

National Aeronautics and Space Administration



Fermi
Gamma-ray Space Telescope

www.nasa.gov/fermi

Les sursauts gamma à l'ère de *Fermi*

Frédéric Piron

**Laboratoire de Physique
Théorique et Astroparticules
(IN2P3/CNRS et Univ. Montpellier 2)**

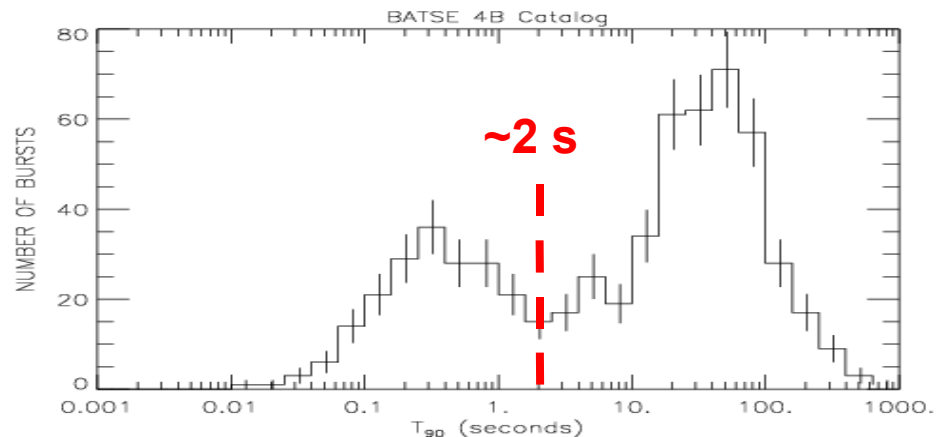
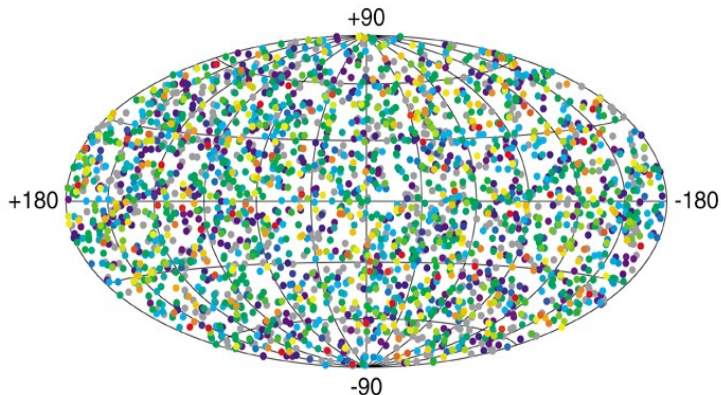
Plan de l'exposé

- **Rappels historiques**
- **Le paradigme actuel des sursauts gamma**
 - Jets relativistes et modèle de la boule de feu
 - Emission à haute énergie
- **Observations de sursauts gamma avec *Fermi***
 - Instruments, performances et sensibilité
 - GRB 080825C, GRB 080916C et GRB 090323

Rappels historiques (1/4)

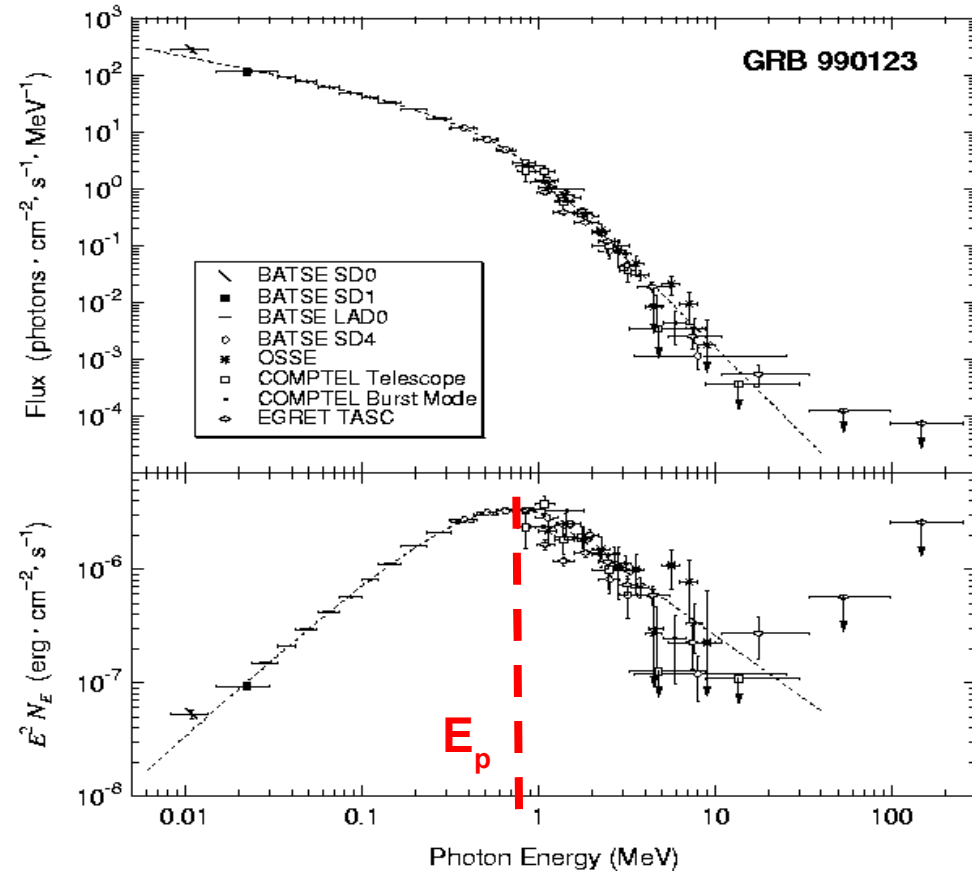
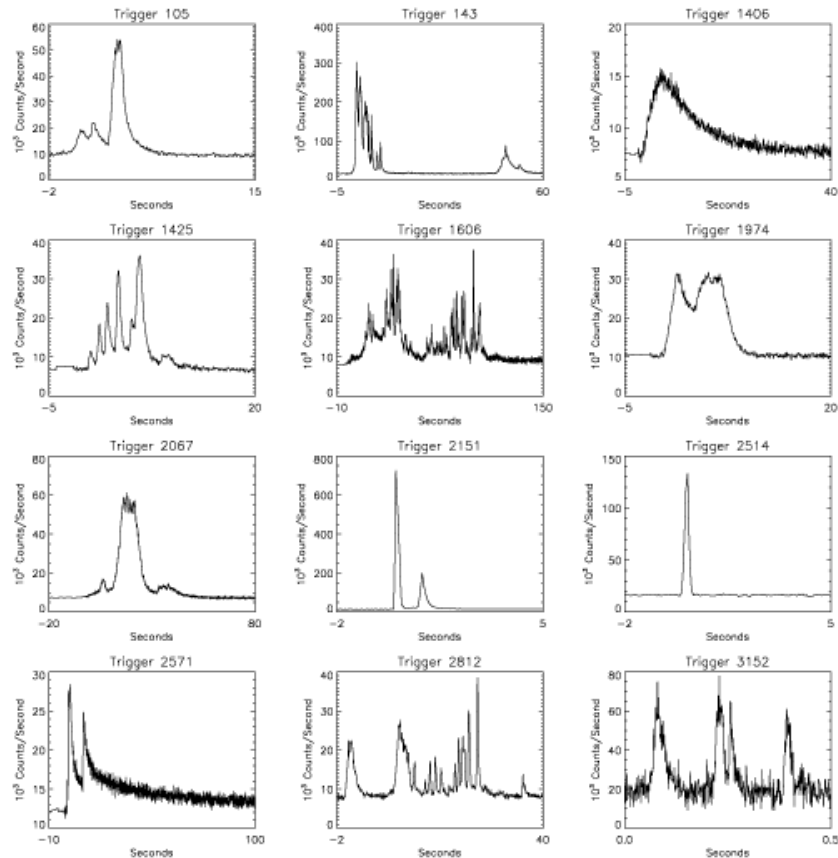
- **1967** : premières observations des **sursauts (émission prompt)** par les satellites militaires Vela
 - Beaucoup de théories dans les premières années
 - Origine Galactique (étoiles à neutrons) ?
- **1991 - 2000** : observatoire Compton (CGRO)
 - BATSE (~30 keV – 2 MeV, ciel non occulté)
 - Un sursaut par jour
 - Isotropie dans le ciel : **origine cosmologique ?**
 - Sursauts **courts (<2 s)** ou **longs** (plus mous)
 - EGRET (~30 MeV – 30 GeV, FoV ~ 0.6 sr)

2704 BATSE Gamma-Ray Bursts



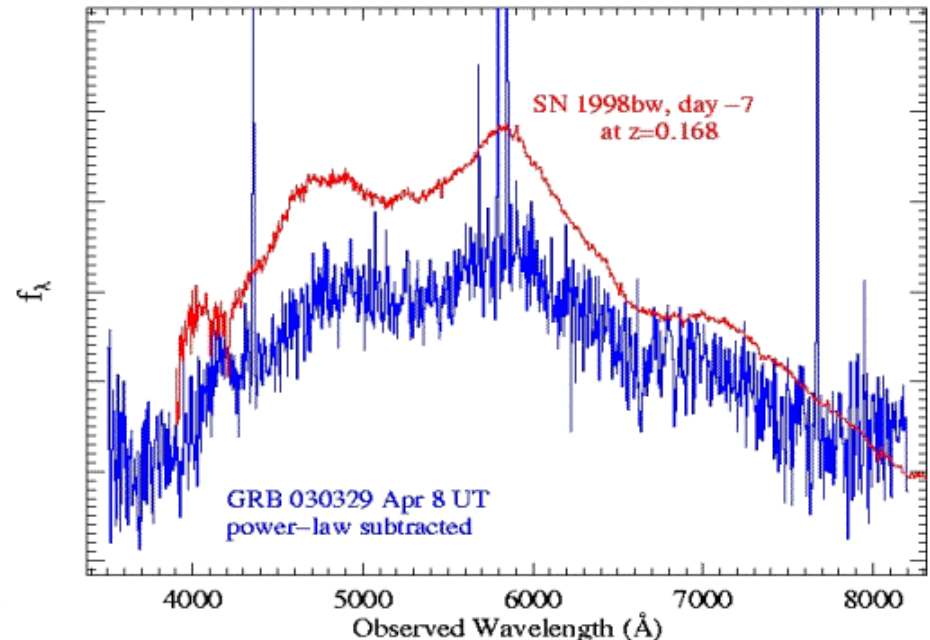
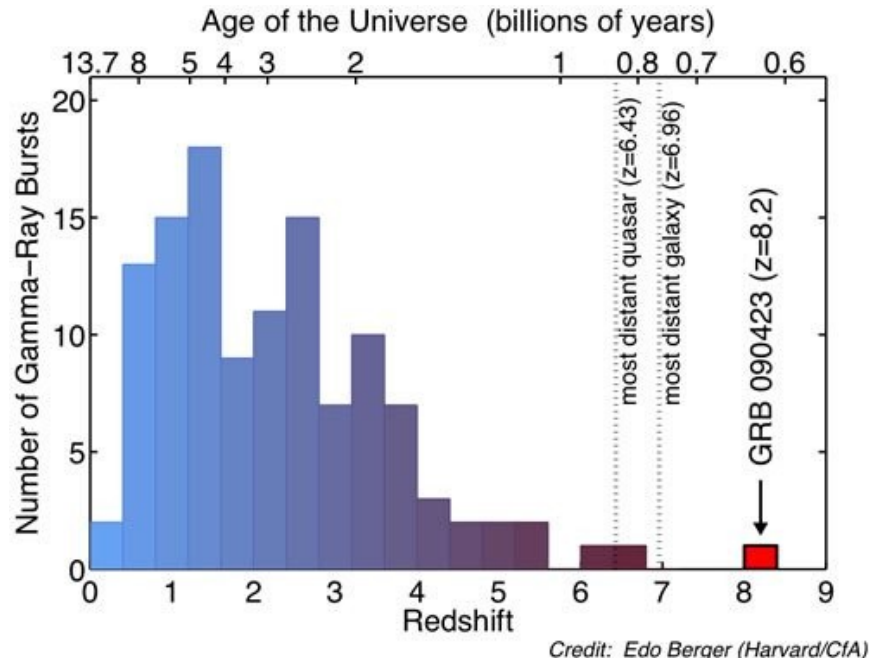
Rappels historiques (2/4)

- Une grande variété de courbes de lumière
- **Spectre de Band** en général
 - Indices spectraux $\alpha \sim -1.0$, $\beta \sim -2.5$, énergie au pic $E_p \sim$ quelques 100 keV



Rappels historiques (3/4)

