



Susanna D. Vergani

CNRS - Observatoire de Paris

GRB : multi-longueurs d'onde (+ multi-messagers)

Sursauts gamma : d'un phénomène gamma à multi-longueur d'onde

- Phénomène gamma —> multi-longueur d'onde
- Etude des propriétés de l'émission rémanente et du jet
- Sondes de l'univers lointain

Sursaut gamma = GRB (gamma-ray burst)

Emission rémanente = rémanence = afterglow

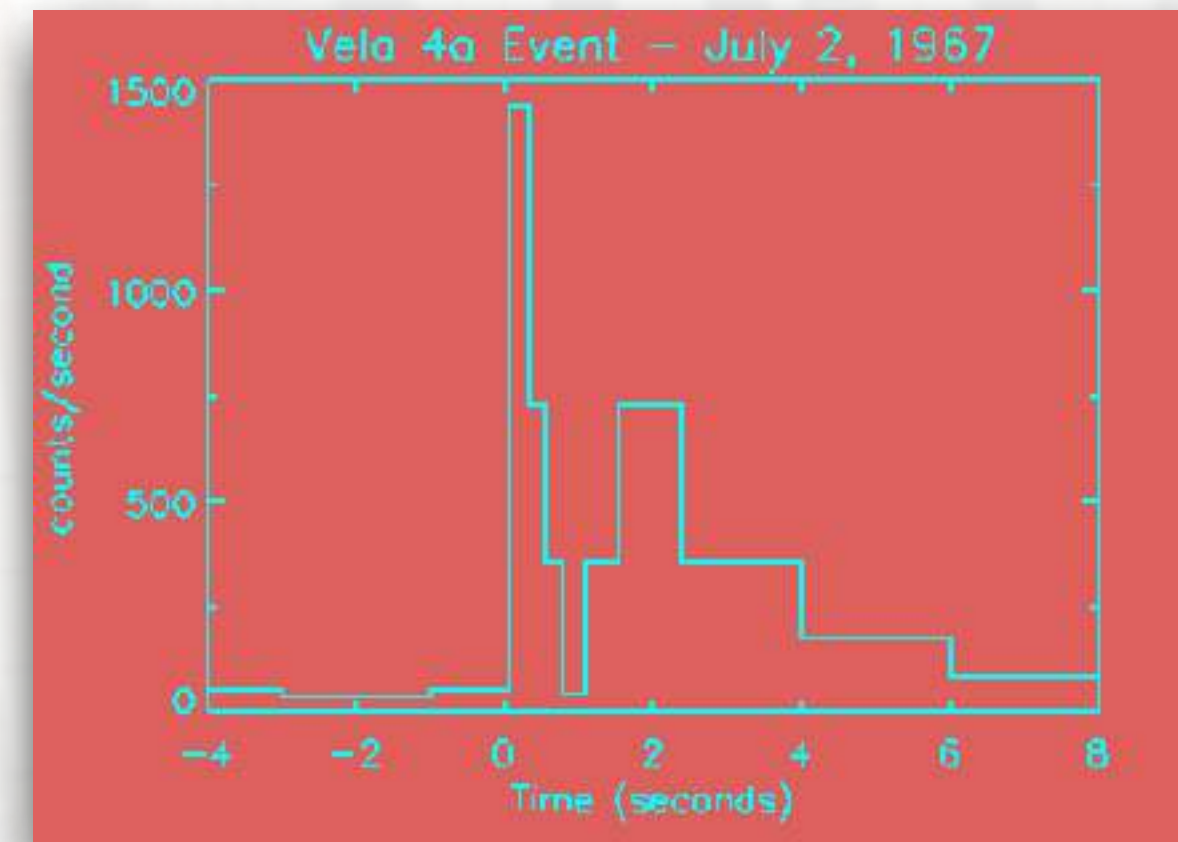
Décalage spectral vers le rouge = redshift = z

Sursauts gamma : d'un phénomène gamma à multi-longueur d'onde

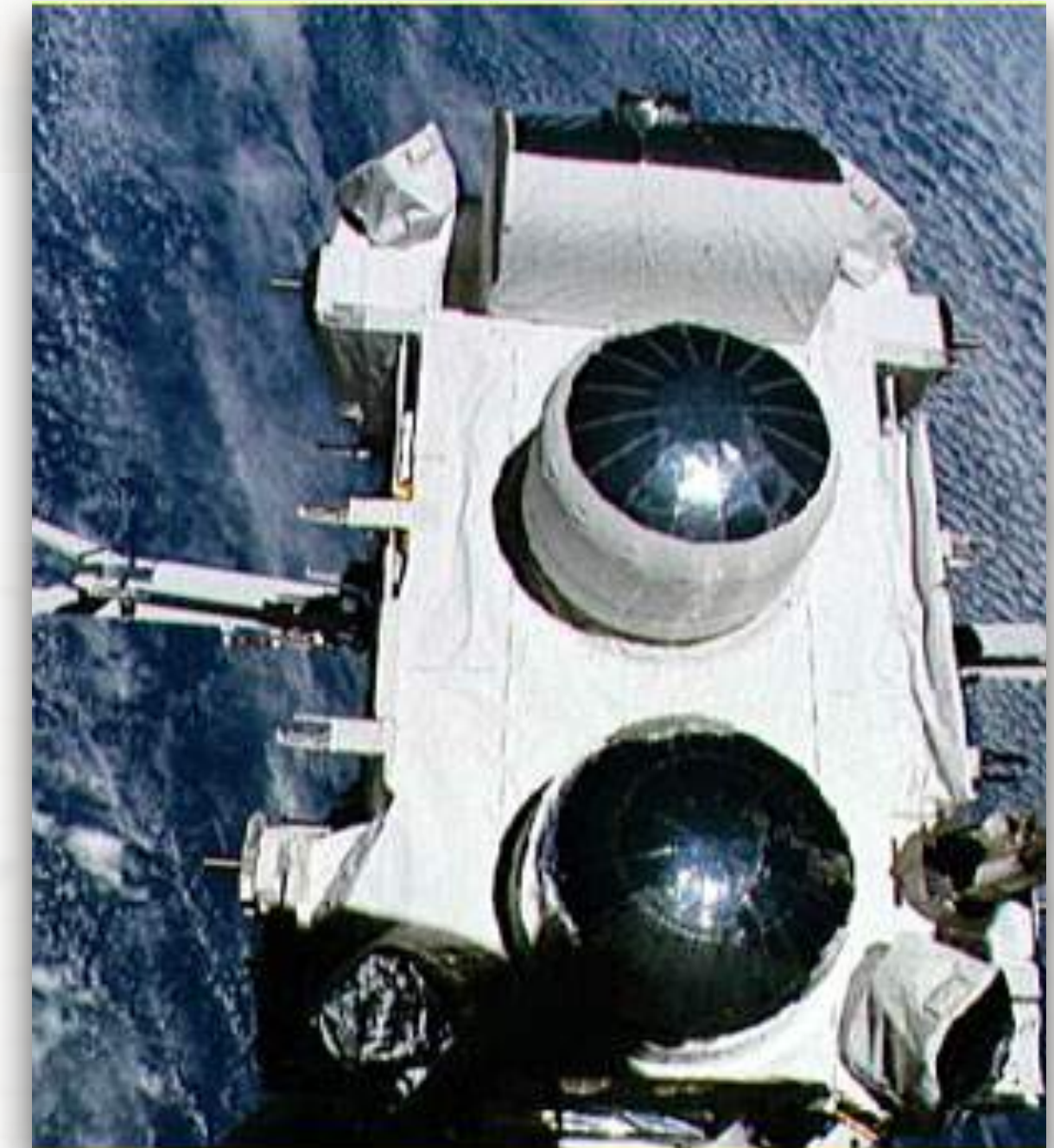
VELA Satellite (Credits: NASA)



Klebesadel et al. (VELA Satellite)



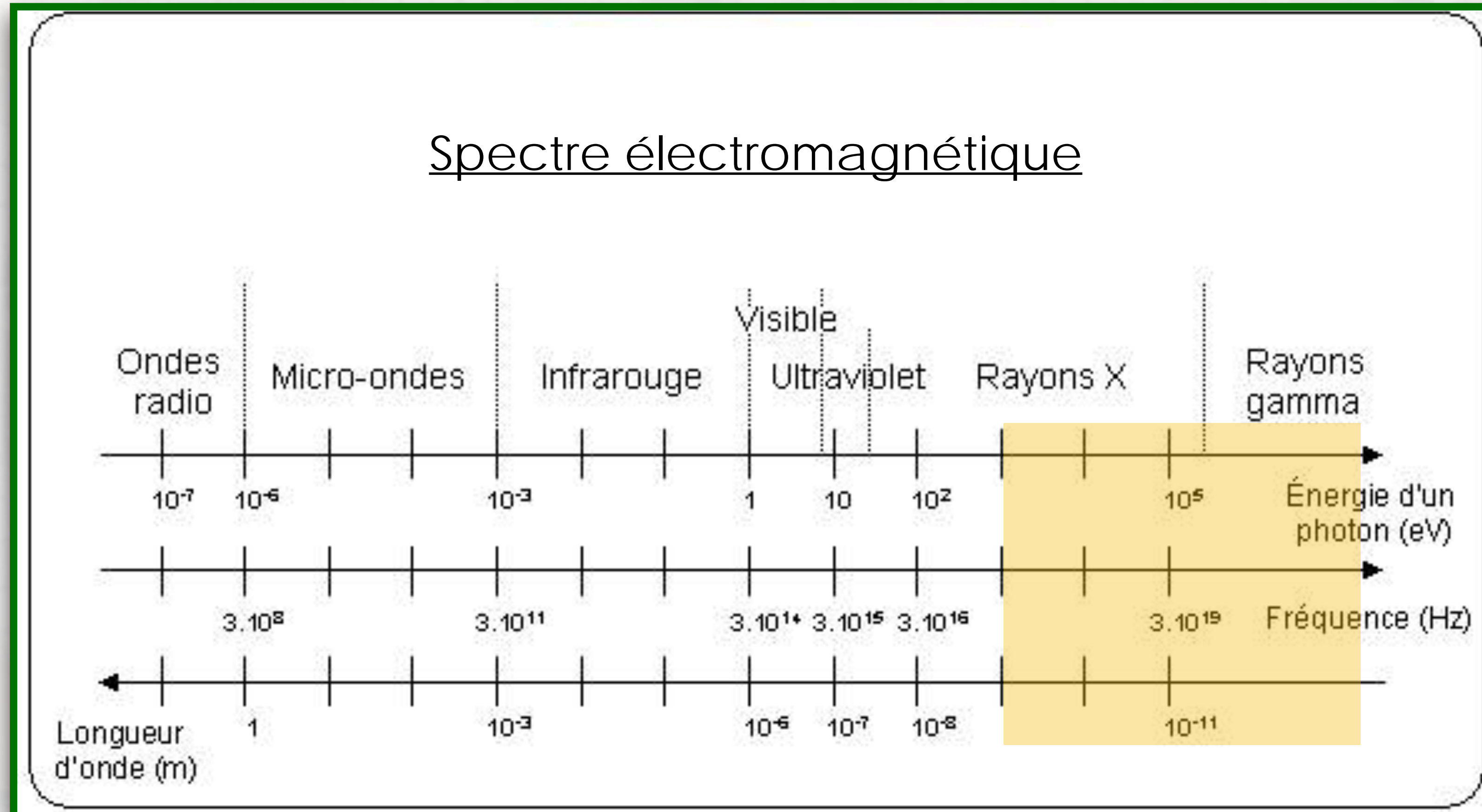
Credits: NASA



- 1967 par satellite test nucléaires

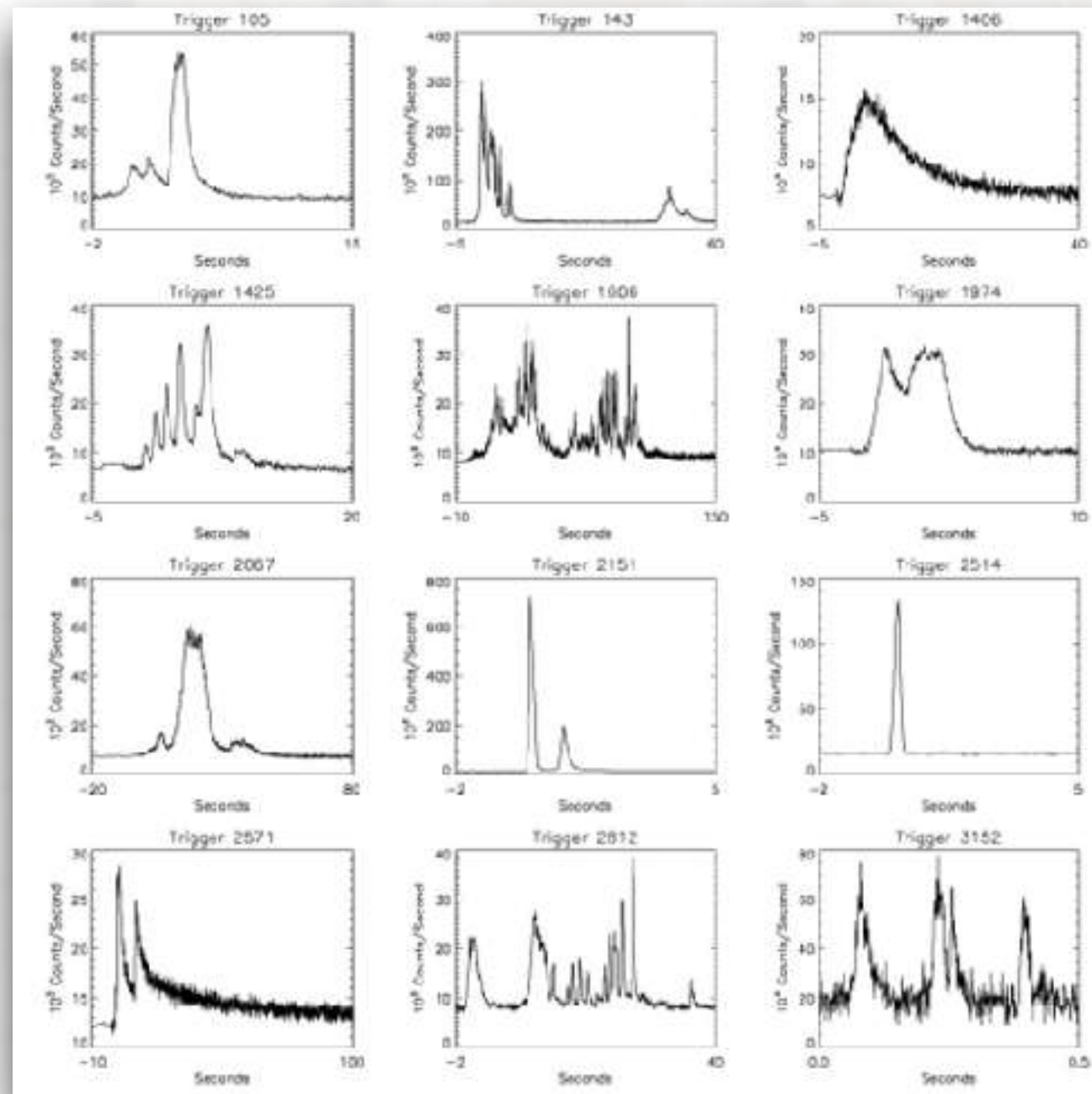
- L'instrument BATSE sur la mission COMPTON

Sursauts gamma : d'un phénomène gamma à multi-longueur d'onde

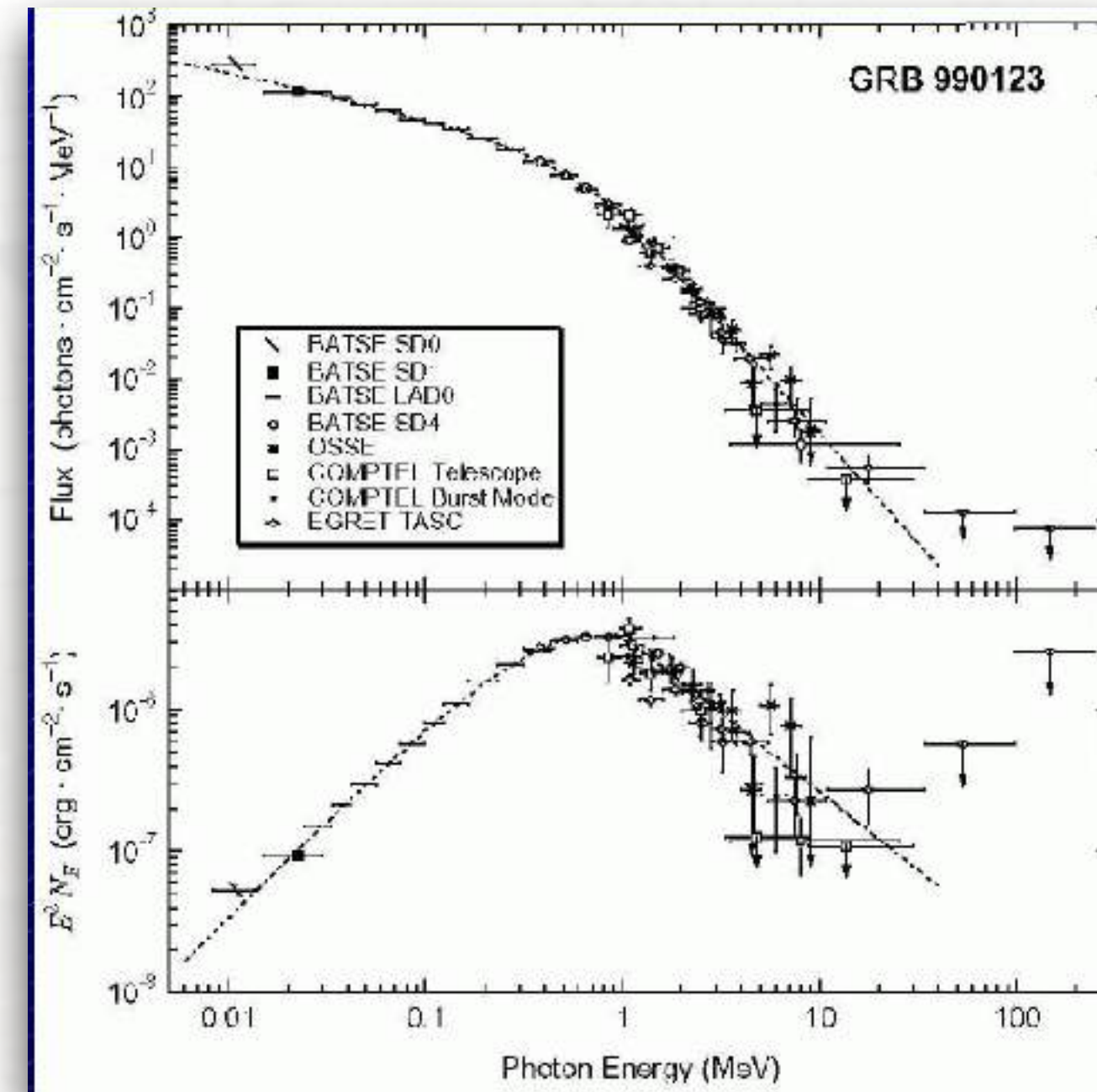


Sursauts gamma : d'un phénomène gamma à multi-longueur d'onde

Fishman et al. 1995



Gomboc et al. 2012



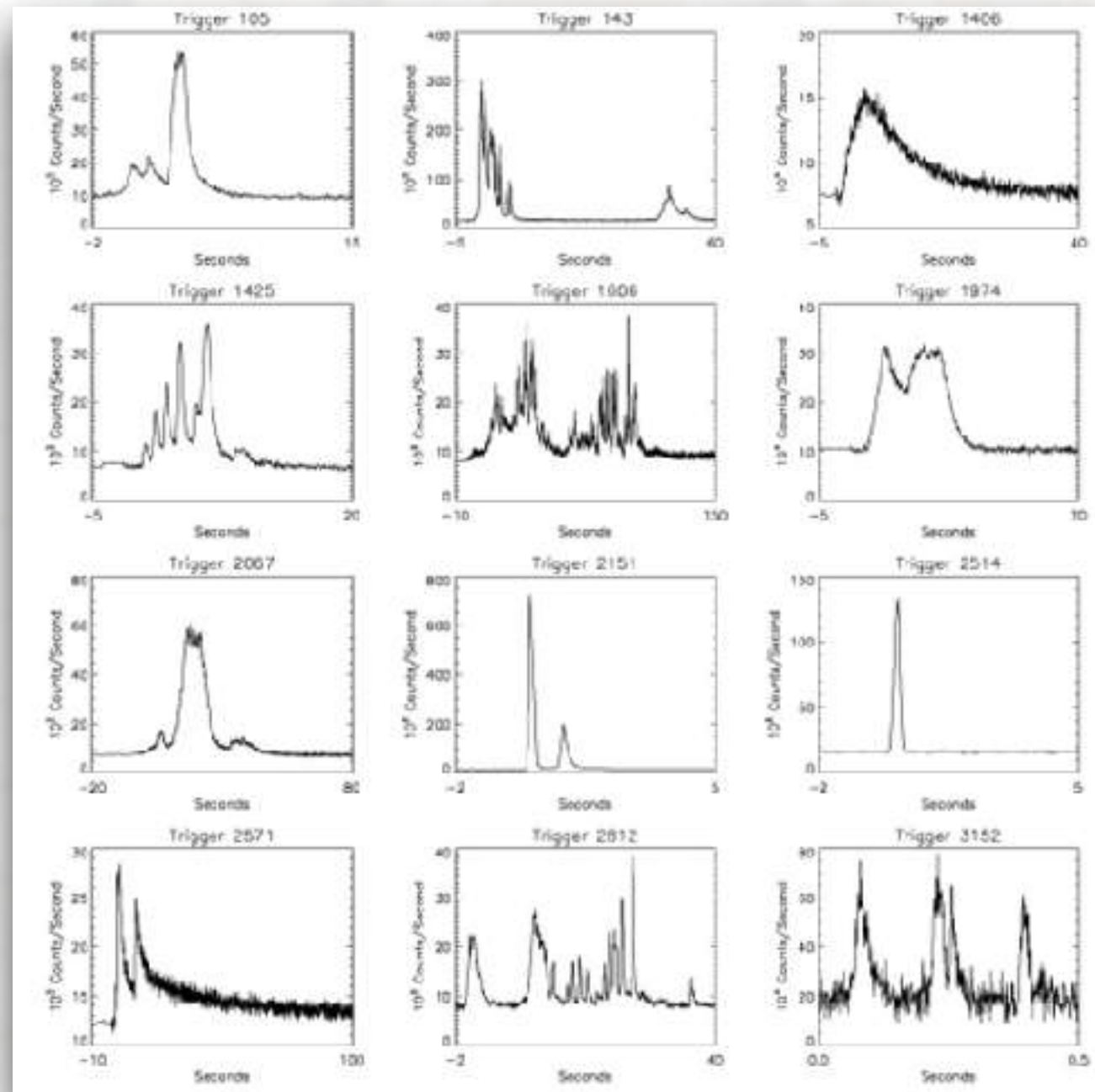
- détection de l'émission prompt
- < 1s jusqu'à > 100s
- variabilité (∂t): < 10ms.
Information sur la taille (R) de la source : $R \leq c\partial t \sim 10^3\text{km}$
- spectre non thermique

Problème!

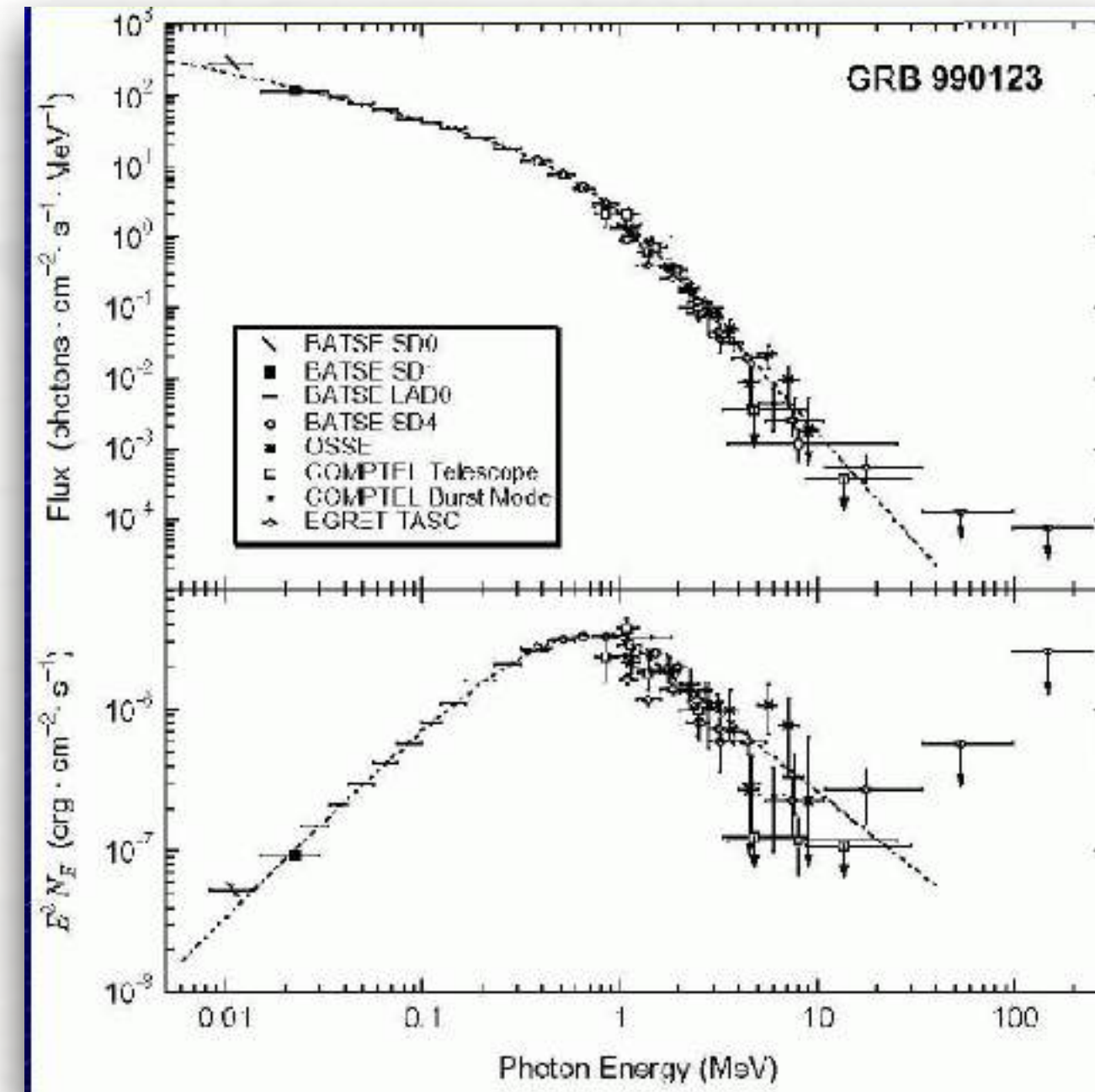
- *Solution*: vitesse relativiste
 $\Gamma = 1/(1-v^2/c^2)^{1/2} \gg 1$
- $\Gamma \geq 100$! ($R \sim 10^7\text{km}$)

Sursauts gamma : d'un phénomène gamma à multi-longueur d'onde

Fishman et al. 1995



Gomboc et al. 2012



- détection de l'émission prompt
- < 1s jusqu'à > 100s
- variabilité (∂t): < 10ms.
Information sur la taille (R) de la source : $R \leq c\partial t \sim 10^3\text{km}$
- spectre non thermique

Problème!

- *Solution*: vitesse relativiste
 $\Gamma = 1/(1-v^2/c^2)^{1/2} \gg 1$
- $\Gamma \geq 100$! ($R \sim 10^7\text{km}$)

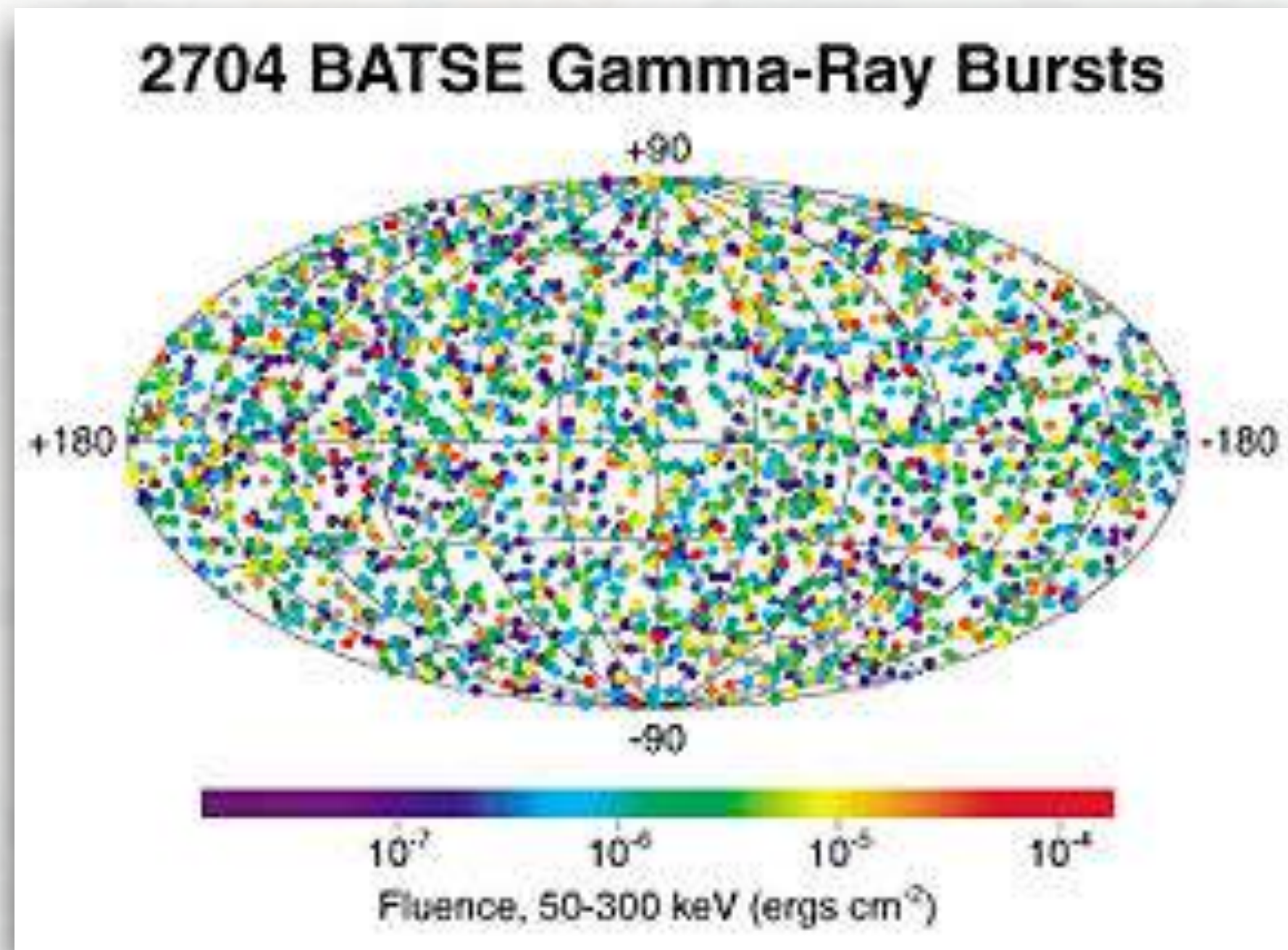
- Energie très élevée, 10^{53} erg \rightarrow jet

Sursauts gamma : d'un phénomène gamma à multi-longueur d'onde

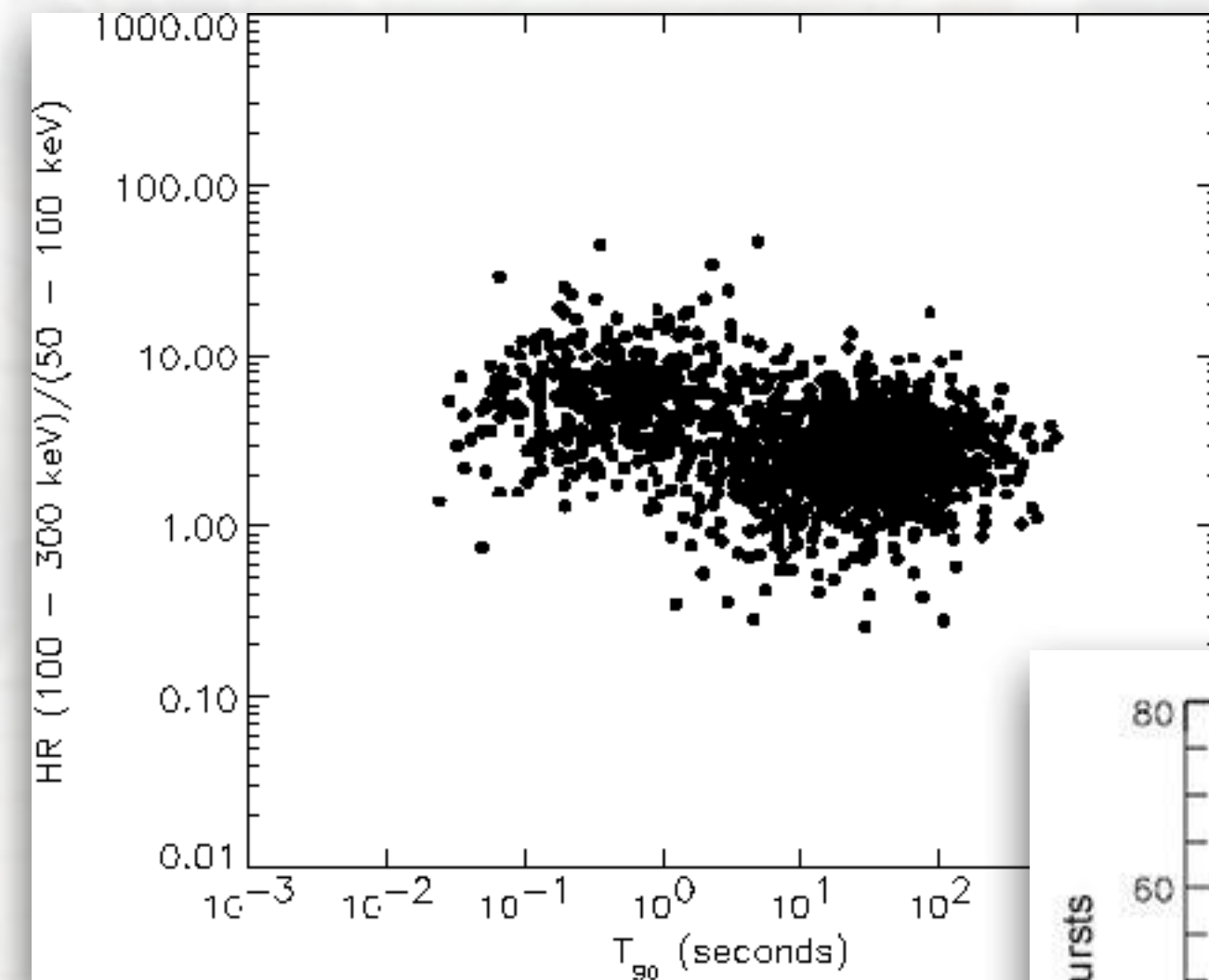
- Objet compact
- Jet ultra-relativiste

Sursauts gamma : d'un phénomène gamma à multi-longueur d'onde

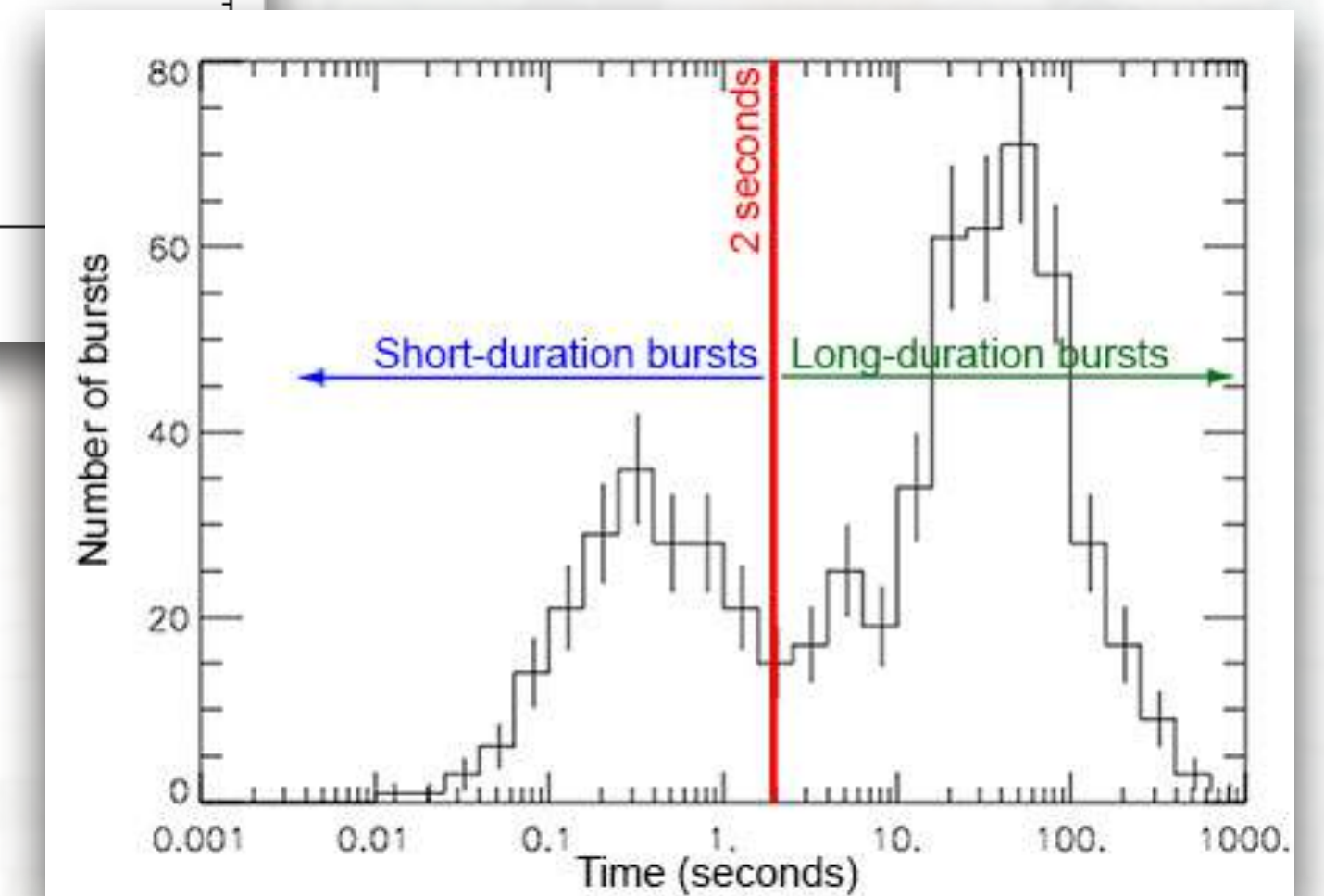
Credits: NASA



Fishman 1999



Credits: NASA



- GRBs sont isotropes : origine extra-galactique?
- GRBs longs et courts

Sursauts gamma : d'un phénomène gamma à multi-longueur d'onde

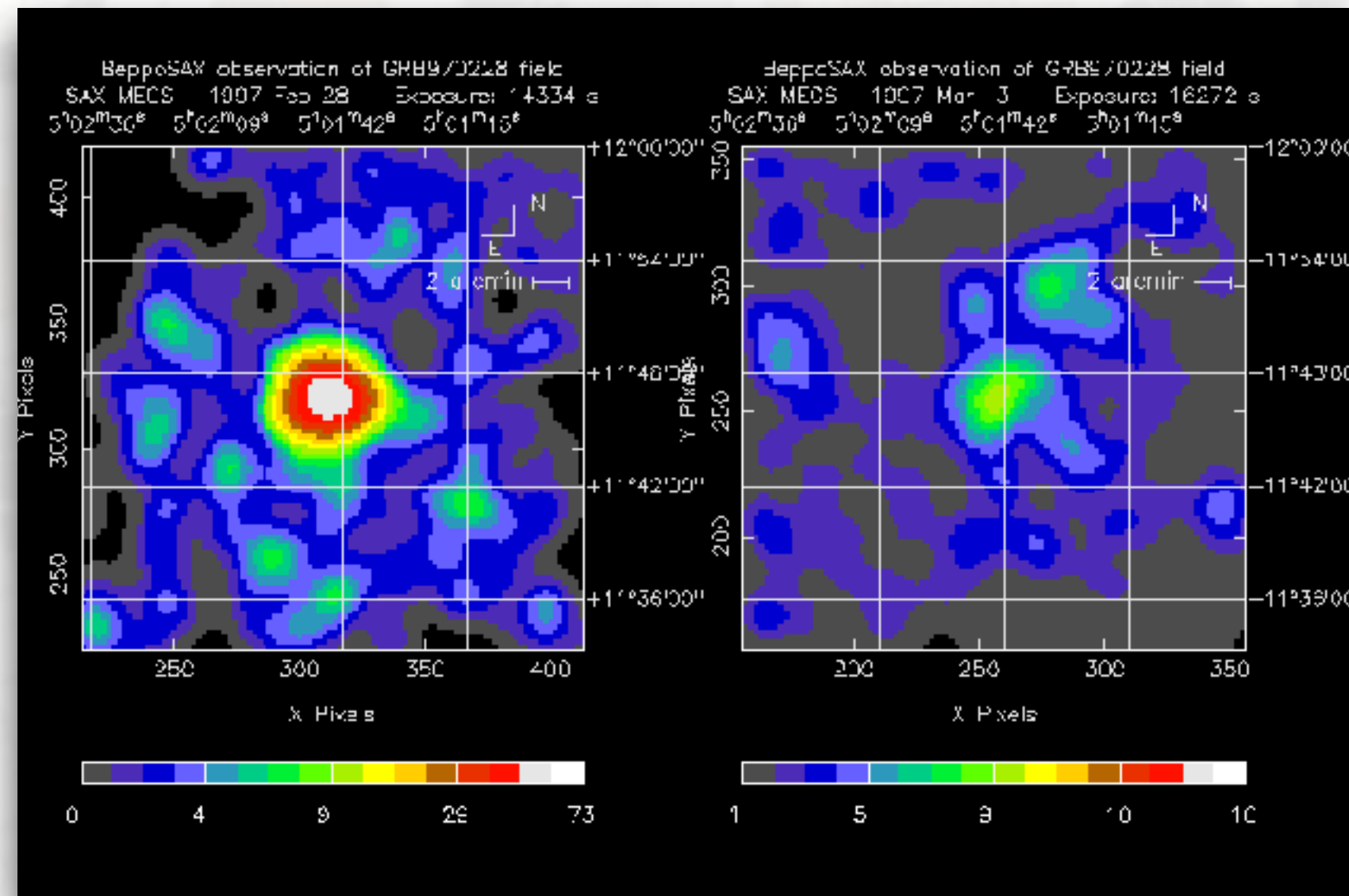
- Objet compact
- Jet ultra-relativiste
- GRB longs et courts
- Origine extra-galactique ?

