

Les Sursauts Gamma

Une histoire à suspense:

- 1967: découverte par les satellites espions VELA
- quinze ans d'incertitude sur l'échelle de distance

Des objets extraordinaires:

« les plus violentes explosions de l'Univers »

Les sursauts gamma étudiés pour eux-mêmes

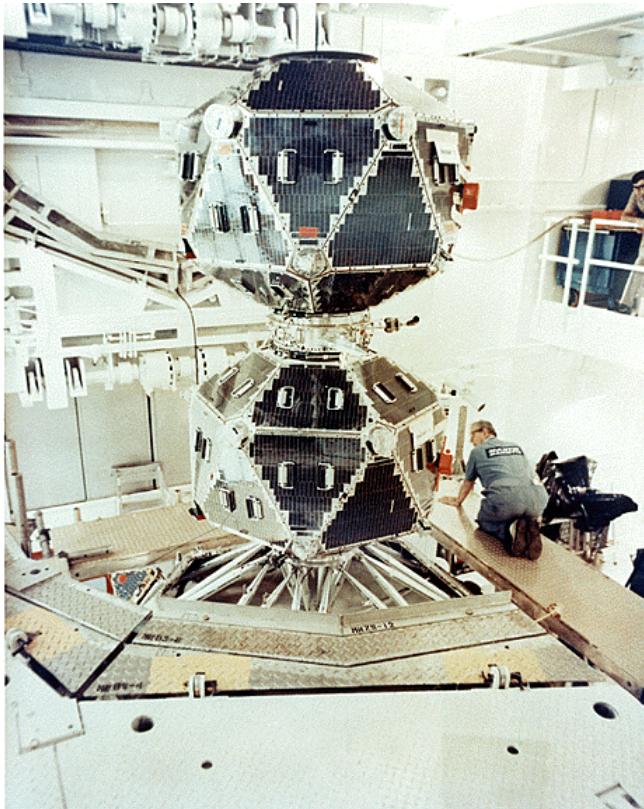
- mécanismes pour la production et l'émission d'énergie

Les sursauts gamma: outils pour la cosmologie

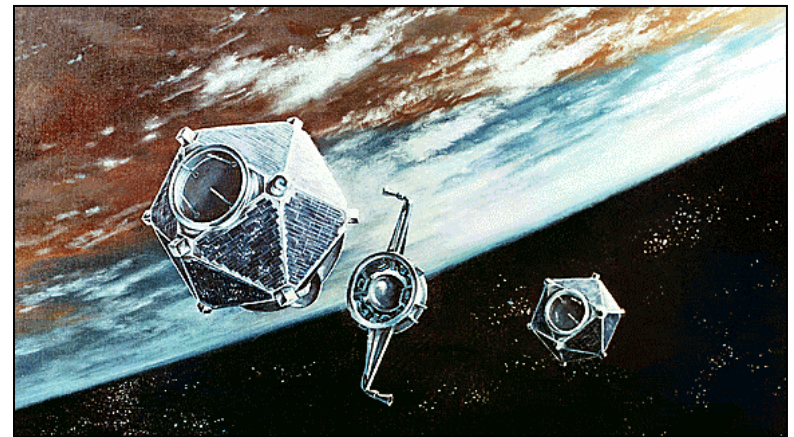
- sursauts à grand z

La mission VELA: détecter les explosions nucléaires soviétiques

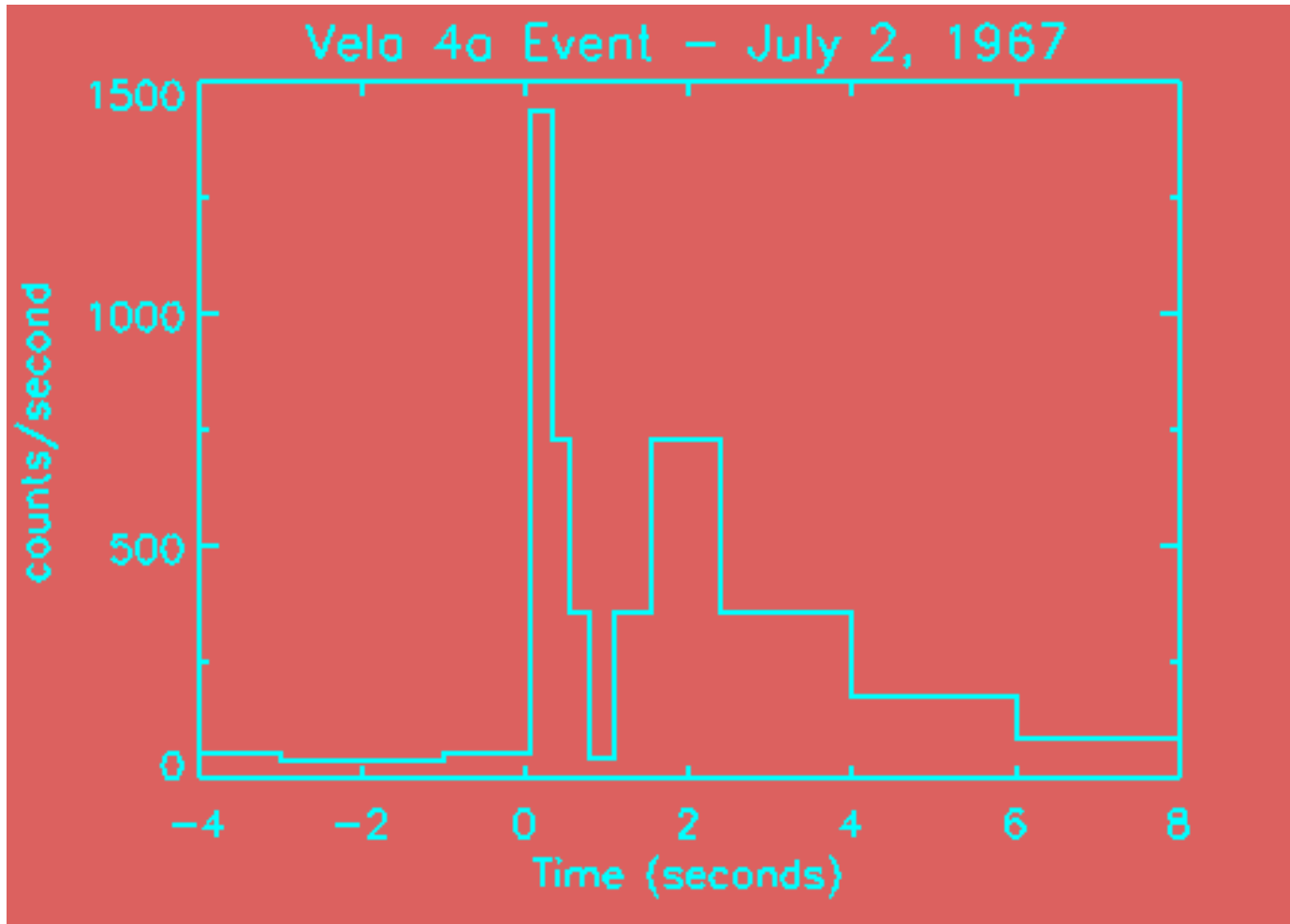
→ Comment détecter une explosion nucléaire ?
ondes sismiques, rayons gamma



Le projet « VELA »
(3 paires de satellites
lancés en 1963, 1964 et 1965)



Le premier sursaut gamma



La première publication

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

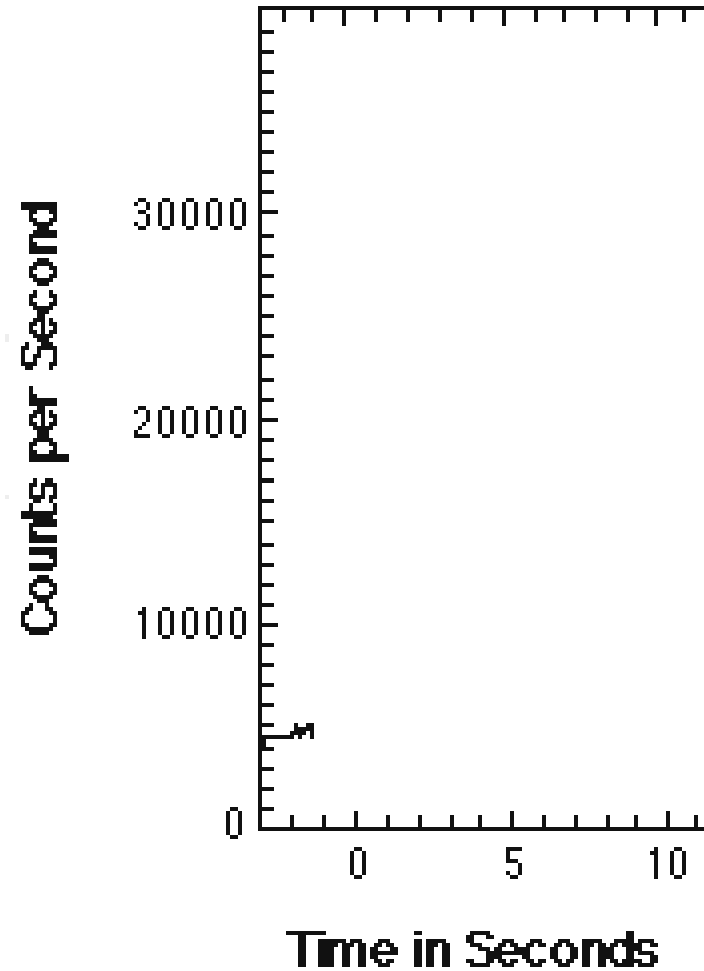
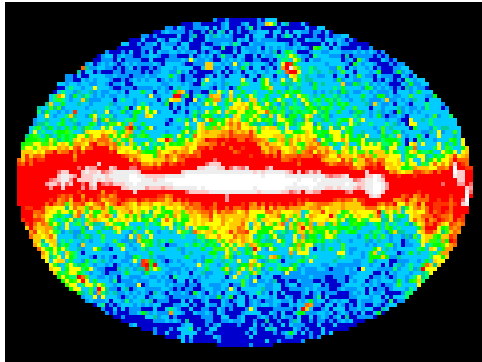
Received 1973 March 16; revised 1973 April 2

ABSTRACT

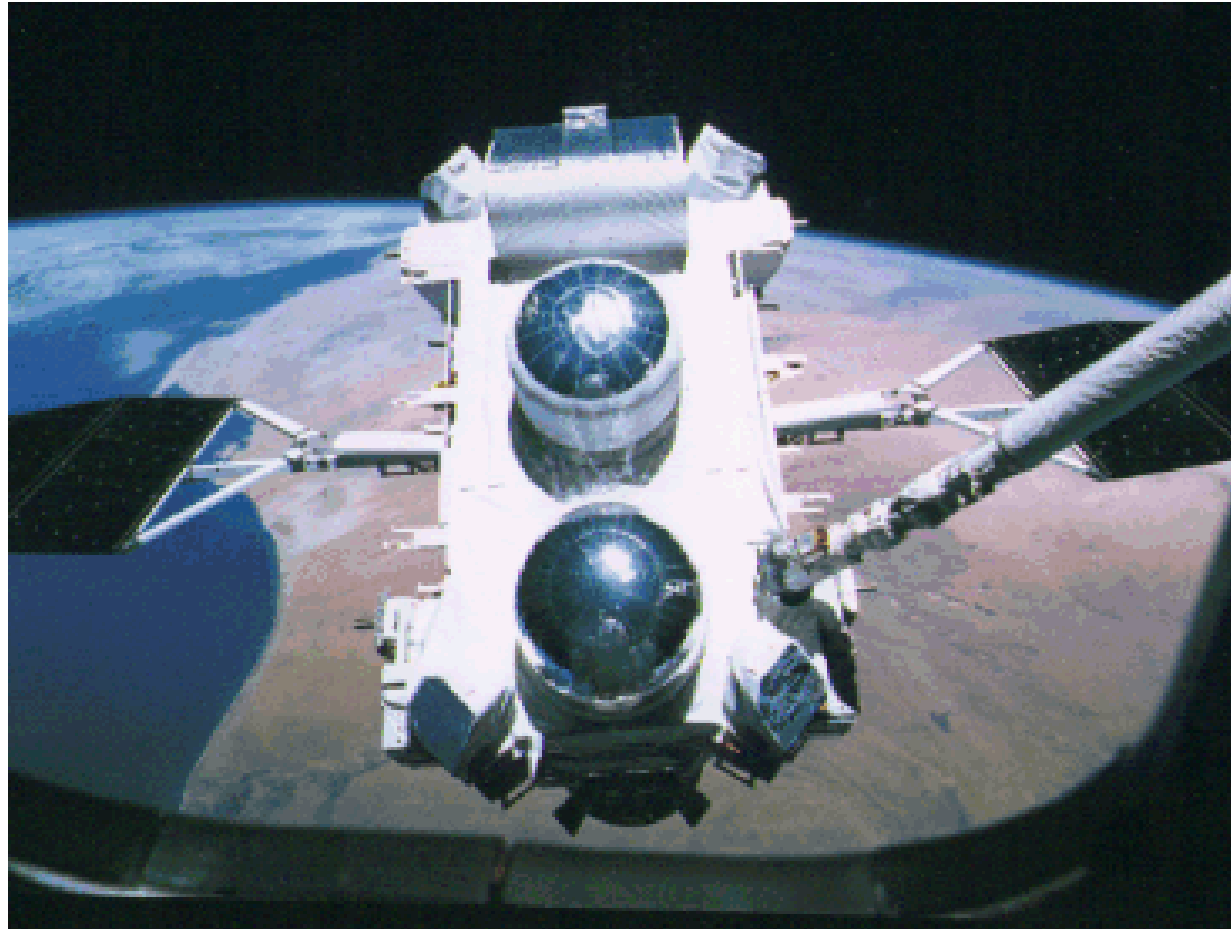
Sixteen short bursts of photons in the energy range 0.2–1.5 MeV have been observed between 1969 July and 1972 July using widely separated spacecraft. Burst durations ranged from less than 0.1 s to ~ 30 s, and time-integrated flux densities from $\sim 10^{-5}$ ergs cm^{-2} to $\sim 2 \times 10^{-4}$ ergs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

