semaine 74



positively directed jets of particles
 ater falls toward their central
 blazar so bright in gamma rays is its
 aimed straight at us.

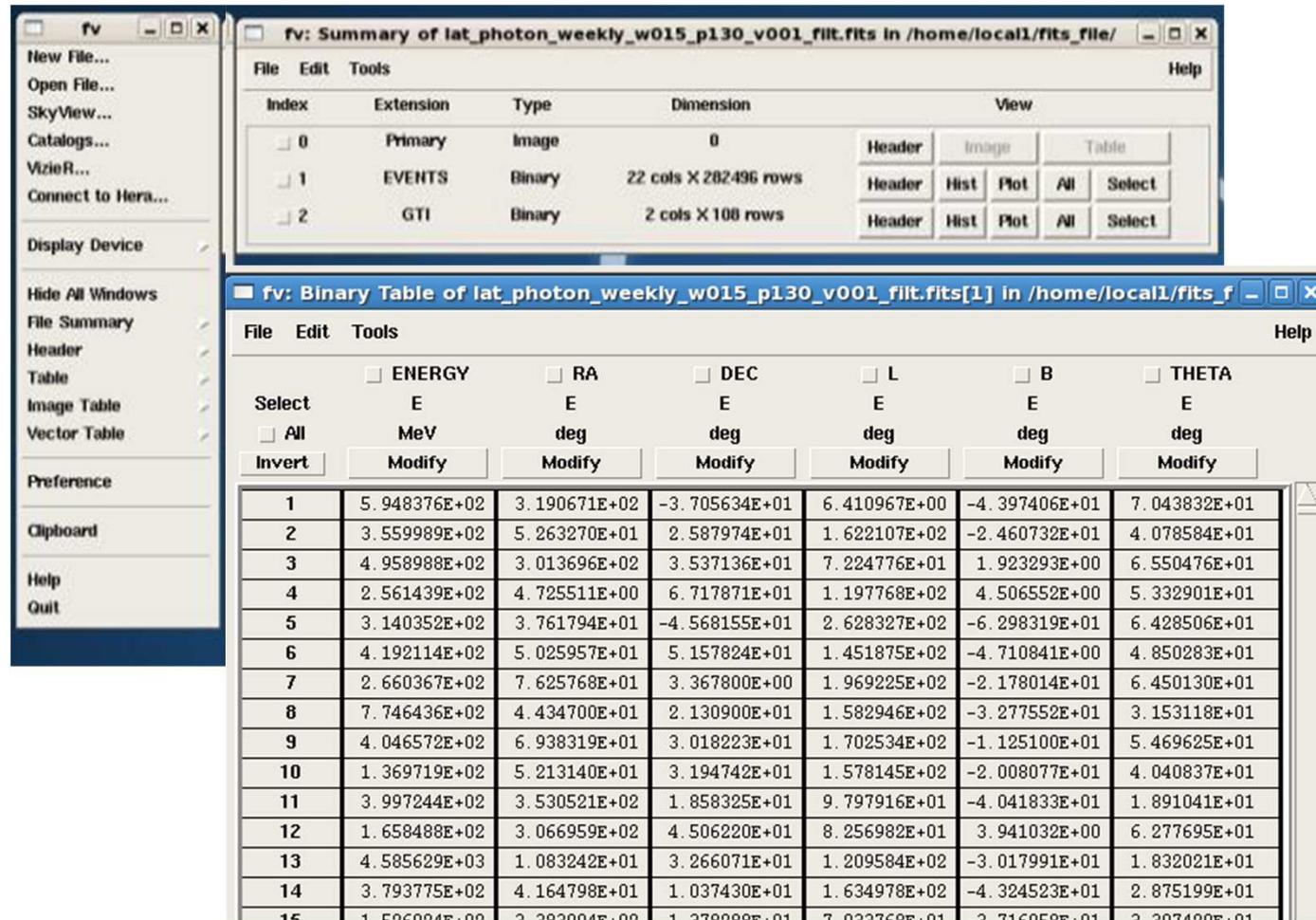
Unprecedented flares from the blazar 3C 454.3 in the constellation Pegasus now make it the brightest persistent

The Fermi-LAT data



Explore a weekly data file with the command fv (fits viewer)

➤ fv fits_file/lat_photon_weekly_w074_p302_v001_filt.fits



The screenshot shows the fv (fits viewer) interface. The top window displays a summary of the data file, and the bottom window displays a detailed table of the data.

fv: Summary of lat_photon_weekly_w015_p130_v001_filt.fits in /home/local1/fits_file/

Index	Extension	Type	Dimension	View
0	Primary	Image	0	Header Image Table
1	EVENTS	Binary	22 cols X 282496 rows	Header Hist Plot All Select
2	GTI	Binary	2 cols X 100 rows	Header Hist Plot All Select

fv: Binary Table of lat_photon_weekly_w015_p130_v001_filt.fits[1] in /home/local1/fits_f

Select	ENERGY	RA	DEC	L	B	THETA
<input type="checkbox"/> All	E	E	E	E	E	E
<input type="checkbox"/> Invert	MeV	deg	deg	deg	deg	deg
	Modify	Modify	Modify	Modify	Modify	Modify
1	5.948376E+02	3.190671E+02	-3.705634E+01	6.410967E+00	-4.397406E+01	7.043832E+01
2	3.559989E+02	5.263270E+01	2.587974E+01	1.622107E+02	-2.460732E+01	4.078584E+01
3	4.958988E+02	3.013696E+02	3.537136E+01	7.224776E+01	1.923293E+00	6.550476E+01
4	2.561439E+02	4.725511E+00	6.717871E+01	1.197768E+02	4.506552E+00	5.332901E+01
5	3.140352E+02	3.761794E+01	-4.568155E+01	2.628327E+02	-6.298319E+01	6.428506E+01
6	4.192114E+02	5.025957E+01	5.157824E+01	1.451875E+02	-4.710841E+00	4.850283E+01
7	2.660367E+02	7.625768E+01	3.367800E+00	1.969225E+02	-2.178014E+01	6.450130E+01
8	7.746436E+02	4.434700E+01	2.130900E+01	1.582946E+02	-3.277552E+01	3.153118E+01
9	4.046572E+02	6.938319E+01	3.018223E+01	1.702534E+02	-1.125100E+01	5.469625E+01
10	1.369719E+02	5.213140E+01	3.194742E+01	1.578145E+02	-2.008077E+01	4.040837E+01
11	3.997244E+02	3.530521E+02	1.858325E+01	9.797916E+01	-4.041833E+01	1.891041E+01
12	1.658488E+02	3.066959E+02	4.506220E+01	8.256982E+01	3.941032E+00	6.277695E+01
13	4.585629E+03	1.083242E+01	3.266071E+01	1.209584E+02	-3.017991E+01	1.832021E+01
14	3.793775E+02	4.164798E+01	1.037430E+01	1.634978E+02	-4.324523E+01	2.875199E+01
15	1.596024E+02	3.383004E+02	1.378288E+01	7.033768E+01	-3.716058E+01	3.307420E+01

Machine virtuelle



Player ▾ | Applications Places System | 6:52 PM

fv: Summary of CTA102_604800.lc in /mnt/hgfs/Echanges/temp/

Index	Extension	Type	Dimension	View
<input type="checkbox"/> 0				
<input type="checkbox"/> 1	LIG			

File Edit Tools

Terminal

```

usage: Date_to_MET hour minute second day month year
<62>local1:localhost.localdomain% python Date_to_MET.py 0 0 0
usage: Date_to_MET heure minute seconde jour mois annee
<63>local1:localhost.localdomain% python Date_to_MET.py 0 0 0
2017-09-04 00:00:00
MET: 526176000
MJD: 58000.0
semaine/week: 483
<64>local1:localhost.localdomain% fv /mnt/hgfs/Echanges/temp/

Suspended
<65>local1:localhost.localdomain% bg
[1] /home/local1/bin/fv5.3/fv /mnt/hgfs/Echanges/temp/CTA102_604800.lc
<66>local1:localhost.localdomain% python MET2date.py 5.044e8
2016-12-25 23:06:40
MD: 5837.96296296
MJD: 57747.962963
<67>local1:localhost.localdomain% python Date_to_MET.py 0 0 0
2016-12-25 00:00:00
MET: 504316800
MJD: 57747.0
semaine/week: 447
<68>local1:localhost.localdomain%
  
```

Terminal

```

File Edit View Terminal Tabs Help
gtbin: WARNING: No spacecraft file: EXPOSURE keyword will be set equal to ontime
.
Nombre de photons: 357714
<94>local1:localhost.localdomain% fetch 501
fichier stocke dans/file stored into: /mnt/hgfs/Echanges/cosmax/fits_file/
wget -nH --cut-dirs=6 -r -l0 -c -N -np -R 'index*' -erobots=off --retr-symlinks
http://heasarc.gsfc.nasa.gov/FTP/fermi/data/lat/weekly/lat_photon_weekly_w501_p302_v001.fits
--2018-01-16 18:34:56-- http://heasarc.gsfc.nasa.gov/FTP/fermi/data/lat/weekly/
photon//lat_photon_weekly_w501_p302_v001.fits
Resolving heasarc.gsfc.nasa.gov... 129.164.179.23, 2001:4d0:2310:150::23
Connecting to heasarc.gsfc.nasa.gov|129.164.179.23|:80... connected.
HTTP request sent, awaiting response... 301 Moved Permanently
Location: https://heasarc.gsfc.nasa.gov/FTP/fermi/data/lat/weekly/lat_photon_weekly_w501_p302_v001.fits [following]
--2018-01-16 18:34:57-- https://heasarc.gsfc.nasa.gov/FTP/fermi/data/lat/weekly/
photon//lat_photon_weekly_w501_p302_v001.fits
Connecting to heasarc.gsfc.nasa.gov|129.164.179.23|:443... connected.
HTTP request sent, awaiting response... 200 OK
Length: 193728960 (185M) [application/fits]
Saving to: `lat_photon_weekly_w501_p302_v001.fits'

0% [          ] 29,519      14.0K/s
95>local1:localhost.localdomain%
  
```

Gamma-ray

La suite COSMAX



- **Basée sur les propriétés uniques des données LAT: publiques, tout le ciel, « simples », disponibles immédiatement.**
- **Suite de scripts (python) permettant à un non-initié d'explorer et d'utiliser simplement ces données**
- **Préinstallée sur une machine Linux virtuel (VMWare ou VirtualBox) ou disponible sous forme de « tarball » Linux**
- **Fonctionnalités:**
 - Télécharger les données
 - Explorer les données
 - Créer des cartes du ciel, des courbes de lumière, des animations
 - Etudier les spectres des sources
 - Consulter les blogs de Fermi...
- **Présentée à des professeurs, des astronomes amateurs, des scientifiques....**
- **Tutoriel: <ftp://www.cenbg.in2p3.fr/astropart/VM/cosmax.pdf>**

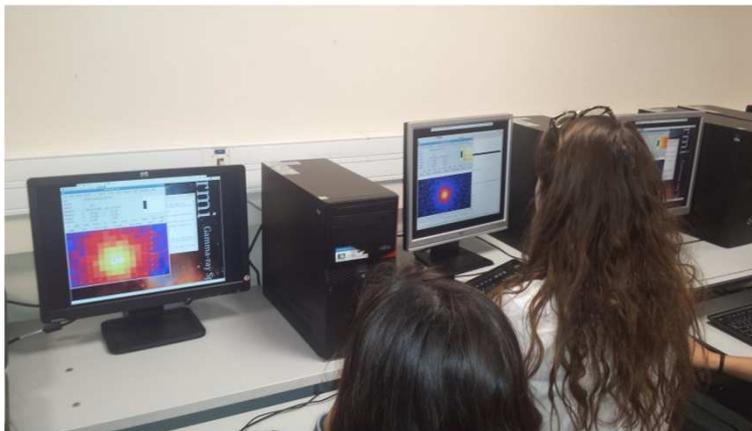
Masterclasse



Une journée, un chercheur/classe, qui explique la Science, le détecteur, les données, et guide l'analyse des données avec les élèves. Classes de T et 1^{ère}.

Ex: Etude d'une éruption de blazar

Nombre de photons → flux de photons → flux d'énergie → luminosité



Exercice sur le soleil



Le flux d'énergie du soleil mesuré sur la Terre est d'environ 1 kW m^{-2} , estimer:

- le nombre de photons par s et m^2

($\lambda=550 \text{ nm}$, $h=6.63 \times 10^{-34} \text{ Js}$)

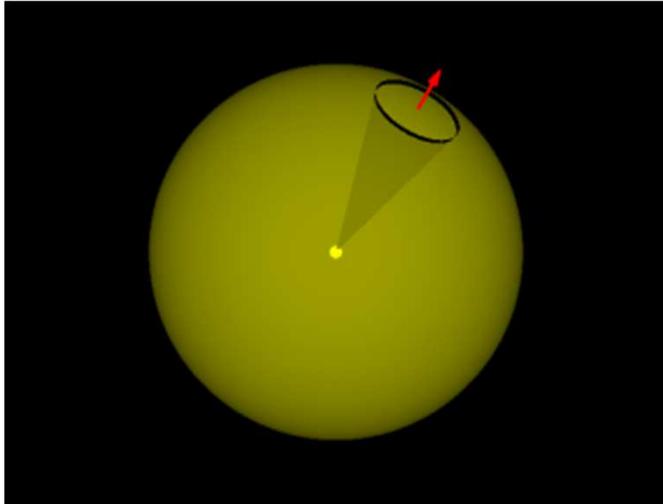
$E=hc/\lambda = 3.6 \times 10^{-19} \text{ J}$ (=2.3 eV)

- $N=1\text{kJ}/E = 2.8 \times 10^{21} \text{ photons/m}^2 \text{ s}$

- la luminosité du soleil (distance = $150 \times 10^6 \text{ km}$).

réponse: $2.8 \times 10^{26} \text{ W}$ (vraie réponse: $4 \times 10^{26} \text{ W}$)

Flux et luminosité



Le nombre de photons produit dans un cône par unité de temps reste constant et donc indépendant de la distance à la source. A une distance donnée, la surface interceptée par ce cône varie comme le carré de la distance.

Flux $F_p = N / S T$

$F_p =$ Flux (ph cm⁻² s⁻¹)

$N =$ Nombre de photons collectés

$S =$ Surface de collection (cm²)

$T =$ Temps de collection (s)

Flux d'énergie $F_E = F_p E$

$F_E =$ Flux d'énergie (W cm⁻²)

$E =$ énergie moyenne des photons

1 MeV = 1.6 10⁻¹³ J

Fluence $F = N E / S$

$F =$ Fluence (J cm⁻²)

$N =$ Nombre de photons collectés

$S =$ Surface de collection (cm²)

Luminosité $L = 4 \pi d^2 F_E$

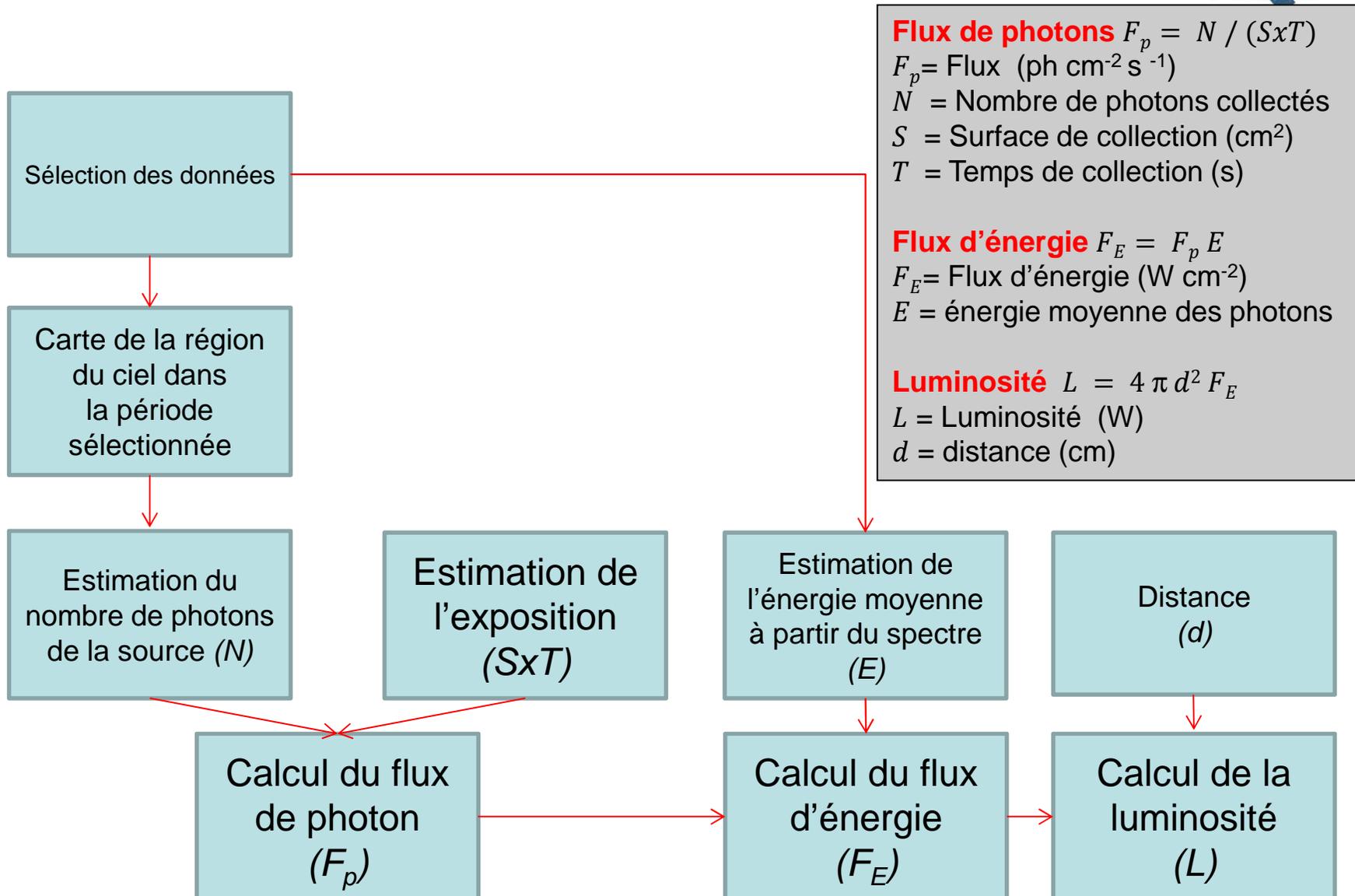
$L =$ Luminosité (W)