Sursauts gamma : d'un phénomène gamma à multi-longueur d'onde

Le satellite *BeppoSAX*

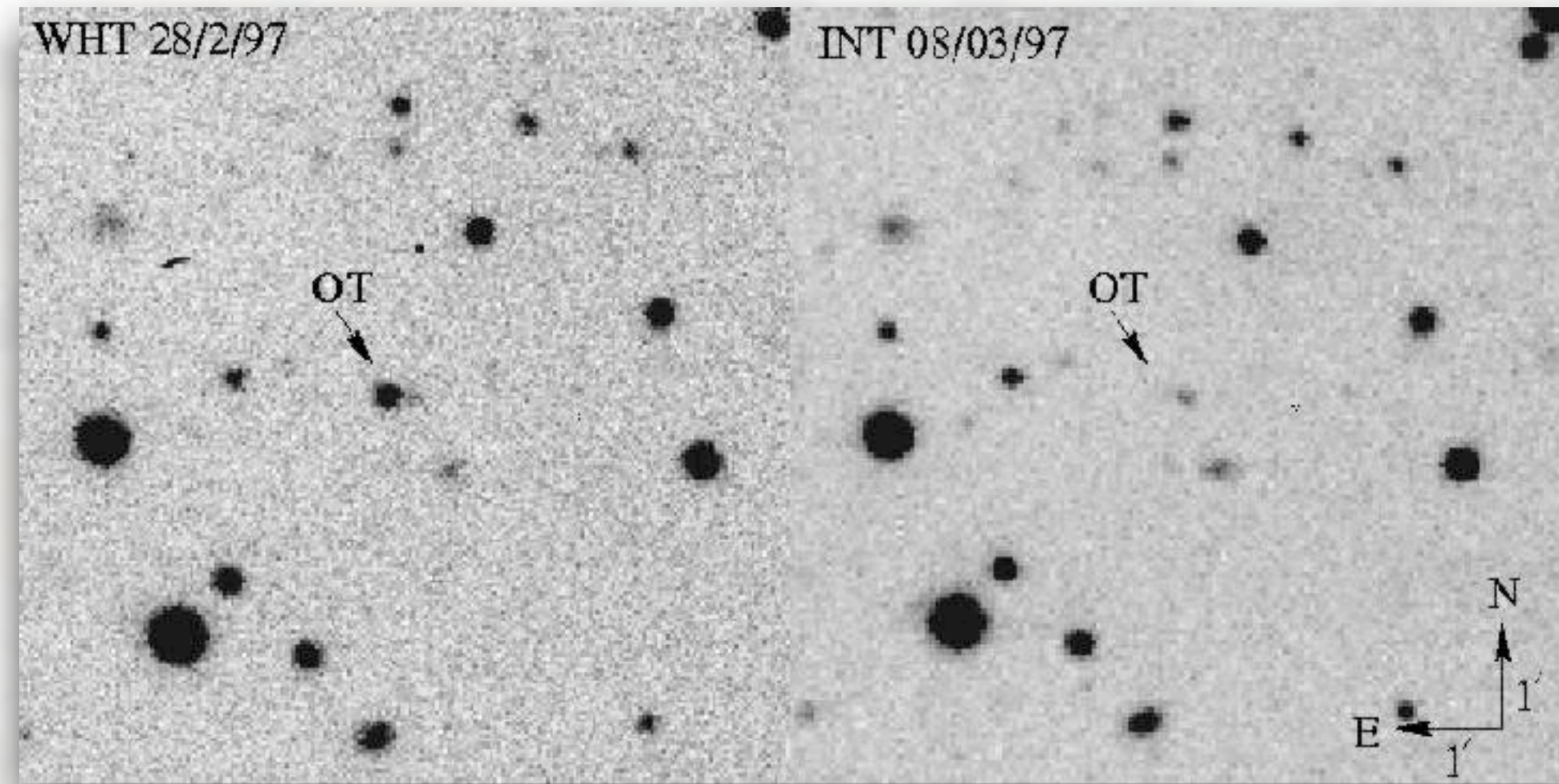


Credits: BeppoSAX Team



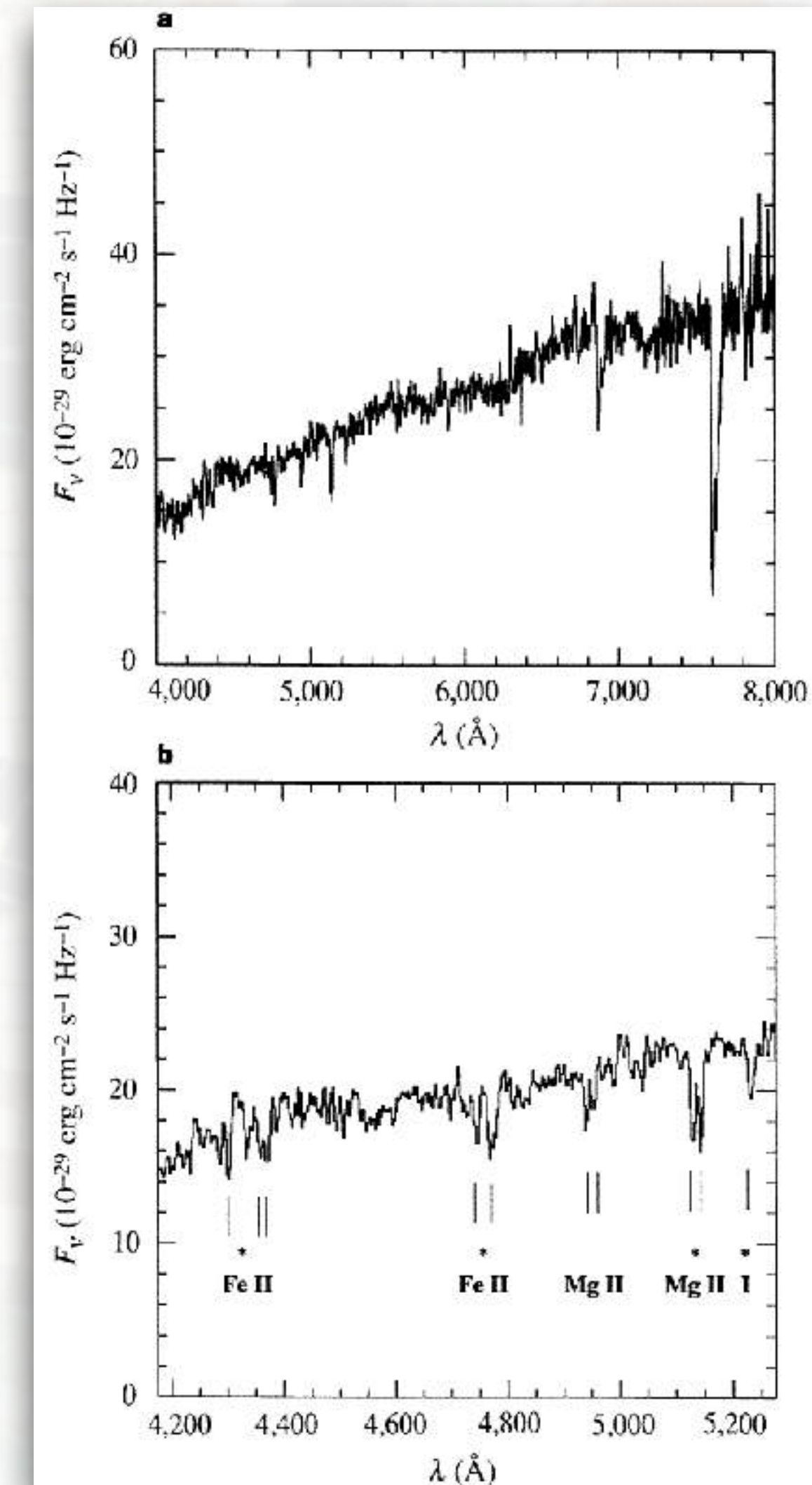
- 1997: Détection de l'émission rémanente (rayons X)
- localisation plus précise :
~arcmin (degrés pour les detections rayons gamma)

Sursauts gamma : d'un phénomène gamma à multi-longueur d'onde



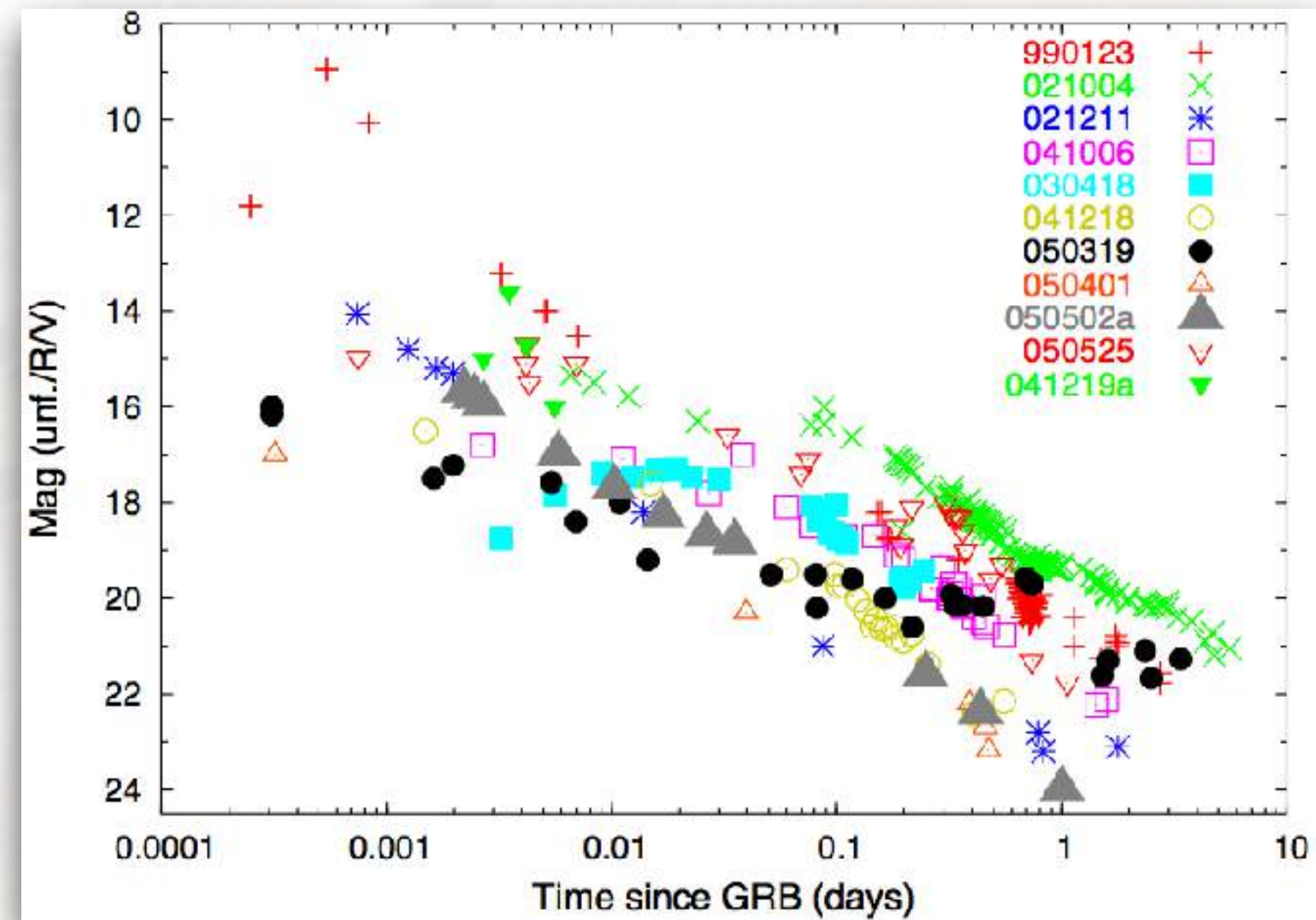
- première détection optique
- première mesure de redshift
- origine extra-galactique confirmée

Metzger et al. 1997



Sursauts gamma : d'un phénomène gamma à multi-longueur d'onde

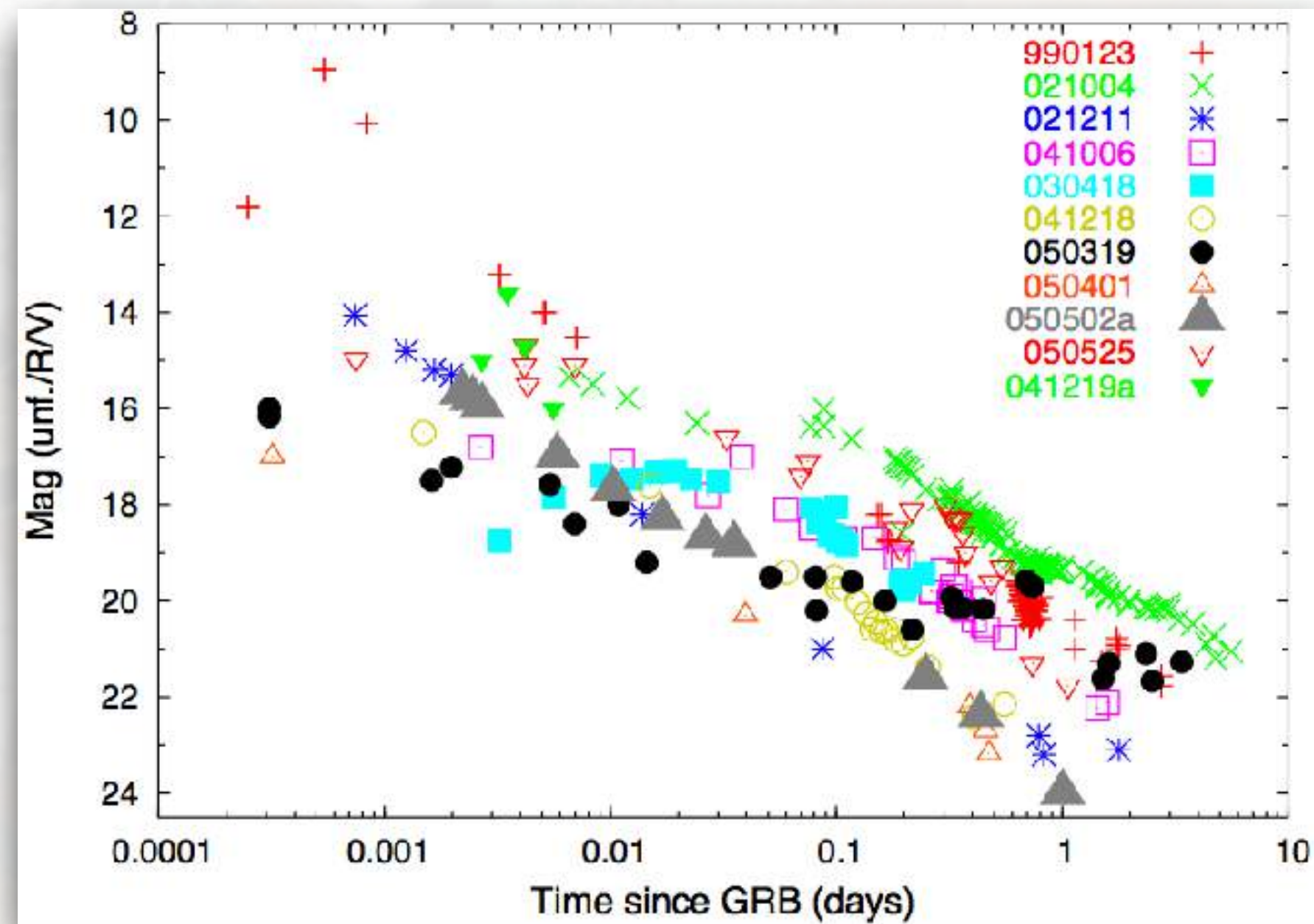
Guidorzi et al. 2005



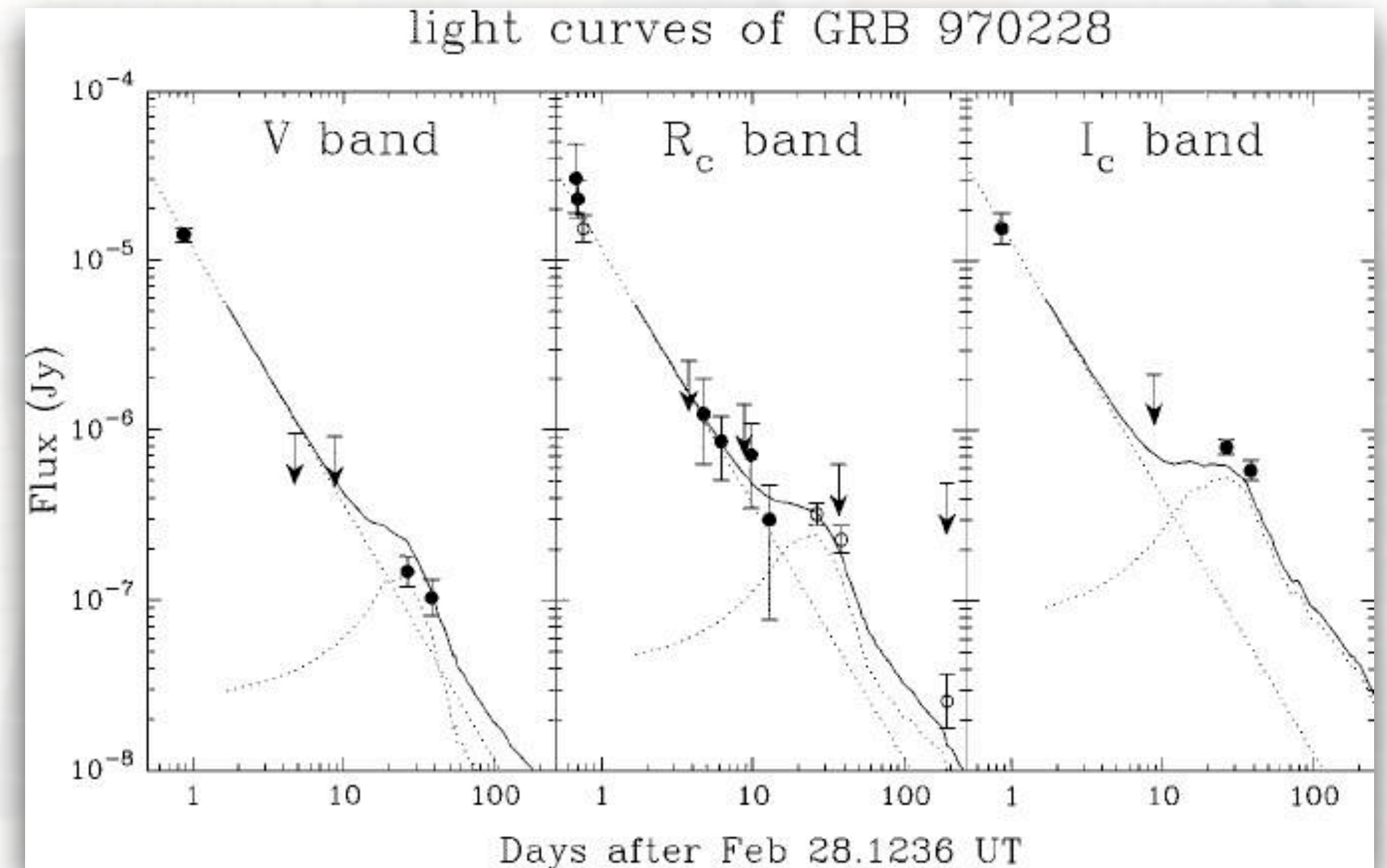
- première détection émission rémanente optique
- premières courbes de lumières
- durée : ~quelques jours (plusieurs années en radio)

Sursauts gamma : d'un phénomène gamma à multi-longueur d'onde

Guidorzi et al. 2005



Galama et al. 2000



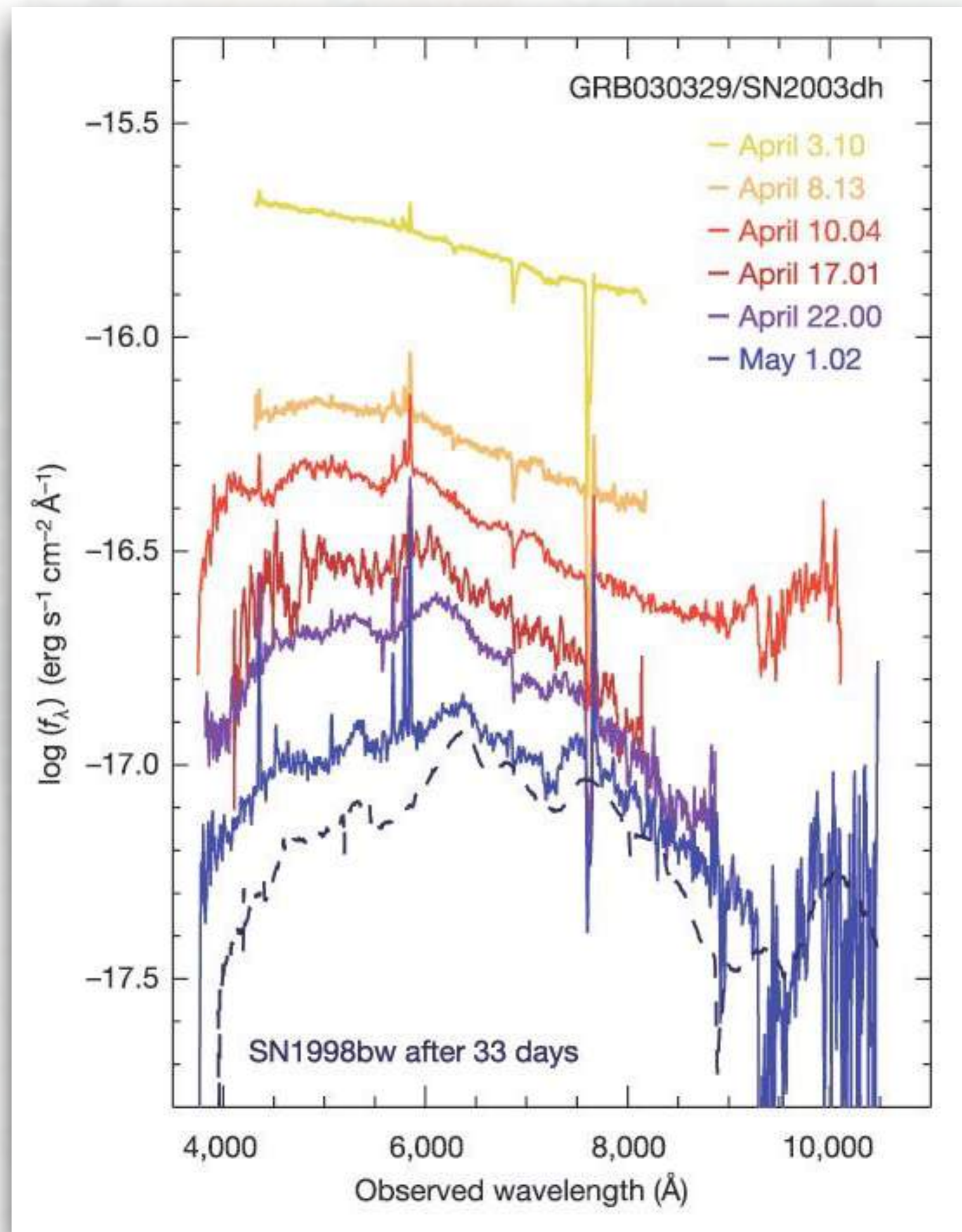
- première détection émission rémanente optique
- premières courbes de lumières
- durée : ~quelques jours (plusieurs années en radio)

GRB longs

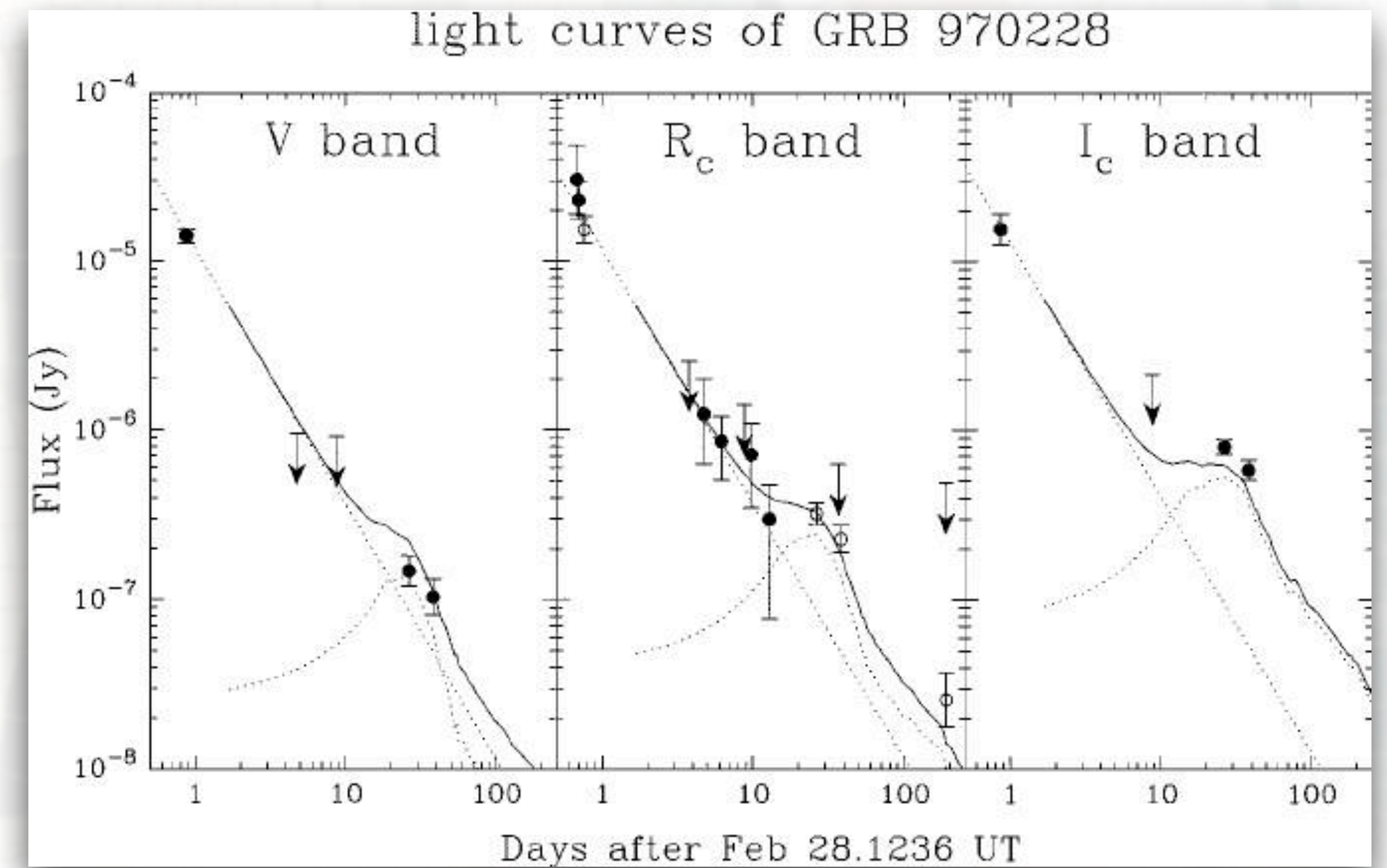
- Bosses \rightarrow Hypernovæ ?

Sursauts gamma : d'un phénomène gamma à multi-longueur d'onde

Hjorth+03



Galama et al. 2000

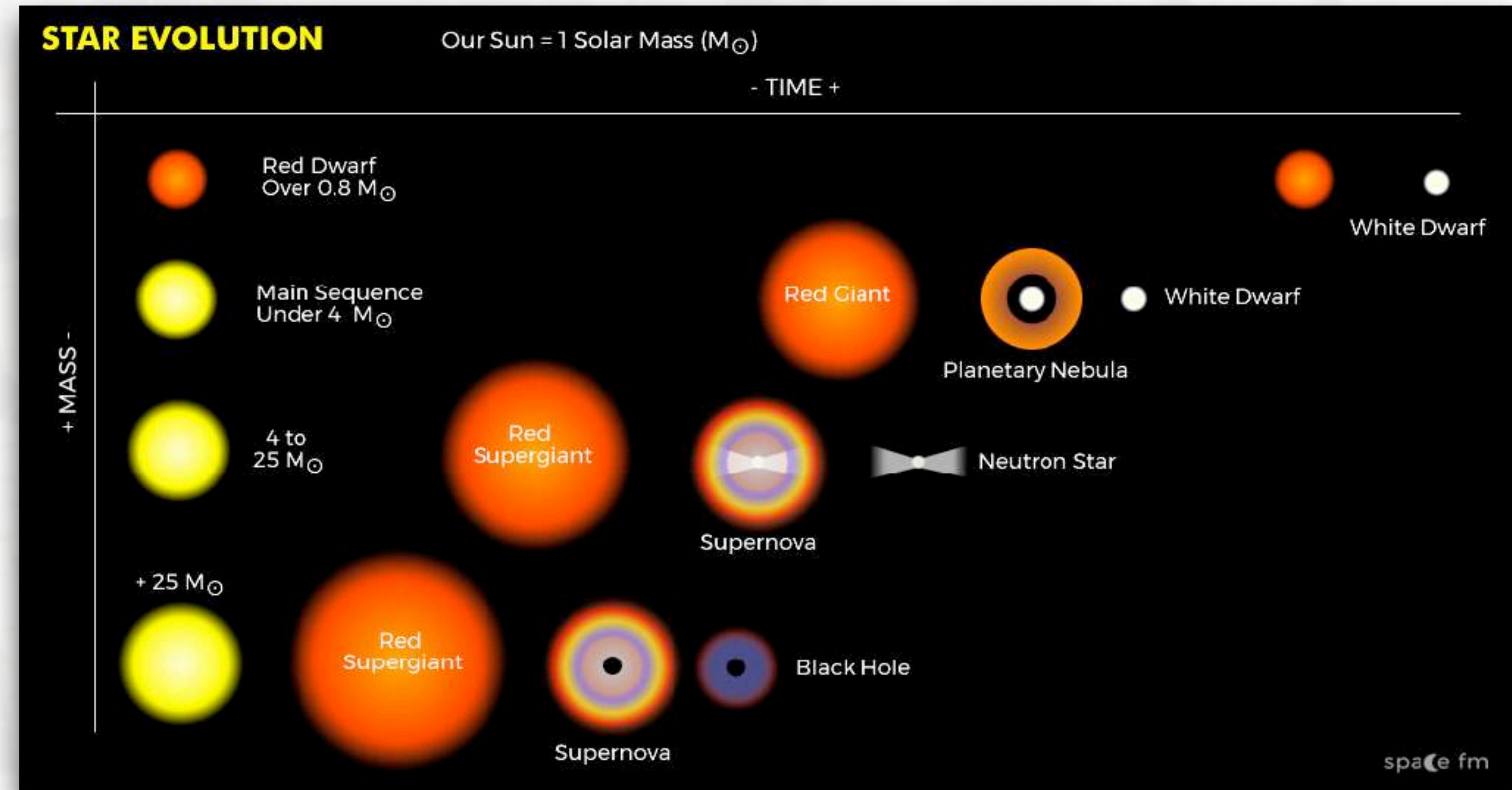
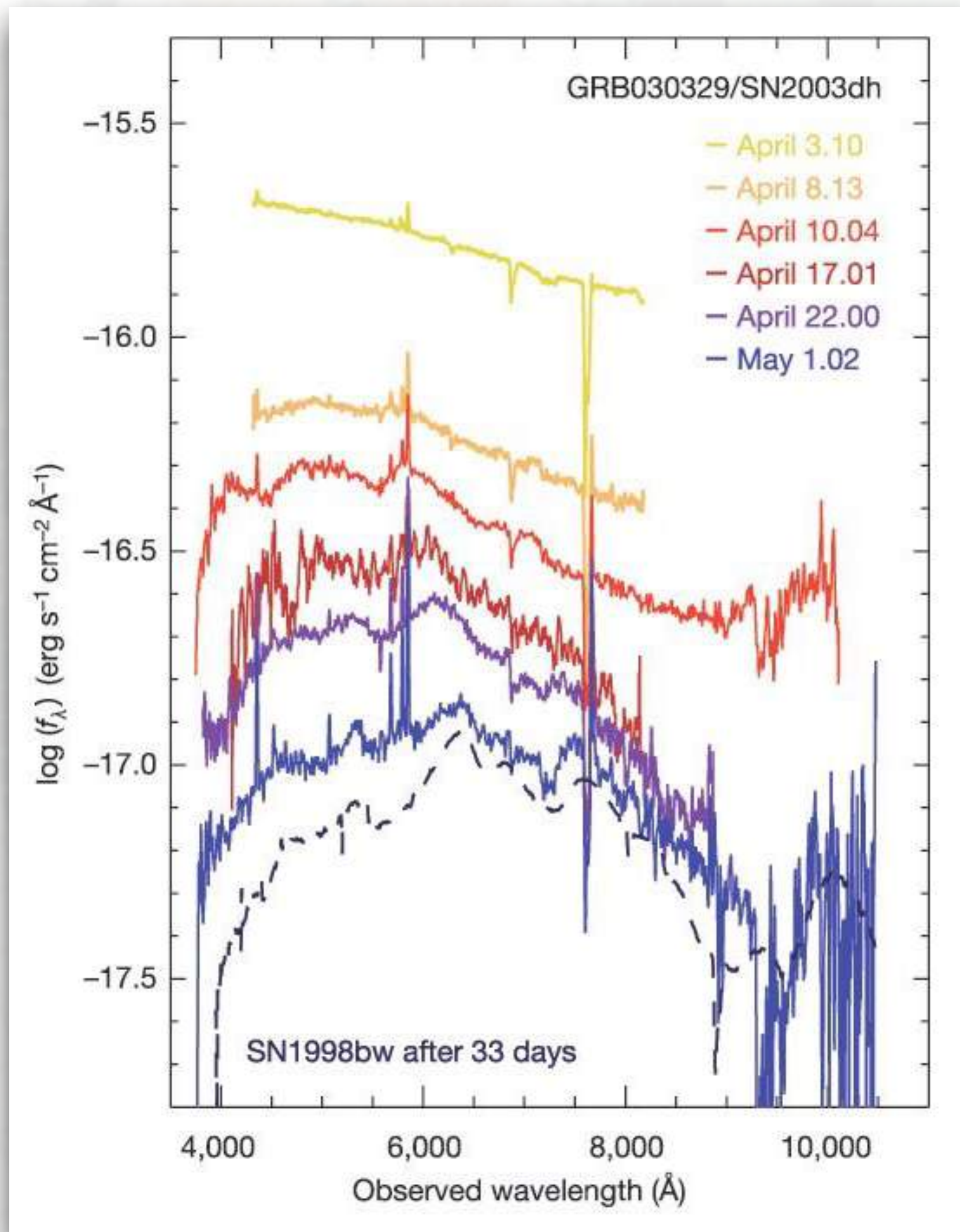


GRB longs

- Bosses —> Hypernovæ
Supernovæ type Ic *broad line*

Sursauts gamma : d'un phénomène gamma à multi-longueur d'onde

Hjorth+03



• Etoiles massives progéniteurs des GRB longs

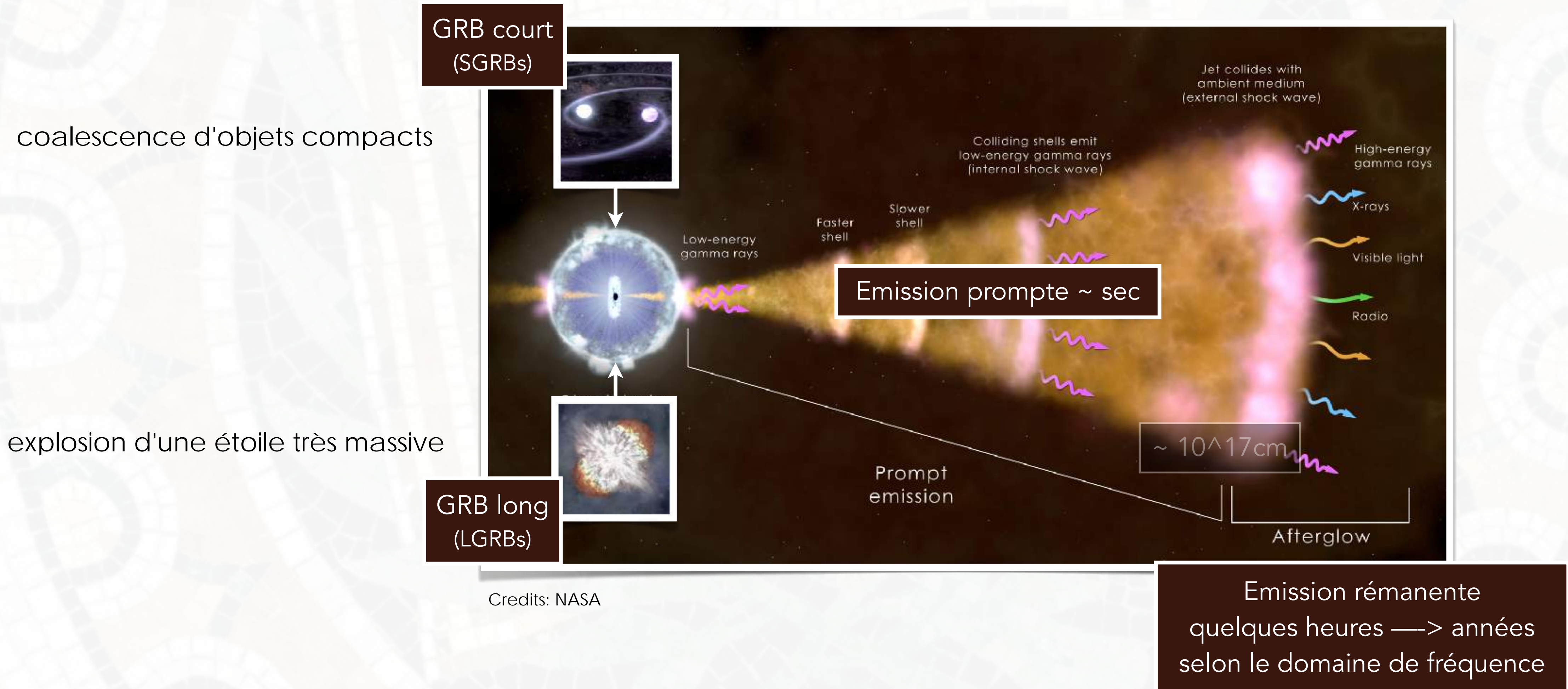
Sursauts gamma : d'un phénomène gamma à multi-longueur d'onde

- Objet compact
 - GRB longs: trou noir produit par effondrement étoile massive
- Jet ultra-relativiste
- GRB longs et courts
- Origine extra-galactique

Sursauts gamma : d'un phénomène gamma à multi-longueur d'onde

Les Sursauts gamma (GRBs)

jets ultra-relativistes associés à la formation cataclysmique de trous noirs



Credits: NASA

Sursauts gamma : d'un phénomène gamma à multi-longueur d'onde

- Phénomène gamma —> multi-longueur d'onde
- **Etude des propriétés de l'émission rémanente et du jet**
- Sondes de l'univers lointain

Sursauts gamma : étude émission rémanente & jet

Niel Gehrels Swift Observatory



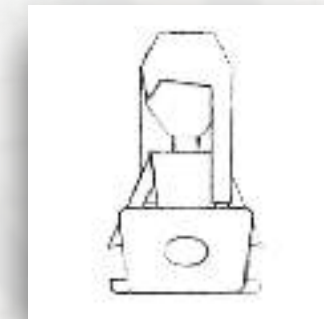
Alerte

Secondes



Grands télescopes

Secondes



ToO (heures)



Secondes



Télescopes robotiques



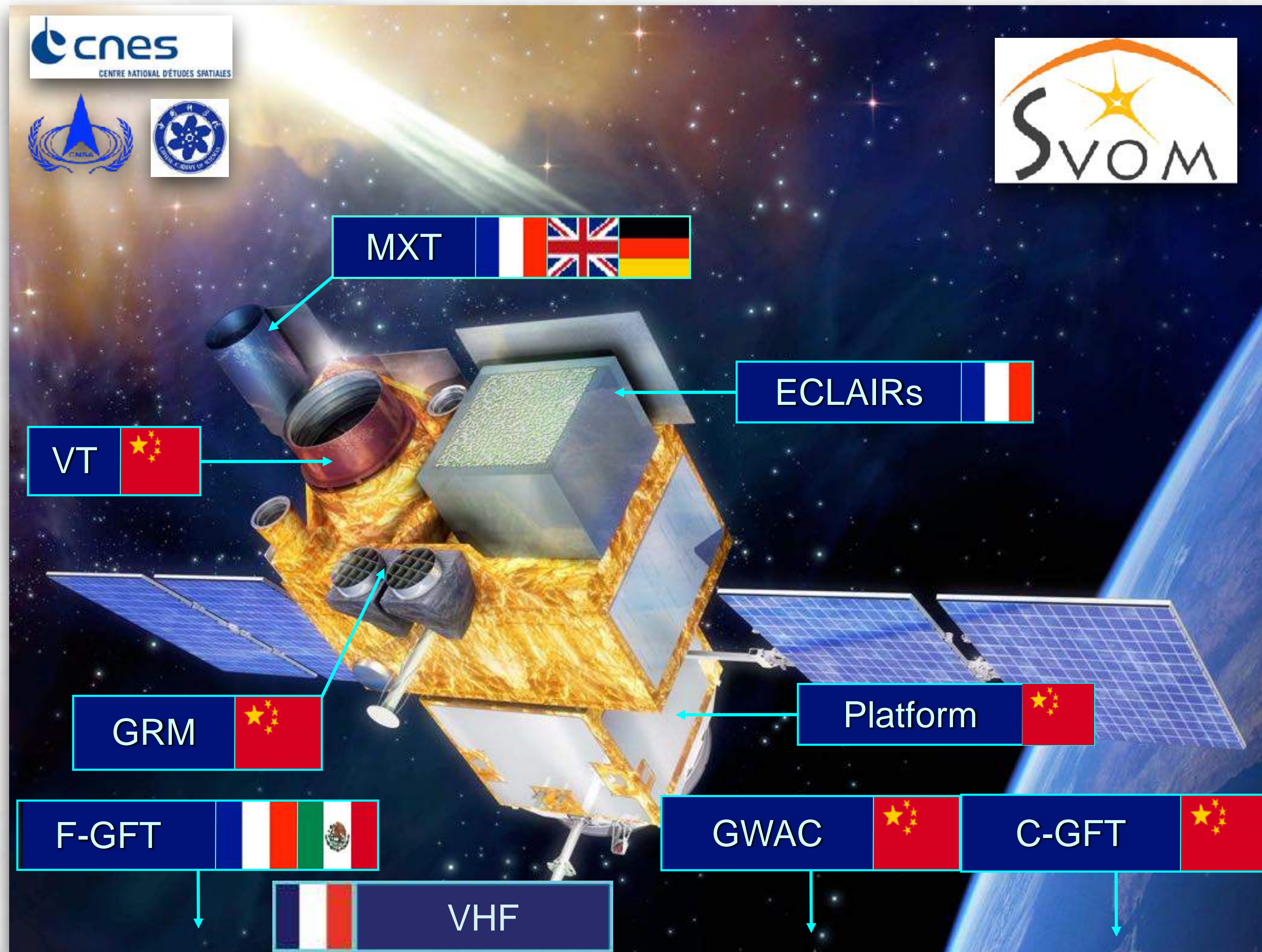
+



+



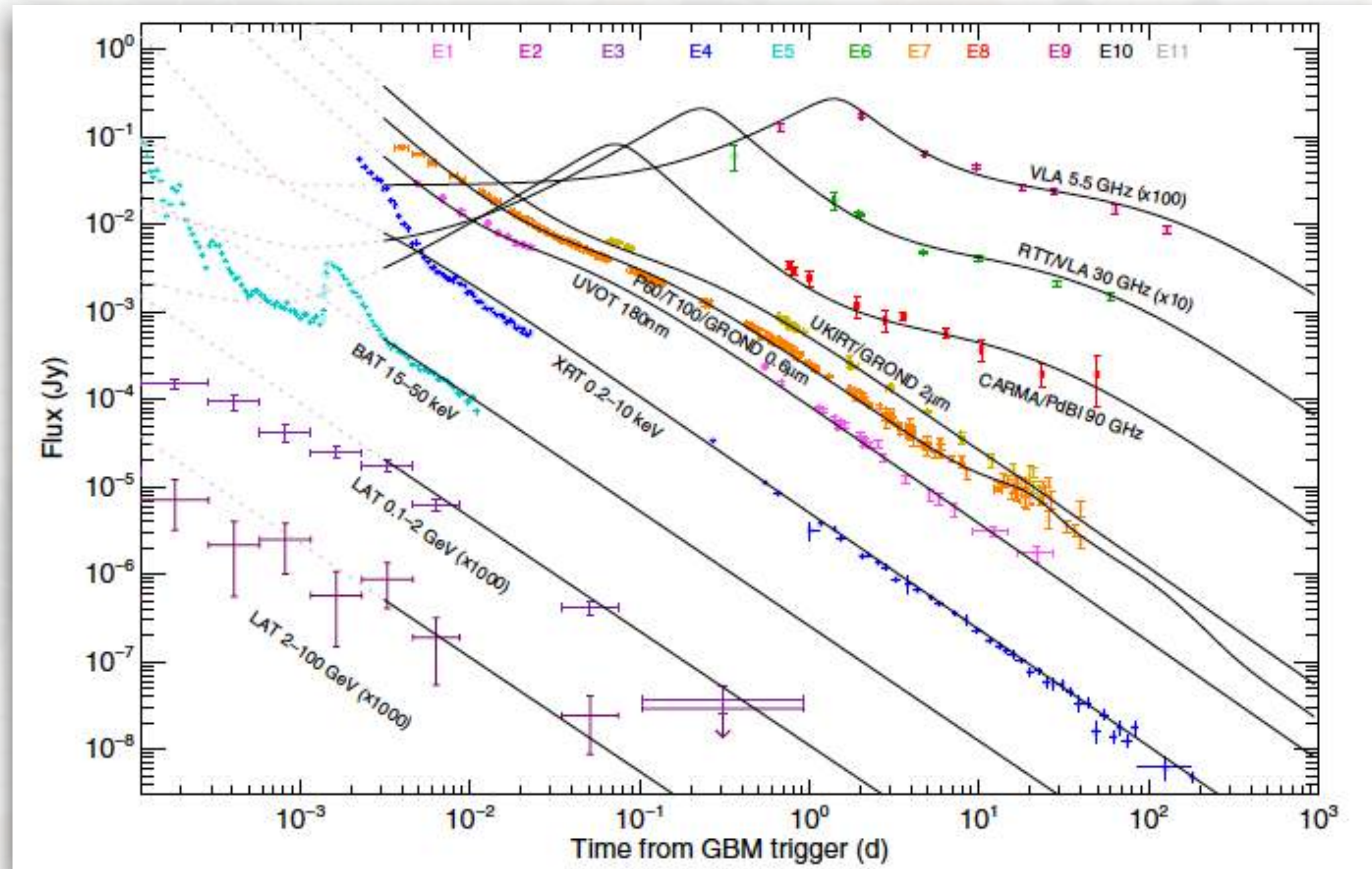
Sursauts gamma : étude émission rémanente & jet