Les sursauts peuvent être très brillants



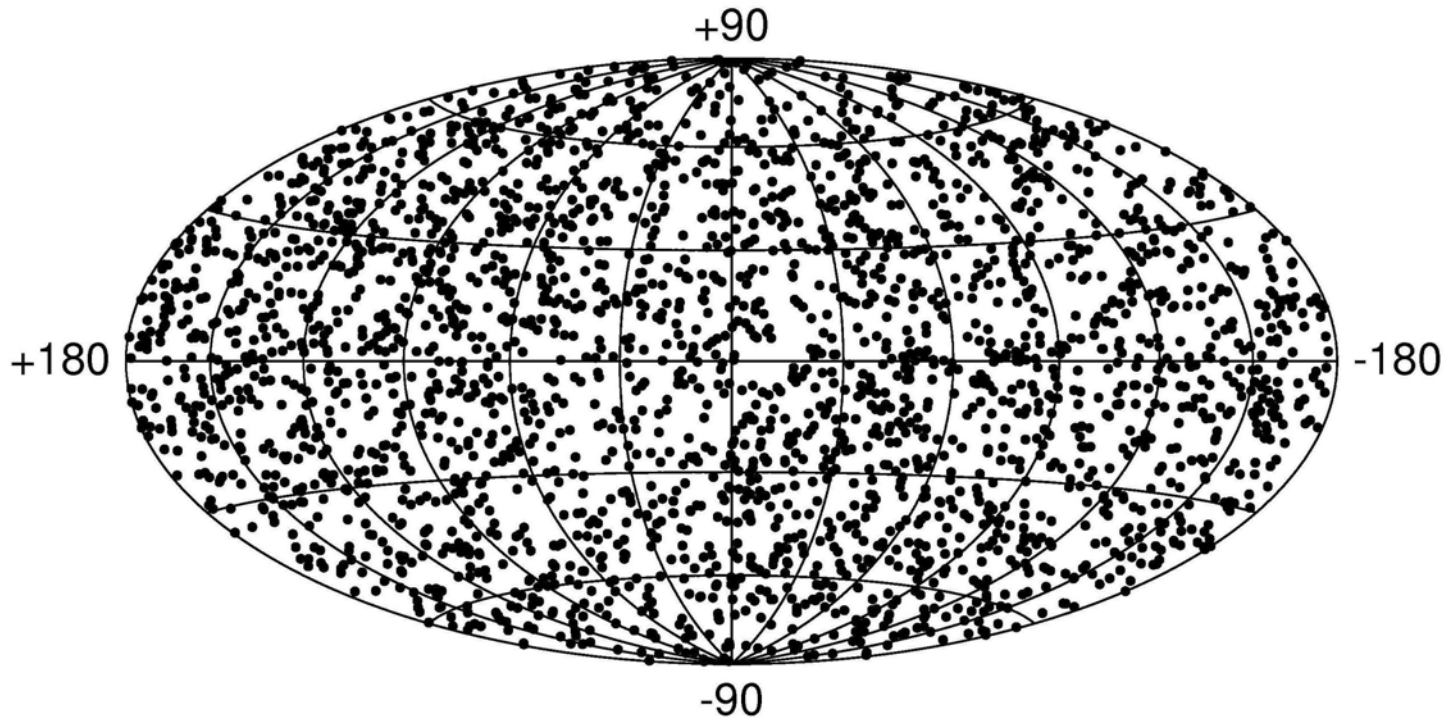
1991 : lancement de Compton GRO



expérience BATSE : un gain de près de 100 en sensibilité

On s'attendait à trouver les sursauts concentrés dans le plan du disque galactique. On a finalement obtenu cela :

2704 BATSE Gamma-Ray Bursts

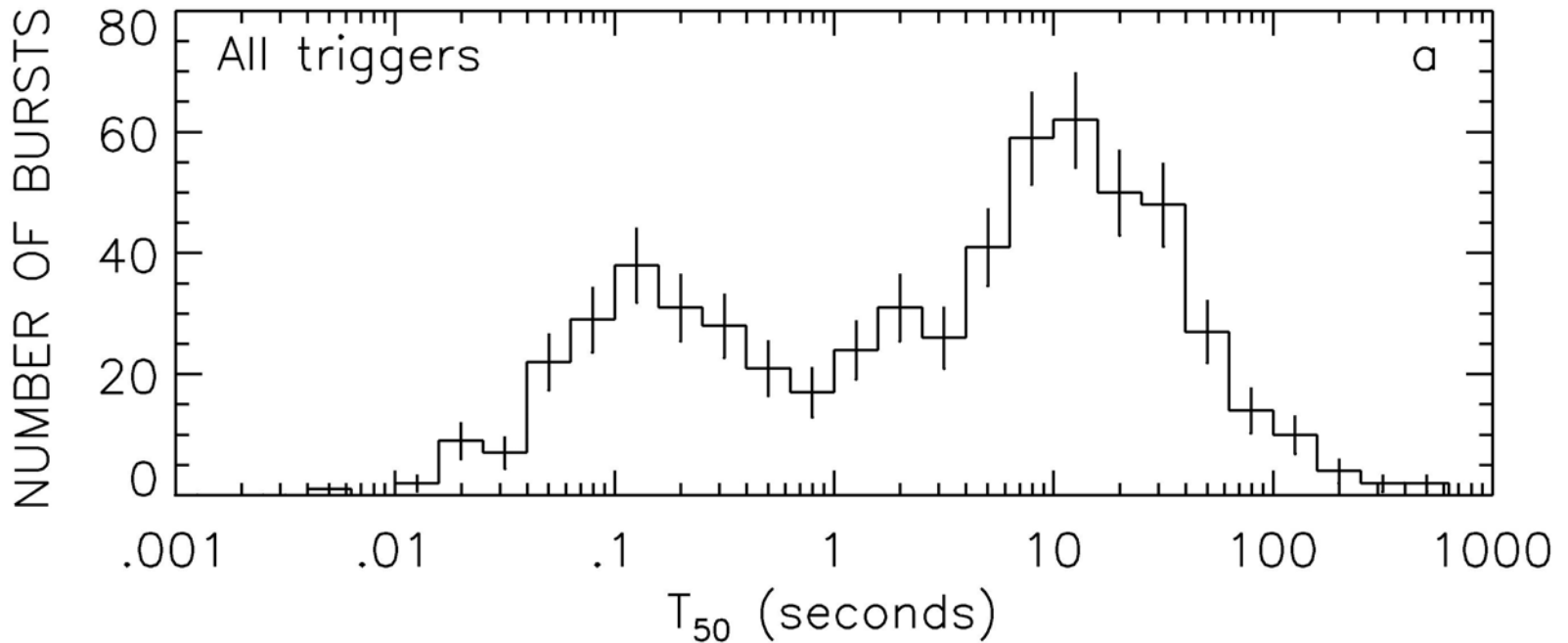


Première indication en faveur d'une échelle de distance cosmologique

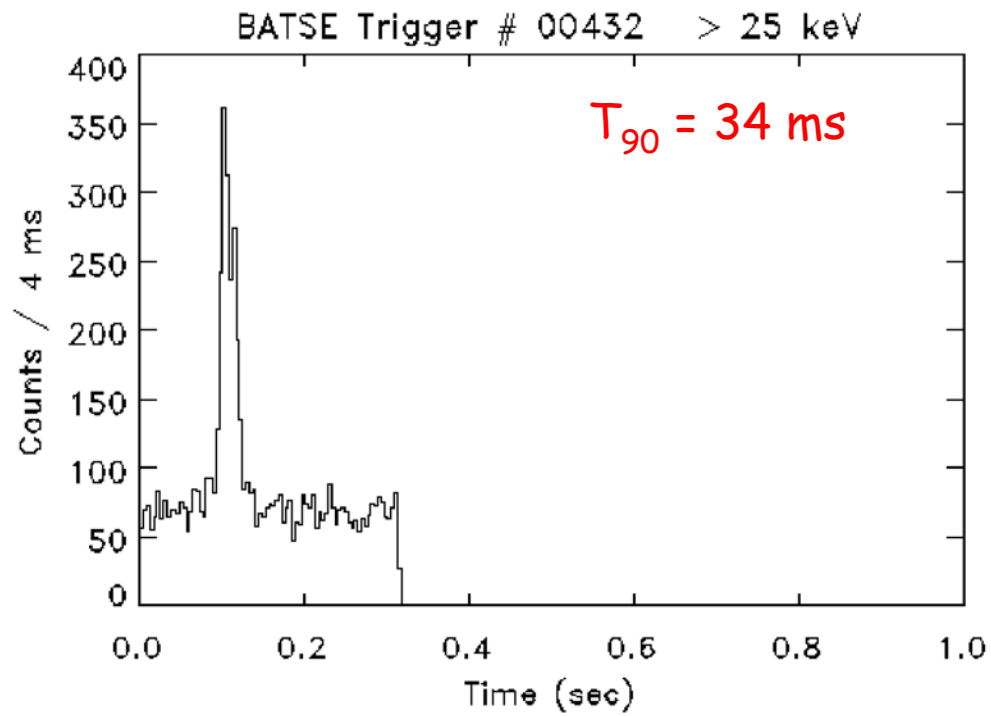
Le bilan des observations

Propriétés temporelles

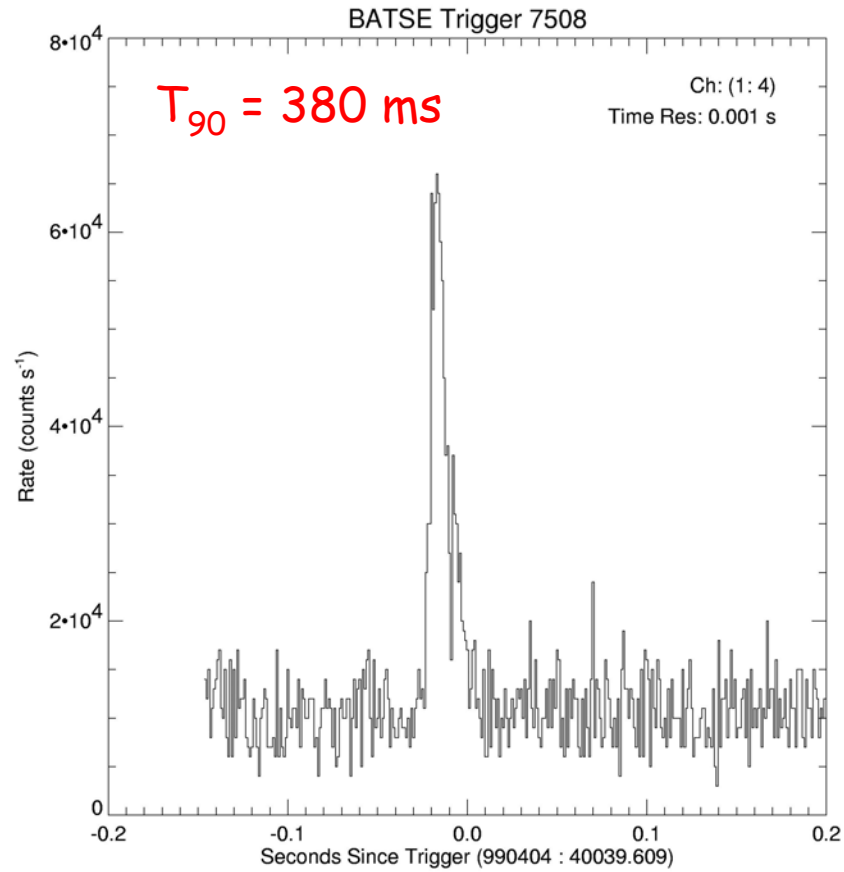
Des sursauts courts et des sursauts longs