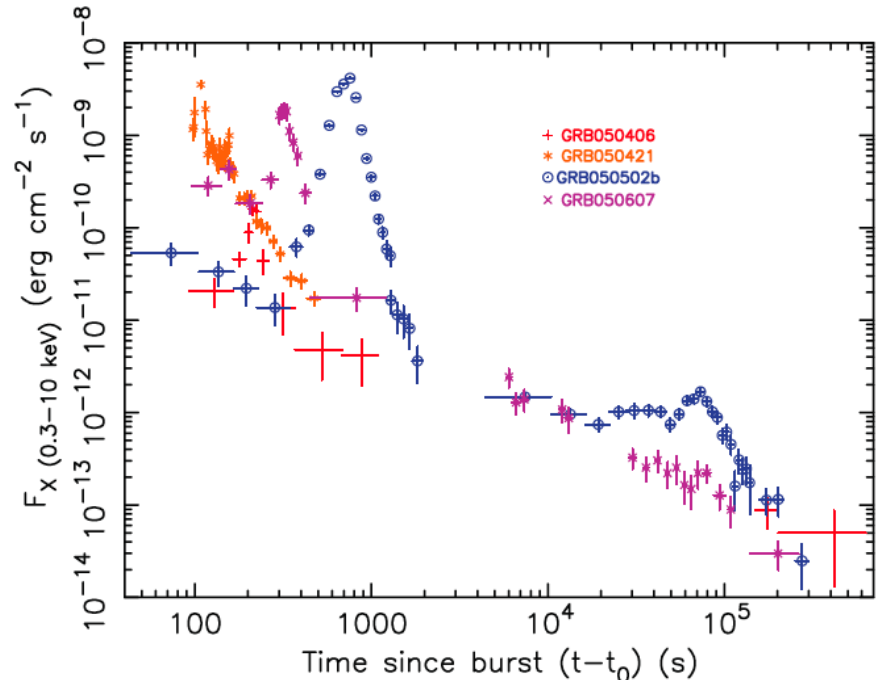
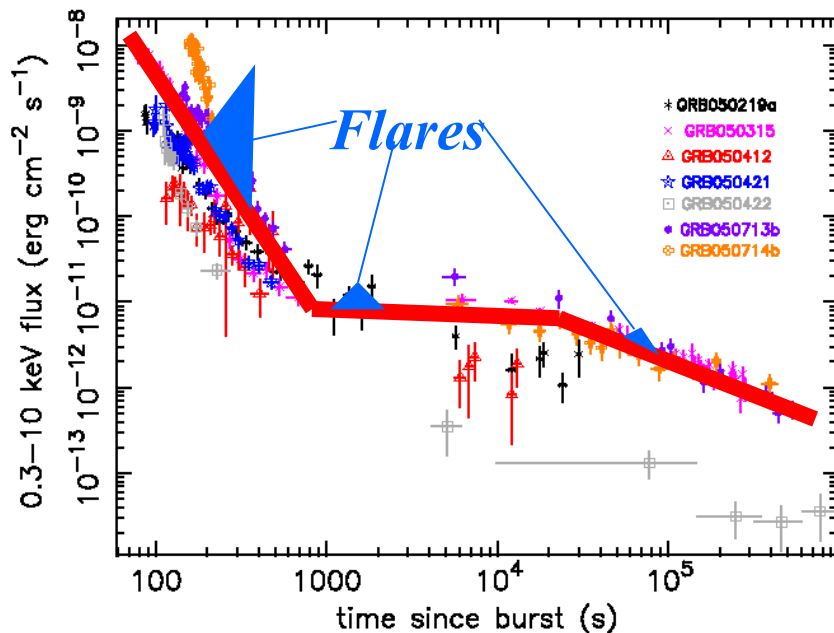
- **1996 - 2002 : Beppo-SAX et suivi au sol des sursauts longs**
 - Découverte d'une **émission rémanente (afterglow)** en X, optique, radio
 - Premières mesures de distances (GRB 970228 à $z \sim 0.7$ et GRB 971214 à $z \sim 3.4$) et donc de l'énergie libérée à la source : $E_{\gamma, \text{iso}} \sim 10^{52} - 10^{54}$ erg
 - Premières contraintes sur le **jet** ($E_{\gamma} \sim 10^{51}$ erg), taux d'occurrence, densité du milieu extérieur, connexion avec les supernovae (association de GRB 980425 avec SN1998bw), progéniteurs supposés des sursauts longs
- **2003 - 2006 : HETE-2**
 - Confirmation de la **connexion sursauts longs / supernovae (GRB 030329)**



Rappels historiques (4/4)

- 2004 - ? : Swift

- Tous les instruments réunis à bord pour étudier la connexion entre phases prompte et rémanente et pour la mesure de grands z
 - BAT (Burst Alert Telescope) : moniteur gamma (15 – 150 keV) grand champ (2 sr) pour la détection (localisation à quelques arcmin)
 - XRT : caméra CCD petit champ ($\sim 20'$) pour la localisation précise ($\sim 5''$) et l'observation de l'afterglow en rayons X (0.2-10 keV) ; repointage en ~ 1 -2 min
 - UVOT : télescope UV/optique pour la photométrie et la spectroscopie ($< 1''$)
- Découverte de propriétés étonnantes de l'émission rémanente (plateau faiblement décroissant, X-ray flares dans $\sim 50\%$ des cas), notamment des sursauts courts
 - distances, galaxies hôtes, taux d'occurrence, information sur le progéniteur



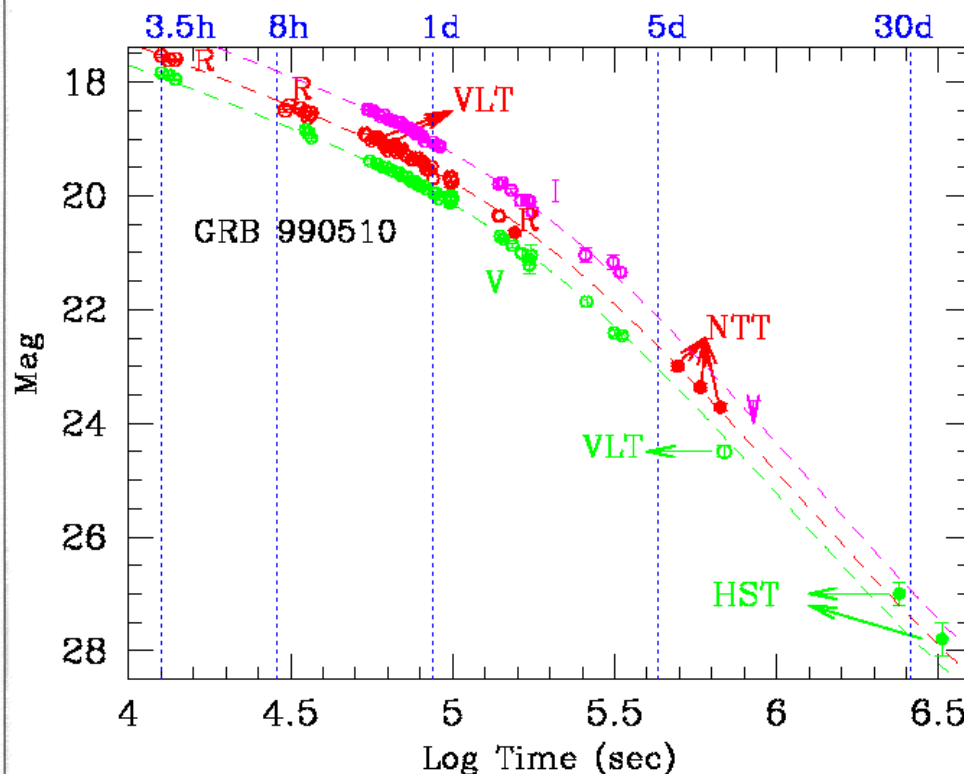
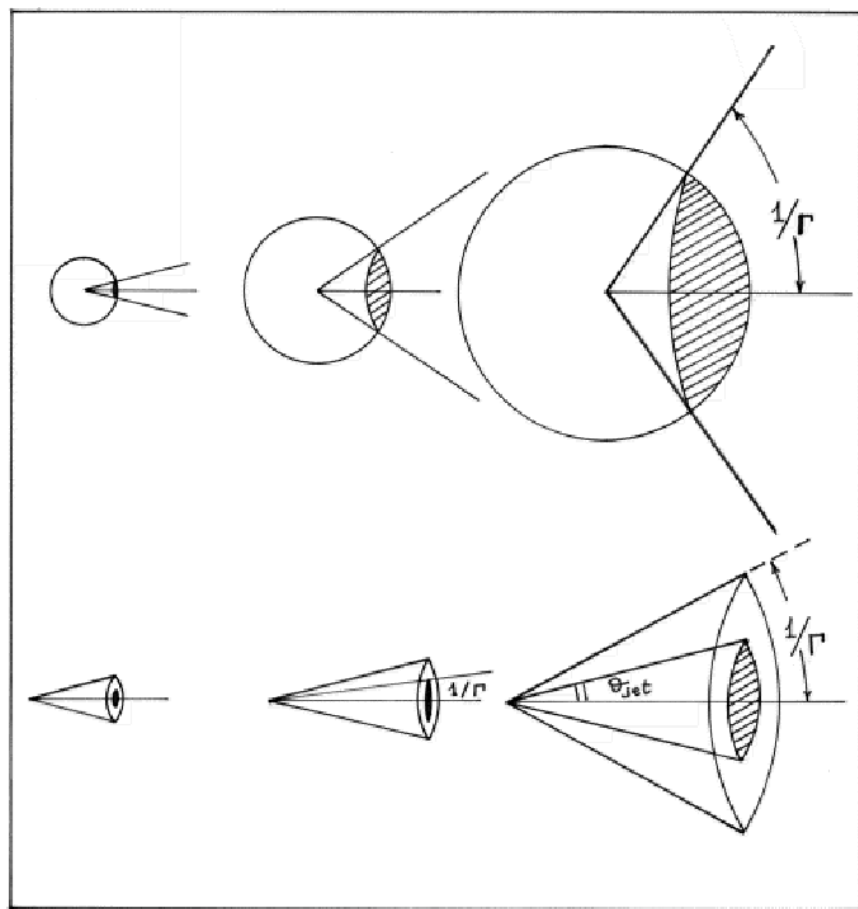
Pourquoi un mouvement relativiste ?

- Les sursauts gamma sont des objets cosmologiques et très énergétiques ($E_{\gamma, \text{iso}} \sim 10^{52} - 10^{54} \text{ erg}$)
 - sources compactes accrétantes
 - émission collimée sous forme de jet relativiste
- Argument 1 : le problème de compacité
 - Très grande luminosité $L_{\text{iso}} \sim 10^{50} - 10^{53} \text{ erg/s}$
 - Pour une source au repos, la variabilité rapide Δt implique une source de dimension $R < c\Delta t$ suffisamment petite pour que les photons d'énergie $\varepsilon = E_{\text{ph}} / m_e c^2 \sim 1$ s'annihilent en paires ($\gamma\gamma \rightarrow e^+e^-$) :
 - la densité de photons cibles $n_{\text{ph}}(1/\varepsilon) \sim L_{1/\varepsilon} / (4\pi R^2 m_e c^3)$ conduit à l'opacité suivante : $\tau_{\gamma\gamma}(\varepsilon) \sim \sigma_T n_{\text{ph}}(1/\varepsilon) R = \sigma_T L_{1/\varepsilon} / (4\pi m_e c^3 R) > 10^{14} L_{1/\varepsilon, 51} (\Delta t / 1 \text{ ms})^{-1}$
 - une telle opacité devrait créer un spectre thermique, incompatible avec les observations à haute énergie
 - Pour une source en mouvement relativiste, $\tau_{\gamma\gamma}$ est réduit d'un facteur $\Gamma^{2(1-\beta)}$
 - $-\beta \sim 2-3$ et $\tau_{\gamma\gamma} < 1 \Rightarrow \Gamma > \Gamma_{\text{min}} \sim 100$ (augmente avec $1/\Delta t$, E_{max} , z et flux)

$$\Gamma_{\text{min}}(E_{\text{max}}) = \left[\frac{4 d_L^2 A}{c^2 t_v} \frac{m_e^2 c^4}{(1+z)^2 E_{\text{max}}} g \sigma_T \right]^{\frac{1}{2-2\beta}} \left[\frac{(\alpha - \beta) E_{\text{pk}}}{(2 + \alpha) 100 \text{ keV}} \right]^{\frac{\alpha - \beta}{2-2\beta}} \exp\left(\frac{\beta - \alpha}{2 - 2\beta}\right) \left[\frac{2 m_e^2 c^4}{E_{\text{max}} (1+z)^2 100 \text{ keV}} \right]^{\frac{\beta}{2-2\beta}}$$

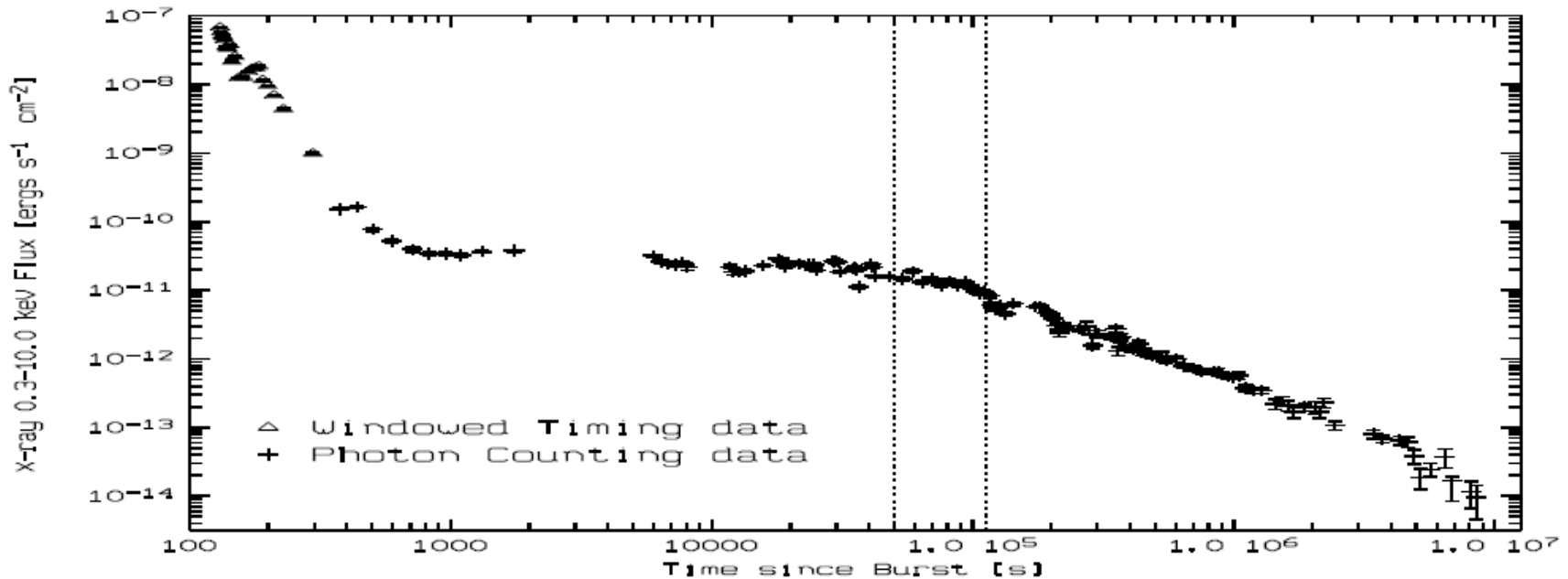
Pourquoi un jet ?