Sursauts gamma : étude émission rémanente & jet

GRB 130427A

Perley+14



Sursauts gamma : étude émission rémanente & jet

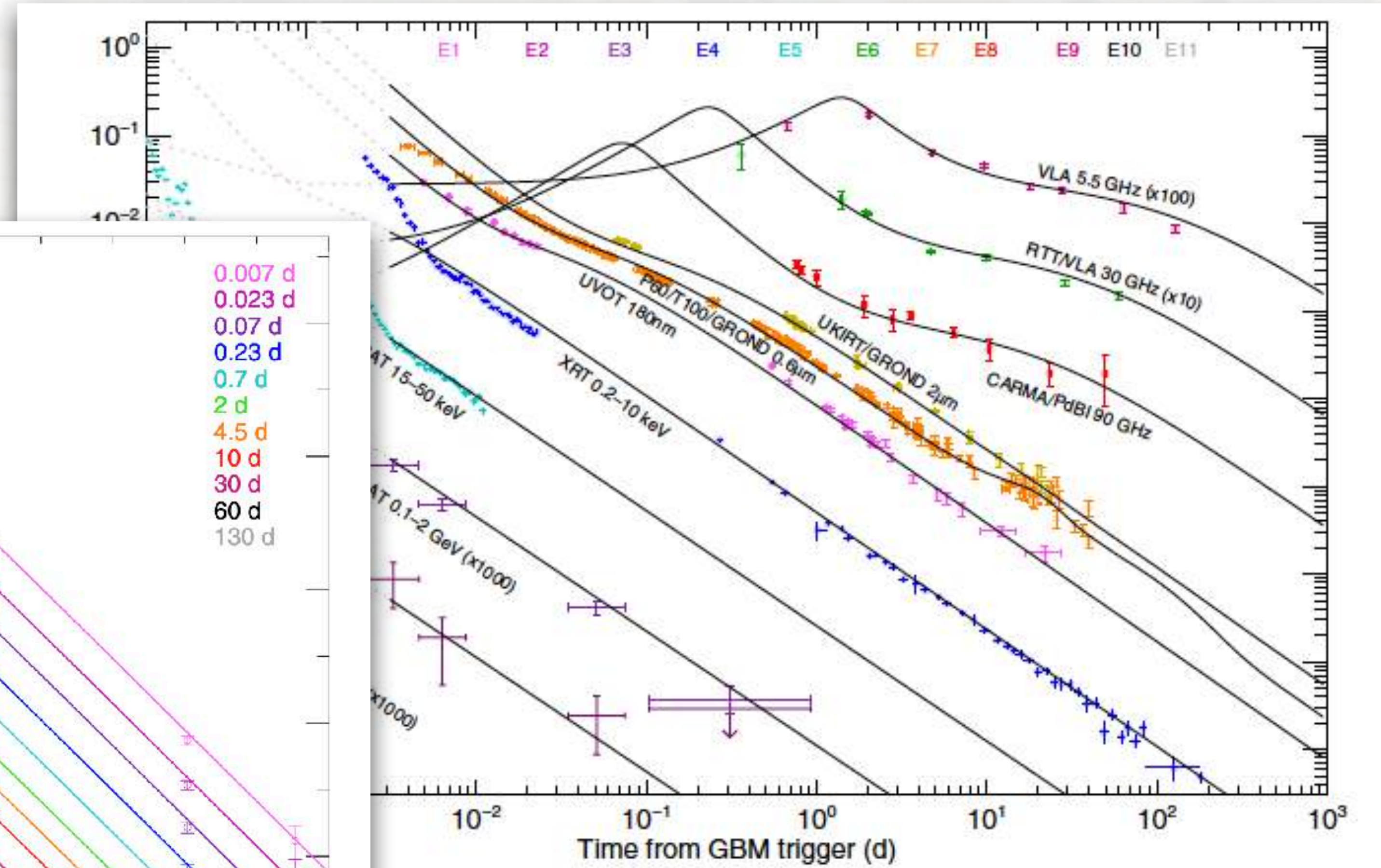
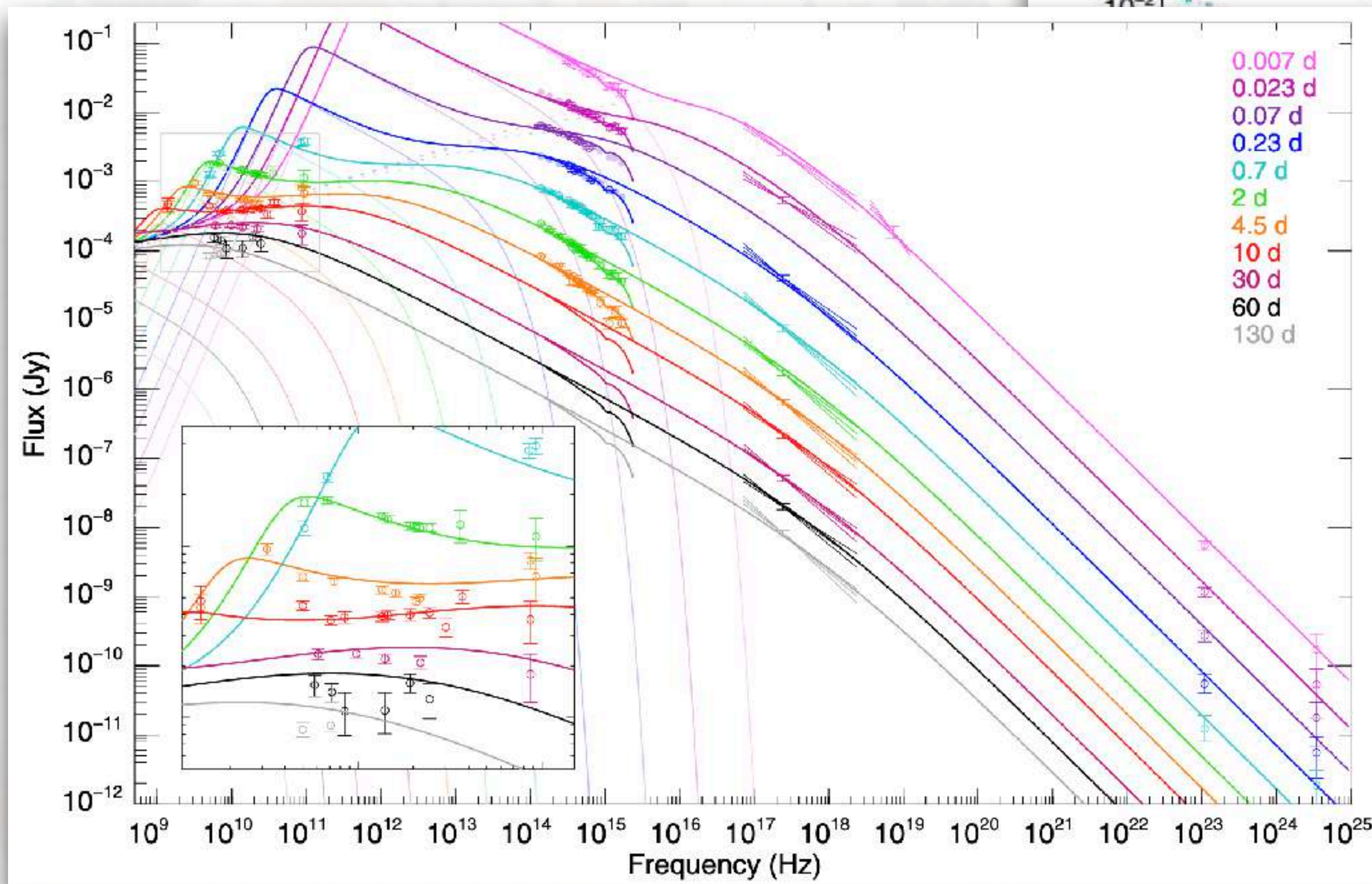
GRB 130427A

Perley+14

Radio

Optique

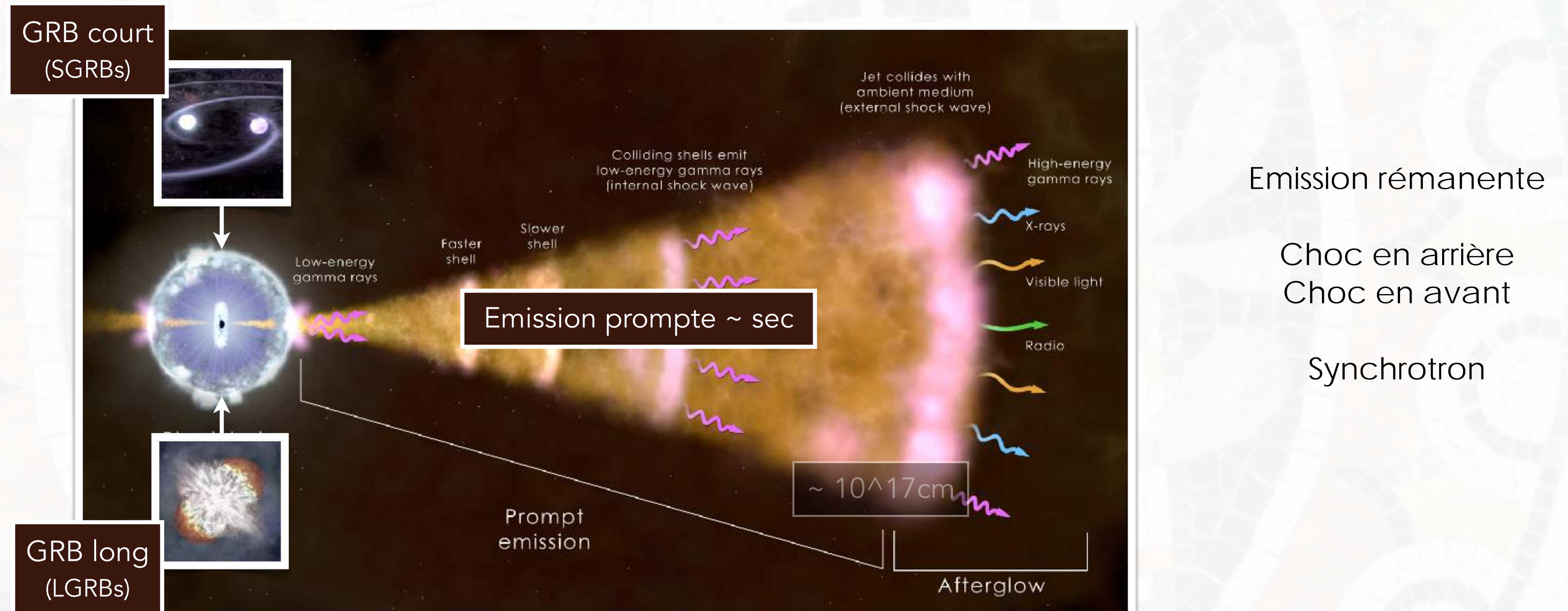
X



Sursauts gamma : étude émission rémanente & jet

Les Sursauts gamma (GRBs)

jets ultra-relativistes associés à la formation cataclysmique de trous noirs



Credits: NASA

Emission rémanente
quelques heures \rightarrow années
selon le domaine de fréquence

Sursauts gamma : étude émission rémanente & jet

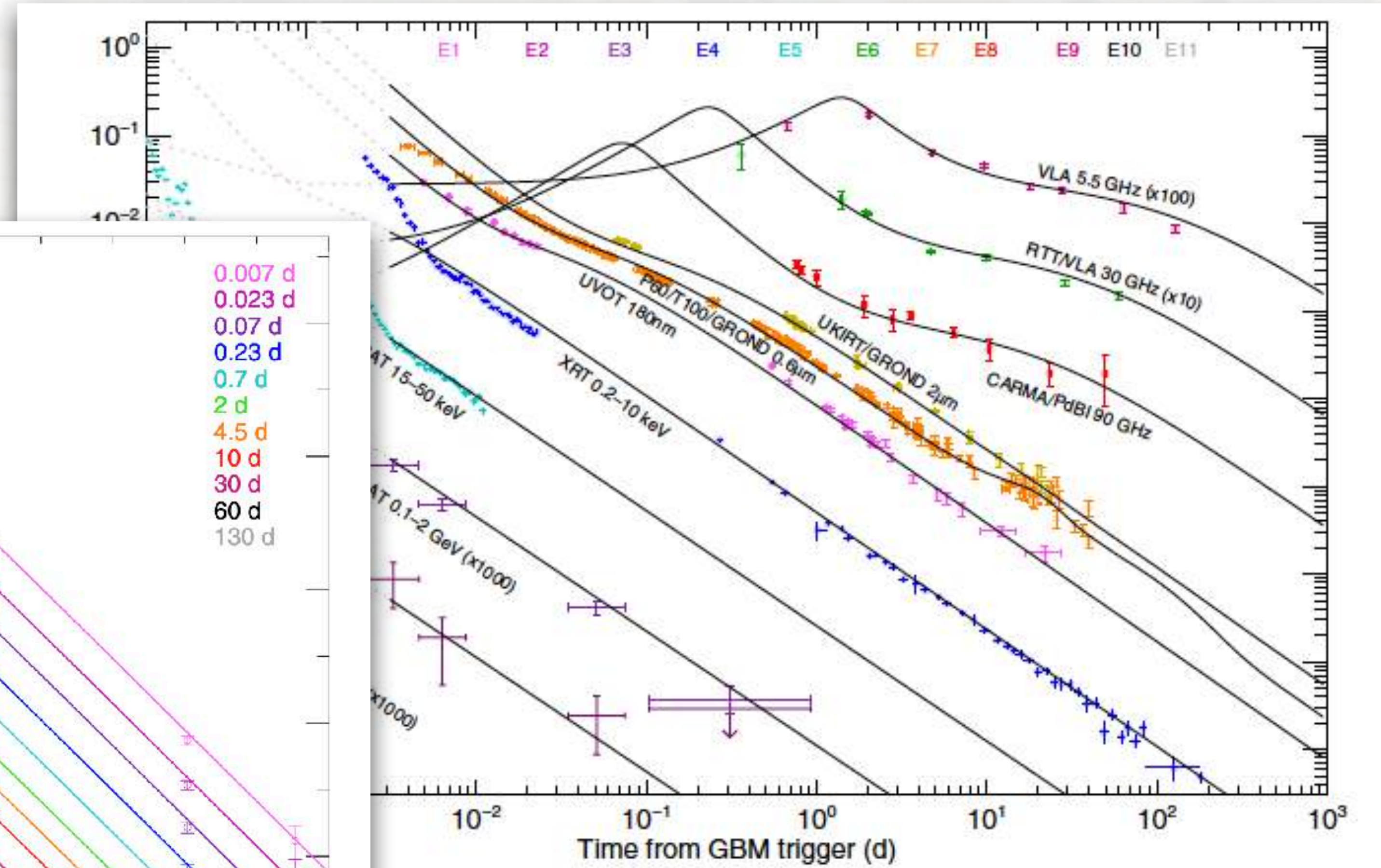
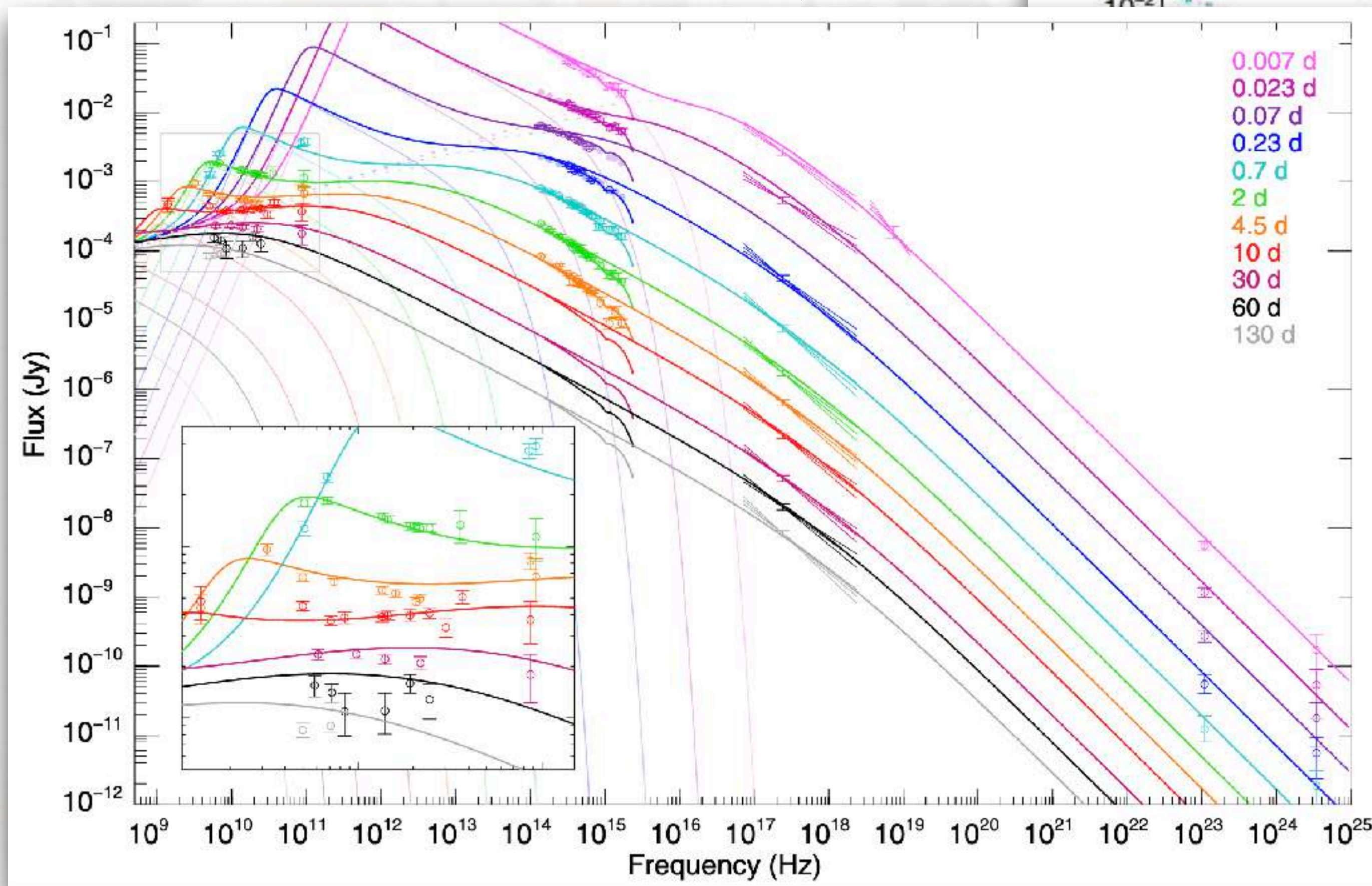
GRB 130427A

Perley+14

Radio

Optique

X



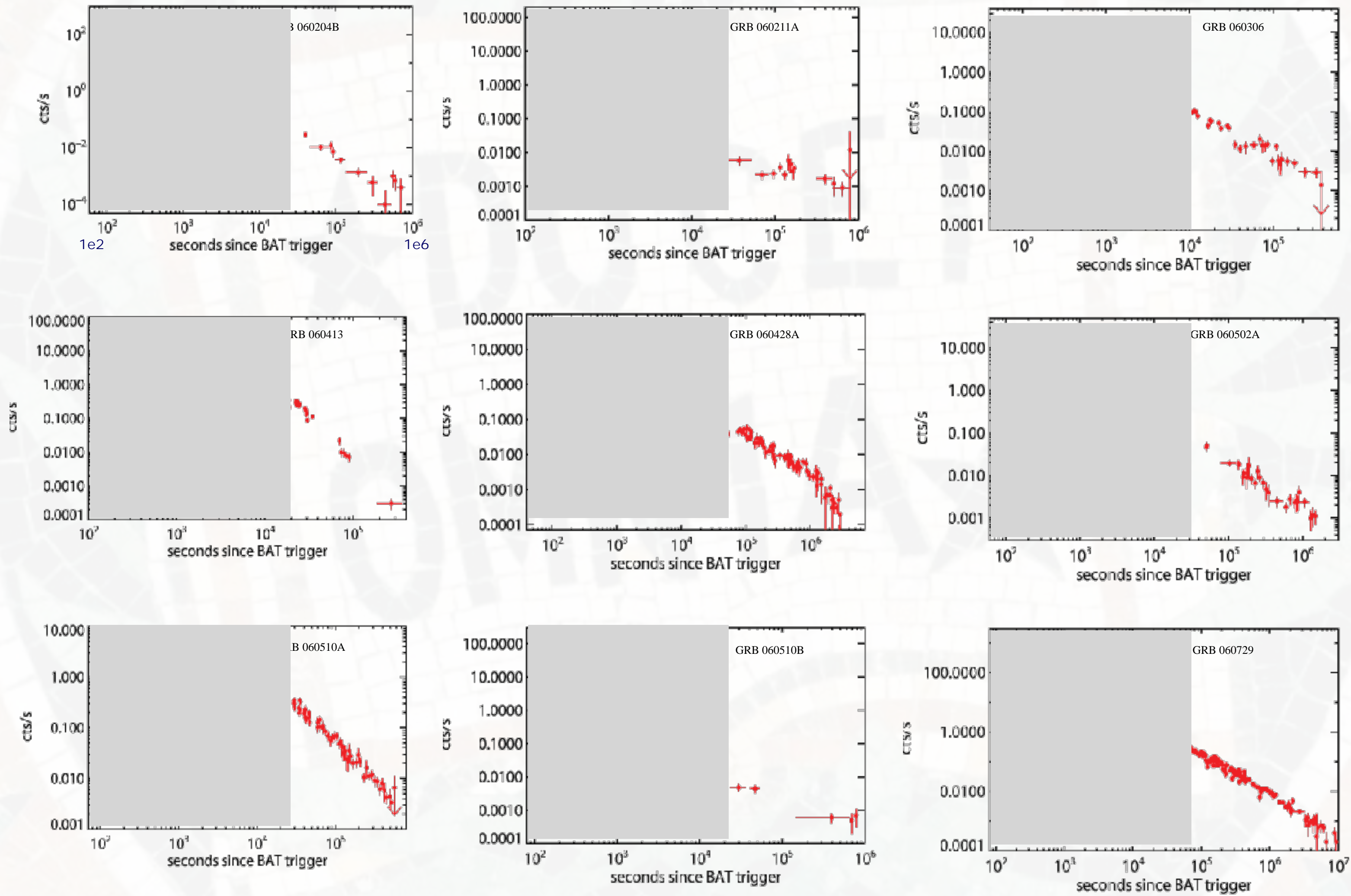
Sursauts gamma : étude émission rémanente & jet



50-100 fois plus sensible
que les télescopes radio actuels

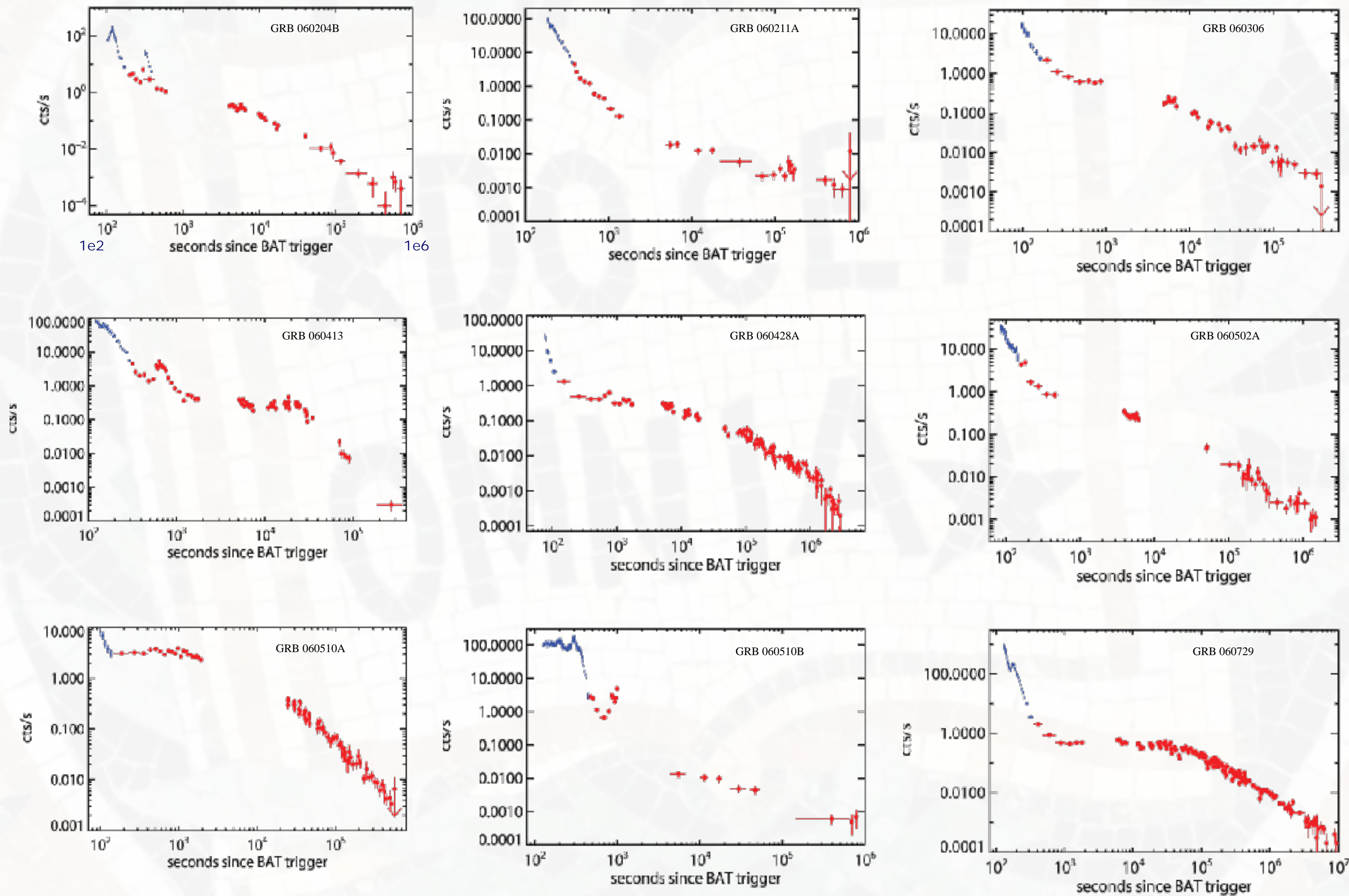
Sursauts gamma : étude émission rémanente & jet

Burrows et al. 2008



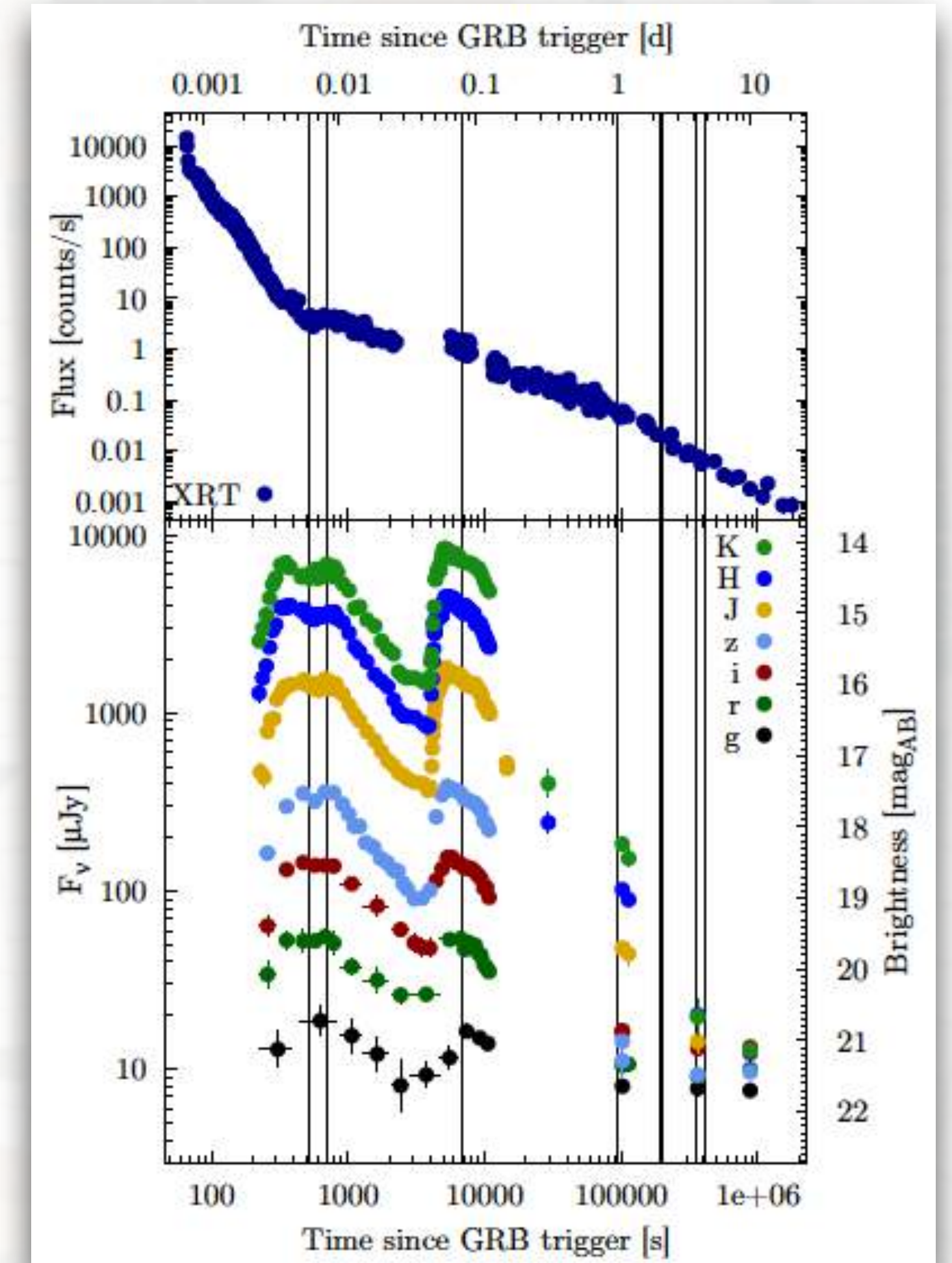
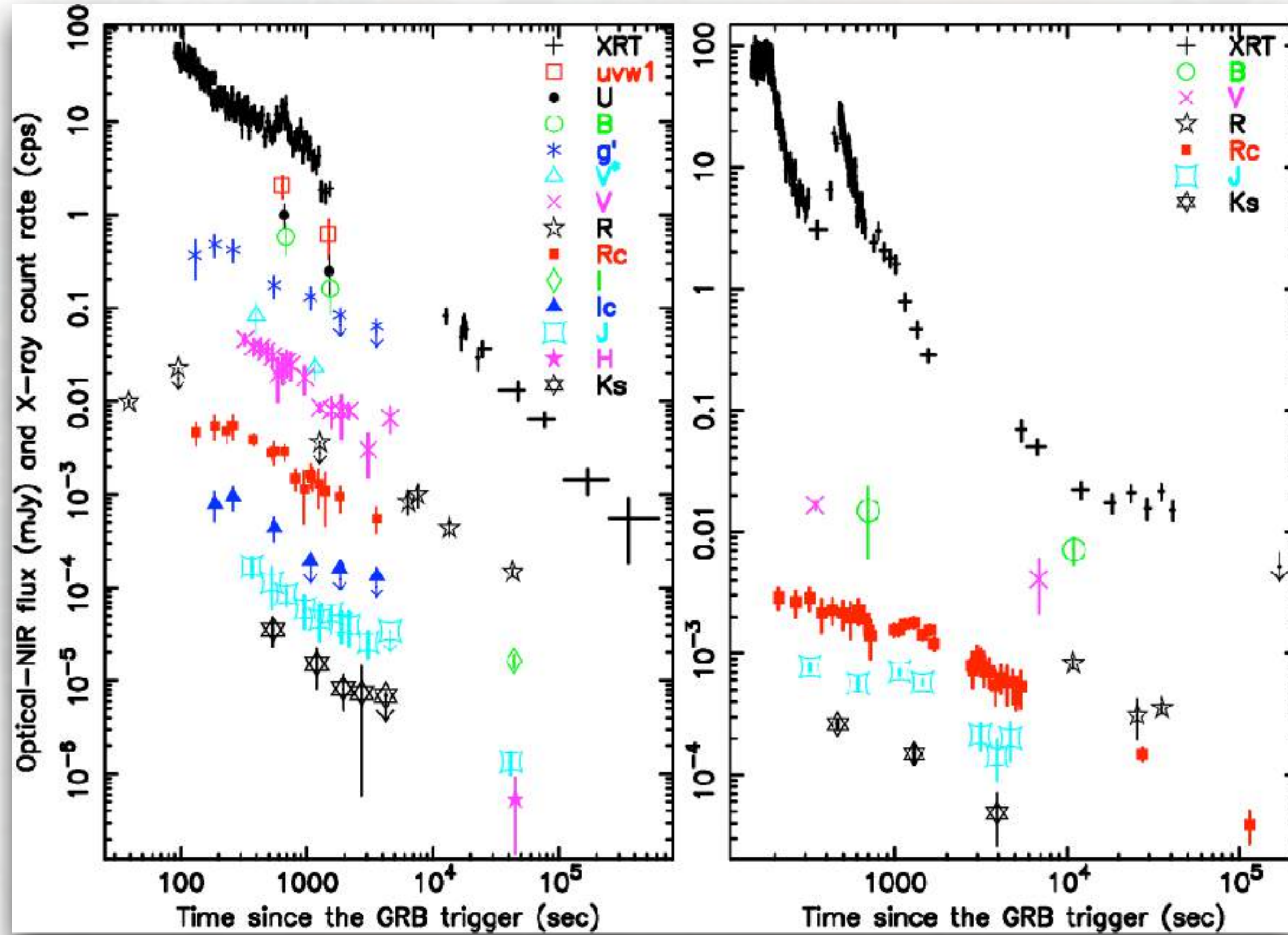
Sursauts gamma : étude émission rémanente & jet