$d =$ distance (cm)

Luminosité du Soleil: 4 10²⁶ W

Luminosité de la Voie Lactée: 5 10³⁶ W

Analyses des données du LAT





Serveur des données du Fermi-LAT à la NASA



Index of /FTP/fermi/data/lat/weekly/

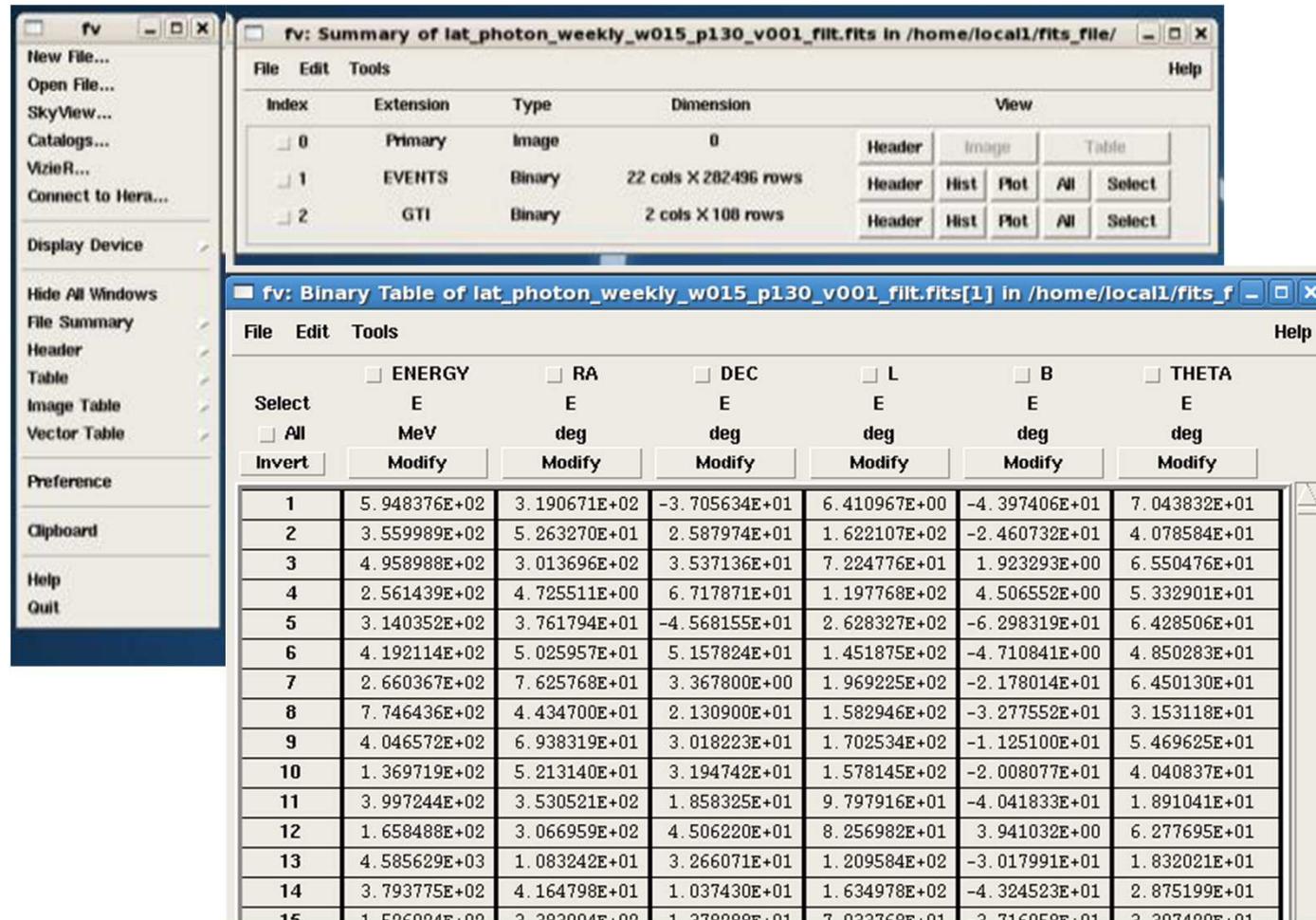
<u>Name</u>	<u>Last modified</u>	<u>Size</u>	<u>Description</u>
Parent Directory		-	
lat_photon_weekly_w009_p203_v001.fits	21-Apr-2014 15:49	10M	
lat_photon_weekly_w010_p203_v001.fits	21-Apr-2014 16:04	35M	
lat_photon_weekly_w011_p203_v001.fits	21-Apr-2014 16:22	34M	
lat_photon_weekly_w012_p203_v001.fits	21-Apr-2014 16:43	36M	
lat_photon_weekly_w013_p203_v001.fits	21-Apr-2014 16:59	36M	
lat_photon_weekly_w014_p203_v001.fits	21-Apr-2014 17:18	35M	
lat_photon_weekly_w015_p203_v001.fits	21-Apr-2014 17:38	34M	
lat_photon_weekly_w016_p203_v001.fits	21-Apr-2014 17:53	33M	
lat_photon_weekly_w017_p203_v001.fits	21-Apr-2014 18:08	50M	
lat_photon_weekly_w018_p203_v001.fits	21-Apr-2014 18:25	35M	
lat_photon_weekly_w019_p203_v001.fits	21-Apr-2014 18:43	35M	
lat_photon_weekly_w020_p203_v001.fits	21-Apr-2014 18:59	36M	
lat_photon_weekly_w021_p203_v001.fits	21-Apr-2014 19:19	34M	
lat_photon_weekly_w022_p203_v001.fits	21-Apr-2014 19:40	35M	
lat_photon_weekly_w023_p203_v001.fits	21-Apr-2014 19:57	33M	
lat_photon_weekly_w024_p203_v001.fits	21-Apr-2014 20:09	33M	
lat_photon_weekly_w025_p203_v001.fits	21-Apr-2014 20:26	42M	
lat_photon_weekly_w026_p203_v001.fits	21-Apr-2014 20:43	35M	
lat_photon_weekly_w027_p203_v001.fits	21-Apr-2014 21:00	35M	
lat_photon_weekly_w028_p203_v001.fits	21-Apr-2014 21:16	34M	
lat_photon_weekly_w029_p203_v001.fits	21-Apr-2014 21:37	46M	
lat_photon_weekly_w030_p203_v001.fits	21-Apr-2014 21:54	52M	

Les données de Fermi



Ouvrir un des fichiers de données hebdomadaires avec le programme fv (fits viewer)

➤ fv fits_file/lat_photon_weekly_w074_p302_v001_filt.fits



The screenshot shows the fv (fits viewer) interface. The main window displays a summary of the file 'lat_photon_weekly_w015_p130_v001_filt.fits'. The summary table is as follows:

Index	Extension	Type	Dimension	View
0	Primary	Image	0	Header Image Table
1	EVENTS	Binary	22 cols X 282496 rows	Header Hist Plot All Select
2	GTI	Binary	2 cols X 108 rows	Header Hist Plot All Select

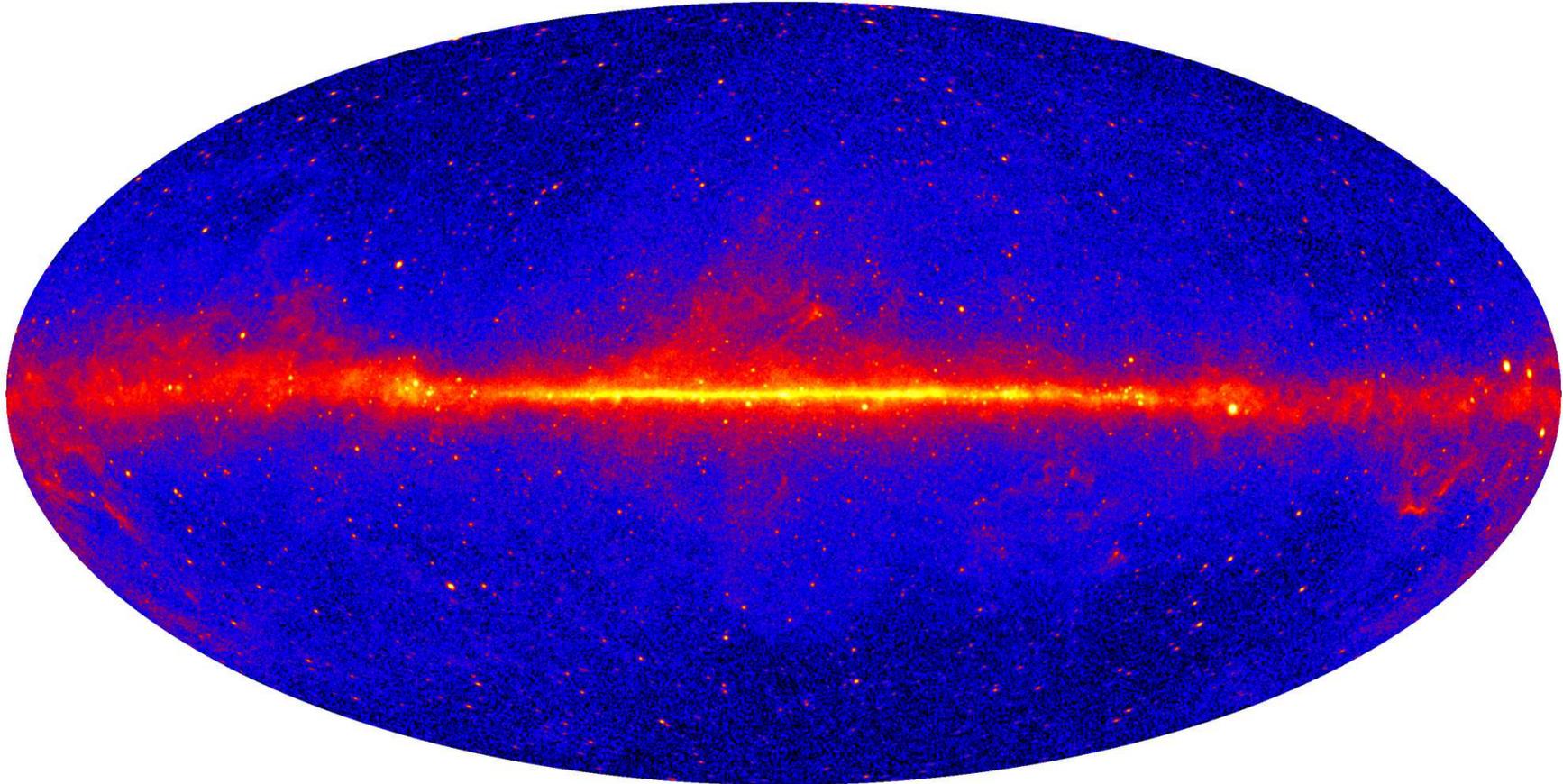
The detailed view shows a binary table with columns: ENERGY, RA, DEC, L, B, THETA. The units are MeV, deg, deg, deg, deg, deg. The data is as follows:

Select	ENERGY (MeV)	RA (deg)	DEC (deg)	L (deg)	B (deg)	THETA (deg)
1	5.948376E+02	3.190671E+02	-3.705634E+01	6.410967E+00	-4.397406E+01	7.043832E+01
2	3.559989E+02	5.263270E+01	2.587974E+01	1.622107E+02	-2.460732E+01	4.078584E+01
3	4.958988E+02	3.013696E+02	3.537136E+01	7.224776E+01	1.923293E+00	6.550476E+01
4	2.561439E+02	4.725511E+00	6.717871E+01	1.197768E+02	4.506552E+00	5.332901E+01
5	3.140352E+02	3.761794E+01	-4.568155E+01	2.628327E+02	-6.298319E+01	6.428506E+01
6	4.192114E+02	5.025957E+01	5.157824E+01	1.451875E+02	-4.710841E+00	4.850283E+01
7	2.660367E+02	7.625768E+01	3.367800E+00	1.969225E+02	-2.178014E+01	6.450130E+01
8	7.746436E+02	4.434700E+01	2.130900E+01	1.582946E+02	-3.277552E+01	3.153118E+01
9	4.046572E+02	6.938319E+01	3.018223E+01	1.702534E+02	-1.125100E+01	5.469625E+01
10	1.369719E+02	5.213140E+01	3.194742E+01	1.578145E+02	-2.008077E+01	4.040837E+01
11	3.997244E+02	3.530521E+02	1.858325E+01	9.797916E+01	-4.041833E+01	1.891041E+01
12	1.658488E+02	3.066959E+02	4.506220E+01	8.256982E+01	3.941032E+00	6.277695E+01
13	4.585629E+03	1.083242E+01	3.266071E+01	1.209584E+02	-3.017991E+01	1.832021E+01
14	3.793775E+02	4.164798E+01	1.037430E+01	1.634978E+02	-4.324523E+01	2.875199E+01
15	1.526024E+02	3.383004E+02	1.378288E+01	7.033768E+01	-3.716058E+01	3.307420E+01

Le ciel vu par Fermi



Carte faite avec des photons de $E > 1$ GeV collectés pendant 4 ans



Le fond diffus est dû à la production de rayons gamma par les particules du rayonnement cosmique qui interagissent avec la matière (gaz, poussière) présente dans la Galaxie. Des sources ponctuelles sont également visibles.

Coordonnées célestes



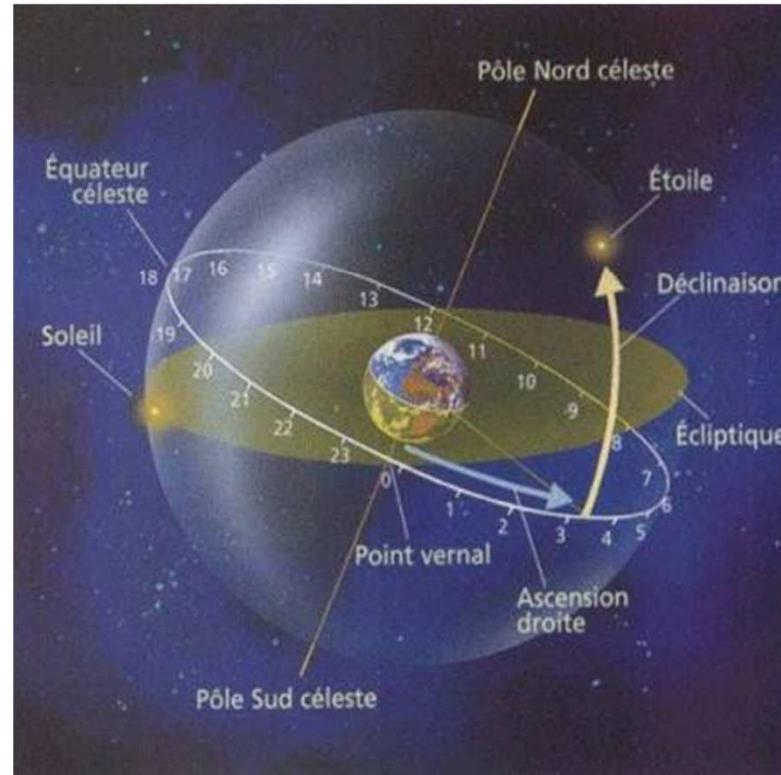
Déclinaison= latitude prolongée dans le ciel

Ascension droite=équivalent de la longitude

Référence pour la longitude: méridien de Greenwich.