- **Argument 2 : la cassure achromatique dans les courbes de lumière**
 - Pour un mouvement relativiste, l'angle d'ouverture de la région émettrice ($\sim 1/\Gamma$) augmente et sature à θ_{jet} contrairement au cas sphérique



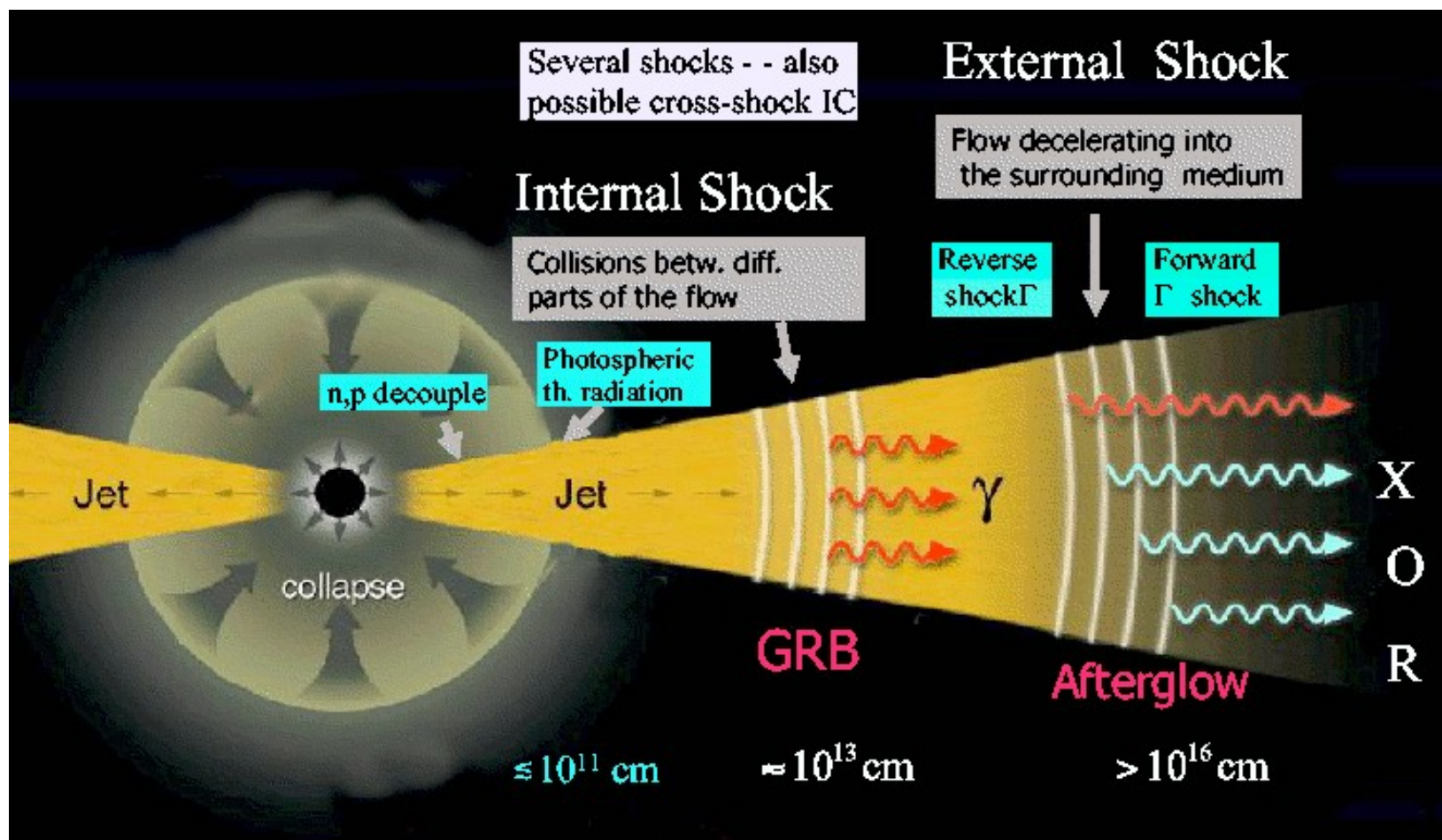
mais...

- ...la plupart des courbes de lumière en rayons X ne présente pas de cassure
 - Cassure possible pour ~5 sursauts en rayons X et ~2 en rayons X et optique
 - Pas de cassure observée ~125 jours après la détection de GRB 060729 : $\theta_{\text{jet}} > 28^\circ$



Le modèle de la boule de feu

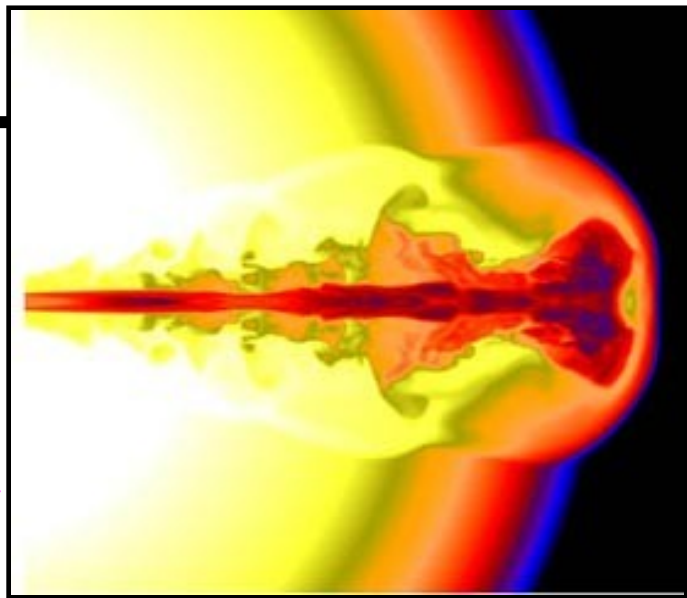
- Jet accéléré jusqu'à $\Gamma > 100$, opaque (émission photosphérique attendue à $R \sim 10^{11-12}$ cm)
- **Chocs internes** entre surdensités dans les éjectas à $R \sim 10^{14-15}$ cm (émission prompt)
- Jet freiné par le milieu interstellaire et **chocs externes** à $R \sim 10^{16-17}$ cm (émission rémanente)



Progéniteurs ?

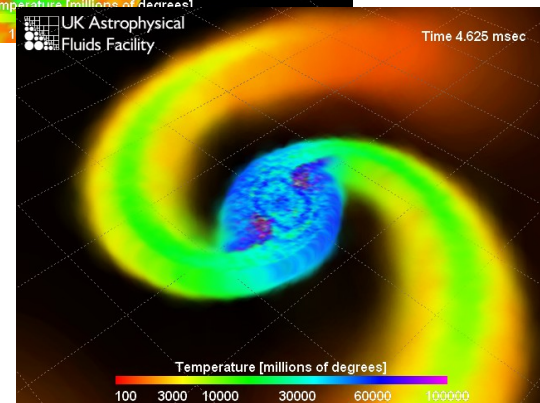
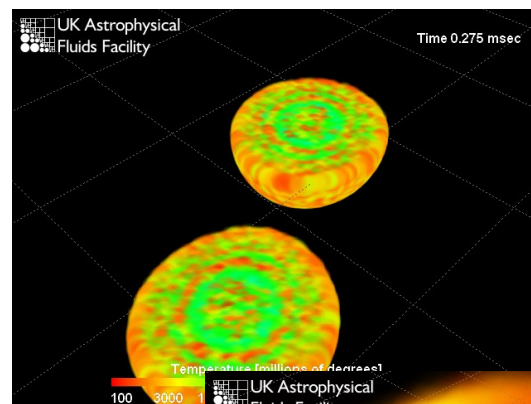
• Sursauts longs

- Ingrédients : **étoiles Wolf-Rayet** $>10 M_{\odot}$ de rayon $\sim R_{\odot}$, en rotation rapide
- Effondrement et formation d'une **supernova** et d'un **trou noir** de $\sim 2-3 M_{\odot}$ entouré d'un **disque d'accrétion** (maintenu pendant qq 10 s)
- Energie émise suivant l'axe de rotation
- Sortie du jet de l'enveloppe stellaire en qq 10 s
- Facteurs de Lorentz $\Gamma \sim 10-100$
- Angle d'ouverture du jet $\theta_{\text{jet}} \sim 5^{\circ}$
- **Régions de formation stellaire**



• Sursauts courts

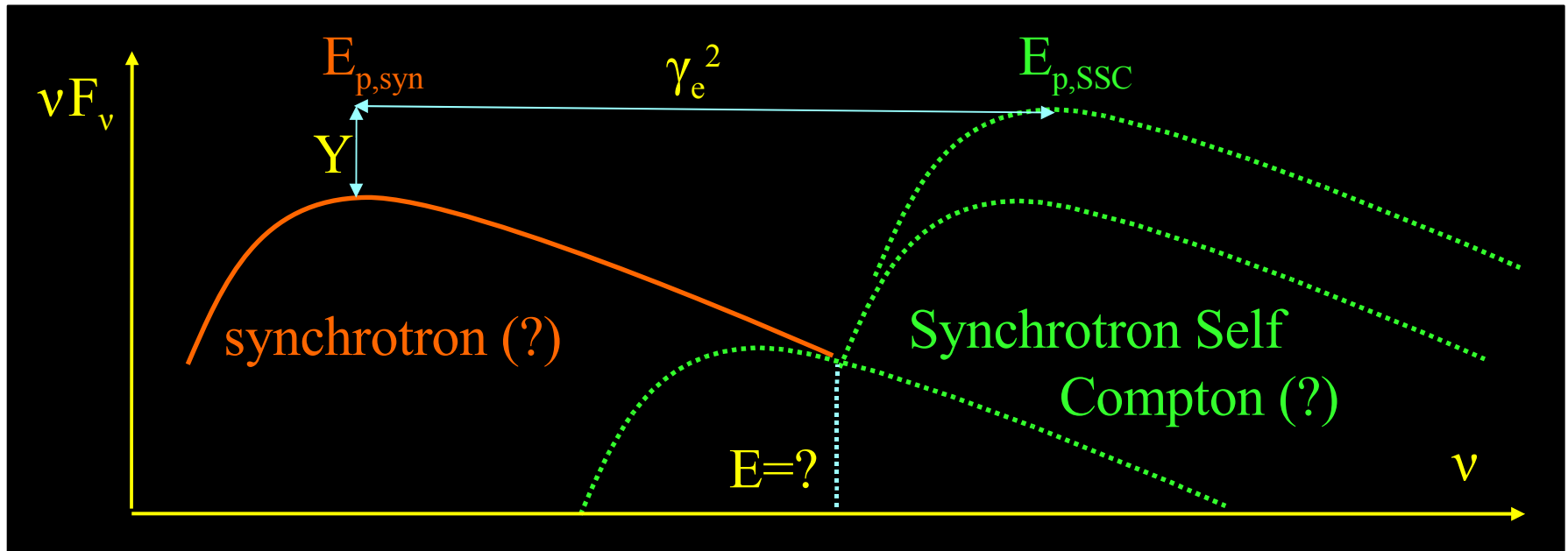
- $\sim 15\%$ des sursauts détectés
- Associés à des galaxies elliptiques (population d'étoiles vieilles)
- **Fusion d'objets compacts (NS-NS ou NS-BH)**
- Echelle de temps de la fusion de l'ordre de la ms
- Ejection dans une **région de plus faible densité** (faible émission rémanente)



Processus d'émission à haute énergie

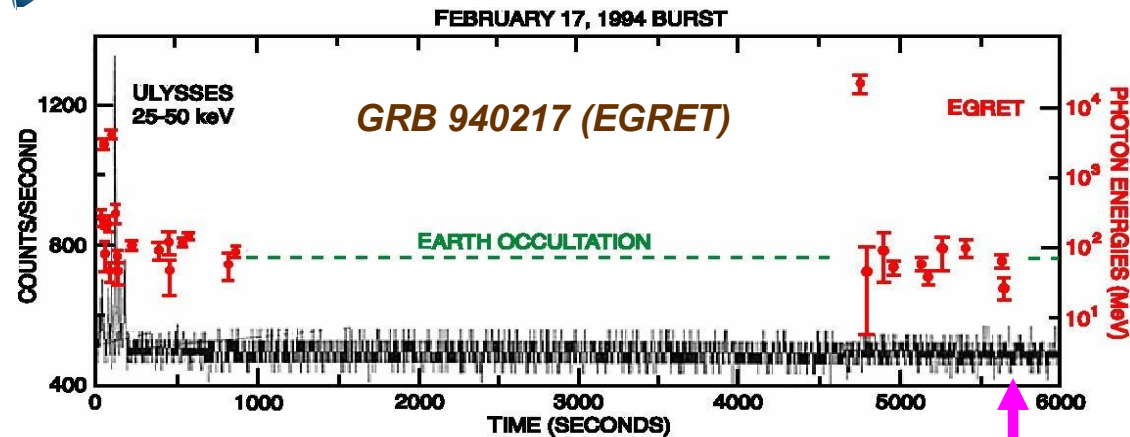
- Effet Compton inverse ou Synchrotron Self Compton (SSC)

$$E_{p,SSC} / E_{p,syn} \sim \gamma_e^2, \quad L_{SSC} / L_{syn} = Y, \quad Y(1+Y) \sim \epsilon_{rad} \epsilon_e / \epsilon_B$$



