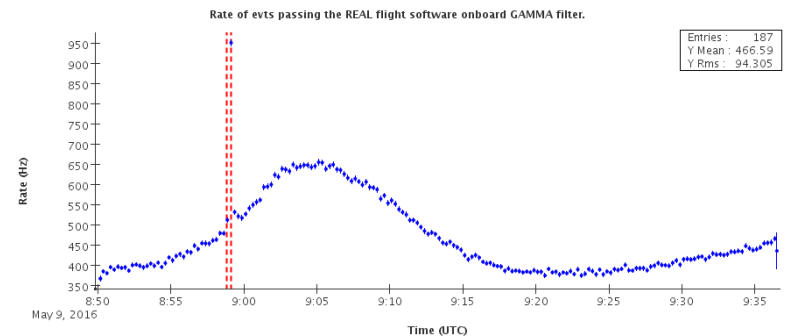
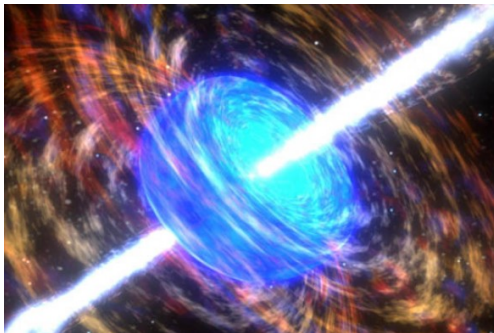


Sursauts Gamma

Johan Bregeon

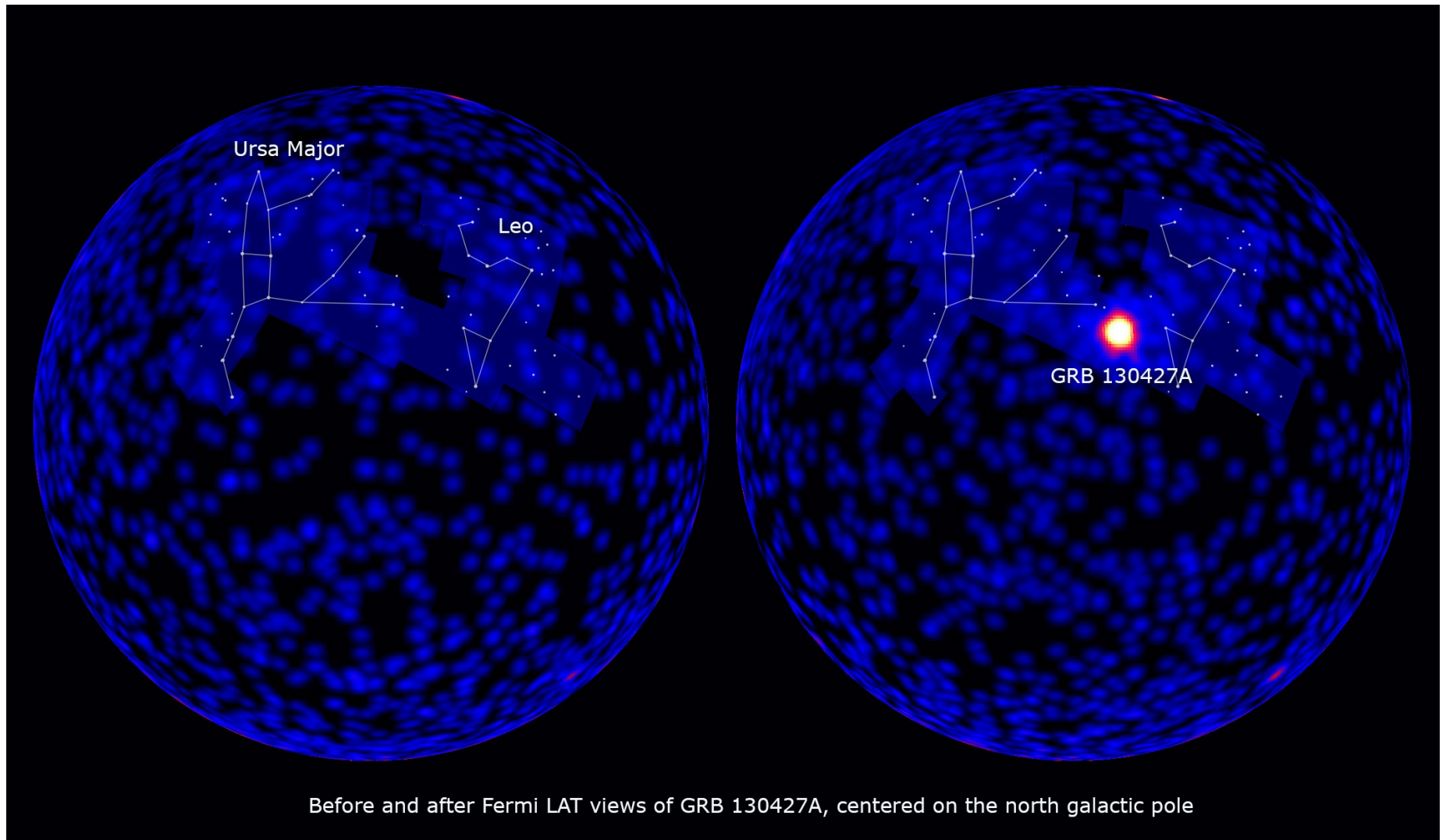
Laboratoire Univers et Particules de Montpellier

(Merci à F. Piron, MG Bernardini et M. Yassine pour les planches)



OCEVU L2 Summer Camp, IRAP, 14 juin 2016

Sursaut gamma ?

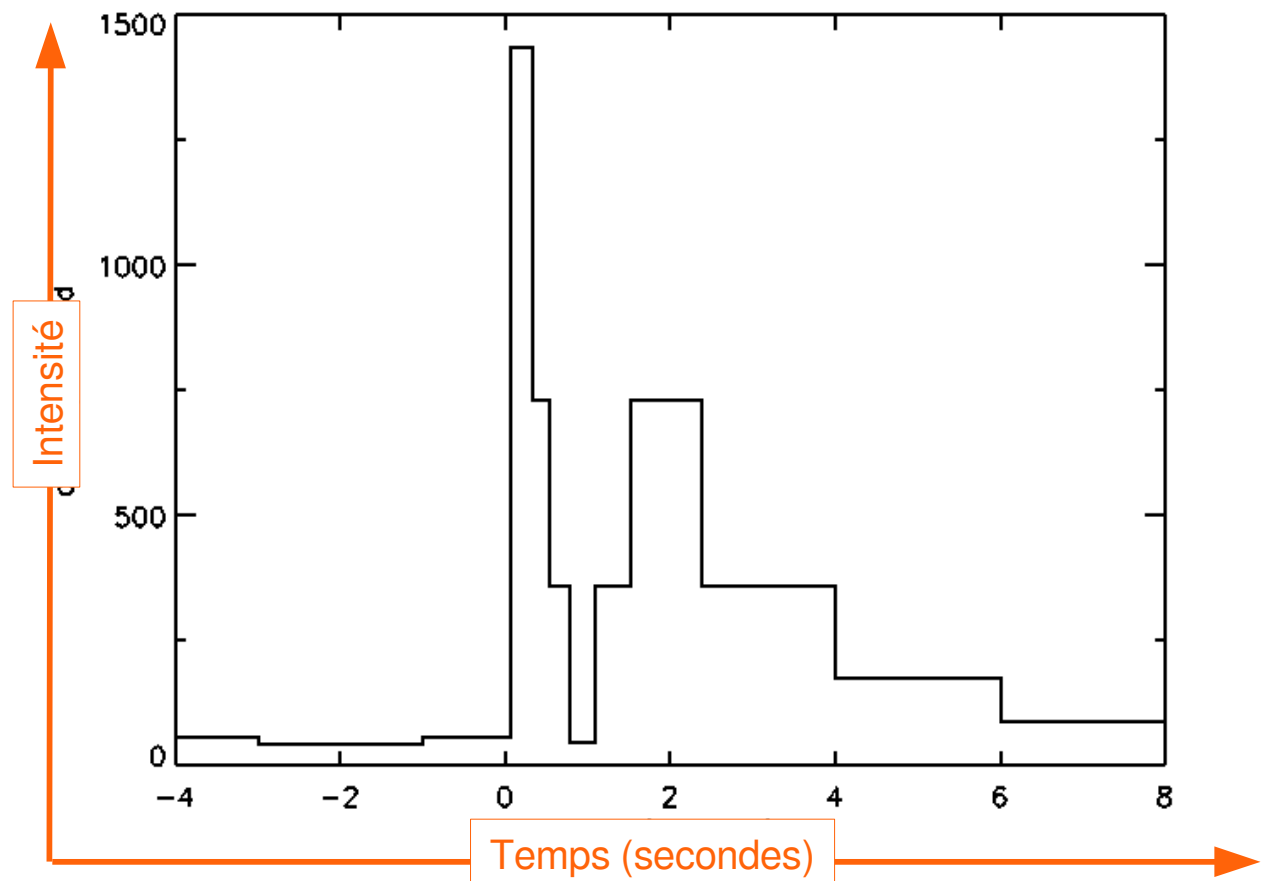


- Très intense “flash” de photons gamma (keV – GeV)
- Durée quelques secondes à quelques minutes
- Extrêmement énergétique

1967 : une découverte fortuite



- 1963 : démarrage du projet militaire américain **VELA**
 - détecter les essais atmosphériques en rayons gamma
 - paires de satellites en orbite à ~120 000 km
- 1967 : découverte accidentelle du premier **sursaut gamma GRB 670702** (“Gamma-Ray Burst” du 2 juillet 1967)



1973 : le premier article

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 182:L85–L88, 1973 June 1

© 1973. The American Astronomical Society. All rights reserved. Printed in U.S.A.

OBSERVATIONS OF GAMMA-RAY BURSTS OF COSMIC ORIGIN

RAY W. KLEBESADEL, IAN B. STRONG, AND ROY A. OLSON

University of California, Los Alamos Scientific Laboratory, Los Alamos, New Mexico

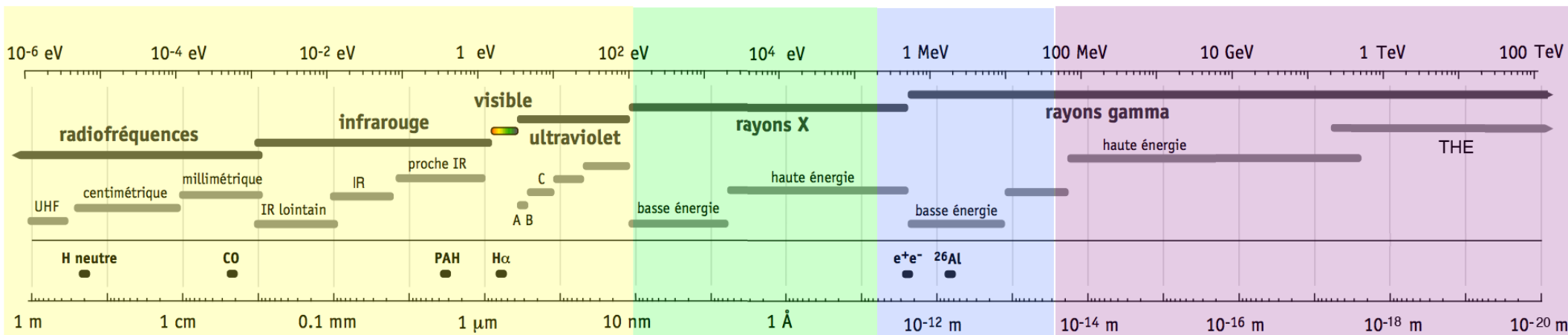
Received 1973 March 16; revised 1973 April 2

ABSTRACT

Sixteen short bursts of photons in the energy range 0.2–1.5 MeV have been observed between 1969 July and 1972 July using widely separated spacecraft. Burst durations ranged from less than 0.1 s to ~ 30 s, and time-integrated flux densities from $\sim 10^{-5}$ ergs cm^{-2} to $\sim 2 \times 10^{-4}$ ergs cm^{-2} in the energy range given. Significant time structure within bursts was observed. Directional information eliminates the Earth and Sun as sources.

Subject headings: gamma rays — X-rays — variable stars

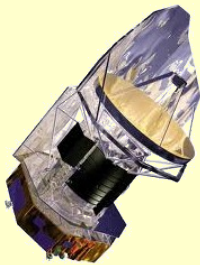
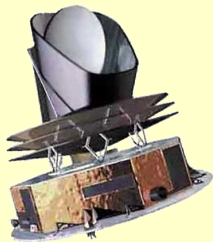
Spectre électromagnétique et rayons gamma



Domaines radio, sub-mm, infra-rouge, visible, UV, X

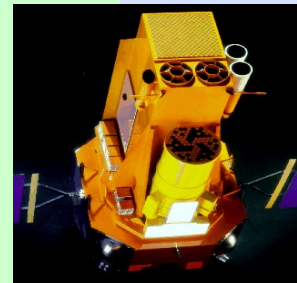
Domaine des rayons gamma

Planck



XMM
Newton

SWIFT



Compton



Fermi

HAWC

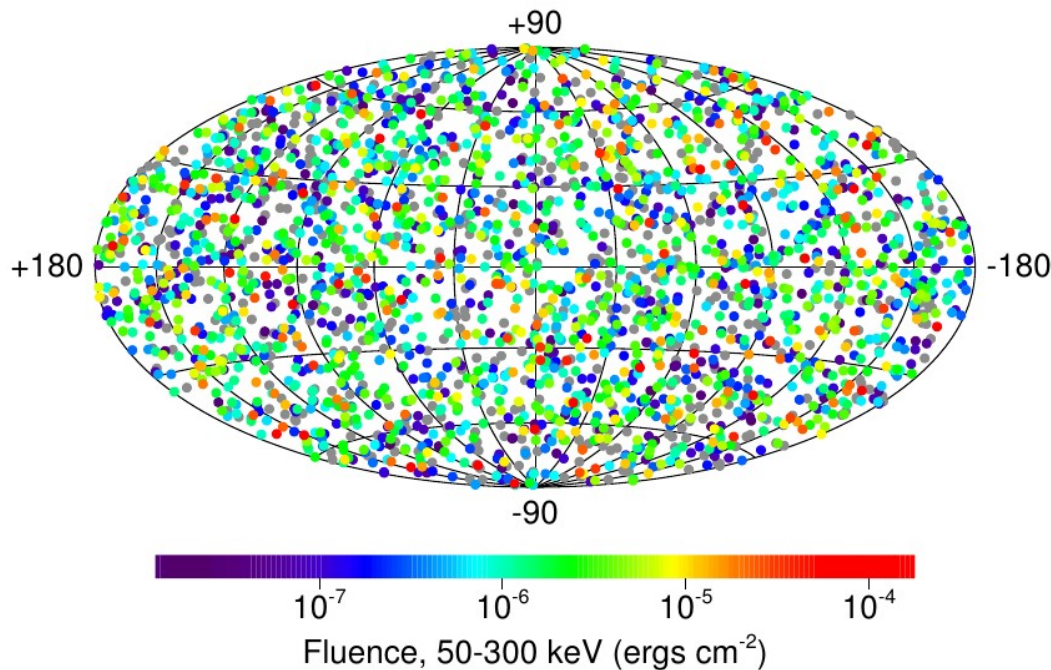


HESS

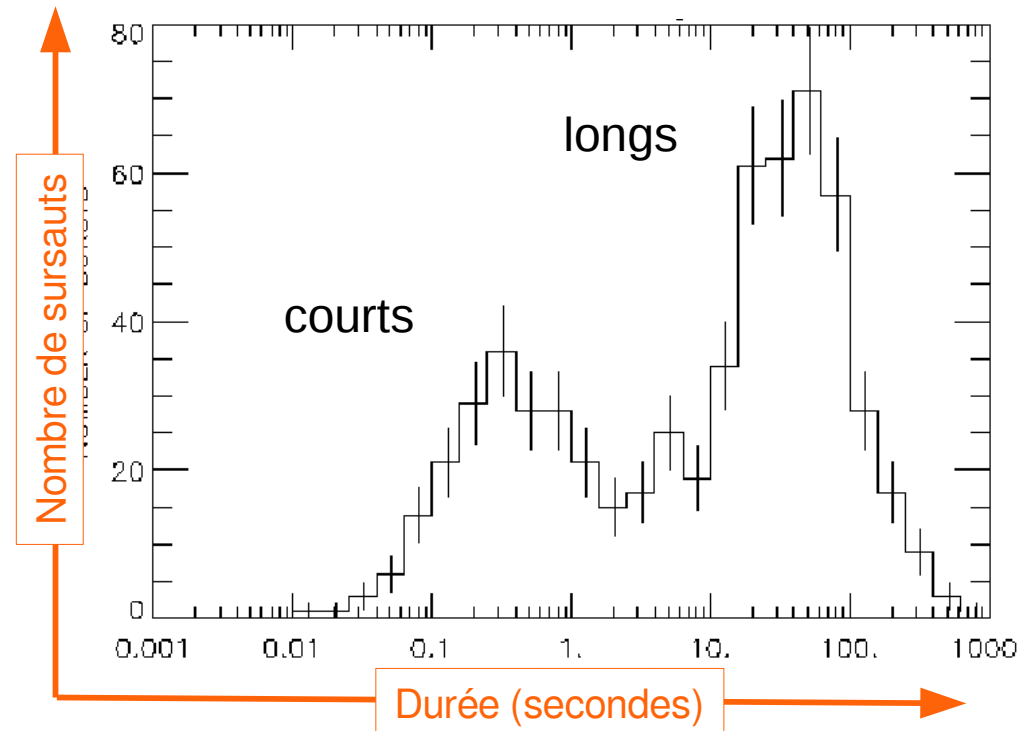
1991 – 1996 : les premiers indices



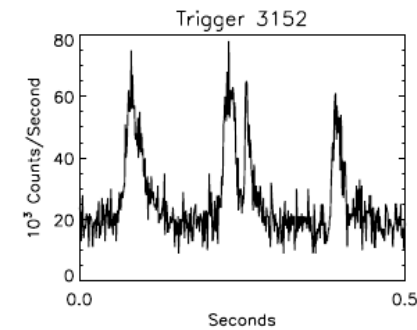
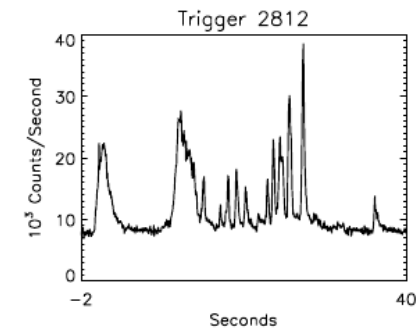
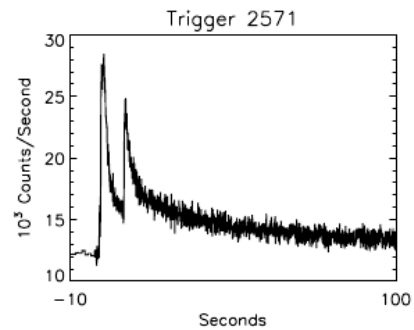
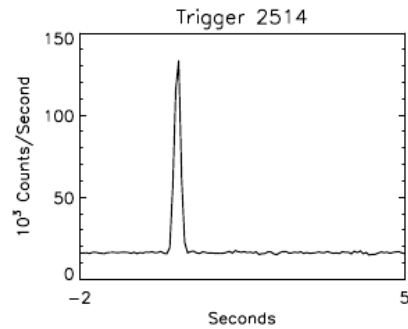
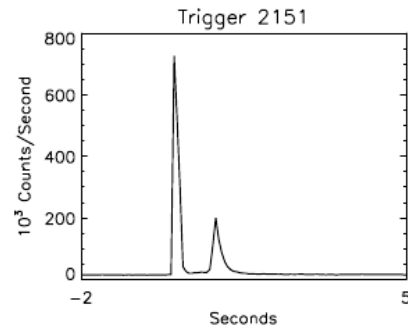
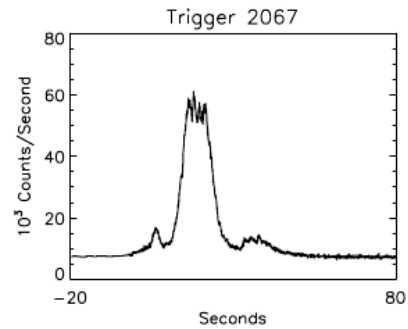
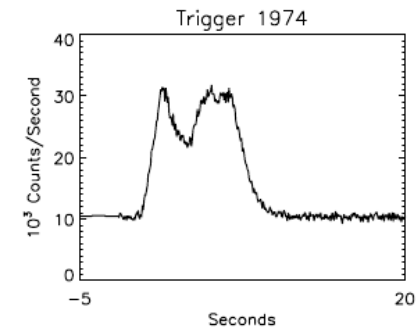
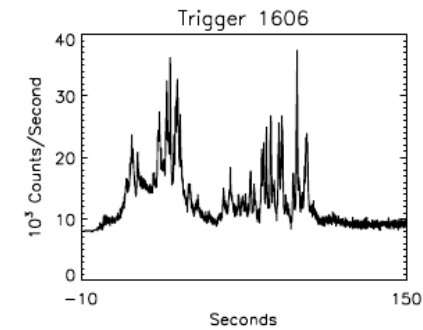
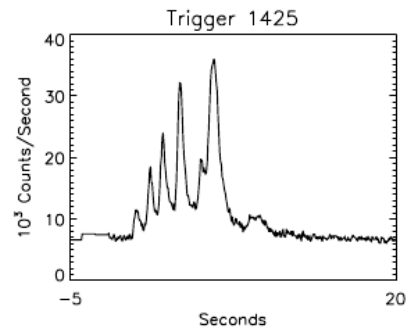
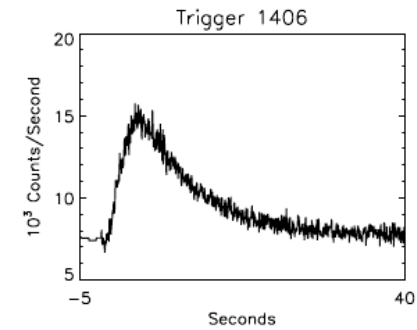
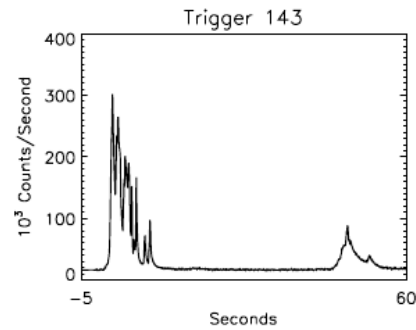
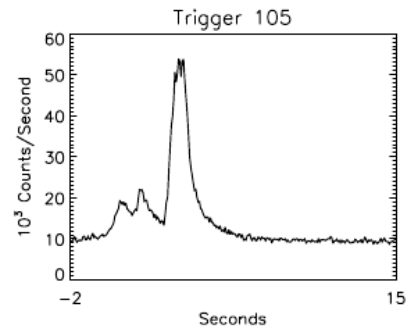
2704 BATSE Gamma-Ray Bursts



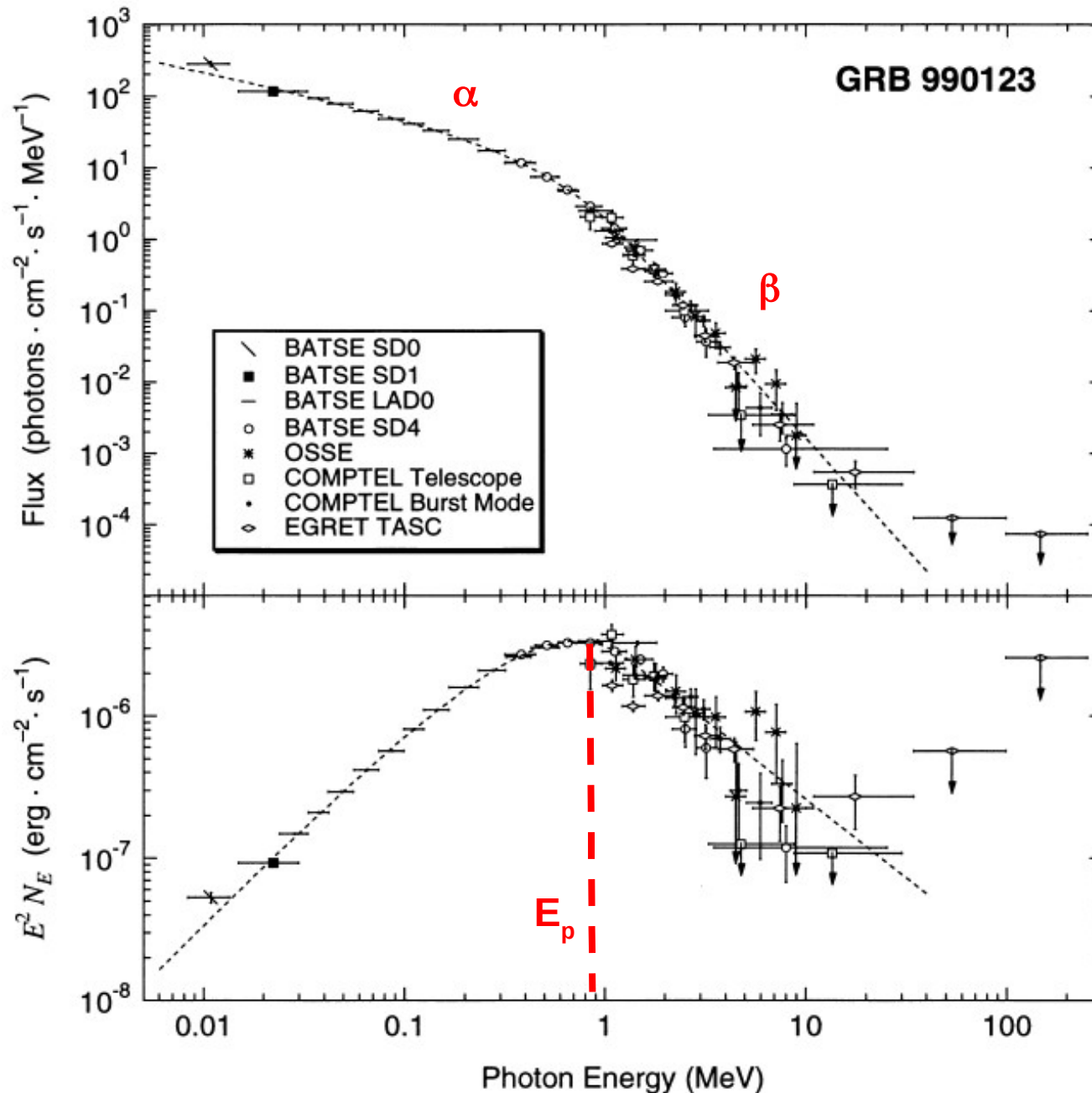
- BATSE (observatoire Compton) :
 - ~30 keV – 2 MeV
 - Un sursaut gamma par jour
- **Distribués uniformément** sur la sphère céleste (isotropie)
 - Cosmologiques !
- Deux classes : **courts ou longs**
 - 2 types de sources ?