Référence pour l'ascension droite: point occupé par le soleil signalant le début du printemps

(« point vernal »)



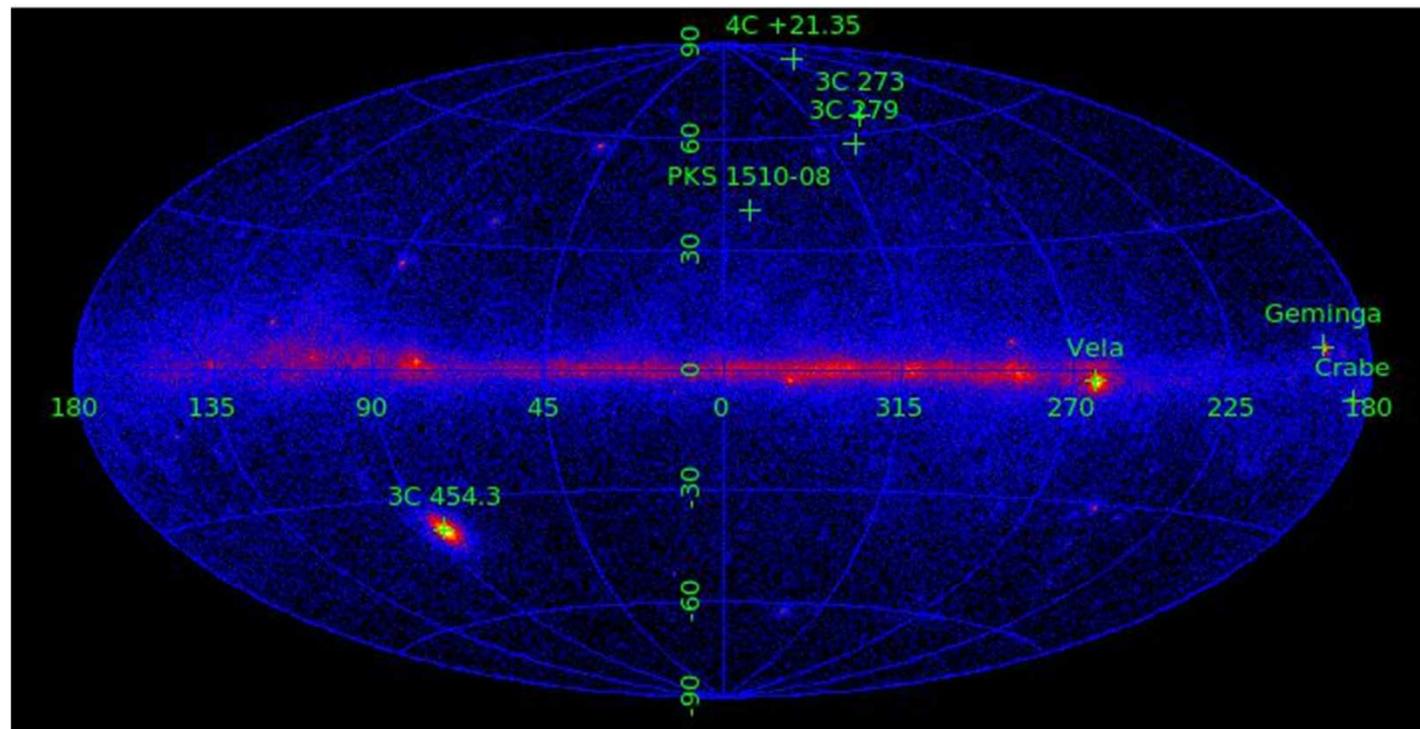
Créer une carte du ciel



> create_map #semaine (option)

option= cel, gal, ait

Ex: create_map 129 ait



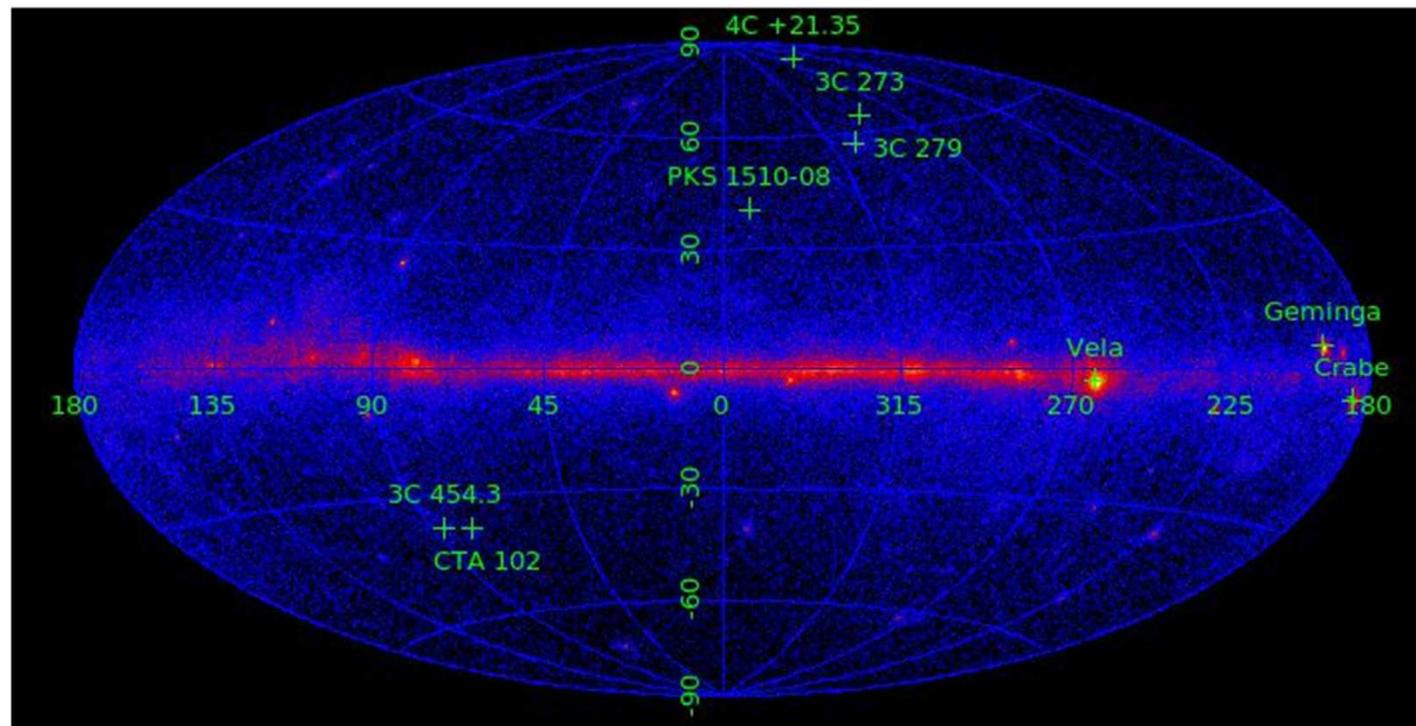
Créer une carte du ciel



> create_map #semaine (option)

option= cel, gal, ait

Ex: create_map 592



Etude d'une source céleste



Une source du ciel est caractérisée par:

- sa **position** dans le ciel (deux coordonnées, qui sont des angles équivalents aux longitude et latitude sur Terre)
- son **flux** (qui peut être variable dans le temps)
- sa « **densité de flux** » appelé aussi « **spectre** », qui représente l'intensité des différents rayonnements émis en fonction de leur énergie. C'est un flux par unité d'énergie. Dans le domaine des rayons gamma, la **densité de flux** s'écrit le plus souvent comme $N(E)=k E^{-\alpha}$ où k et α sont des constantes. α est appelé **l'indice spectral**.

Loi de puissance

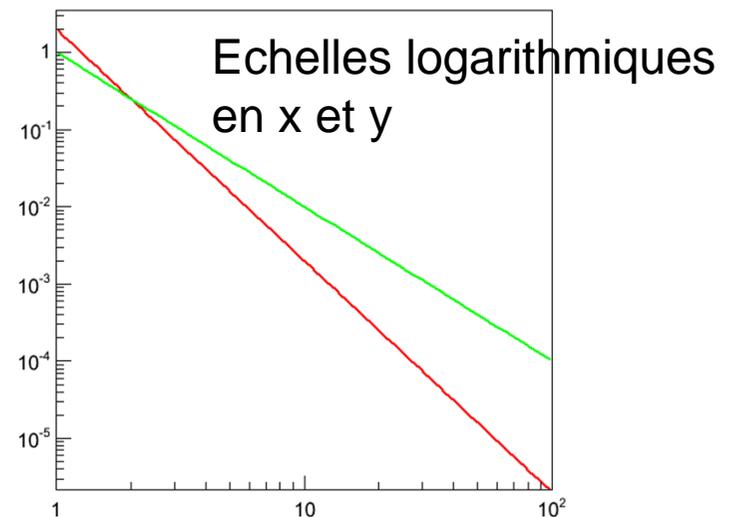
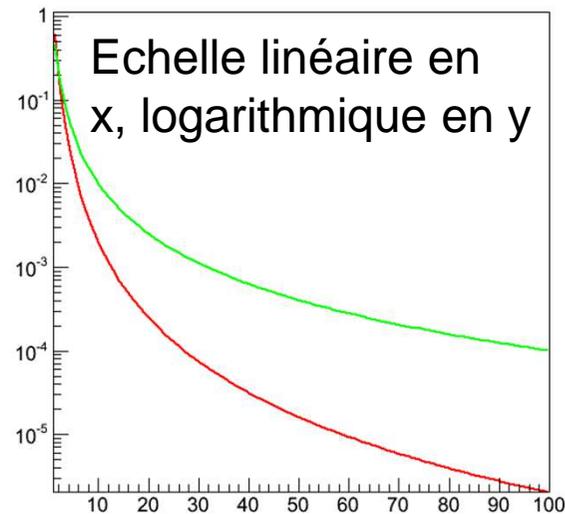
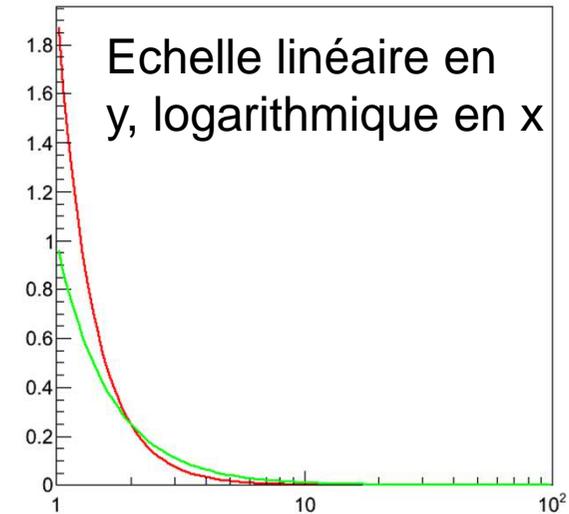
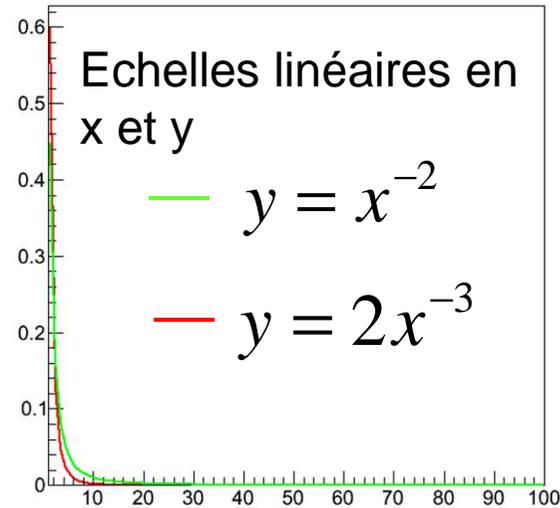


$$y = x^{-\alpha}$$

$$y = \exp(-\alpha \ln(x))$$

$$\ln(y) = -\alpha \ln(x)$$

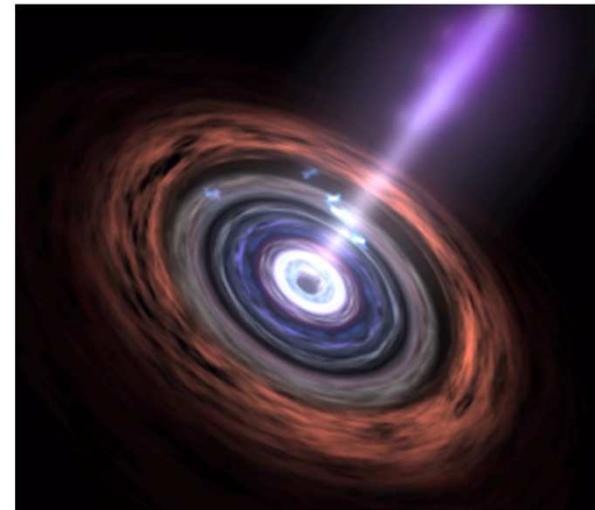
$$\log_{10}(y) = -\alpha \log_{10}(x)$$



Le blazar 3C 454.3



- C'est le noyau actif de galaxie (blazar) le plus brillant détecté par le LAT, avec des éruptions spectaculaires.
- Il abrite un trou noir de 4 milliards de masse solaire.
- Il est situé à une distance de 7.2 milliards d'année lumière (décalage spectral=0.859).
- Ses coordonnées sont:
(RA, DEC)=(343.5°, 16.15°)



Le blazar 3C 454.3



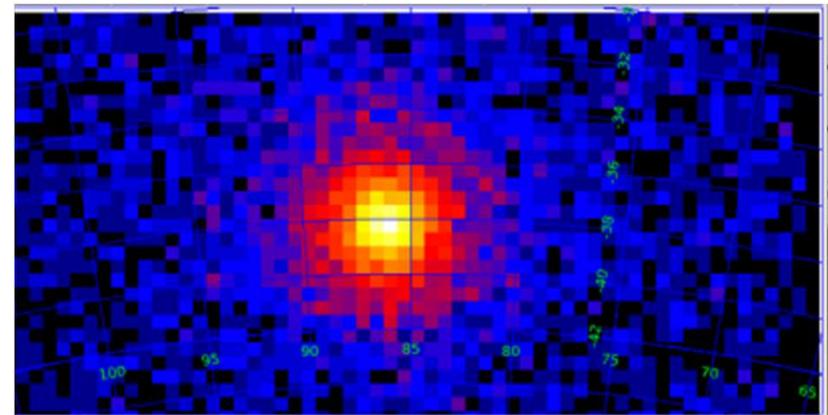
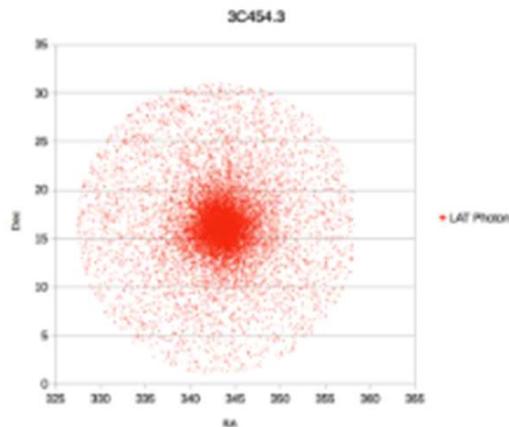
Création d'une carte avec sélection (temps et position)

Explication de l'étalement des photons (résolution angulaire)

Utilisation des données en format csv pour reproduire la carte avec Excel ou autre tableur utilisé par les élèves:

- Nuage de points
- Histogramme 2D

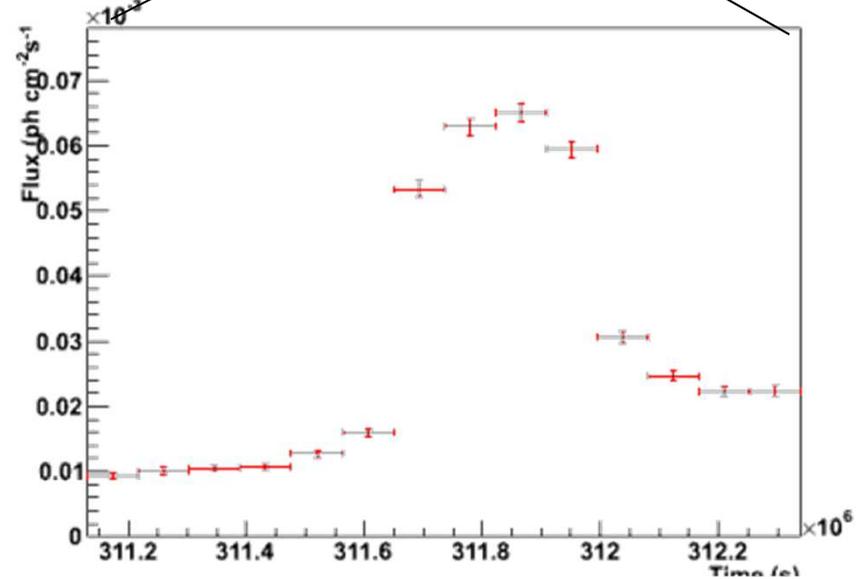
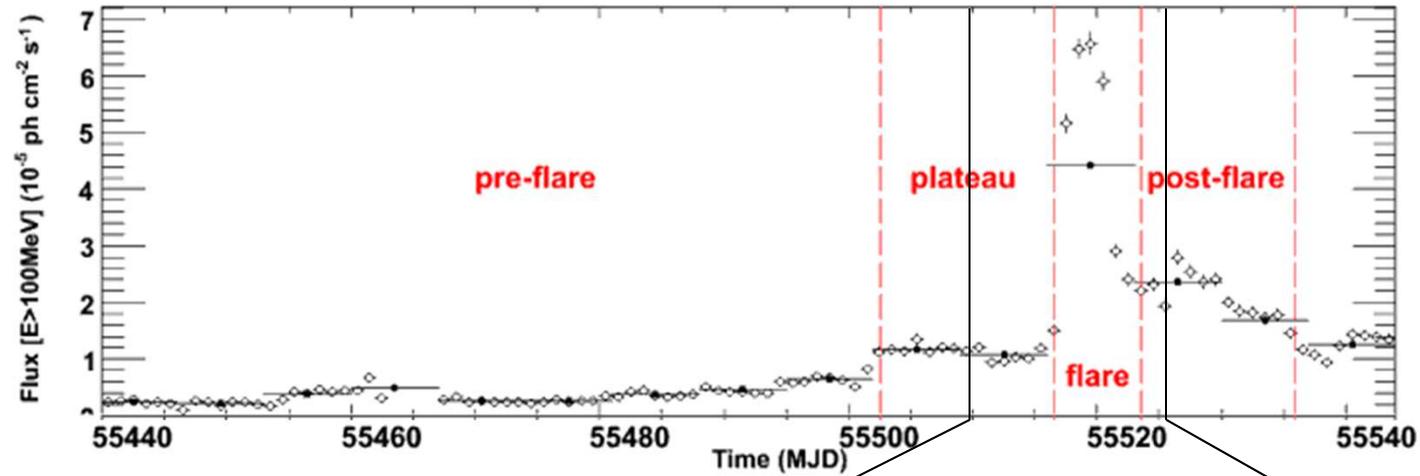
```
create_map 129 ait 311731200 311990400 343.5 16.15 15
```



Courbes de lumière



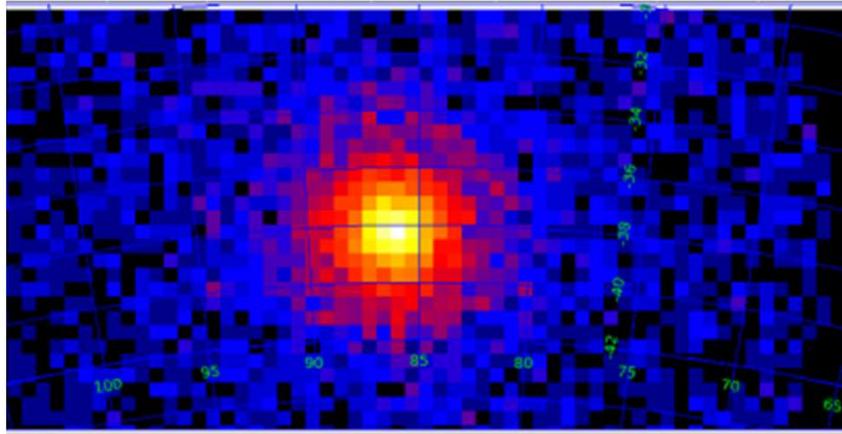
- create_light_curve 128-129 Ic 3454.txt 0 0 86400 343.5 16.15 5



Le blazar 3C 454.3



```
create_map 129 ait 311731200 311990400 343.5 16.15 15
```



$$F_p = N / S T$$

N = Nombre de photons collectés

S = Surface de collection (cm²)

T = Temps de collection (s)

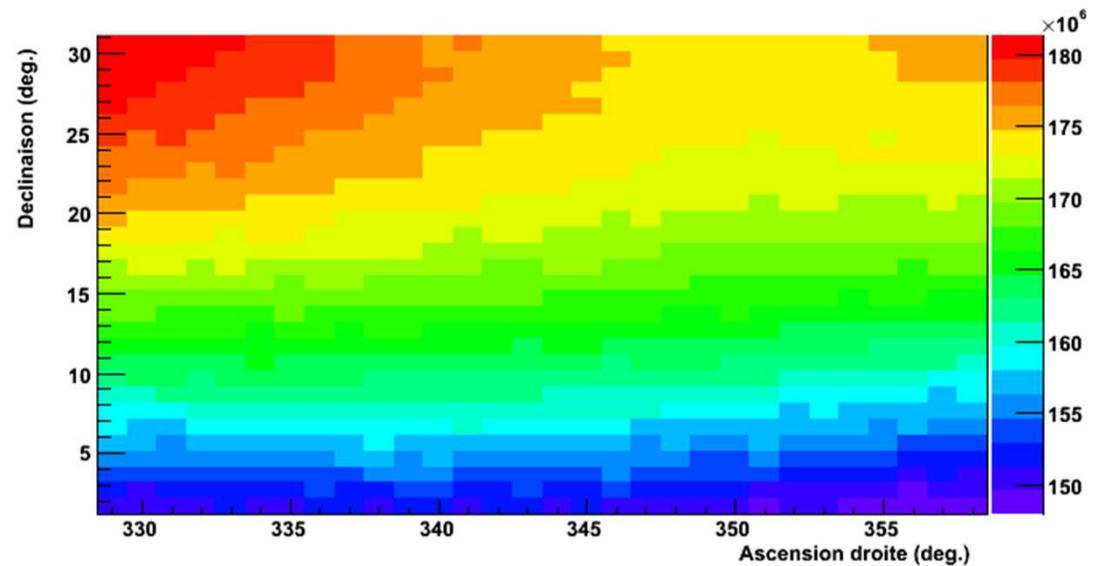
Le produit $S T$ est appelé exposition.

```
create_exposure 129 map 200
```

Nombre de photons:

Exposition (S T):

Flux de photons:

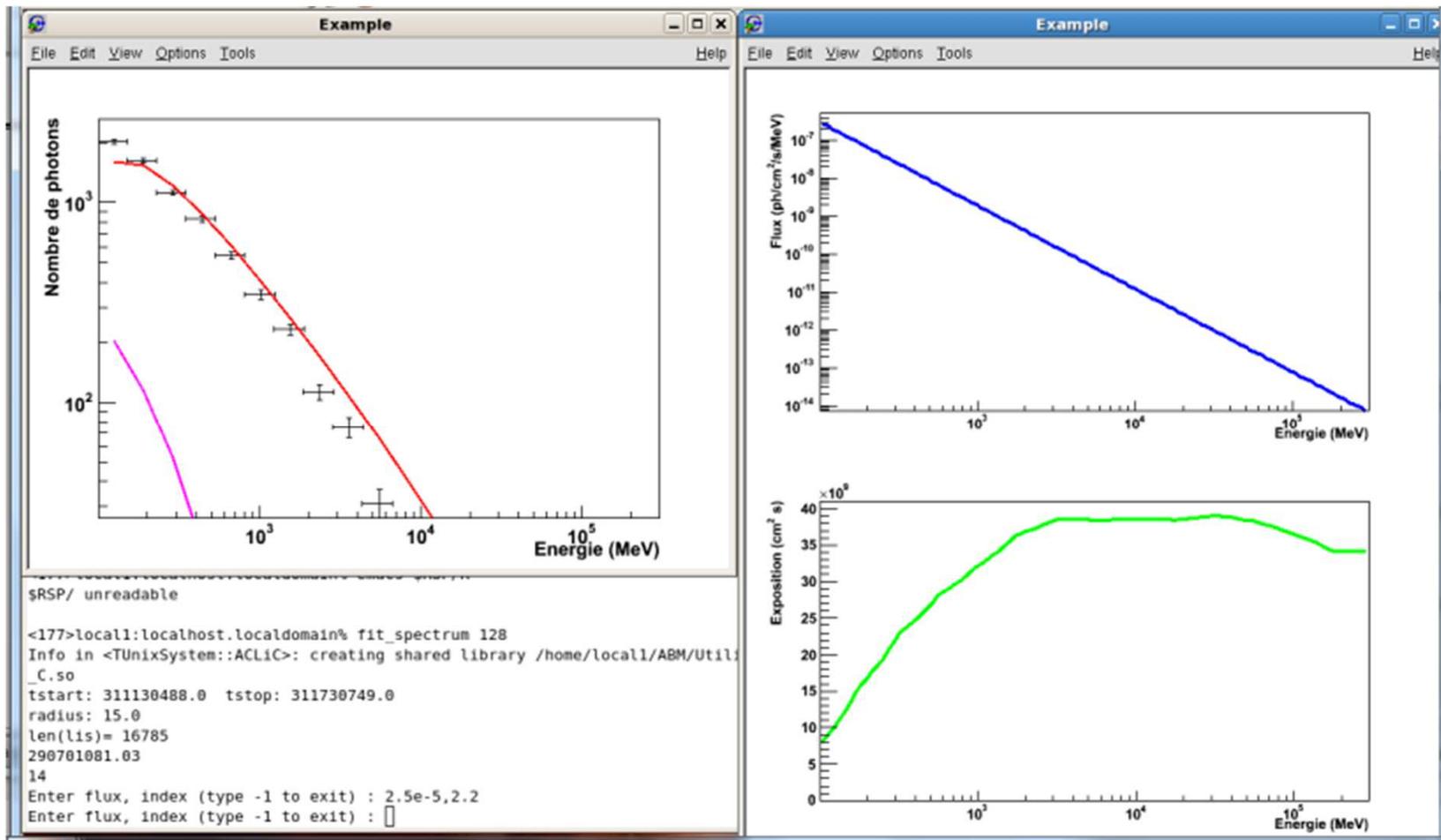


Spectre en énergie



➤ fit_spectrum 129

Ajuster le flux et l'indice spectral pour obtenir une bonne reproduction des données
L'écran de droite montre la distribution en énergie (haut) et l'exposition en fonction de l'énergie (bas) dont le produit donne le nombre de photons en fonction de l'énergie (à gauche).



Le sursaut gamma 080916C



Marque-pages Outils ?

NASA - NASA's Fermi Tele... x +

pages/GLAST/news/high_grb.html

916C nasa press release →

Create account | Not logged in | Talk | Contributions | Log in

history Search

NASA NEWS News, features & press releases MISSIONS Current, future, past missions & launch dates MULTIMEDIA Images, videos, NASA TV & more CONNECT Social media channels & NASA apps ABOUT NASA Leadership, organization, budget, careers & more

NASA Home > Missions > Fermi Gamma-ray Space Telescope > News

Send Print Share

Missions

Missions Highlights

Current Missions

- Fermi Gamma-ray Space Telescope
- Science
- Launch
- Multimedia
- Spacecraft and Instruments Team
- News and Media

Past Missions

Future Missions

Launch Schedule

Mission Calendar

People Who Read This Also Read...

Fermi
Fermi Gamma-ray Space Telescope

Feature

Text Size + -

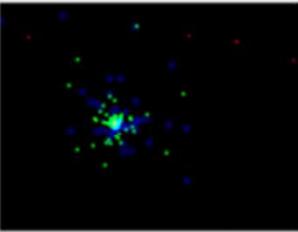
NASA's Fermi Telescope Sees Most Extreme Gamma-ray Blast Yet 02.19.09

The first gamma-ray burst to be seen in high-resolution from NASA's Fermi Gamma-ray Space Telescope is one for the record books. The blast had the greatest total energy, the fastest motions and the highest-energy initial emissions ever seen.

"We were waiting for this one," said Peter Michelson, the principal investigator on Fermi's Large Area Telescope at Stanford University. "Burst emissions at these energies are still poorly understood, and Fermi is giving us the tools to understand them."

Gamma-ray bursts are the universe's most luminous explosions. Astronomers believe most occur when exotic massive stars run out of nuclear fuel. As a star's core collapses into a black hole, jets of material -- powered by processes not yet fully understood -- blast outward at nearly the speed of light. The jets bore all the way through the collapsing star and continue into space, where they interact with gas previously shed by the star and generate bright afterglows that fade with time.

This explosion, designated GRB 080916C, occurred at 7:13 p.m. EDT on Sept.



This movie compresses about 8 minutes of Fermi LAT observations of GRB 080916C into 6 seconds. Colored dots represent gamma rays of different energies. Visible light has energy between about 2 and 3 electron volts (eV). The blue dots represent lower-energy gamma rays (less than 100 million eV); green, moderate energies (100 million to 1 billion eV); and red, the highest

NASA's Fermi Gamma-ray Space Telescope is approximately 158 m/s

total energy of the burst is higher than any other gamma-ray burst ever seen.

ty, which is they

the

ector

the distance to 4.2 billion Earth years (1)

GRB 080916C

Detection

Detection time 16 September 2008

Detected by Fermi Gamma-ray Space Telescope

Duration 23 Earth minutes

Position

Right ascension 07^h 59^m 23.24^s

Declination -56° 38' 16.8"

Distance 12.2 billion light-years (3.740 Gpc)

Constellation Carina

Energetics

Total energy output 8.8 × 10⁵⁴ ergs

See also: Gamma-ray burst, Category Gamma-ray bursts



<http://www.sciencemag.org/cgi/rapidpdf/323/5922/1688?ijkey=FM8C.rv8K96z2&keytype=ref&siteid=sci>

RESEARCH ARTICLES

Fermi Observations of High-Energy Gamma-Ray Emission from GRB 080916C

The Fermi LAT and Fermi GBM Collaborations*

Gamma-ray bursts (GRBs) are highly energetic explosions signaling the death of massive stars in distant galaxies. The Gamma-ray Burst Monitor and Large Area Telescope onboard the Fermi Observatory together record GRBs over a broad energy range spanning about 7 decades of gamma-ray energy. In September 2008, Fermi observed the exceptionally luminous GRB 080916C, with the largest apparent energy release yet measured. The high-energy gamma rays are observed to start later and persist longer than the lower energy photons. A simple spectral form fits the entire GRB spectrum, providing strong constraints on emission models. The known distance of the burst enables placing lower limits on the bulk Lorentz factor of the outflow and on the quantum gravity mass.

Gamma-ray bursts (GRBs) are the most luminous explosions in the universe and are leading candidates for the origin of ultrahigh-energy cosmic rays (UHECRs). Prompt emission from GRBs from ~ 10 keV to ~ 1 to

5 MeV has usually been detected, but occasionally photons above 100 MeV have been detected by the Energetic Gamma-Ray Experiment Telescope (EGRET) (1) and more recently by Astro-rivelatore Gamma a Immagini LEggero (AGILE) (2). Observations of gamma rays with energies >100 MeV are particularly prescriptive

and help understand the underlying energy source. Although there have been observations of photons above 100 MeV (3–5), it has not been possible to distinguish competing interpretations of the emission (6–8). The Fermi Gamma-ray Space Telescope, launched on 11 June 2008, provides broad energy coverage and high GRB sensitivities through the Gamma-ray Burst Monitor (GBM) and the Large Area Telescope (LAT) (9). The GBM consists of 12 sodium iodide (NaI) detectors, which cover the energy band between 8 keV and 1 MeV, and two bismuth germanate (BGO) scintillators, which are for the energy band between 150 keV and 40 MeV. The LAT is a pair conversion telescope with the energy coverage from below 20 MeV to more than 300 GeV (supporting online text). In this paper, we report detailed measurements of gamma-ray emission from the GRB 080916C detected by the GBM and LAT.