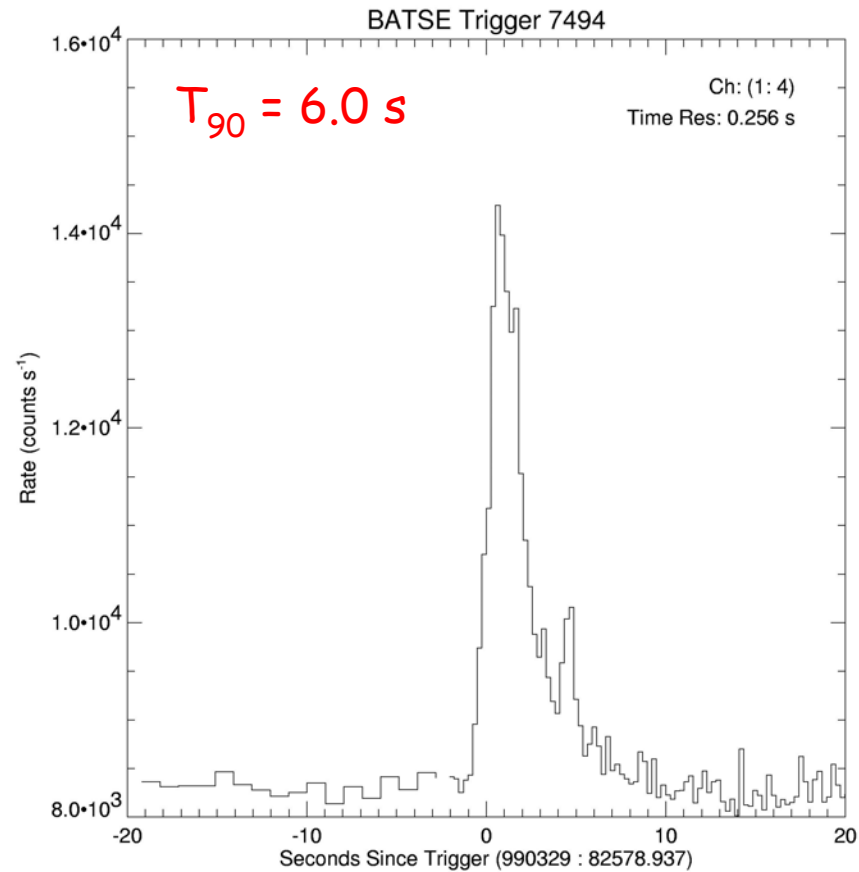
Des profils temporels très variés



Des profils temporels très variés

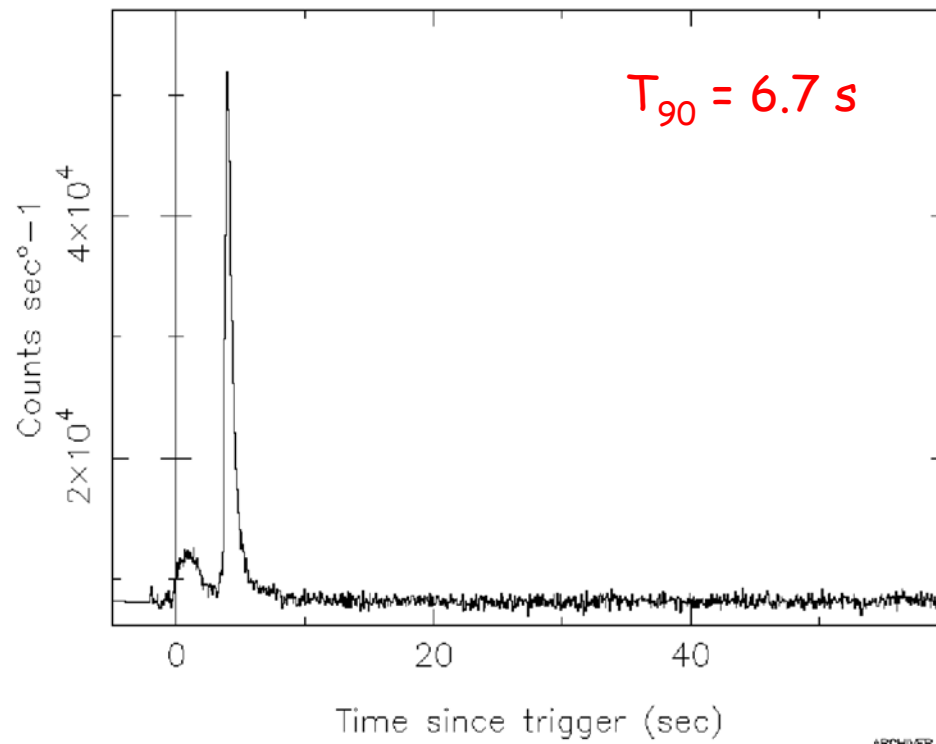


Des profils temporels très variés



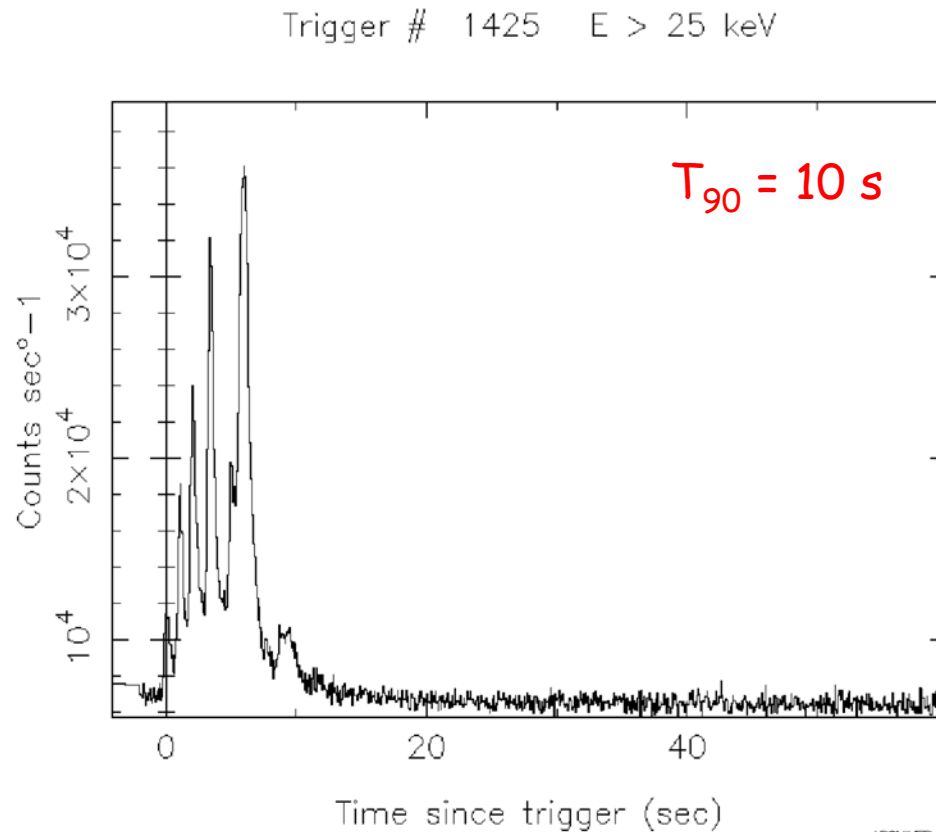
Des profils temporels très variés

Trigger # 999 E > 25 keV



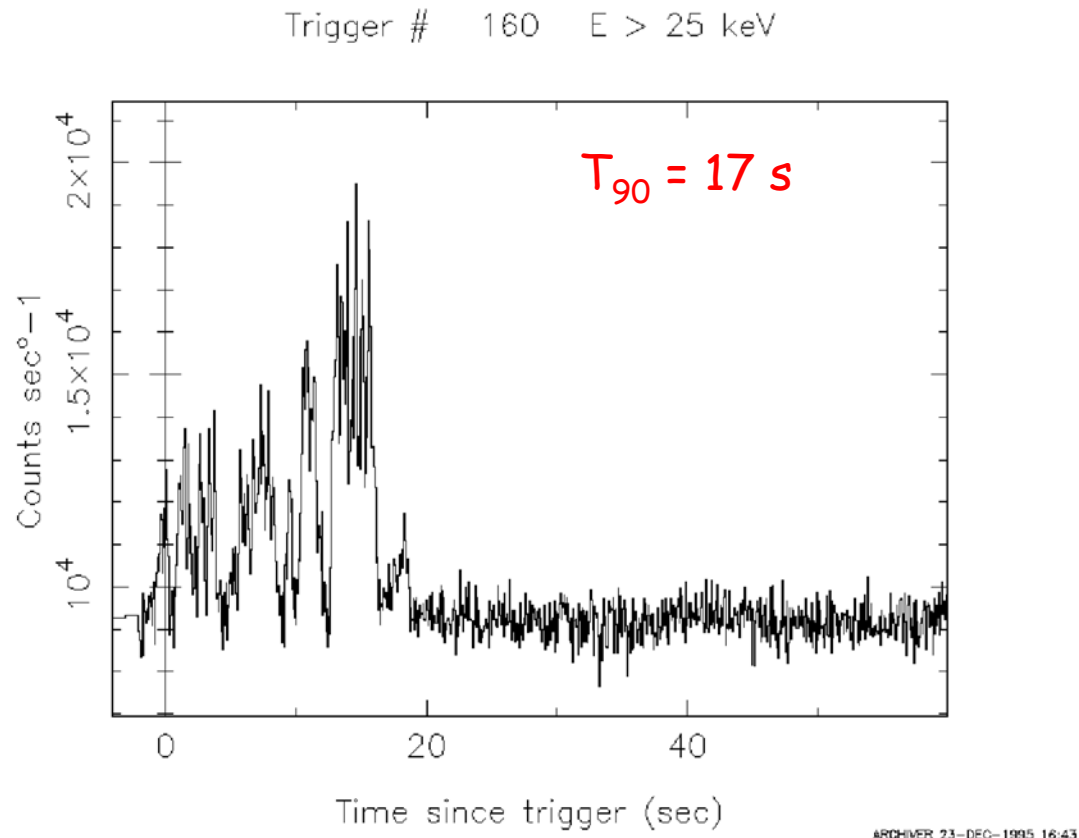
ARCHIVER 24-DEC-1995 01:25

Des profils temporels très variés

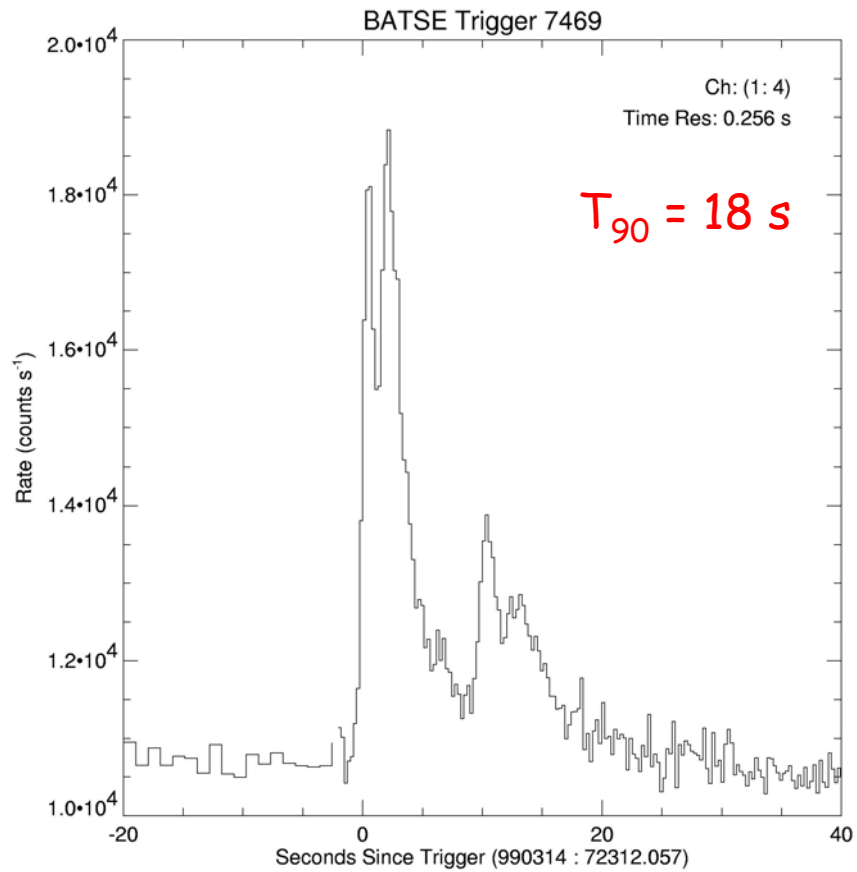


ARCHIVER 24-DEC-1995 06:39

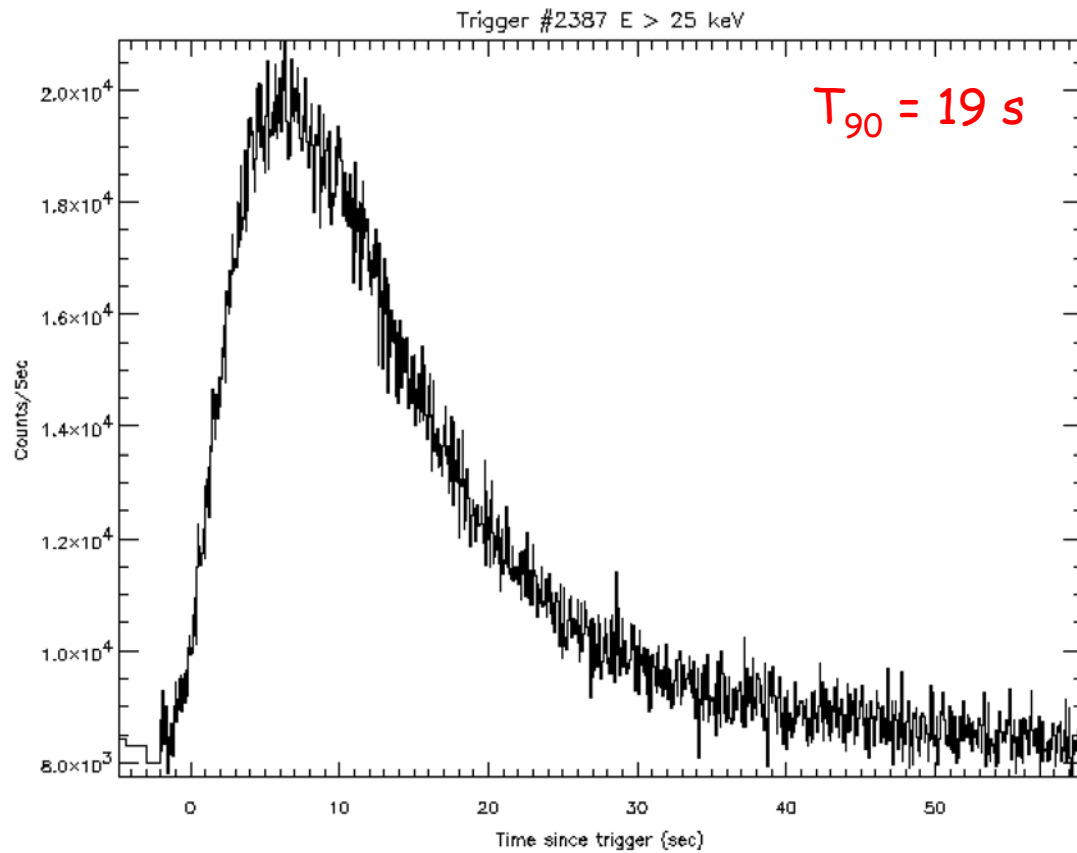
Des profils temporels très variés



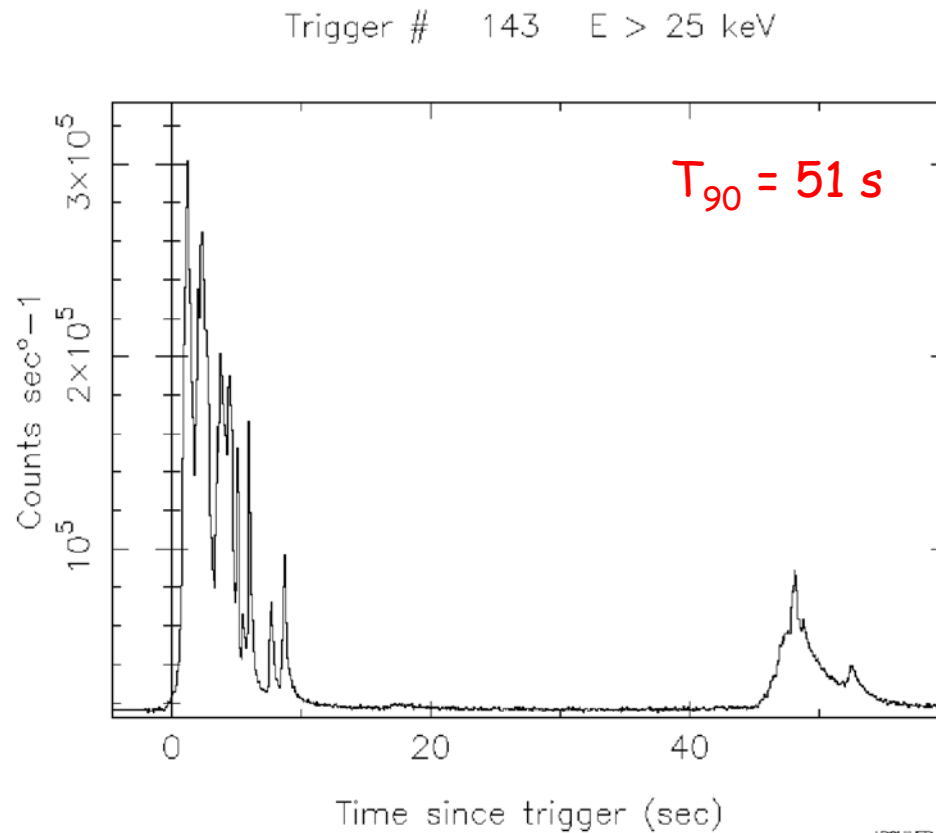
Des profils temporels très variés