Une grande variabilité de profils temporels



Des spectres simples et caractéristiques



- Spectre **non thermique** :
loi de puissance brisée

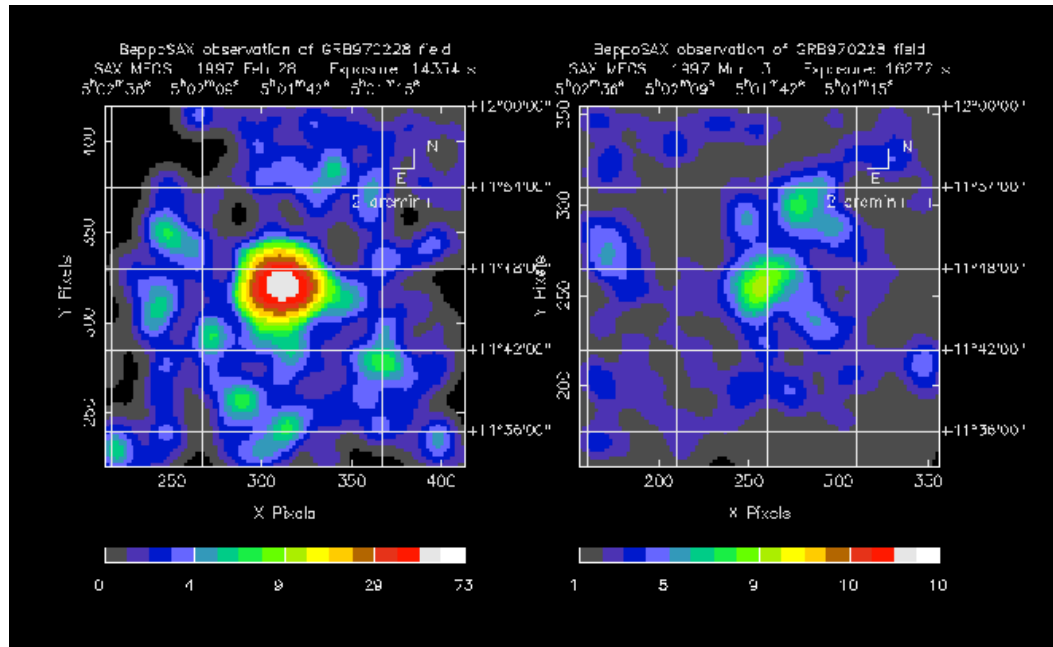
$$E < E_{peak} : F(E) \propto E^\alpha \times \exp(E/E_0)$$

$$E > E_{peak} : F(E) \propto E^\beta$$

- Indices spectraux :
 $\alpha \sim -1.0$, $\beta \sim -2.5$
- Energie au pic :
 $E_p \sim$ quelques 100 keV

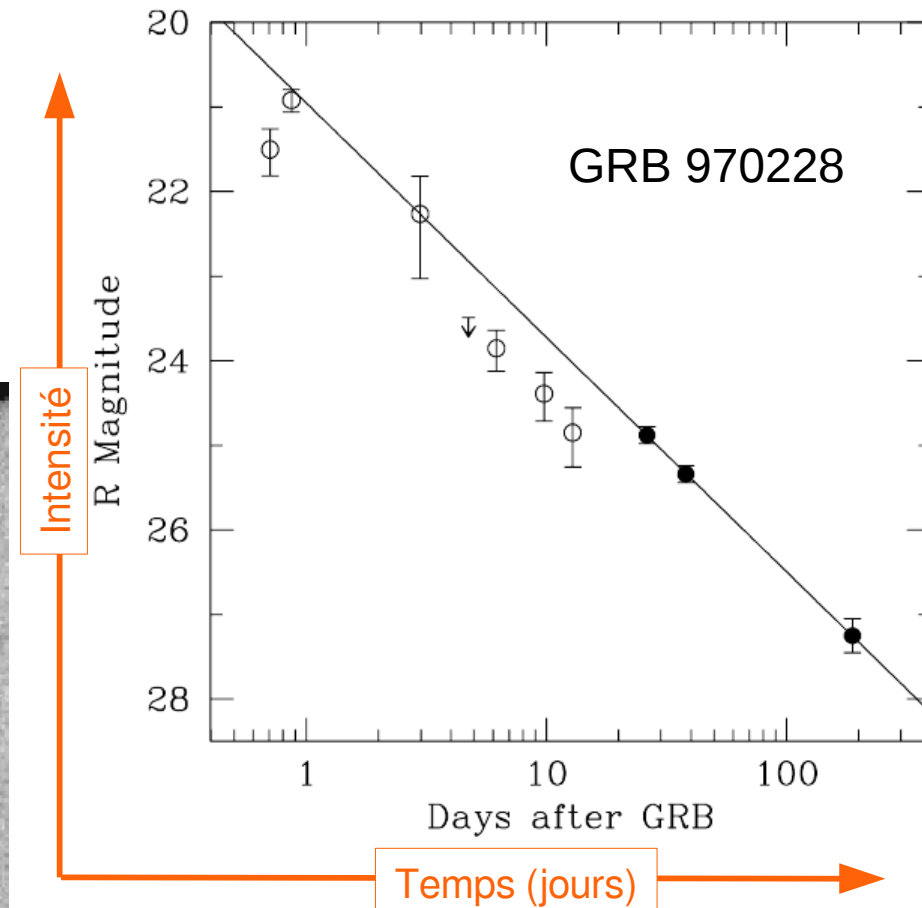
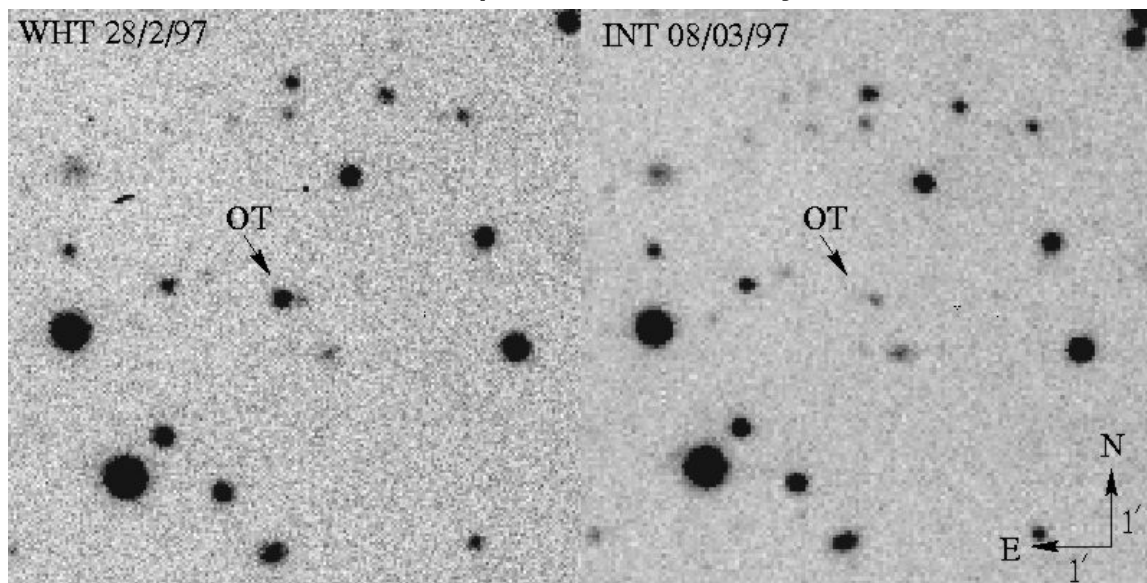
GRB 970228 : la première rémanence

- En rayons X : après 8 h et ~3 jours



L'intensité de l'émission rémanente décroît très vite en se décalant vers les plus grandes longueurs d'ondes : $\gamma \rightarrow X \rightarrow \text{visible} \rightarrow \text{radio}$

- Dans le visible : après 21 h et 8 jours

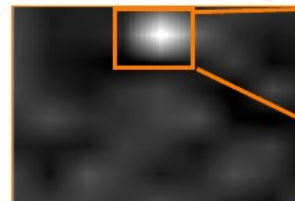


L'observatoire spatial *Swift* (2004 - ?)



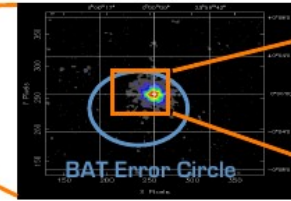
- Une approche multi-longueurs d'onde
- **Burst Alert Telescope** : moniteur gamma (15-150 keV), grand champ de vue (2 sr)
→ détection et localisation
- **X-Ray Telescope** : caméra de petit champ de vue ($\sim 20'$) pour l'observation de la rémanence en rayons X (0.2-10 keV) après un **repointage rapide** (1-2 min)
→ localisation précise
- **UV/Optical Telescope** : 30 cm
→ localisation très précise

BAT Burst Image



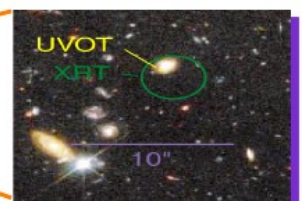
$T < 10$ s; $\theta < 4'$

XRT Image



$T < 100$ s; $\theta < 5''$

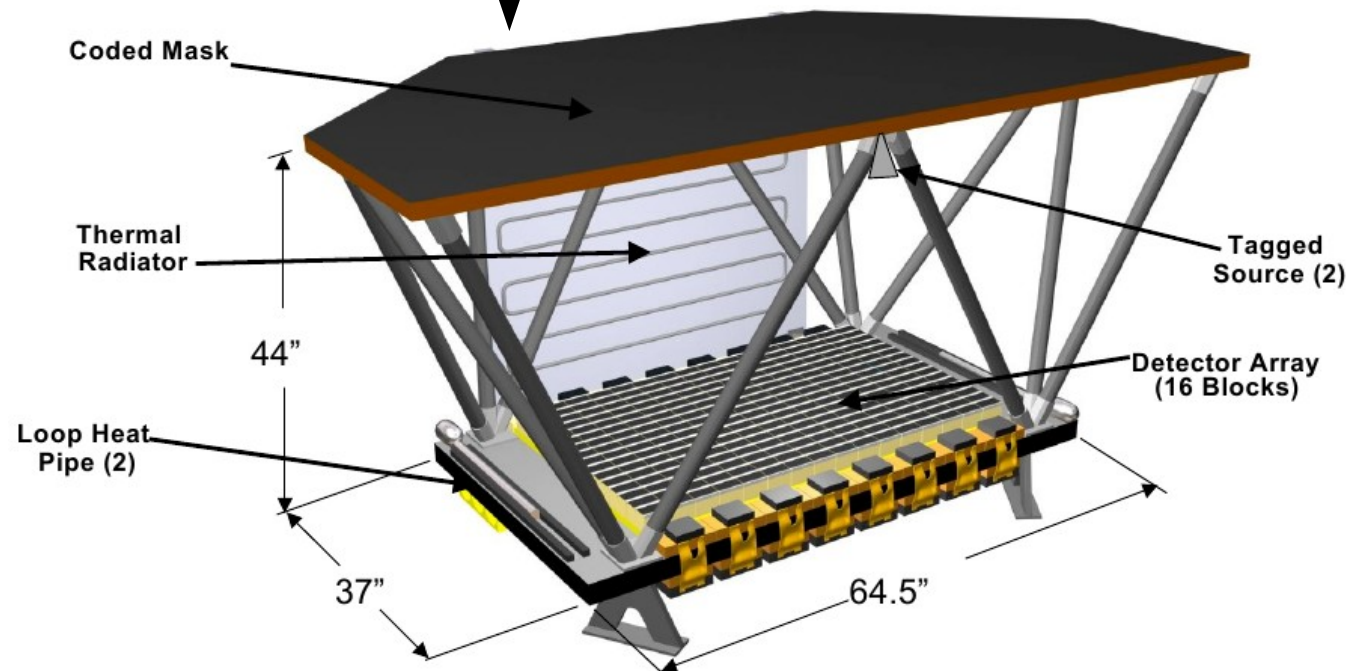
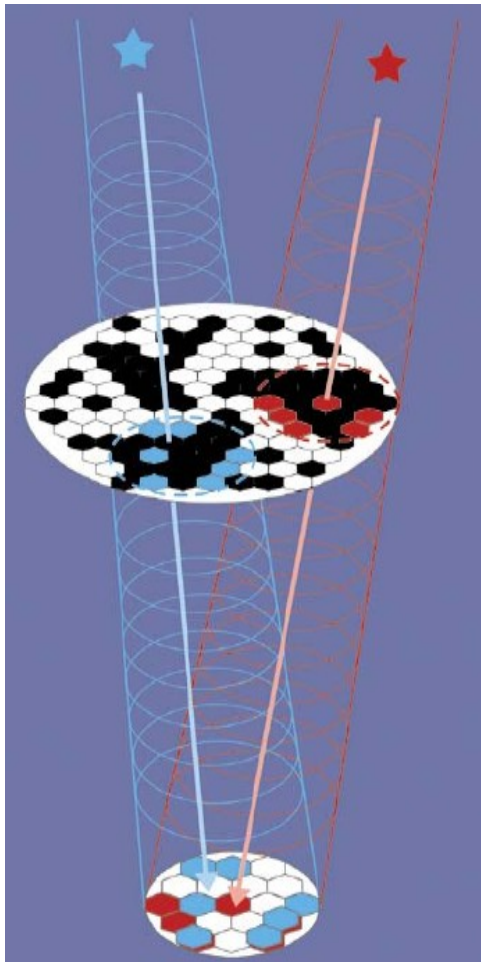
UVOT Image



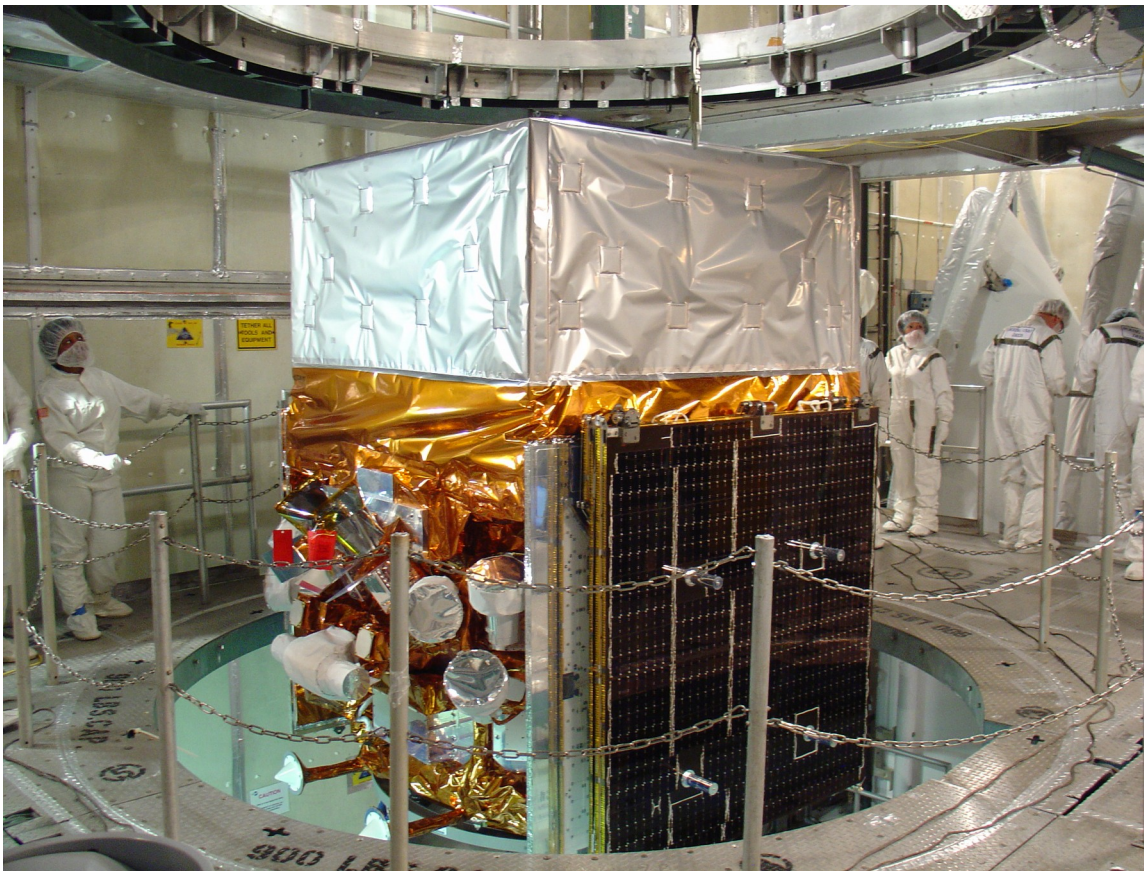
$T < 300$ s; $\theta < 0.5''$

Le “Burst Alert Telescope” de *Swift* : principe

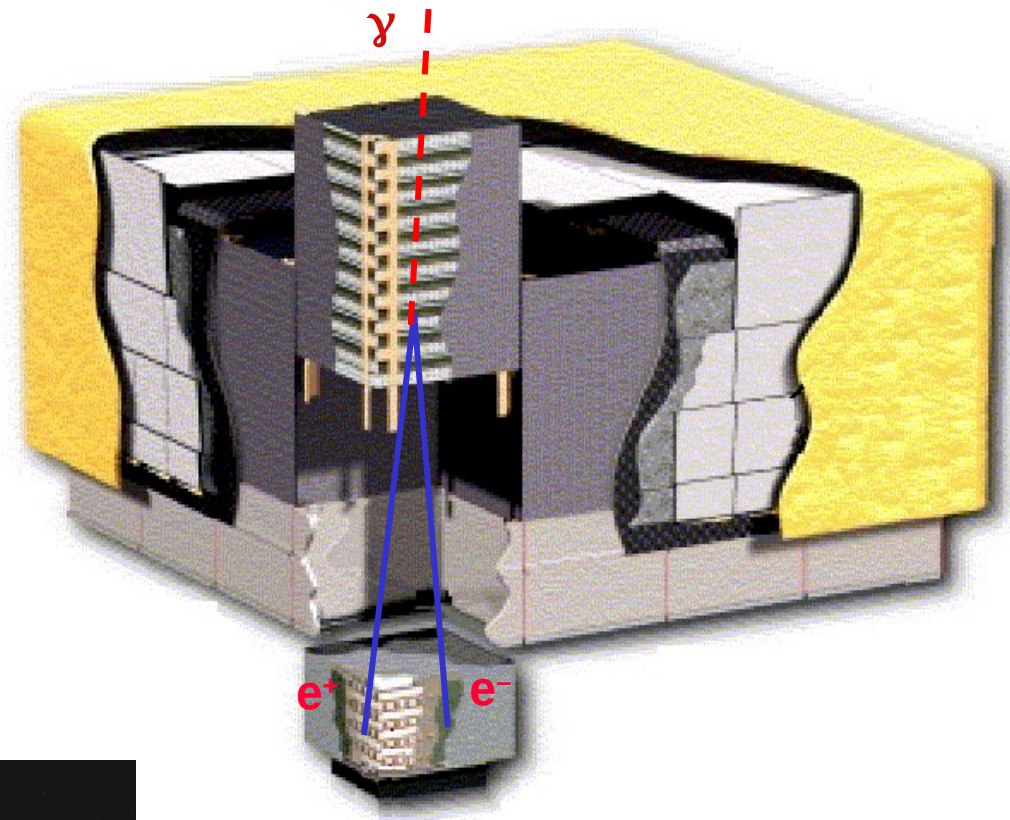
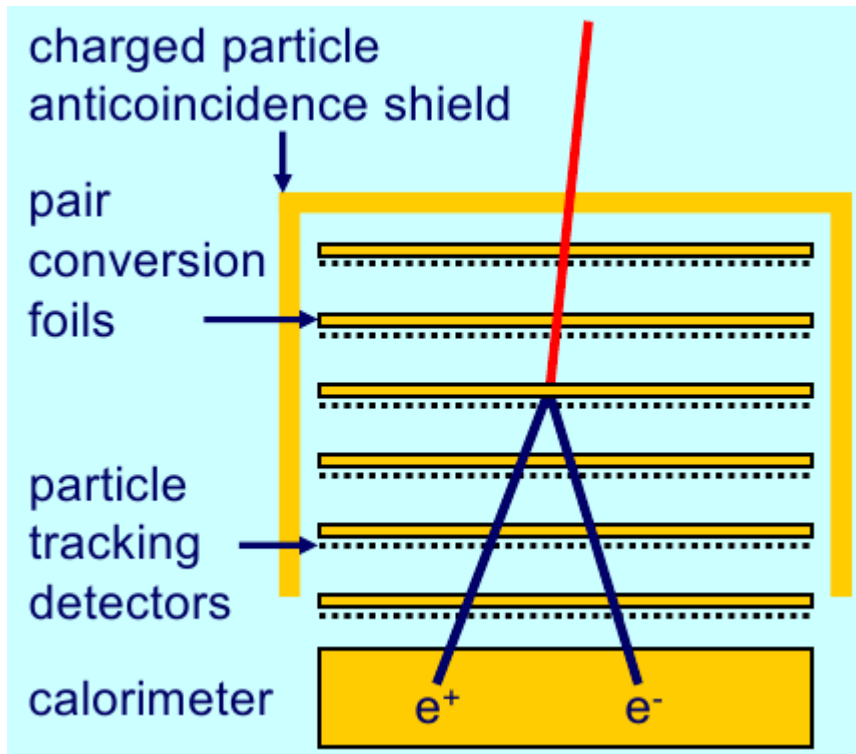
- Télescope à **masque codé**
- Détection sur le principe de la chambre obscure



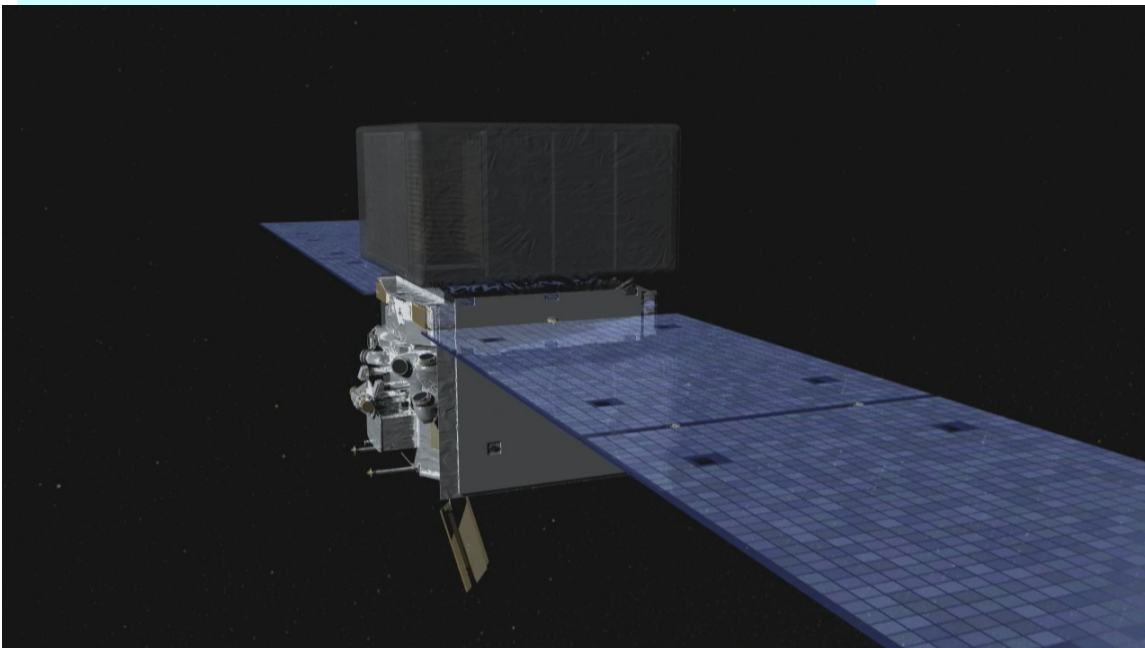
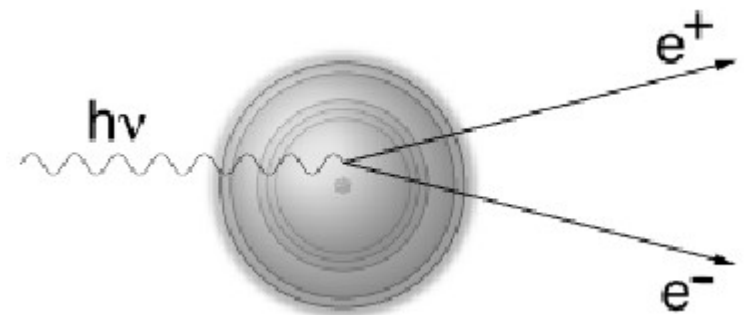
L'observatoire spatial *Fermi* (2008 - ?)