Observations. At 00:12:45.613542 UT (T_0) on 16 September 2008 the GBM flight software triggered on GRB 080916C. The GRB produced large signals in 9 of the 12 NaI detectors and in one of the two BGO detectors. Analysis of the data on the ground localized the burst to a

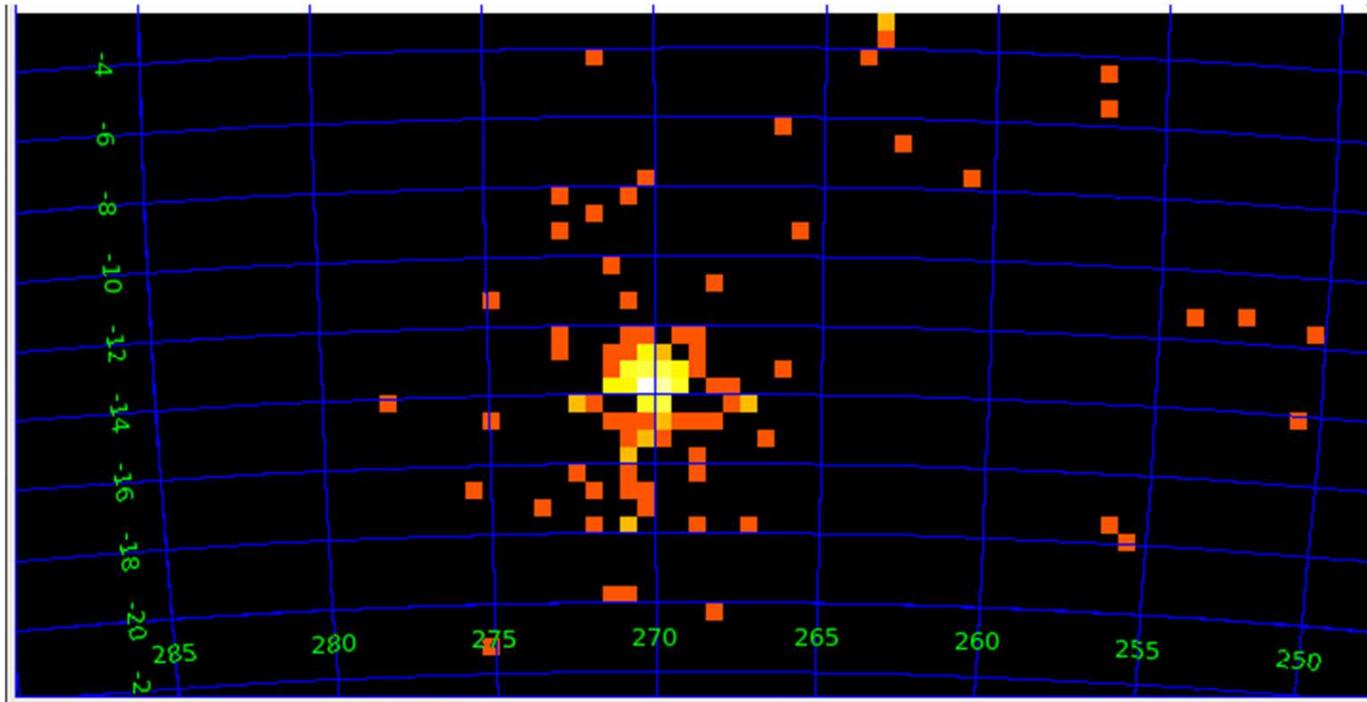
*The full list of authors and affiliations is presented at the

Carte de 080916C



create_map 15 ait 243216700 243217000 120 -56 20

GRB 080916C. décalage spectral=4.35. distance parcourue par la lumière:
12.2 milliards d'années. Distance de luminosité: $d_L = 1.25 \times 10^{29}$ cm

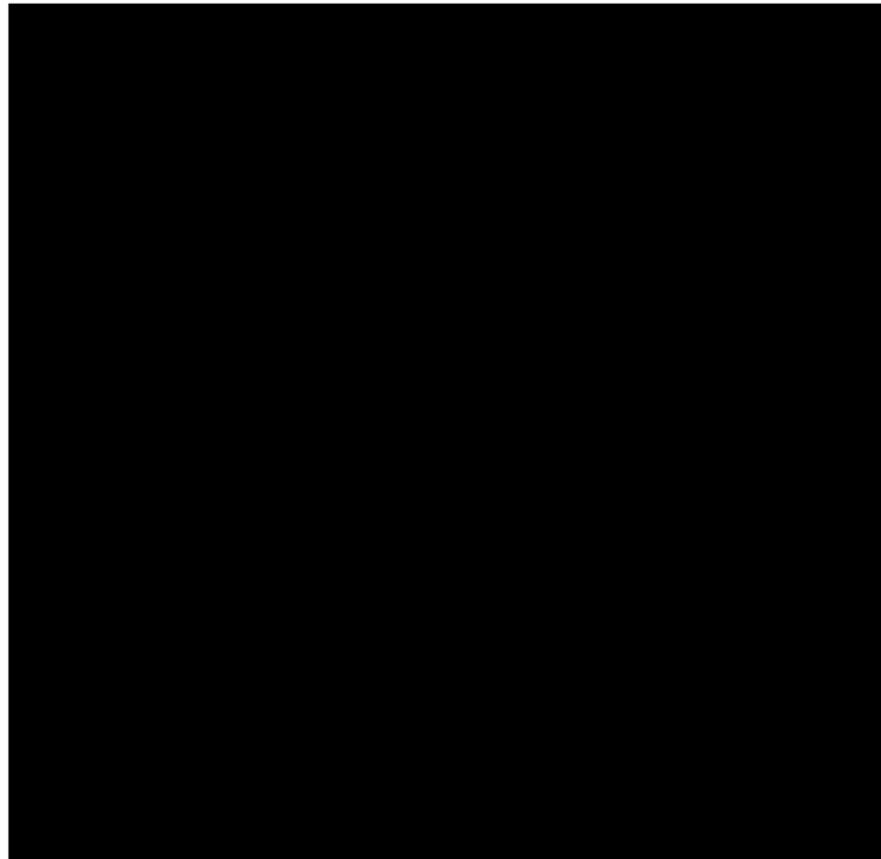


Créer une animation



Ex: `python create_movie_scat.py`

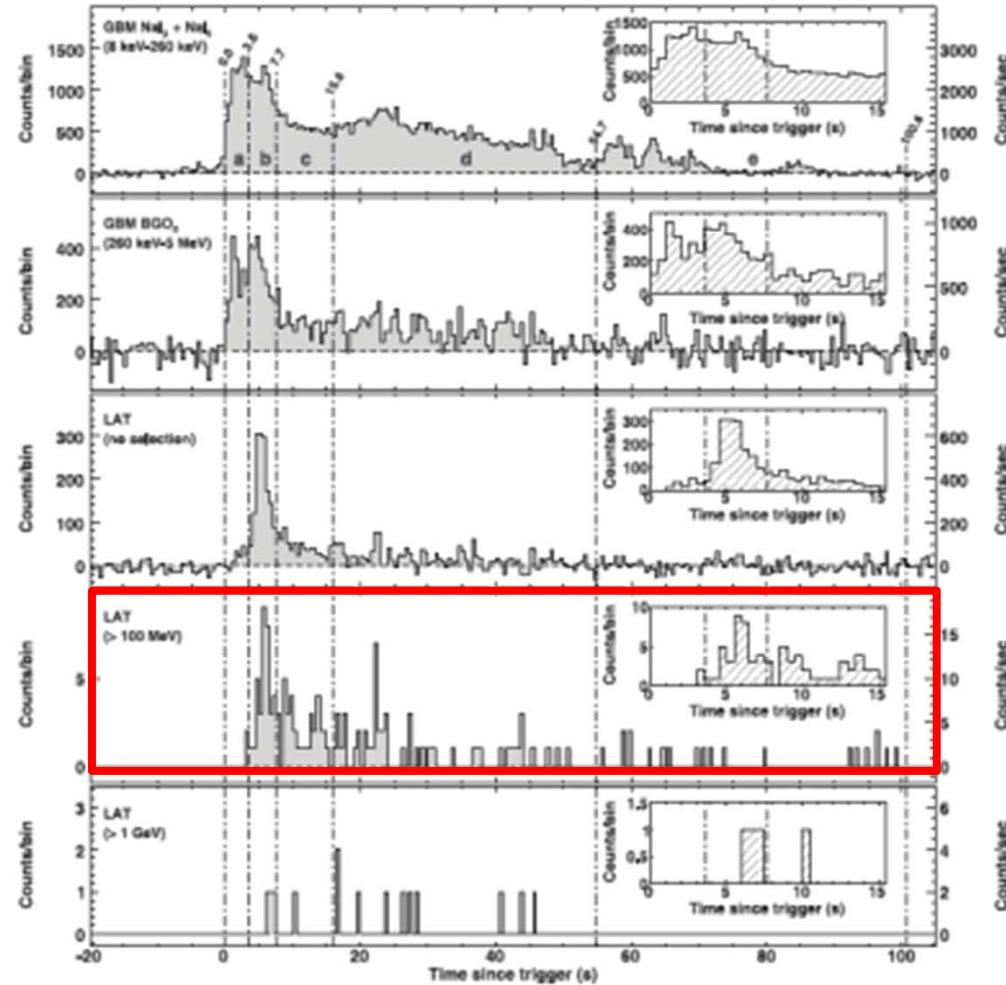
`file_fits/lat_photon_weekly_w015_p203_v001_temp.fits 20`



Courbe de lumière de 080916C



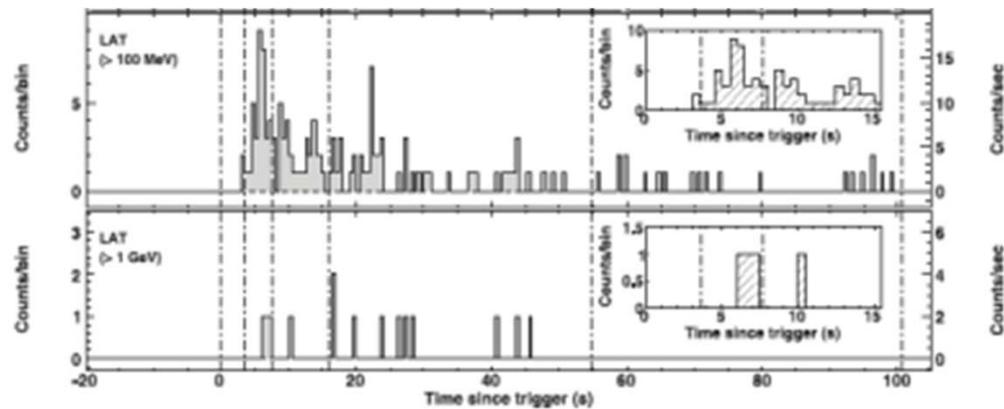
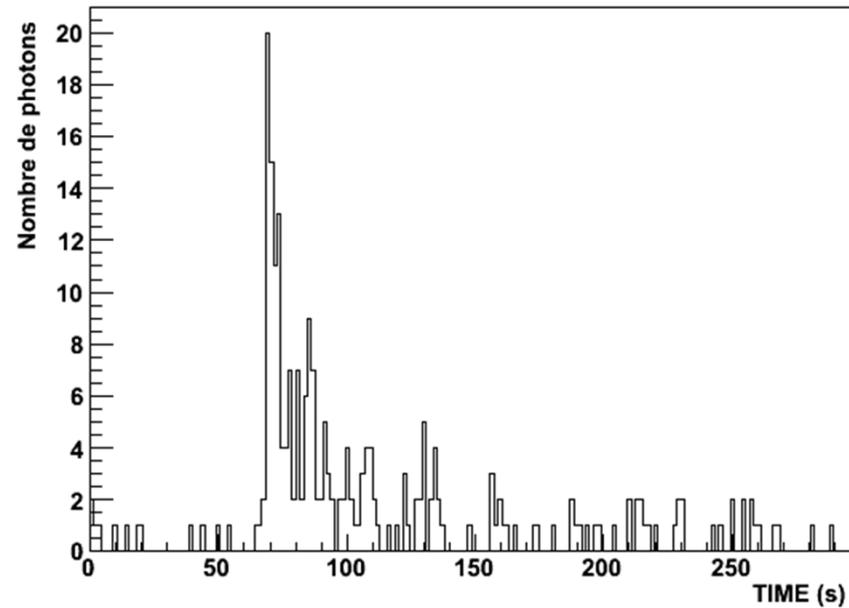
Fig. 1. Light curves for GRB 080916C observed with the GBM and the LAT, from lowest to highest energies. The energy ranges for the top two graphs are chosen to avoid overlap. The top three graphs represent the background-subtracted light curves for the NaI, the BGO, and the LAT. The top graph shows the sum of the counts, in the 8- to 260-keV energy band, of two NaI detectors (3 and 4). The second is the corresponding plot for BGO detector 0, between 260 keV and 5 MeV. The third shows all LAT events passing the onboard event filter for gamma-rays. (Insets) Views of the first 15 s from the trigger time. In all cases, the bin width is 0.5 s; the per-second counting rate is reported on the right for convenience.



La courbe de lumière de 080916C



hist fits_file/lat_photon_weekly_w015_p302_v001_temp.fits TIME 200



Fluence de 080916C



RESEARCH ARTICLES

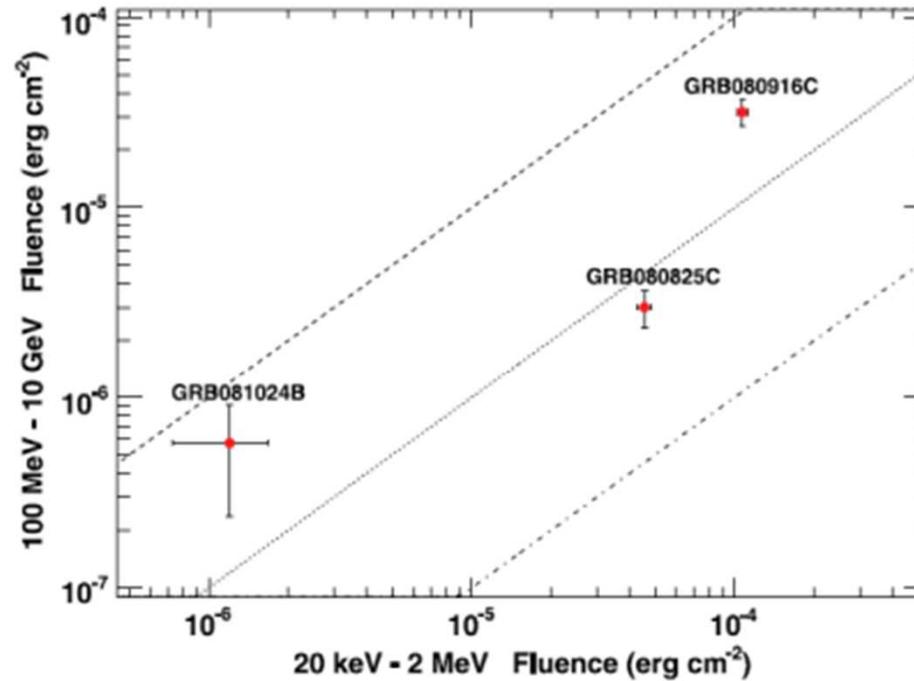


Fig. 6. Low- and high-energy gamma-ray fluences of three GRBs observed with both Fermi instruments. Both energy ranges are two decades. The diagonal lines indicate constant ratios between the two fluences: dashed, LAT and GBM fluences are equal; dotted, LAT fluence is 10% of GBM fluence; dot-dash, LAT fluence is 1% of GBM fluence.