- Processus hadroniques : photopair production ($p + \gamma \rightarrow p + e^+ e^-$), émission synchrotron des protons, production de pions via $p - \gamma$ (photopion), interactions ou collisions $p-p$
 - Les pions neutres se désintègrent en 2 photons de haute énergie $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ qui peuvent cascader en paires avec des photons de plus basse énergie $\gamma\gamma \rightarrow e^+ e^-$
 - **Fermi devrait aider à déterminer les mécanismes dominant à basse et haute énergies**

Les sursauts à haute énergie avant *Fermi*



- Très peu d'observations >100 MeV (EGRET, AGILE)

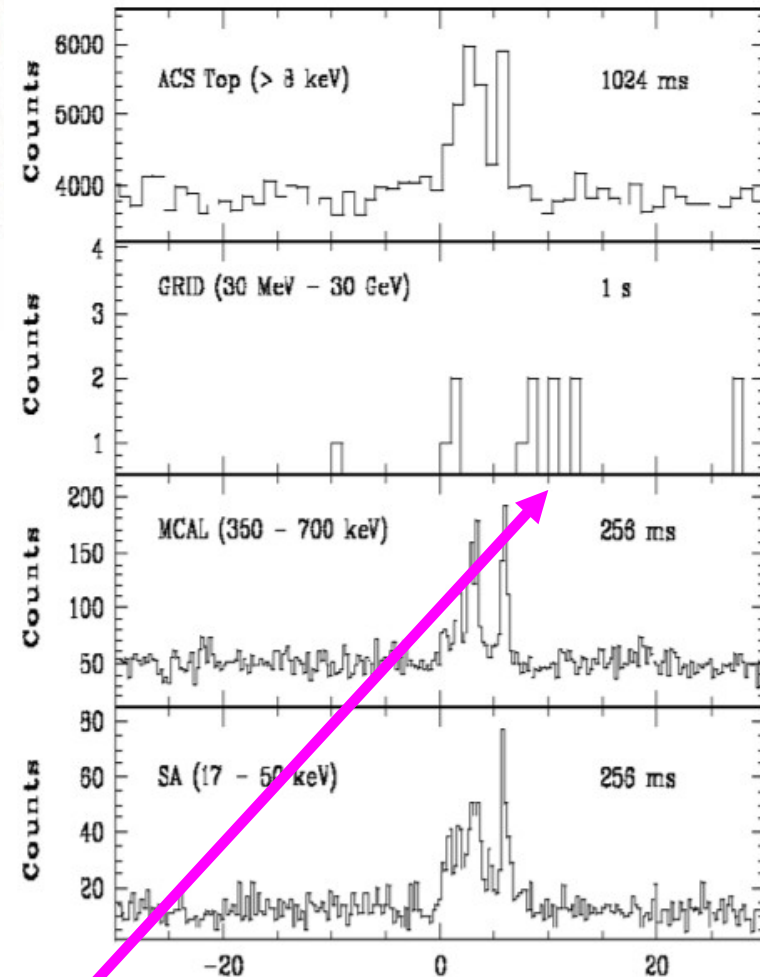
- GRB 940217

- Emission prompt simultanée >100 MeV, pas de coupure spectrale
- Emission retardée de photons >1 GeV jusqu'à 90 min après le trigger (BATSE) ; origine peu claire :
 - Emission SSC rémanente ?
 - Processus hadroniques ?
 - Activité tardive ?
 - Interaction avec le fond diffus IR ?

- GRB 080514B

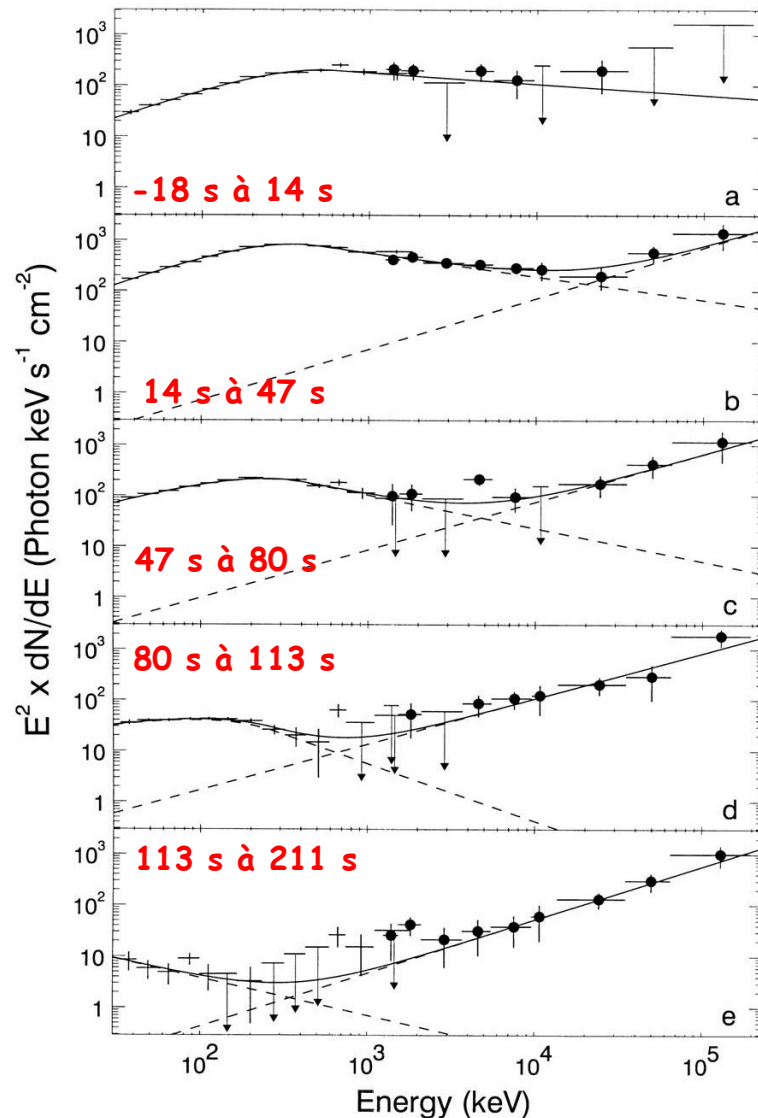
- Observation par AGILE de quelques photons >100 MeV avec une durée un peu plus grande qu'à basse énergie

GRB 080514B (AGILE)



Les sursauts à haute énergie avant *Fermi*

GRB 941017 (EGRET)



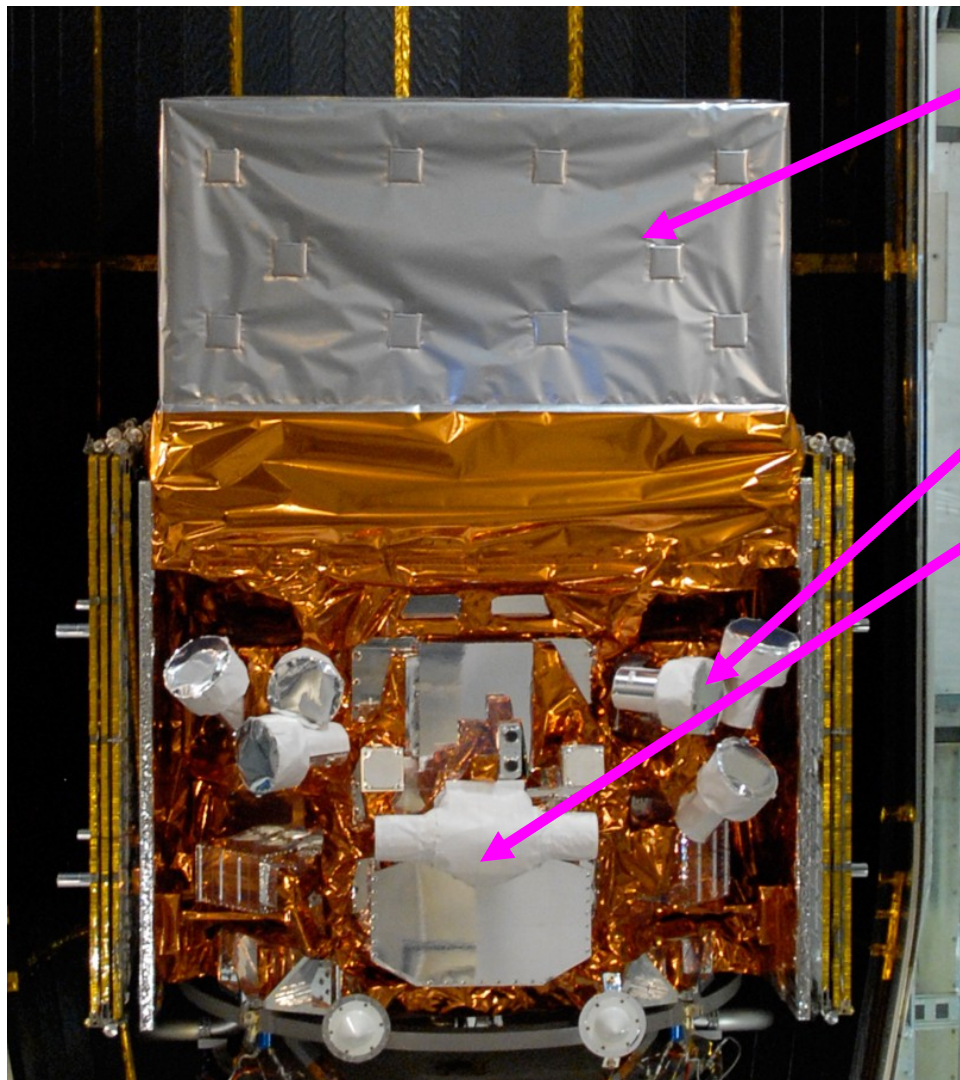
• GRB 941017

- **Composante spectrale additionnelle distincte** du $\sim$ MeV jusqu'à 200 MeV
- **Evolution temporelle différente :** stable, dure ($\sim$ 200 s) plus longtemps que la composante $<$ MeV
- Contient $\sim$ 3 fois plus d'énergie
- **Incompatible avec modèle SSC simple**
- Production de **rayons cosmiques d'ultra-haute énergie** et cascades hadroniques ?
- Plus probable : émission Compton inverse du système de chocs en avant / en retour

• Questions ouvertes

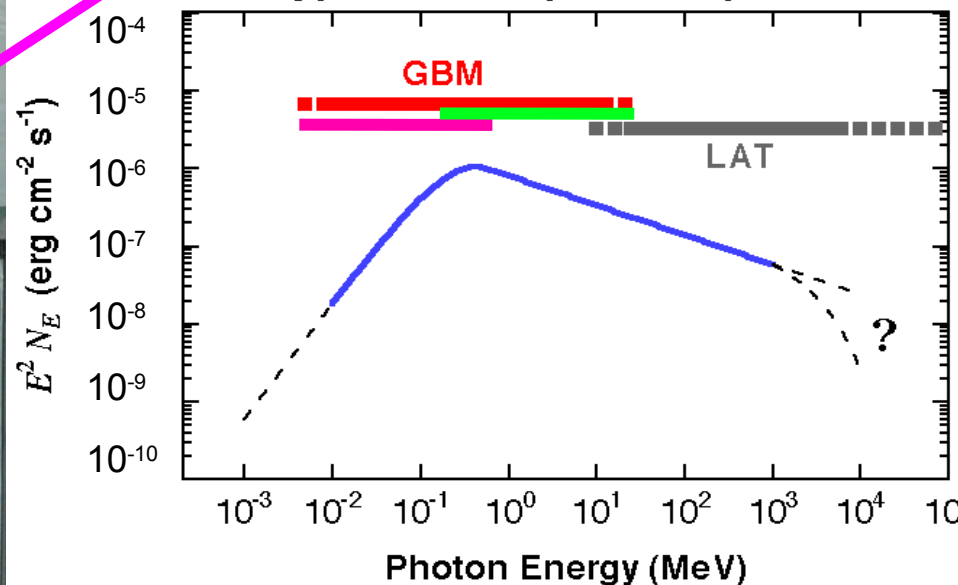
- A quelle énergie s'arrête la composante additionnelle ?
- Y a-t-il une coupure spectrale ?
- Chocs internes ou externes ?
- Quelle est la part des hadrons ?
- Evolution spectrale fine ?
- **Est-ce une propriété commune aux sursauts ?**

Les instruments à bord de *Fermi*



- **Large Area Telescope (LAT)**
 - 20% du ciel à tout instant
 - 20 MeV à >300 GeV
 - Triggers GRB à bord et au sol
 - Localisation, spectroscopie
- **Gamma-ray Burst Monitor (GBM)**
 - Tout le ciel non occulté à tout instant
 - 12 détecteurs au NaI (8 keV à 1 MeV)
 - Trigger GRB à bord, localisation à bord et au sol, spectroscopie
 - 2 détecteurs au BGO (150 keV à 40 MeV)
 - Spectroscopie

"Typical" Prompt GRB Spectrum

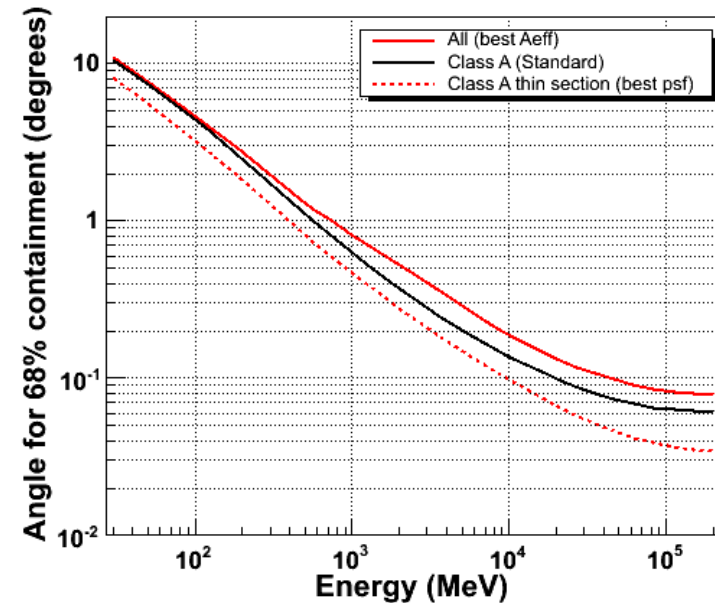


Excellente couverture spectrale de l'émission prompt (7 ordres de grandeur en énergie !!)