Des profils temporels très variés

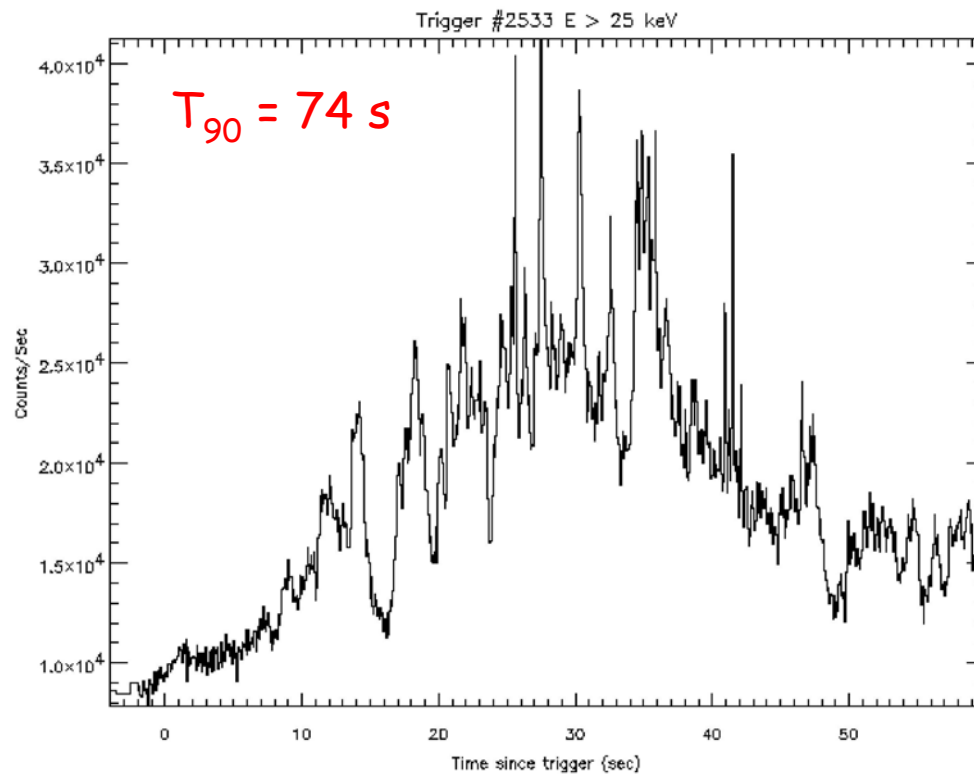


Des profils temporels très variés

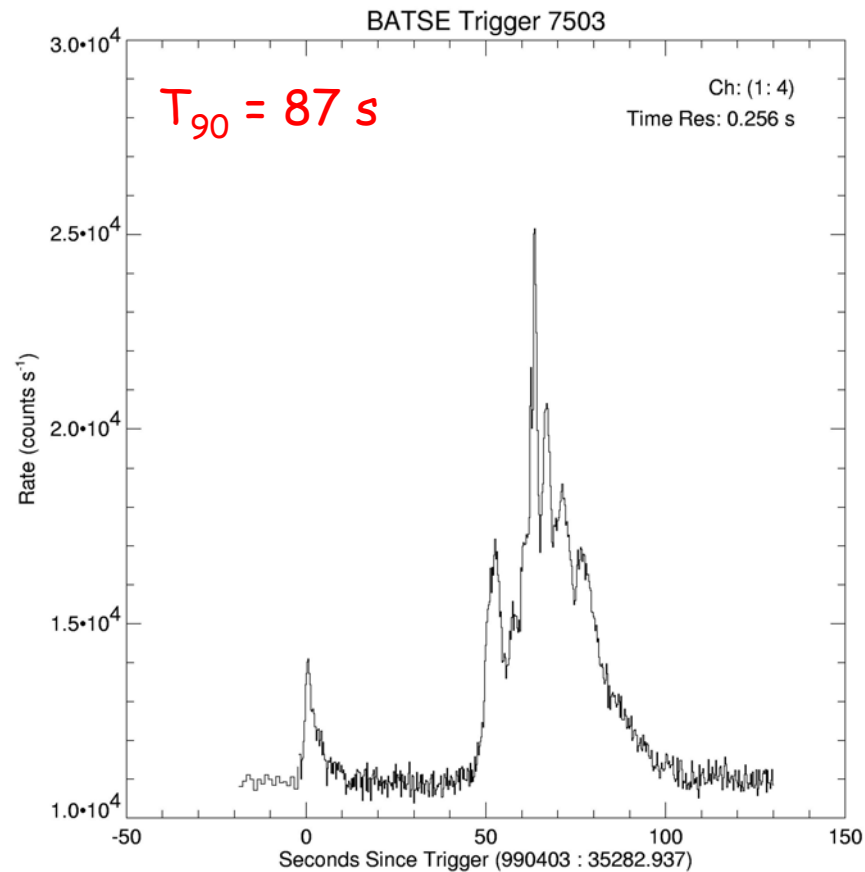


ARCHIVER 23-DEC-1995 16:40

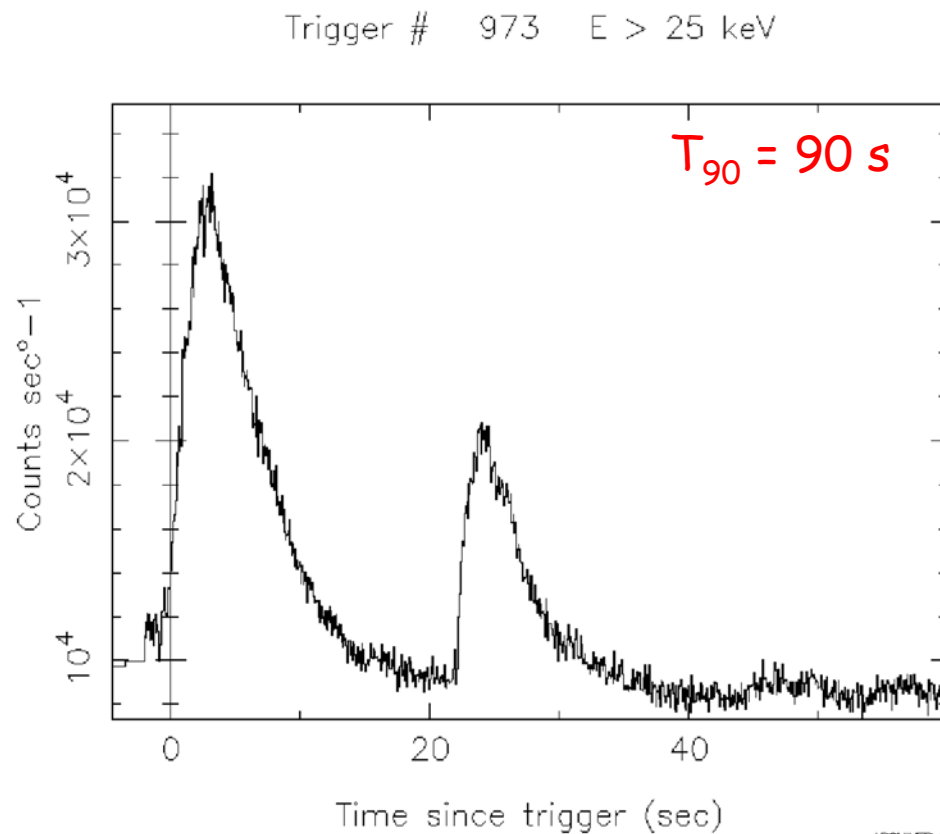
Des profils temporels très variés



Des profils temporels très variés

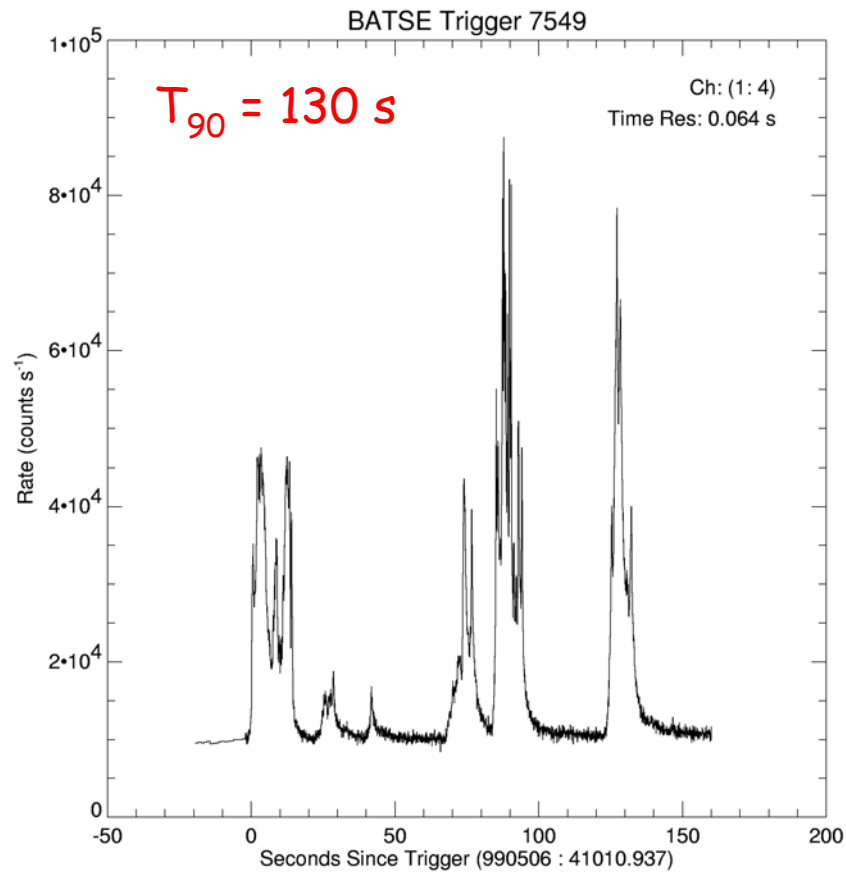


Des profils temporels très variés

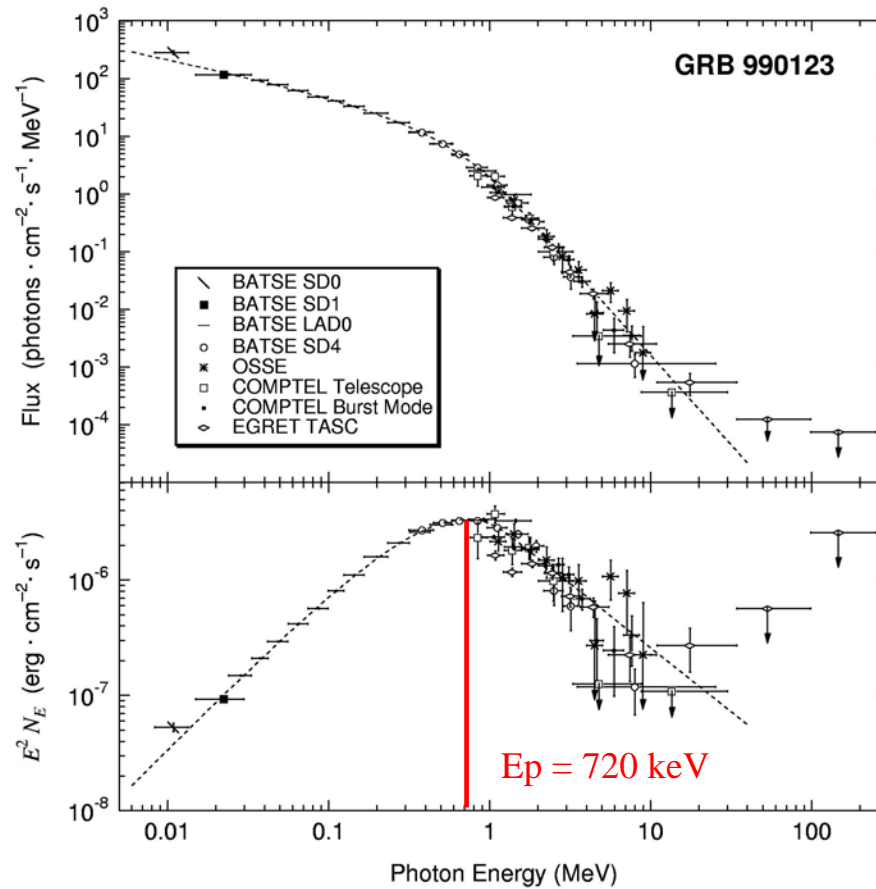


ARCHIVER 24-DEC-1995 01:13

Des profils temporels très variés



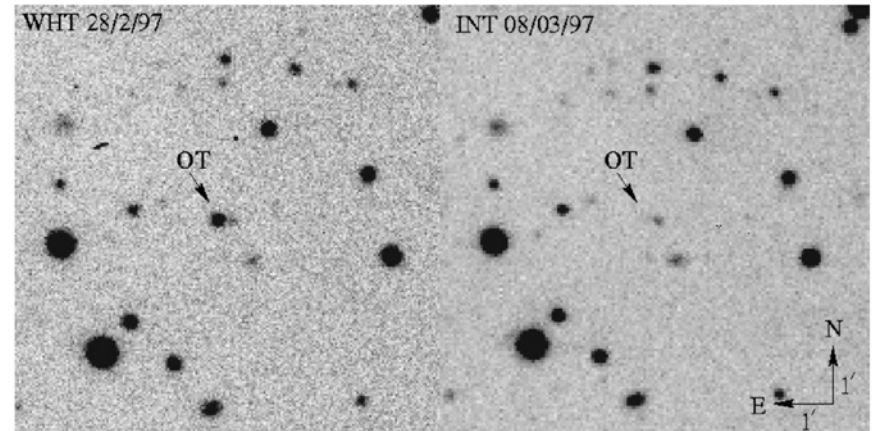
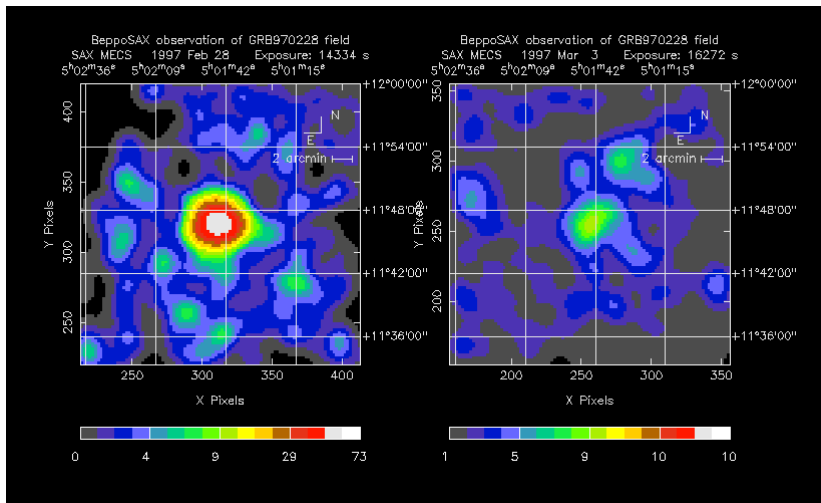
Mais des spectres très semblables



1997 : Beppo-SAX et les rémanences