Burrows et al. 2008



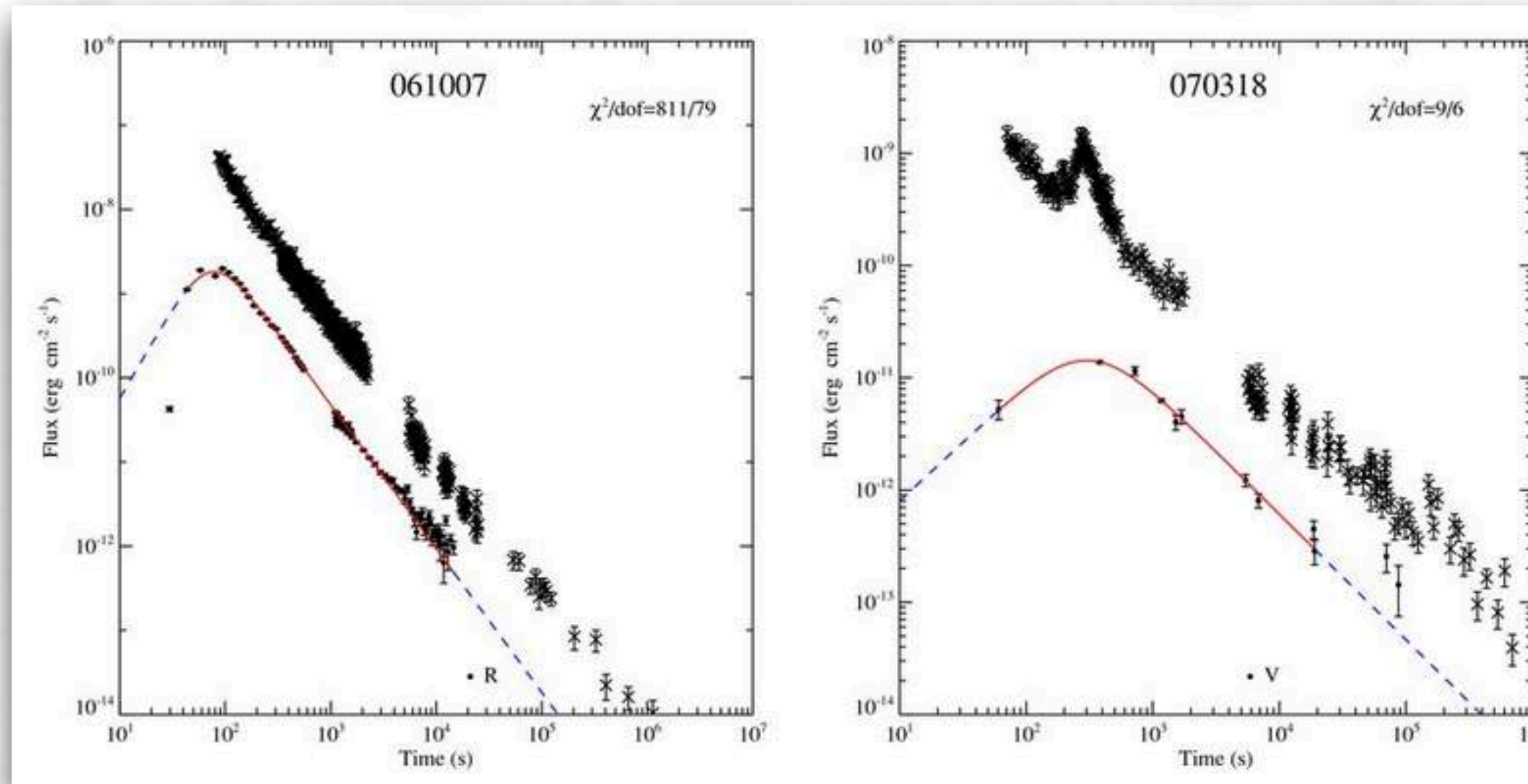
Plateaux
et flares

Sursauts gamma : étude émission rémanente & jet

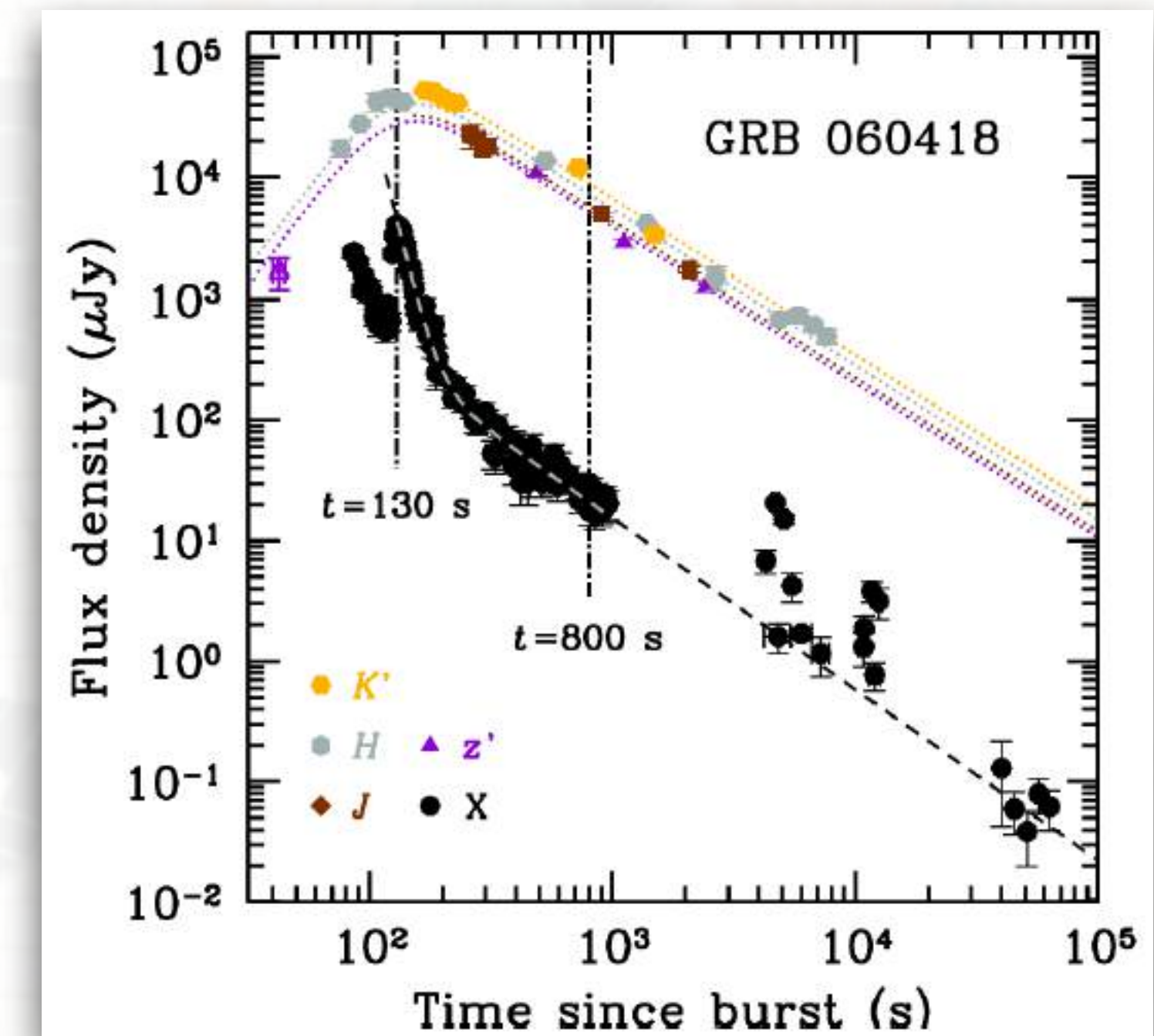


Sursauts gamma : étude émission rémanente & jet

Liang+2009



Molinari, Vergani+2007



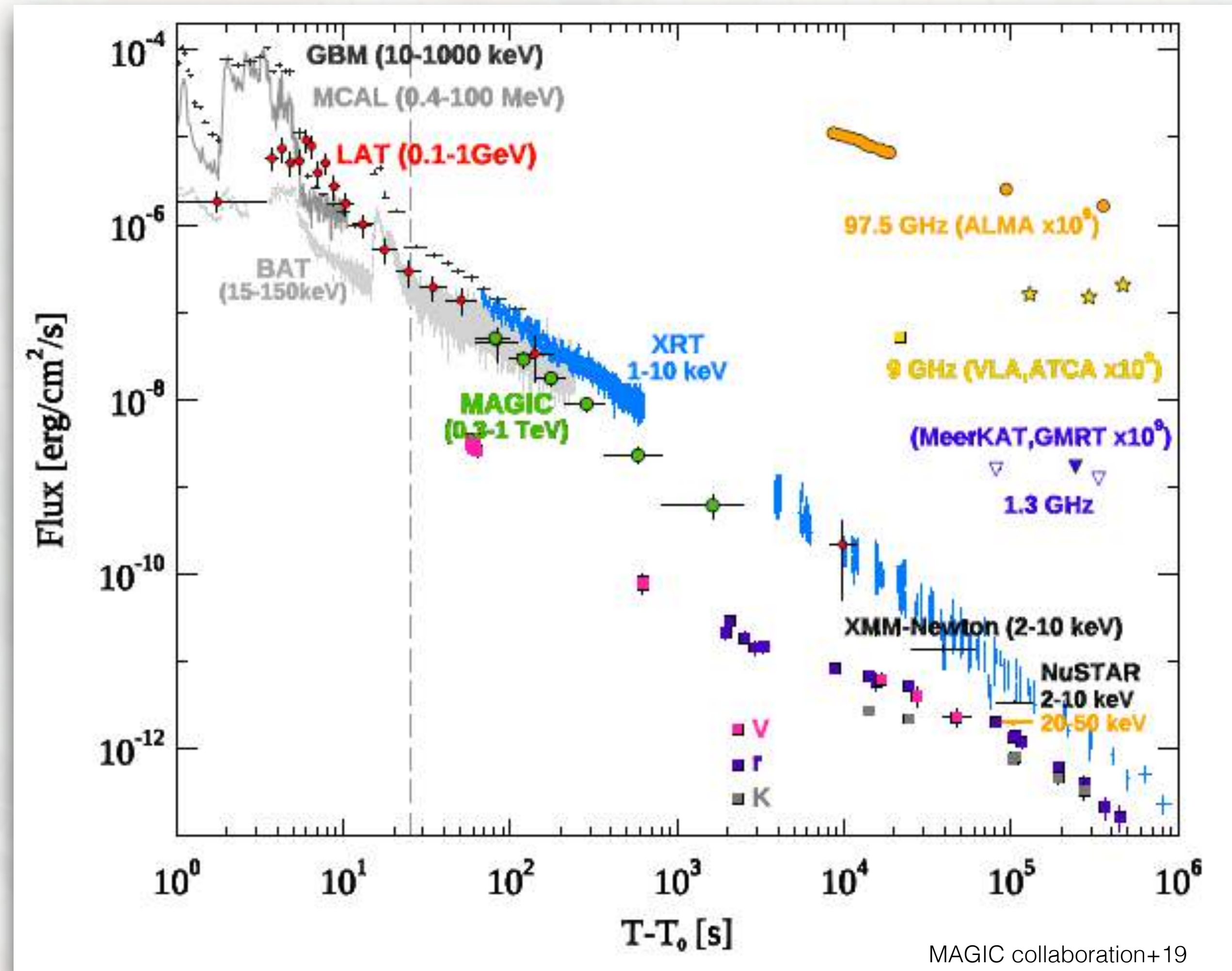
$\Gamma \sim$ quelques centaines

$$\Gamma = 1 / (1 - v^2 / c^2)^{1/2}$$

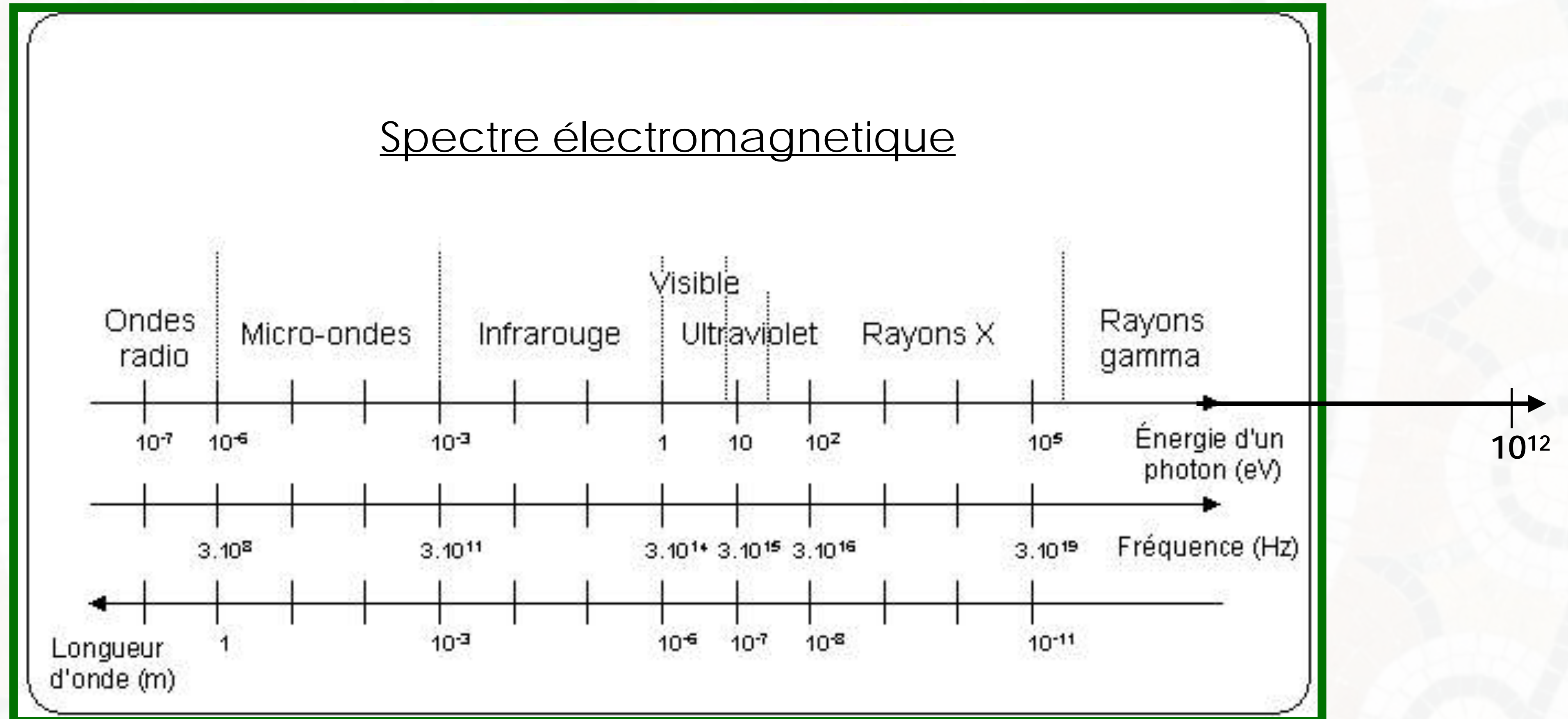
$$v > 0.99995 c$$

Sursauts gamma : étude émission rémanente & jet

GRB190114C



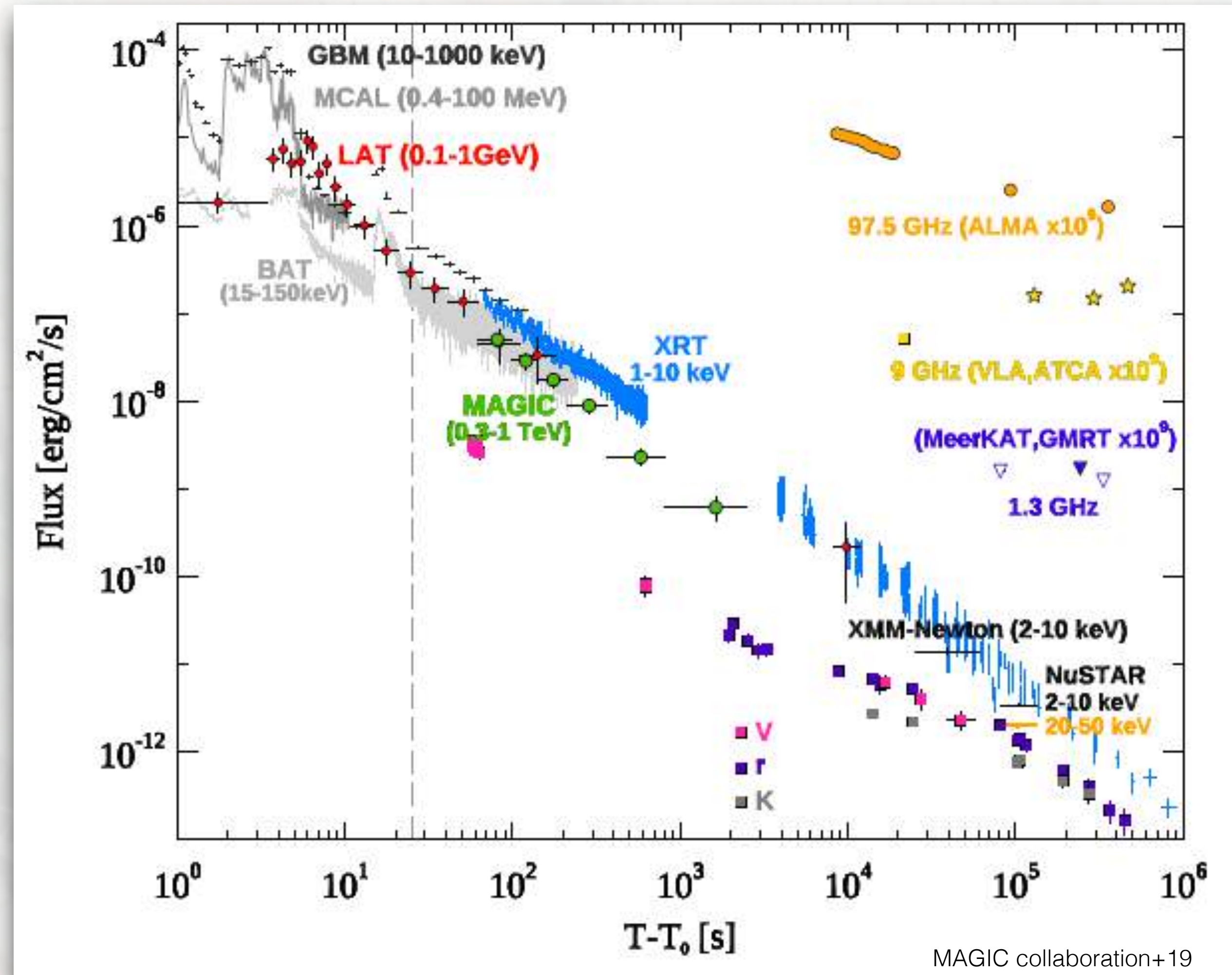
Sursauts gamma : étude émission rémanente & jet



Sursauts gamma : étude émission rémanente & jet

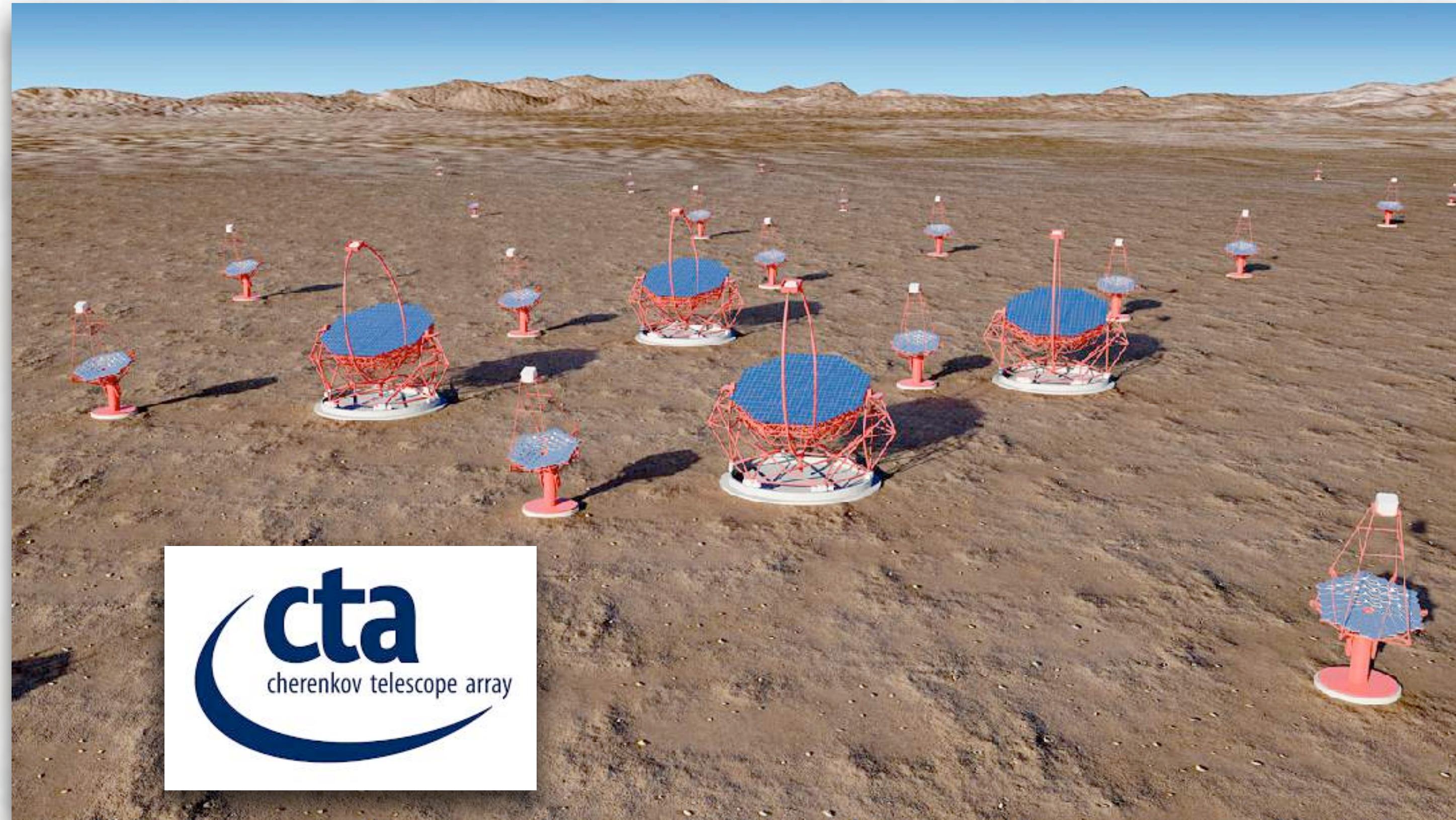
Télescopes Cherenkov

GRB190114C



MAGIC collaboration+19

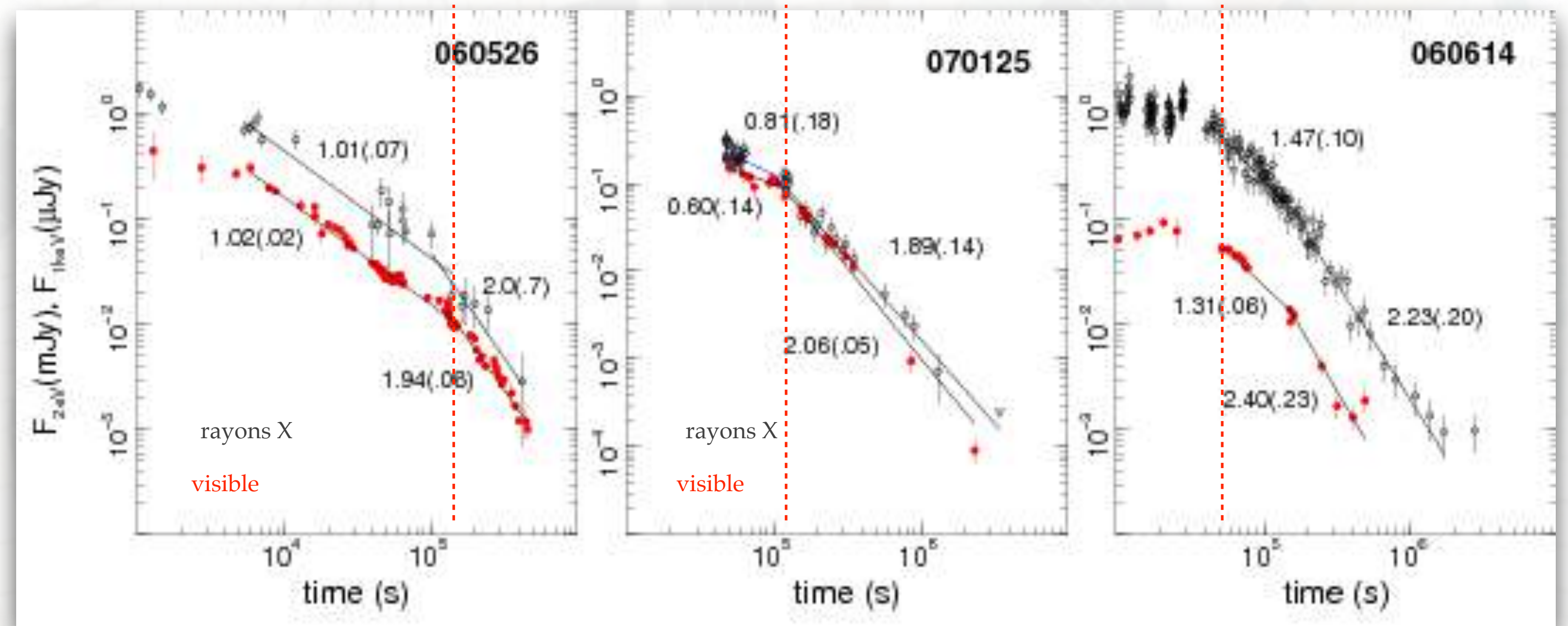
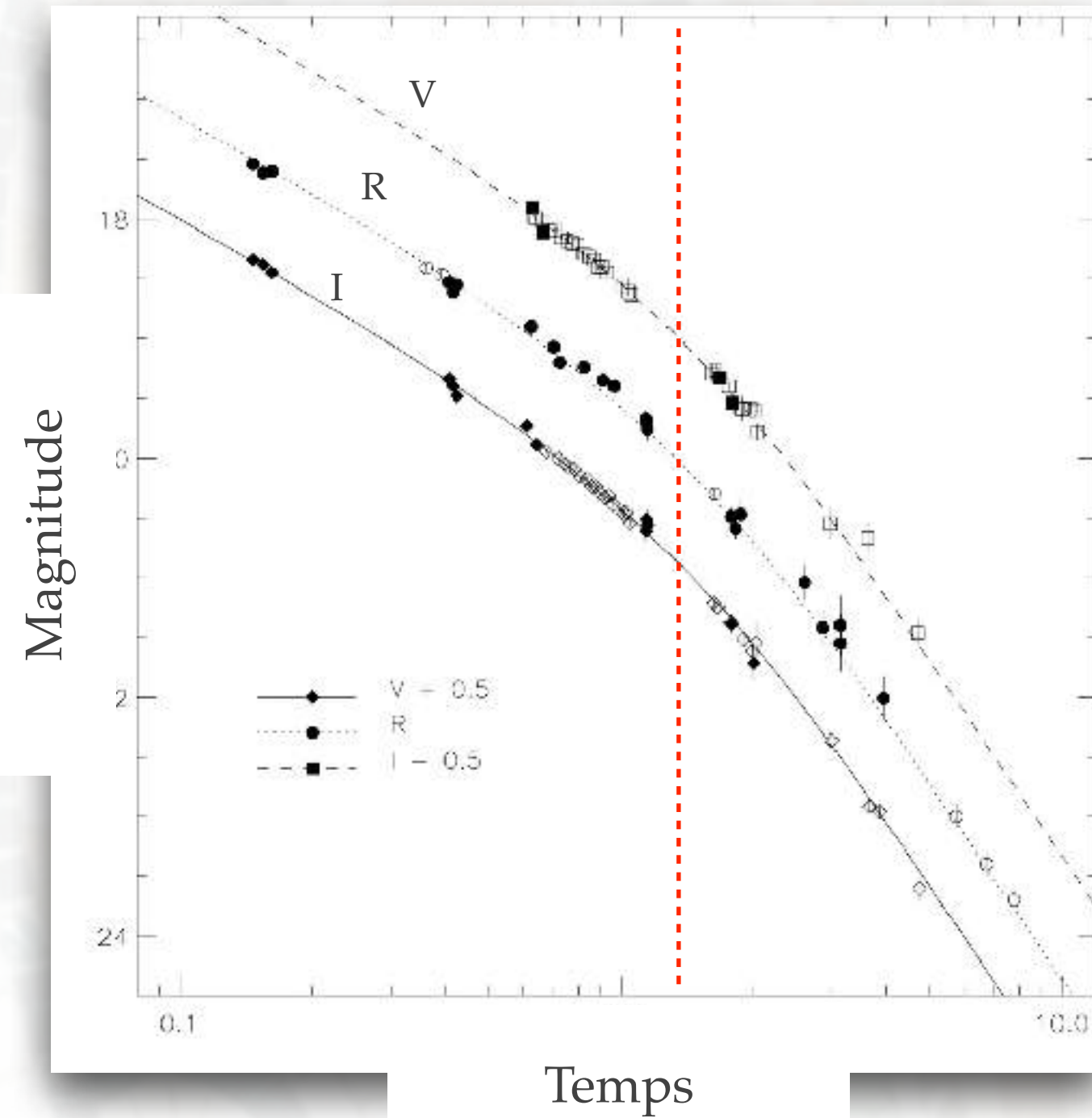
Sursauts gamma : étude émission rémanente & jet



10 fois plus sensible
que les télescopes gamma actuels
...et jusqu'au PeV

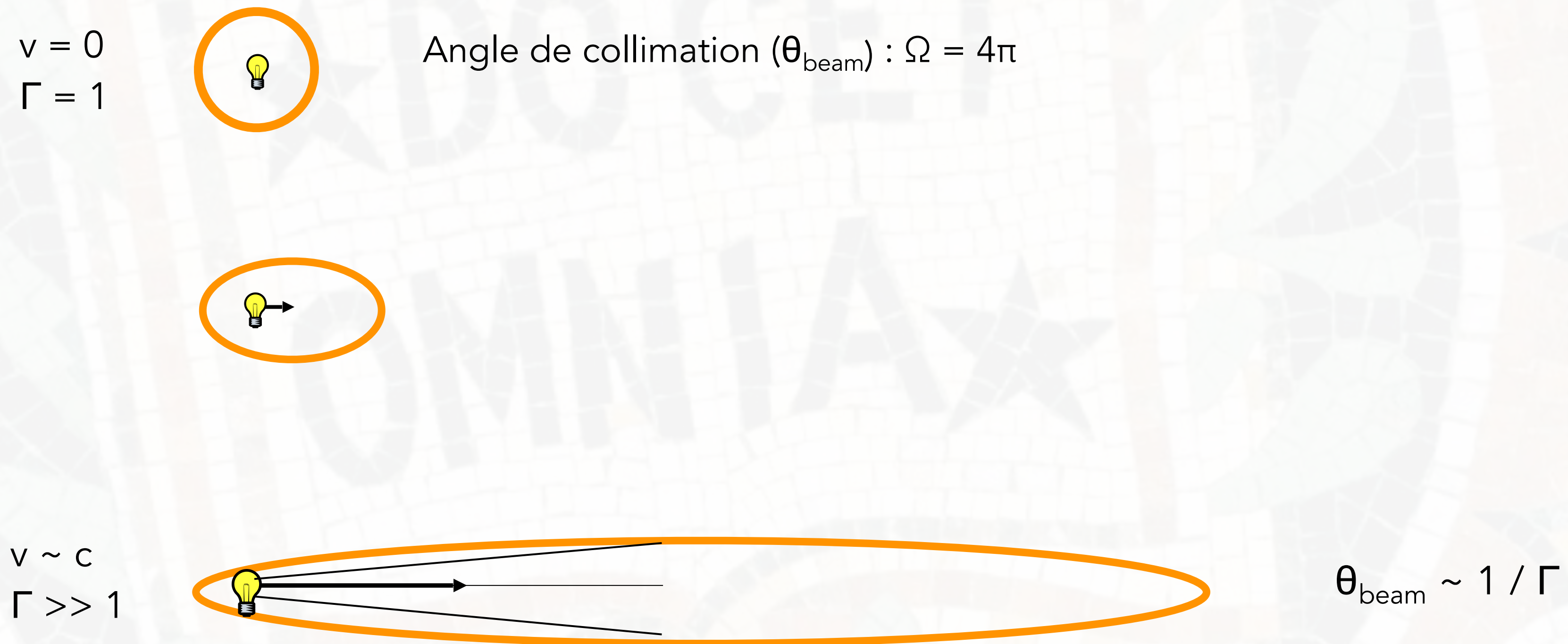
Sursauts gamma : étude émission rémanente & jet

Jet break



Sursauts gamma : étude émission rémanente & jet

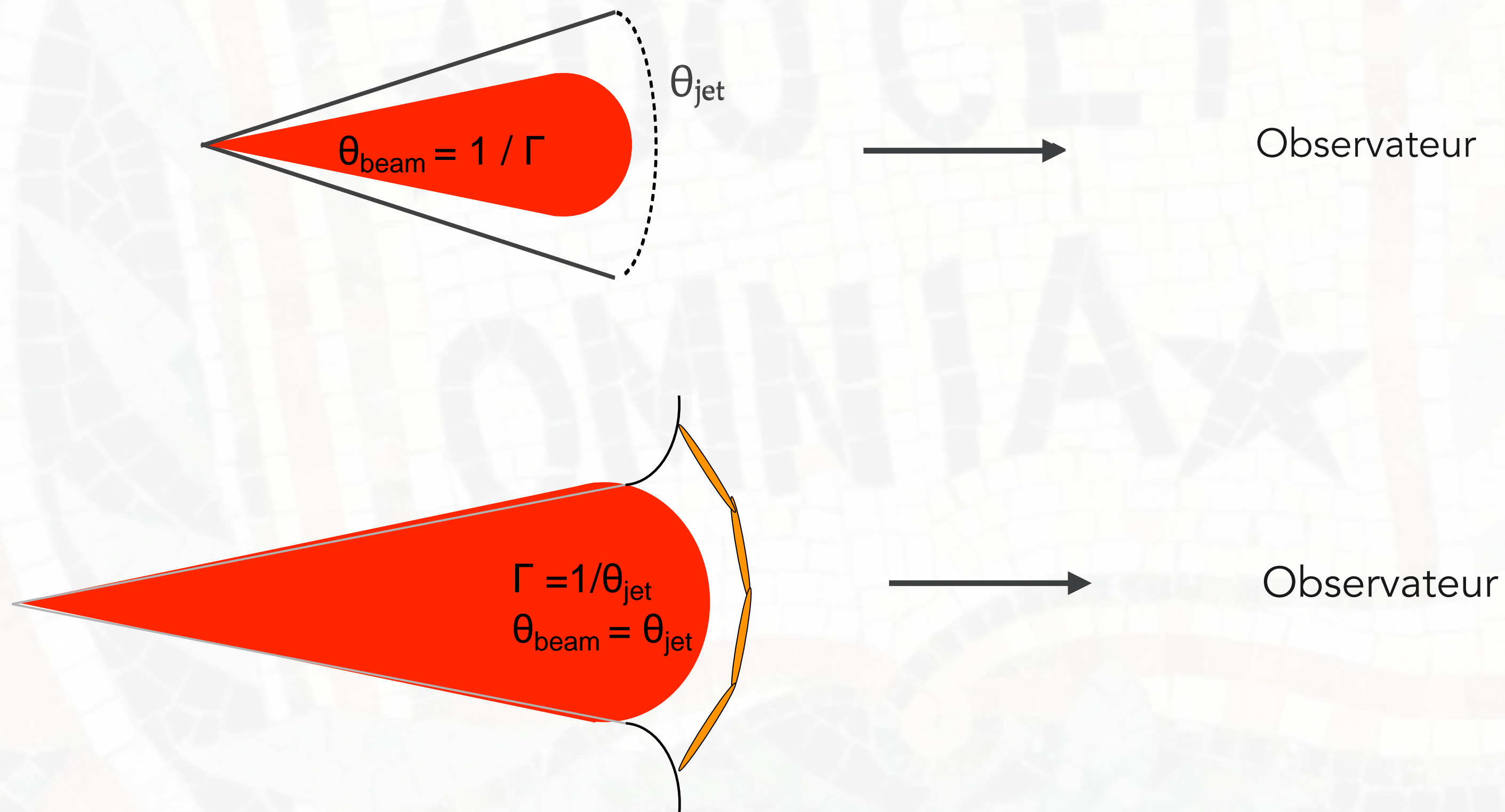
An emitter moving at $v \sim c$, even if emitting isotropically in its rest frame, will strongly beam its radiation as seen by the observer.



Credits @ D. Perley

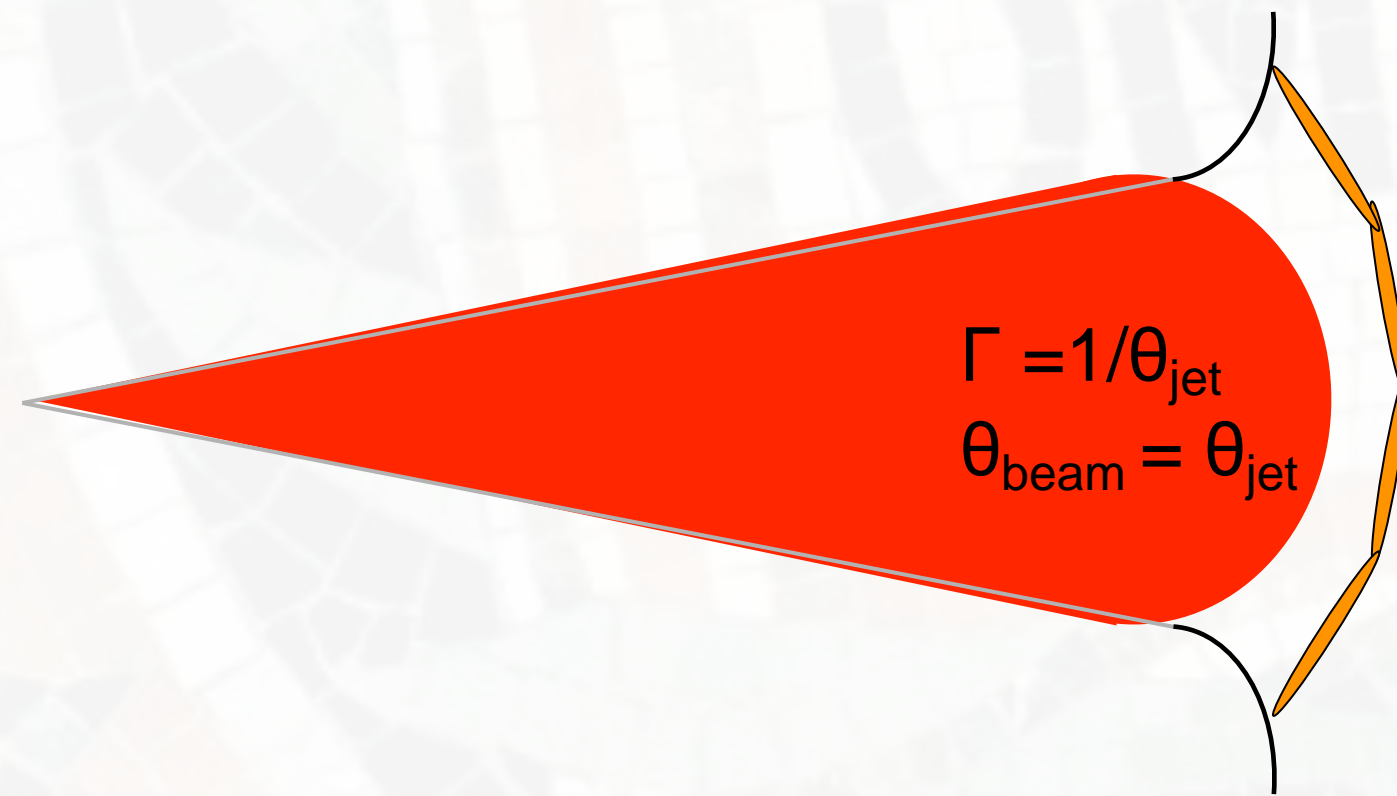
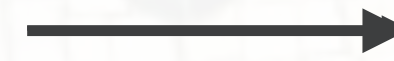
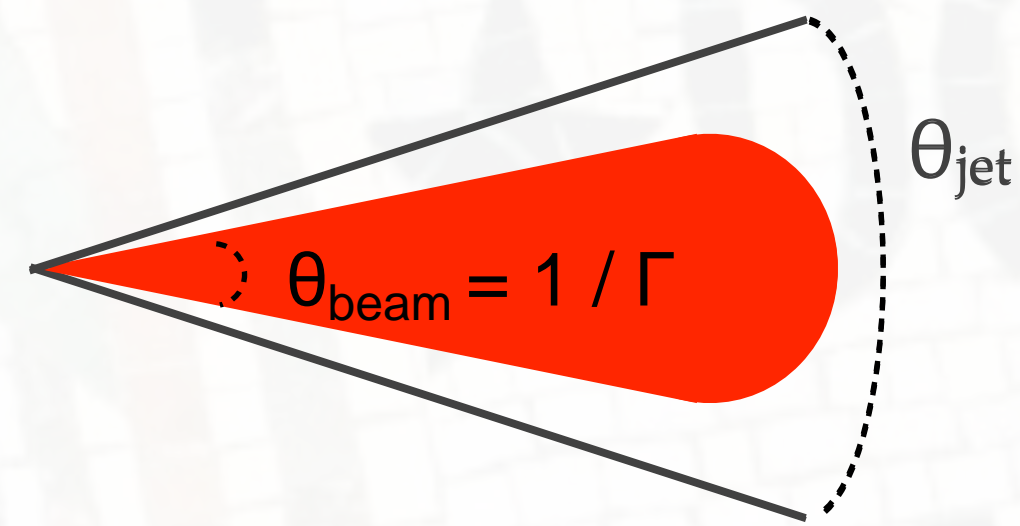
Sursauts gamma : étude émission rémanente & jet

Observateur dans l'axe

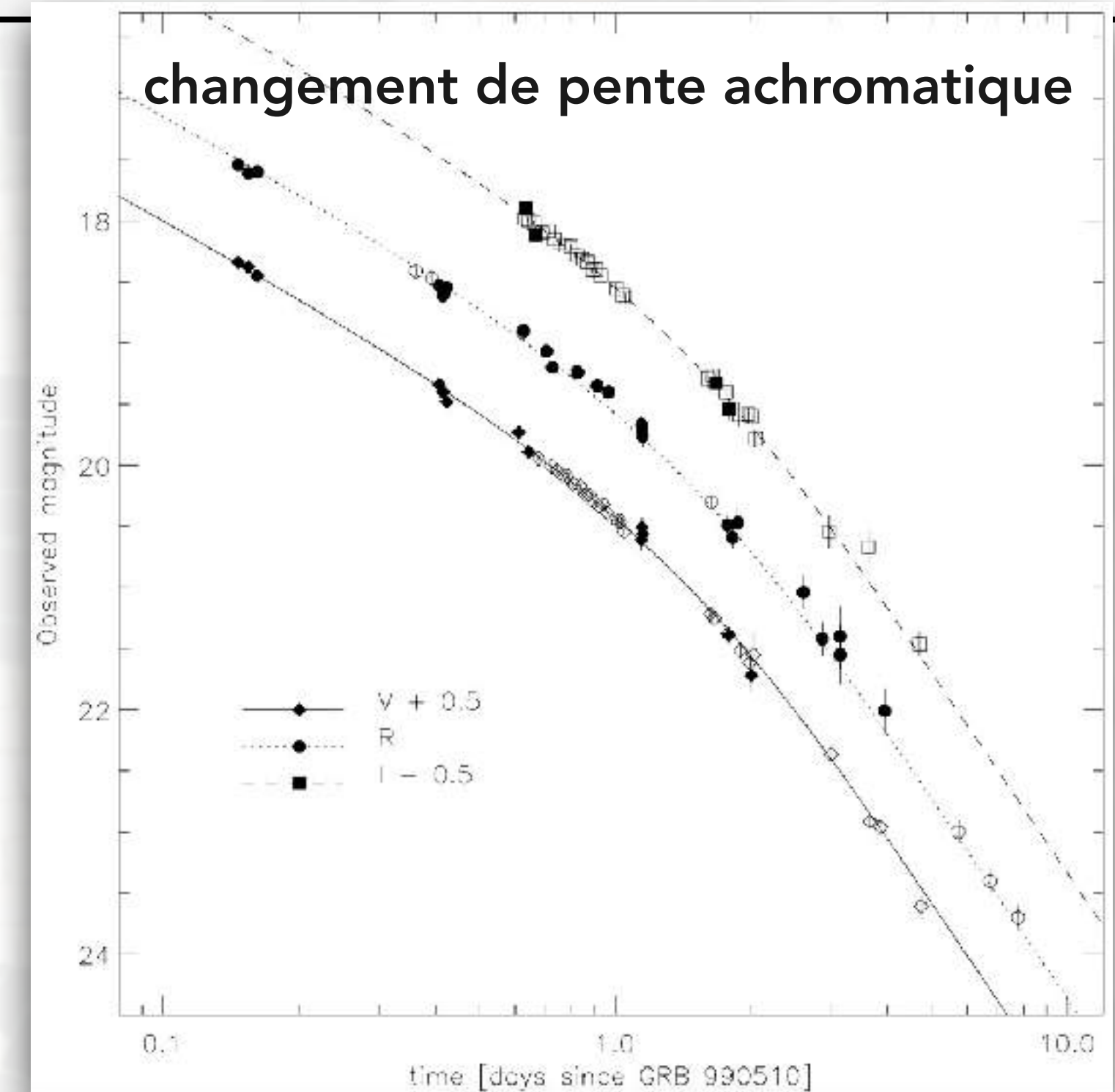


Sursauts gamma : étude émission rémanente & jet

Observateur dans l'axe

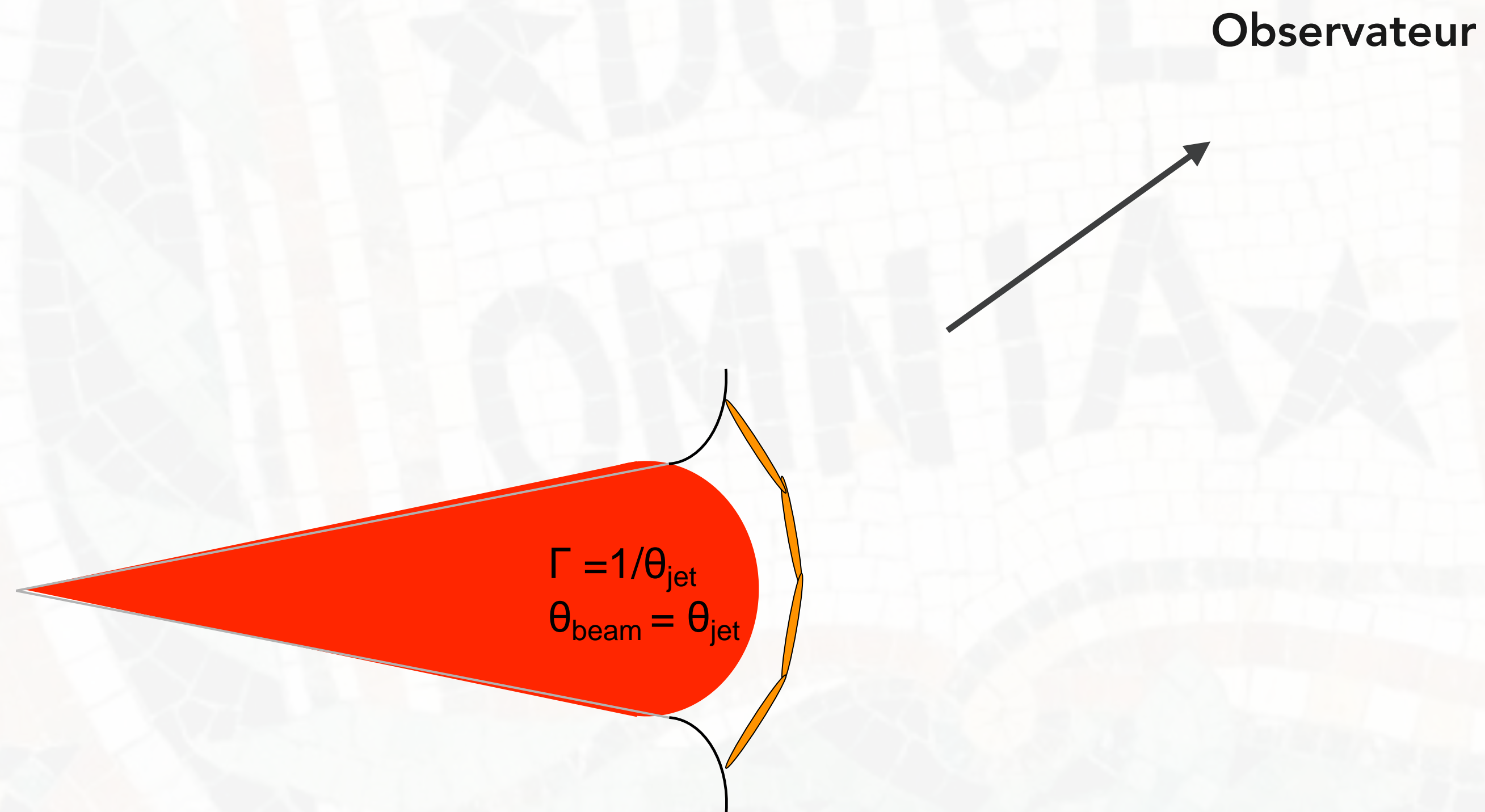


Observateur



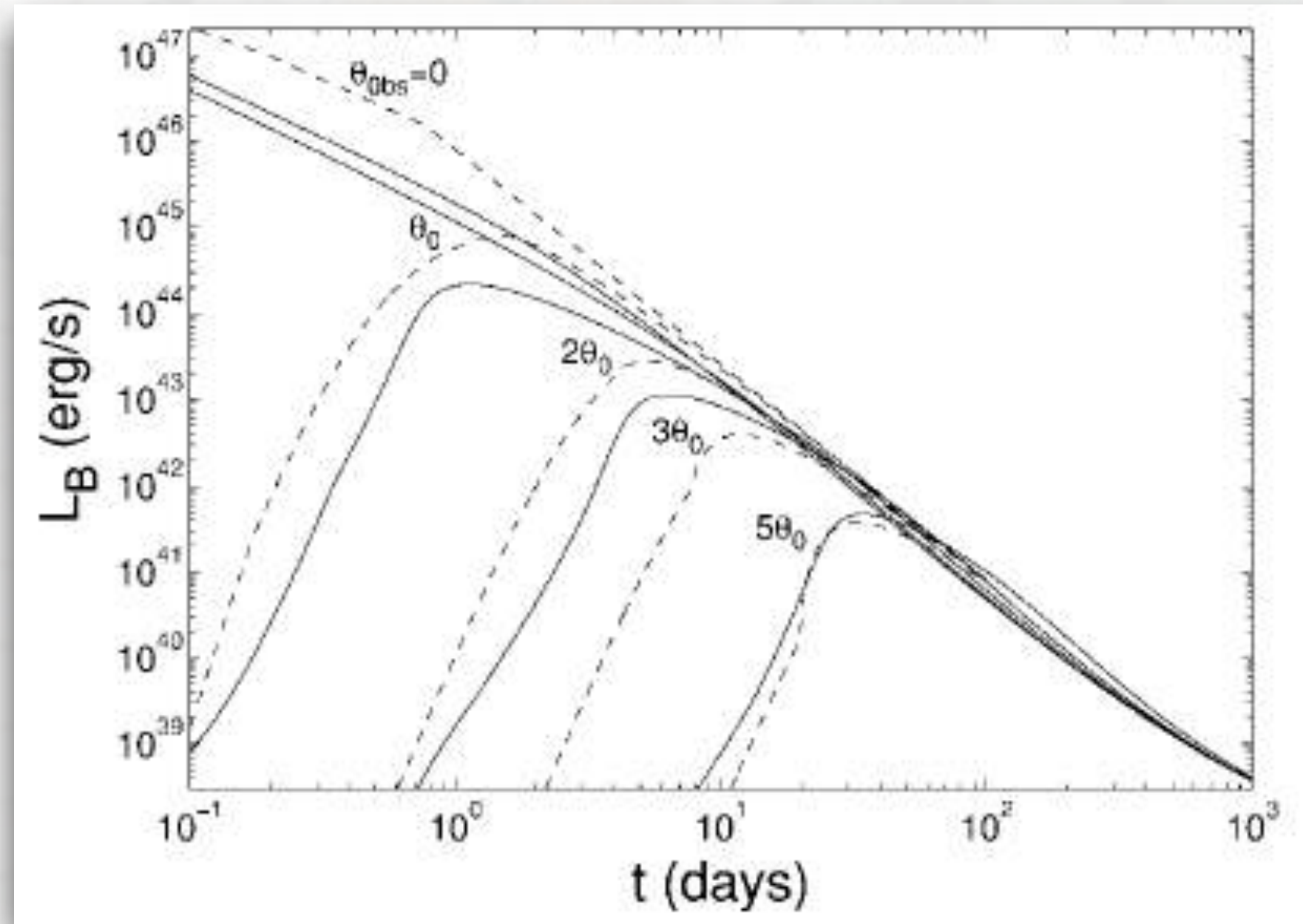
Sursauts gamma : étude émission rémanente & jet