Le “Large Area Telescope” de *Fermi* : principe

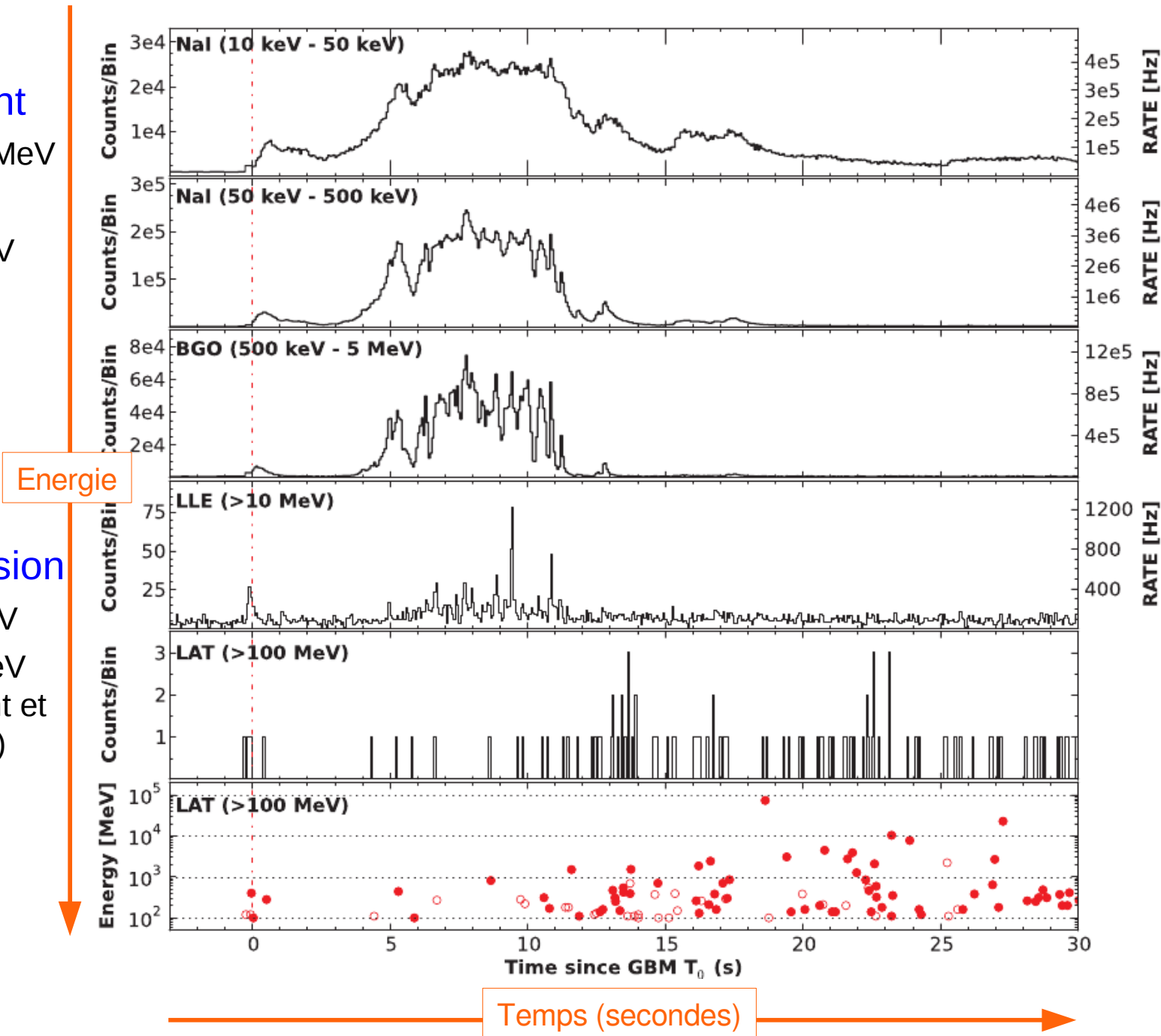


Un télescope “à effet de paires”

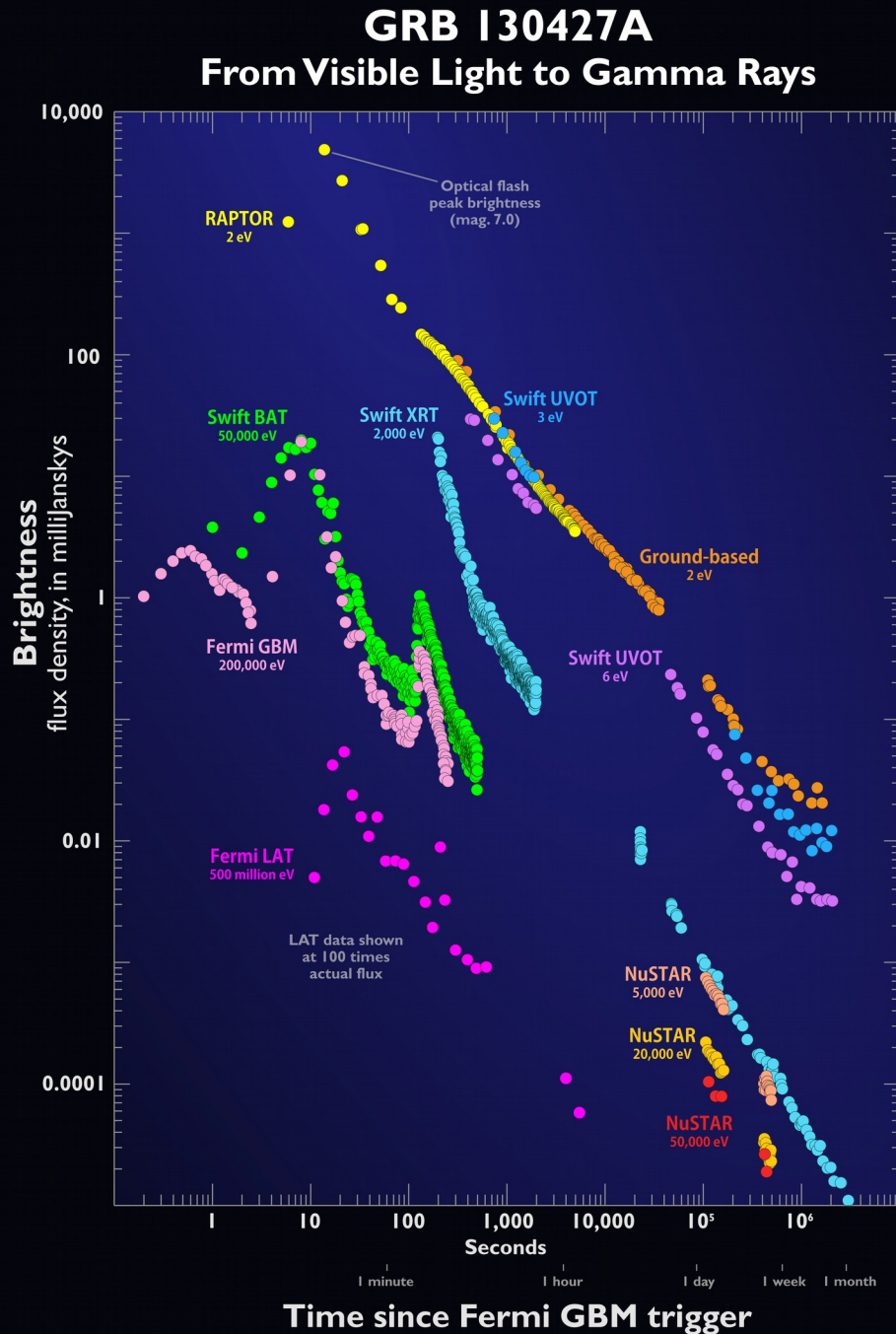


GRB 130427A vu par *Fermi*

- Sursaut **le plus brillant**
 - >500 photons >100 MeV
 - 15 photons >10 GeV
 - Un photon de 73 GeV détecté après 19 s
- Deux phases d'émission
 - Prompte 0.01-10 MeV
 - Rémanente >100 MeV (apparaît tardivement et dure plus longtemps)

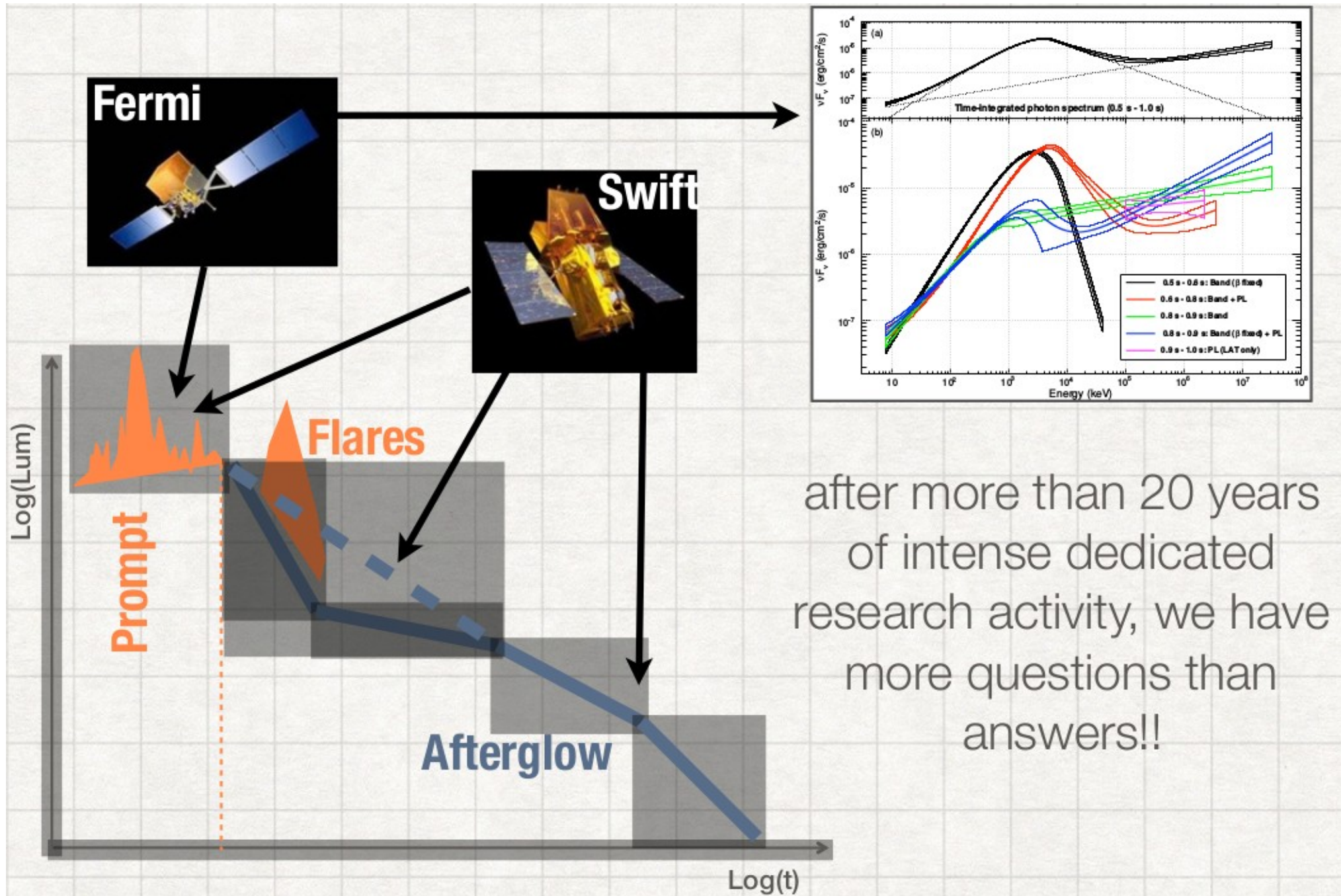


GRB 130427A vu par différents télescopes

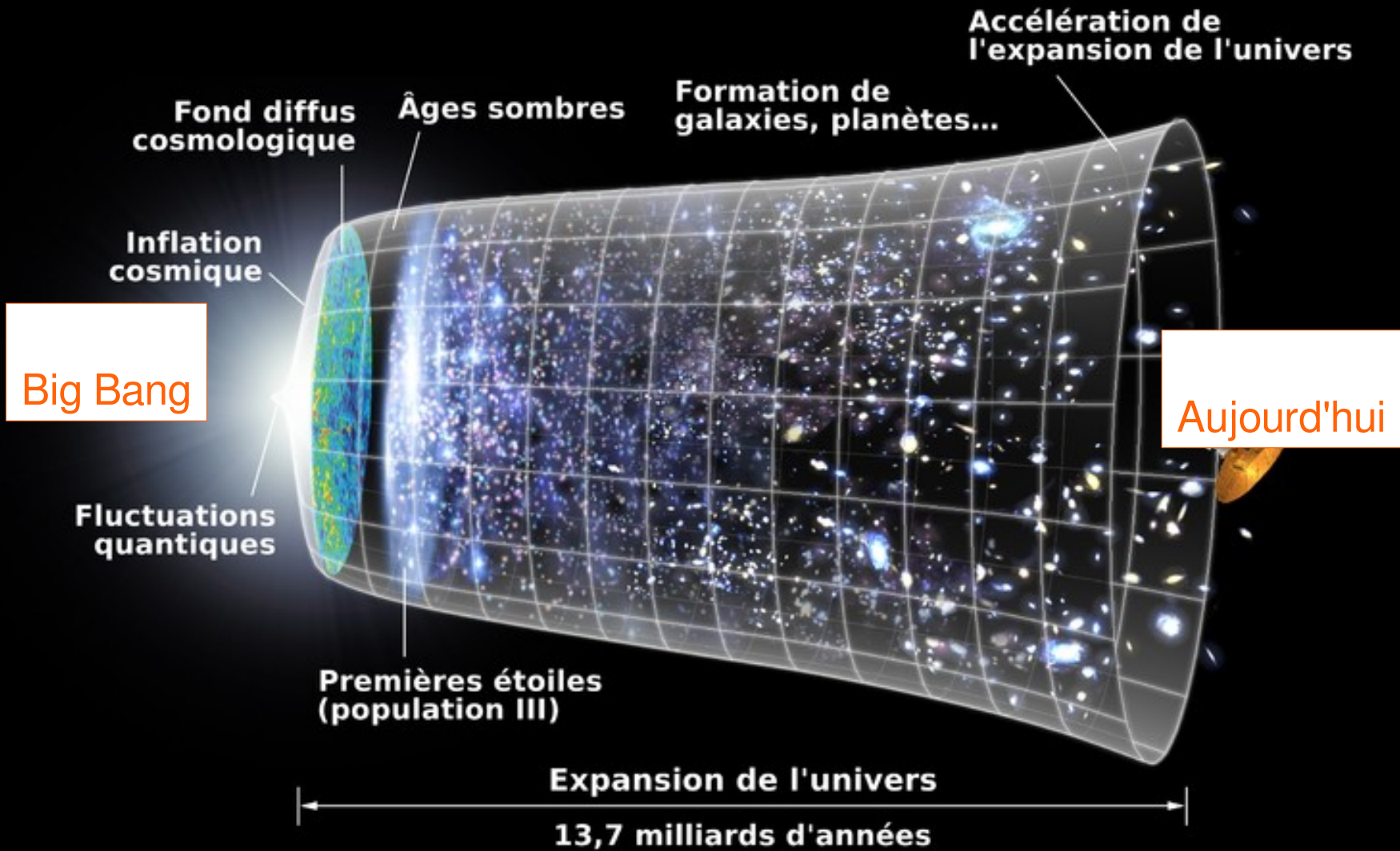


- Sursaut le plus brillant en rayons X et γ (émissions prompt et rémanente)
- Nombreuses observations avec des télescopes au sol
- Flash très brillant dans le visible au moment du sursaut

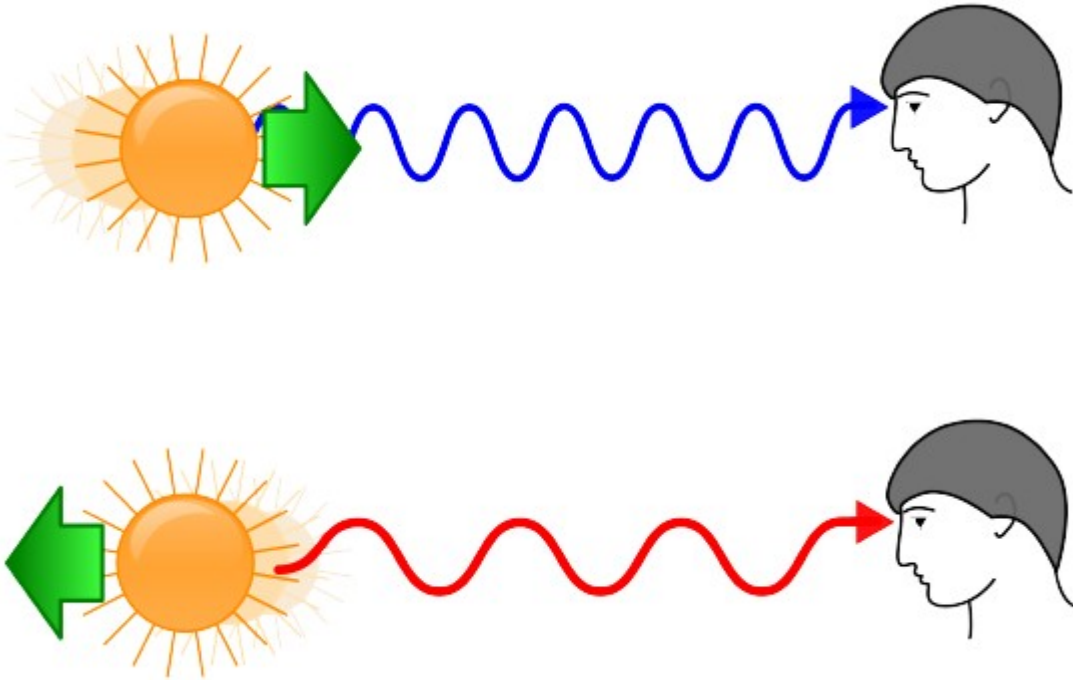
Sursaut : vue “simplifiée”



Expansion de l'Univers

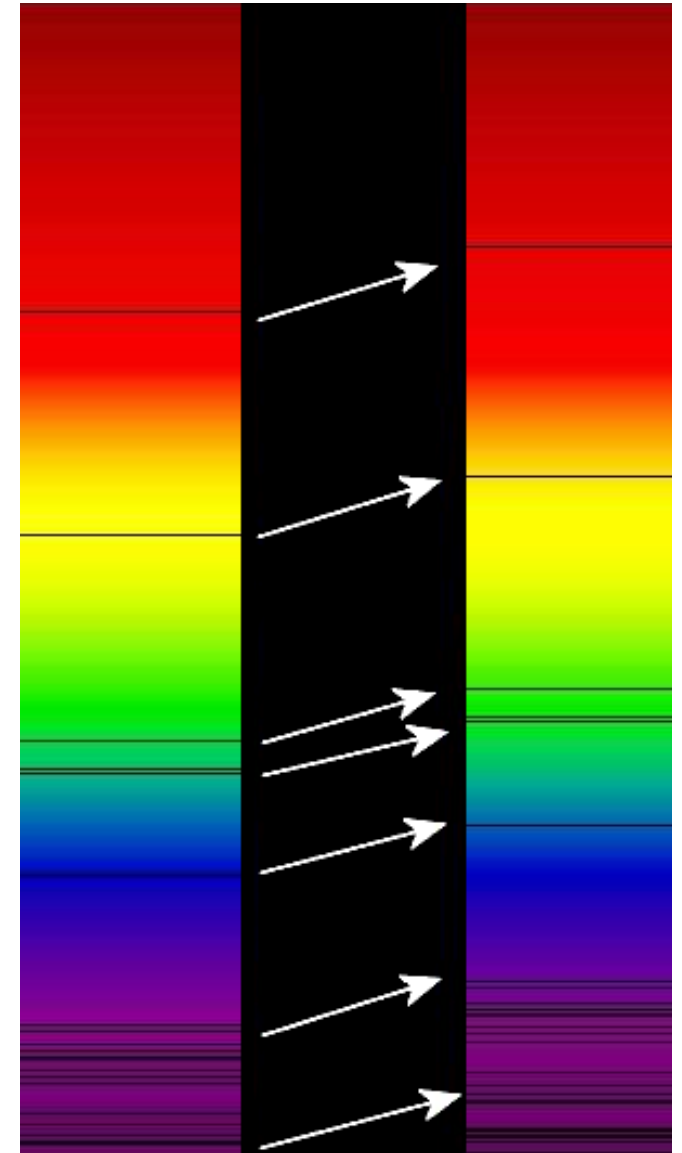


Décalage en fréquence / couleur (*redshift*)

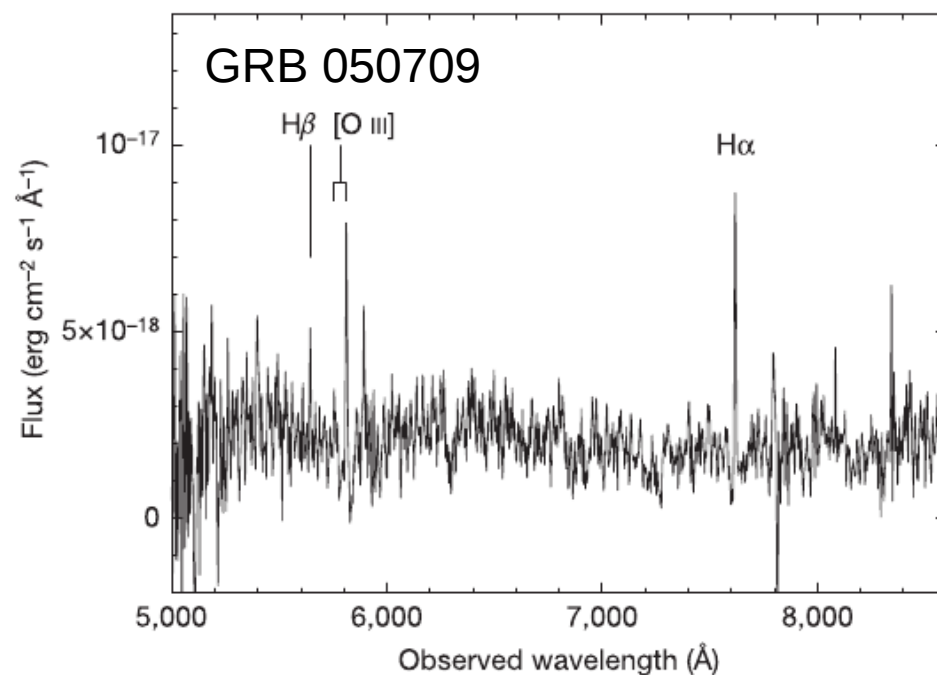
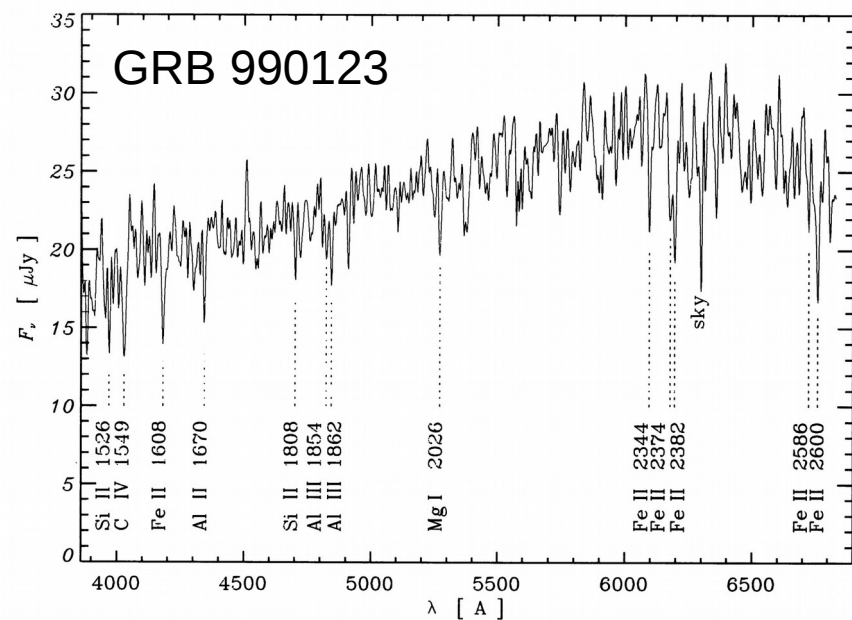
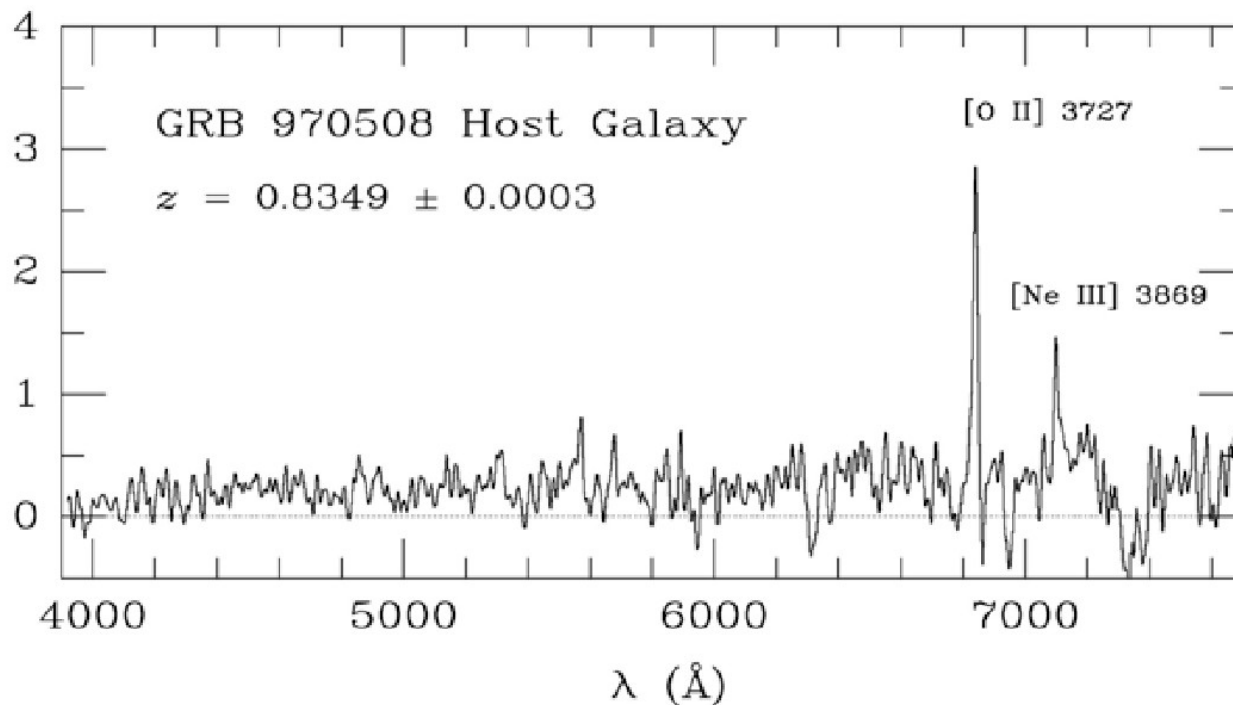
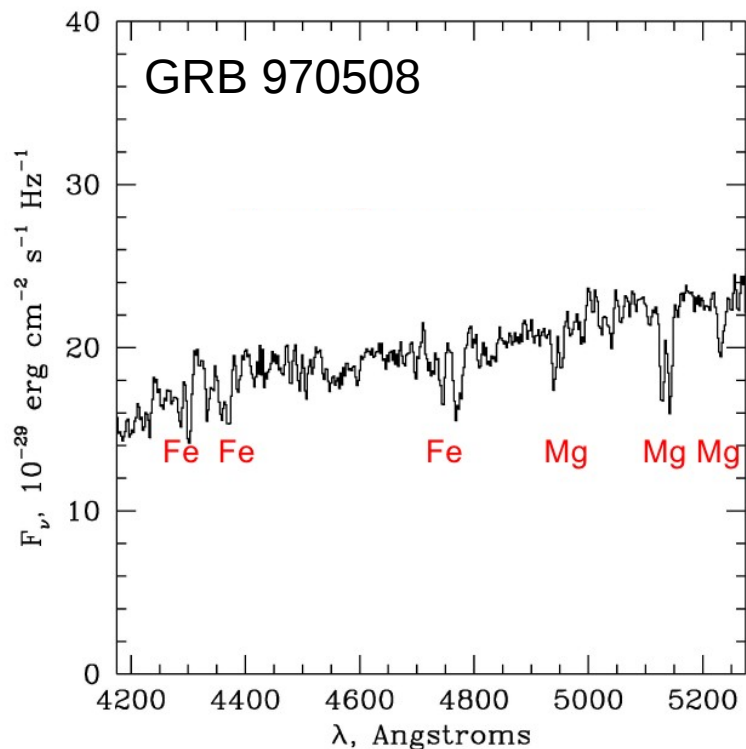