Les localisations gamma sont très imprécises car on ne sait pas former d'images - on y parvient mieux en X

Beppo-SAX : détecteur de sursauts + caméras X
Et, le 28 Février 1997

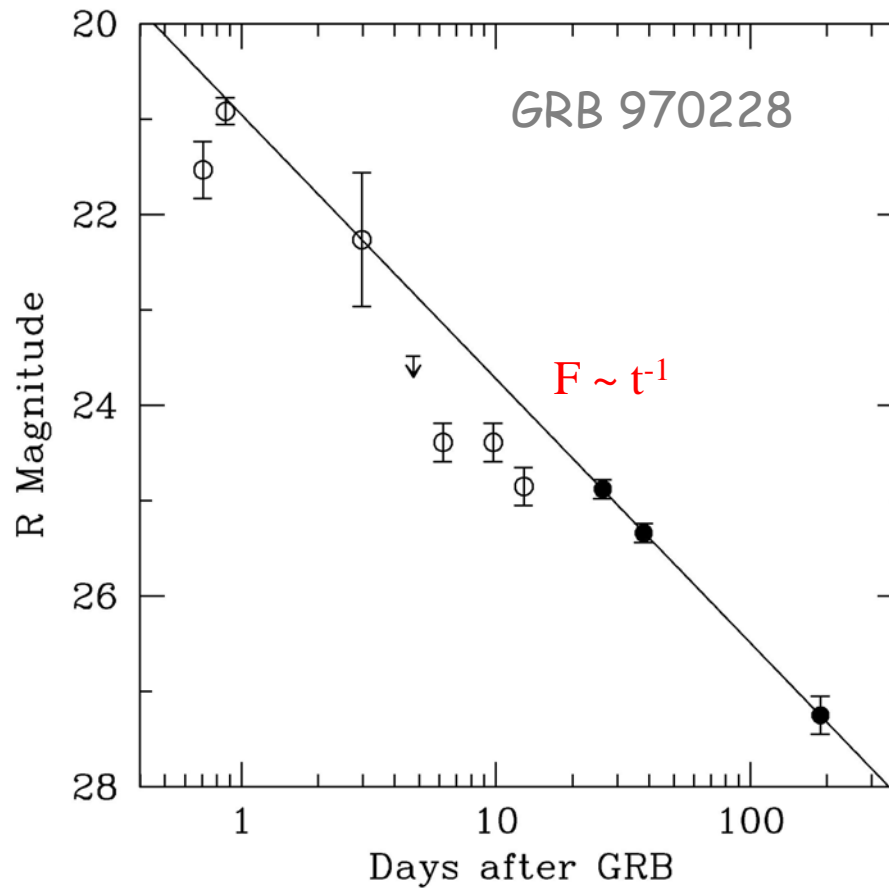


contrepartie X

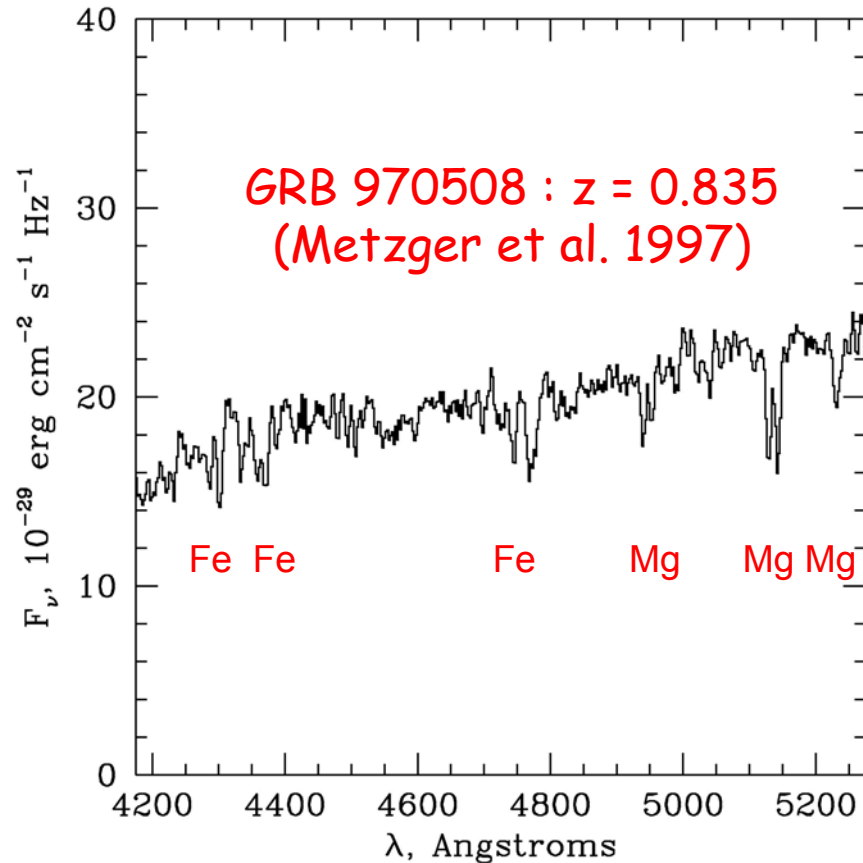
rémanence visible !

La rémanence des sursauts gamma

- évolution du domaine spectral d'émission : **X** → **visible** → **radio**
- décroissance rapide avec le temps en loi de puissance



GRB 970508 et le premier redshift



Une quarantaine de redshifts connus aujourd'hui entre 0.1 et 4.5

(une exception: GRB 980425 à 34 Mpc)

Les sursauts γ sont cosmologiques !