Observateur hors axe



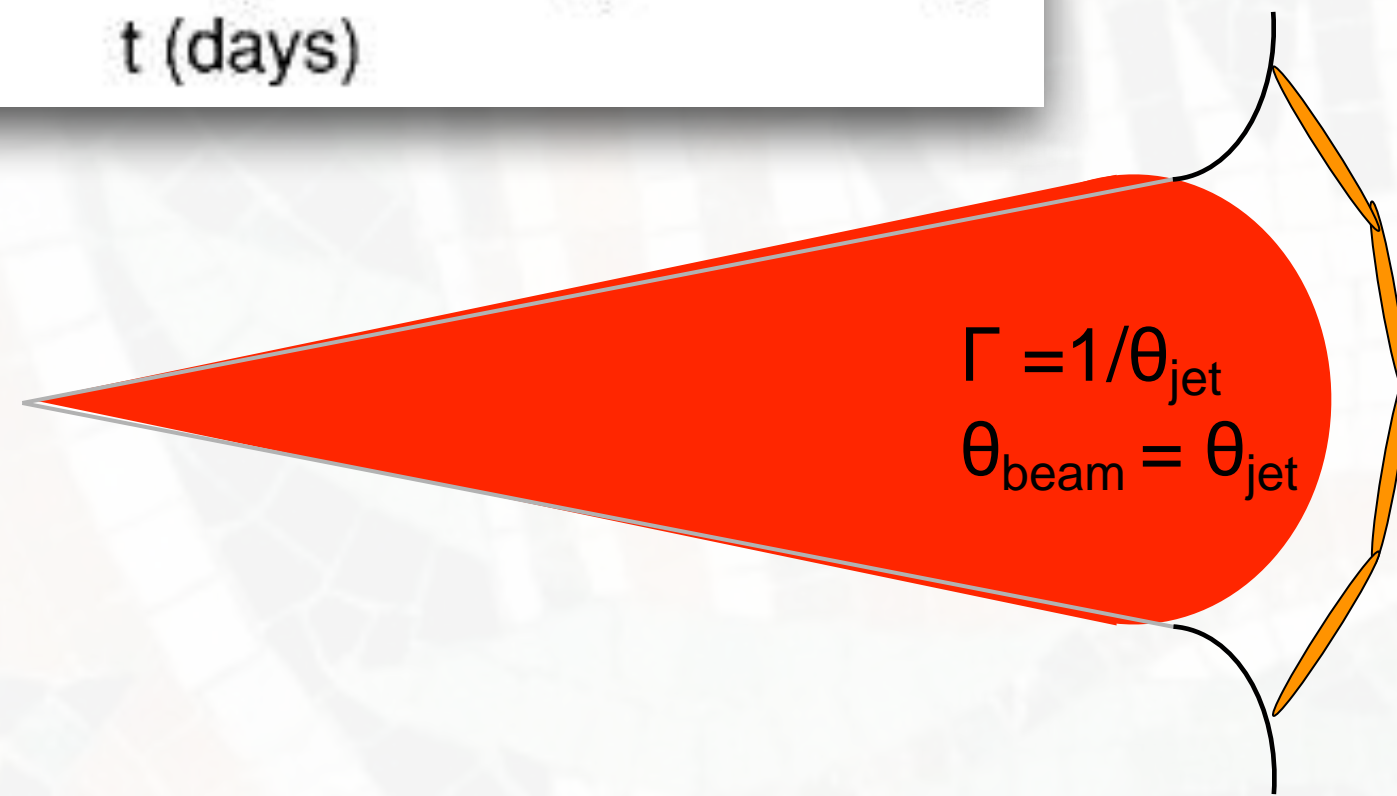
Sursauts gamma : étude émission rémanente & jet

Granot+2002



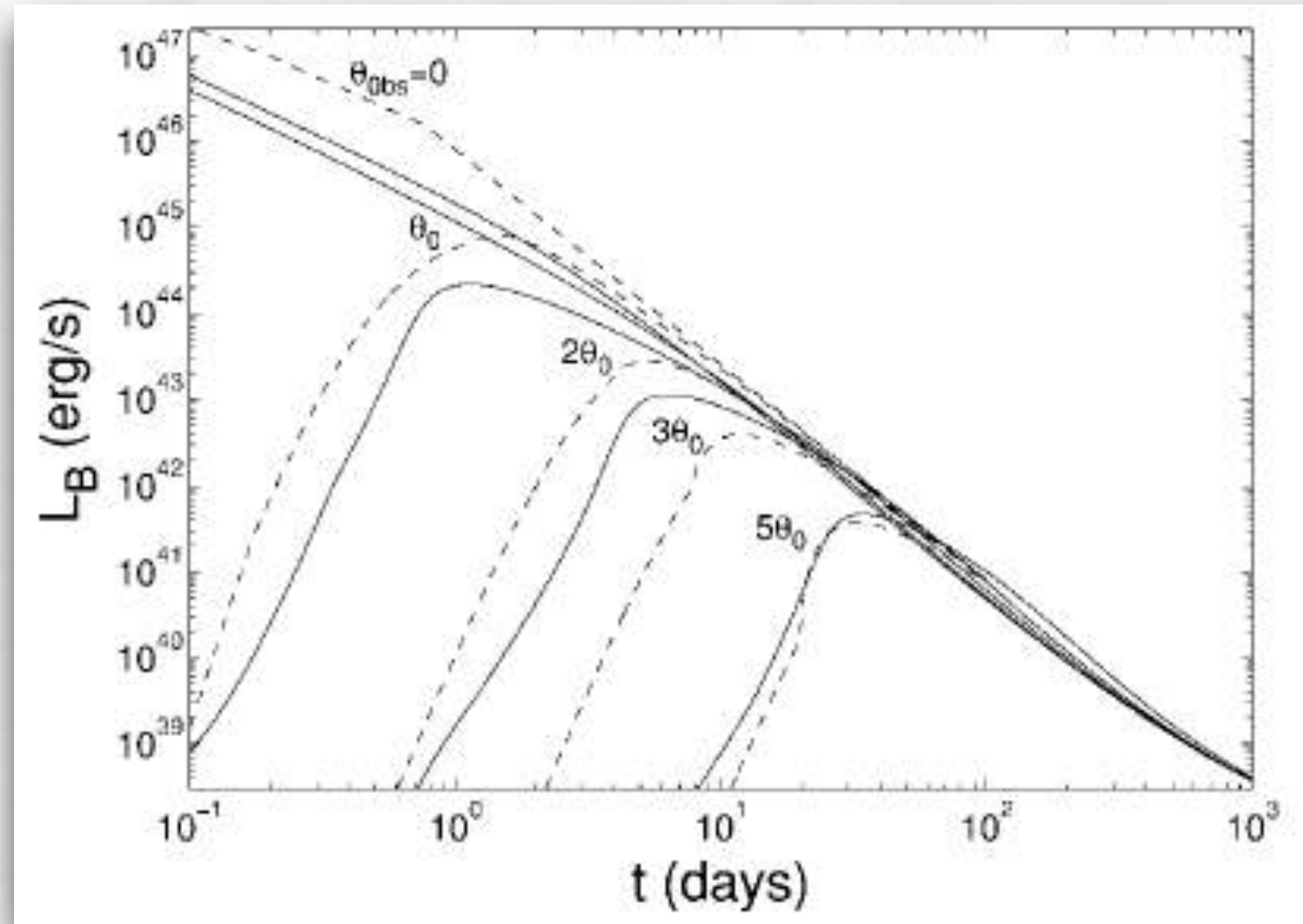
Observateur hors axe

Observateur

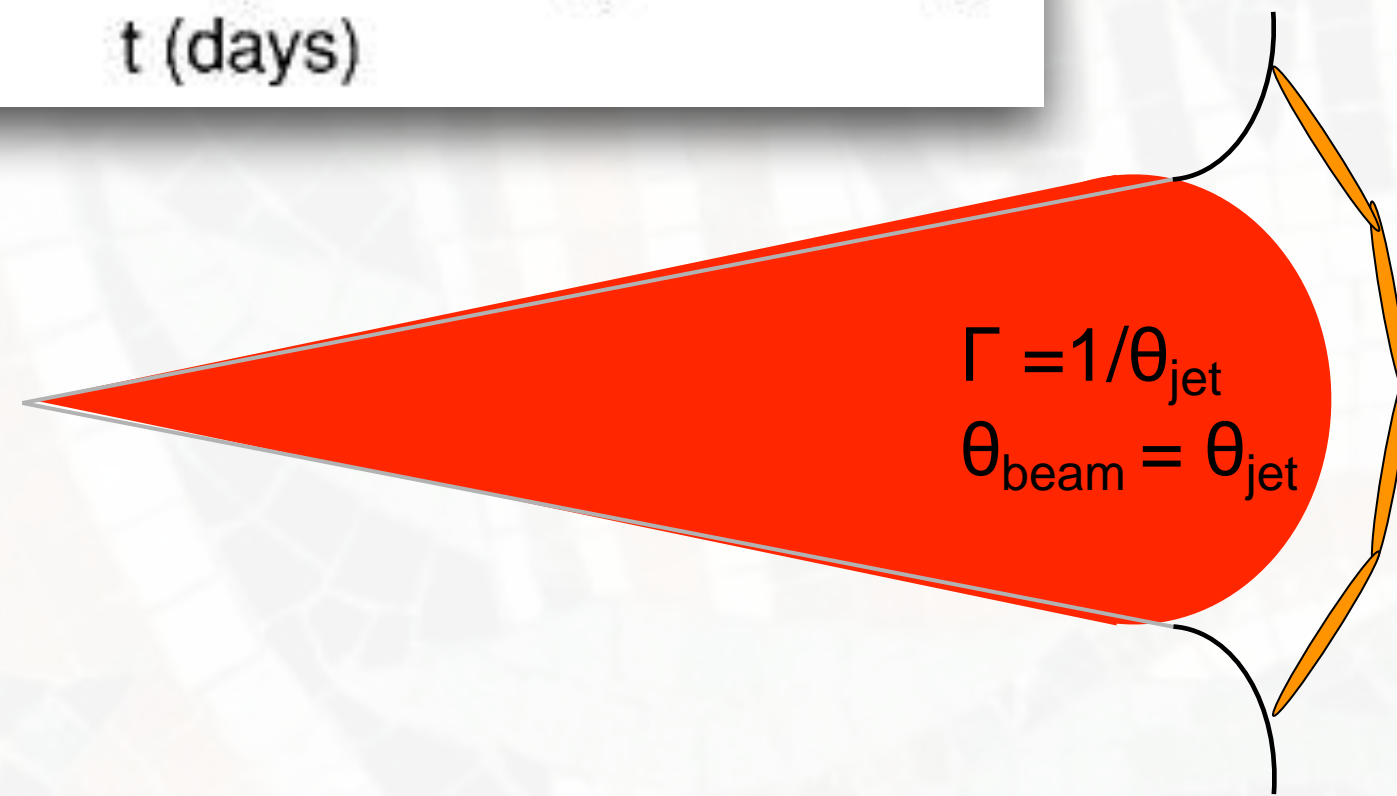


Sursauts gamma : étude émission rémanente & jet

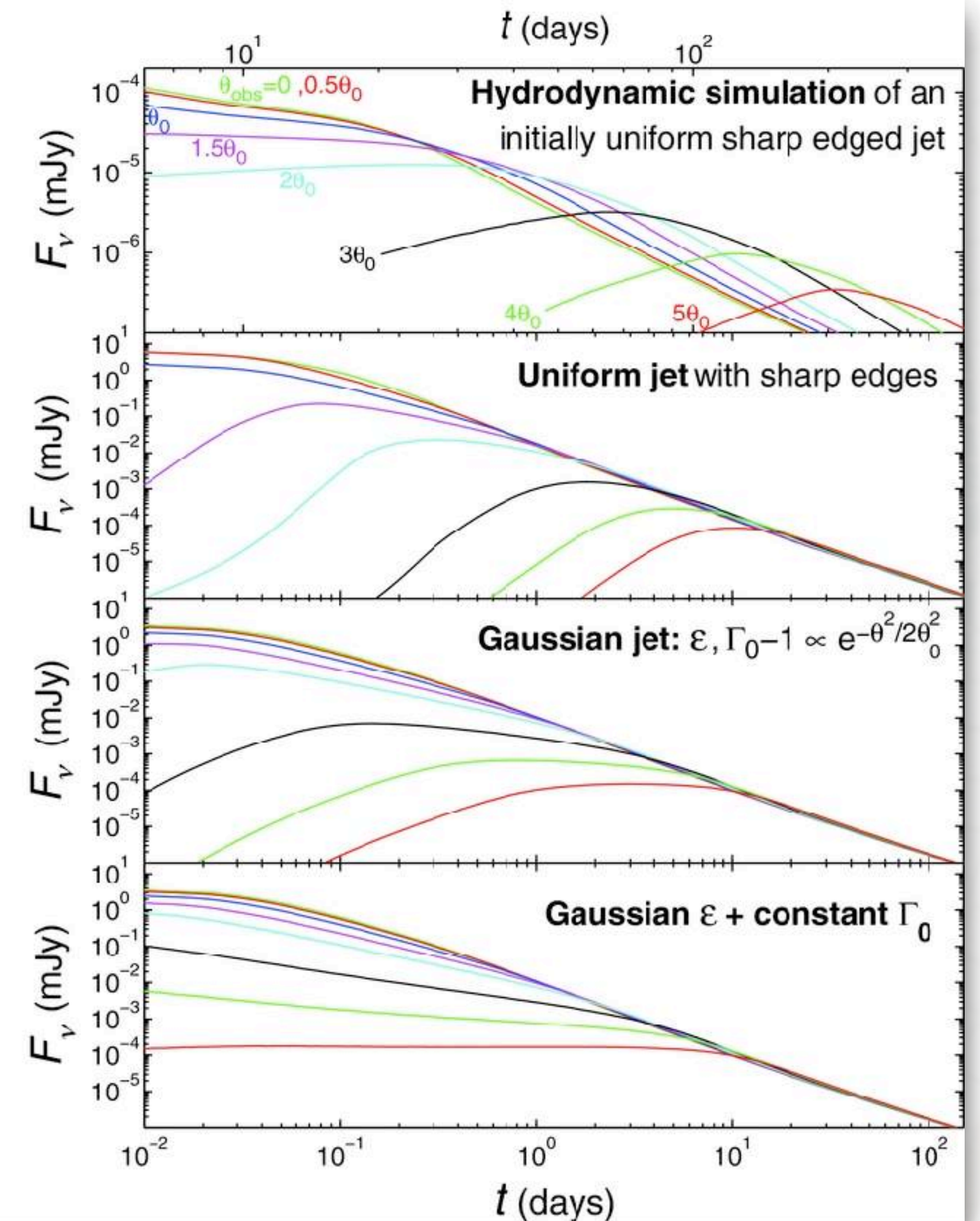
Granot+2002



Observateur hors axe

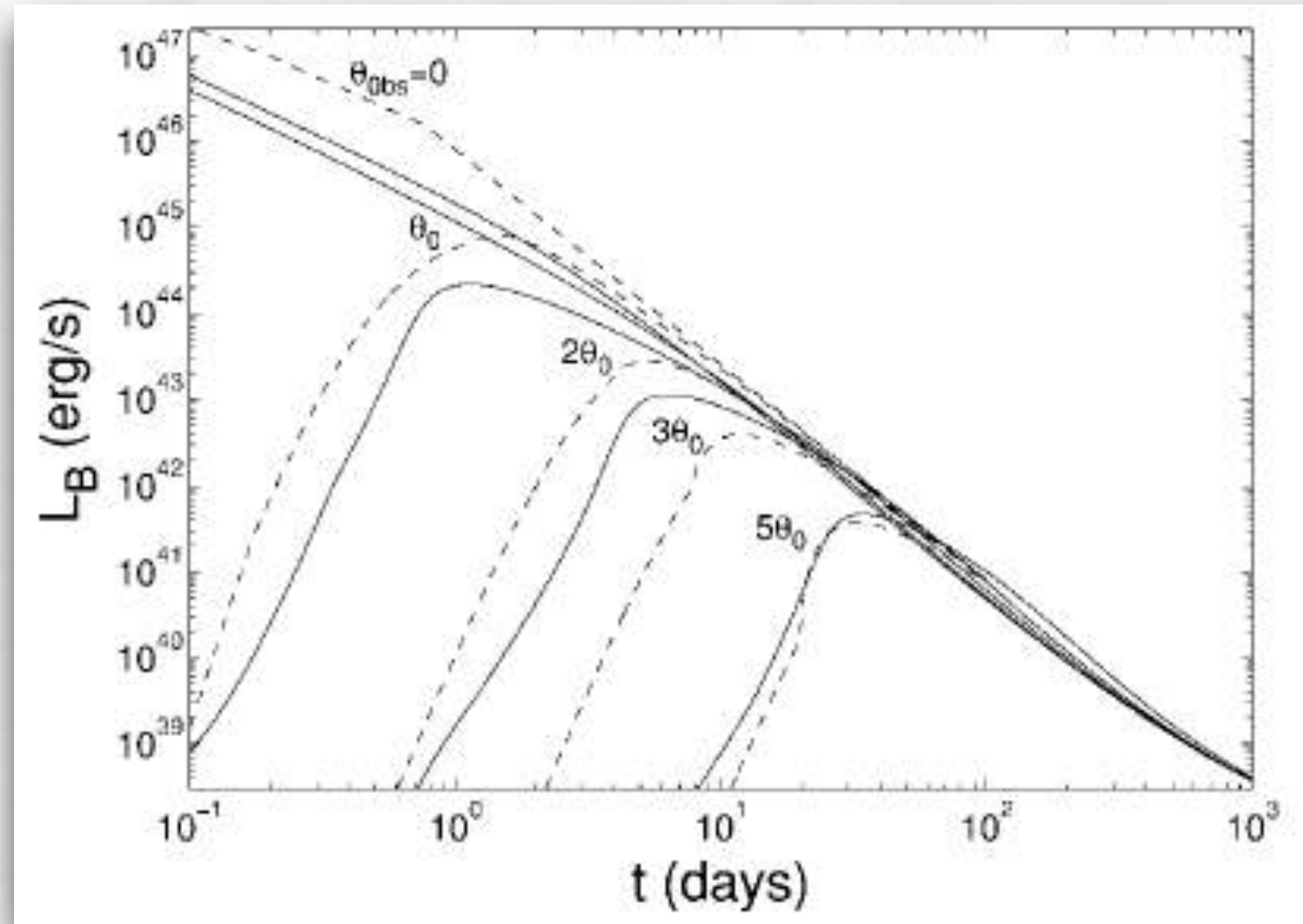


Granot+2014



Sursauts gamma : étude émission rémanente & jet

Granot+2002



Observateur hors axe

on-axis

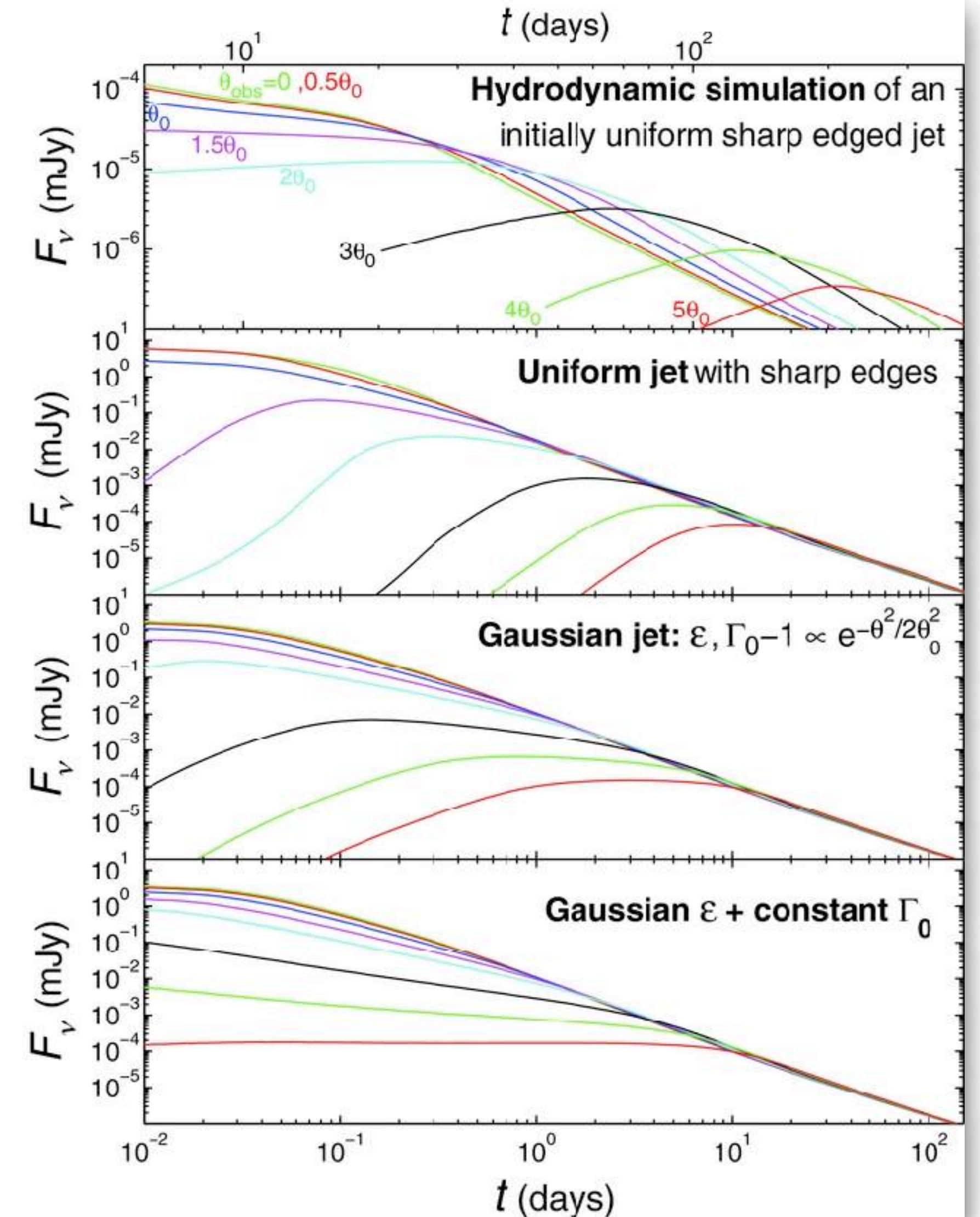


Hors axe beaucoup plus frequents que on-axis

MAIS

Plus faibles

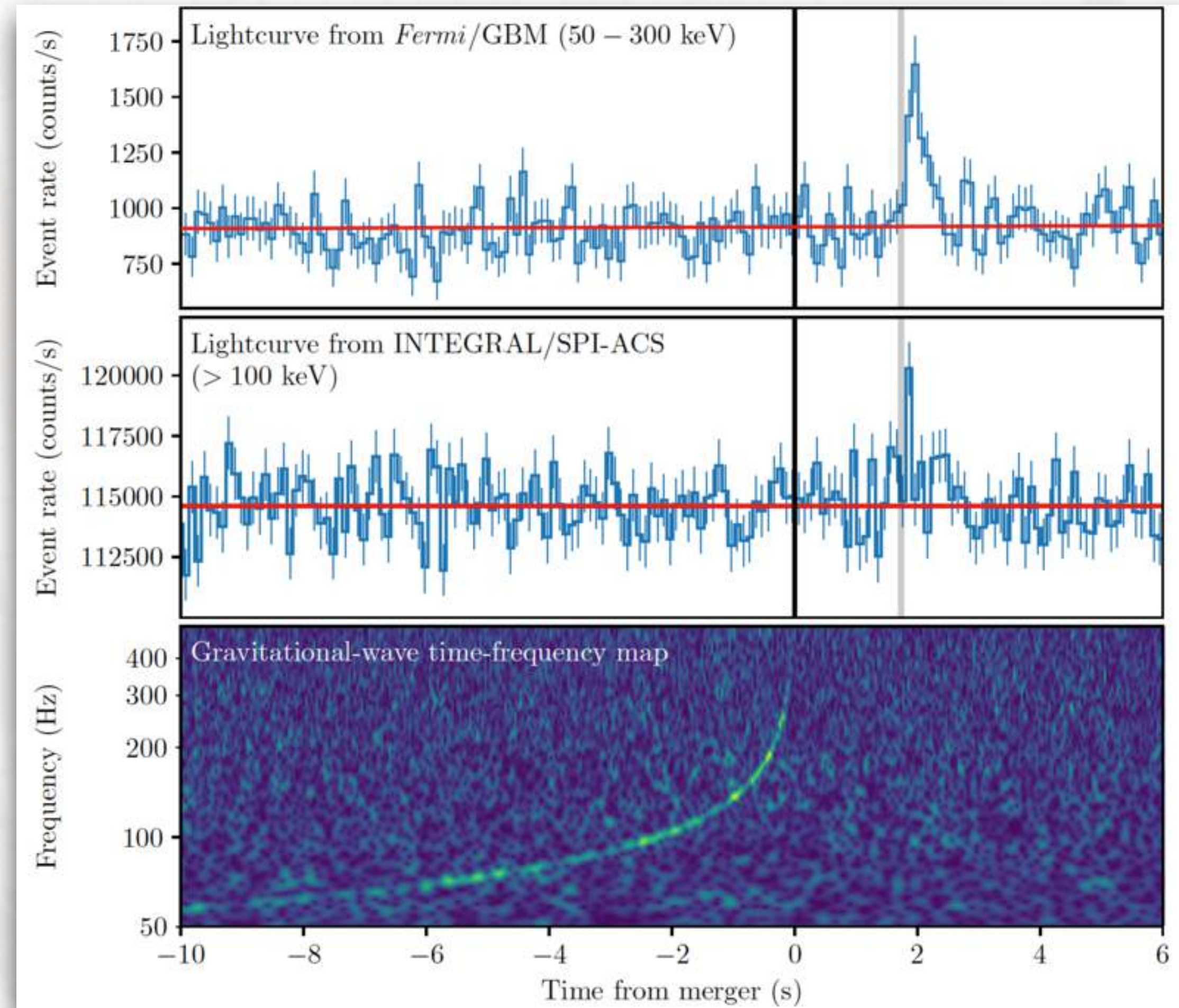
Granot+2014



Sursauts gamma : étude émission rémanente & jet

Multi-longueur d'onde + multi-messsenger

Credit: LIGO/Virgo Collaboration



GRB170817

Sursauts gamma court

GW170817

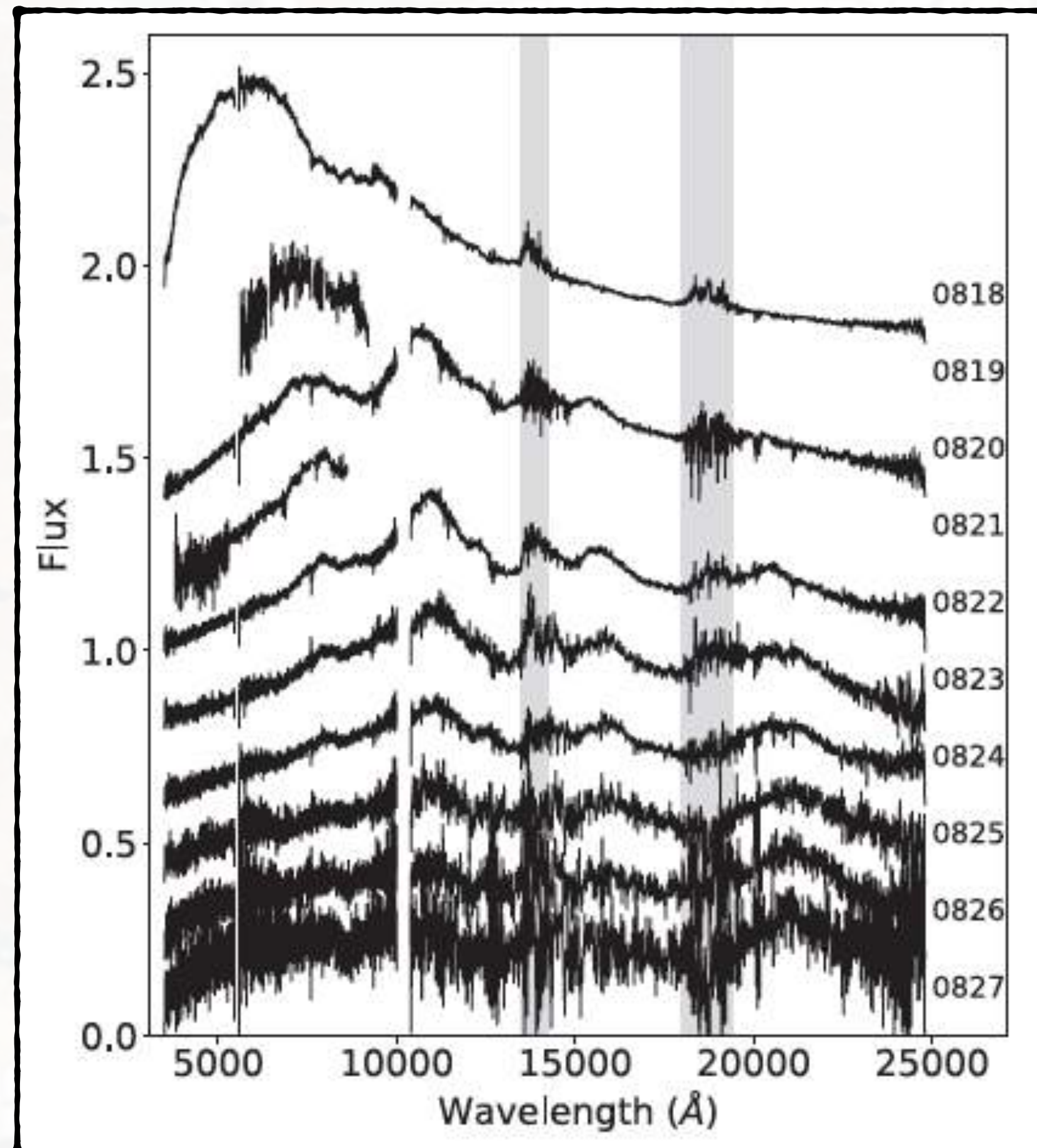
Coalescence d'un système binaire d'étoile à neutrons (BNS)

Sursauts gamma : étude émission rémanente & jet

Kilonova (KN) : AT2017gfo

ESO-VLT/X-Shooter

Pian et al. 2017, Nature



Première étude spectrale d'une Kilonova

- Decadent radioactive **nucléosynthèse r-process**
- Coalescence système binaire étoile à neutrons **site de production des éléments lourds de l'Univers**

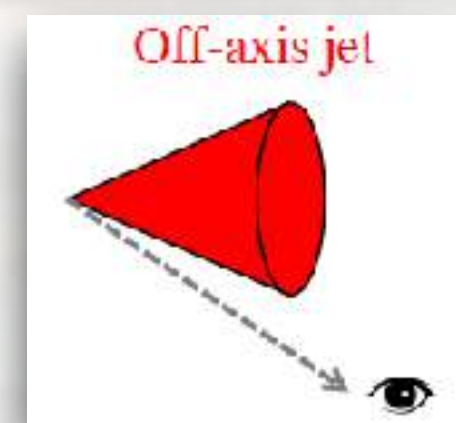
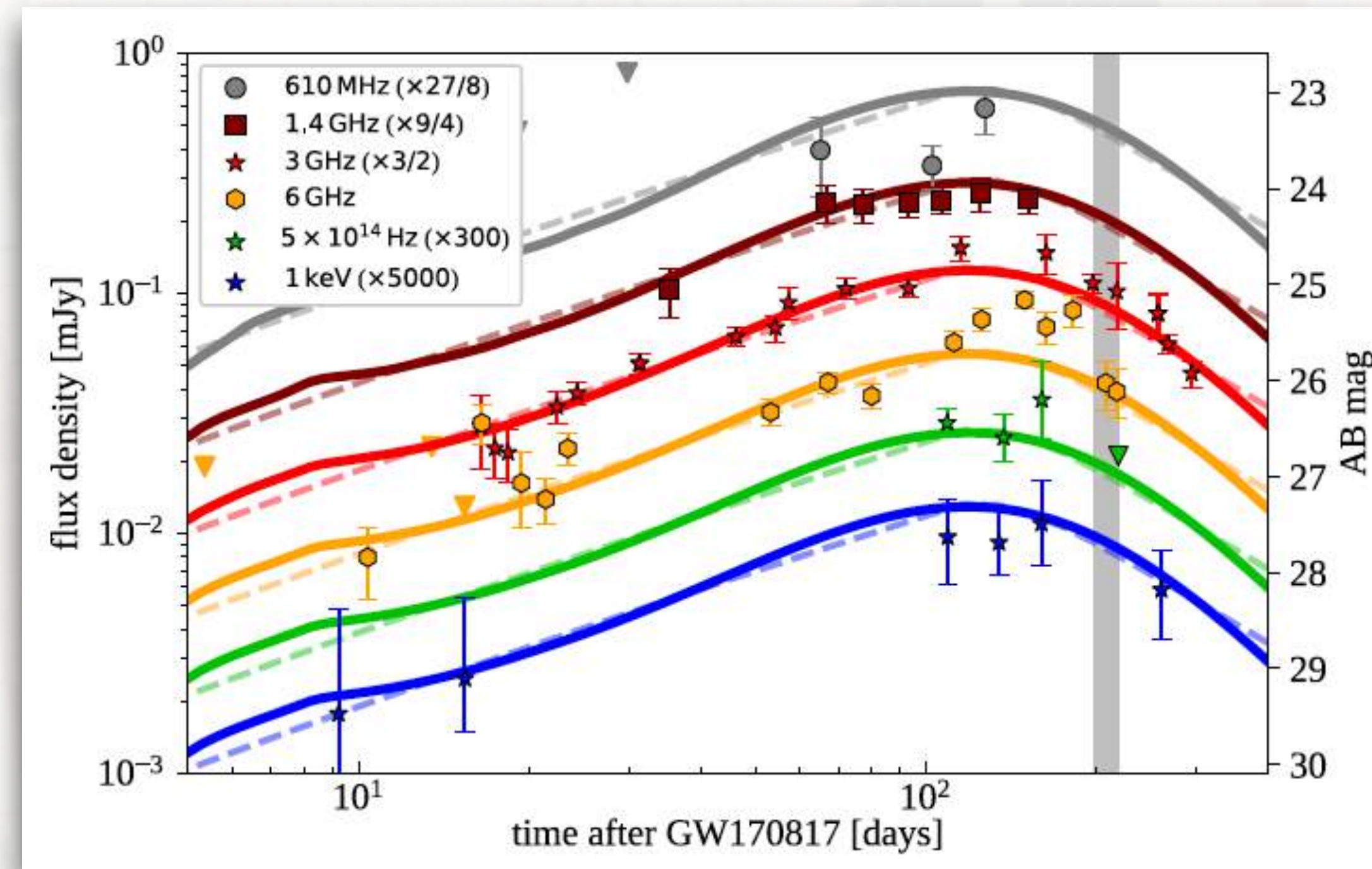
Quels éléments?