Du fait de l'**expansion** de l'Univers :

le spectre d'un objet distant est
décalé vers le rouge pour l'observateur
par rapport au spectre émis à la source



Spectres de sursauts ou de leurs galaxies en visible / IR

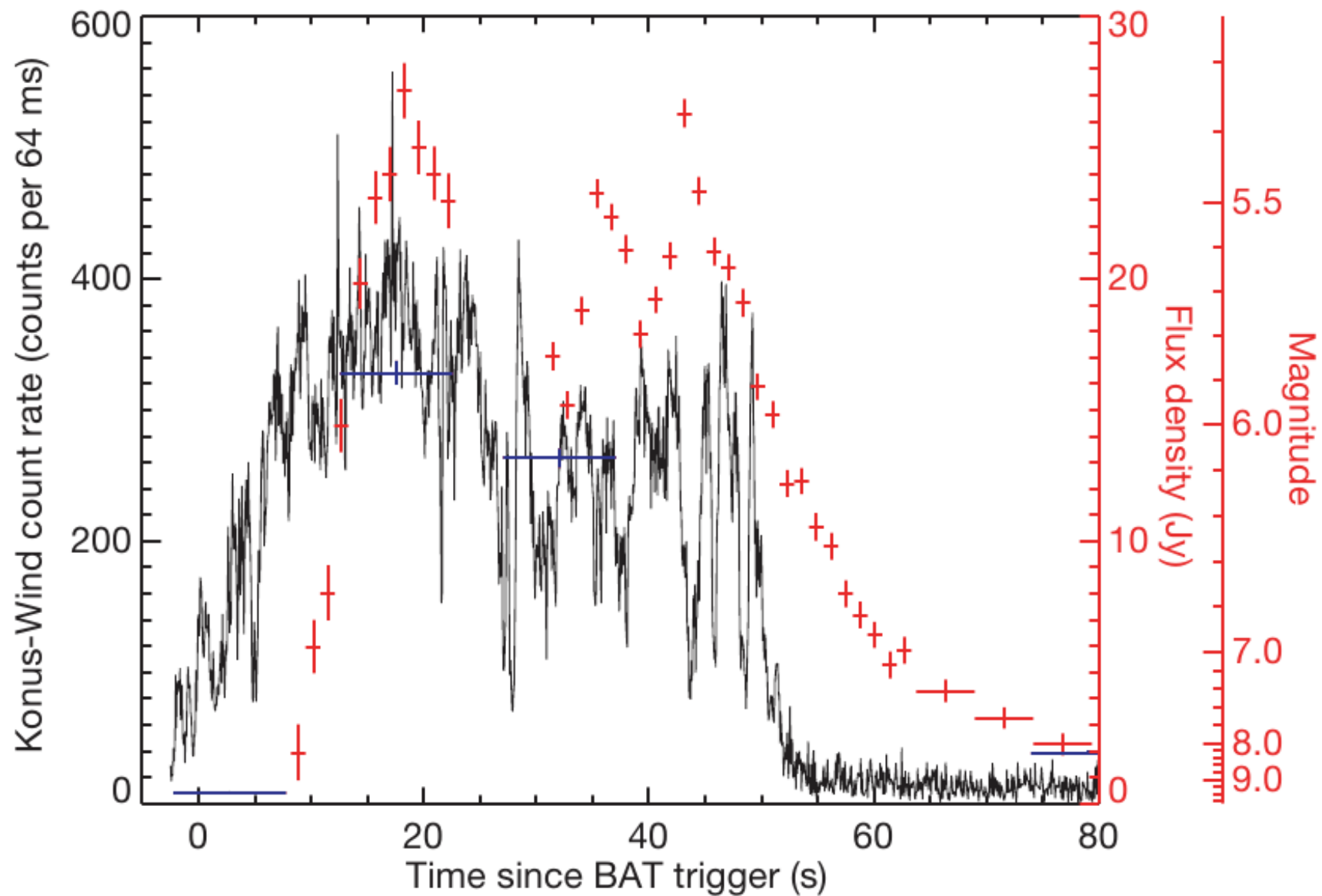


Des objets très distants

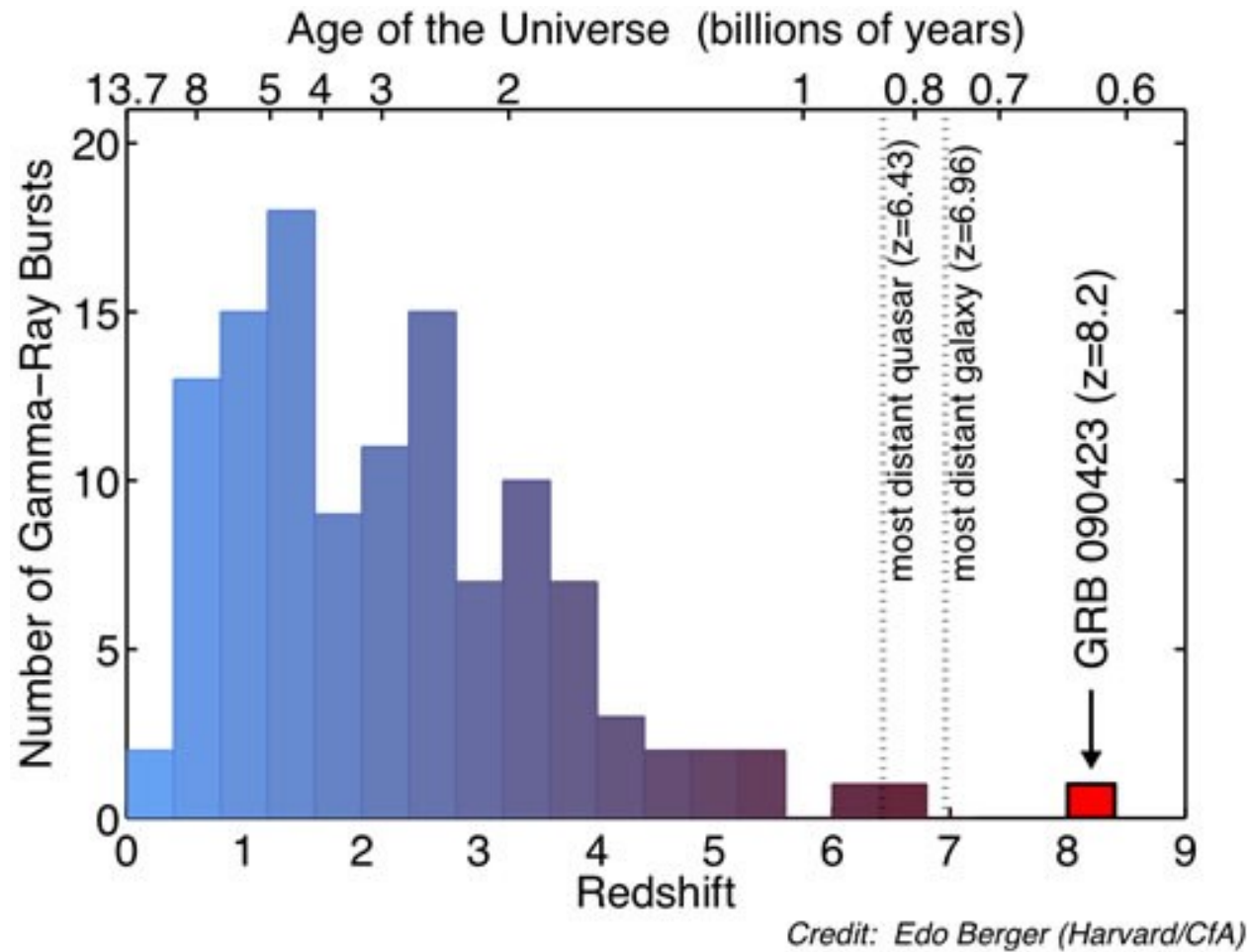


- GRB 970508 : apparu il y a 7 milliards d'années ($z=0.835$)
 - $E_\gamma = 7 \times 10^{44} \text{ J} \sim 1000 \times$ l'énergie lumineuse rayonnée par une supernova
- GRB 990123 : apparu il y a 9 milliards d'années ($z=1.6$)
 - observable avec des jumelles (8.9 magnitudes après 50 s)
 - $E_\gamma = 2 \times 10^{47} \text{ J} \sim 200\,000$ supernovae $\sim 2 M_\odot c^2$ (via $E=mc^2$)
- GRB 080319B : apparu il y a 7.5 milliards d'années ($z=0.94$)
 - visible à l'oeil nu ! (5.3 magnitudes après 20 s)

GRB 080319B : le “naked-eye burst”

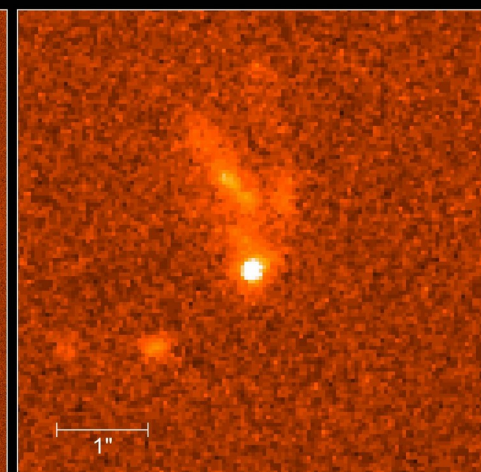
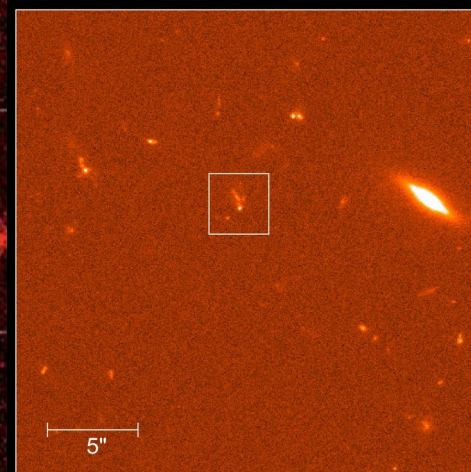
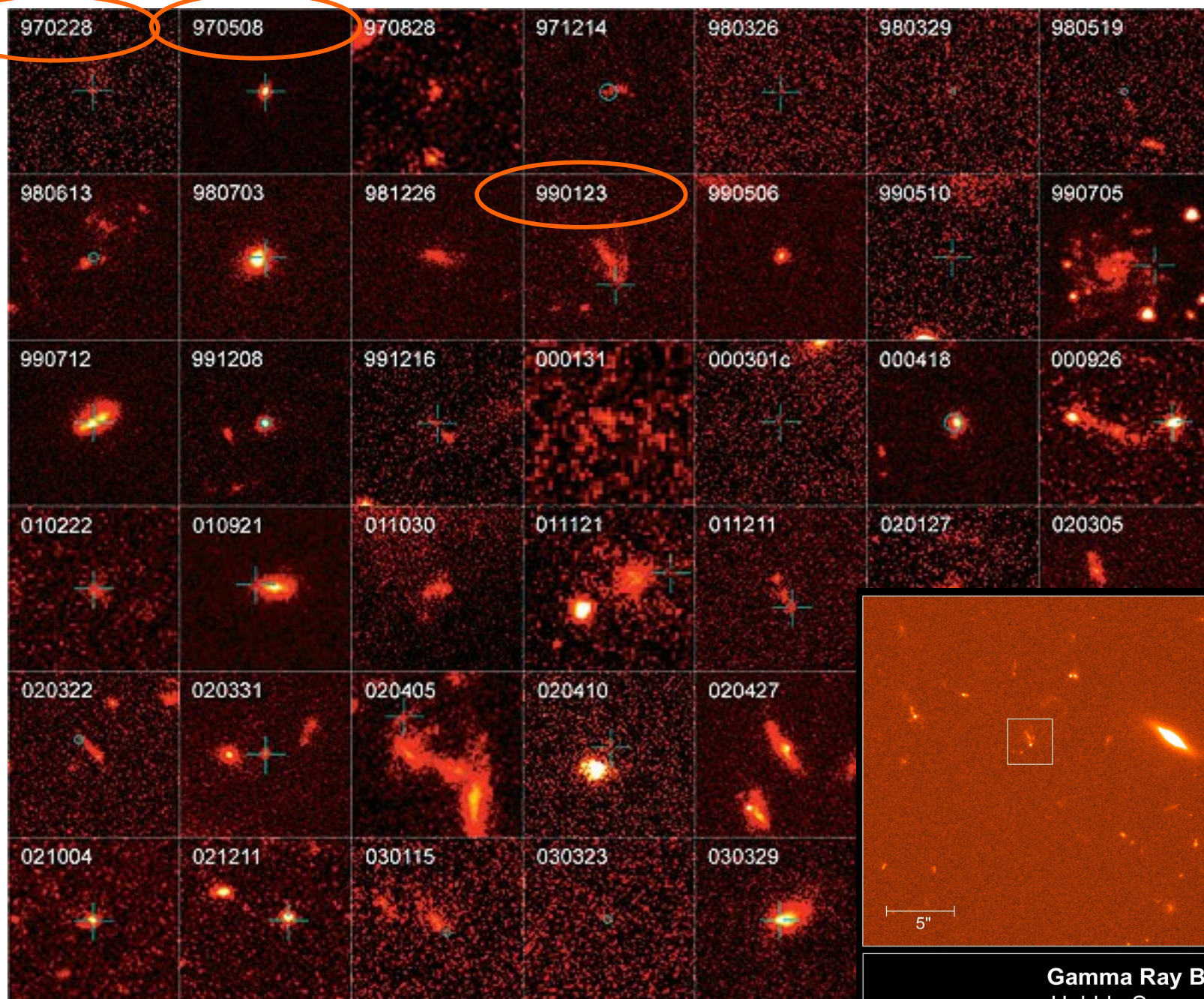


Redshift des sursauts vus par SWIFT



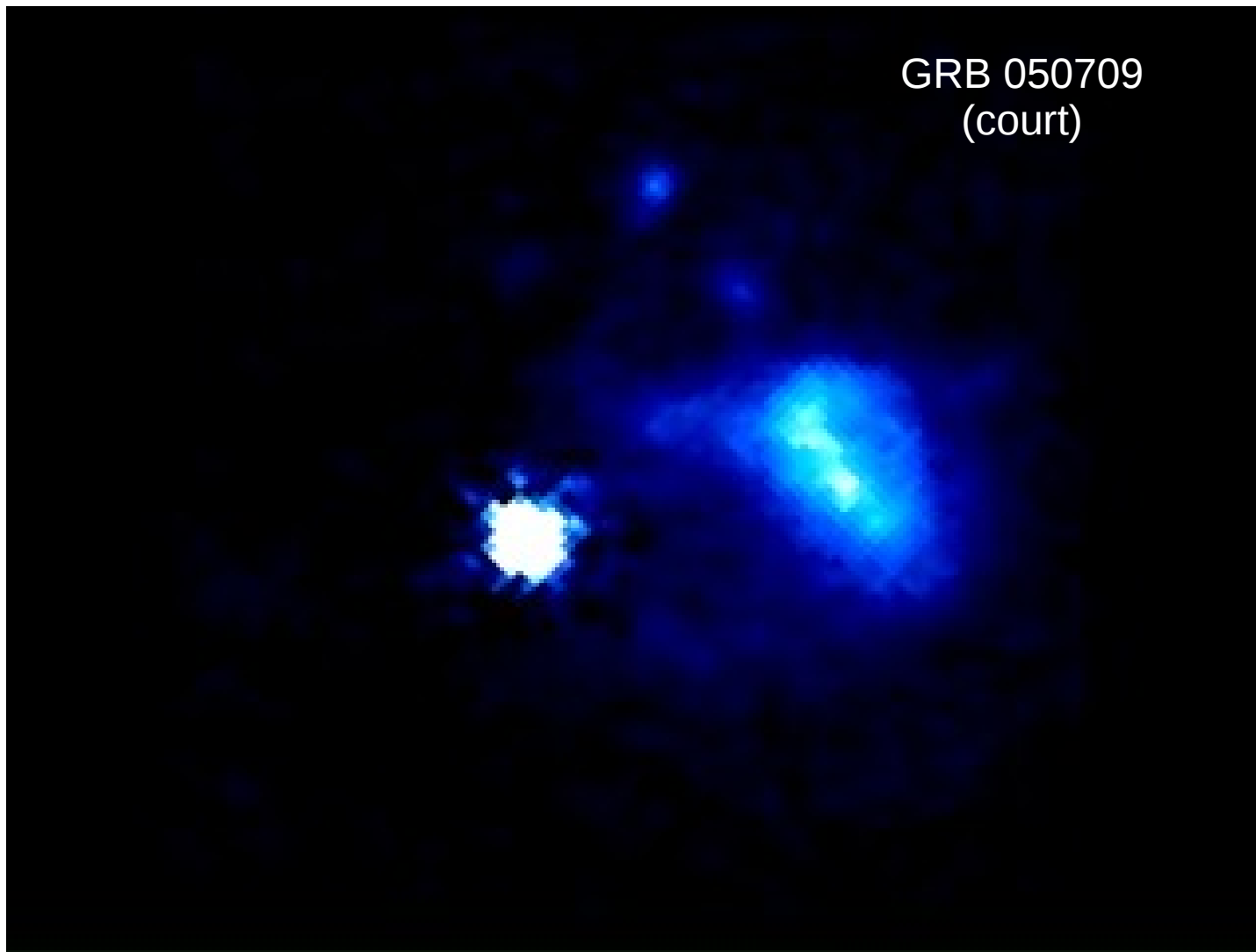
- GRB 090423 : $z=8.2$ soit 630 Millions d'années après le big bang

Quelques galaxies hôtes de sursauts gamma



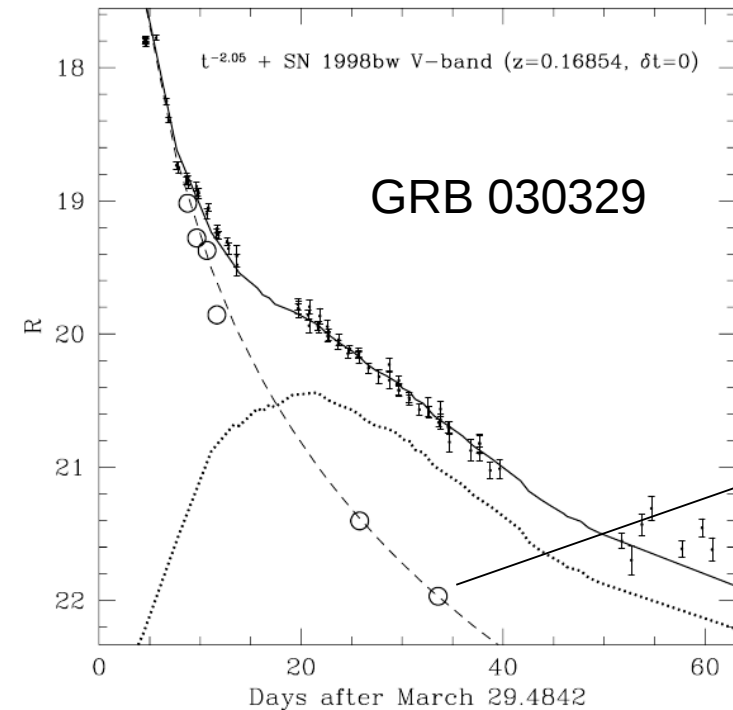
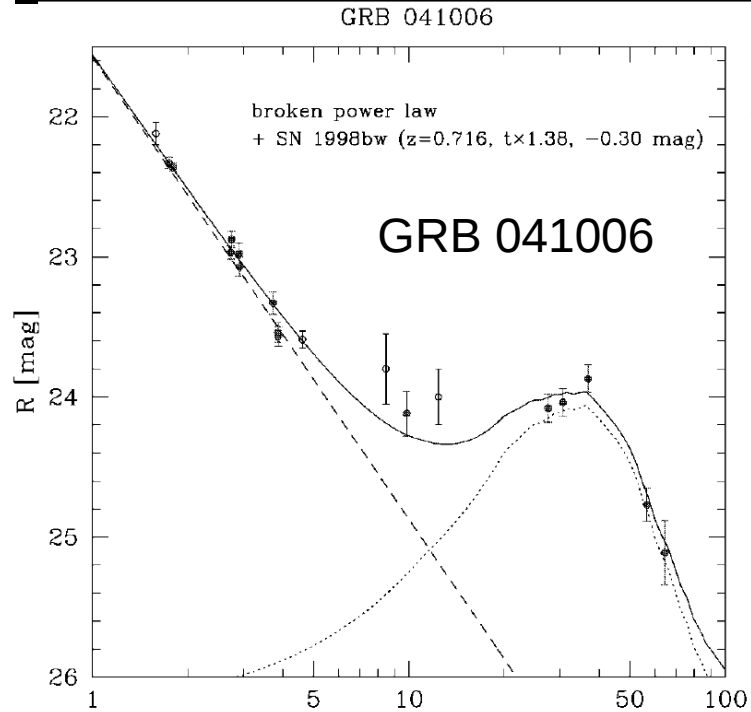
Gamma Ray Burst GRB990123
Hubble Space Telescope • STIS

Position dans la galaxie hôte

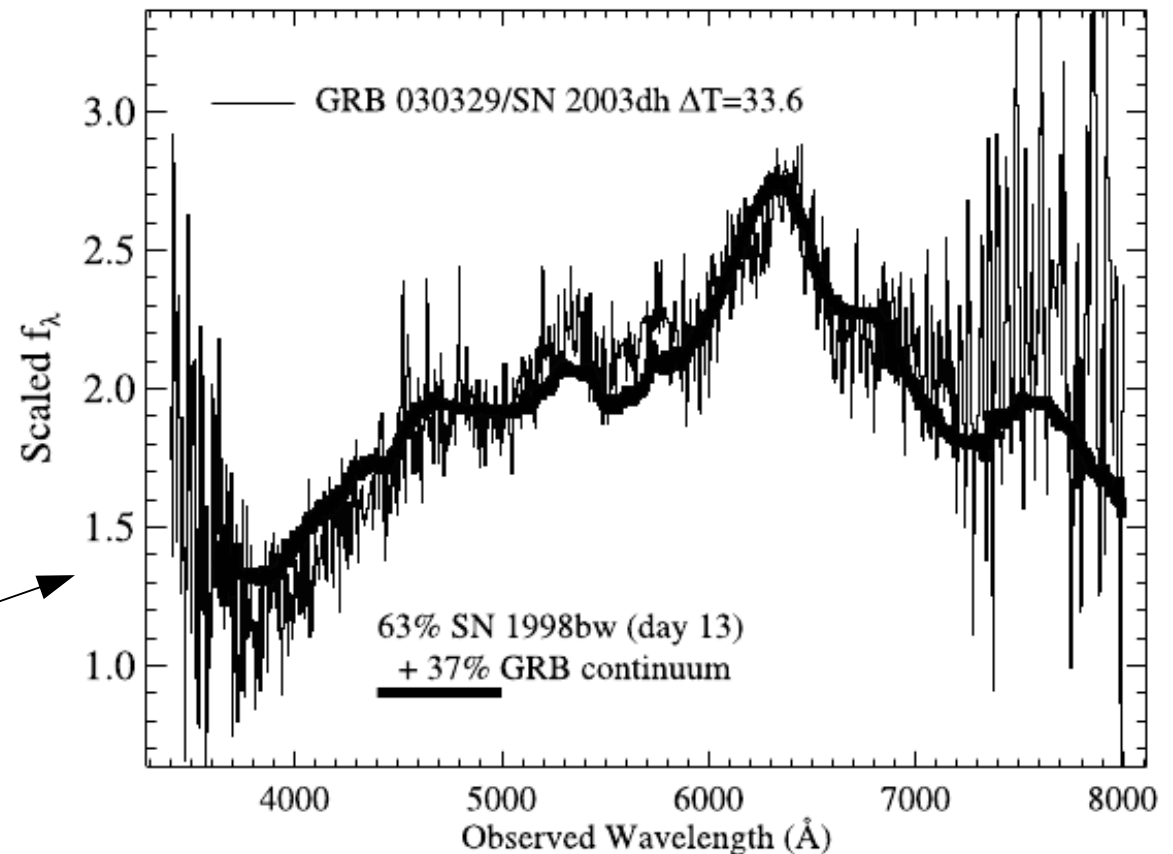


- **Sursauts courts** : dans des galaxies variées, semblent loin des régions de formation stellaire
- **Sursauts longs** : dans des galaxies formant beaucoup d'étoiles (régions centrales)

Sursauts longs : des étoiles qui explosent



- Sursauts longs et “proches” : la rémanence révèle une **supernova** après une à plusieurs semaines
- Association confirmée par études **spectroscopiques**
 - Rémanence de GRB 030329 après ~ 1 semaine dominée par la lumière de SN2003dh



Comment expliquer la luminosité des sursauts ?