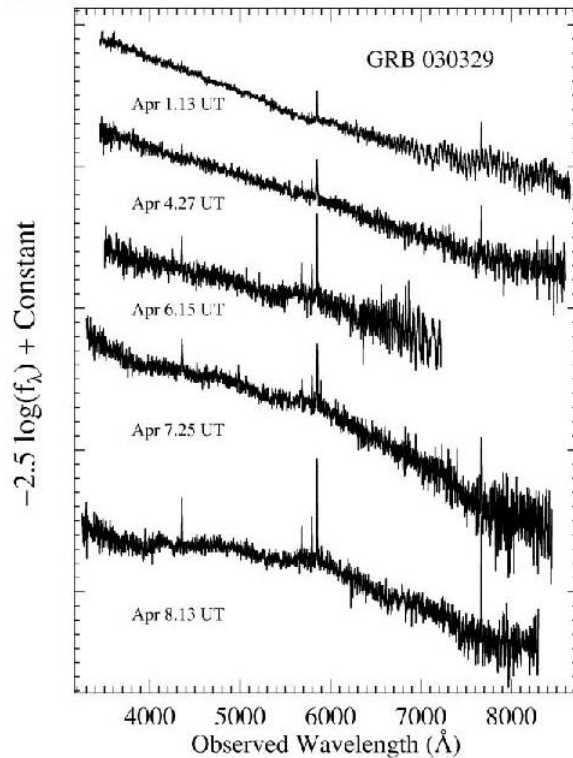
1997	GRB	970228	970508	970828	971214		
	z	0.695	0.835	0.958	3.42		
1998	GRB	980613	980703				
	z	1.096	0.966				
1999	GRB	990123	990510	990705	990712	991208	991216
	z	1.60	1.619	0.86	0.434	0.706	1.02
2000	GRB	000131	000301C	000418	000911	000926	
	z	4.5	2.03	1.118	1.058	2.066	
2001	GRB	010222	010921	011121	011211		
	z	1.477	0.36	0.36	2.14		
2002	GRB	020405	020813	021004	021211		
	z	0.69	1.25	2.3	1.01		
2003	GRB	030226	030323	030328	030329	030429	
	z	1.98	3.37	1.52	0.168	2.65	

Les sursauts γ sont cosmologiques !

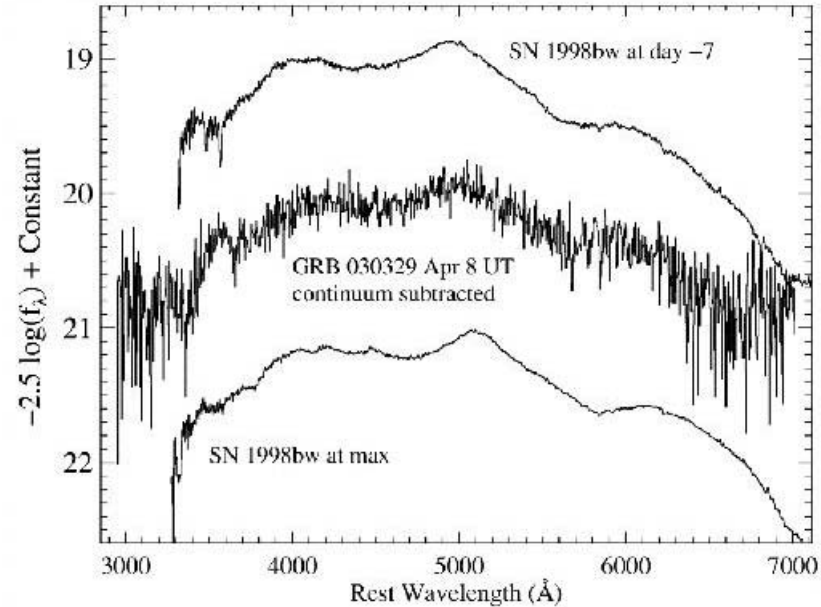
1997	GRB	970228	970508	970828	971214		
	z	0.695	0.835	0.850	0.40		
1998	GRB	980613	980703				
	z	1.096	0.966				
1999	GRB	990123	990510	990705	990712	991208	991216
	z	1.60	1.619	0.86	0.434	0.706	1.02
2000	GRB	000131	000301C	000418	000911	000926	
	z	4.5	2.03	1.118	1.058	2.066	
2001	GRB	010222	010921	011121	011211		
	z	1.477	0.36	0.36	2.14		
2002	GRB	020405	020813	021004	021211		
	z	0.69	1.25	2.3	1.01		
2003	GRB	030226	030323	030328	030329	030429	
	z	1.98	3.37	1.52	0.168	2.65	

Décalage de 4.5 : l'Univers est âgé de 1,4 milliards d'années !
(10 % de l'âge actuel)

GRB 030329 : un sursaut très brillant à $z = 0.15$



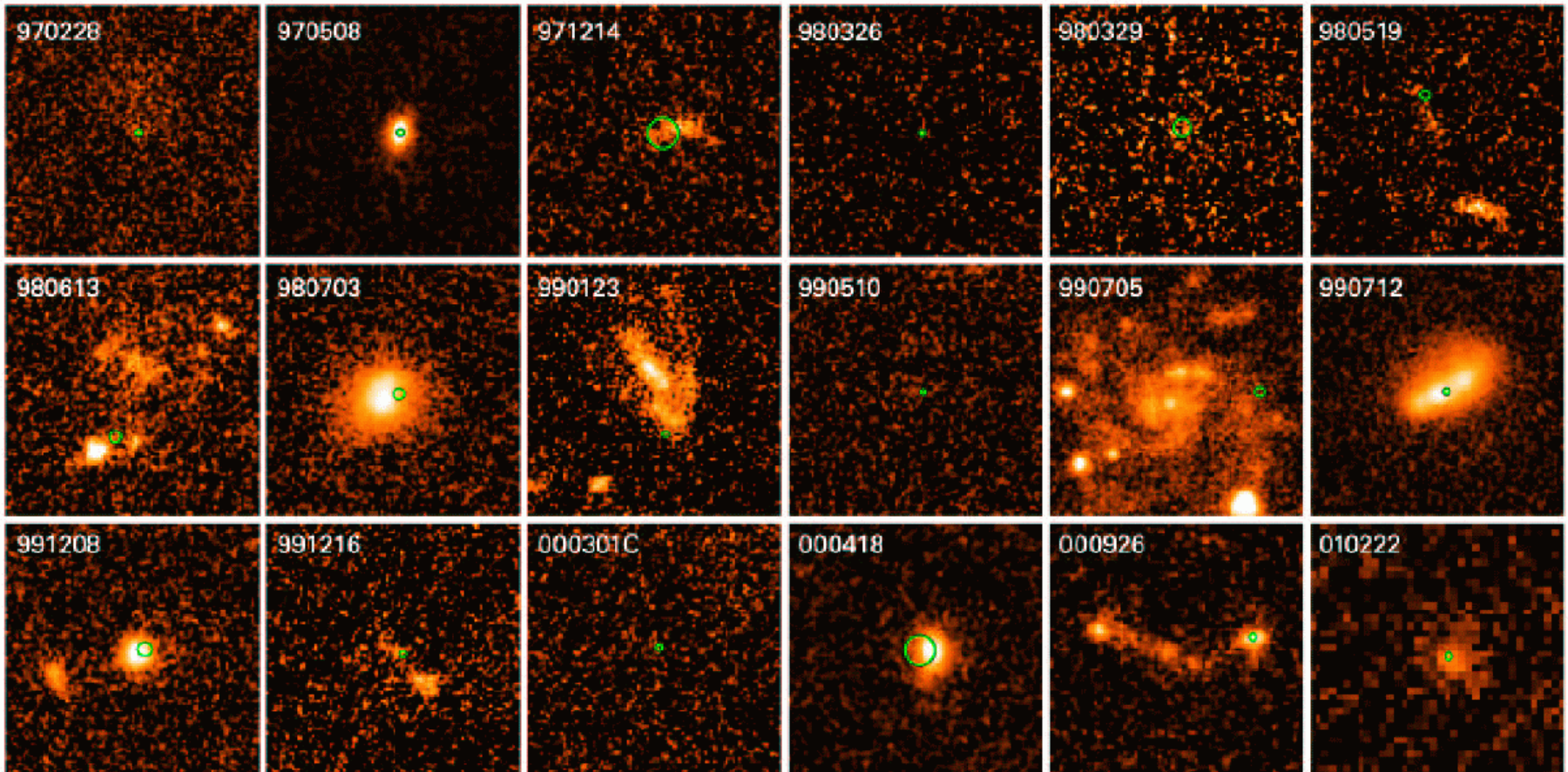
spectre de la rémanence



spectre additionnel après 10 jours

Le sursaut a eu lieu juste avant/après l'explosion d'une étoile de Wolf-Rayet

Les galaxies hôtes des sursauts γ



(Vreeswijk P., PhD thesis, 2001)

Quel(s) modèle(s) pour les sursauts gamma ?

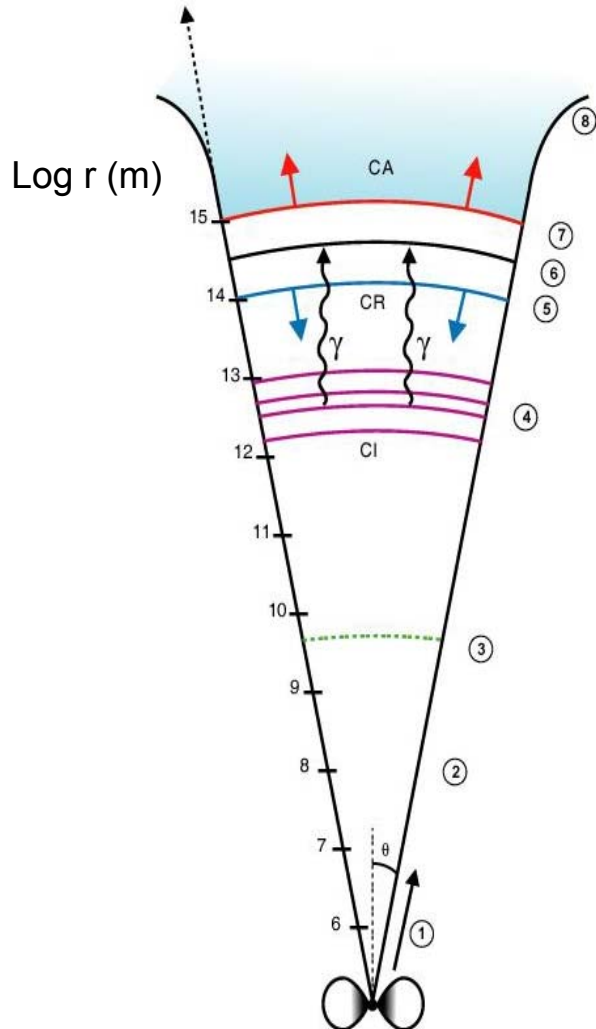
Contraintes de base :

- variabilité temporelle → objets compacts impliqués
- sursauts à z connu → $E_\gamma = 10^{44} - 10^{47} \times \left(\frac{\Omega}{4\pi} \right)$ Joules
(supernova : $E_{ph} = 10^{42}$ Joules , $E_{cin} = 10^{44}$ Joules)
- problème de compacité → $\gamma + \gamma \leftrightarrow e^+ + e^-$
→ émission par un gaz en mouvement relativiste : $\Gamma > 100$
($\Gamma=100 \rightarrow v$ différente de c de $1/20000^{\text{ème}}$)
- association sursauts longs ↔ supernovae de type Ic

Un modèle en trois étapes

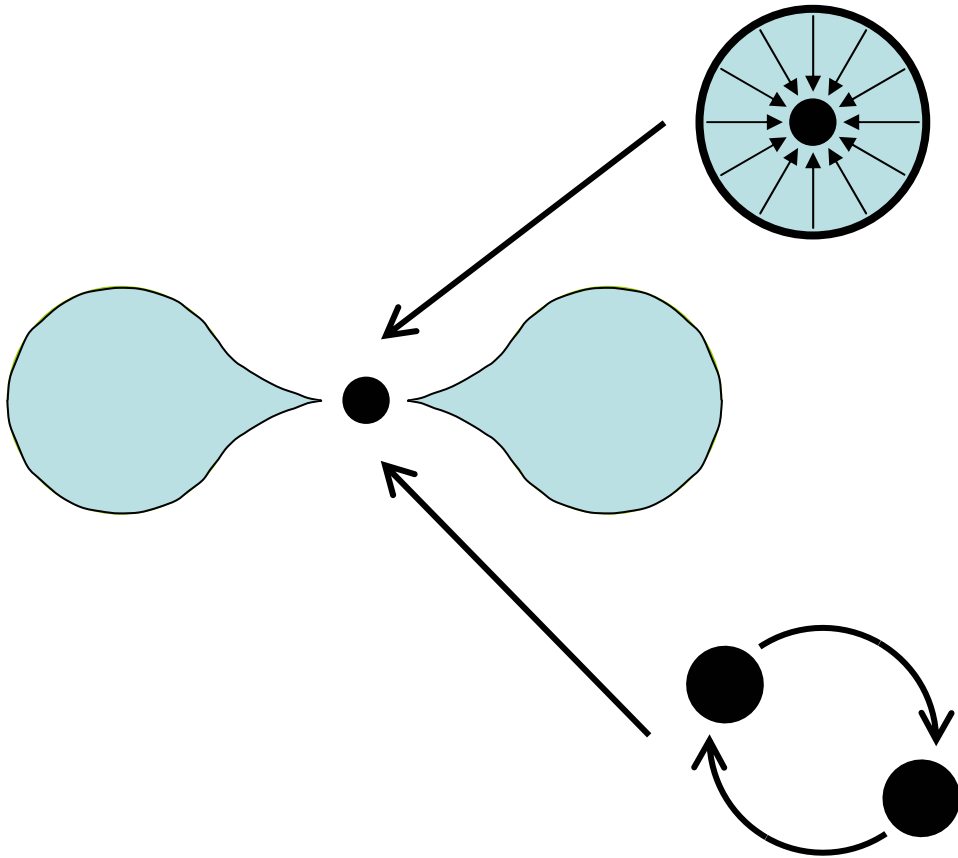
- 1) Le moteur central et la production d'un jet relativiste
 - 2) L'origine de l'émission gamma
 - 3) La production de la rémanence
-
- 1) Extrêmement difficile : RG + champ magnétique + hydrodynamique relativiste
 - 2) Un modèle bien étudié (mais à confirmer) : les « chocs internes »
 - 3) Le mieux compris : onde de choc se propageant dans l'environnement