Très difficile de les déterminer

Sursauts gamma : étude émission rémanente & jet

GRB170817 / GW170817

Ghirlanda+2019

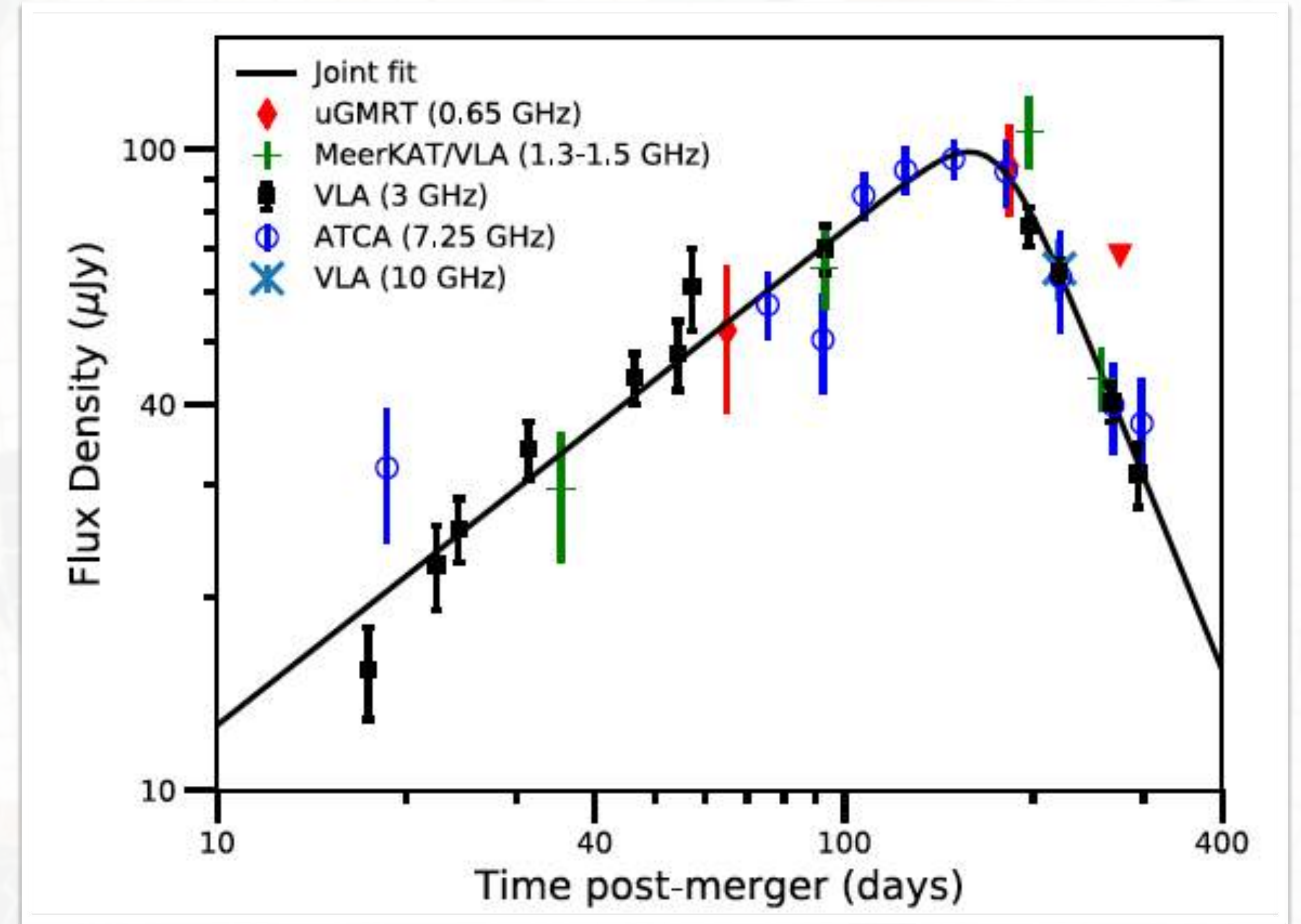
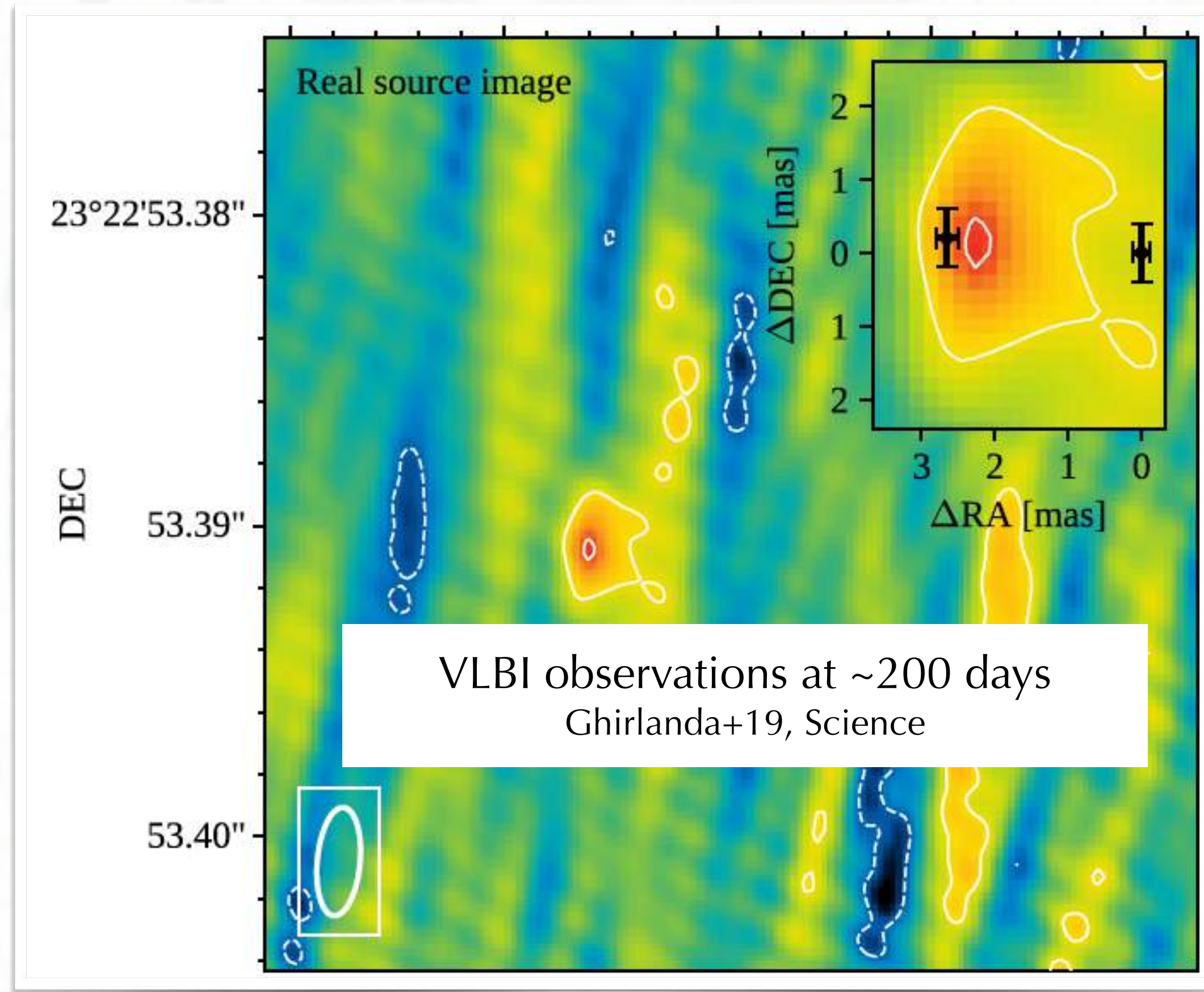


Off-axis jet

Jet uniforme vu hors axe :
exclus

Sursauts gamma : étude émission rémanente & jet

Mooley+18: displacement of 2.7mas in 155 days

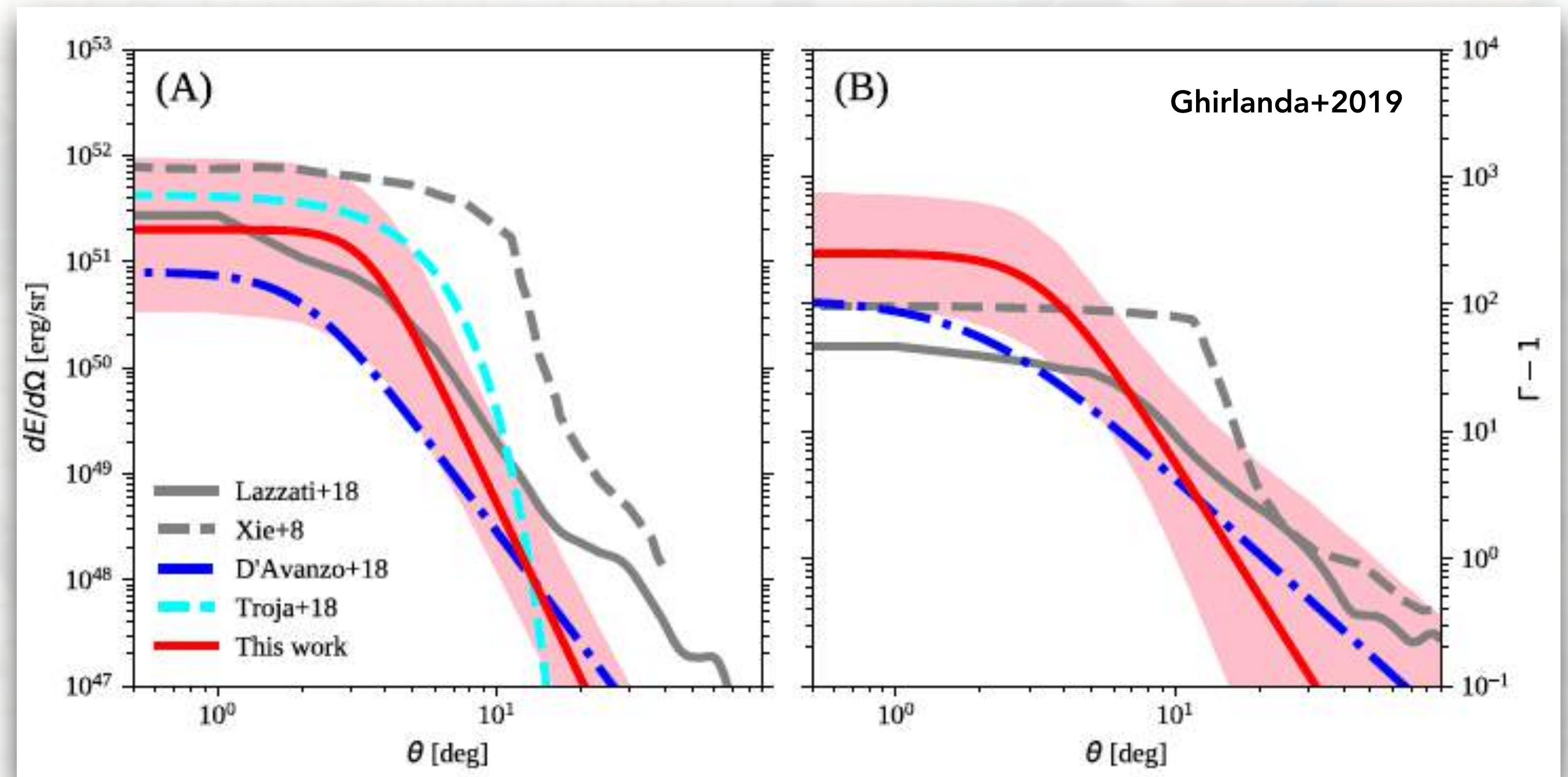
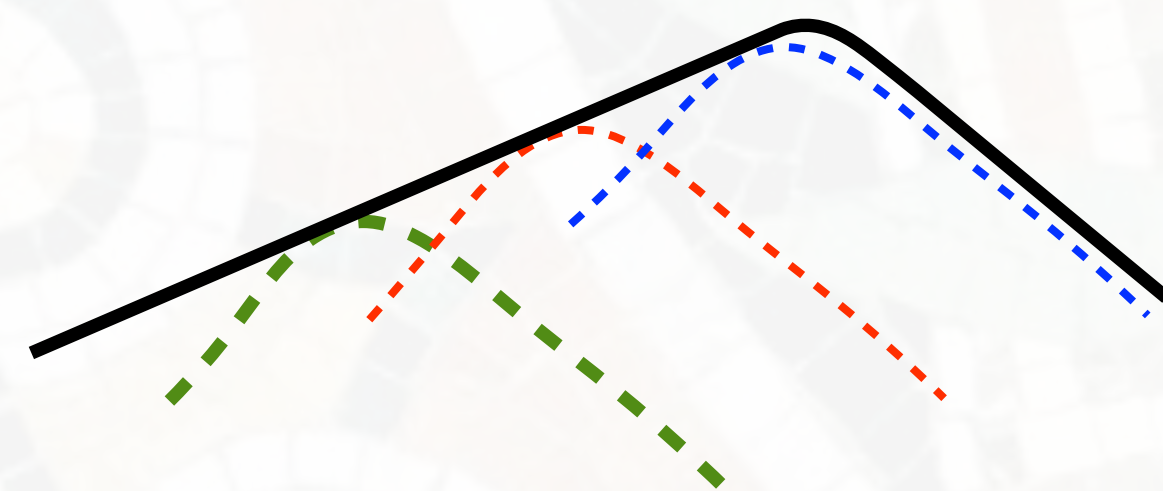
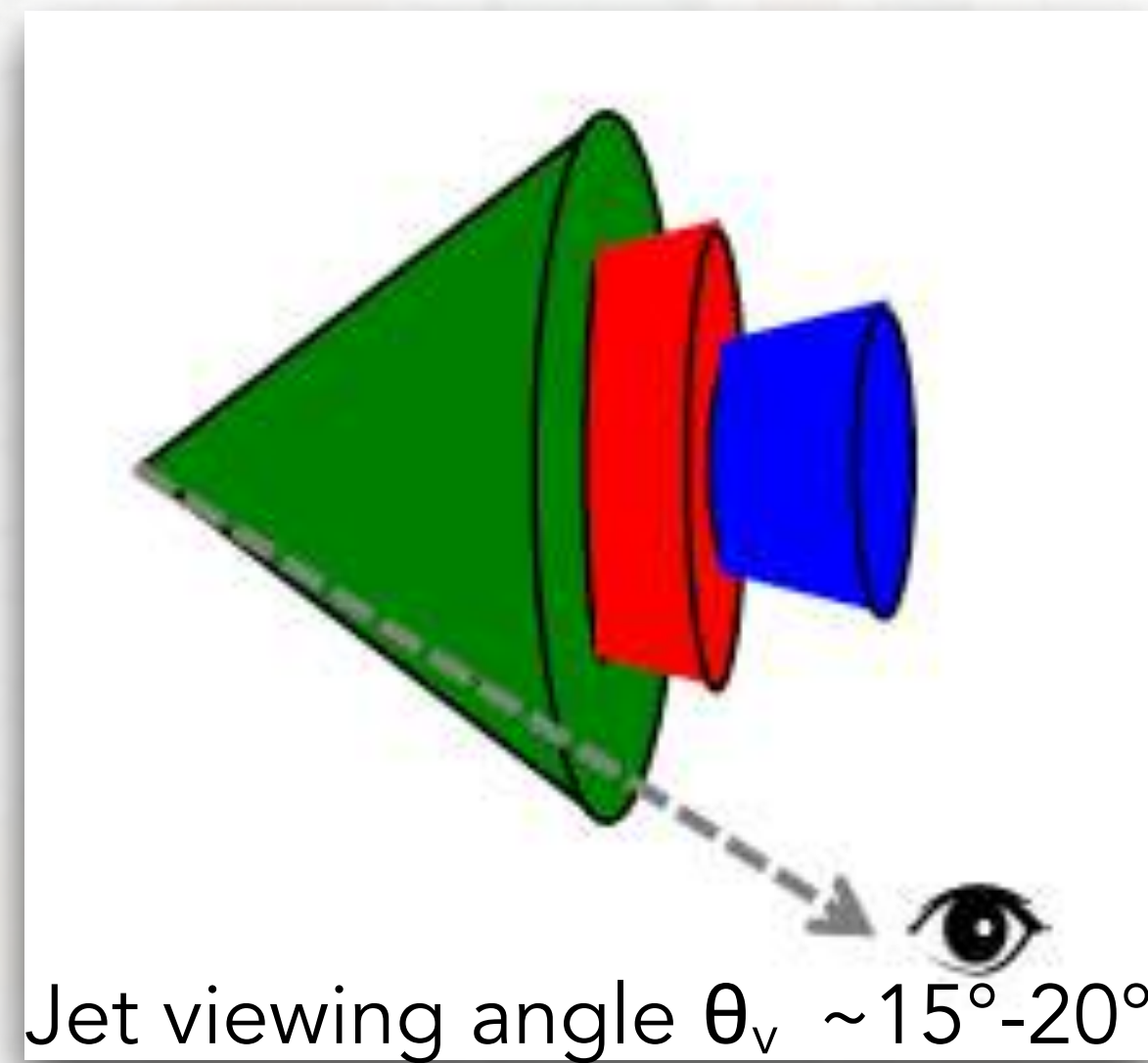


Mooley+2018

Sursauts gamma : étude émission rémanente & jet

$$\Gamma_1 > \Gamma_2 > \Gamma_3$$

$$E_1 > E_2 > E_3$$



Questions ouvertes

- BNS \longleftrightarrow GRB court?
- Tous les GRB associés avec BNS sont comme GRB170817?
- La structure du jet est-elle universelle?
- GRB courts associés aussi avec NSBH ?
- Kilonova \longleftrightarrow GRB court?
- Kilonova \longleftrightarrow BNS ?

Prochaines observations des ondes gravitationnelles par les interféromètres
+ suivi électromagnétique

Sursauts gamma : étude émission rémanente & jet



Fin 2022-fin 2023 + fin 2024-fin 2025

Sursauts gamma : d'un phénomène gamma à multi-longueur d'onde

- Phénomène gamma → multi-longueur d'onde
- Etude des propriétés de l'émission rémanente et du jet
- **Sondes de l'univers lointain**

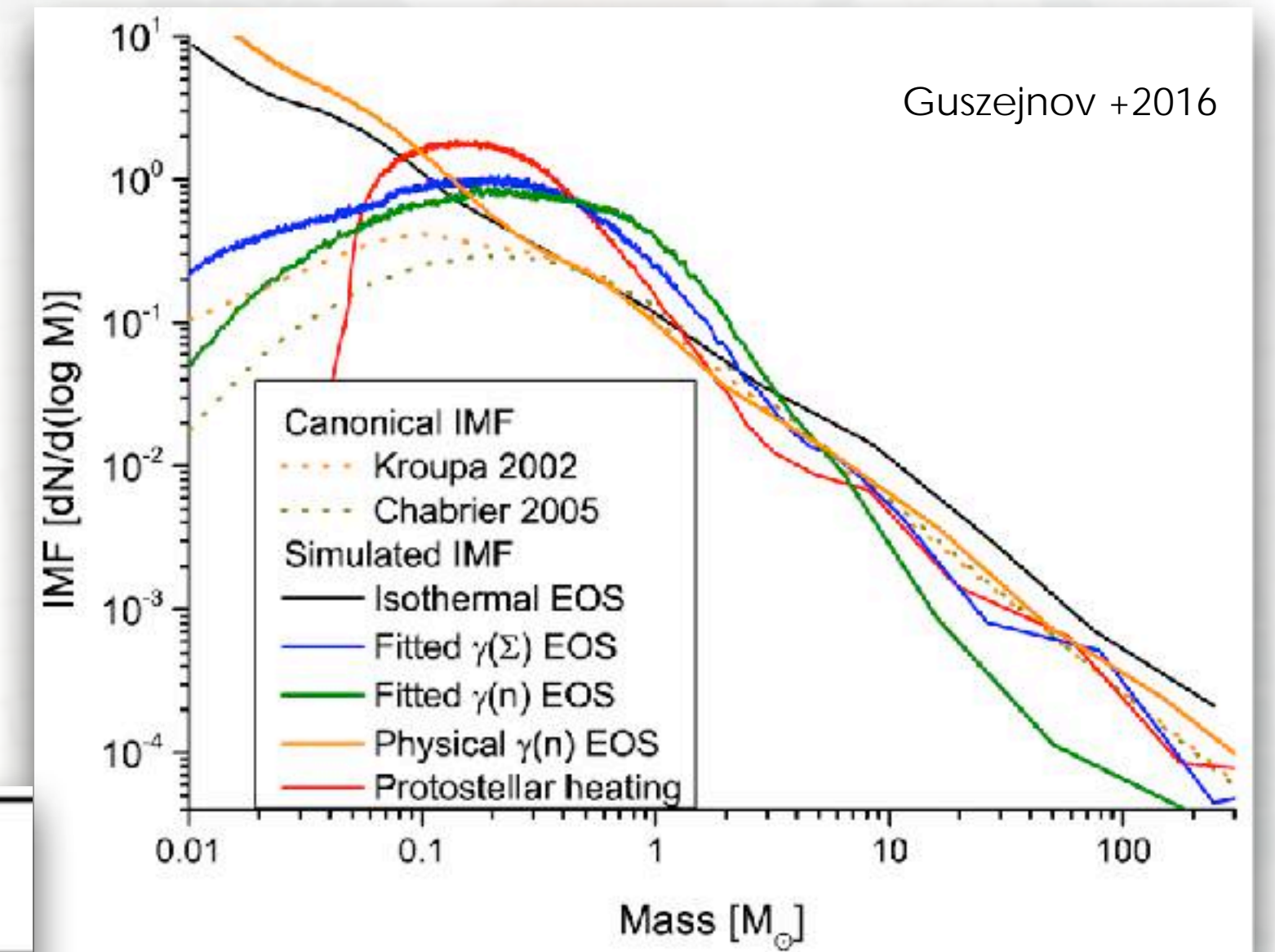
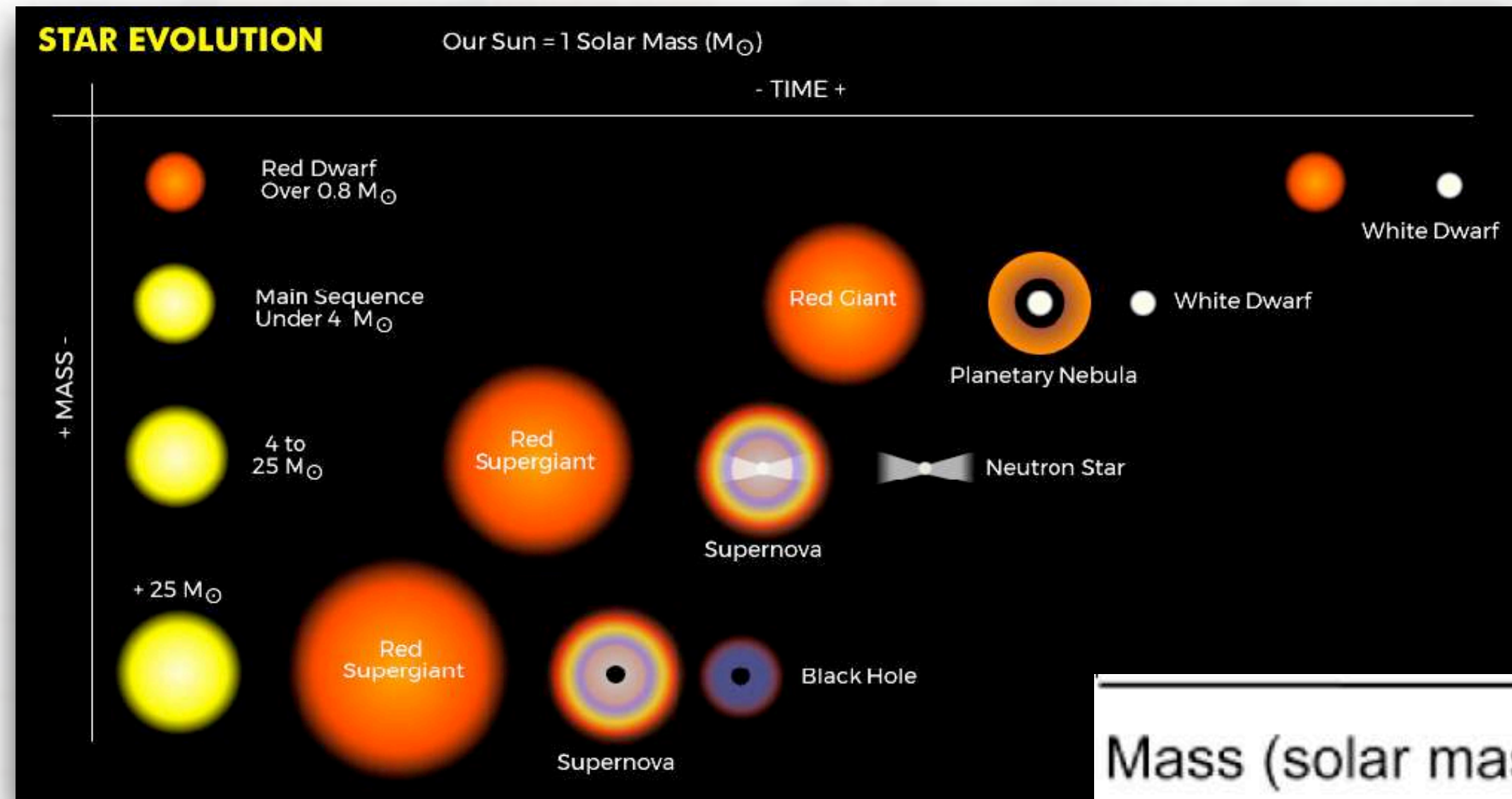
Sursauts gamma : d'un phénomène gamma à multi-longueur d'onde

- Phénomène gamma → multi-longueur d'onde
- Etude des propriétés de l'émission rémanente et du jet
- **Sondes de l'univers lointain**

GRB longs

- * Brillants
- * Etoiles massives

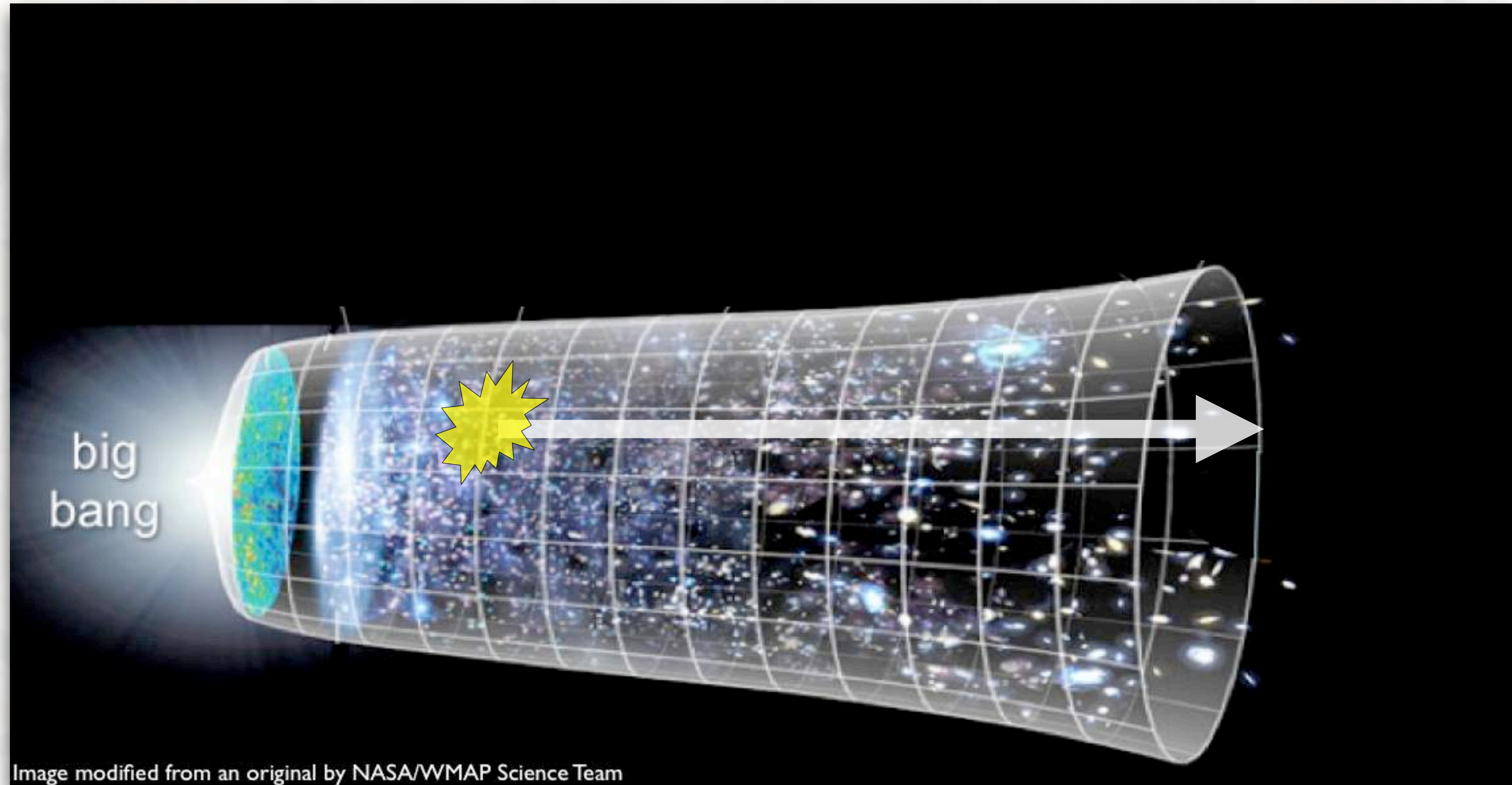
Sursauts gamma : sondes de l'univers lointain



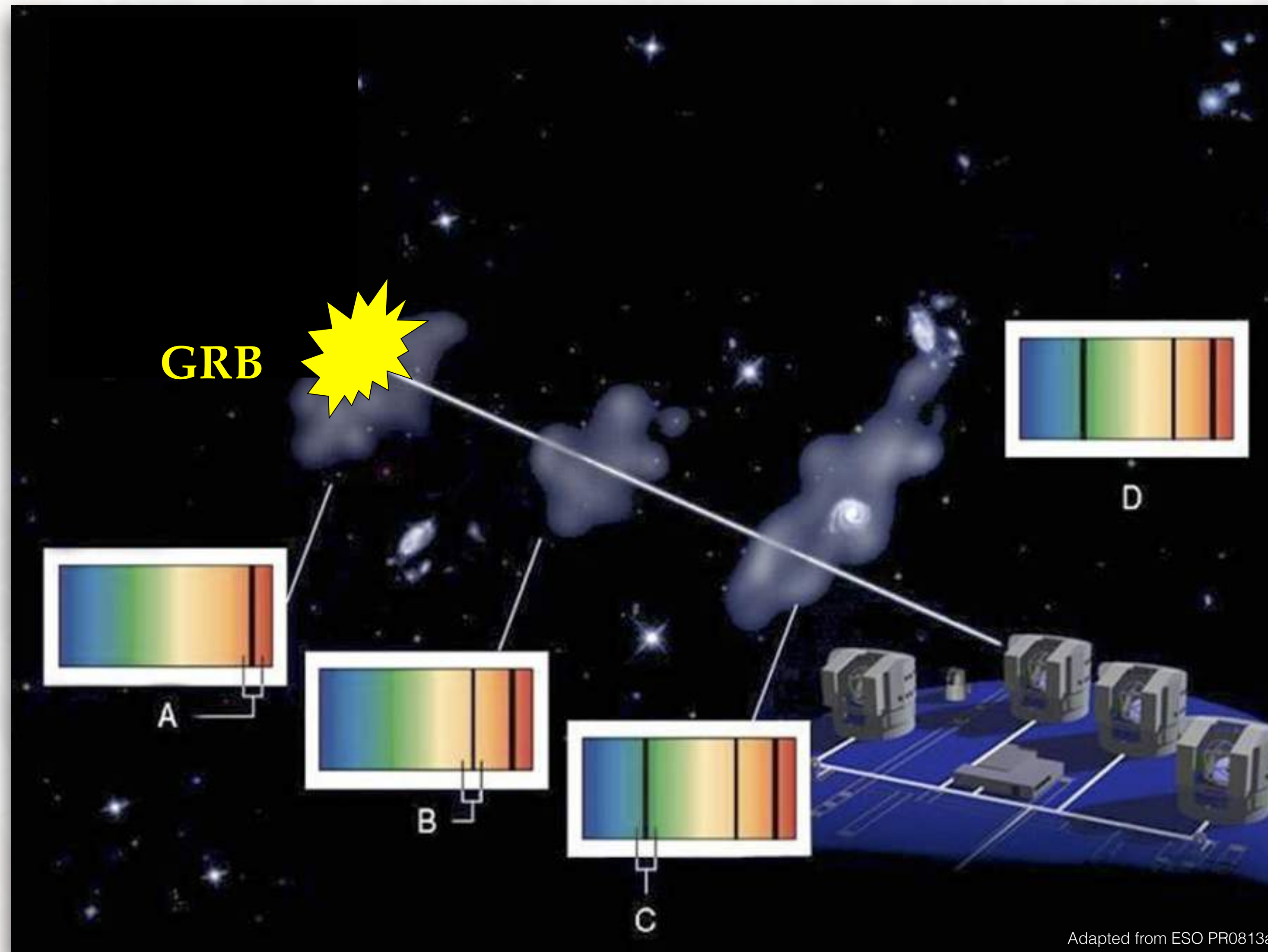
Mass (solar masses)	Time (years)
60	3 million
30	11 million
10	32 million
3	370 million
1.5	3 billion
1	10 billion
0.1	1000s billions

GRB pourraient tracer la formation stellaire jusqu'aux plus grands redshifts

Sursauts gamma : sondes de l'univers lointain

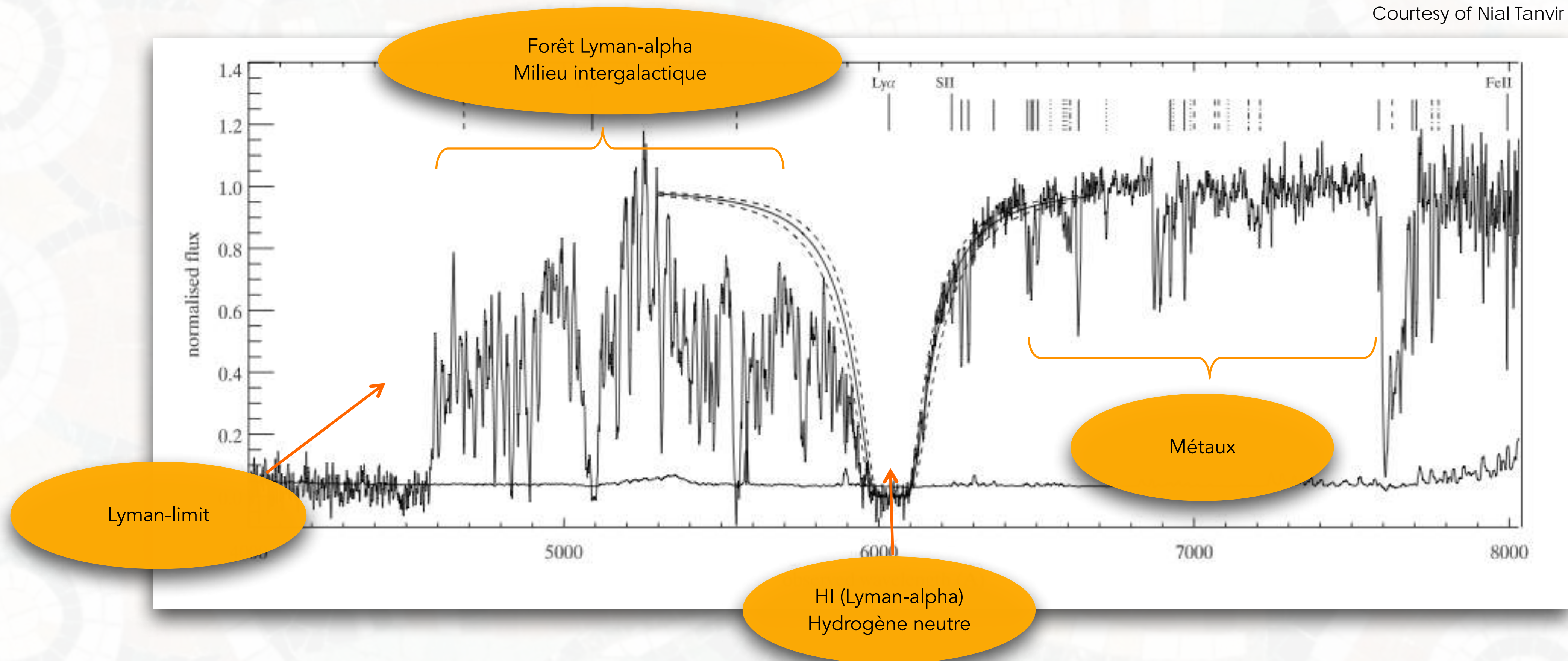


Sursauts gamma : sondes de l'univers lointain



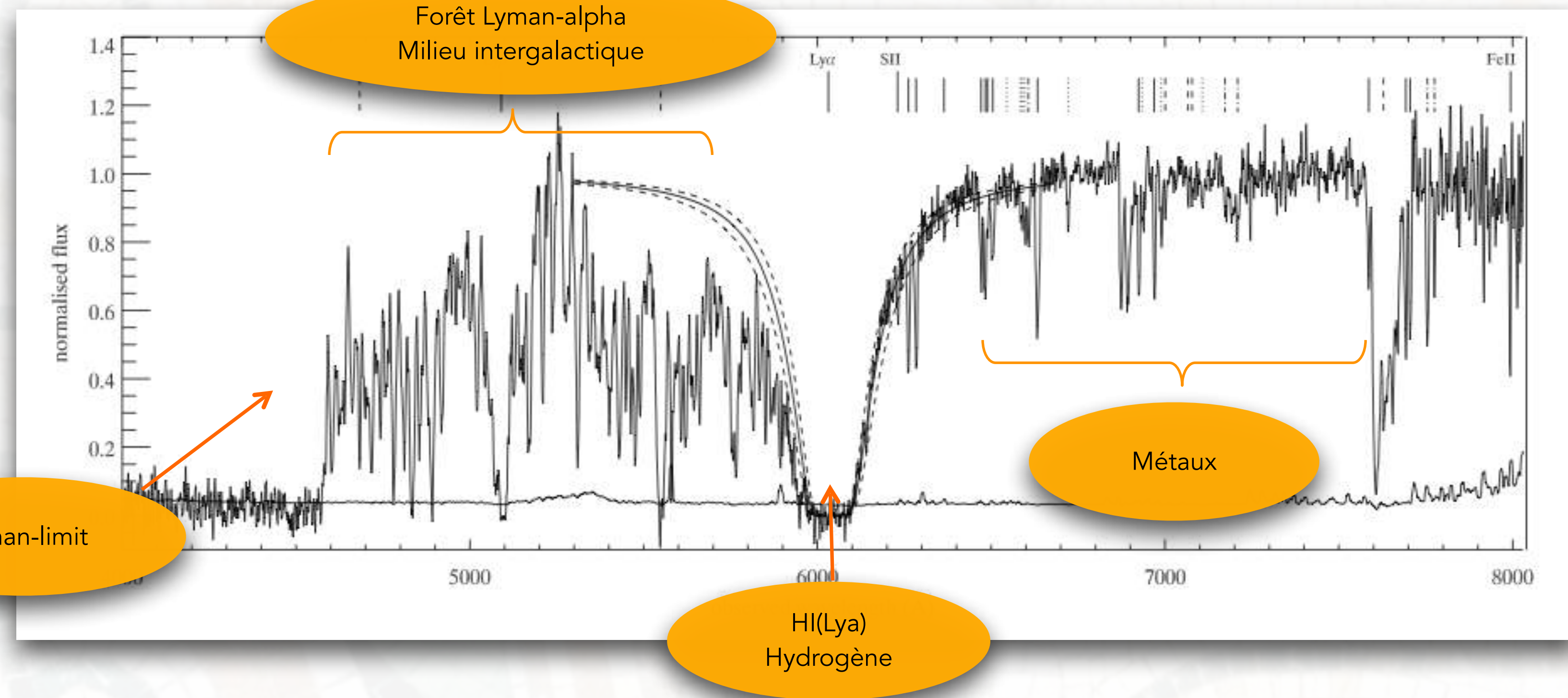
Sursauts gamma : sondes de l'univers lointain