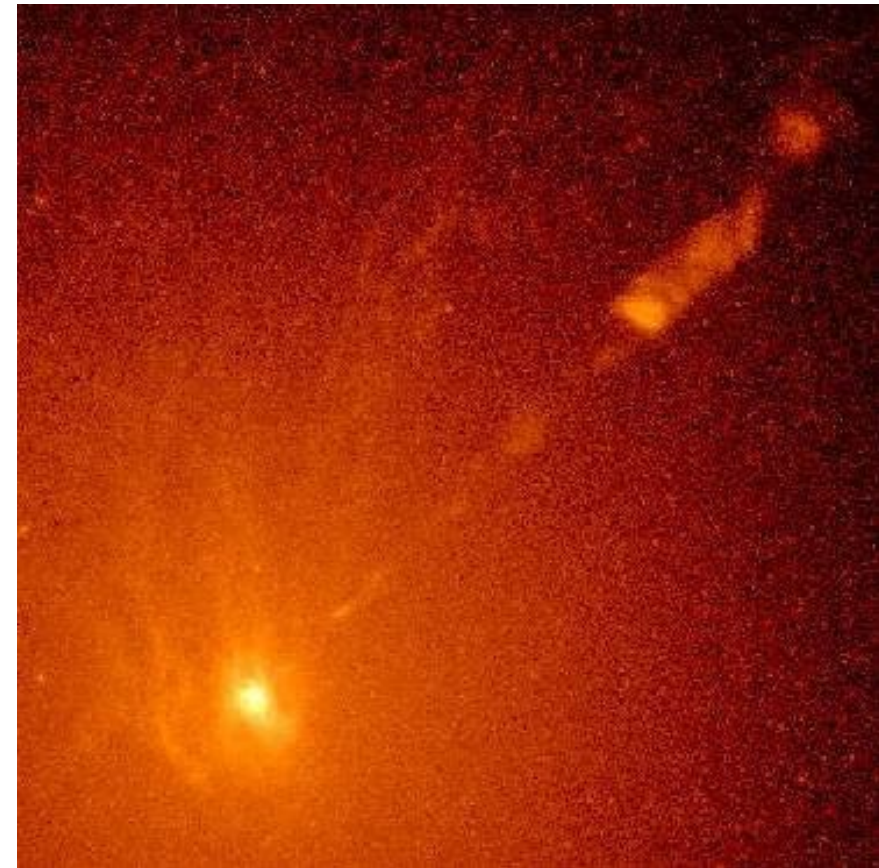
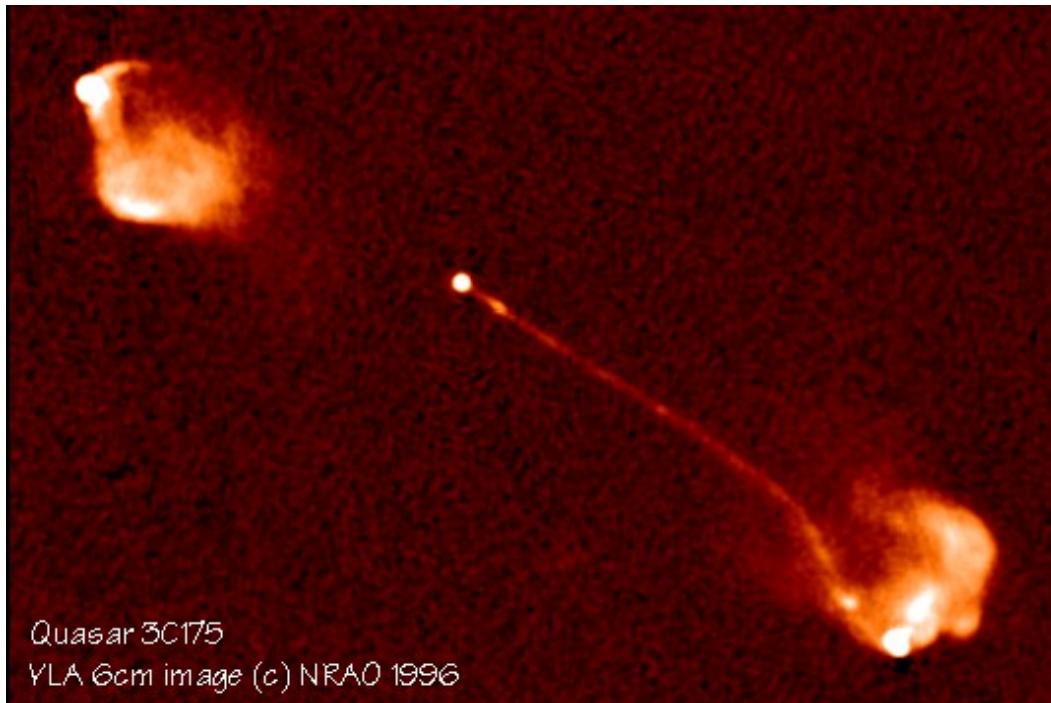
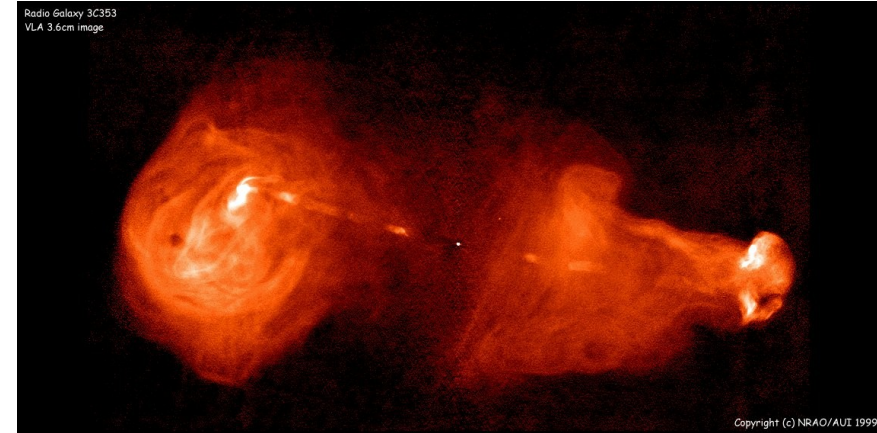
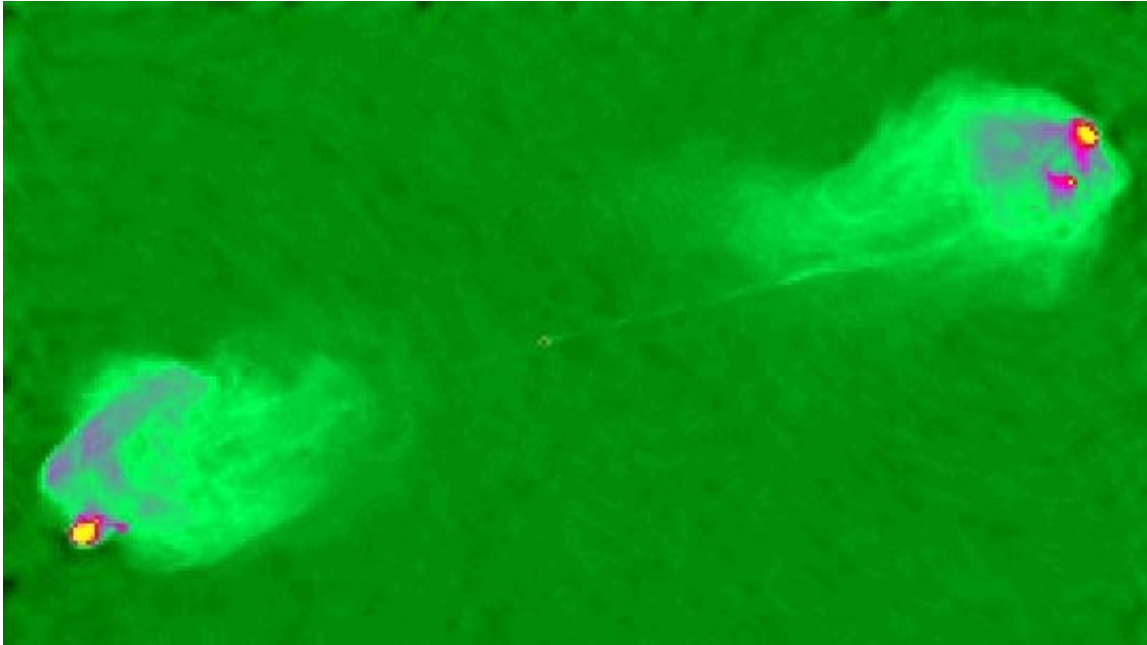
- Source compacte accrétante = trou noir de masse stellaire nouvellement formé qui expulse de la matière dans un jet rapide pointé vers la Terre
 - émission seulement dans la direction du jet (250 fois moins pour une $\frac{1}{2}$ ouverture de 5°)
 - on rate la grande majorité des sursauts
 - vitesse du jet proche de celle de la lumière ($v / c \sim 0.99995$, facteur de Lorentz $\Gamma \sim 100$)
 - amplification de la luminosité dans l'axe du jet

Comment expliquer la luminosité des sursauts ?

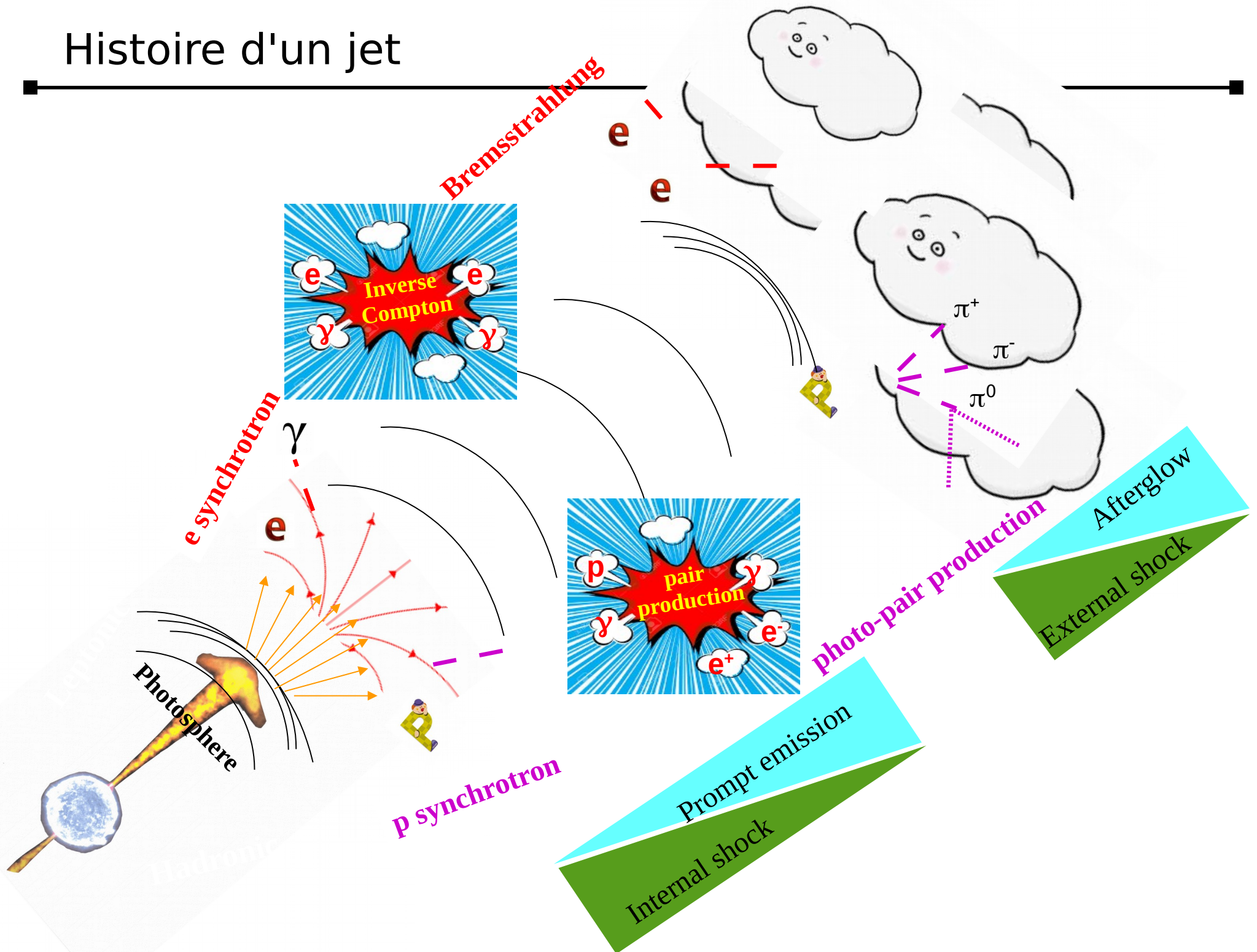
- Source compacte accrétante = **trou noir de masse stellaire nouvellement formé** qui expulse de la matière dans un **jet rapide pointé vers la Terre**
 - émission seulement dans la direction du jet (250 fois moins pour une $\frac{1}{2}$ ouverture de 5°)
 - on rate la grande majorité des sursauts
 - vitesse du jet proche de celle de la lumière ($v / c \sim 0.99995$, facteur de Lorentz $\Gamma \sim 100$)
 - **amplification de la luminosité** dans l'axe du jet



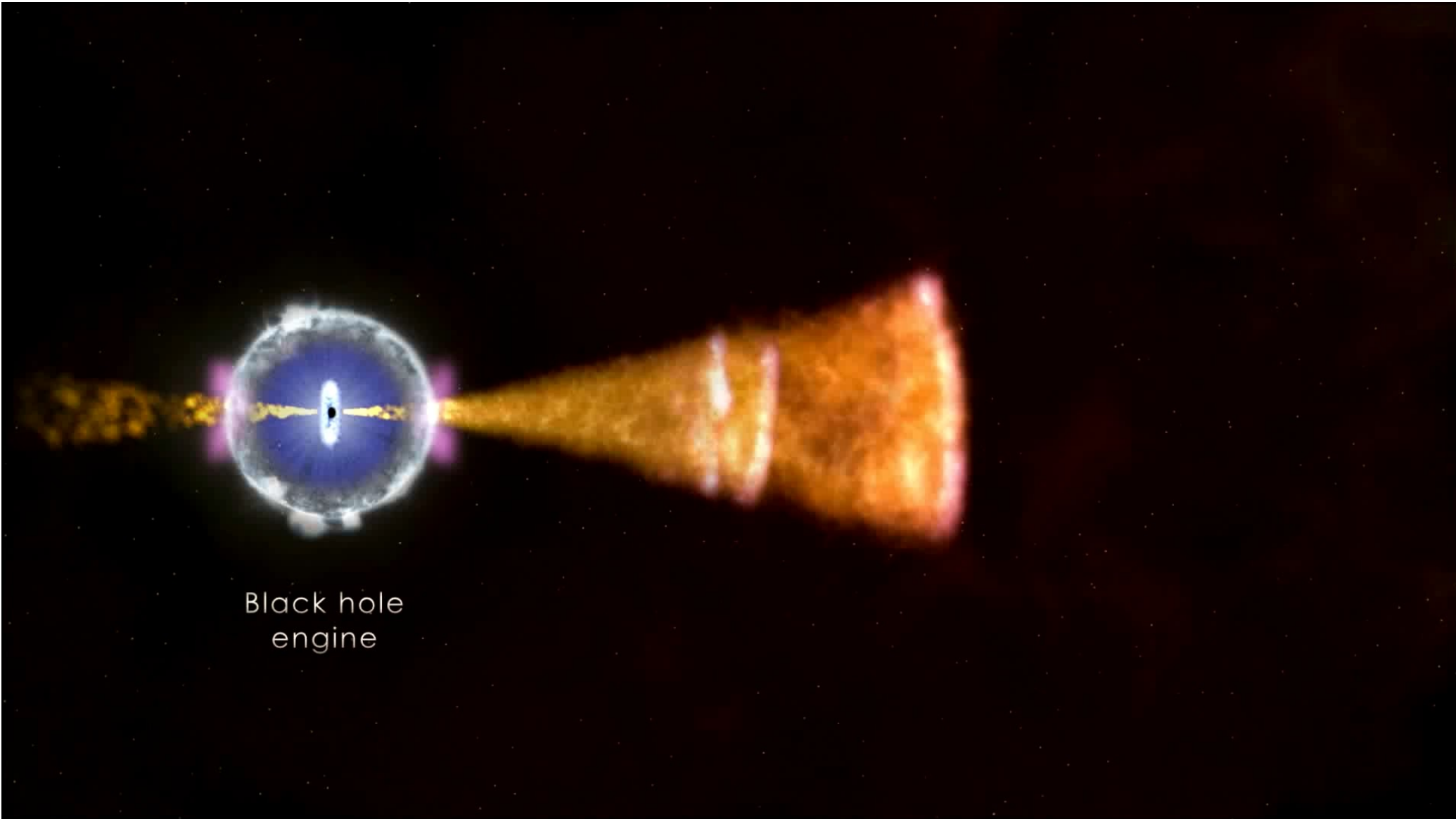
Les jets dans la nature



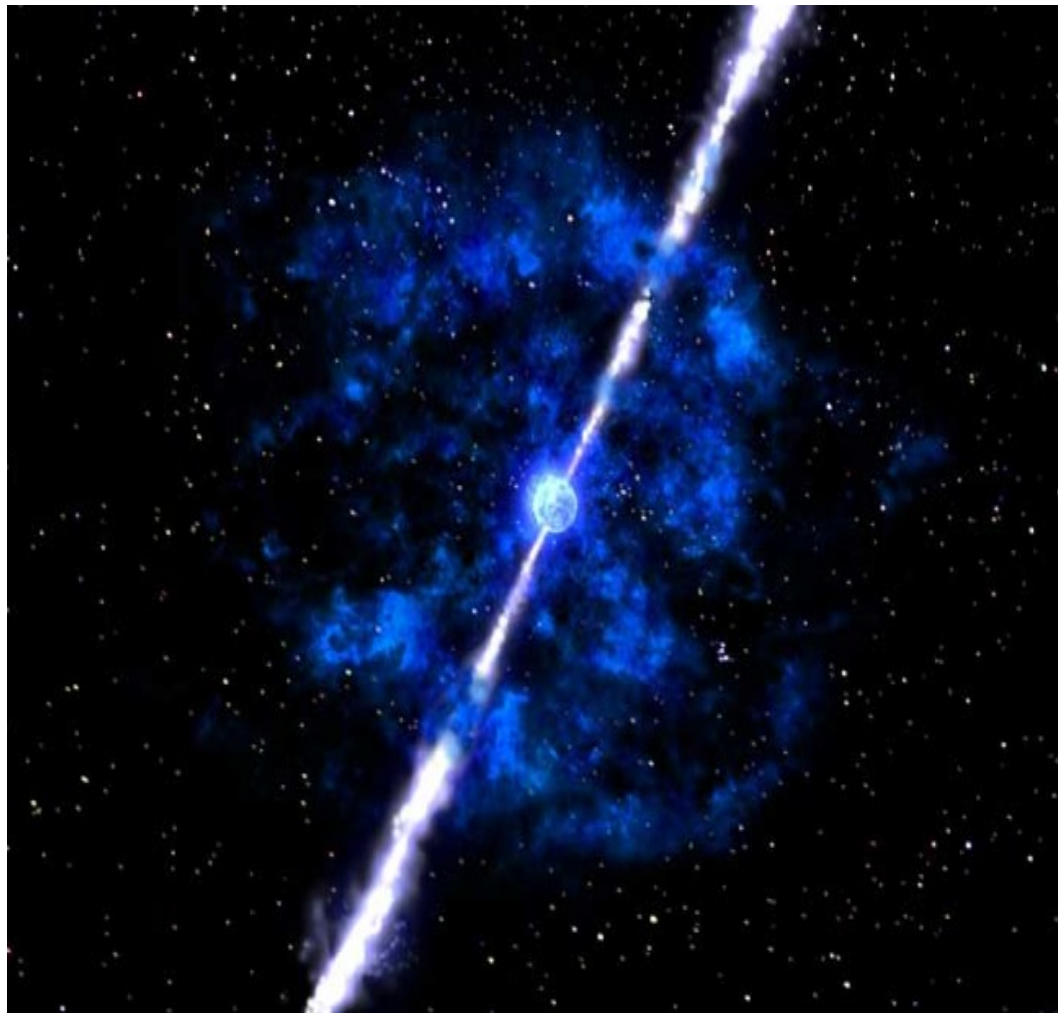
Histoire d'un jet



Le “modèle” des chocs internes / externe

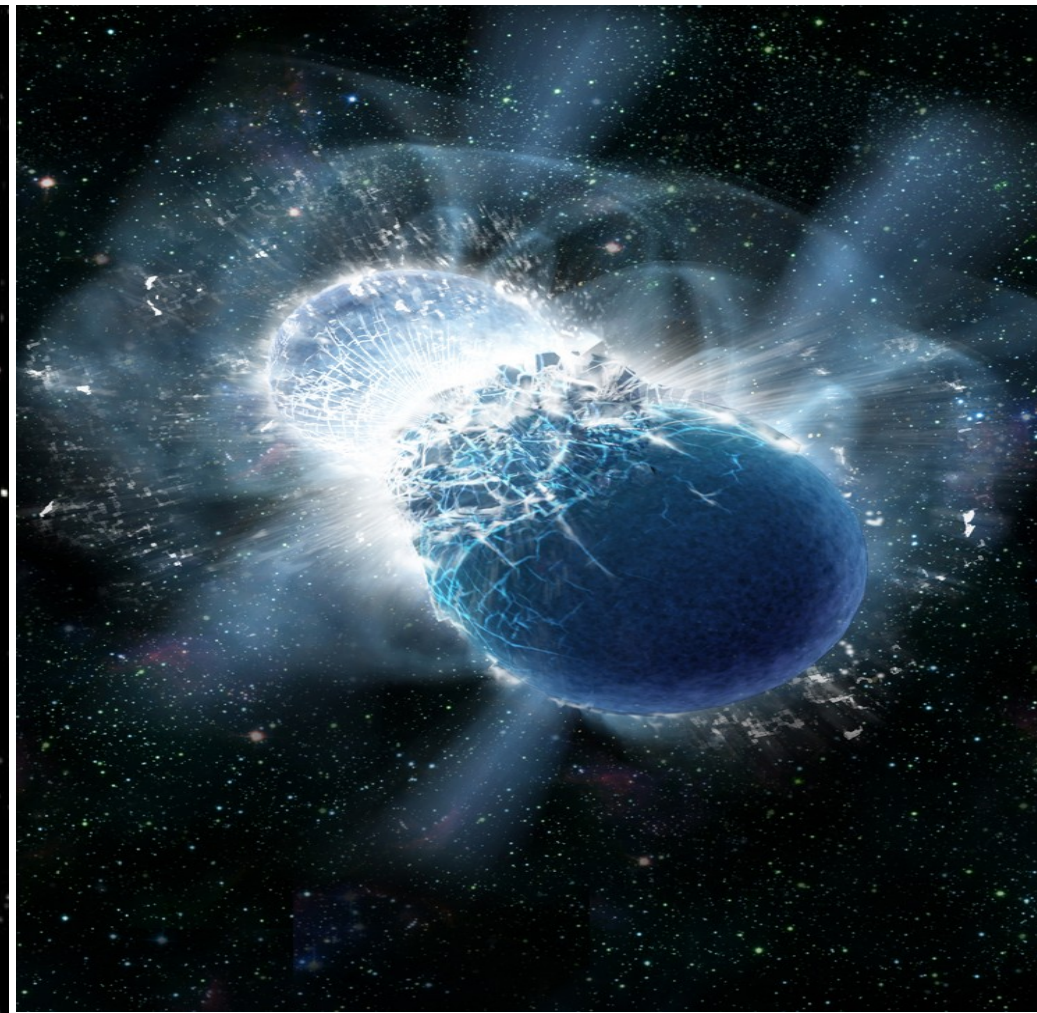


Projéniteurs des sursauts gamma



Sursaut long

- Explosion d'une étoile massive
- Magnétar (étoile à neutron)



Sursaut court

- Coalescence de deux objets compacts
 - Trou noir / Etoile à neutron
 - Etoile à neutron / Etoile à neutron
 - Trou noir / Trou noir ?

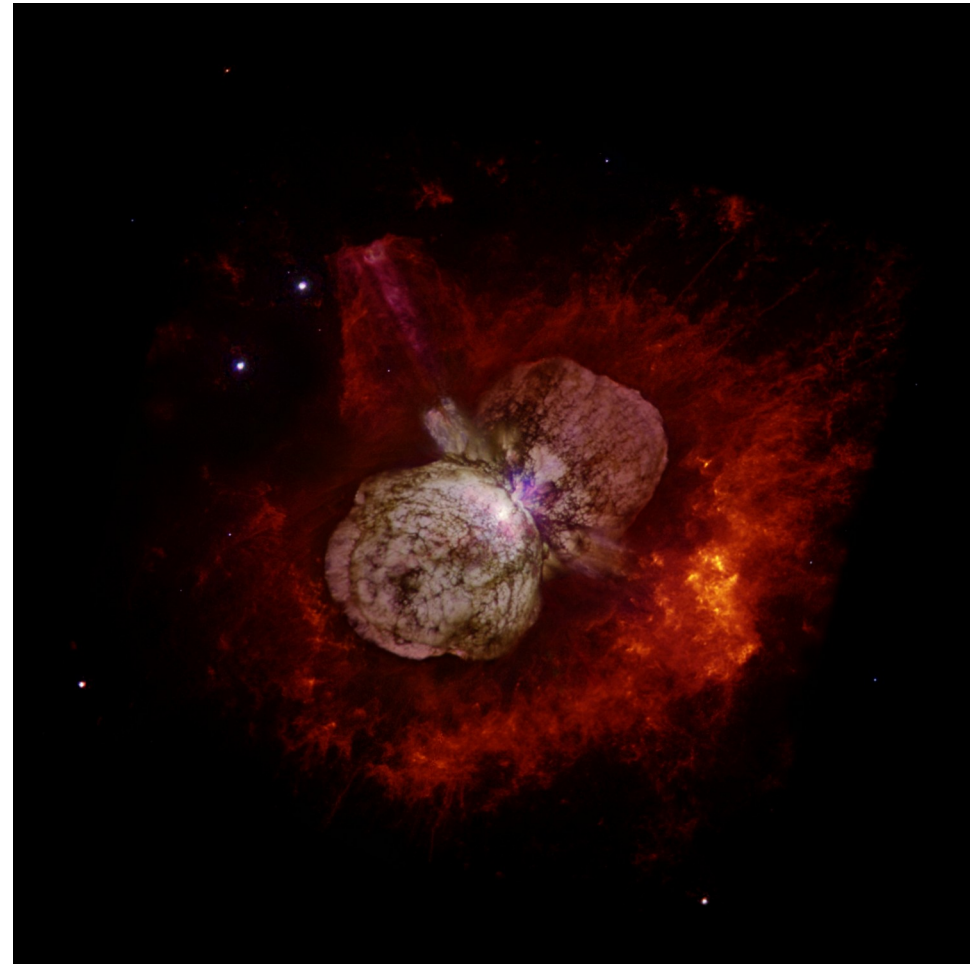
Progéniteurs des sursauts longs ?

- Etoile massive ($>30 M_{\odot}$) en rotation rapide
(de type Wolf Rayet) dans une galaxie formant beaucoup d'étoiles
- En fin de vie :
 - supernova par effondrement gravitationnel
 - formation d'un trou noir de quelques $M_{\odot}$
entouré d'un disque d'accrétion
- Sortie du jet suivant l'axe de rotation



Progéniteurs des sursauts longs ?