Performances du LAT

	LAT	EGRET
Energy range	20 MeV to >300 GeV	20 MeV – 30 GeV
Energy resolution (on axis, 100 MeV – 10 GeV)	<15%	10%
Peak effective area	~ 8000 cm ²	1500 cm ²
Angular resolution (single photon, 10 GeV)	0.15°	0.54°
Field of view	~2.4 sr (@ 1 GeV)	0.4 sr
Deadtime per event	27 us	100 ms

Angular Resolution vs. True Energy at Normal Incidence



- Capacités améliorées pour l'observation des sursauts

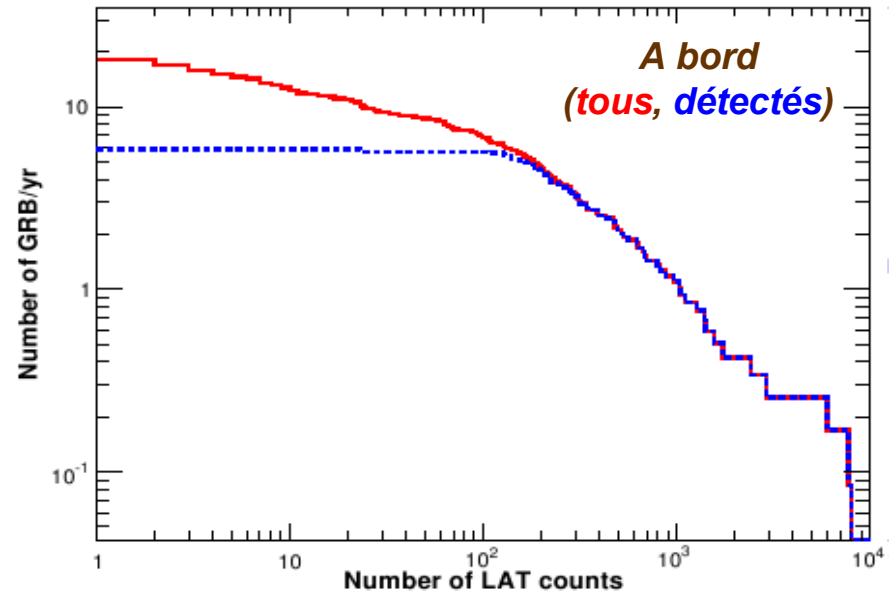
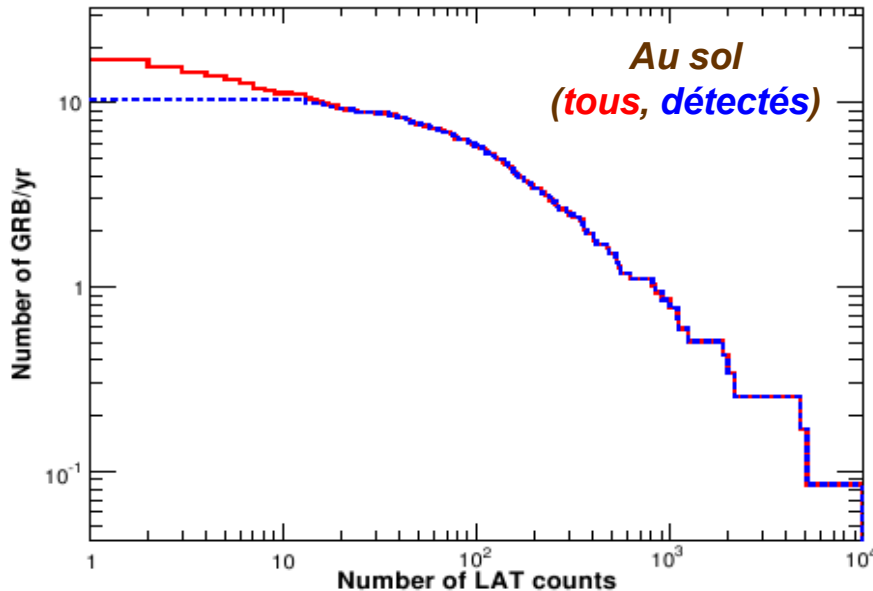
- Mode d'observation efficace (ciel non occulté)
- Grand champ de vue
- Faible temps mort (variabilité sondée jusqu'à la μ s)
 - Possibilité d'étudier les **sursauts courts**
- Grande surface de collection
- Bonne résolution angulaire
- Couverture en énergie plus grande

Beaucoup de GRB

Plus de photons pour chaque GRB

Bonne localisation des GRB

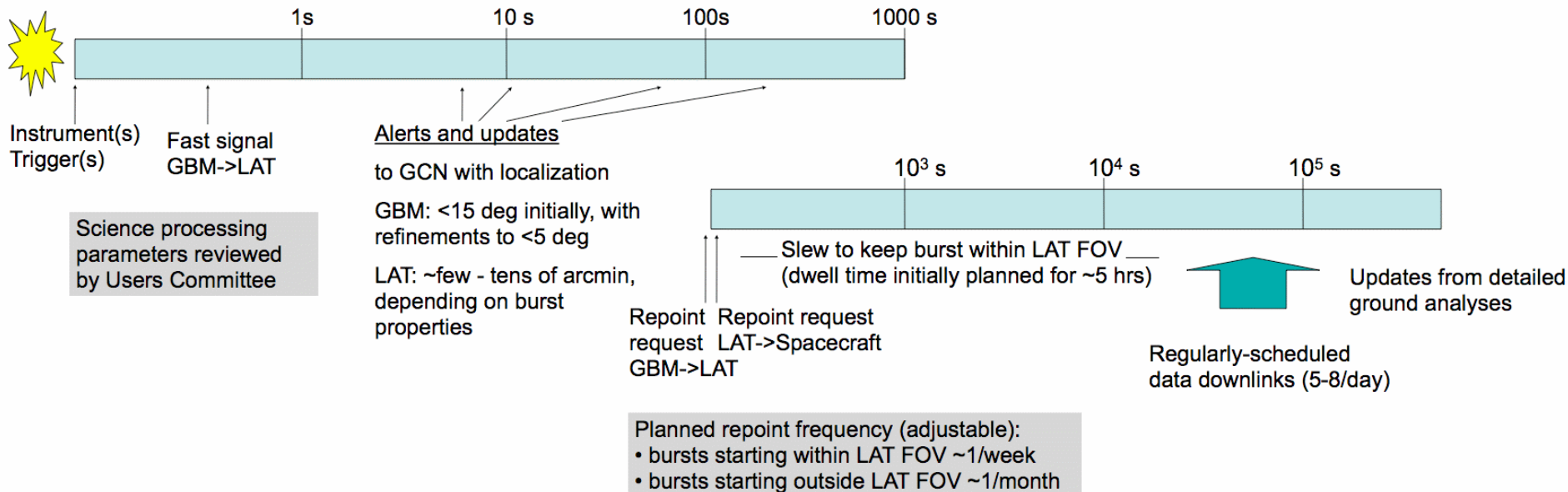
Nombre attendu de sursauts dans le LAT



- Nombre prédit de sursauts détectés par le LAT par an en fonction du nombre de photons
 - 12 détections prédites en 12 mois contre 9 réelles (voir plus loin)
 - Simulation basée sur l'extrapolation à haute énergie des mesures de BATSE...
 - Meilleure sensibilité au sol qu'à bord (reconstruction de traces dans le TKR, efficacité, résolution angulaire et rejet du fond moins sophistiqués)

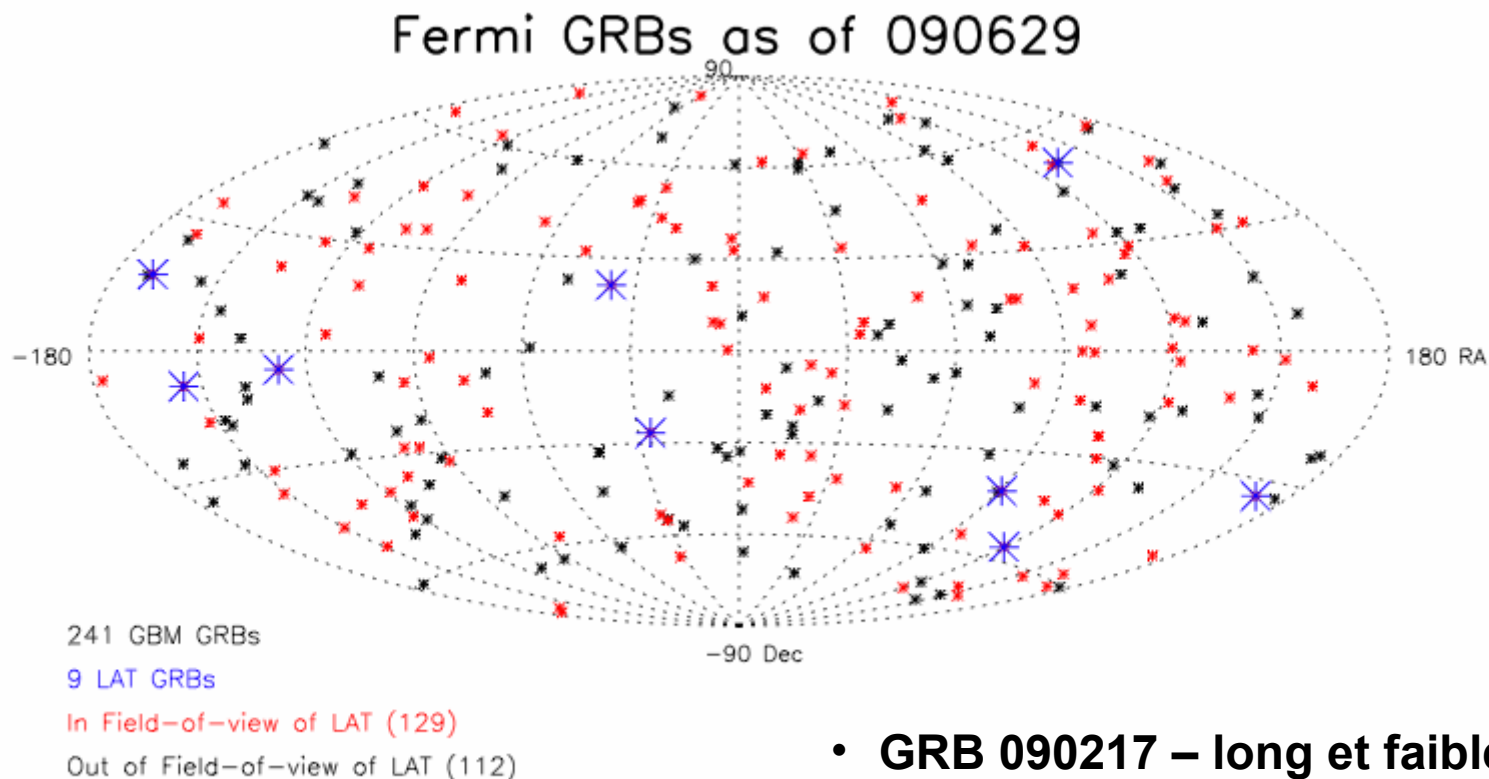
Alertes et notices GCN

Typical GLAST GRB Timeline



- **Traitement des données à bord et alertes GCN (“GRB Coordinate Network”)**
 - ~10-15 s du trigger au GCN avec le système TDRSS (Tracking and Data Relay Satellite System)
 - Localisation GBM (<15° initialement en moins de 2 s), intensité (coups), dureté, classification
 - Localisation LAT, intensité (coups), dureté
- **Traitement des données (émission prompt) au sol (GBM en ~15 min, LAT en ~5 à 12 h)**
 - Localisation GBM affinée (<5°), courbes de lumière GBM préliminaire
 - Localisation LAT affinée, flux et spectre à haute énergie, résultats de recherche d'afterglow
- **Analyse finale des données (24 à 72 h)**
 - Modèle d'ajustement de spectre, analyse spectrale conjointe GBM-LAT