Courtesy of Nial Tanvir



Sursauts gamma : sondes de l'univers lointain

Courtesy of Nial Tanvir



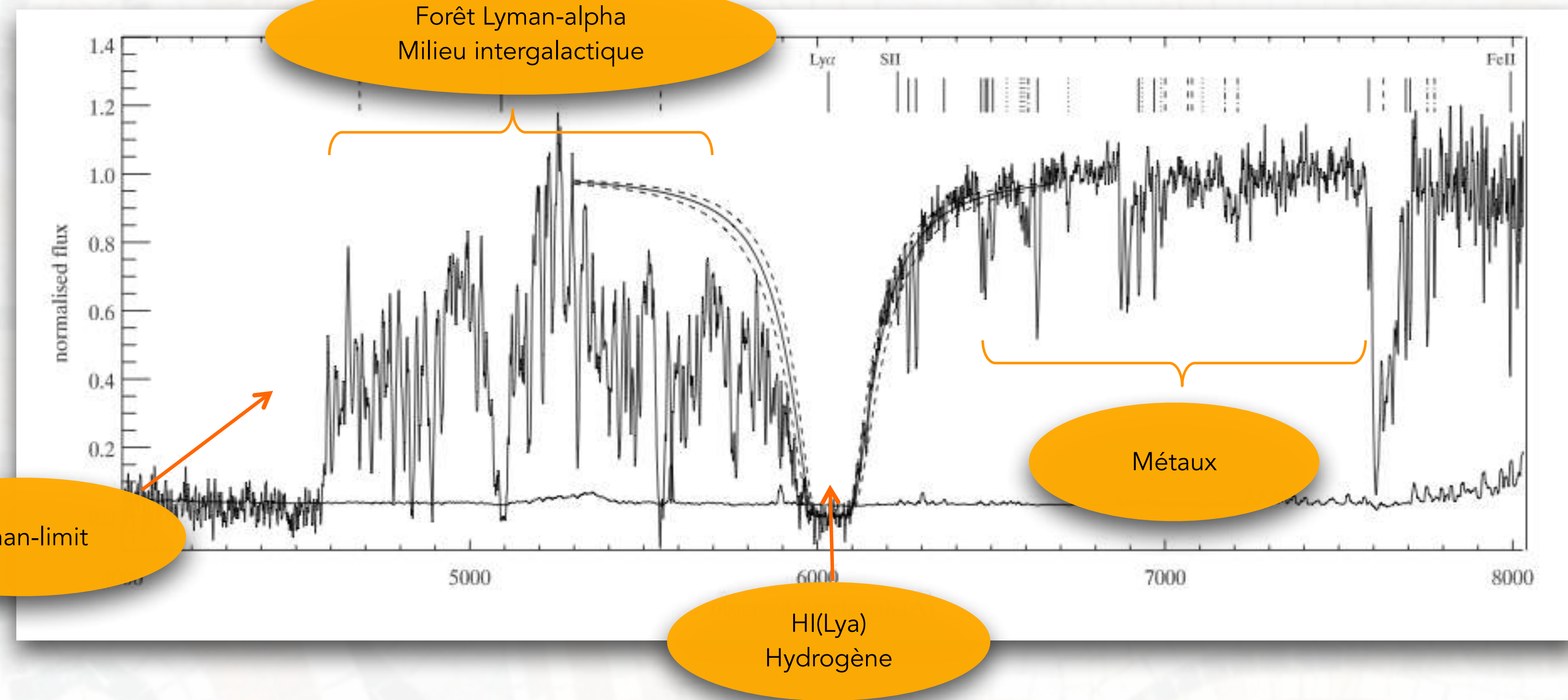
$z=3.97$

$R > 28.5$

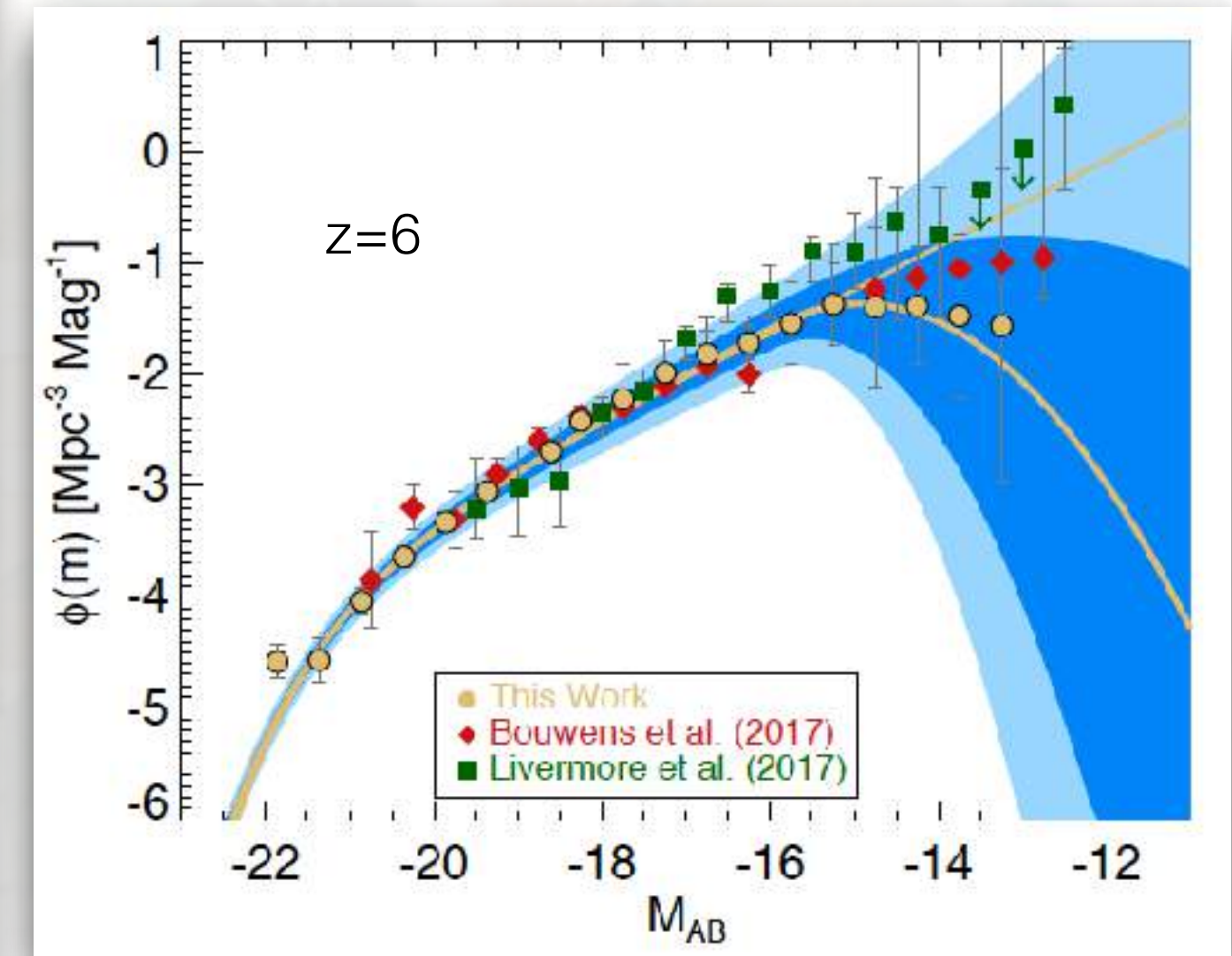
Chen+ 2005; Starling+2005

Sursauts gamma : sondes de l'univers lointain

Courtesy of Nial Tanvir

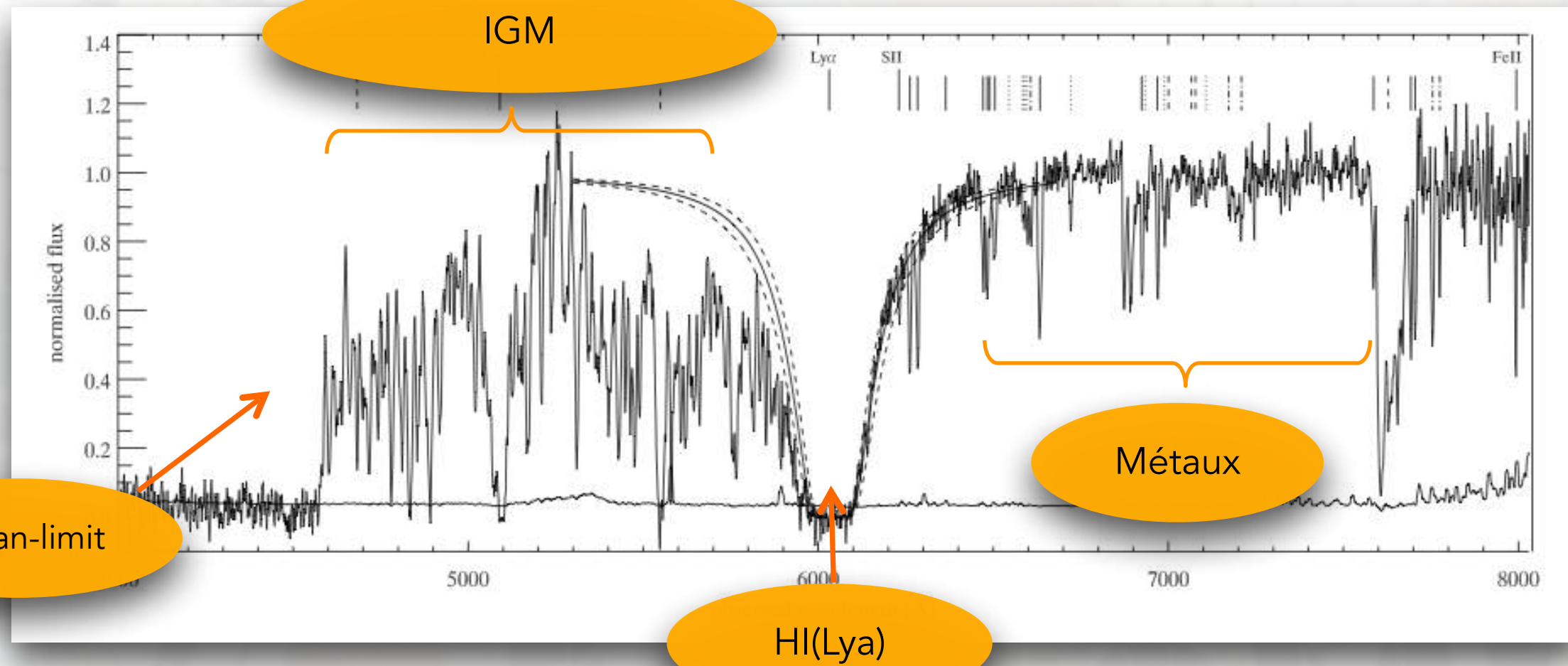


Atek+18



Sursauts gamma : sondes de l'univers lointain

Courtesy of Nial Tanvir

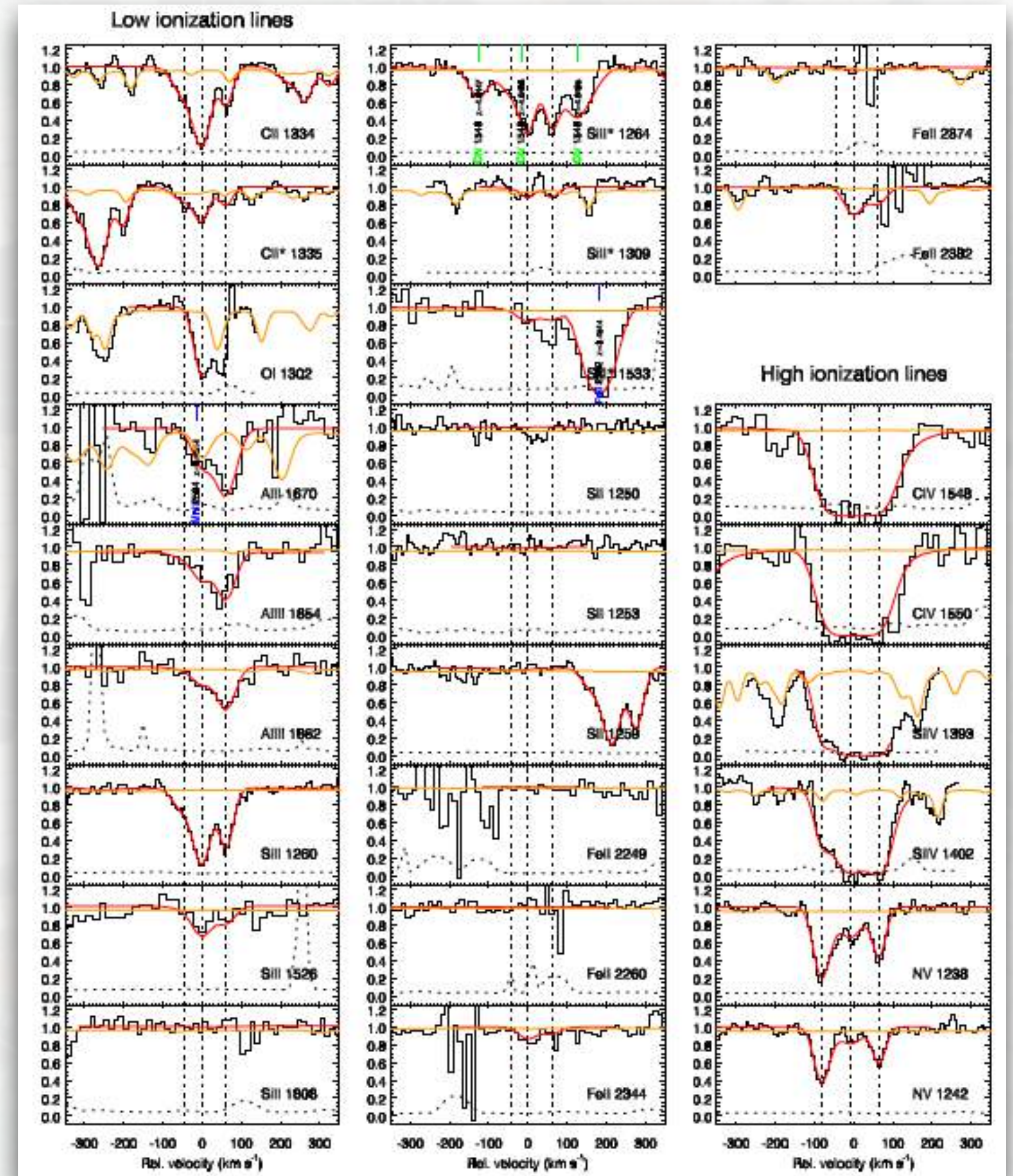


Enrichissement chimique des galaxies

Densité de colonne des métaux

Densité de colonne de l'hydrogène neutre

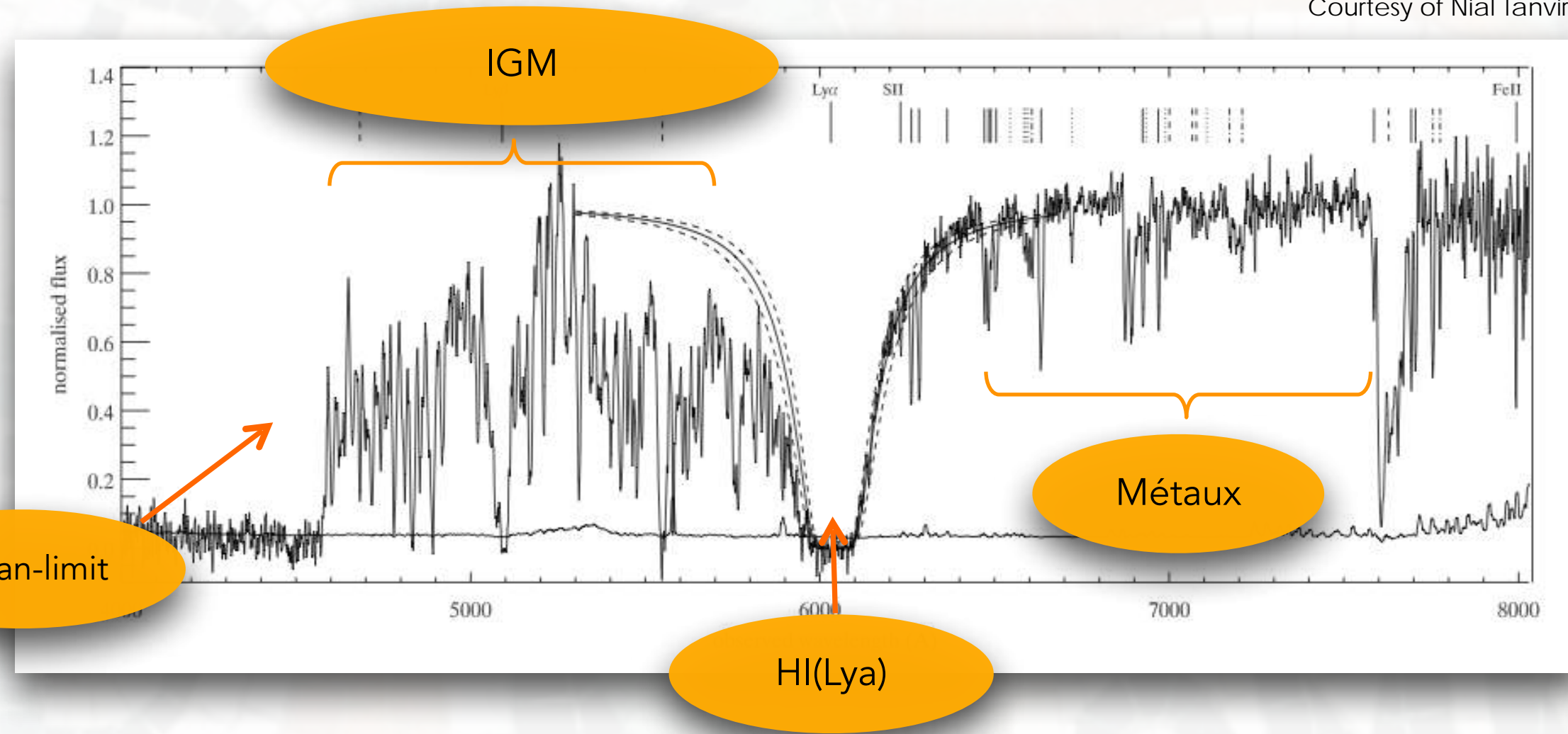
$z=5.9$



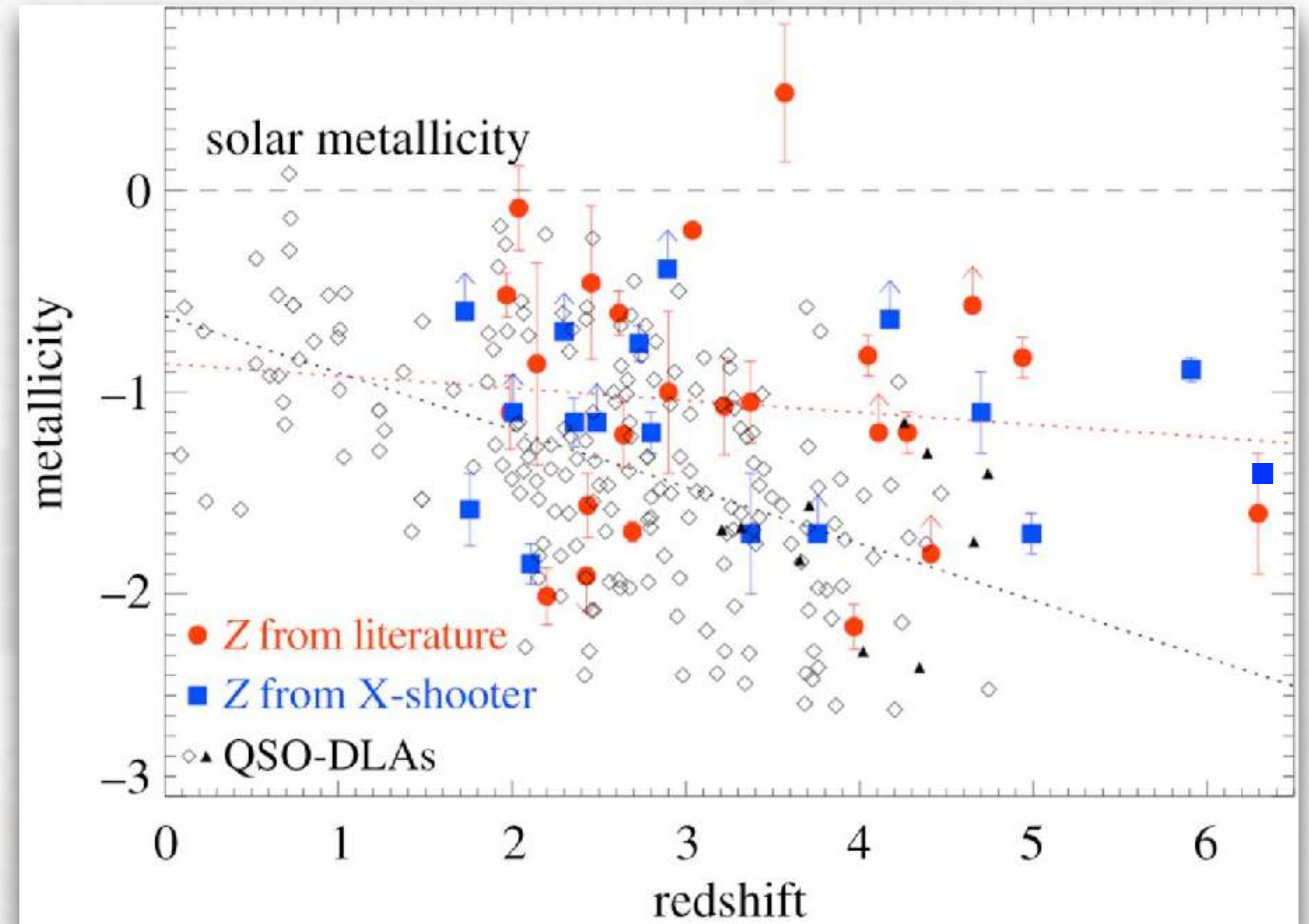
Sursauts gamma : sondes de l'univers lointain

Adapted from Thöne+13

Courtesy of Nial Tanvir



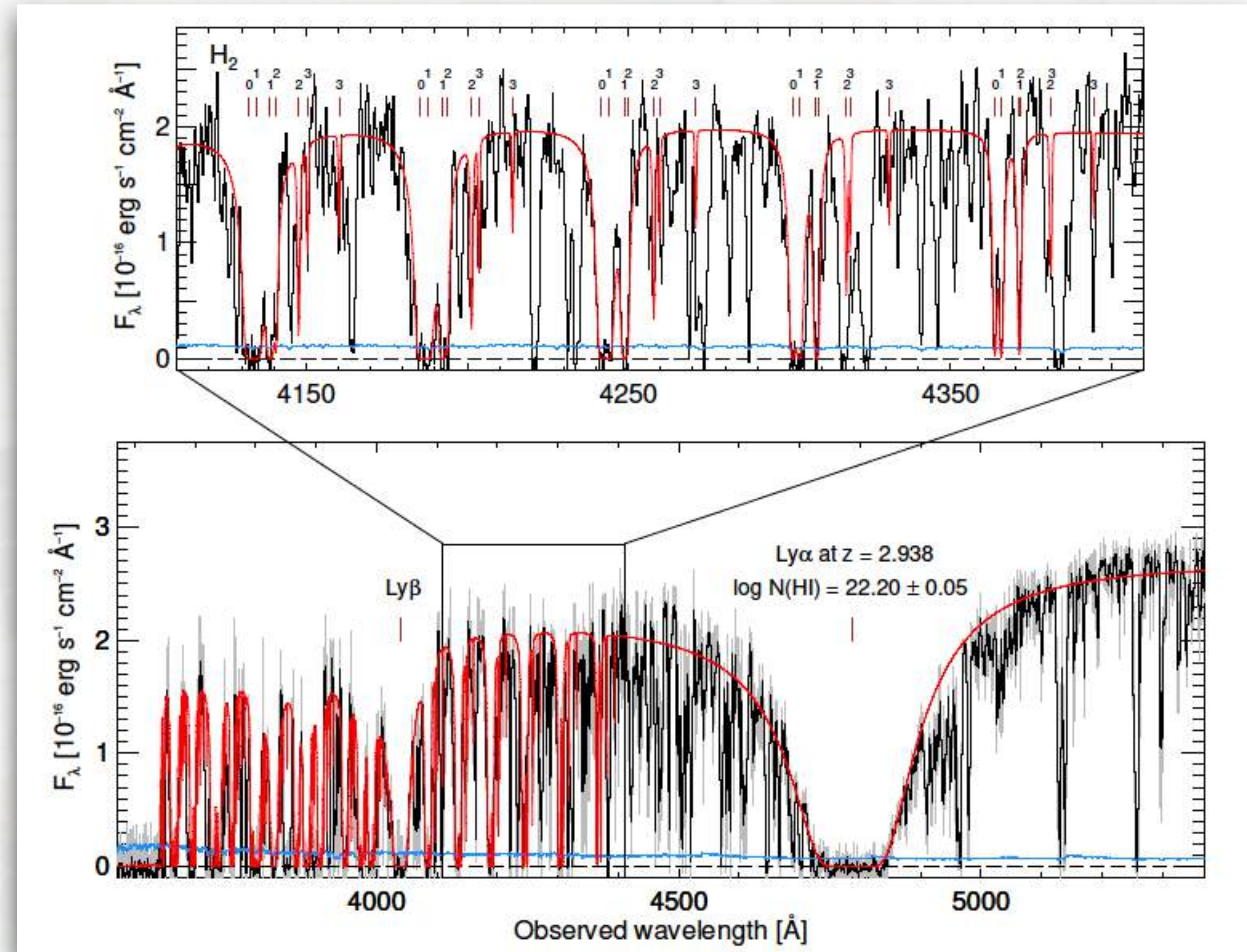
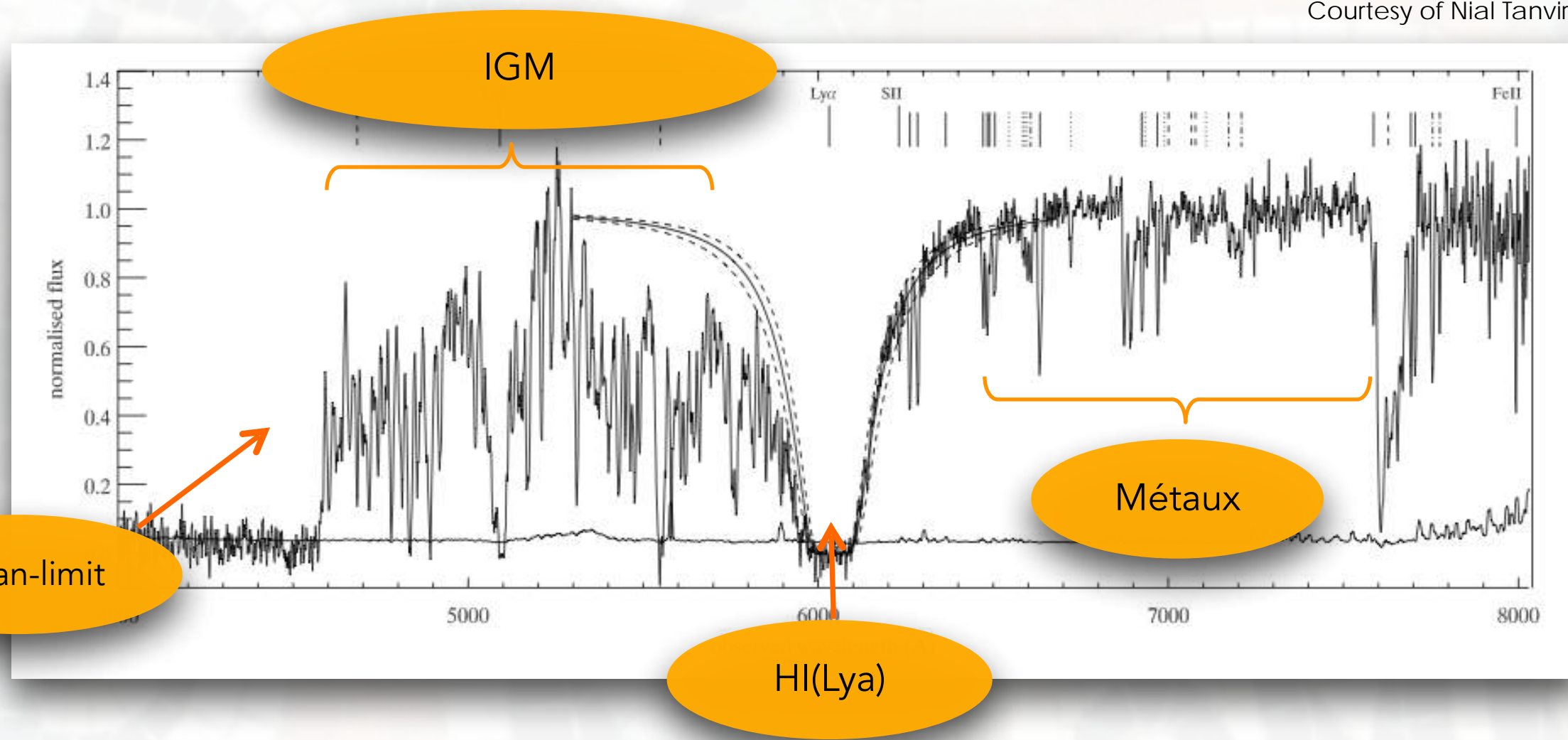
Enrichissement chimique des galaxies



Sursauts gamma : sondes de l'univers lointain

Bolmer+19

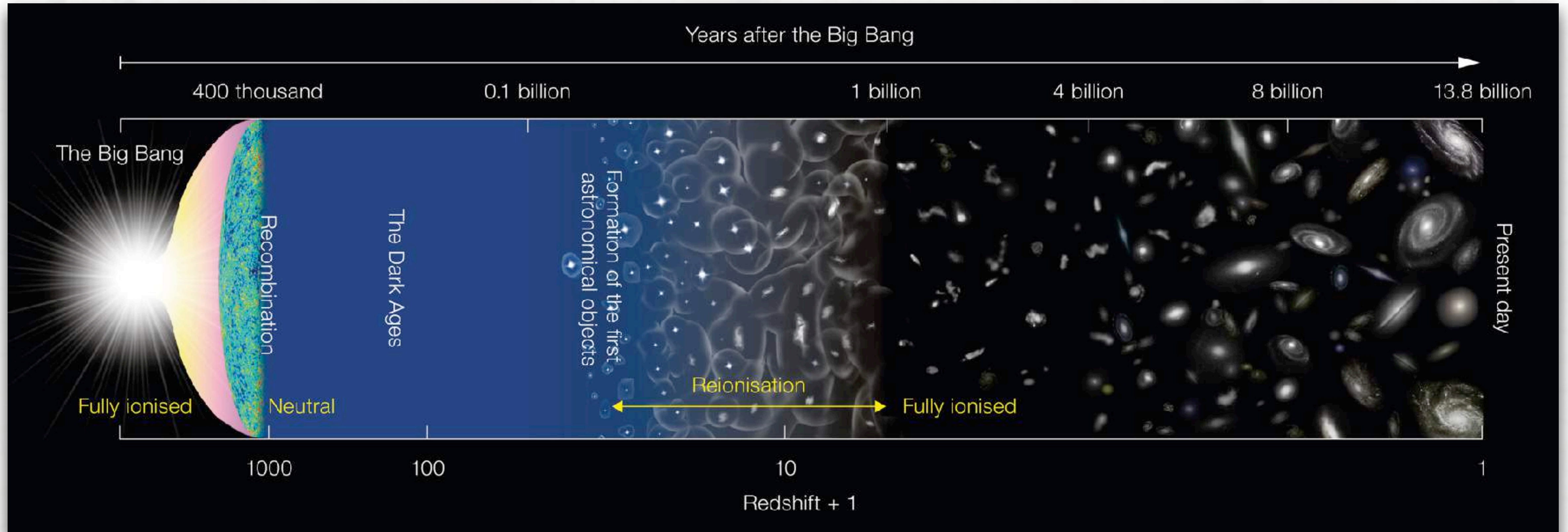
Courtesy of Nial Tanvir



Detection directe de l'hydrogène moléculaire

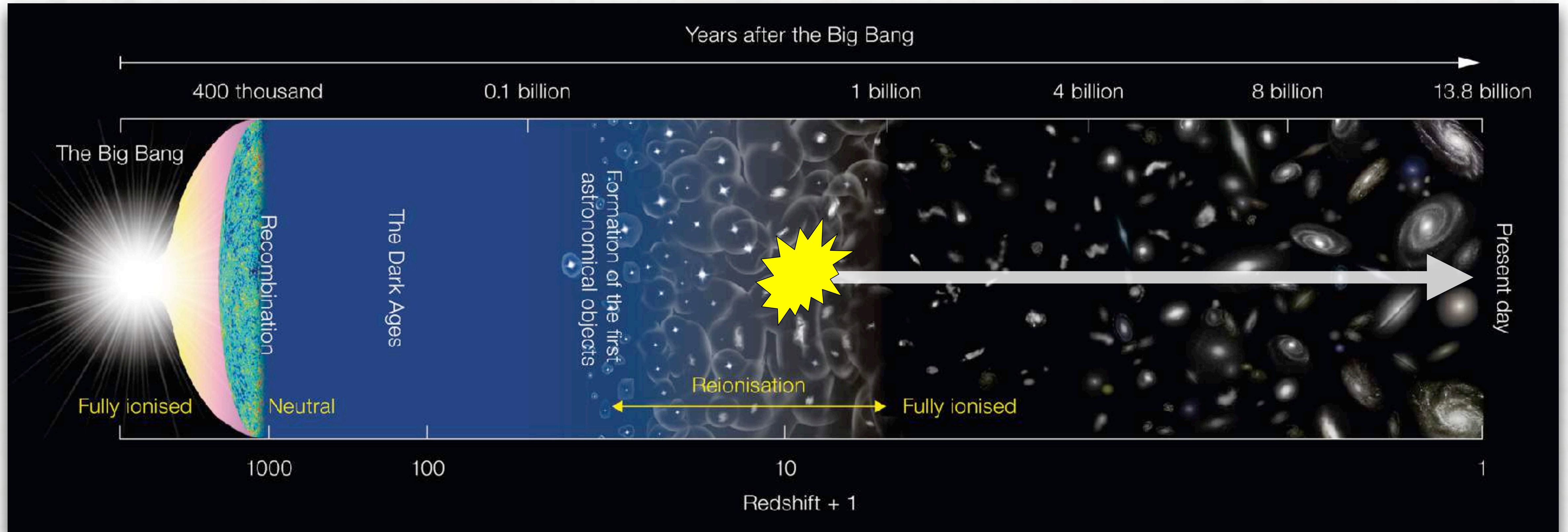
Sursauts gamma : sondes de l'univers lointain

Réionisation : qui et comment?



Sursauts gamma : sondes de l'univers lointain

Réionisation : qui et comment?

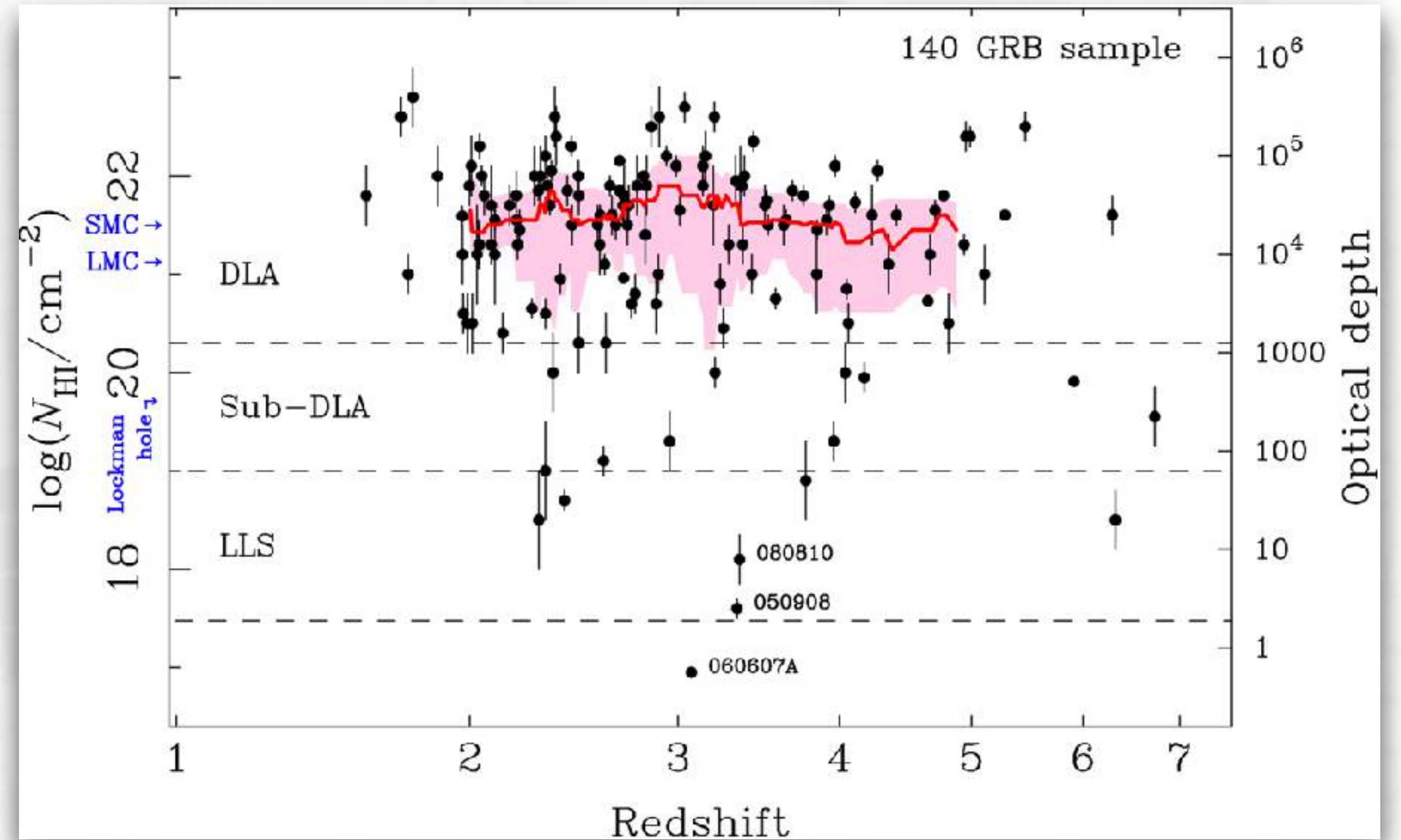
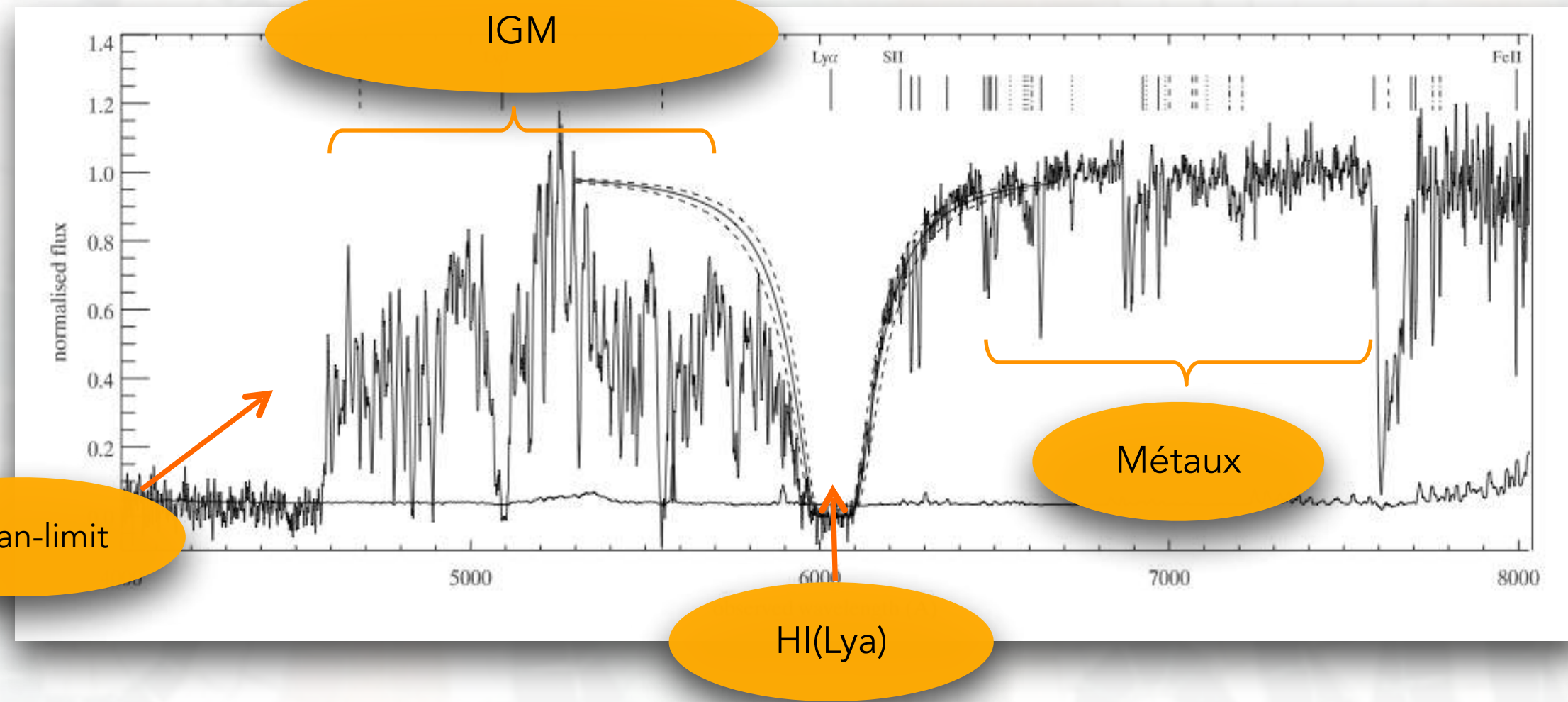


Sursauts gamma : sondes de l'univers lointain

Réionisation : qui et comment?

Tanvir+19

Courtesy of Nial Tanvir

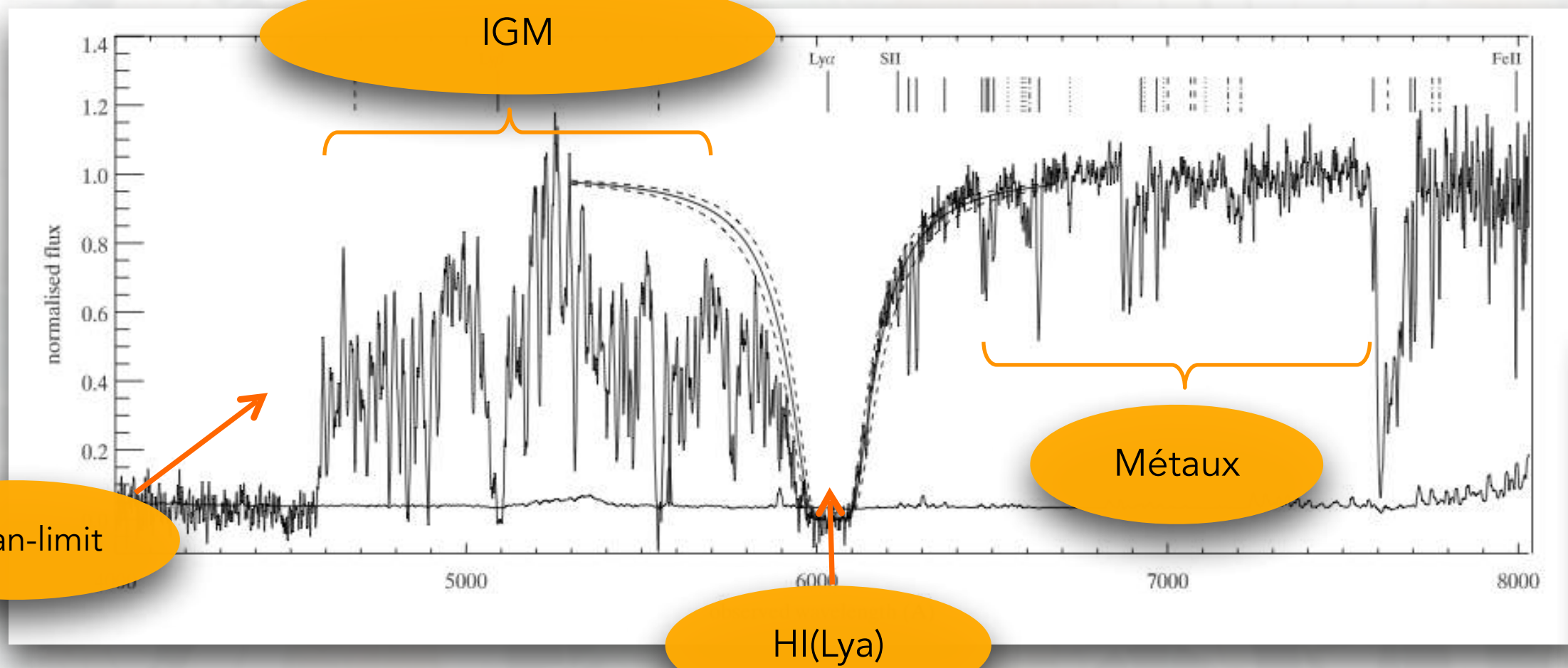


Fraction d'échappement des photons ionisants

$$f_{\text{esc}} < 0.015$$

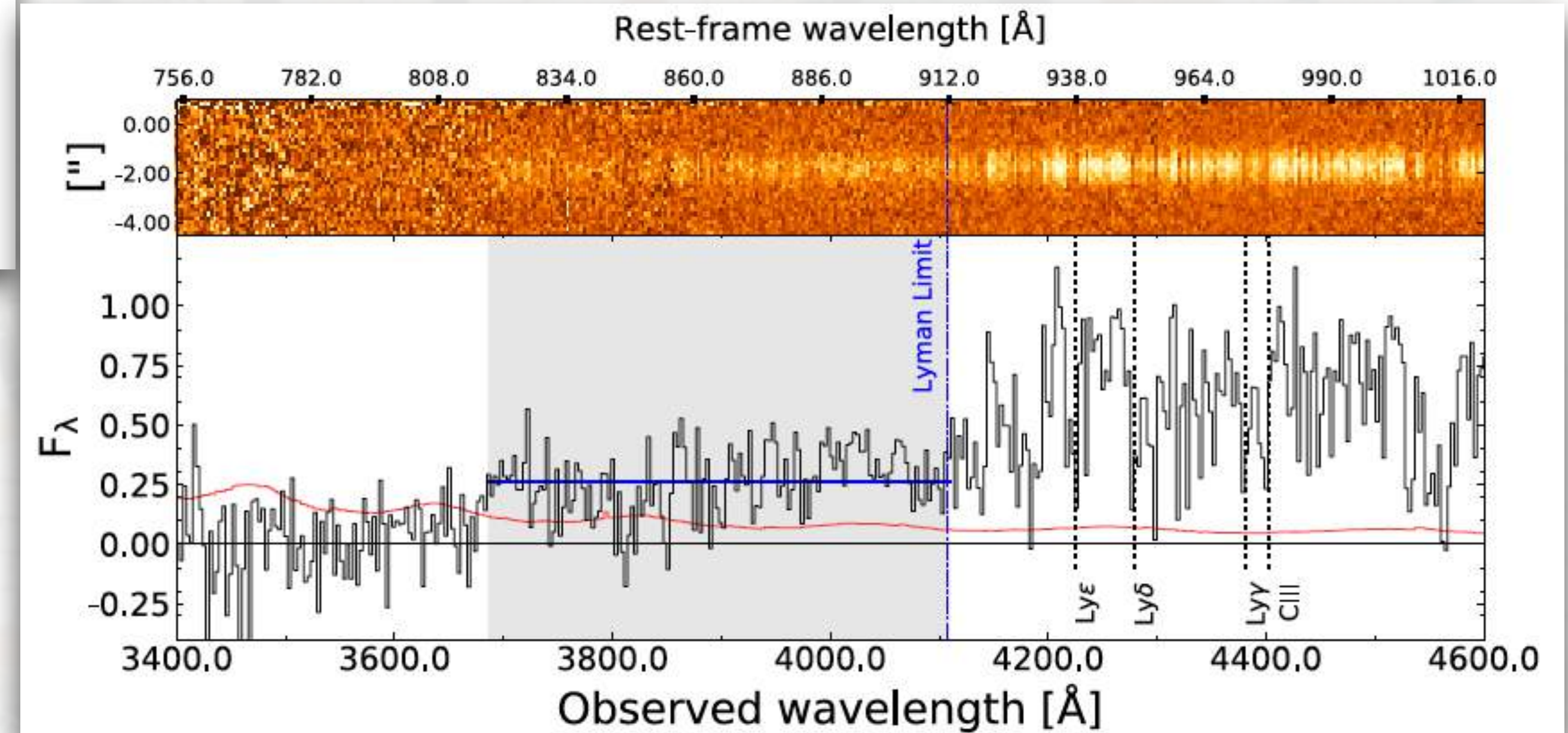
Sursauts gamma : sondes de l'univers lointain