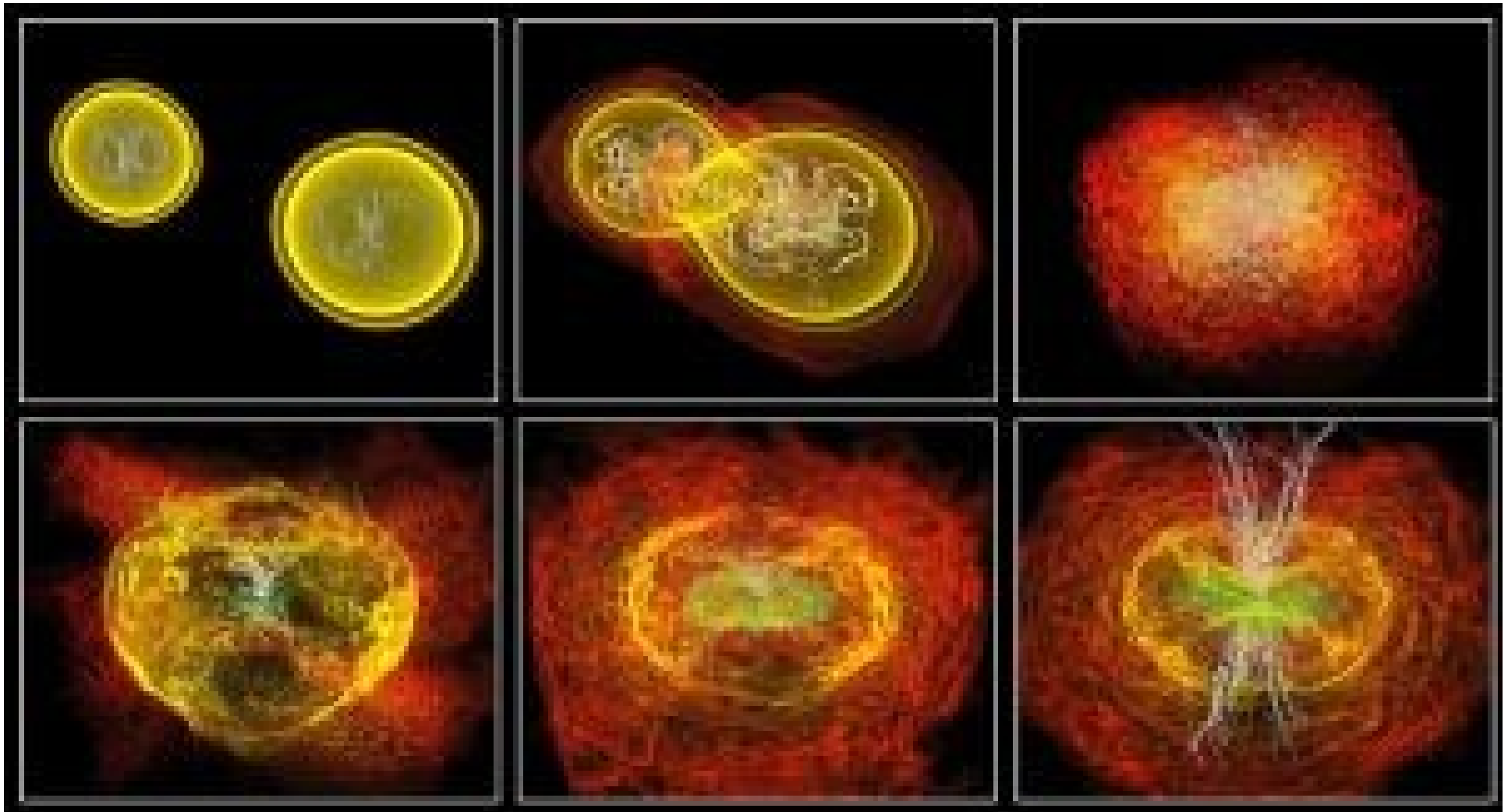
- Etoile massive ($>30 M_{\odot}$) en rotation rapide (de type Wolf Rayet) dans une galaxie formant beaucoup d'étoiles
- En fin de vie :
 - supernova par effondrement gravitationnel
 - formation d'un trou noir de quelques $M_{\odot}$ entouré d'un disque d'accrétion
- Sortie du jet suivant l'axe de rotation



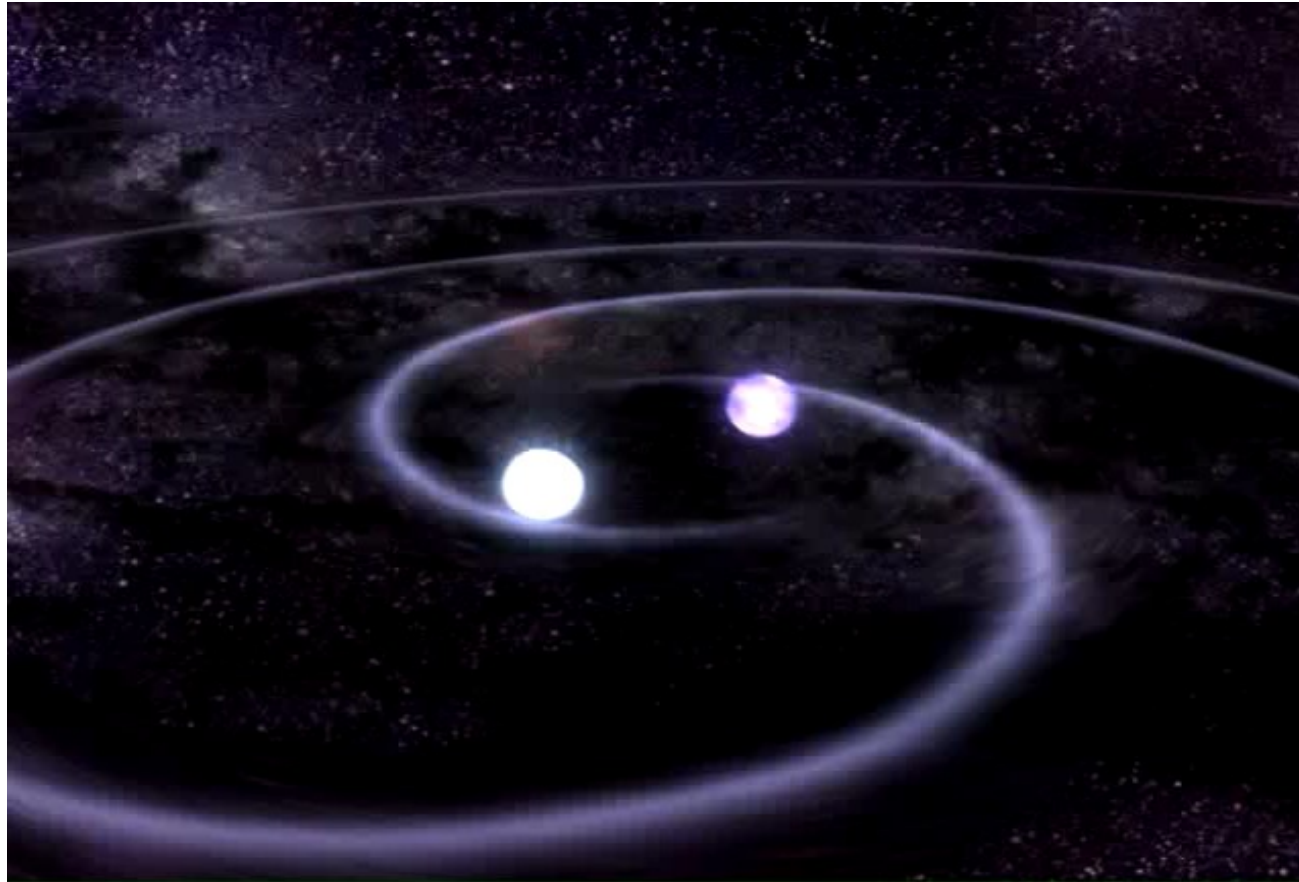
- Taux $\sim 1 \text{ Gpc}^{-3} \text{ yr}^{-1}$ (contre SN Ib/c : $2 \times 10^4 \text{ Gpc}^{-3} \text{ yr}^{-1}$)
- 1 sursaut long / galaxie tous les $\sim 10^{5-6}$ ans
- Eta Carinae à moins de 10 000 a.l.

Progéniteurs des sursauts courts ?

- **Système double de deux étoiles à neutrons et/ou trous noirs**
- Fusion (en ~ 1 ms environ) quelques 10^8 ans après la formation du système binaire
- Loin des régions de formation stellaire $\rightarrow$ milieu externe peu dense, rémanence peu brillante
- Taux $\sim 10 \text{ Gpc}^{-3} \text{ yr}^{-1}$ (NS-NS : $200\text{-}3000 \text{ Gpc}^{-3} \text{ yr}^{-1}$)



Sursauts courts et ondes gravitationnelles



Découverte des ondes gravitationnelles

GW150914

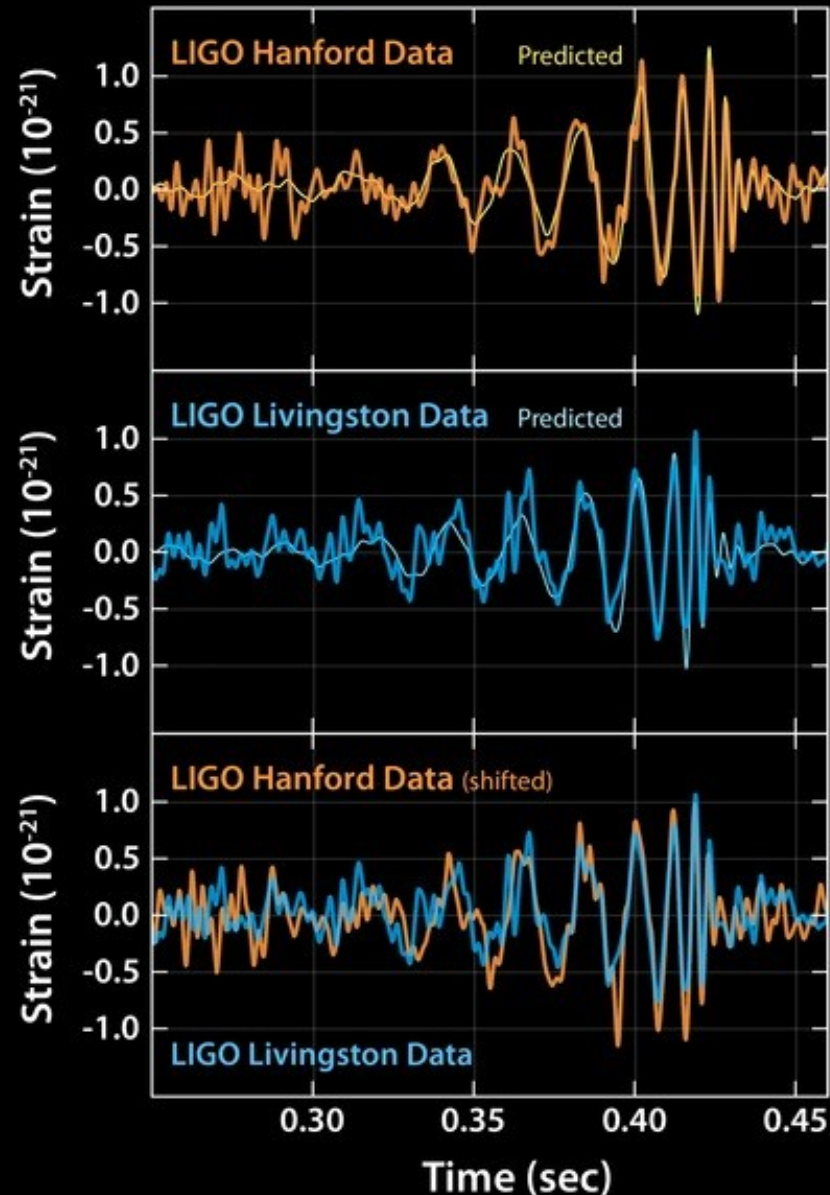
- Fusion de 2 trous noirs supermassifs

- 36 Ms $\pm 5/-4$
- 29 Ms $\pm 4/-4$

- Le signal correspond parfaitement aux prédictions de la relativité générale

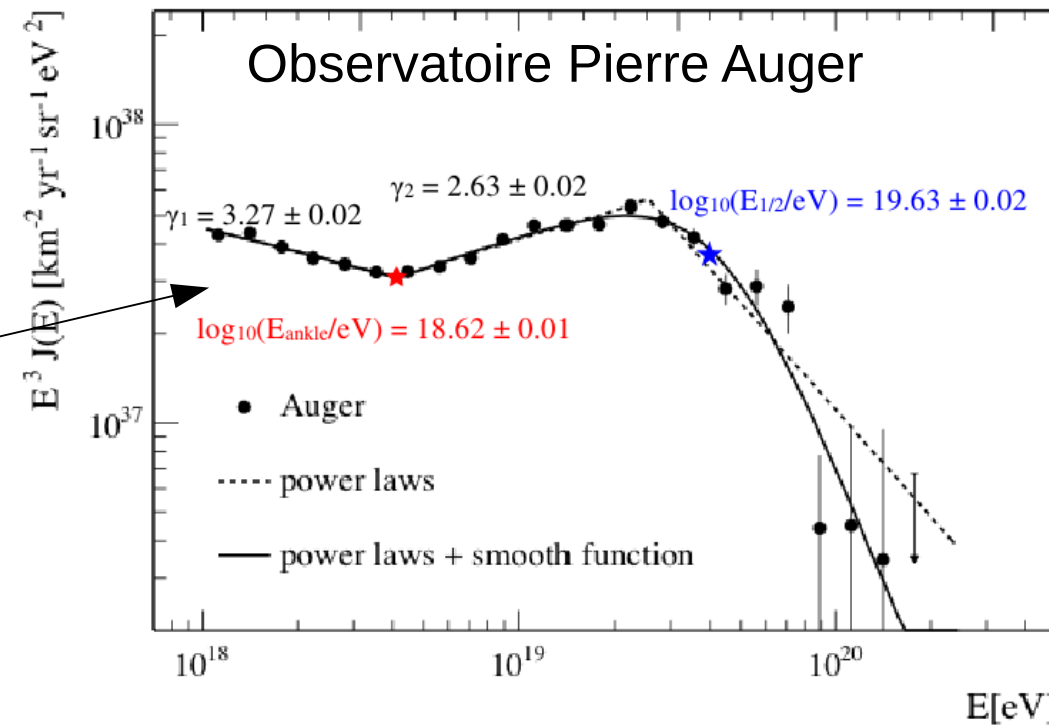
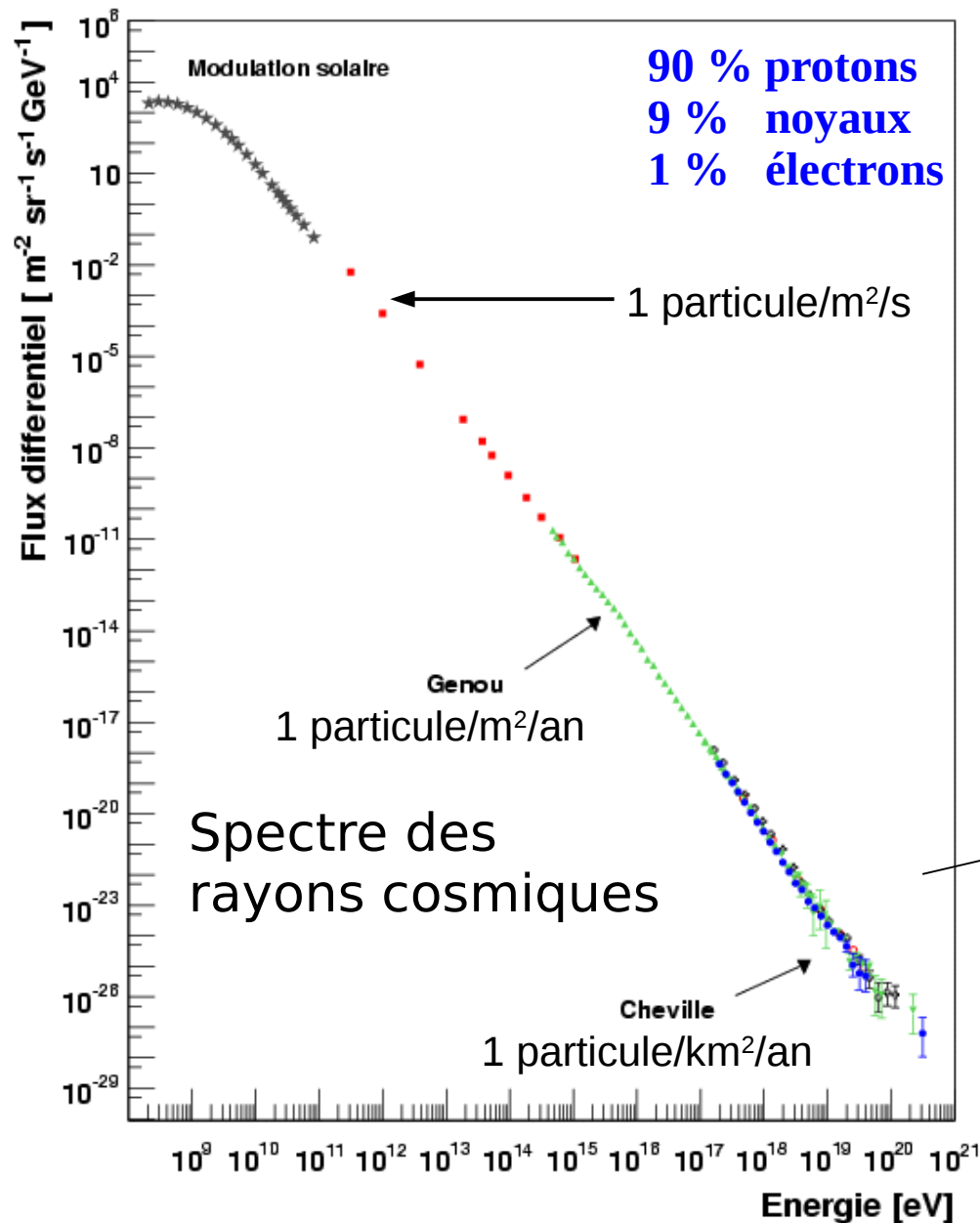
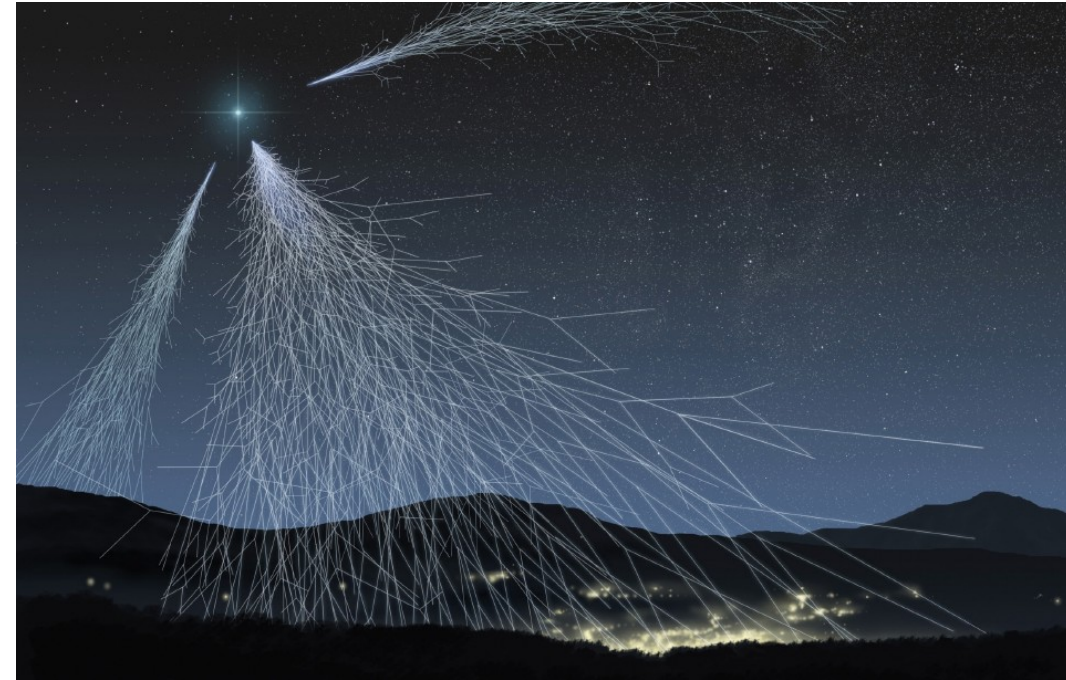
Questions :

- Contrepartie EM ?
 - à priori non...
 - mais pas impossible !
- Formation de ces 2 trous noirs ?



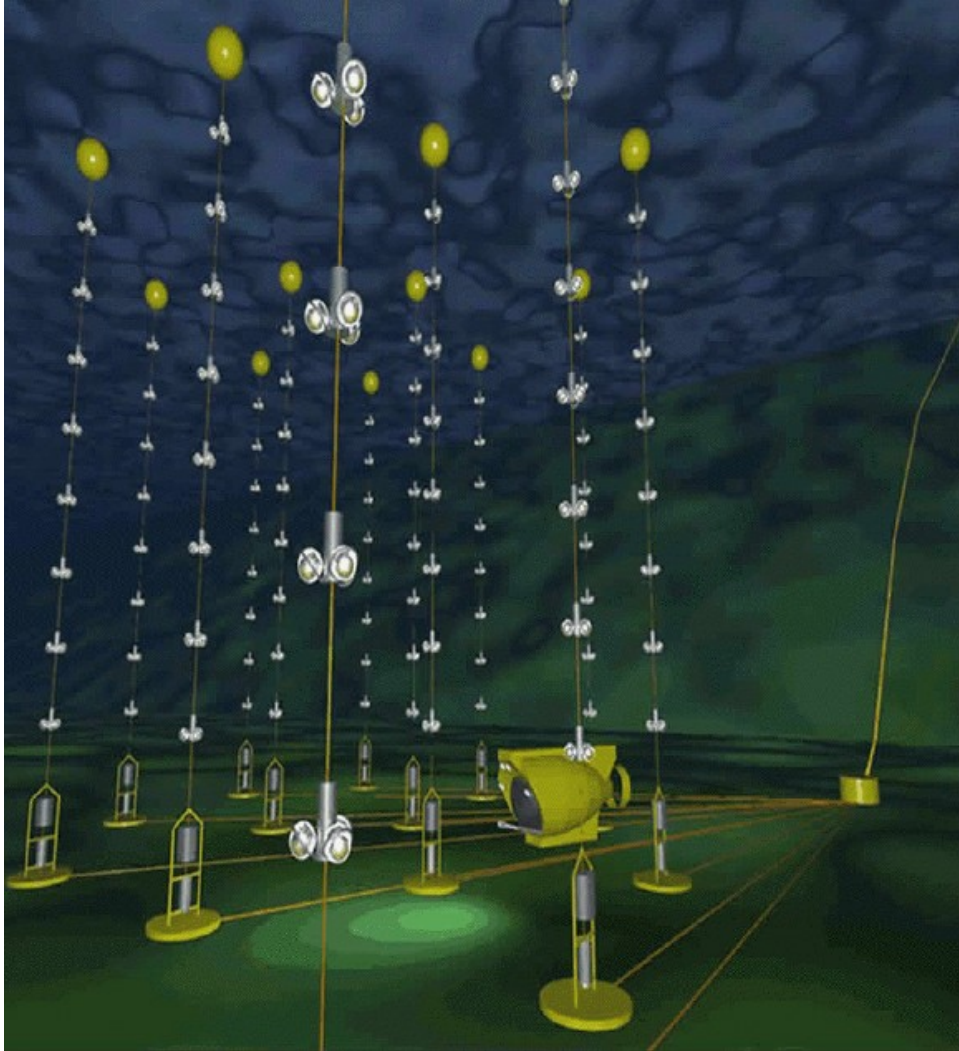
Rayons cosmiques d'ultra-haute énergie

- Particules (protons, noyaux, électrons...) bombardant la Terre, origine inconnue

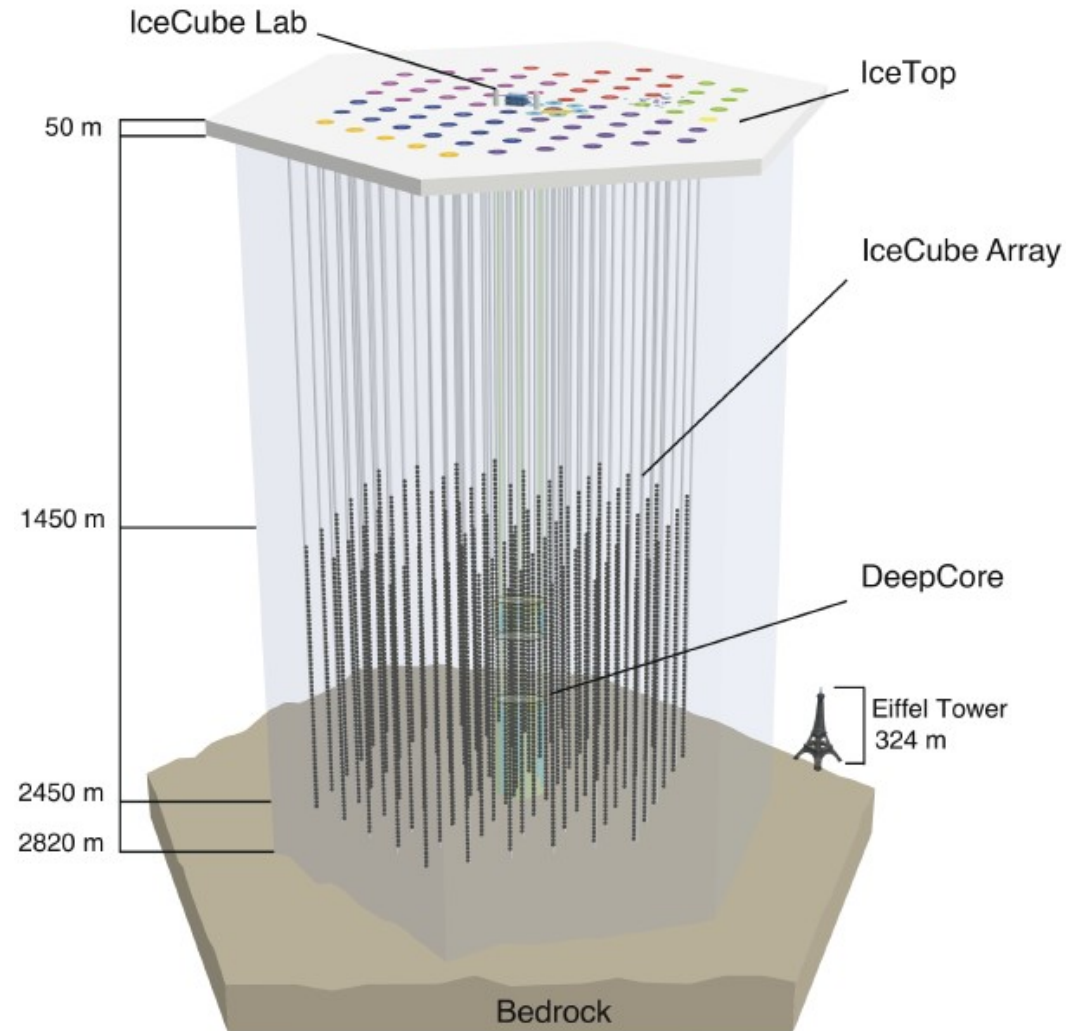


Neutrinos de haute énergie

- ANTARES (à 2500 m de profondeur au large de la Seyne-sur-Mer)
 - bientôt KM3Net