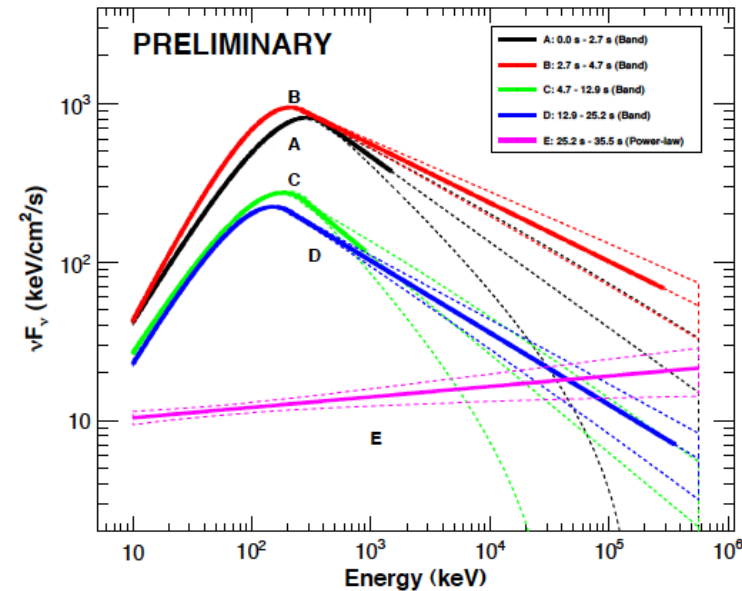
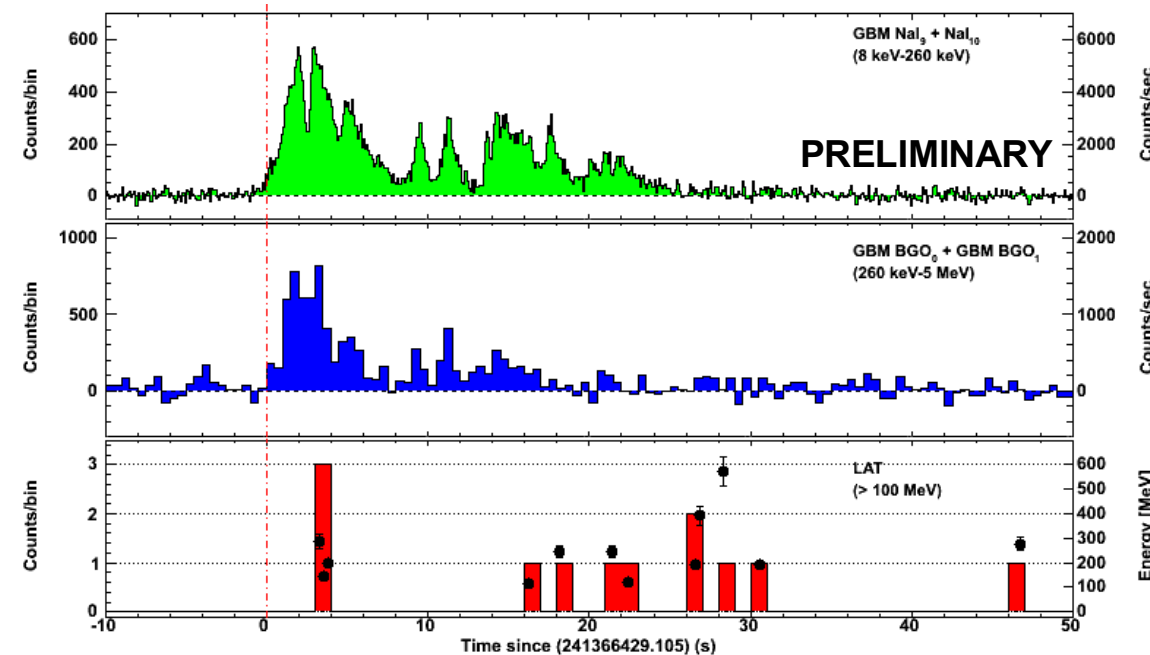
Les sursauts de *Fermi* en date du 29 juin 2009



- GRB 080825C – long et faible
- GRB 080916C – long et intense, $z=4.35$
- GRB 081024B – court et faible
- GRB 081215A – vu de côté

- GRB 090217 – long et faible
- GRB 090323 – **ARR** (émission étendue), $z=3.6$
- GRB 090328 – **ARR** (émission étendue), $z=0.736$
- GRB 090510 – court et intense (**1^{ère} notice GCN du LAT**), $z=0.9$
- GRB 090626 – long et faible

GRB 080825C : le tout premier sursaut du LAT

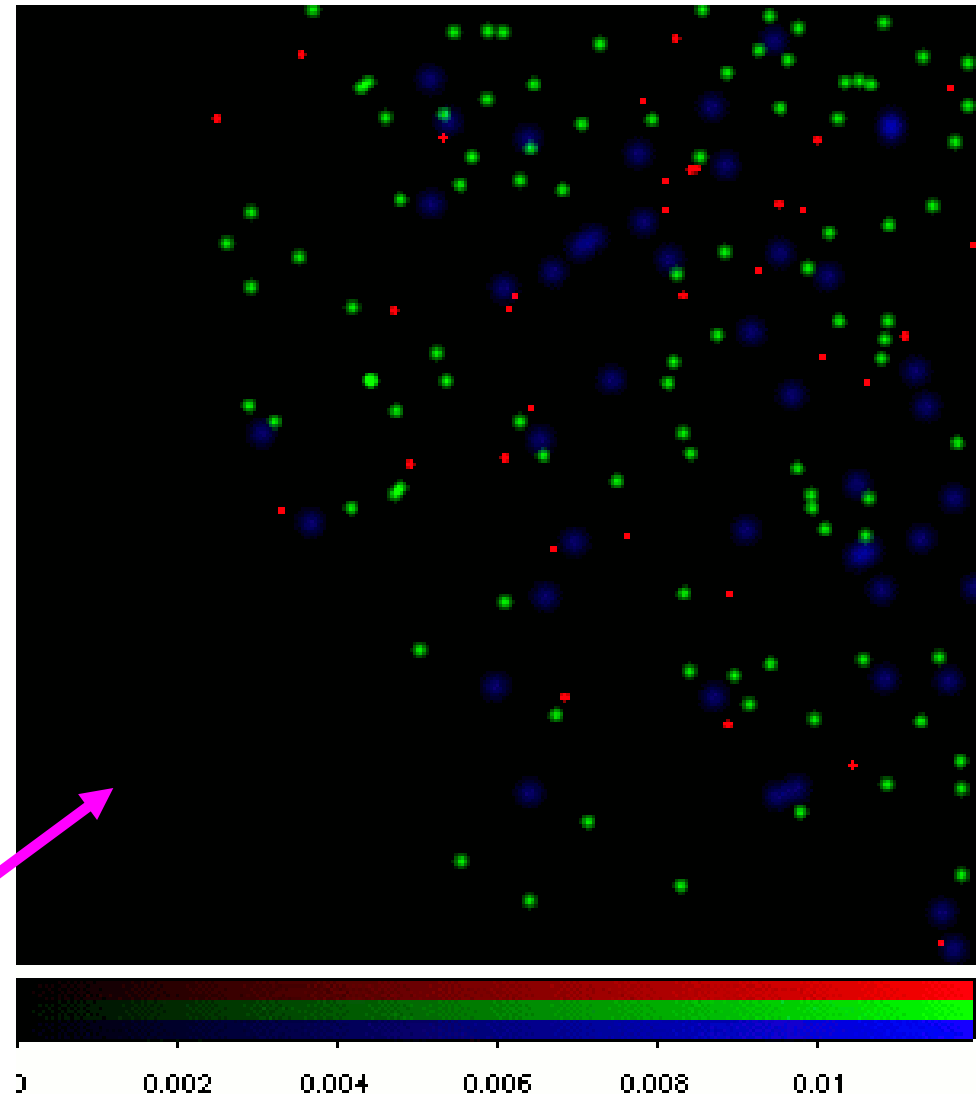


- Pics multiples dans le GBM (les 2 plus brillants <5 s), durée de ~35 s
- Détection par le LAT à **6.4 σ**
 - Premier photon du LAT coïncide avec le 2^{ème} pic du GBM
 - Signe d'une **émission étendue >100 MeV**
 - Photon de plus haute énergie (~570 MeV) détecté alors que le signal est devenu très faible dans le GBM
- Evolution spectrale mou-dur-mou (**spectre de Band**) ?

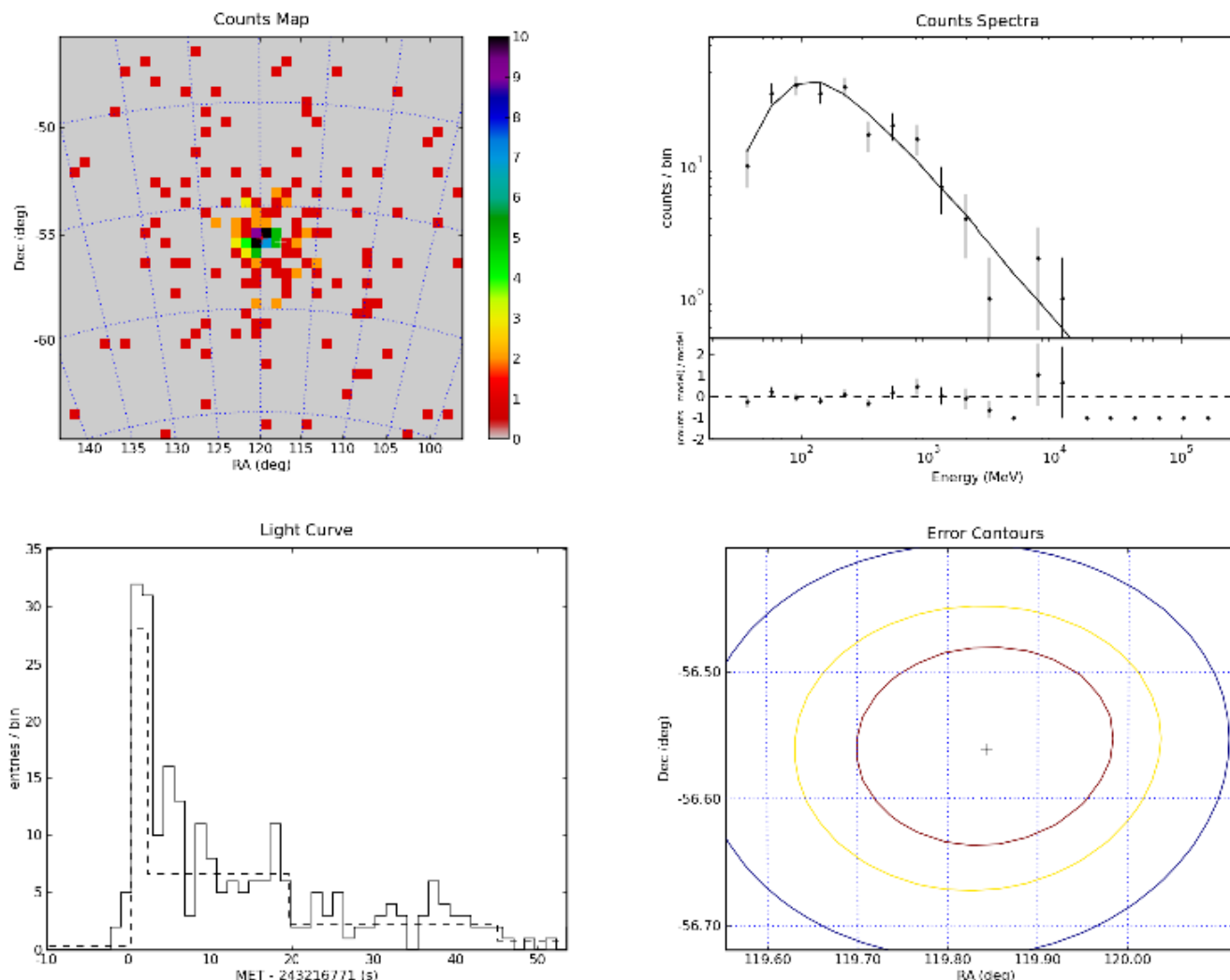
GRB 080916C : le sursaut le plus intense

- Région de $\pm 30^\circ$ autour de GRB 080916C
 - Observé à $\sim 50^\circ$ hors axe
- RGB = < 100 MeV,
 100 MeV - 1 GeV,
 > 1 GeV
- Début à $T_0 - 200$ s
- 100 s d'exposition par image
- 5 s entre 2 images

Zone noire = en dehors du champ de vue

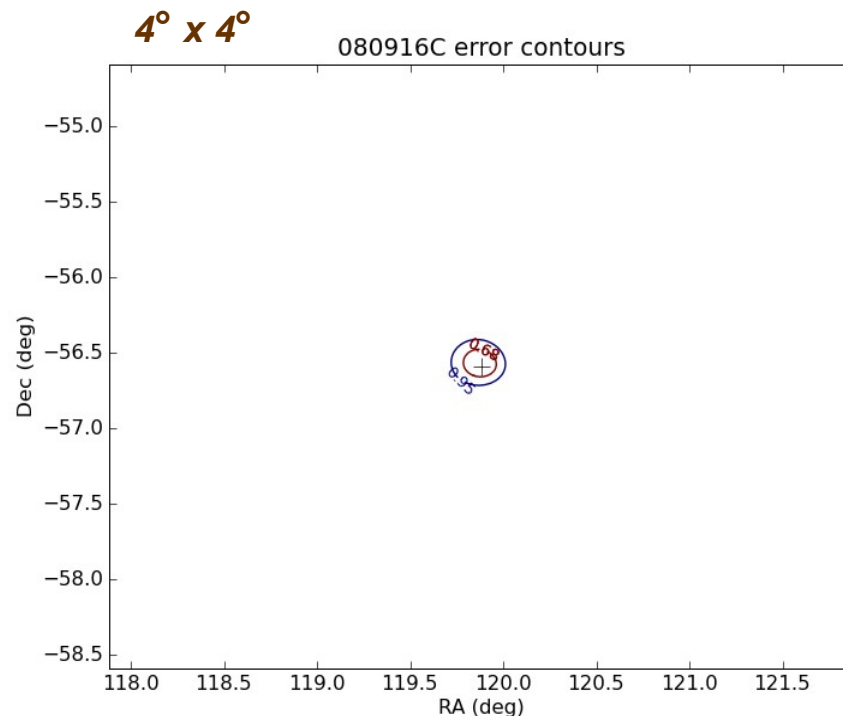
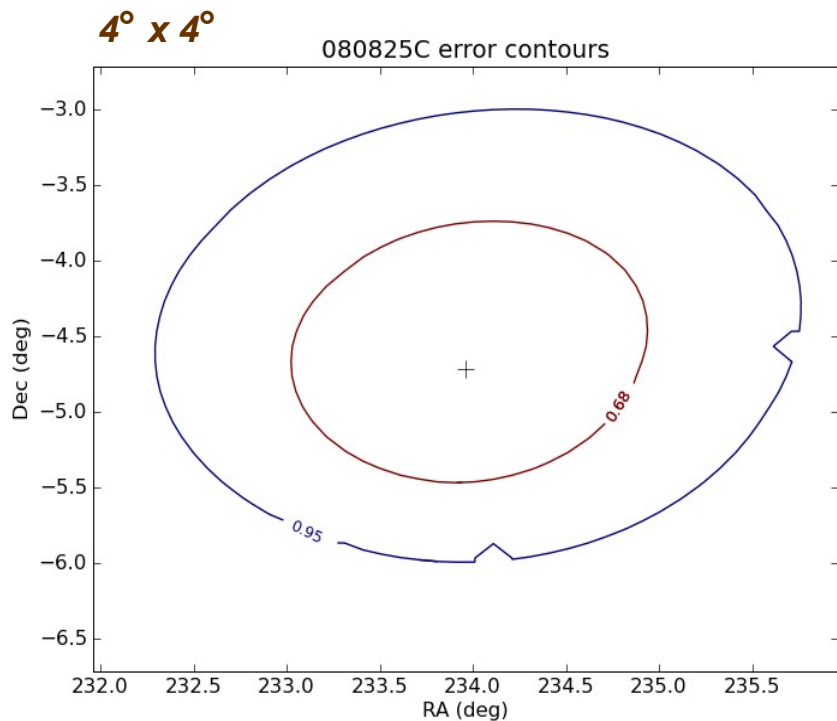