> fluence 15

$$\text{Fluence: } 80000 \text{ MeV}/3000 \text{ cm}^2 \\ = 4.3 \cdot 10^{-5} \text{ erg cm}^{-2}$$

$$E_{\text{tot}} = 4 \pi d^2 \text{ Fluence} / (1+z) \\ = 1.6 \times 10^{54} \text{ erg}$$

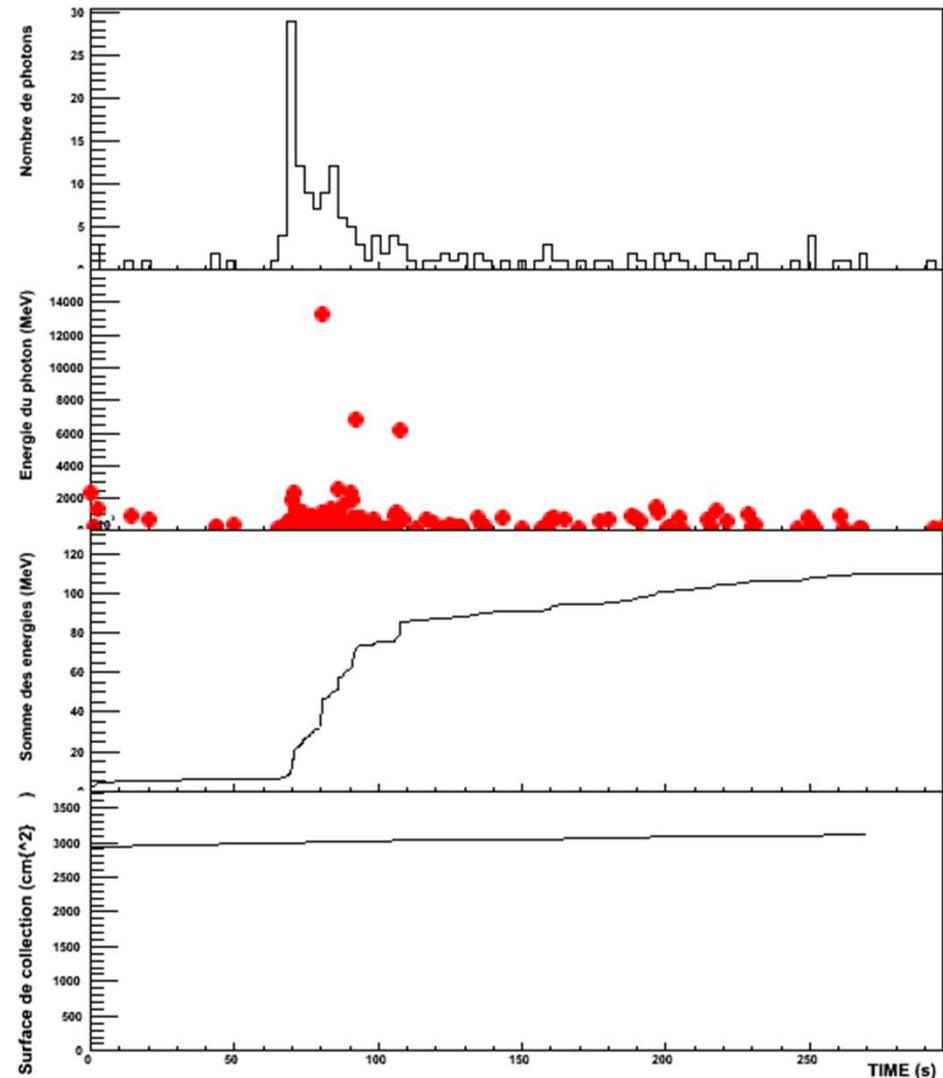
Rappel:

Masse du soleil: $2 \cdot 10^{30} \text{ kg}$

$$E = Mc^2 = 2 \cdot 10^{47} \text{ J} = 2 \cdot 10^{54} \text{ erg}$$

L'énergie produite dans ce GRB en rayons gamma correspond à une masse solaire convertie en énergie!

(Note: la production française d'énergie électrique correspond à une masse de 20 kg)



Des micro-trous noirs produits par accélérateurs?



RHIC: « La machine à Big-Bang pourrait détruire la Terre » (Sunday Time, 18 Juillet 1999)

LHC: Pas assez d'énergie (facteur 10^{15}) pour atteindre l'énergie limite nécessaire à la création d'un trou noir... sauf s'il existe des dimensions supplémentaires avec les paramètres adéquats.

Ces micro-trous noirs disparaîtraient rapidement:

- « évaporation »
- taux d'accrétion limitée (Eddington).

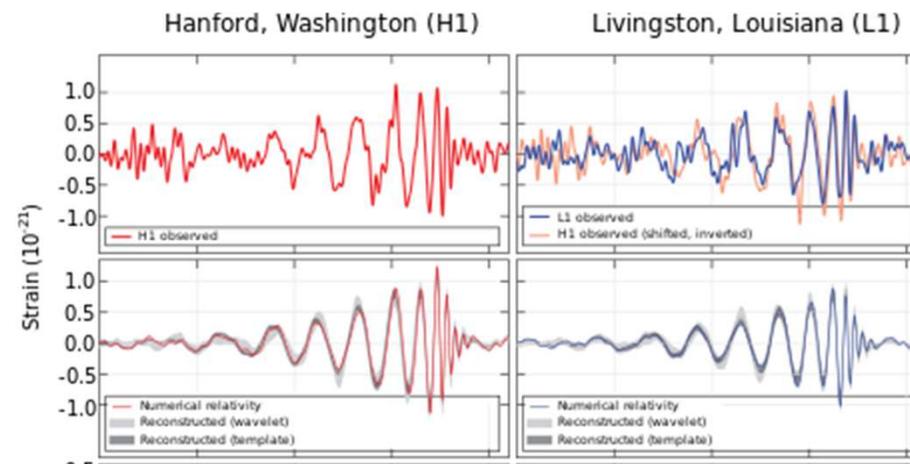
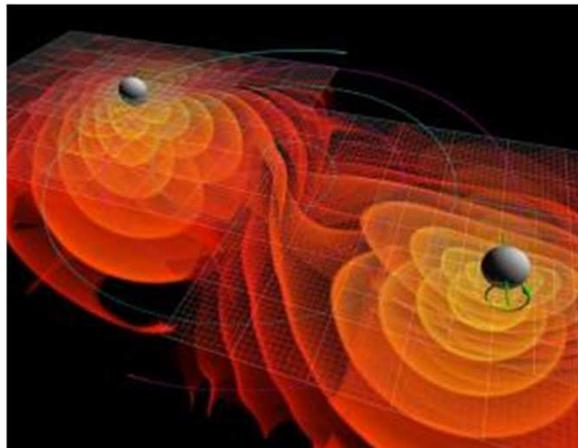
Des rayons cosmiques bombardent la Terre avec une énergie bien supérieure.



Fusion of black holes- Gravitational waves



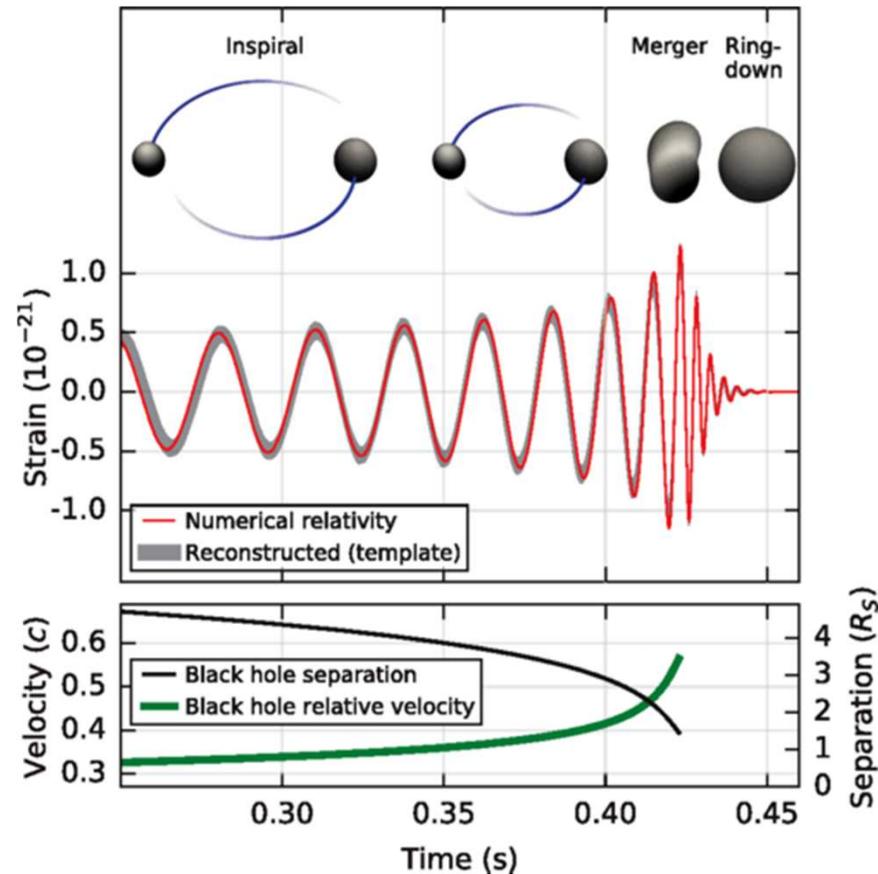
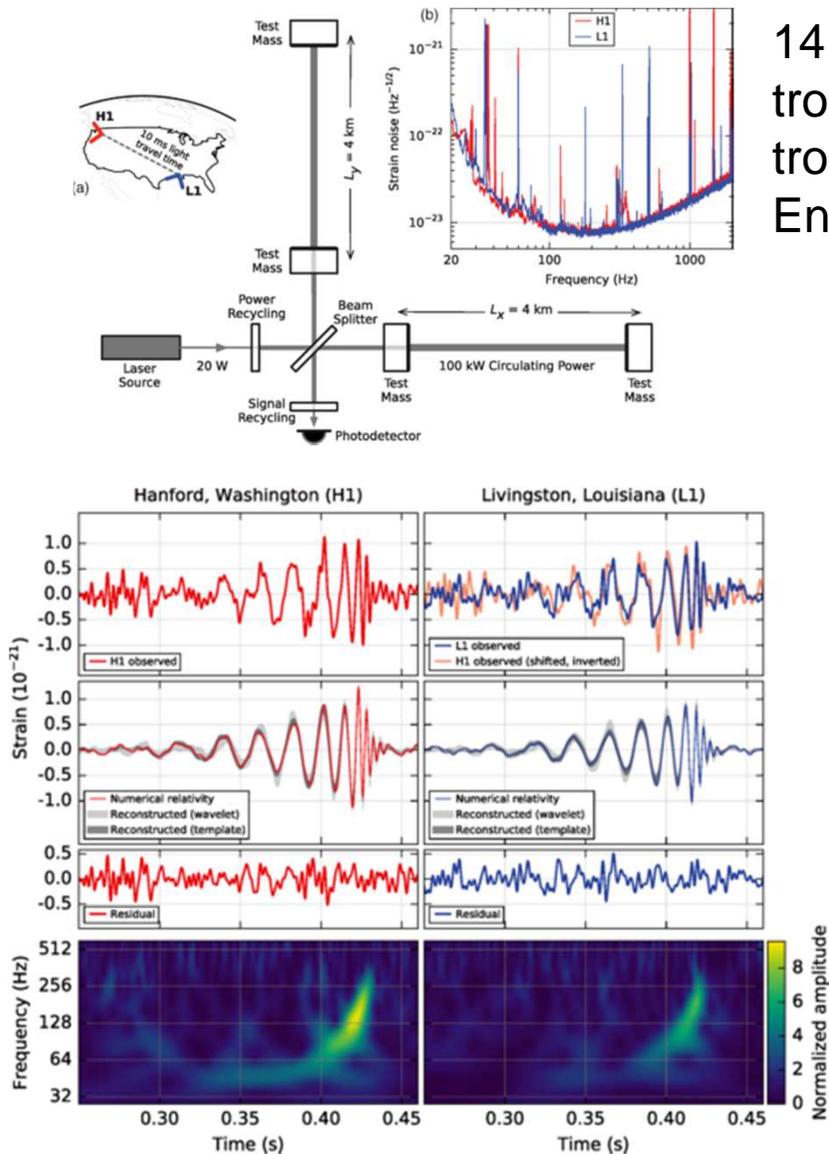
- The spacetime can be made to vibrate when two massive bodies fuse together and emit "gravitational waves".
- The discovery of these waves, produced by the fusion of two 30-solar-mass black holes into a bigger one, was announced in last February by the LIGO team.
- The relative length variation is extremely small: 10^{-21}

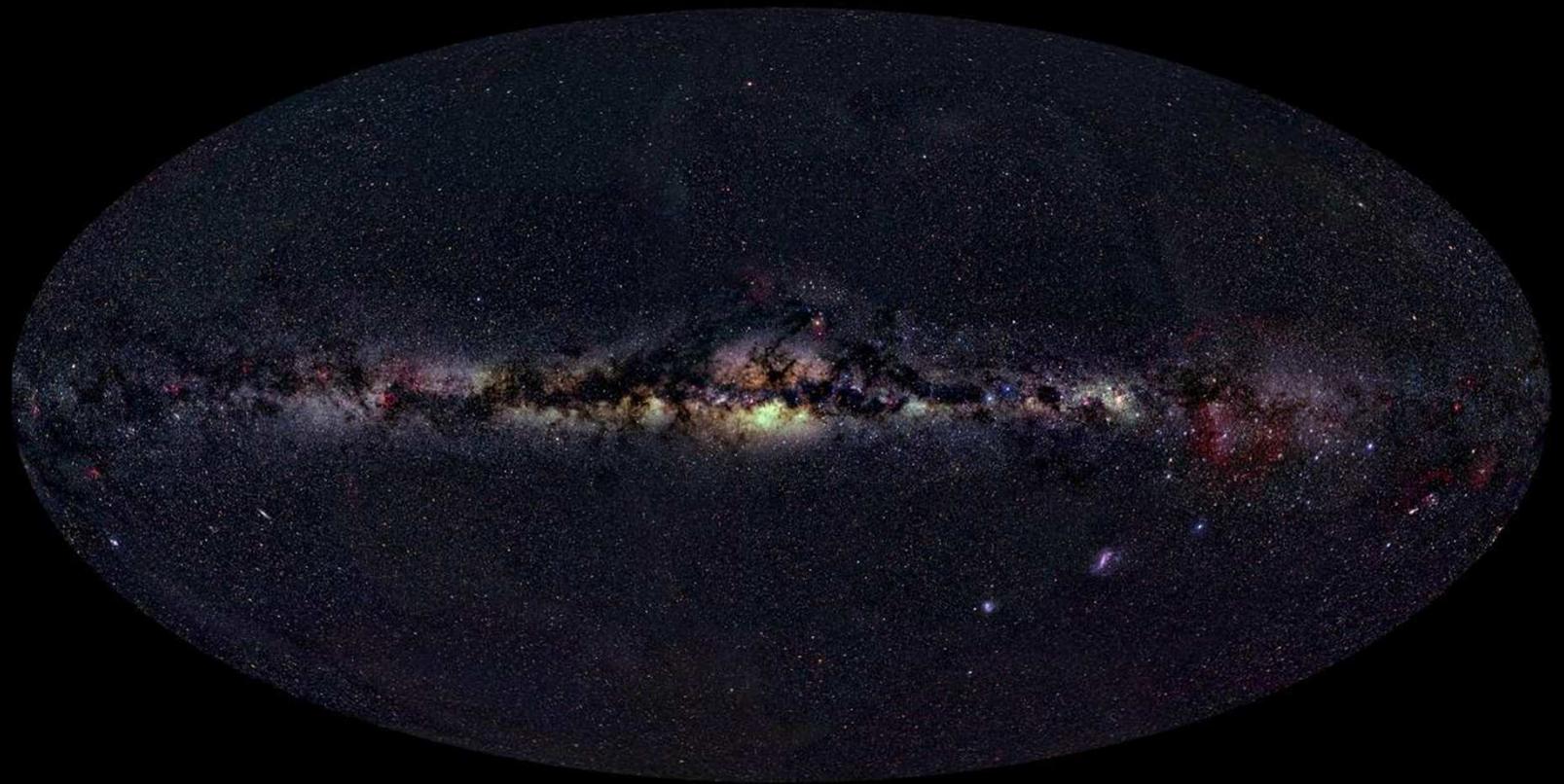


Première détection directe des ondes gravitationnelles par LIGO



14 Septembre 2015: détection de la fusion de deux trous noirs de 36 et 29 masses solaires (M_{\odot}) en un trou noir de 62 M_{\odot} à $1.3 \cdot 10^9$ al.
 Energie libérée en ondes gravitationnelles: $3 M_{\odot}c^2$





© 2000, Axel Mellinger

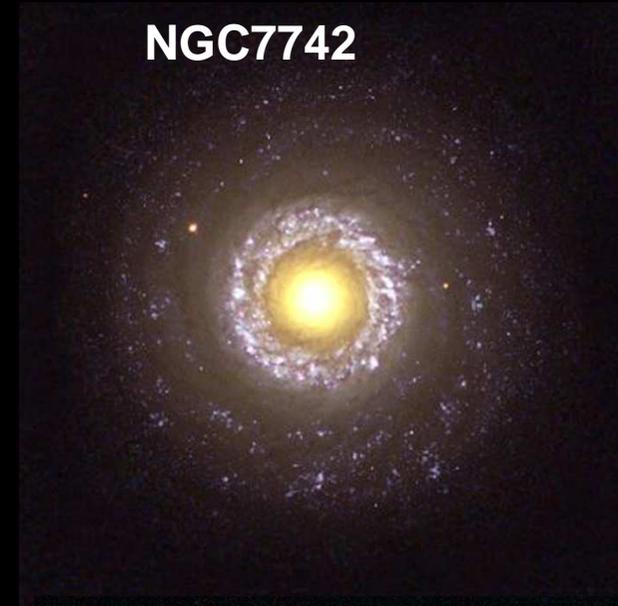
Galaxie de Seyfert

Galaxies spirales

Cœurs compacts et lumineux

Raies d'émission large

NGC7742



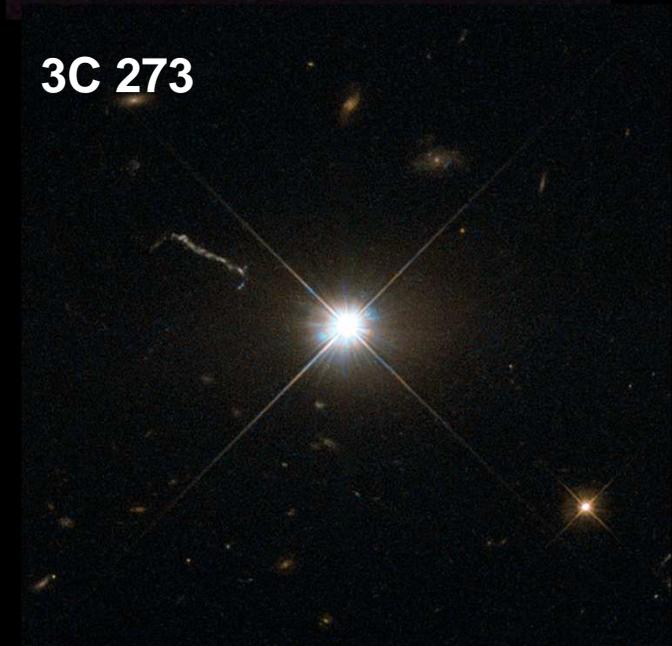
Quasars (quasi-stellar radio source)