- IceCube (pôle Sud)
 - bientôt étendu



Tester la relativité d'Einstein avec le *Fermi*-LAT

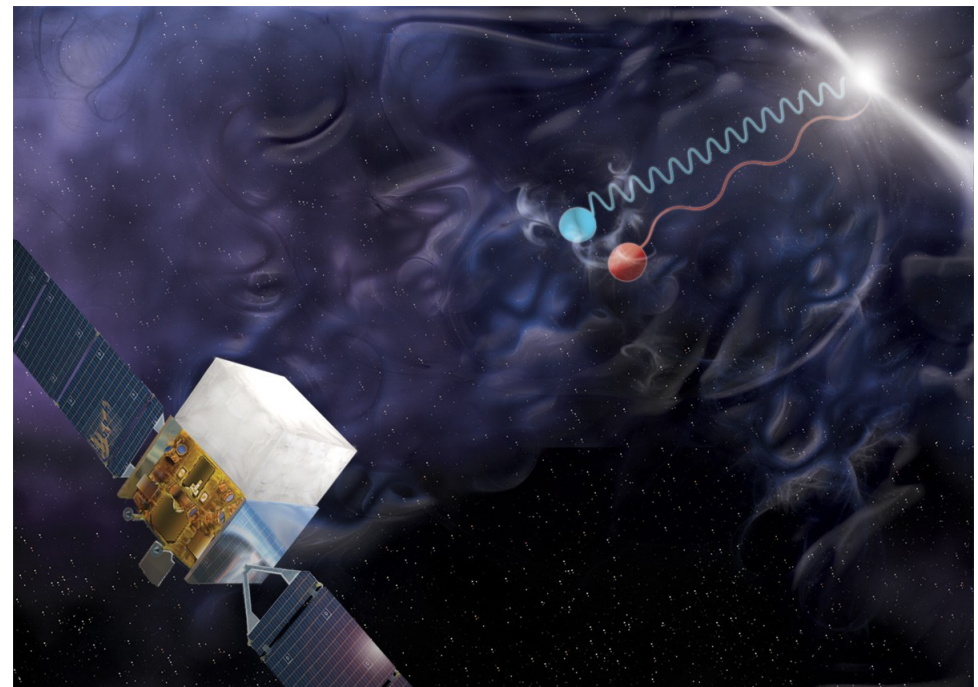
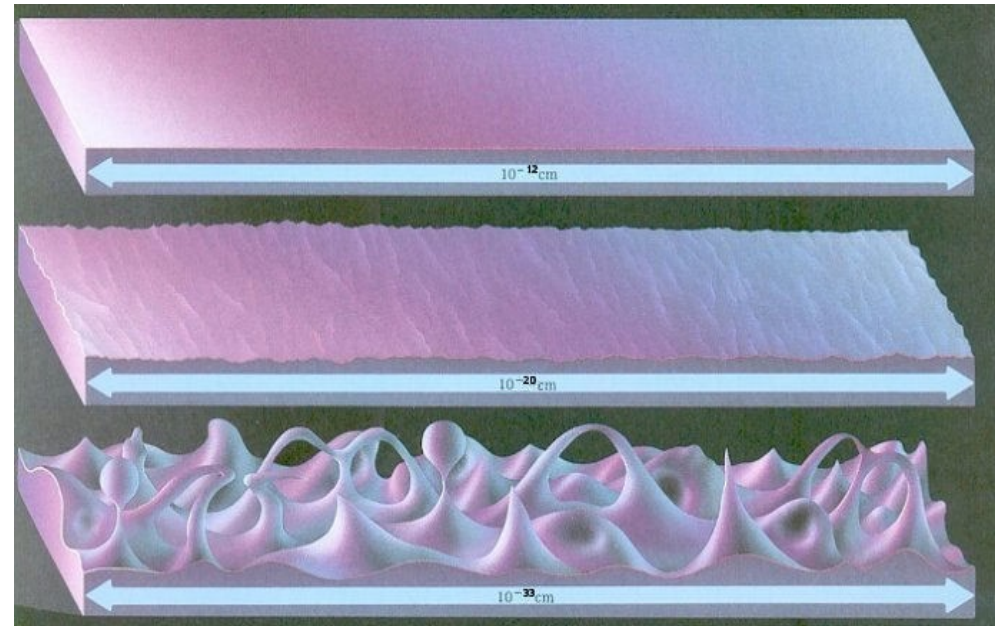
- La nature de l'espace-temps à petite échelle (10^{-35} m) est inconnue
- Certains modèles de gravité quantique prédisent que la vitesse de la lumière dans le vide n'est plus constante

$$v \simeq c \left(1 - \frac{E}{E_{\text{QG}}}\right)$$

- Test : 2 photons émis simultanément par une source distante et observés avec une différence d'énergie ΔE arriveront avec un décalage Δt :

$$\frac{\Delta t}{10 \text{ ms}} \simeq \left(\frac{\Delta E}{1 \text{ GeV}}\right) \left(\frac{E_{\text{QG}}}{10^{19} \text{ GeV}}\right)^{-1} \left(\frac{L}{1 \text{ Gpc}}\right)$$

- GRB 090510 (*Fermi*) :
 $E_{\text{QG}} > 9 \times 10^{19} \text{ GeV} (=7.6 E_{\text{Planck}})$

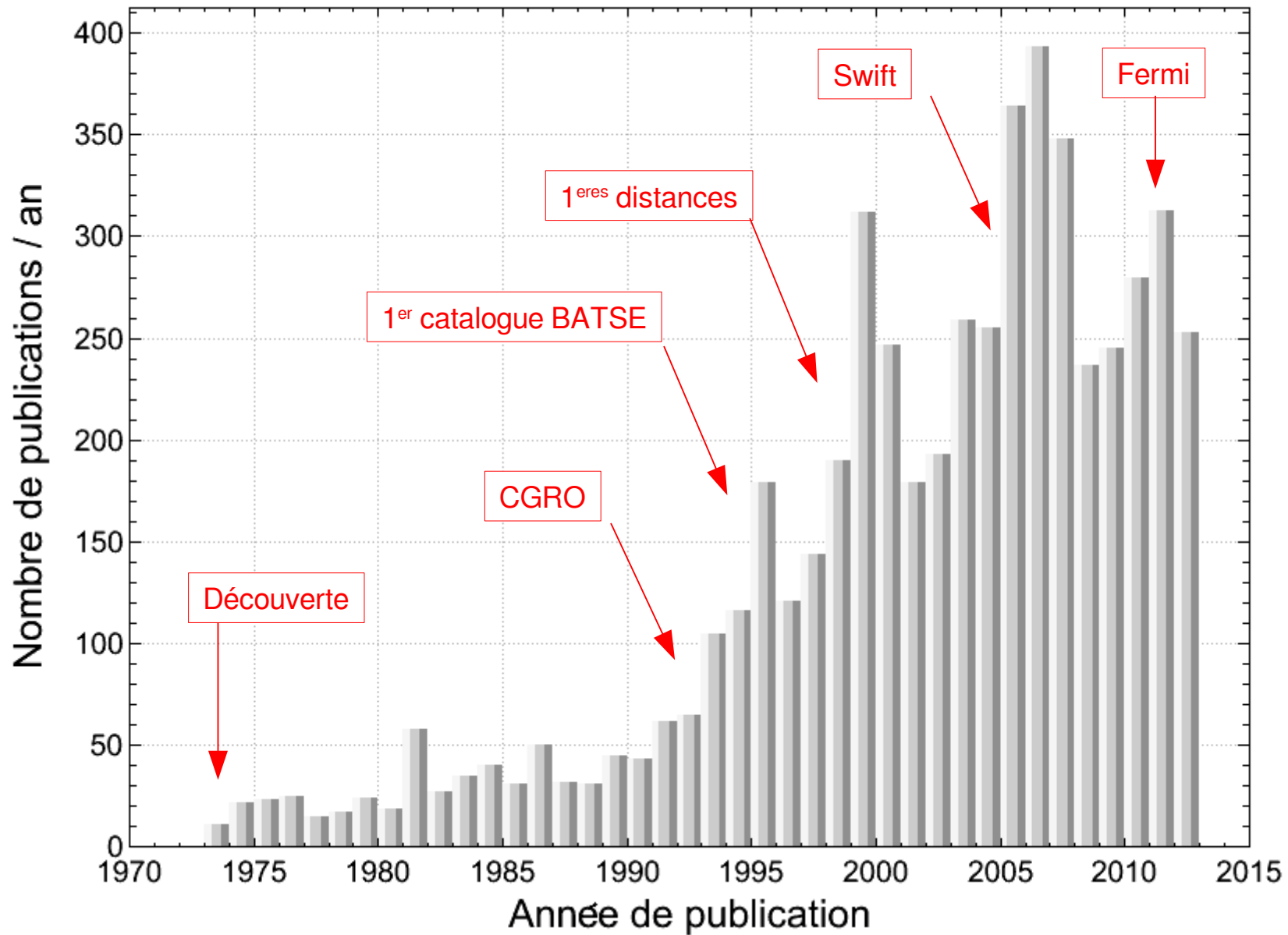


Sonder l'Univers lointain



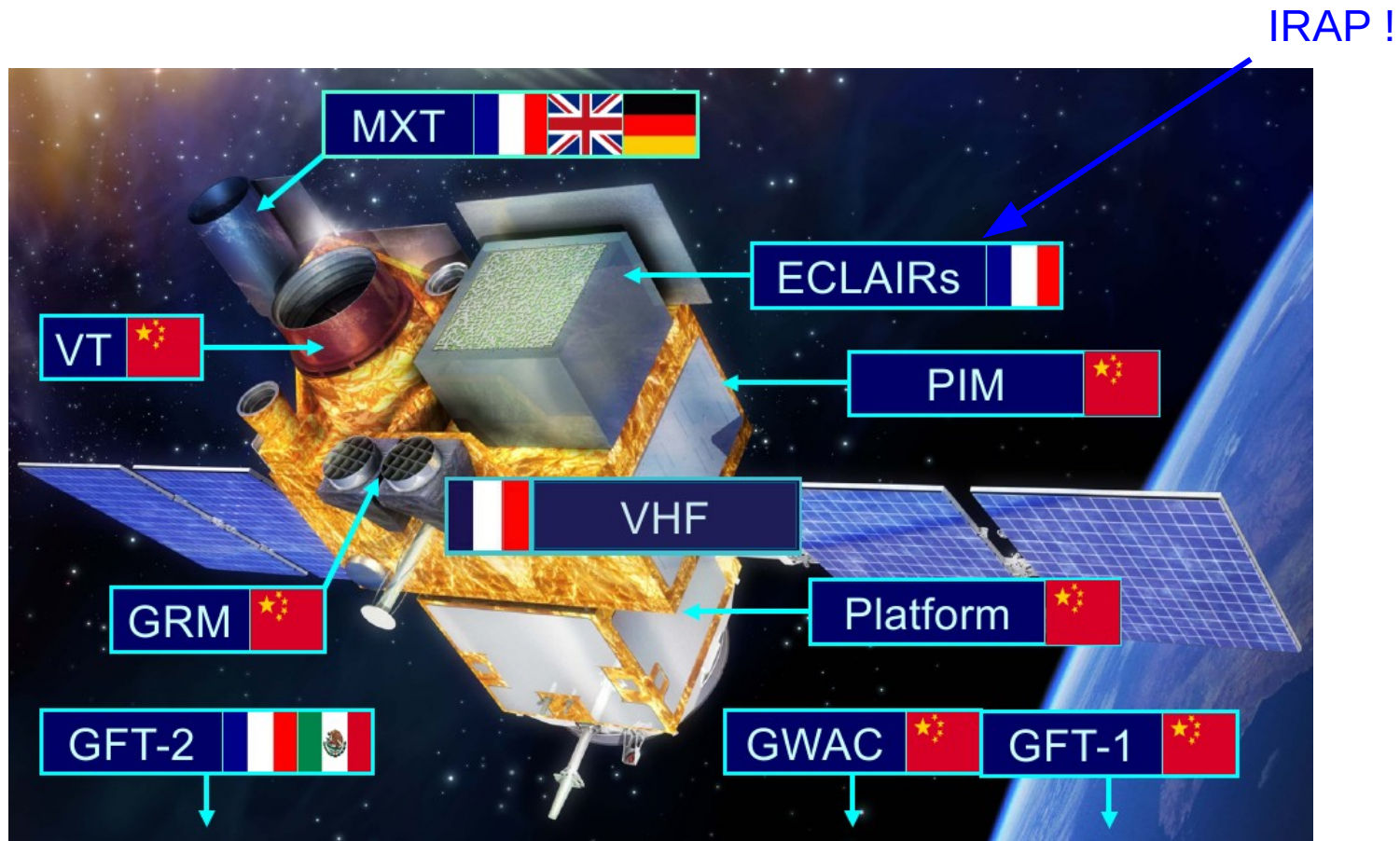
- GRB 090423 : apparu **seulement 630 millions d'années après le Big Bang**
- GRB 090429B : apparu **seulement 520 millions d'années après le Big Bang**
- L'Univers avait atteint seulement 4% de son âge actuel
- Etude des 1^{ères} étoiles et de la formation stellaire aux temps reculés
- Etude des 1^{ères} galaxies et du gaz qu'elles contiennent

La prochaine grande étape ?



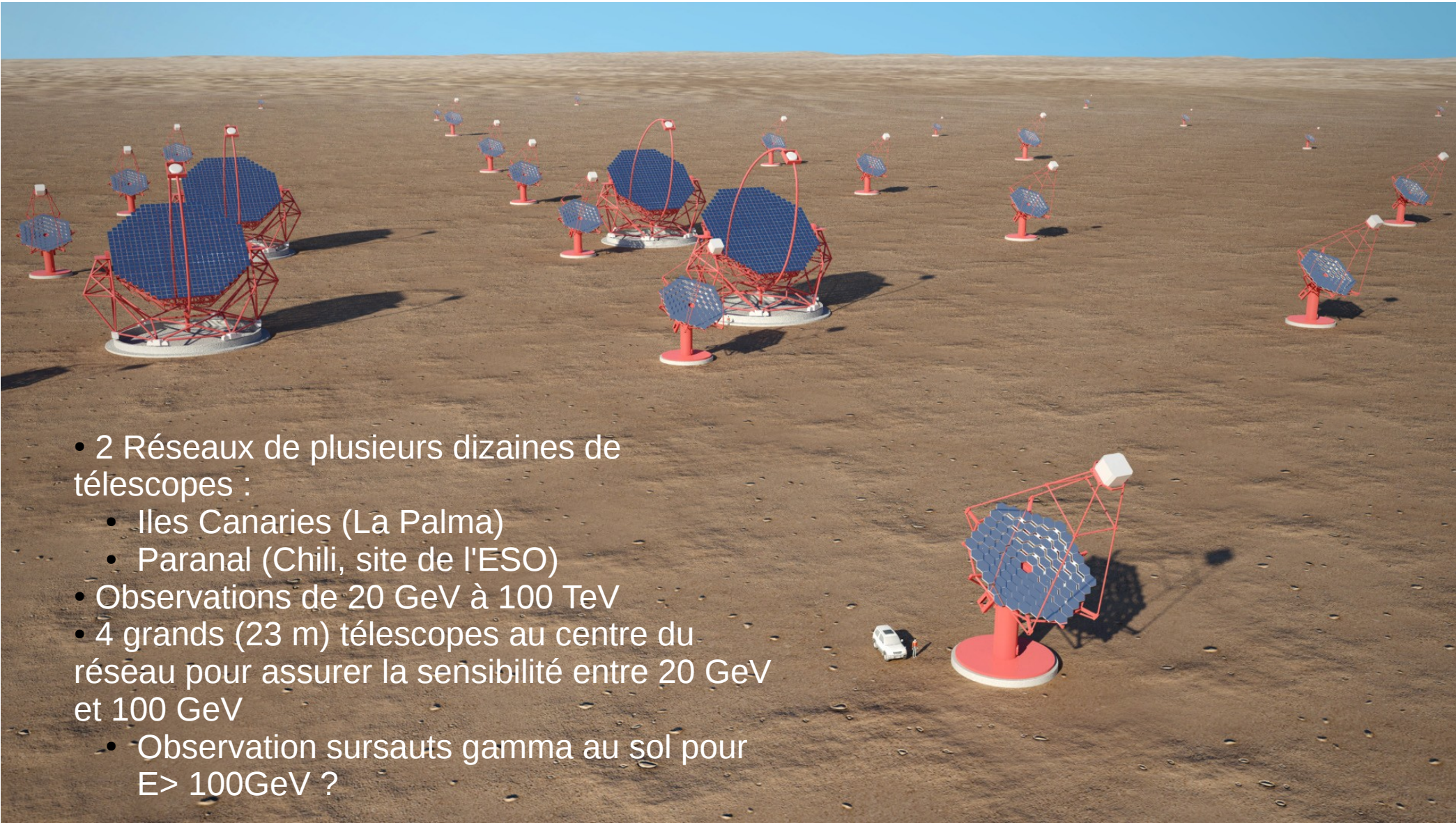
La mission SVOM (2021 - ?)

- “Space-based multi-band astronomical Variable Objects Monitor”
- ~80 sursauts / an, repointé en <5 min
- 145 sursauts localisés en 3 ans (~12 au-delà de $z=5$)
- Associé à plusieurs télescopes au sol pour le suivi optique



CTA Cerenkov Telescope Array

- 2 Réseaux de plusieurs dizaines de télescopes :
 - Iles Canaries (La Palma)
 - Paranal (Chili, site de l'ESO)
- Observations de 20 GeV à 100 TeV
- 4 grands (23 m) télescopes au centre du réseau pour assurer la sensibilité entre 20 GeV et 100 GeV
- Observation sursauts gamma au sol pour $E > 100 \text{ GeV}$?



Conclusions

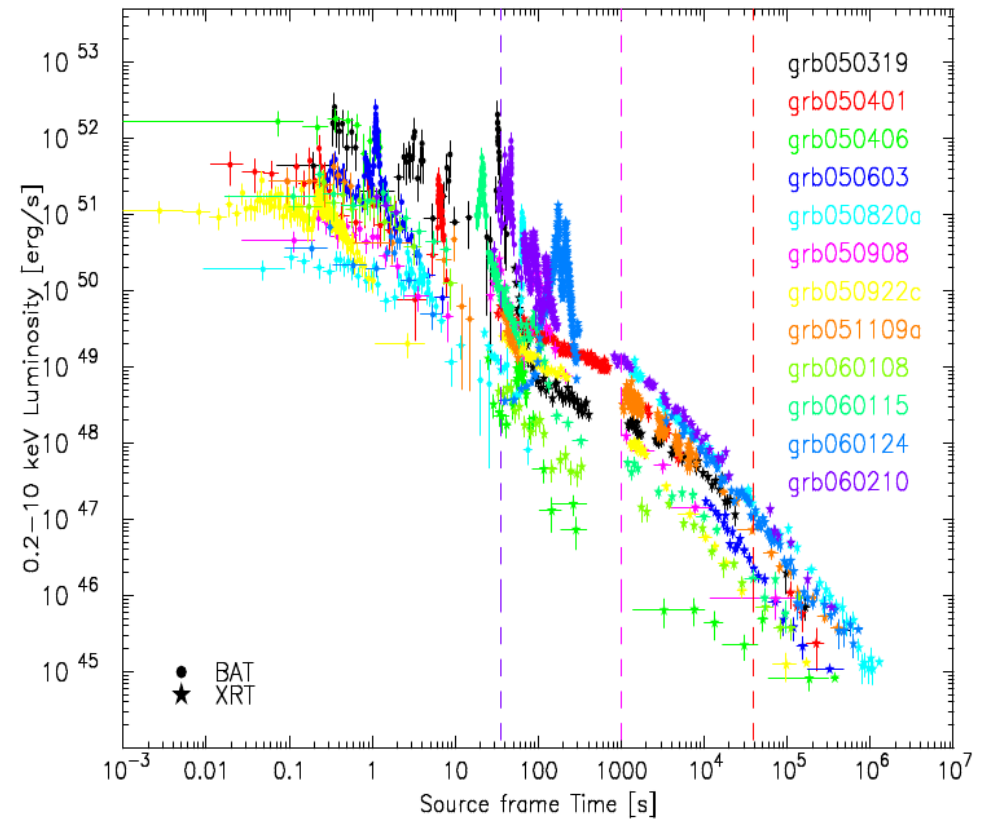
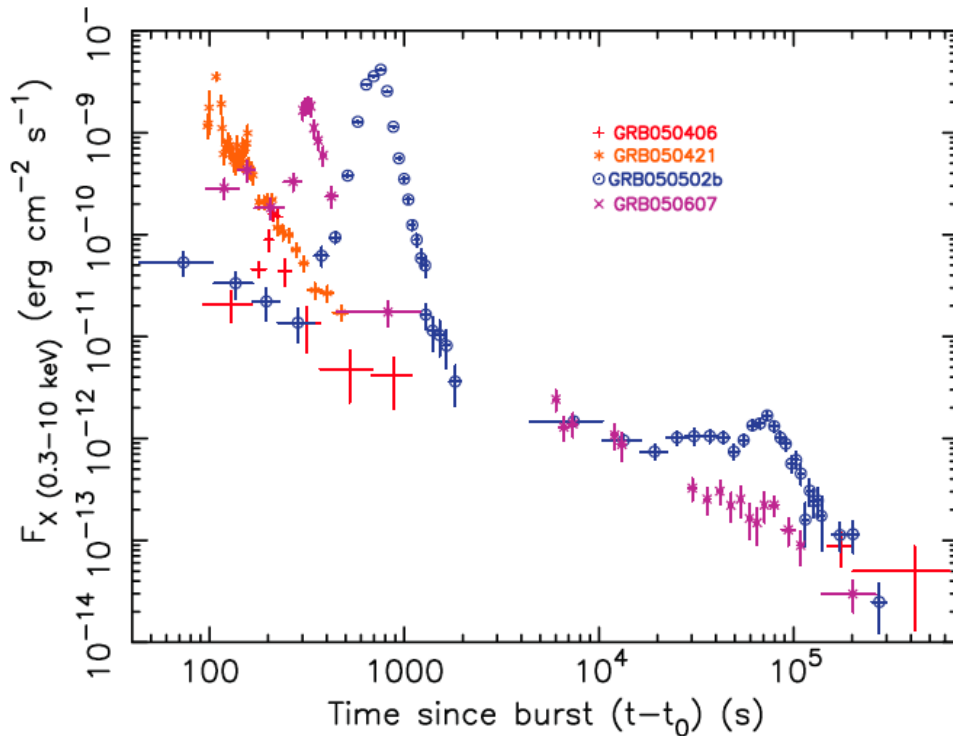
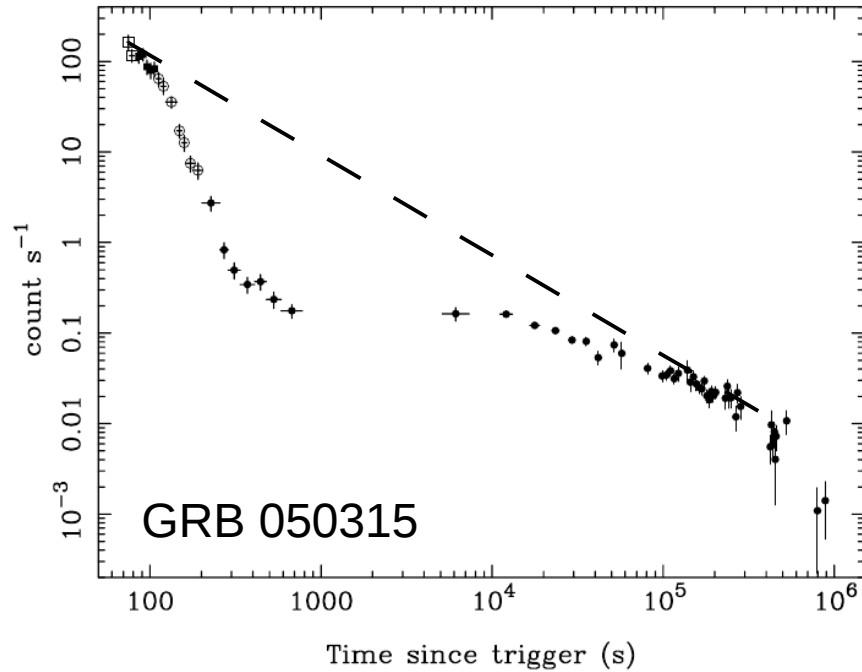
Environ 50 ans après la découverte des sursauts gamma, leur étude est au coeur de questions importantes de l'astrophysique moderne

- Les sursauts gamma marquent la **naissance des trous noirs de masse stellaire, ou la coalescence de 2 objets compacts.**
- **Astrophysique des hautes énergies** dans l'environnement des objets compacts : phénomènes d'accrétion / éjection, accélération de particules dans les chocs
- **Nouvelles astronomies / nouveaux messagers** (ondes gravitationnelles et “astro-particules”) pour l'astrophysique
 - X, gamma MeV $\rightarrow$ TeV, neutrino, UHECRs, ondes gravitationnelles
- Tests de **physique fondamentale (relativité d'Einstein)**
 - granularité de l'espace temps
- Cosmologie et formation des **premières structures de l'Univers**

CTA publicité



Quand débute la rémanence ?