“Automated Science Processing”



- Lancé automatiquement par le “pipeline” de traitement des données sur **chaque alerte reçue du GCN**
- Résultats disponibles en temps réel aux **“Burst Advocates”**

Précision de localisation avec le LAT (1/2)



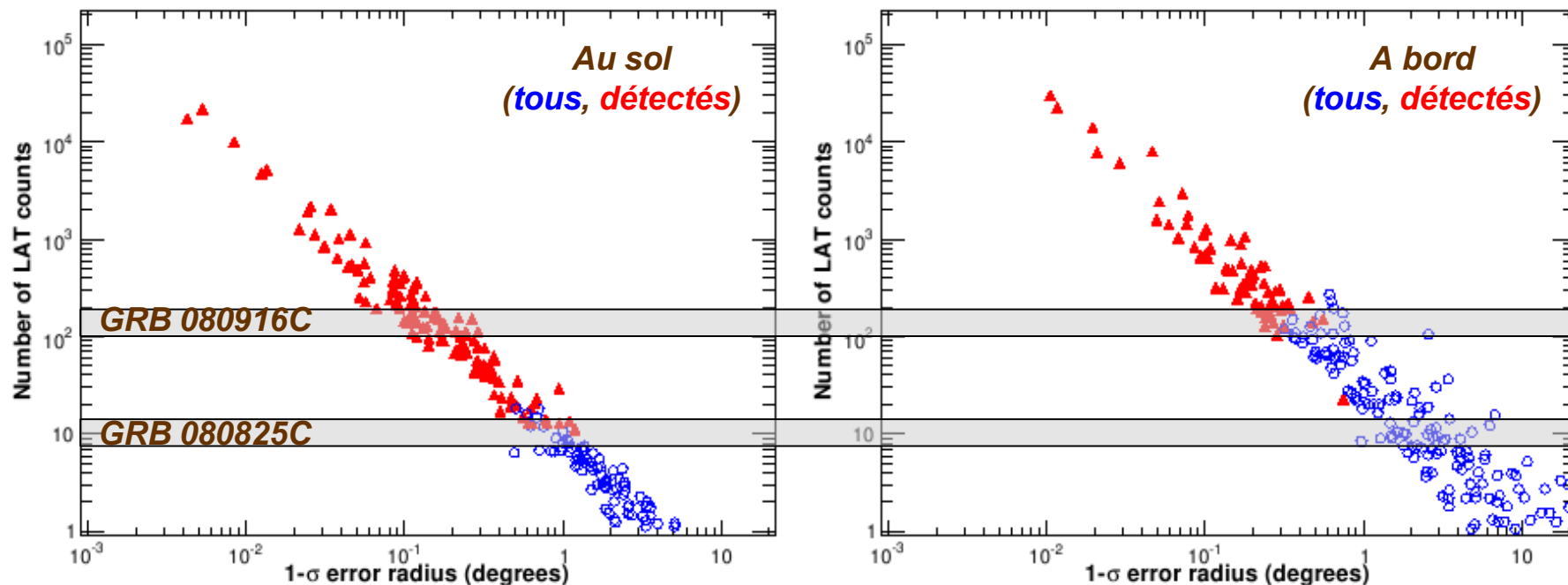
• GRB 080825C

- ~10 evts >100 MeV, 60° hors axe
- GBM : (232.2°, -4.9°) ± 1.5° (68%)
- **LAT** : (233.96°, -4.72°) ± **0.95°** (68%)

• GRB 080916C

- 145 evts >100 MeV, 52° hors axe
- GBM : (121.8°, -61.3°) ± 1.0° (68%)
- **LAT** : (119.88°, -56.59°) ± **0.09°** (68%)

Précision de localisation avec le LAT (2/2)

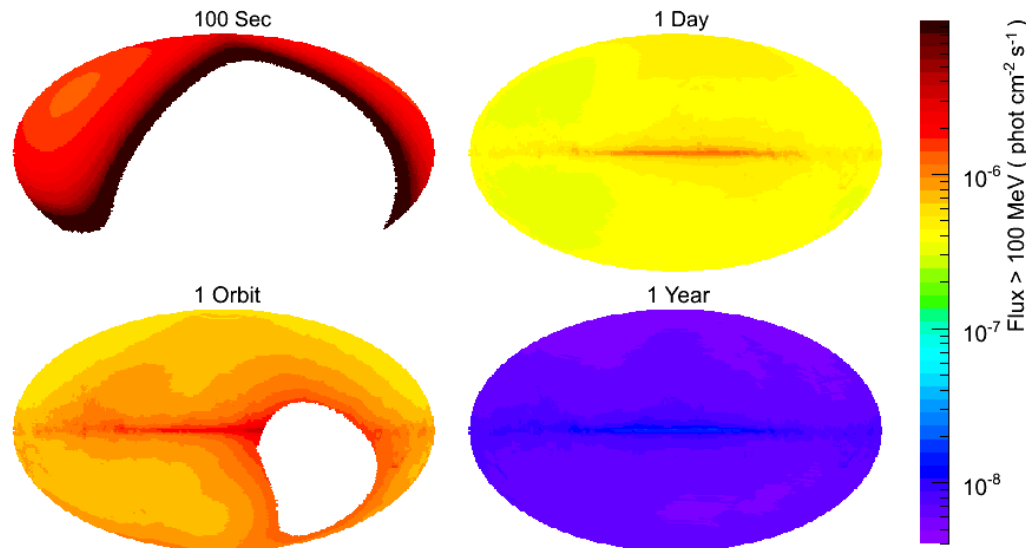


- Simulation sur une “grille” de sursauts
 - Dépend de β , angle hors axe, fluence, durée
 - Résolution angulaire du LAT dépend beaucoup de l'énergie
 - Un unique photon $>1\text{ GeV}$ peut faire une grande différence
 - Seuil de détection et erreur de localisation plus faibles au sol

“Autonomous Repoint Recommendation”

- Mode principal = **cartographie du ciel**

- Ciel complet
toutes les 2 orbites (3 h)
- Exposition uniforme :
chaque zone du ciel est vue
durant **~30 min** toutes les 2 orbites

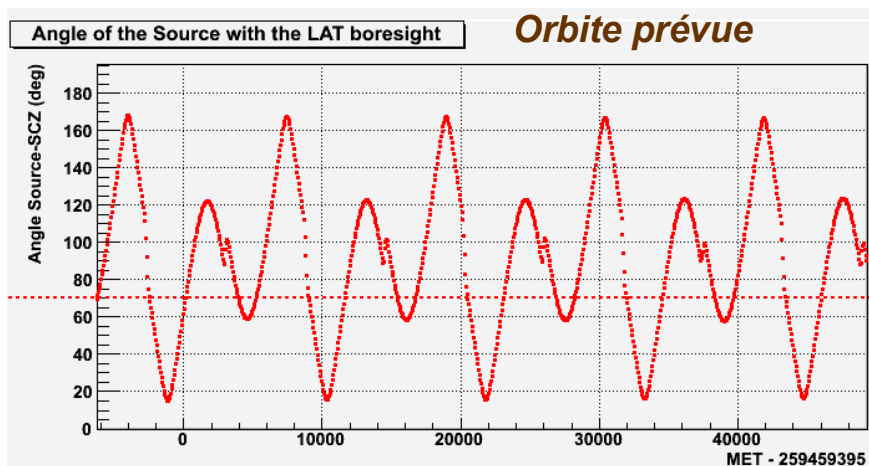
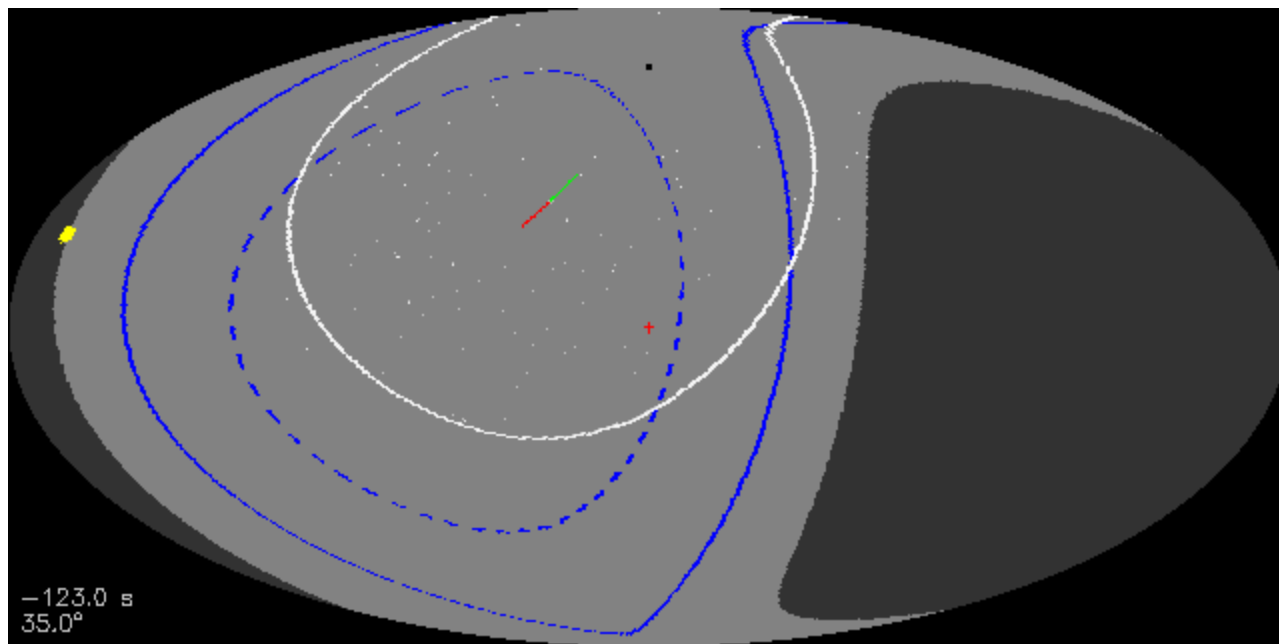


- Le satellite peut **repointer** (“Autonomous Repoint Recommendation” - ARR) pour la **recherche d’émission rémanente de sursauts brillants** avec le LAT

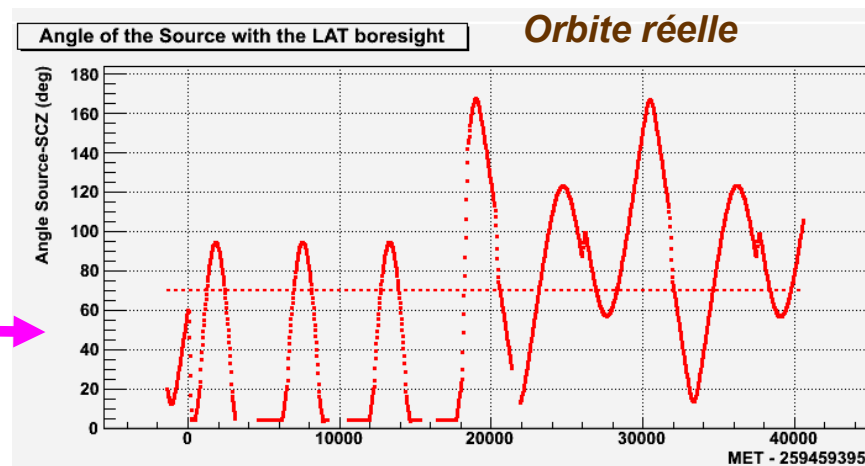
- Depuis le 8 octobre 2008 à 14:11:08
- ARR déclenchée soit par le trigger GRB du LAT à bord, soit par un trigger GBM intense (le GBM transmet au LAT, qui transmet au satellite)
- Sursaut dans le champ de vue du LAT ou en dehors (seuils différents)
- **Cible suivie durant 5 h** (nominalement) tant qu'elle est au-dessus de l'horizon à plus de 20° (“Earth avoidance angle”), sinon orbite à 50° de l'horizon jusqu'à ce que la cible soit de nouveau visible
- Conséquence (faible) sur la prise de données en mode cartographique

GRB 090323 et ARR

- Pointé du LAT (coordonnées célestes) de ~ -120 s à ~ 6000 s
 - Croix rouge = GRB 090323
 - Point jaune = soleil
 - Région sombre = occultée par la Terre ($\theta_z > 113^\circ$)
 - Cercle blanc = champ de vue du LAT ($\pm 66^\circ$)
 - Cercles bleus = $20^\circ / 50^\circ$ au-dessus de l'horizon
 - Points blancs : evts