Propriétés similaires aux Seyfert

mais plus lumineux

Galaxies hôtes elliptiques

3C 273



Le catalogue de Charles Messier

Messier (18^{ème} s) « chasseur de comètes »
Catalogue d'objets étendus et diffus

Type	Nombre
Nébuleuse obscure	0
Galaxie	40
Amas globulaire	29
Nébuleuse	5
Amas ouvert (+ M24)	28
Amas ouvert et nébuleuse	2
Nébuleuse planétaire	4
Rémanent de supernova	1
Etoile binaire	1
Total	110

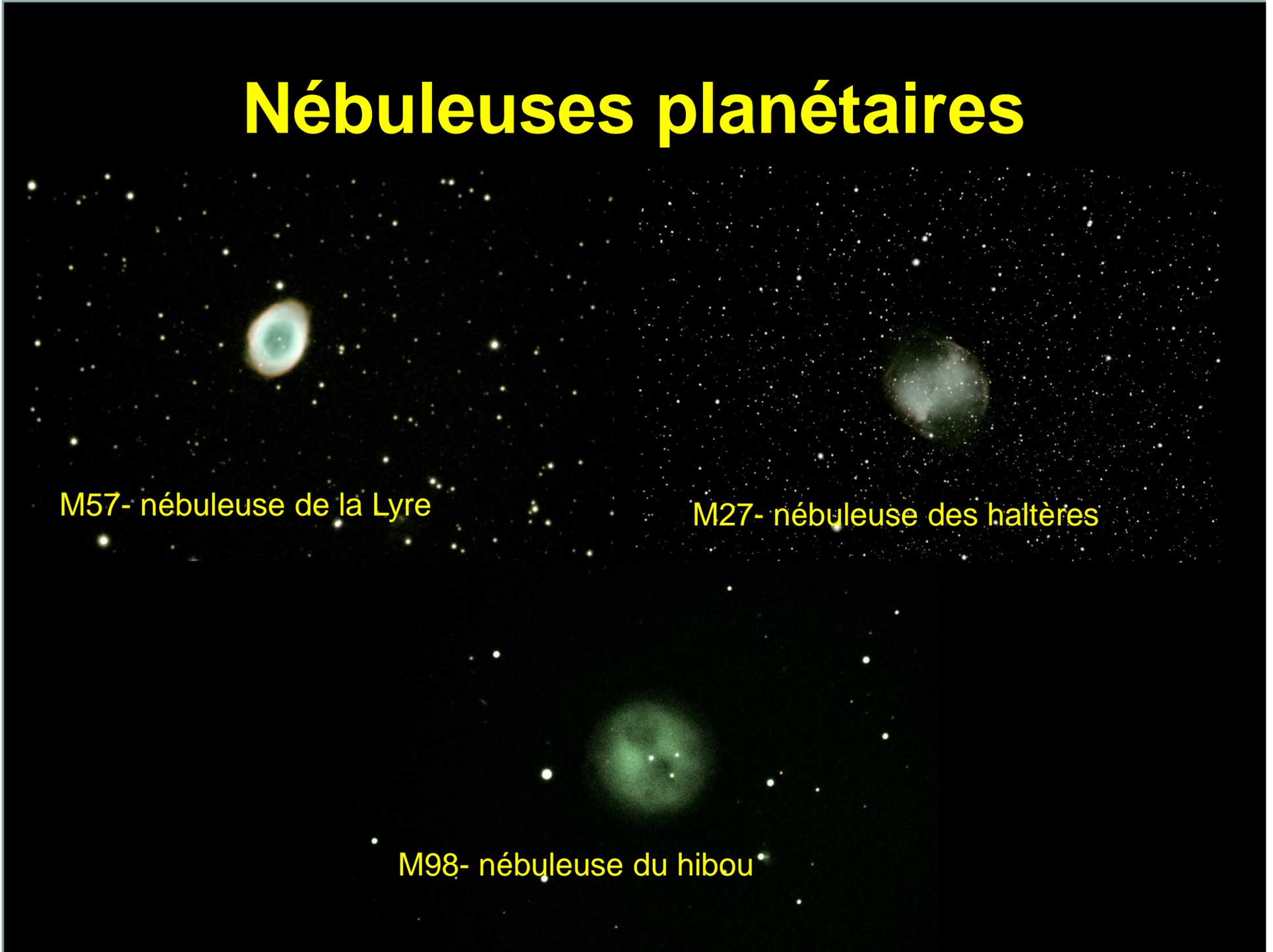


Nébuleuses planétaires

M57- nébuleuse de la Lyre

M27- nébuleuse des haltères

M98- nébuleuse du hibou



Amas globulaires



Amas ouverts



M45- les Pléiades

M11- amas

Nébuleuses diffuses



M8- nébuleuse de la Lagune



M20- nébuleuse de la Trifide



M42- grande nébuleuse d'Orion



M16- nébuleuse du cone

Reste de supernova

M1- nébuleuse du Crabe

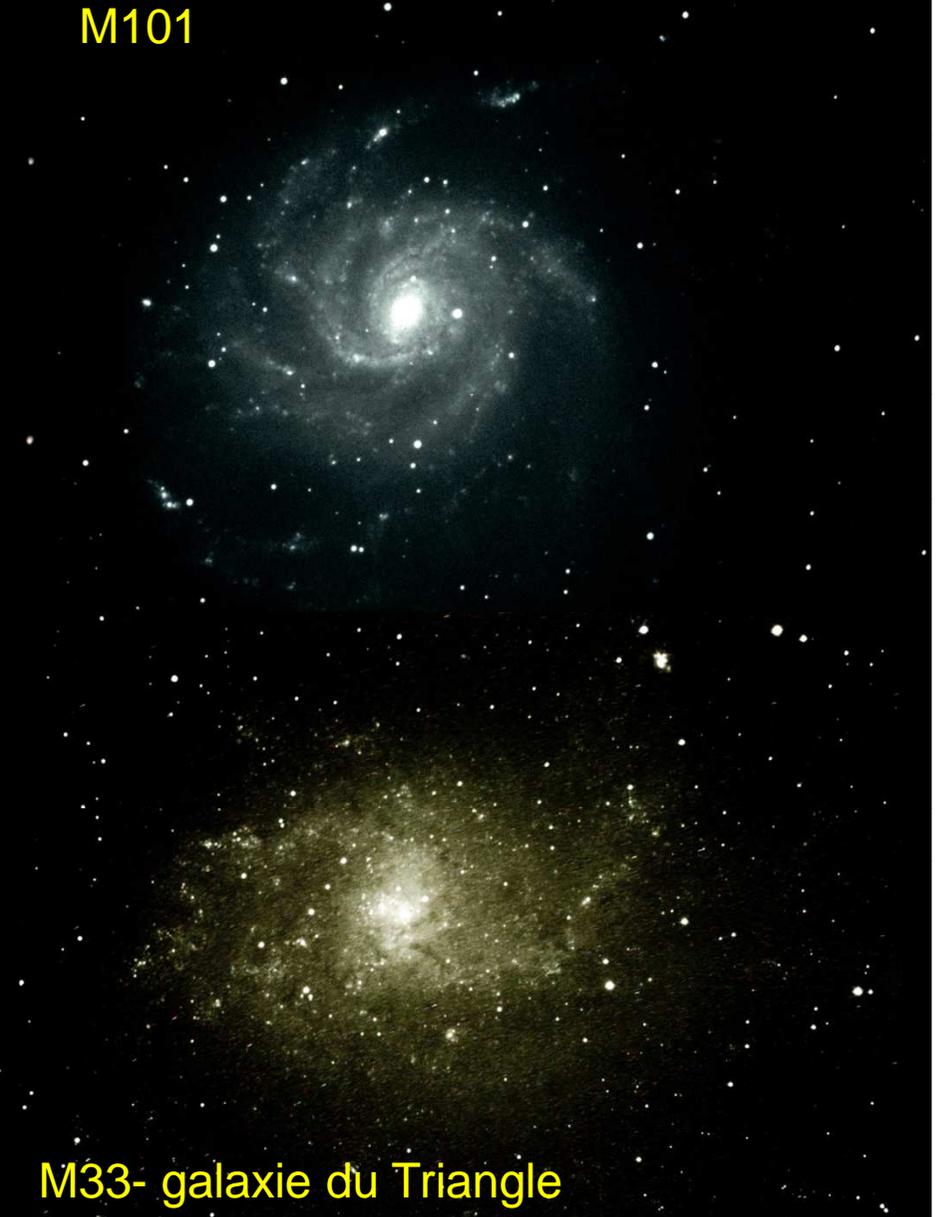


Galaxies spirales

M51



M101



M31- galaxie d'Andromède

M33- galaxie du Triangle

Galaxies elliptiques ou à flambée de formation d'étoiles

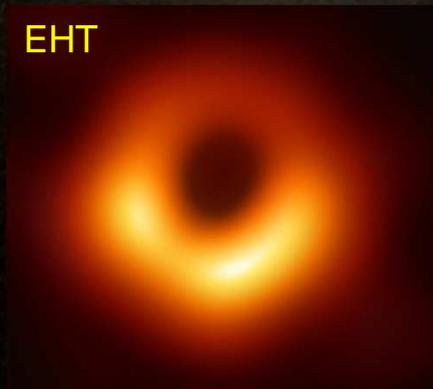
M87



M82



EHT

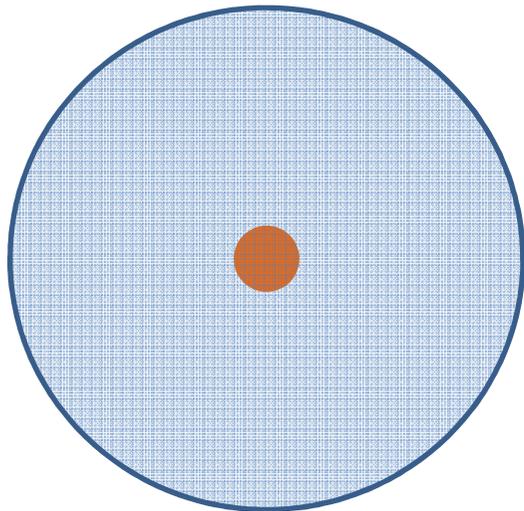


Détecter un objet céleste

Le « signal » dépend de l'énergie reçue par le détecteur.

Luminosité = puissance rayonnée par l'objet dans une gamme de longueur d'onde (W).

Pour un détecteur (rayon R) entourant l'astre:
Puissance reçue (P) = Luminosité (L)



Si l'émission est isotrope:

$P/\text{unité de surface} = \text{Flux d'énergie (F)} = L/4\pi R^2$

Puissance reçue sur un détecteur de surface S
à la distance R:

$P = F \times S$

Energie reçue: $E = P \times T = F \times S \times T$

$$E = F \times S \times T$$

- E: Energie reçue
- F: Flux d'énergie de l'astre
- S: Surface de collection du détecteur (vue de l'astre)
- T: Temps de collection

Note: Le produit $S \times T$ est appelé *exposition*.

Grande surface de collection: lunettes, télescopes, jumelles
(+ meilleur pouvoir séparateur, fort grossissement)

Grand temps de collection: **photographie**

Astrophotographie

Permet des temps de pose longs pour révéler des objets faibles.

Problème: comment compenser la rotation de la Terre?

« Règle des 500 »

$$T_{\max} = 500 \text{ s} / \text{focale (mm)}$$

(focale pour un format 24x36)

Ex: 10s pour 50 mm;

3 s pour 170 mm.



Solution pour dépasser T_{\max}

Appareil fixé sur une monture astronomique

rotation au taux sidéral (1 tour en ~ 24 h) autour d'un axe parallèle à l'axe de la Terre.





Monture en
impression 3D,
arduino nano
et moteur pas-à-pas
~ 30 euros
Alignement vers la Polaire
À l'aide d'un laser vert

ftp://www.cenbg.in2p3.fr/astropart/StarTrack/StarTrack_f.pdf

Réglages de l'appareil

- distance de mise au point : à l'infini. Débrayer l'autofocus si possible et mettre au point manuellement.
- sensibilité: ISO 1600 ou 3200;
- format RAW si possible;
- mode manuel:
 - o ouverture complète du diaphragme (ou fermer d'une valeur);
 - o vitesse d'exposition : 15-30 s, voire plus si l'appareil le permet. Faire des essais en fonction de la qualité du suivi du ciel, estimée à partir de la taille des étoiles ;
- déclenchement : au retardateur ou via WIFI pour éviter les vibrations lors du déclenchement.