- La rémanence précoce (<10 ks), observable grâce à *Swift*-XRT
- Décroissance rapide suivie d'un plateau
- Apparition fréquente d'éruptions intenses



FIN

1963 : traité d'interdiction des essais nucléaires

**Treaty Banning Nuclear Weapon Tests in the Atmosphere, in Outer Space and under Water
Signed by the Original Parties, the Union of Soviet Socialist Republics, the United Kingdom of Great Britain
and Northern Ireland and the United States of America at Moscow: 5 August 1963**

The Governments of the United States of America, the United Kingdom of Great Britain and Northern Ireland, and the Union of Soviet Socialist Republics, hereinafter referred to as the "Original Parties,"

Proclaiming as their principal aim the speediest possible achievement of an agreement on general and complete disarmament under strict international control in accordance with the objectives of the United Nations which would put an end to the armaments race and eliminate the incentive to the production and testing of all kinds of weapons, including nuclear weapons,

Seeking to achieve the discontinuance of all test explosions of nuclear weapons for all time, determined to continue negotiations to this end, and desiring to put an end to the contamination of man's environment by radioactive substances,

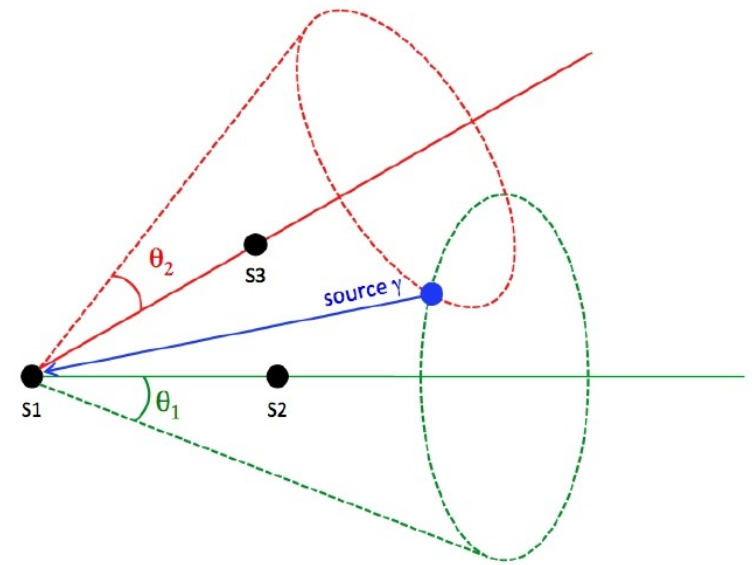
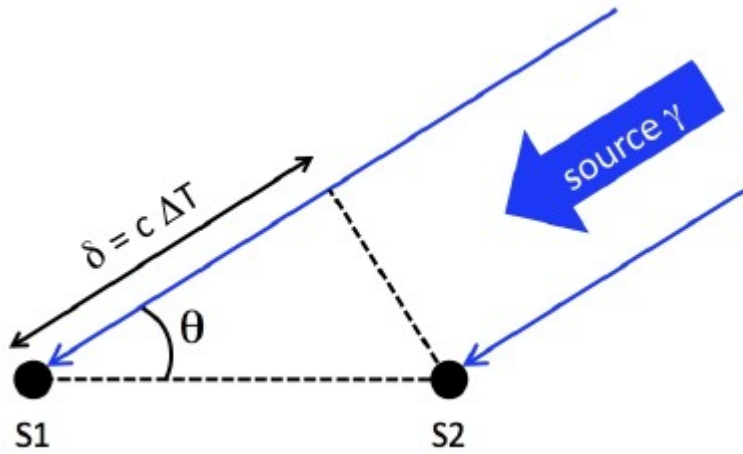
Have agreed as follows:

Article I

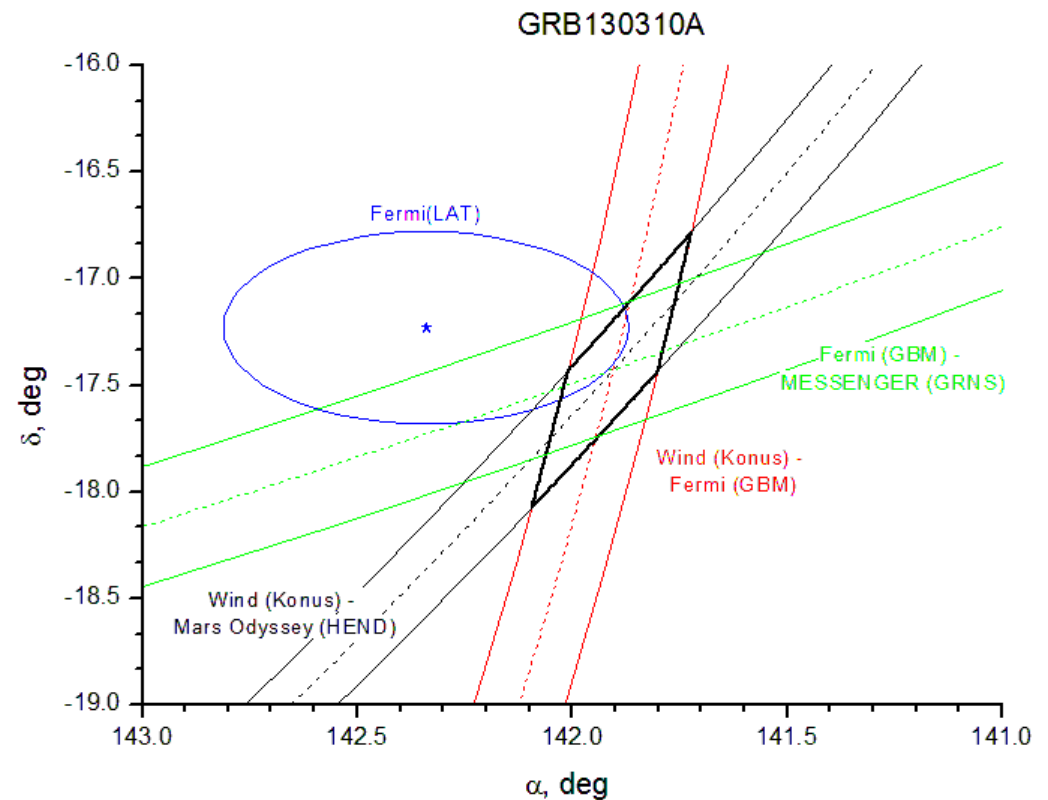
1. Each of the Parties to this Treaty undertakes to prohibit, to prevent, and not to carry out any nuclear weapon test explosion, or any other nuclear explosion, at any place under its jurisdiction or control:

(a) in the atmosphere; beyond its limits, including outer space; or under water, including territorial waters or high seas; or

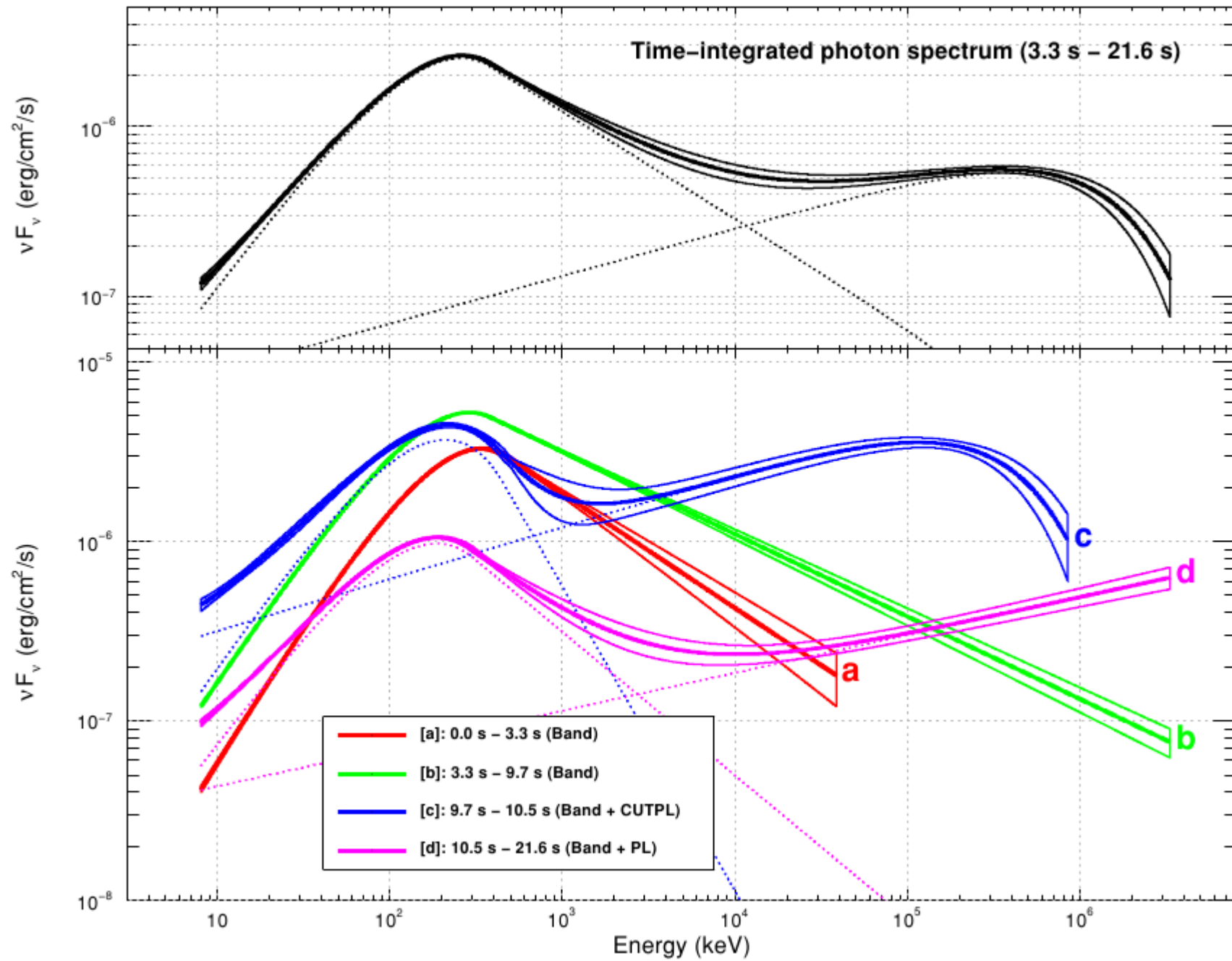
Au début : localisation par triangulation



- Beaucoup de localisations par triangulation, mais les boîtes d'erreur sont grandes et aucune contrepartie n'est trouvée
- Technique encore utilisée de nos jours :

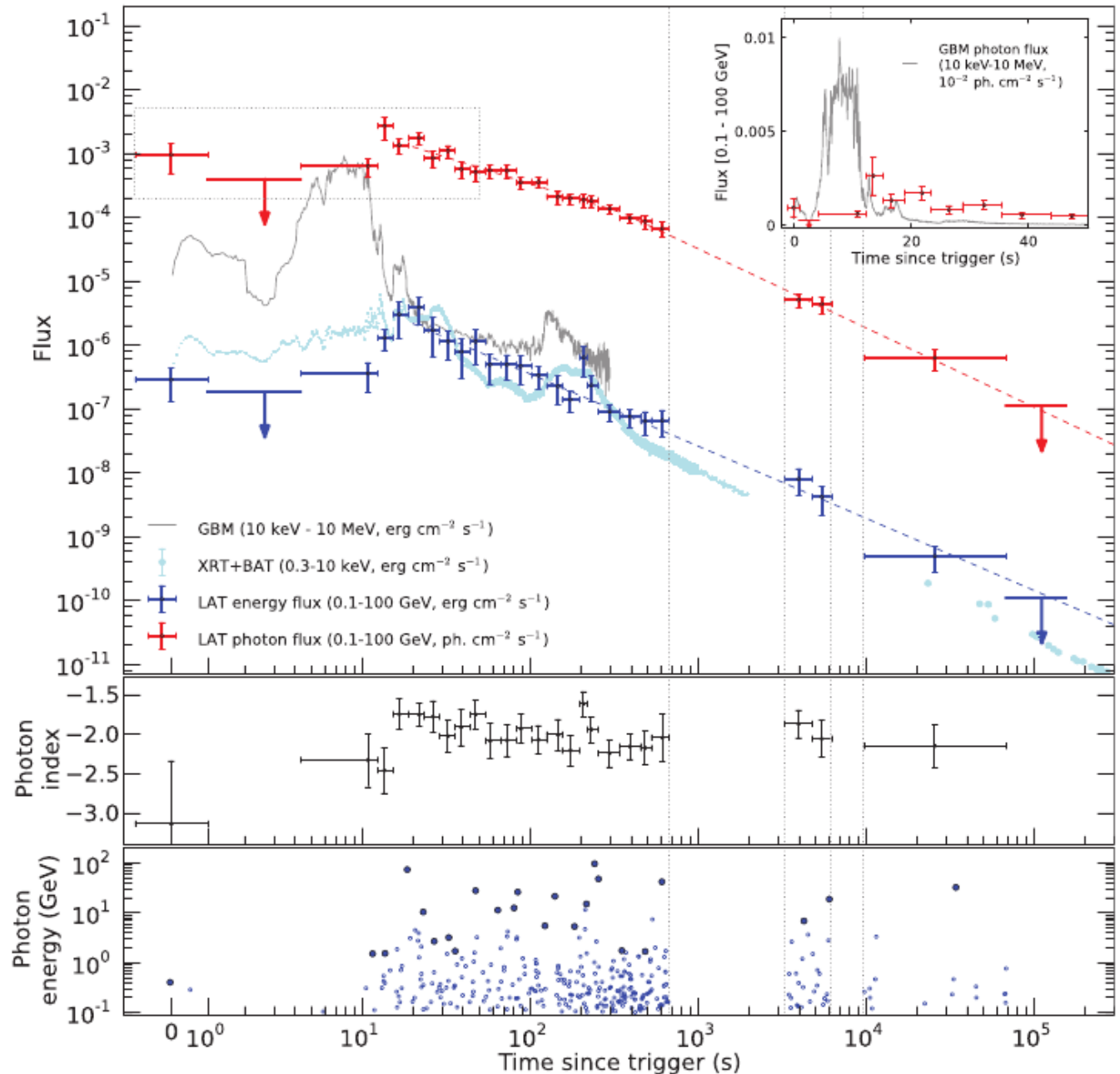


GRB 090926A vu par *Fermi*



GRB 130427A vu par *Swift* et *Fermi*

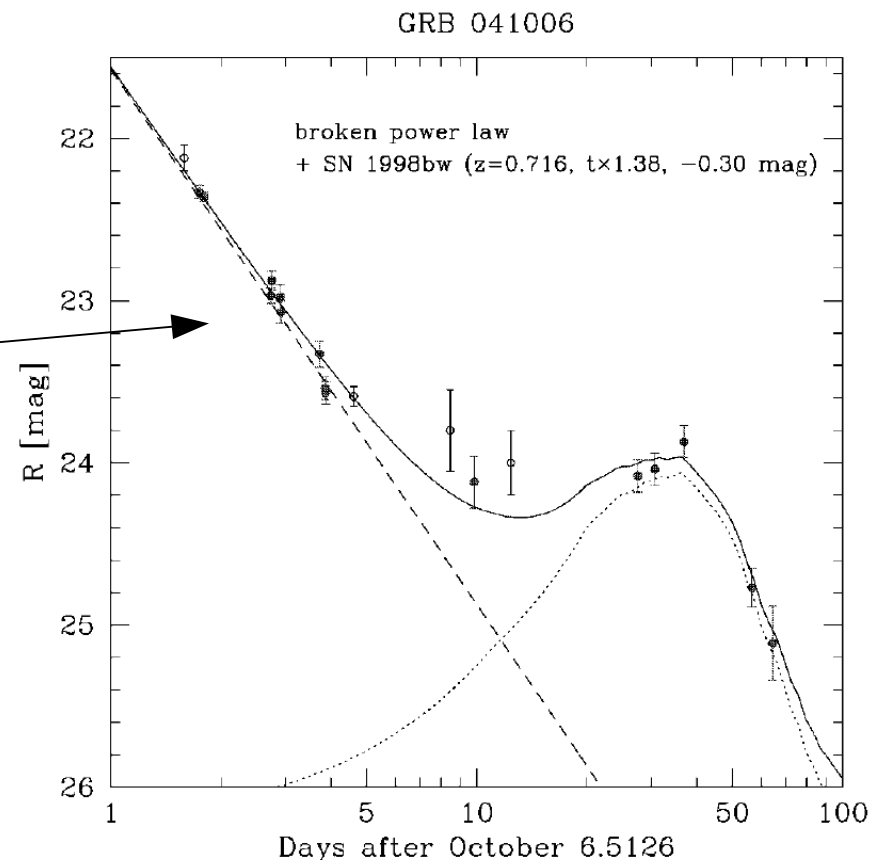
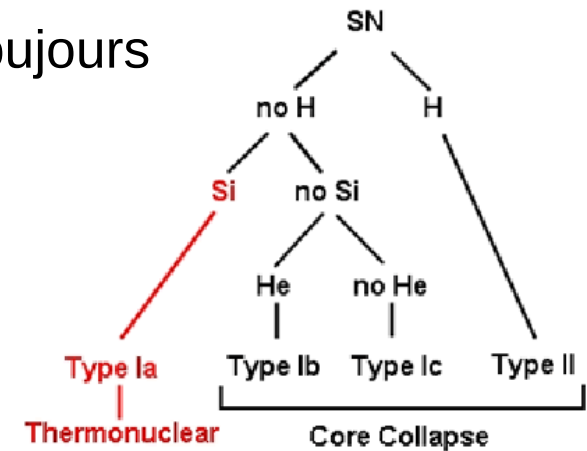
- Rémanence
 - La plus brillante en X
 - La plus longue en γ
 - Un photon de 95 GeV détecté après 244 s
- Courbes de lumière similaires en X et γ



Association avec les SN Ib/c

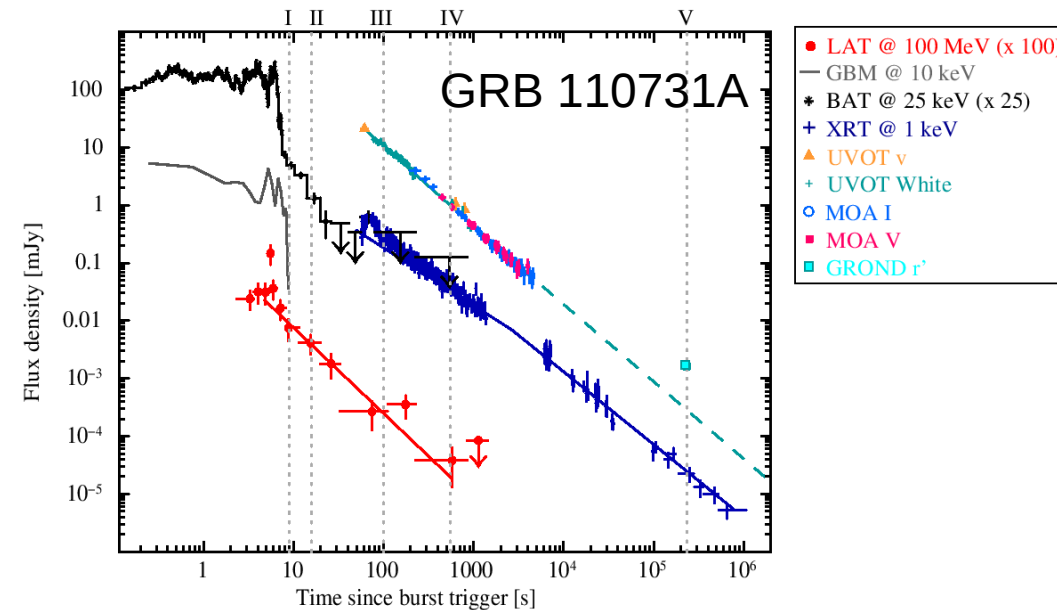
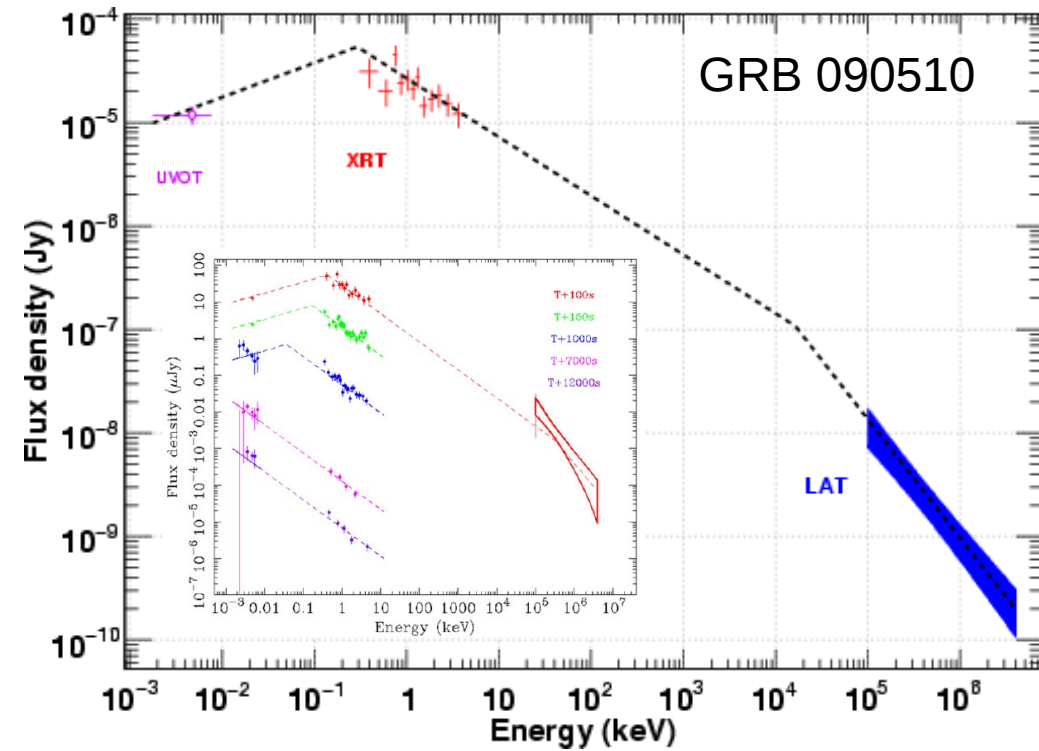
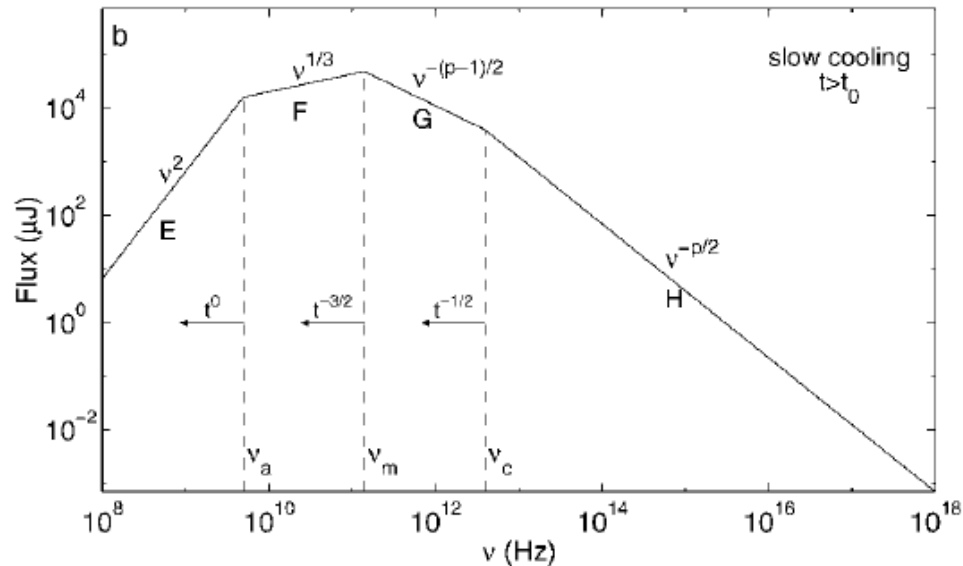
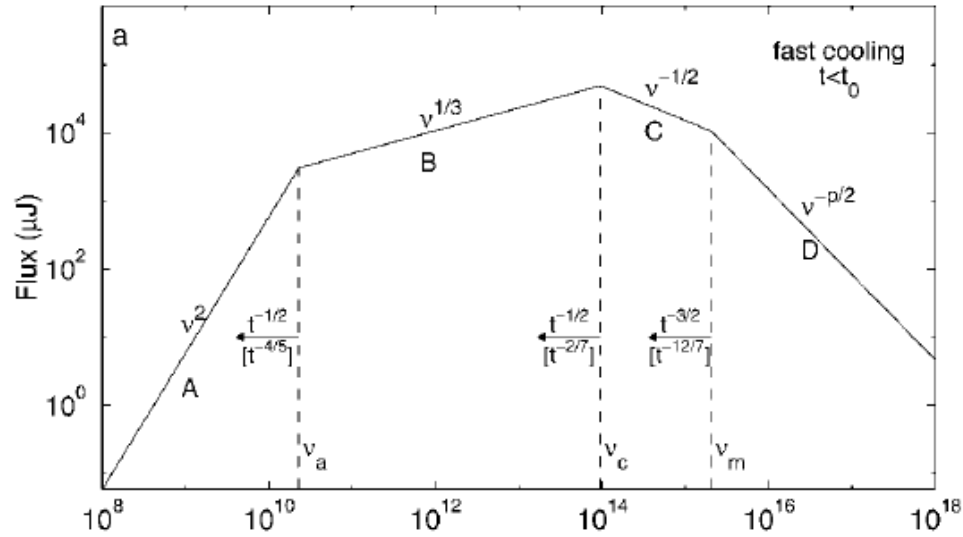
Une bosse dans une courbe de lumière ne suffit pas toujours pour se convaincre → **spectroscopie nécessaire**

GRB/XRF	SN Designation	z	Evidence	Comments
970228		0.695	C	
980326			D	red bump
980425	1998bw	0.0085	A	spectroscopic SN
990712		0.433	C	
991208		0.706	E	low significance
000911		1.058	E	low significance
011121	2001ke	0.362	B	spectral features
020305			E	not fitted by GRB-SNe
020405		0.691	C	red bump
020410			D	discovered via bump
020903		0.251	B	spectral features
021211	2002lt	1.006	B	spectral features
030329	2003dh	0.1685	A	spectroscopic SN
030723			D	red bump, X-ray excess
031203	2003lw	0.1055	A	spectroscopic SN
040924		0.859	C	
041006		0.716	C	
050416A		0.654	D	poor sampling
050525A	2005nc	0.606	B	spectral features
050824		0.828	E	low significance
060218	2006aj	0.0334	A	spectroscopic SN
060729		0.543	E	afterglow dominated
070419A		0.971	D	poor sampling
080319B		0.938	C	multiple color bump
081007	2008hw	0.530	B	spectral features
090618		0.54	C	
091127	2009nz	0.490	C	spectroscopic SN
100316D	2010bh	0.0591	A	spectroscopic SN
100418A		0.624	D	
101219B		0.552	B	spectral features



Modélisation de la rémanence

Spectre théorique d'émission d'électrons accélérés au choc avant :



Le "modèle" des chocs internes / externe