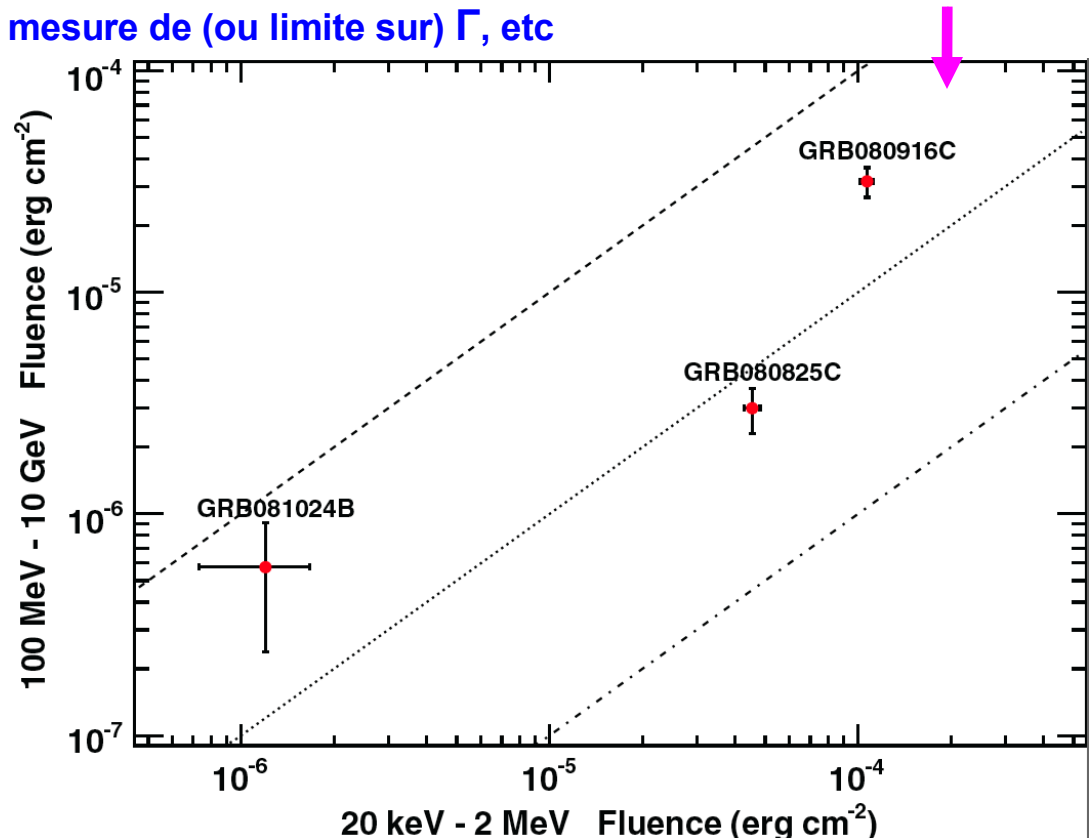
ARR



Conclusions

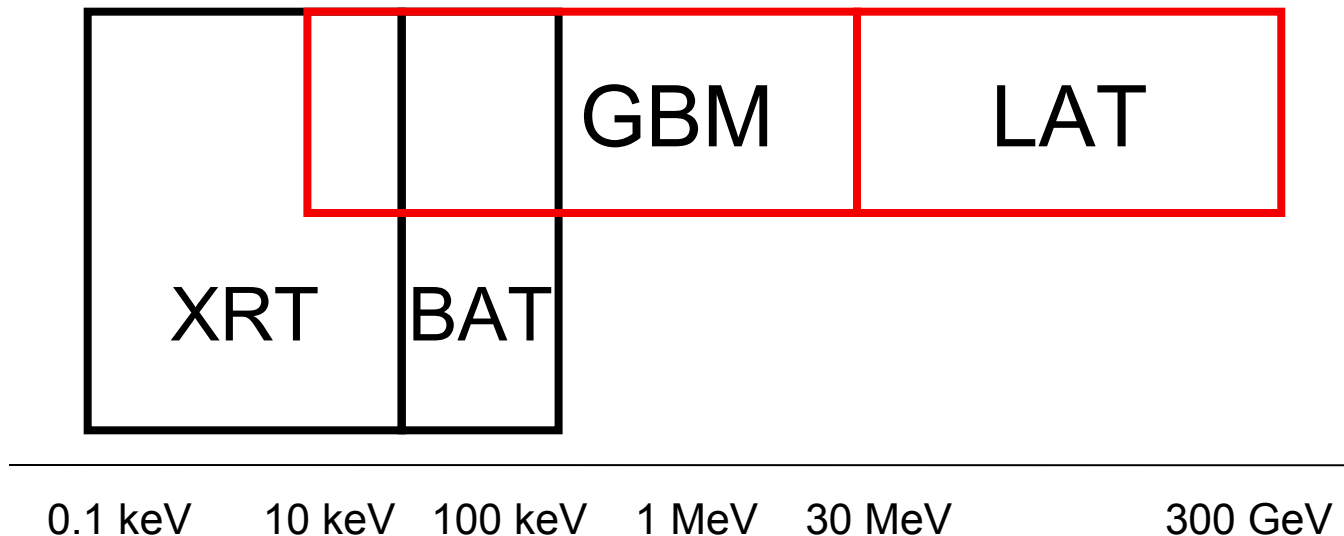
- Après un an d'opération en orbite, **le LAT a détecté 9 sursauts** (parmi ~250 du GBM)
 - Le nombre de sursauts connus >100 MeV est doublé
 - Emission à haute énergie observée à la fois pour les **sursauts longs et courts**
 - Un peu moins que prévu : spectres proches d'une **fonction de Band à haute énergie ?**
- Comme de toute nouvelle mission spatiale, de nombreuses avancées sont attendues de *Fermi* pour la compréhension des sursauts gamma
 - **Région(s) et mécanismes d'émission** prompt, (début de l') **émission rémanente**, **budget énergétique**, effets d'opacité et mesure de (ou limite sur) Γ , etc

**Plus de résultats
dans la présentation
de V. Pelassa !**



Backup slides

Fermi synergy with Swift

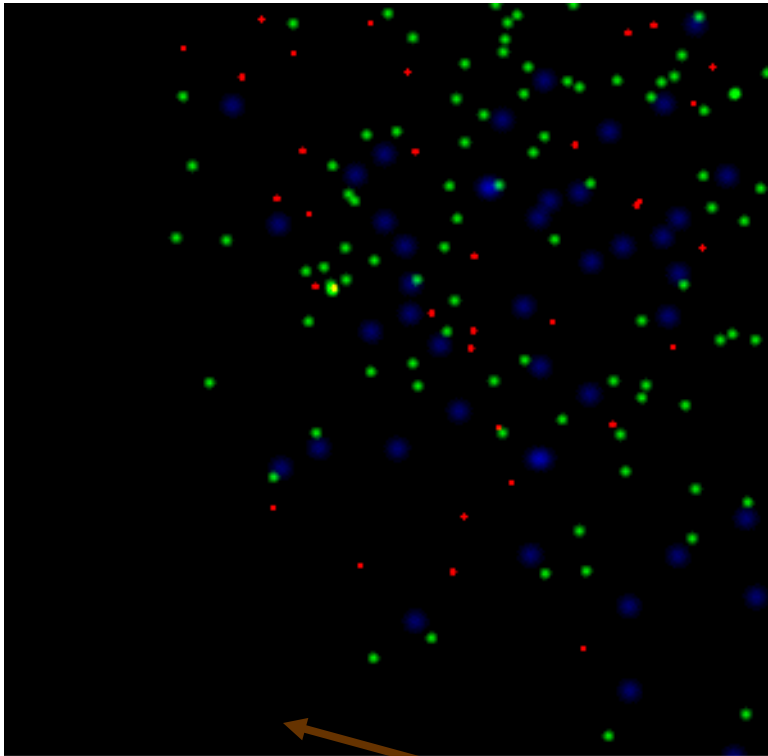


- **Swift and GLAST will measure GRB spectrum with a broad coverage, from 0.1 keV to hundreds of GeV (>9 decades!)**
- **Assuming a Swift GRB detection rate of 100 GRBs / yr, if the GLAST and Swift pointing directions are uncorrelated:**
 - **~20 Swift-detected GRBs / yr will occur within the LAT FoV**
 - **~25 GBM-detected GRBs / yr will be detected by Swift**
- ⇒ GBM will dramatically improve the prompt energy spectral observations (up to 30 MeV) for 1/4 of Swift GRBs
- **If the observing schedule is optimized, the overlap of bursts can be doubled**
- **LAT detections and z measurements**
 - **GRB 081024B & GRB 090217: no z, XRT observations but no confirmation of afterglow detection**
 - **GRB 080825C and GRB 081215A: no z but no XRT observation**
 - **GRB 080916C, GRB 090323 / 28 and GRB 090510: have a z, observed and confirmed by XRT**

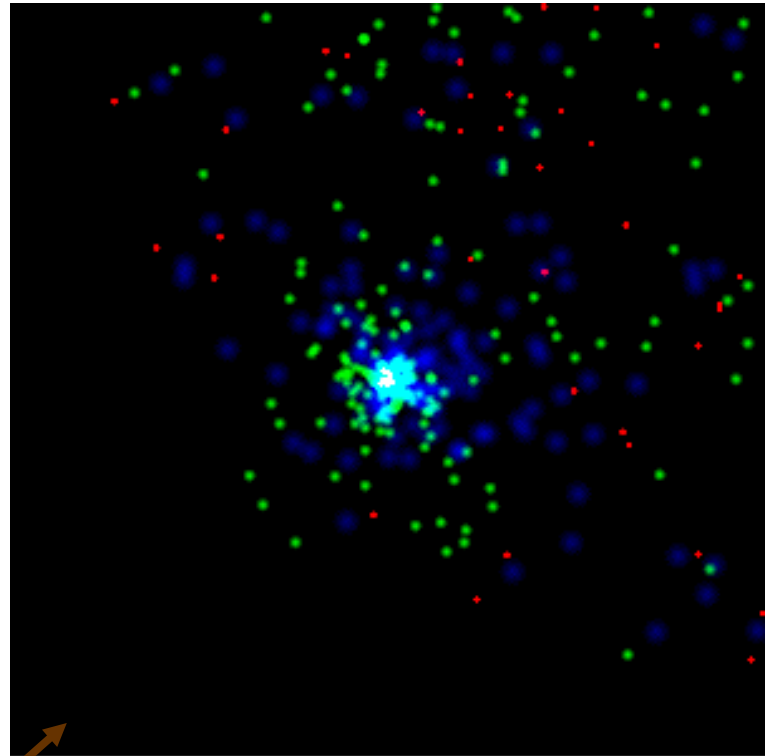
LAT skymap

- ± 30 deg region around GRB 080916C
 - GRB at 48° from the LAT boresight at T_0
- RGB = **<100 MeV**, **100 MeV - 1 GeV**, **>1 GeV**

Before the burst ($T_0 - 100$ s to T_0)



During the burst (T_0 to $T_0 + 100$ s)



Black region = out of FoV

GRB 080916C

At 00:12:45 UT (T_0) on 16 September 2008:

The GBM flight software triggered on a count rate increase in NaI detectors 3 and 4 caused by GRB 080916C
Large signal recorded in 9 NaI and 1 BGO detectors
LAT onboard GRB search not enabled

GBM on-ground position [GCN 8245 – A. Goldstein]

RA = 121.8°, Dec = -61.3° ($\pm 1^\circ$ or at 68% C.L., syst. 2°-3°)

T_{90} = 66 s (50-300 keV), several peaks

LAT on-ground position [GCN 8246 – H. Tajima]

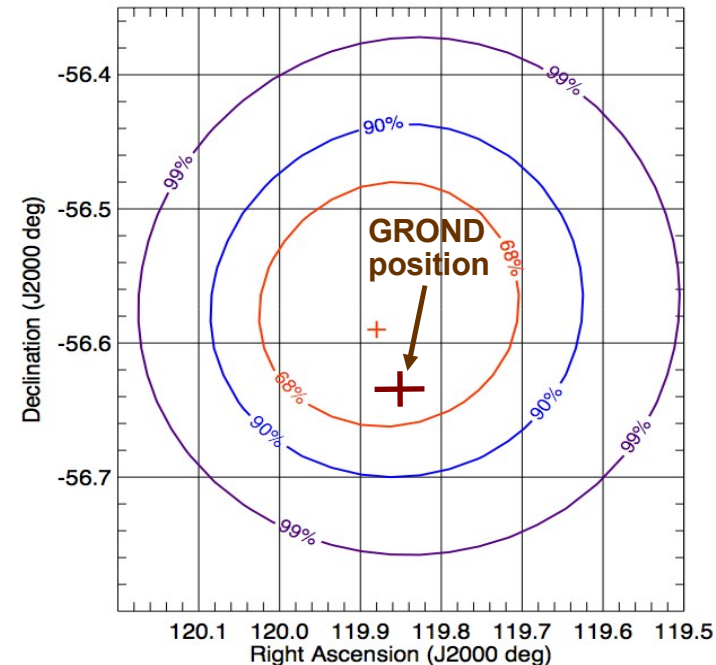
On-ground Automated Science Processing triggered
ROI of 20 deg around GBM location, more than 10 photons > 1 GeV

RA = 119.88°, Dec = -56.59°

Statistical error = 0.09° (0.13°) at 68% (90%) C.L.

Systematic error < 0.1°

Consistent with GBM location



GROND optical follow up [GCN 8257, 8272]

Faint (21.7 mag at T_0+32 h) and fading ($T_0+3.3$ d) source

RA = 119.8472°, Dec = -56.6383° ($\pm 0.5''$ at 68% C.L.)

Photometric redshift of $z=4.35 \pm 0.15$

Swift/XRT follow up after T_0+17 h [GCN 8261, Report 166.1]

RA = 119.8468°, Dec = -56.6380° ($\pm 1.9''$ at 90% C.L.)

IPN triangulation [GCN 8251]