Le modèle « standard » (en une figure)



- 1) accélération
- 2) vitesse limite atteinte: $\Gamma > 100$
- 3) transparence \rightarrow précurseur thermique
- 4) chocs internes (CI) \rightarrow émission γ
- 5) choc retour (CR) \rightarrow flash optique ?
- 6) surface de discontinuité
- 7) choc avant (CA) \rightarrow rémanence
- 8) $1/\Gamma > \theta$ \rightarrow cassure dans la rémanence

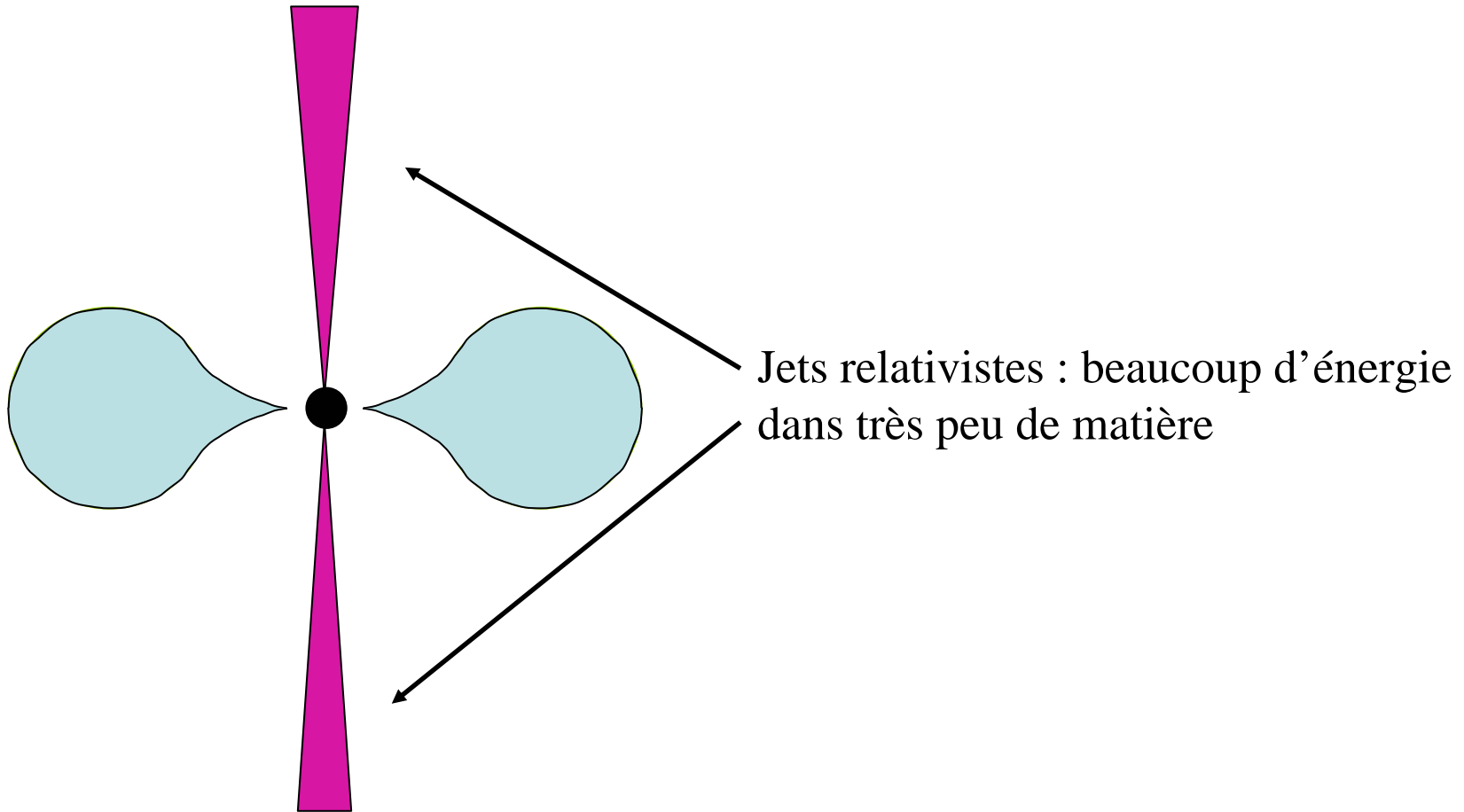
Moteur central : trou noir entouré d'un tore d'accrétion



Effondrement d'une étoile massive
en trou noir (sursauts longs ?)

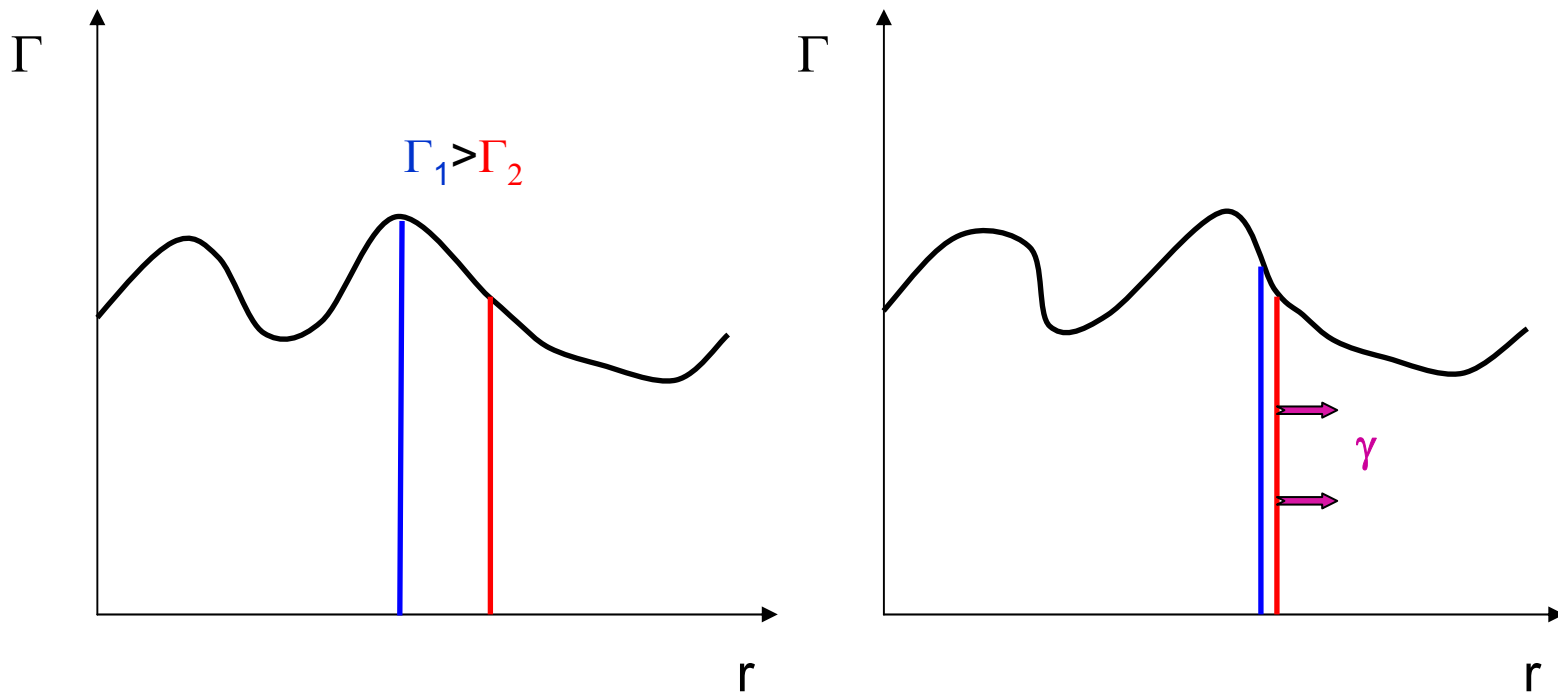
Coalescence de deux objets compacts
(EN/TN) (sursauts courts ?)

Moteur central : trou noir entouré d'un tore d'accrétion



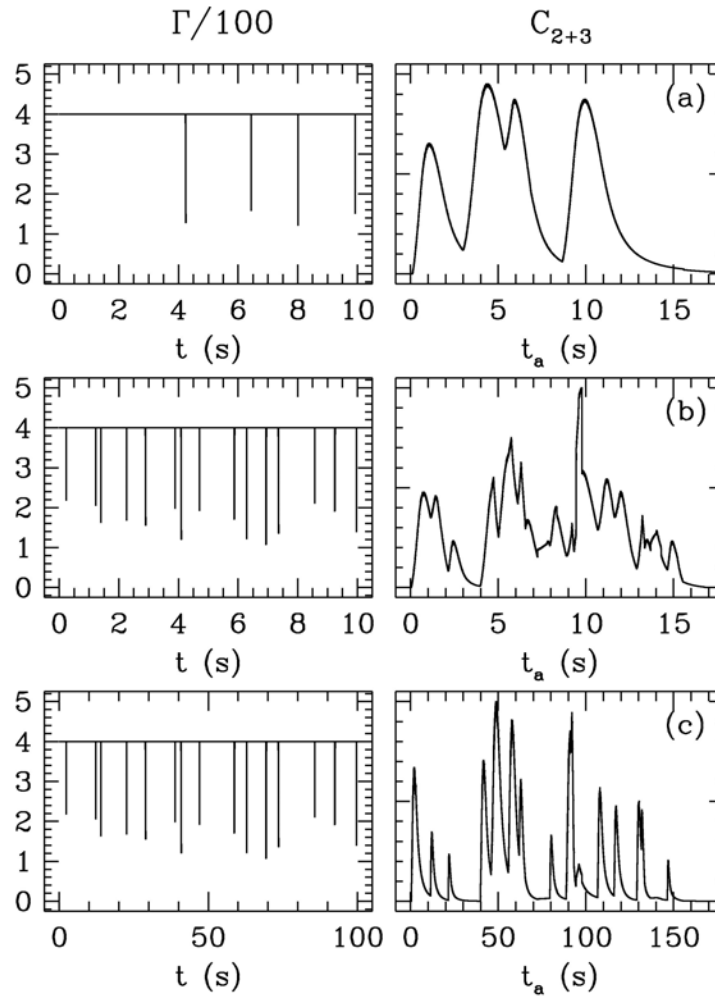
Les chocs internes

Dans l'écoulement relativiste les couches rapides rattrapent les couches « lentes »



chocs → dissipation d'énergie → émission gamma

De jolis résultats ...



Daigne & Mochkovitch 1998

... mais des problèmes aussi: faible efficacité, indice spectraux

L'origine de la rémanence

L'éjecta relativiste est peu à peu freiné par le milieu extérieur (effet chasse-neige) $\rightarrow \Gamma \sim R^{-3/2}$

L'énergie dissipée est rayonnée à la fréquence $\nu \sim t^{-3/2}$

X (minutes), visible (heures), radio (semaines)

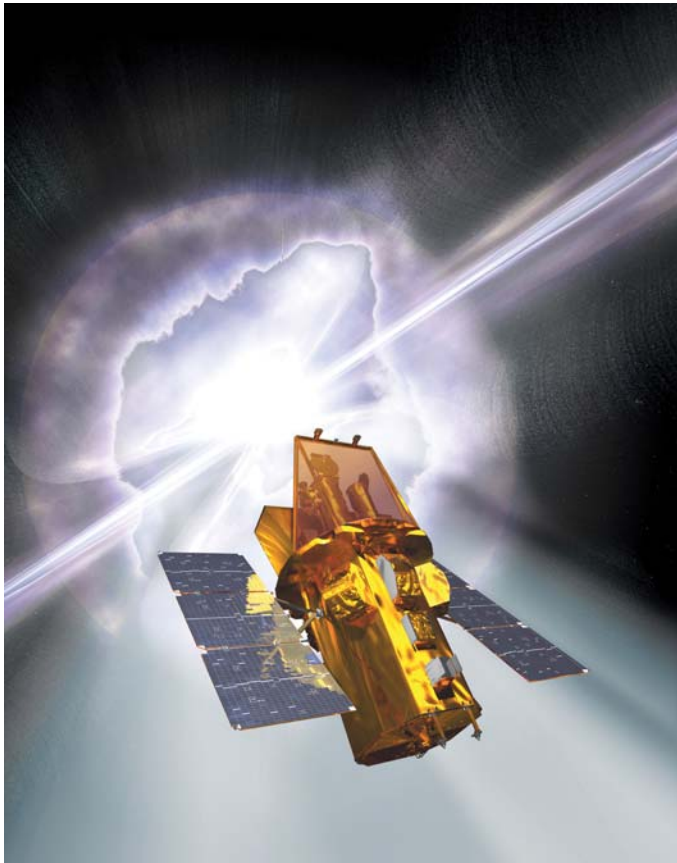
Finalement l'évolution devient non relativiste et l'objet évolue d'un jet en une bulle

W49 : un reste de sursaut gamma dans notre Galaxie ?