Courtesy of Nial Tanvir



GRB191004B @ $z=3.5$

Vielfaure+20

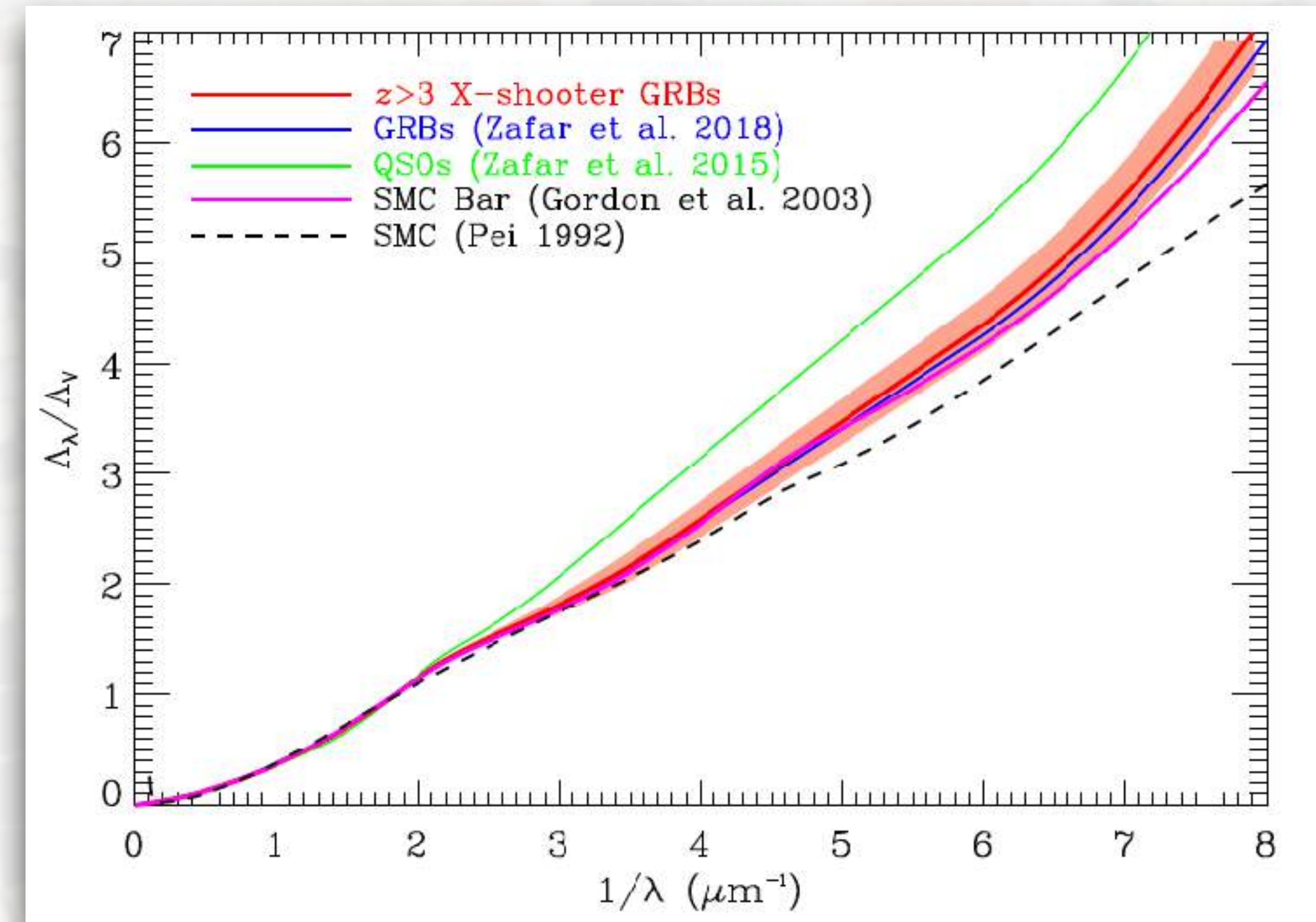
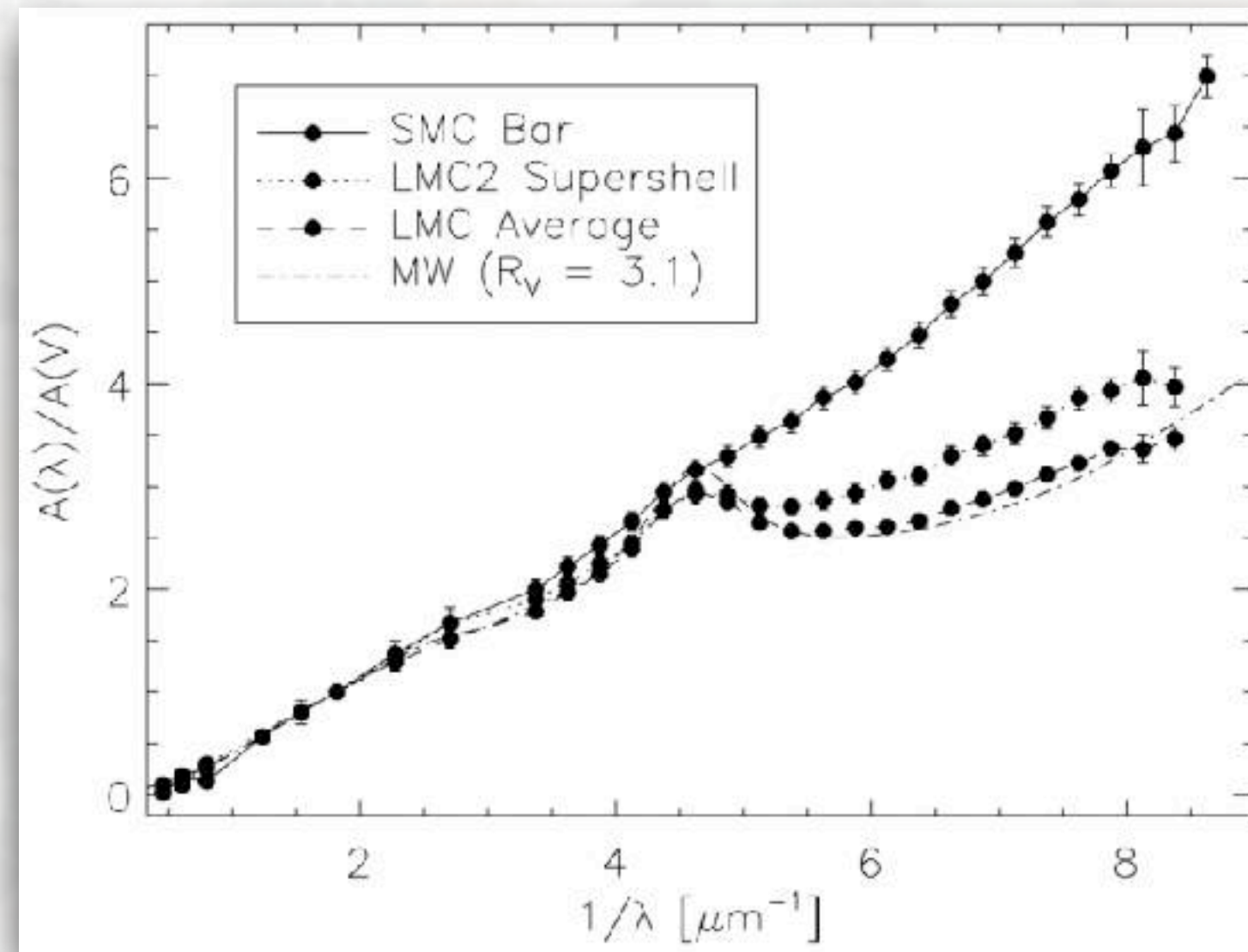


Fraction d'échappement des photons ionisants

Sursauts gamma : sondes de l'univers lointain

Zafar et al. 2018

Gordon et al. 2003



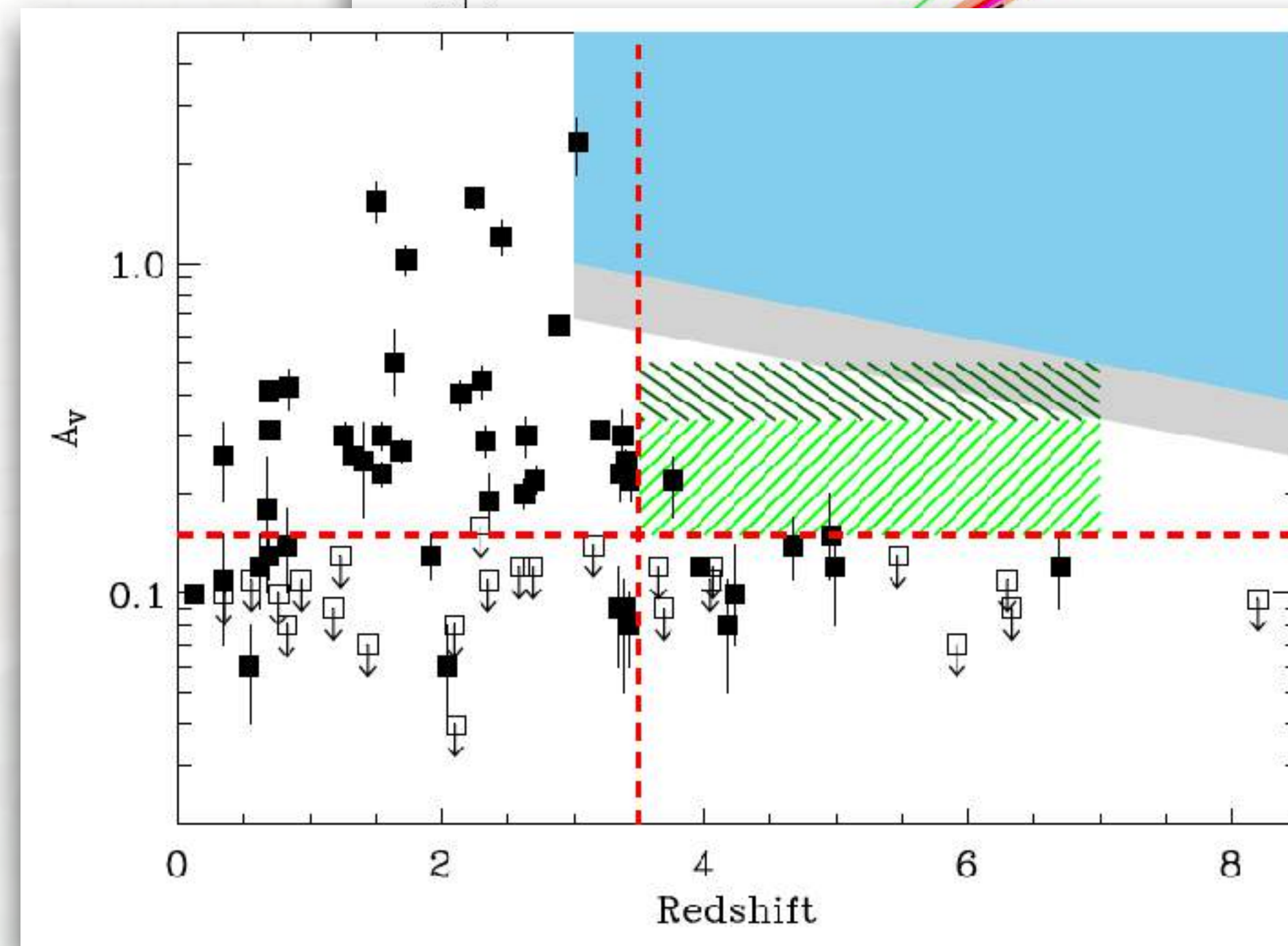
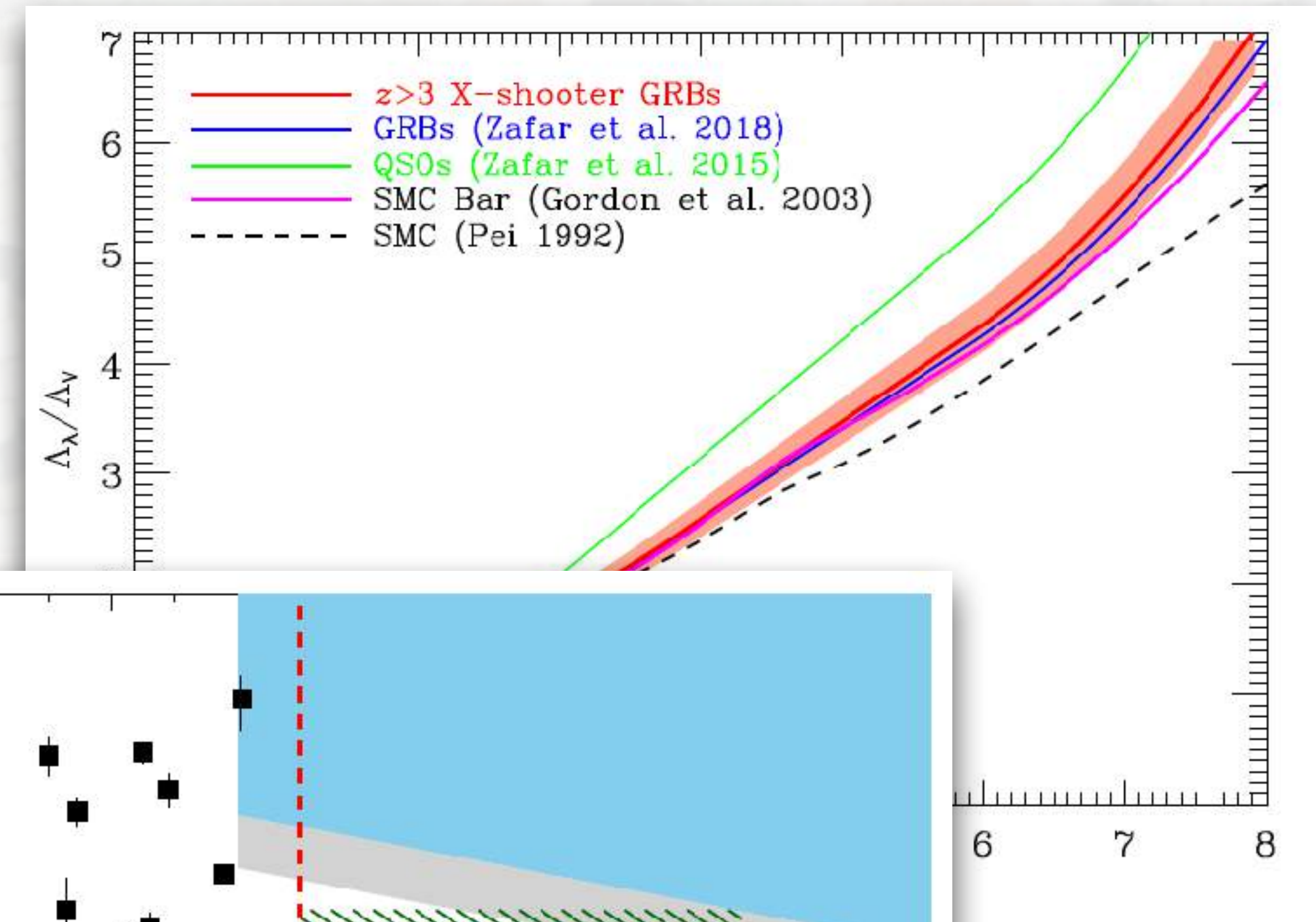
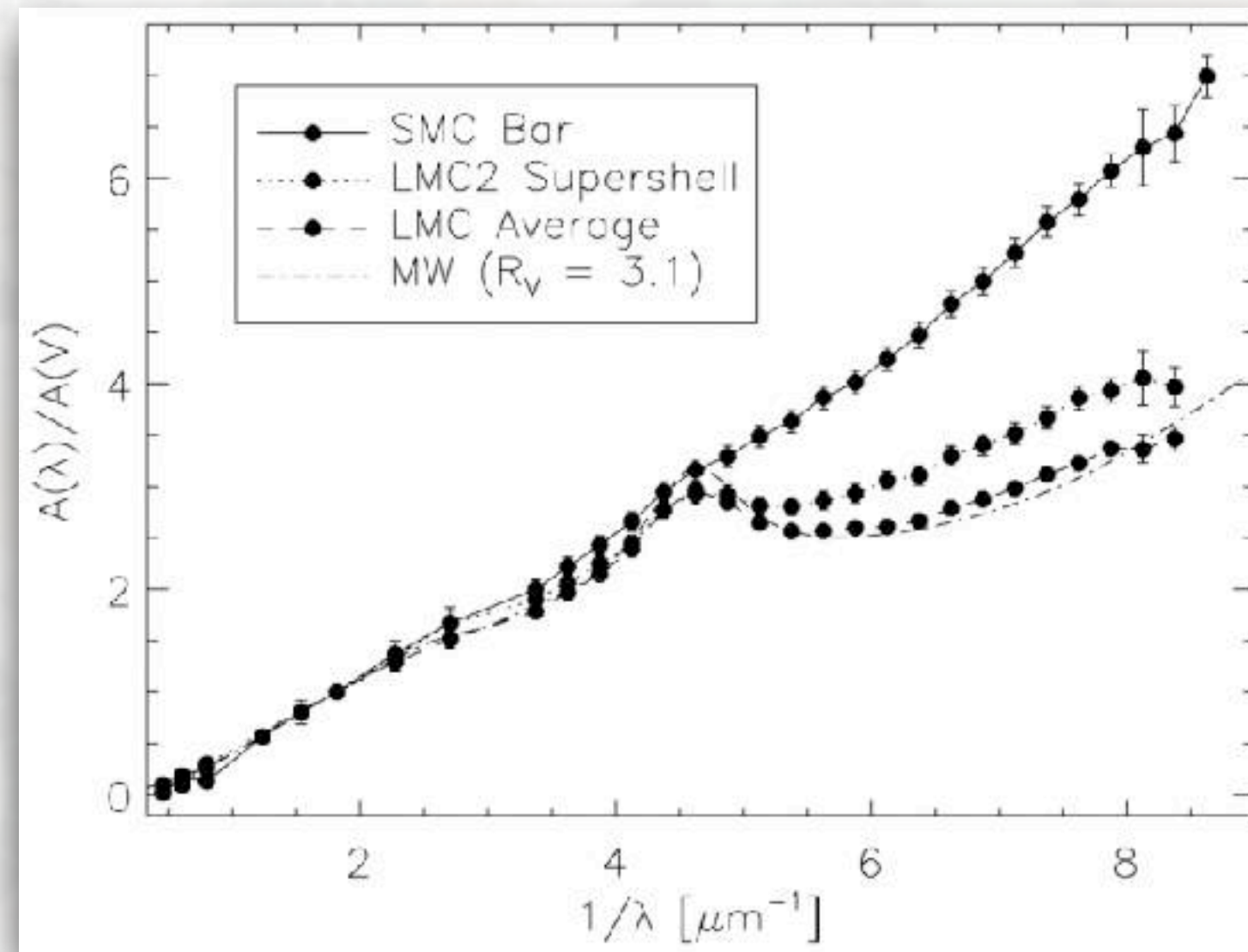
Poussière et extinction

voir aussi Corre et al. 2018

Sursauts gamma : sondes de l'univers lointain

Zafar et al. 2018

Gordon et al. 2003



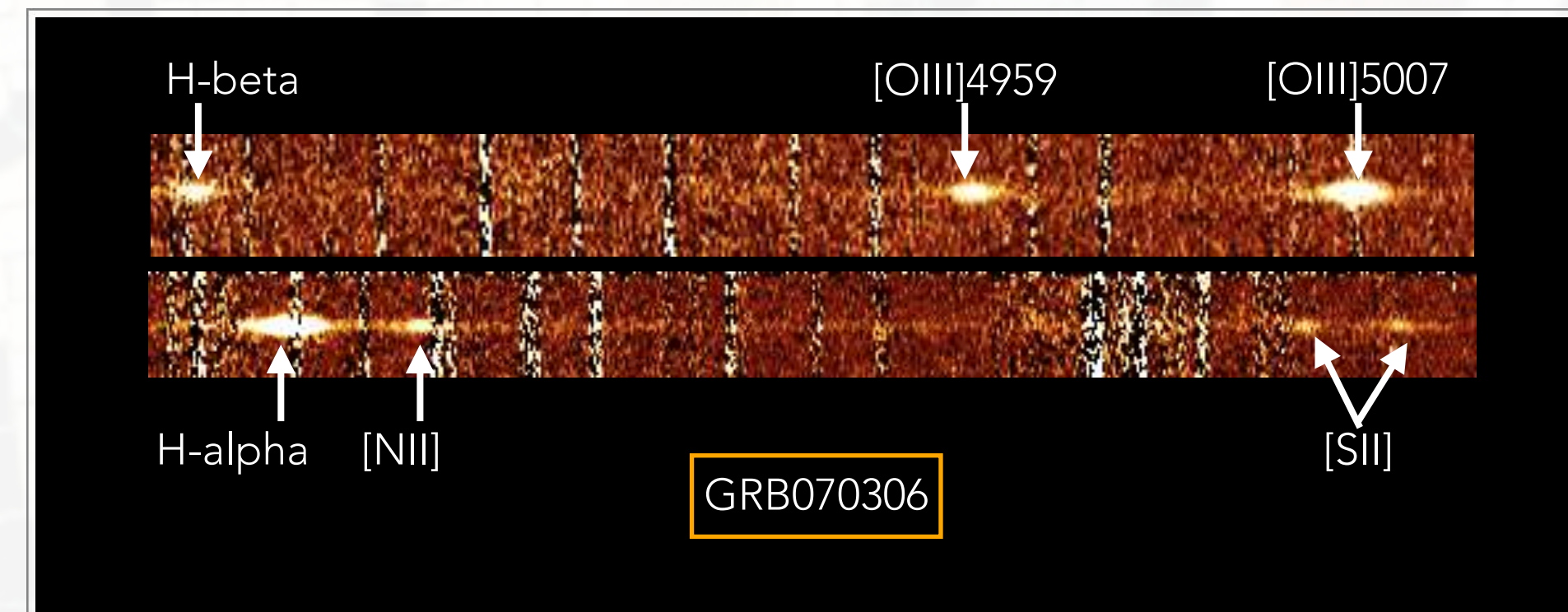
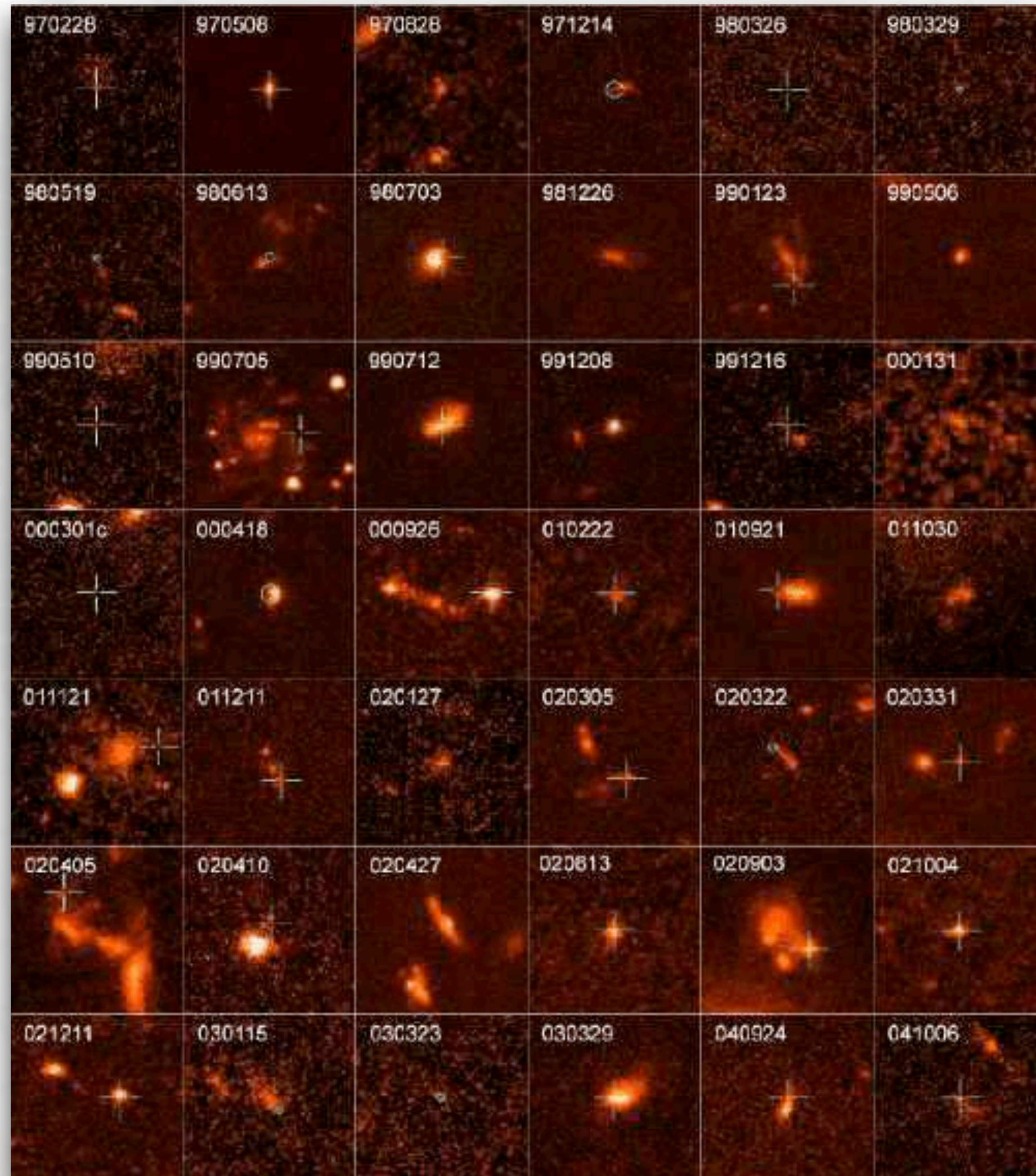
Poussière et extinction

voir aussi Corre et al. 2018

Sursauts gamma : sondes de l'univers lointain

Emission ET absorption

Fruchter et al. 2006

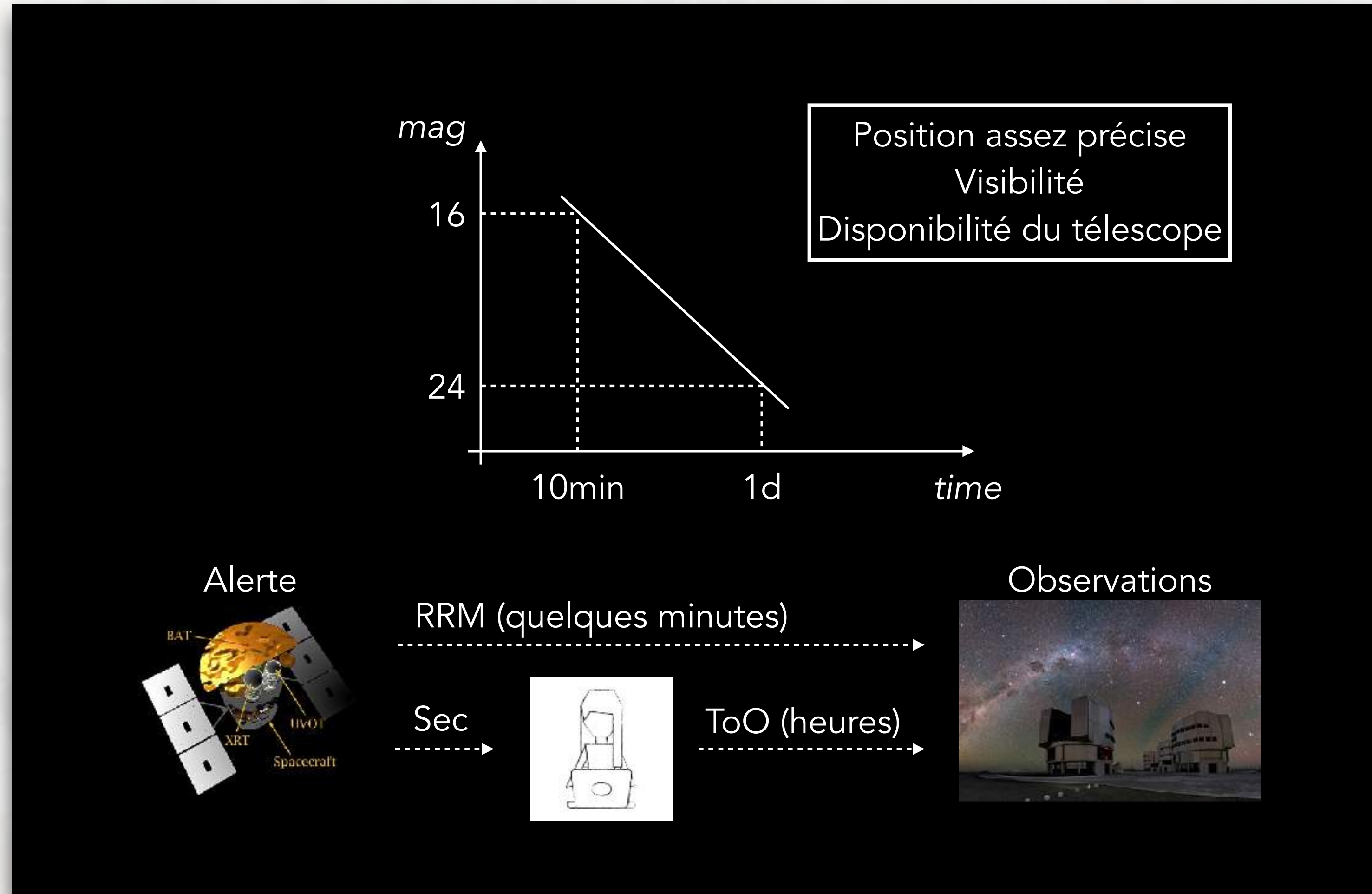


Sursauts gamma : sondes de l'univers lointain

- Star-forming galaxies
- not luminosity selected
- extend to faint galaxies & high z
- cold/warm gas + ionized gas
- HI, metallicity, dust, SFR...
- kinematics
- inflow/outflow
- study réionization
- systematically & at any z !

Seulement les GRB nous permettent d'étudier de cette façon
les galaxies typiques de l'univers jeune

Sursauts gamma : sondes de l'univers lointain



Sursauts gamma : sondes de l'univers lointain

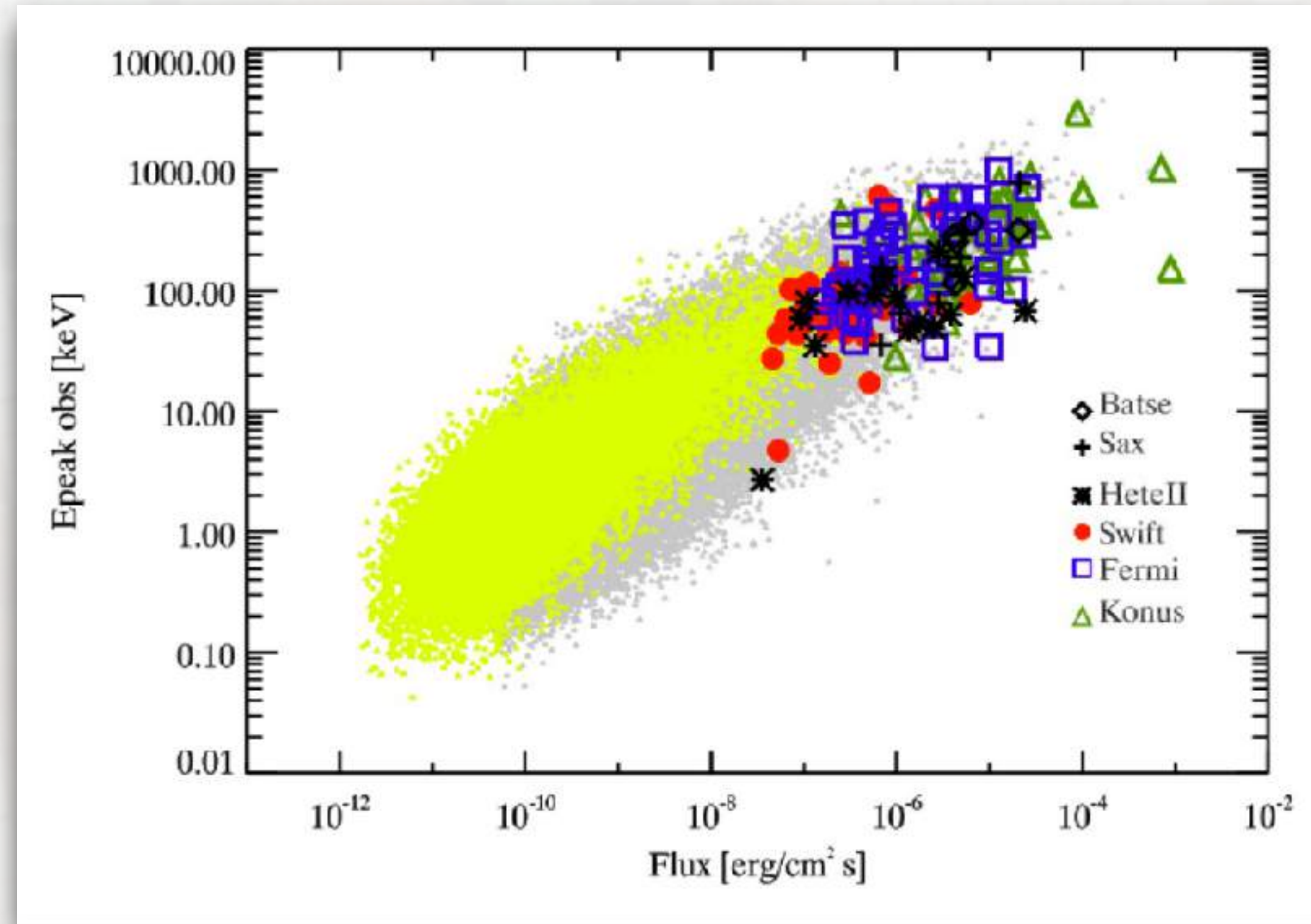
X-Shooter

- 3000 - 24000 Å
- Résolution 5000 - 10000
- $m_{AB} \sim 21$ (1h, SNR=10; K~19)



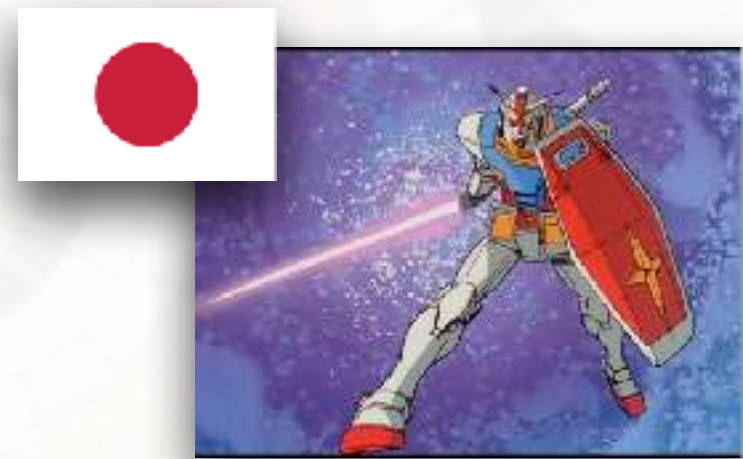
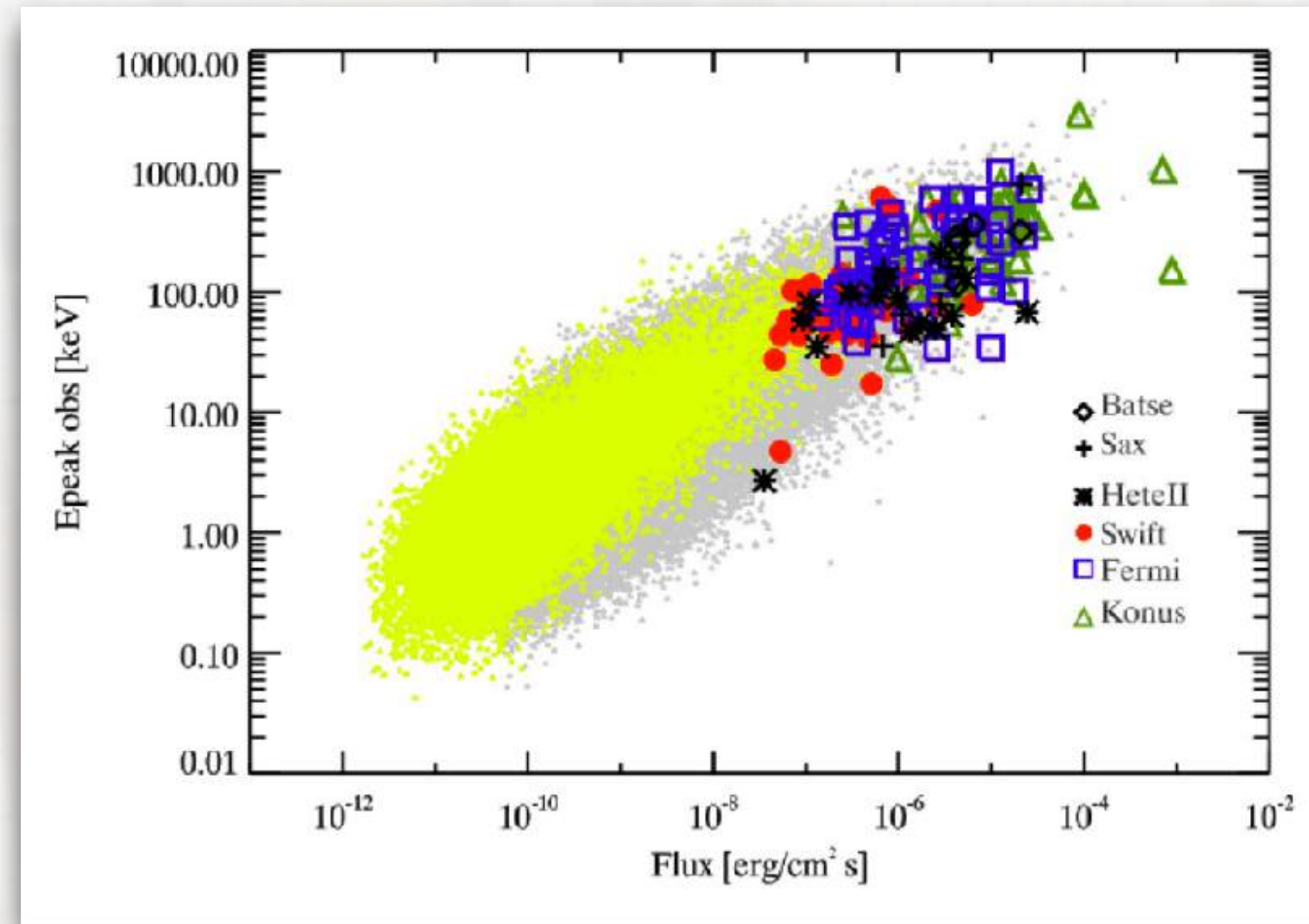
Sursauts gamma : sondes de l'univers lointain

Ghirlanda+ 2015



Sursauts gamma : sondes de l'univers lointain

Ghirlanda+ 2015



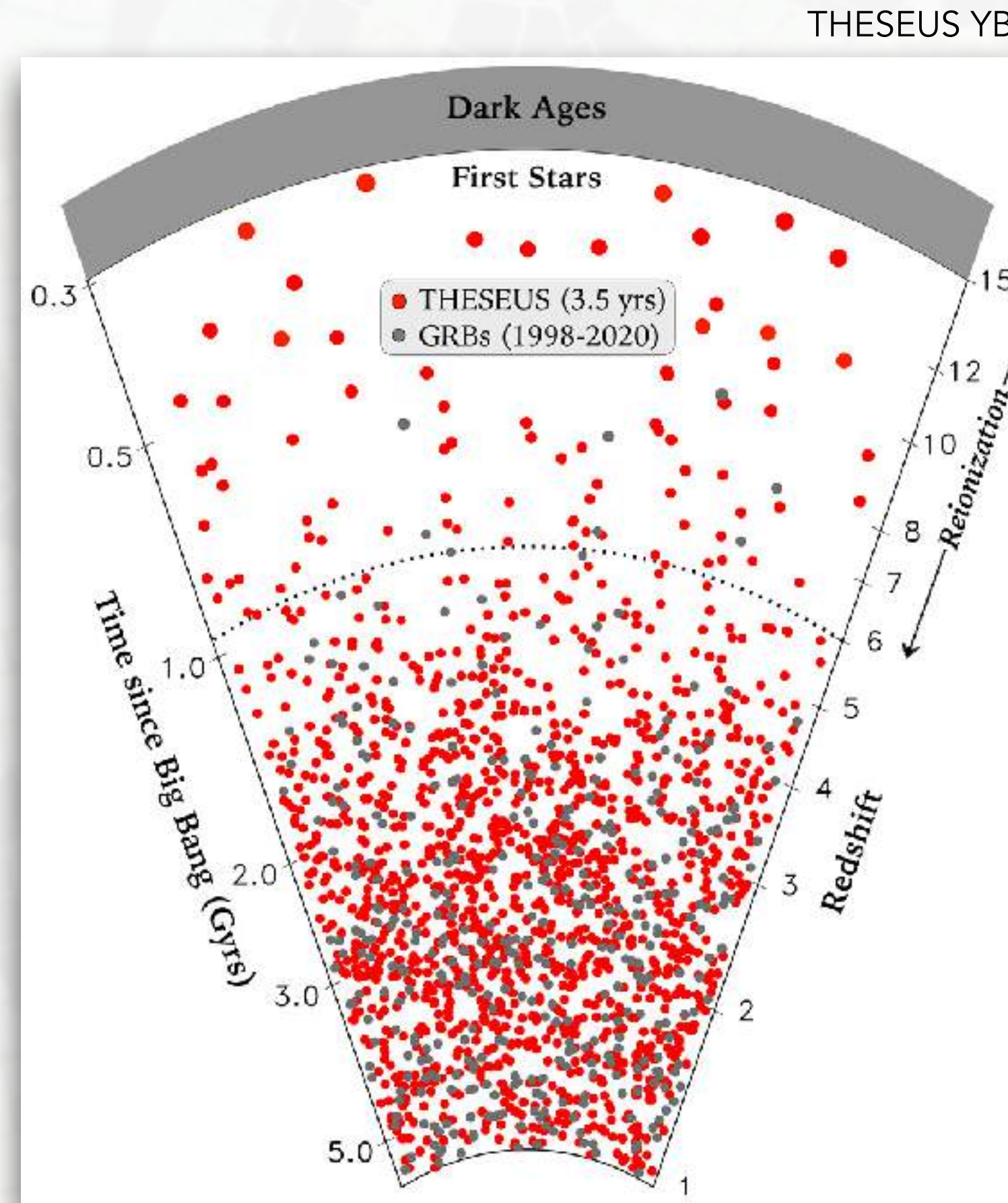
HiZ-GUNDAM

The Gamow Explorer



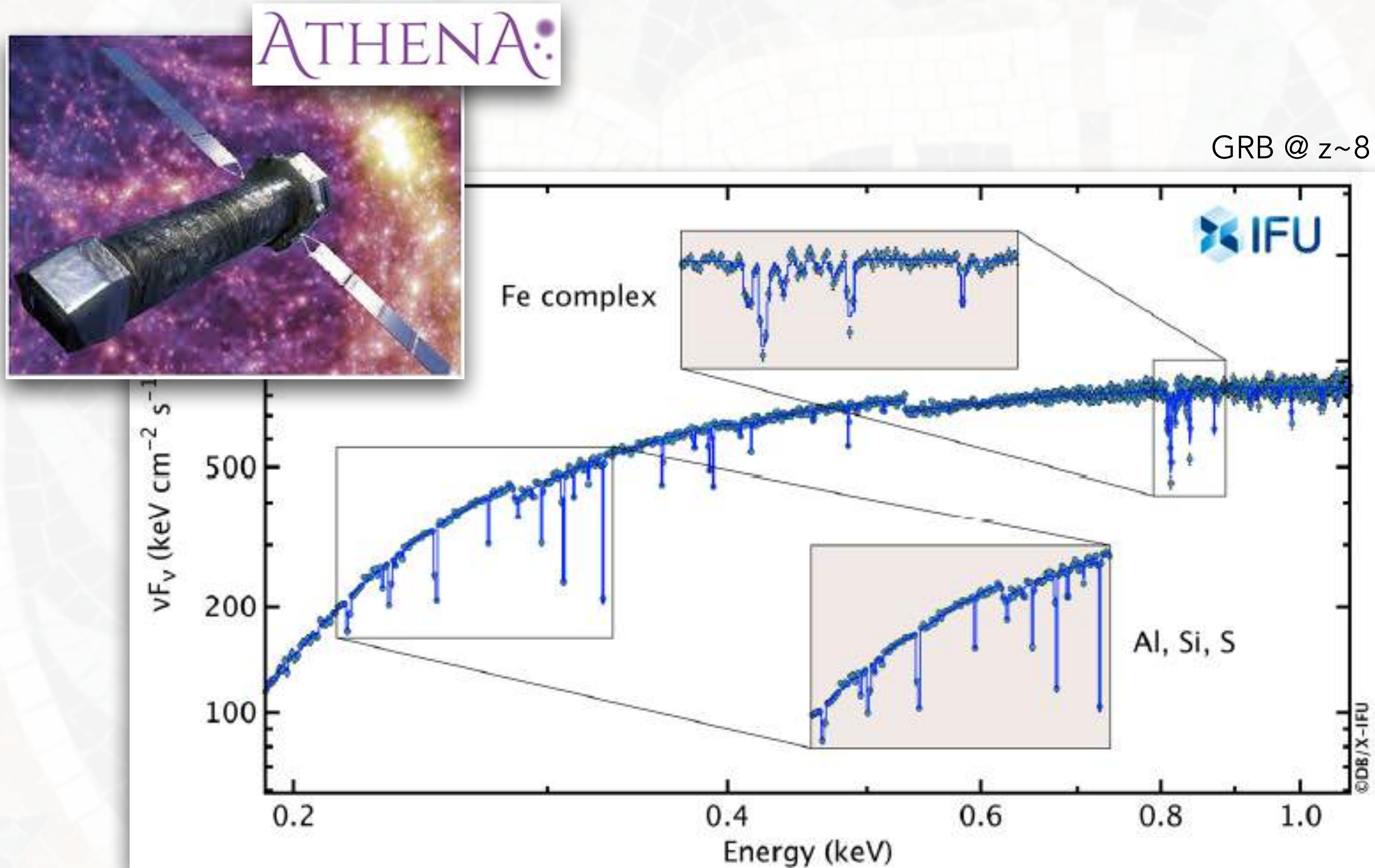
www.isdc.unige.ch/theseus

Sursauts gamma : sondes de l'univers lointain



www.isdc.unige.ch/theseus

Sursauts gamma : sondes de l'univers lointain



THESEUS YB

Sursauts gamma : messages à retenir

Laboratoire physique exceptionnel

Beaucoup de questions encore ouvertes

Observations Multi-longueur d'onde ET multi-messenger nécessaires pour répondre

Sondes uniques de l'univers lointain

Nécessité de satellites capable de détecter (et présélectionner) beaucoup de GRB à grand z

Grand impact de futures instruments



Merci beaucoup!