Nébuleuse de l' Aigle M16

Nébuleuse Omega M17

Nuage stellaire du Sagittaire M24

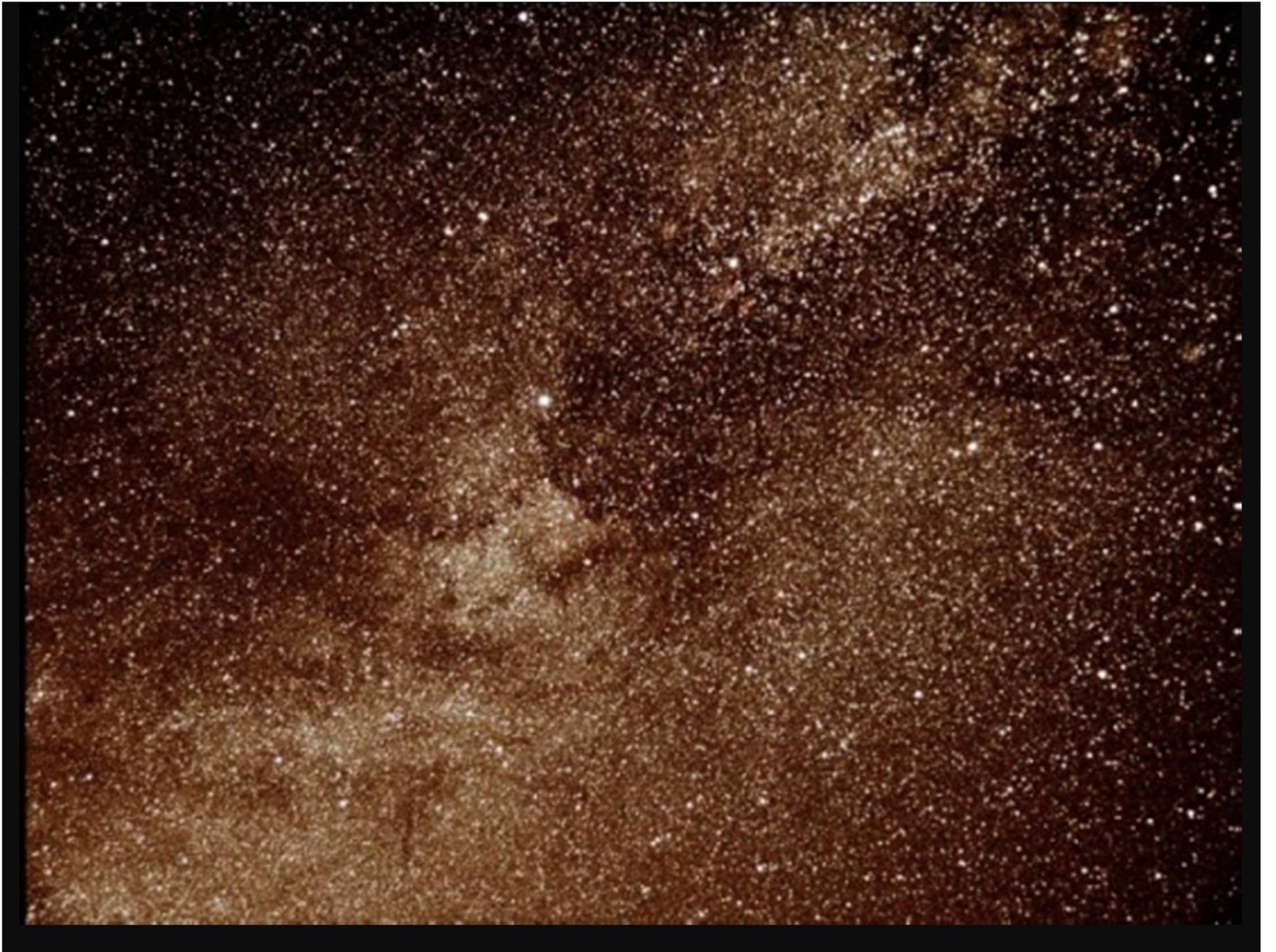
Saturne

M22

Nébuleuse Trifide M20

Nébuleuse de la Lagune M8

24°

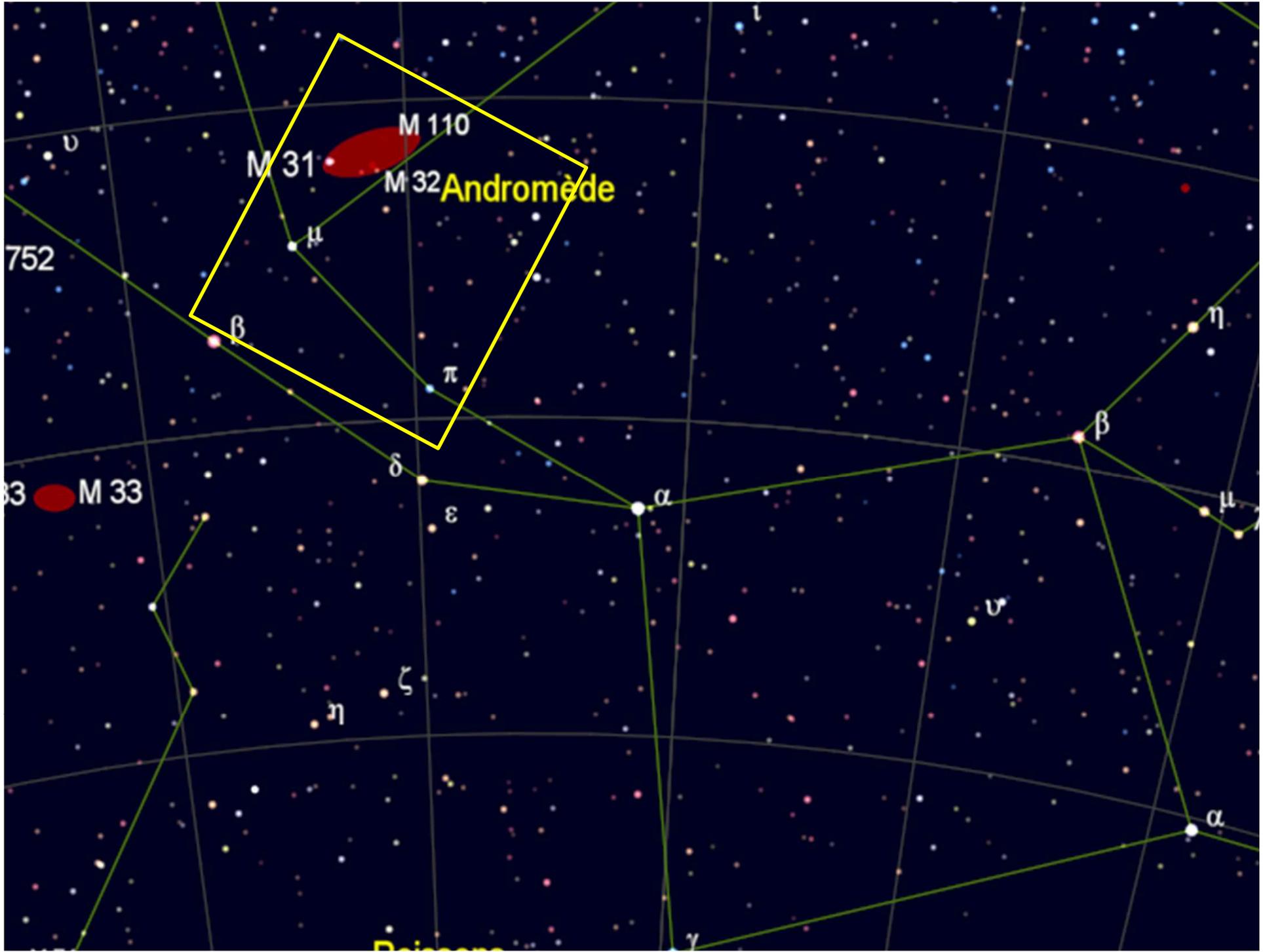


M 31 sans suivi



M 31 avec suivi



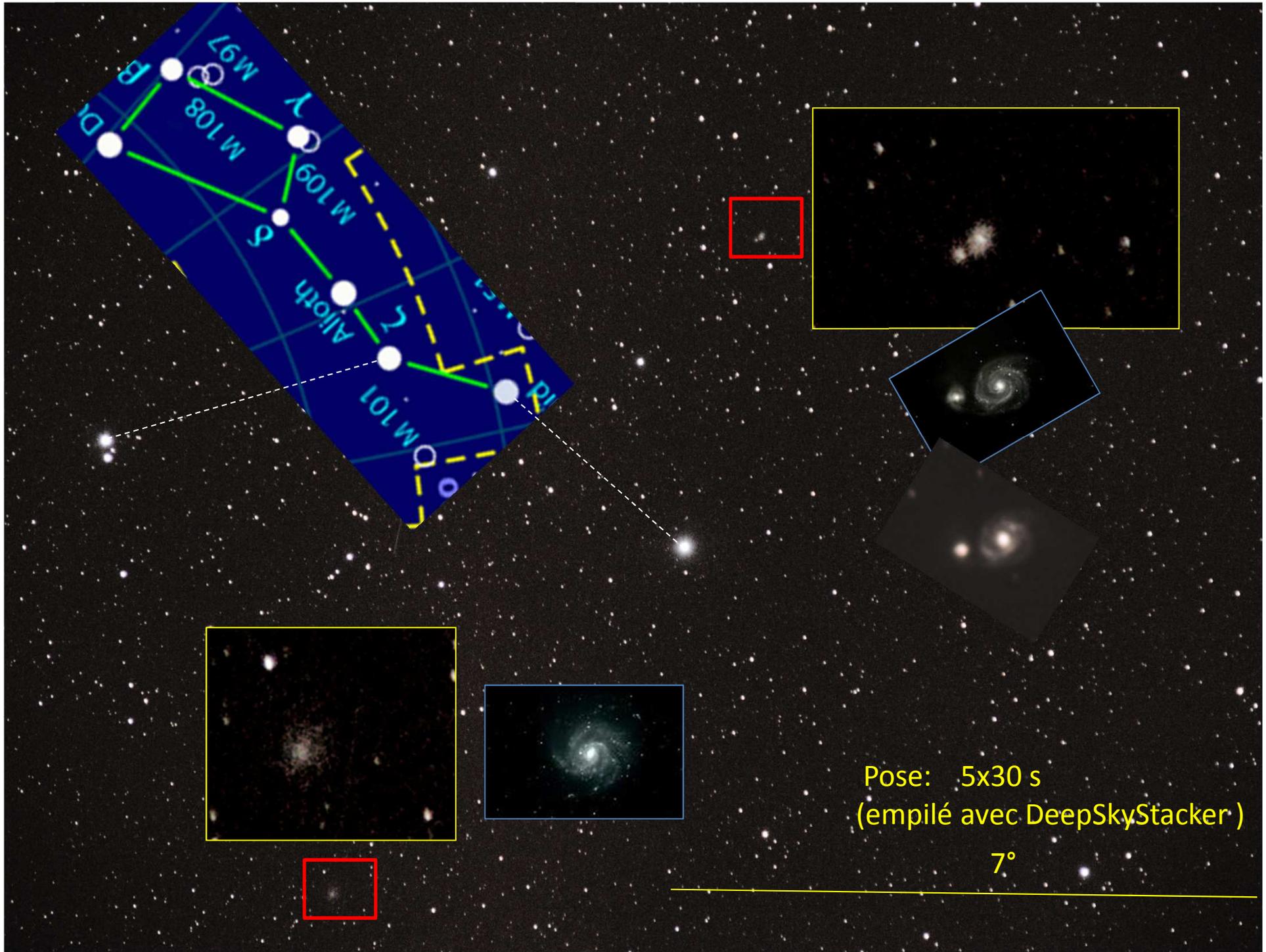


M 31 M 110
M 32 **Andromède**

752

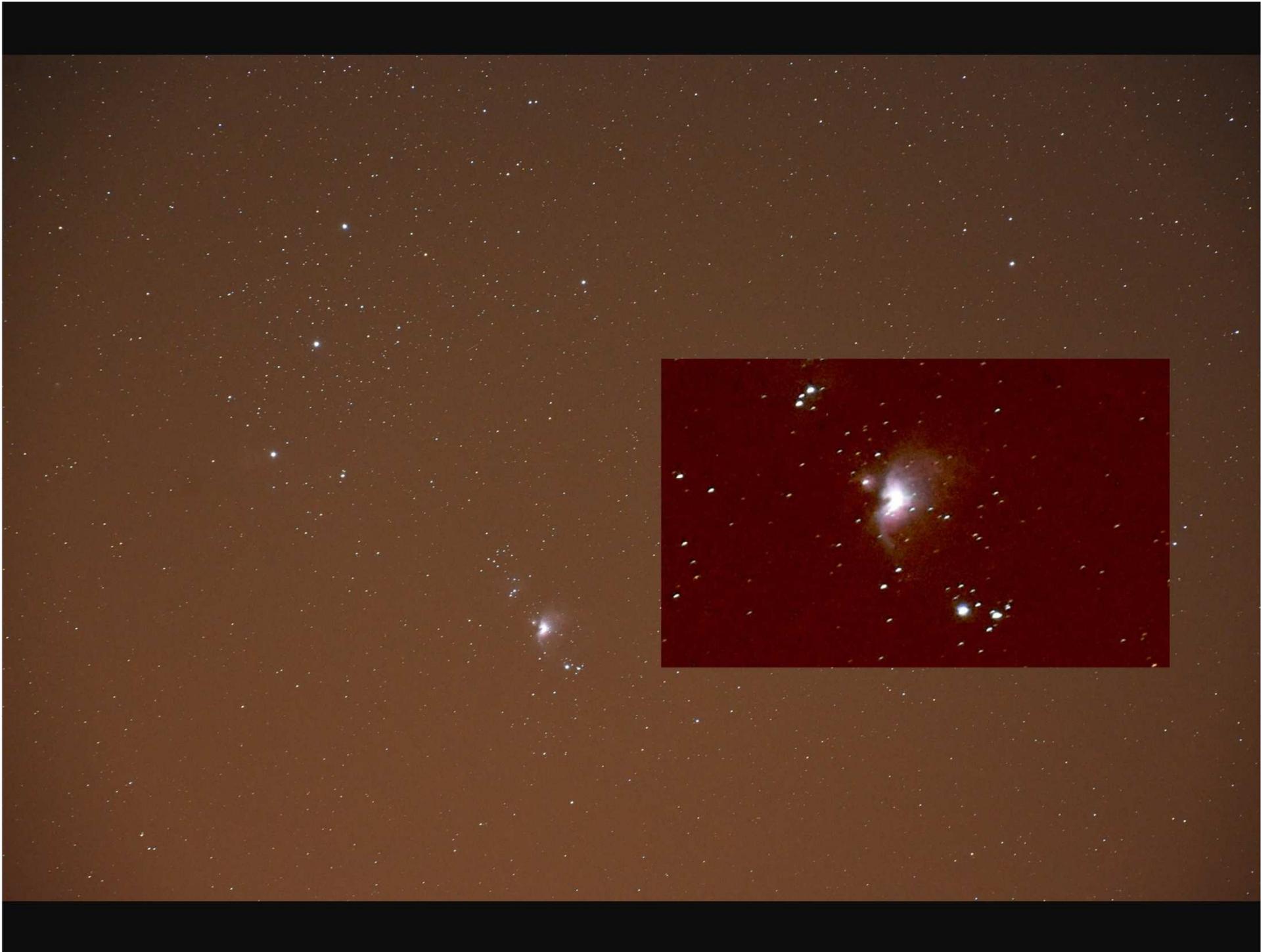
M 33

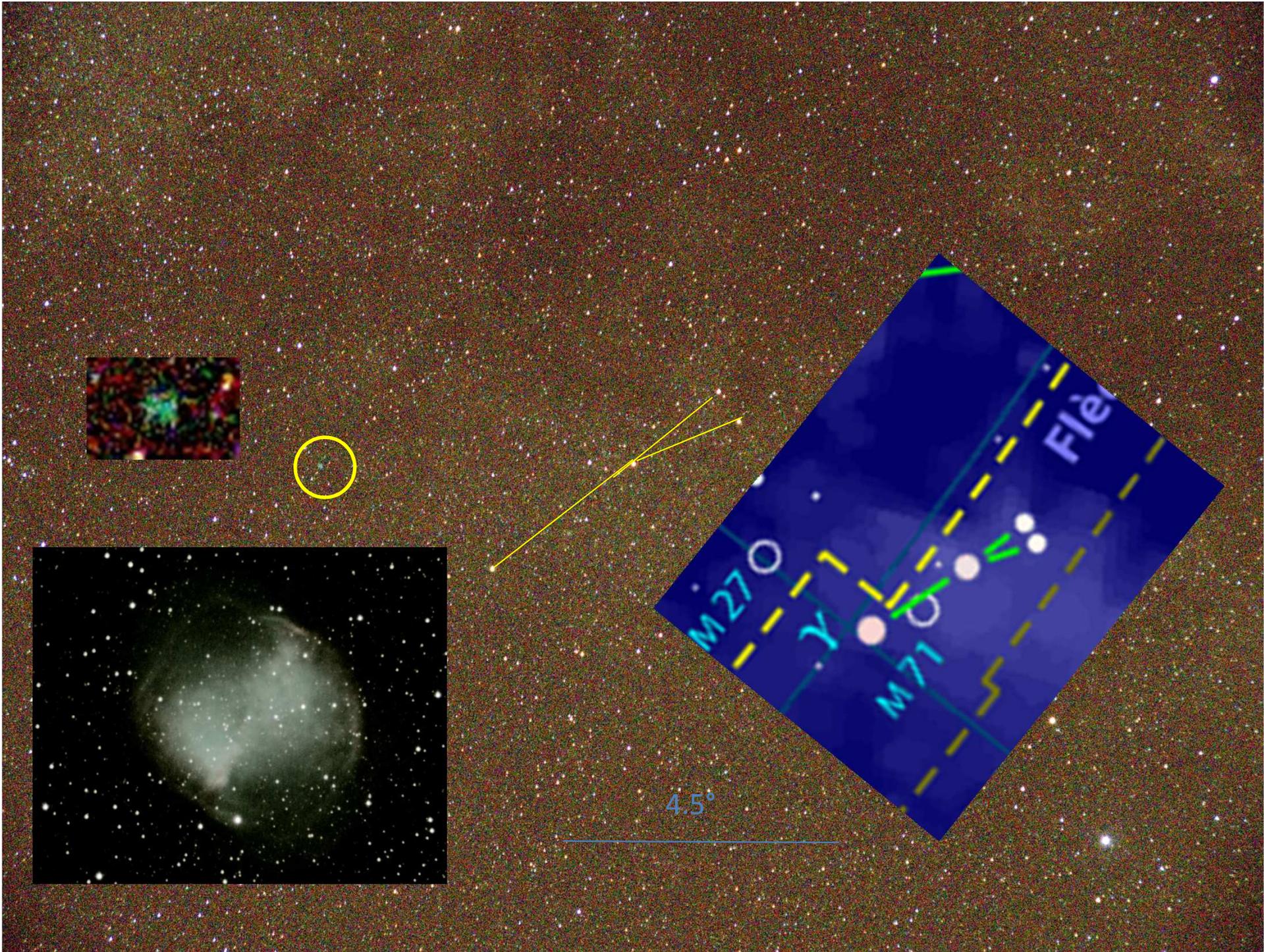
Andromède



Pose: 5x30 s
(empilé avec DeepSkyStacker)

7°





Intéressé?

ftp://www.cenbg.in2p3.fr/astropart/StarTrack/StarTrack_f.pdf

lott@cenbg.in2p3.fr