Le futur

Novembre 2004 : lancement de **SWIFT**

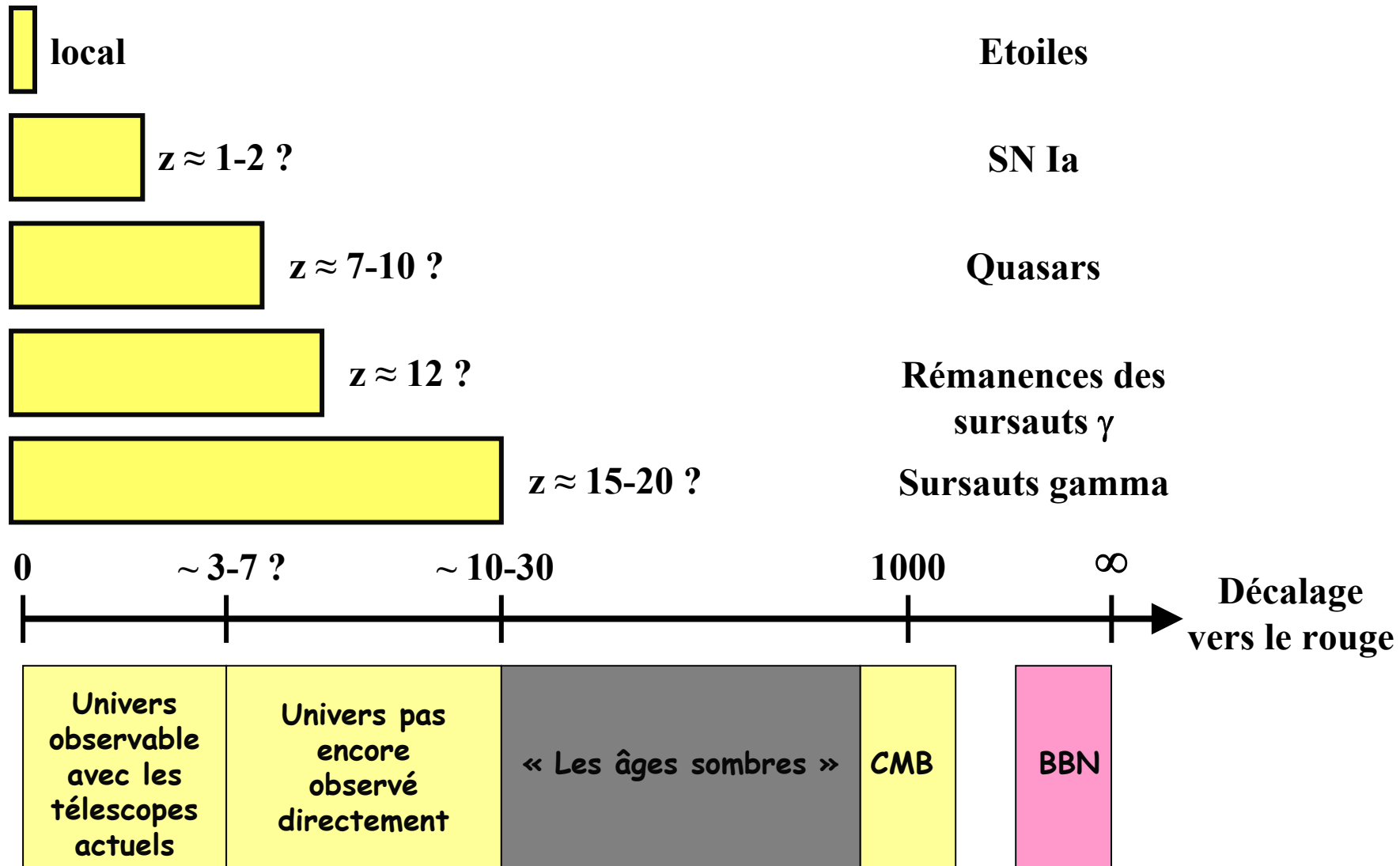


Télescopes gamma, X et optique



- localisations précises en temps réel
- suivi très précoce de la rémanence
- plusieurs dizaines de redshifts par an (dont certains à grand z ?)

Les sursauts : un outil pour la cosmologie ?



Comment détecter la rémanence d'un sursaut gamma à grand décalage vers le rouge ?

Il faut regarder dans l'IR (le domaine optique est absorbé)

Il faut aller très vite : une observation 10 minutes après le sursaut

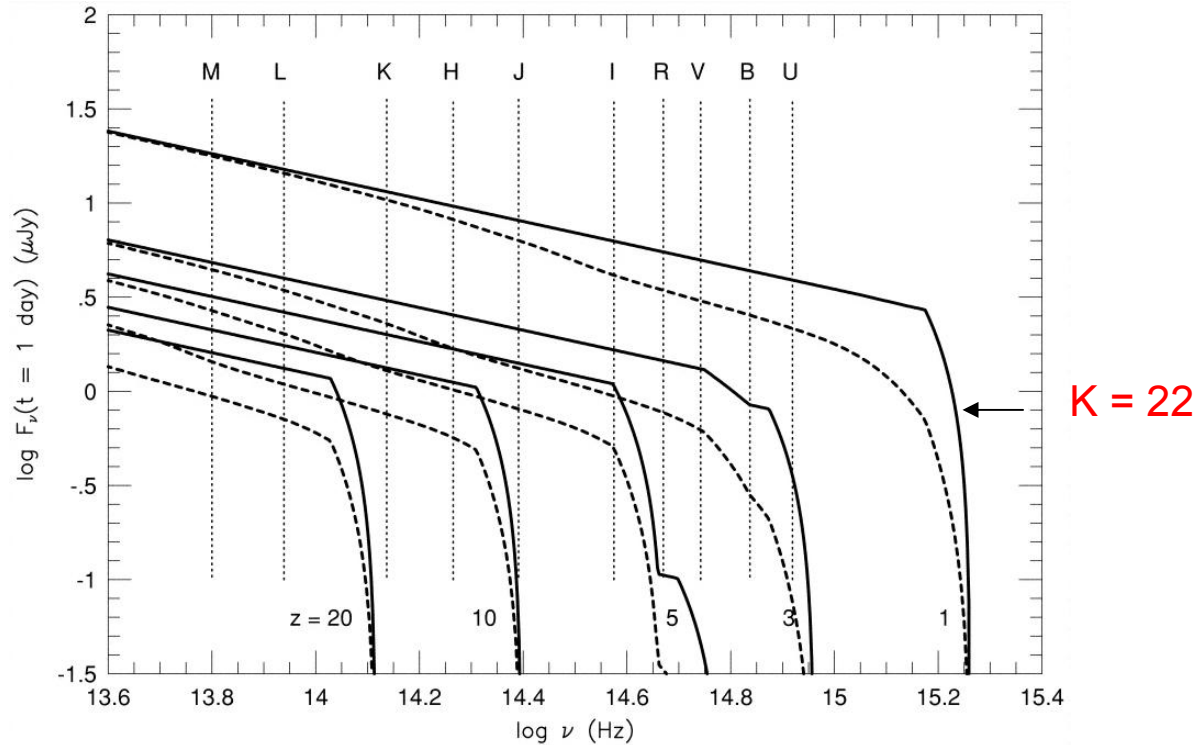
signifie dans le référentiel de la source :

5 minutes après le sursaut à $z = 1$

55 secondes après le sursaut à $z = 10$

la source est donc intrinsèquement plus brillante ce qui compense partiellement la perte de flux due à la plus grande distance.

Les rémanences sont détectables au-delà de $z = 10$

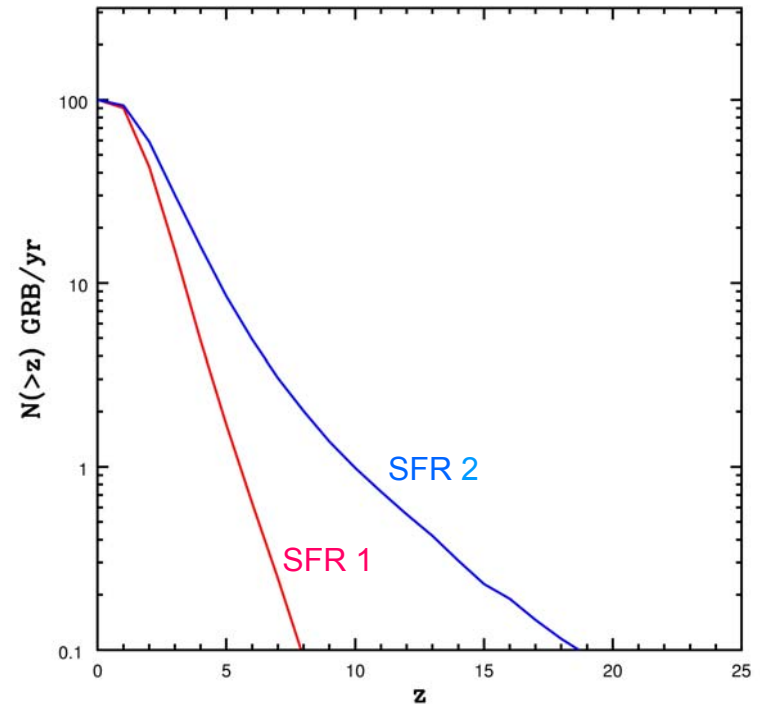
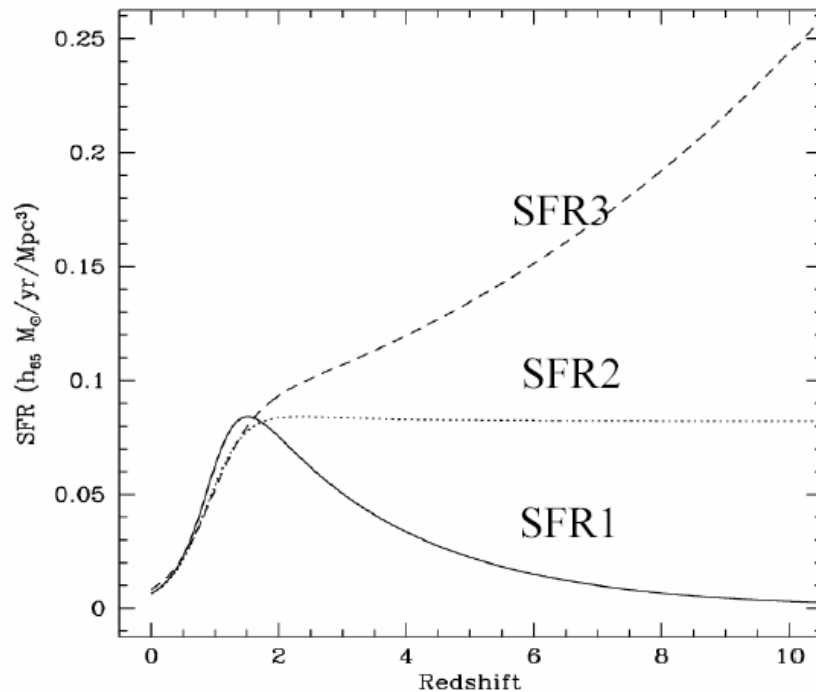


objets parents des sursauts à grand z :
étoiles massives responsables de la réionisation ?

SWIFT observera-t-il des sursauts à grand z ?

Hypothèses:

- taux de sursauts proportionnel au taux de formation d'étoiles
- fonction de luminosité des sursauts: $\Phi(L,z)$



Quelques petits (ou grands ?) scoops et perspectives

GRB 0504XX à $z=4.3$ (le deuxième plus distant)

GRB 050509b un sursaut court (0.15 s) dans une galaxie elliptique
à $z = 0.22$? → coalescence ??

Si des sursauts à grand z sont découverts:

→ SFR(z)

→ spectre d'absorption sur la ligne de visée

structure à grande échelle de l'Univers (X-Shooter, 2007)

2007 – 2009: GLAST + ECLAIRs

→ localisation rapide

→ couverture spectrale sans précédent