

# SURSAUTS GAMMA (GRBS): HYPERNOVAE & FUSIONS D'ÉTOILES À NEUTRONS

Frédéric Daigne (Institut d'Astrophysique de Paris)

Kandinsky - Composition 8- 1923  
Guggenheim Museum, New-York



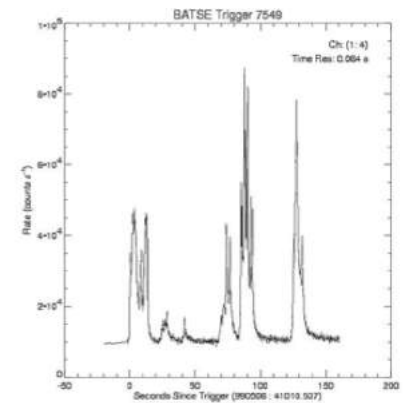
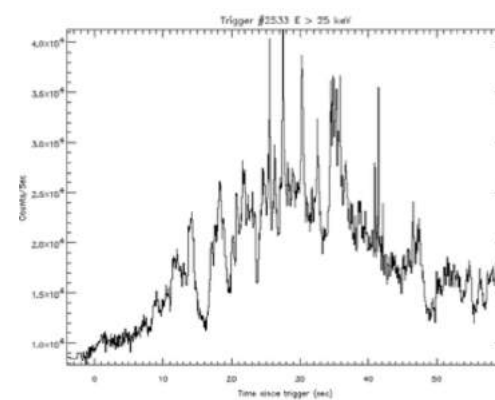
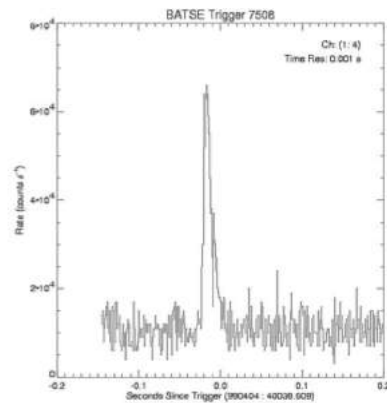
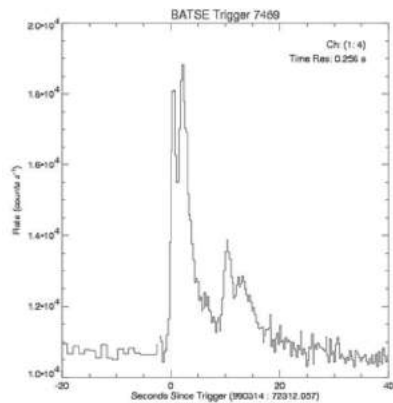
Kandinsky - Curves and sharp angles - 1923  
Guggenheim Museum, New-York

- Retour sur les observations fondamentales : construction d'un scénario théorique
- À quel point les sursauts gamma sont-ils relativistes ?
- La physique de la rémanence : succès récents avec la première détection d'un GRB au TeV
- La physique du GRB : une physique encore mal comprise
- La physique des progéniteurs et de l'événement initial
  - sursauts longs : diversité & évolution
  - sursauts courts : la révolution de 170817

# Contraintes observationnelles sur le scénario théorique

- **Variabilité rapide** (observée au moins jusqu'à  $\Delta t_{\text{var}} \simeq 10 \text{ ms}$ ) : **source compacte (NS, BH stellaire)**

$$\text{Causalité : } R \leq c\Delta t_{\text{var}} \simeq 3000 \text{ km} \left( \frac{\Delta t_{\text{var}}}{10 \text{ ms}} \right)$$



L'émission « prompt » des sursauts gamma est très variable.

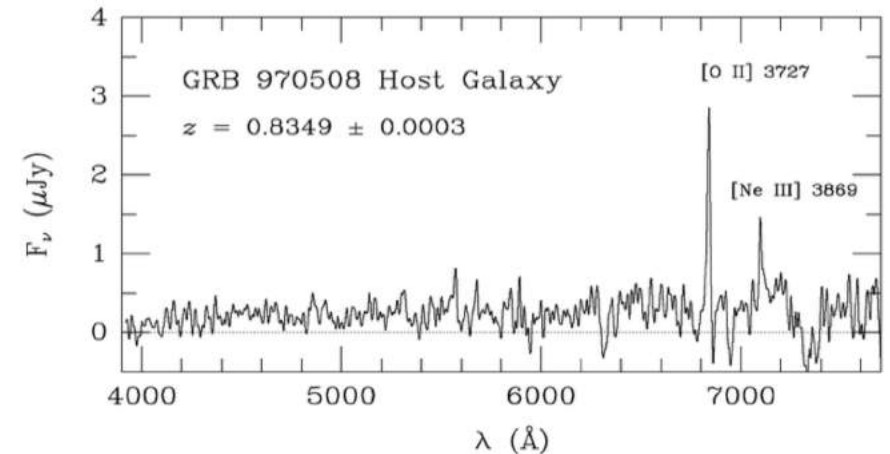
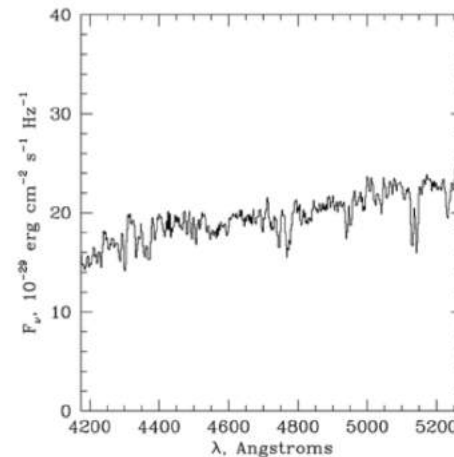
# Contraintes observationnelles sur le scénario théorique

- **Variabilité rapide** (observée au moins jusqu'à  $\Delta t_{\text{var}} \simeq 10 \text{ ms}$ ) : **source compacte (NS, BH stellaire)**

$$\text{Causalité : } R \leq c\Delta t_{\text{var}} \simeq 3000 \text{ km} \left( \frac{\Delta t_{\text{var}}}{10 \text{ ms}} \right)$$

- **Energie libérée** sous forme de photons gamma très élevée : **effondrement gravitationnel**

$$E_{\gamma,\text{iso}} \sim 10^{51-54} \text{ erg} \quad E_{\gamma,\text{true}} \sim 10^{49-52} \text{ erg ?}$$



Les sursauts gamma sont cosmologiques :  
donc intrinsèquement très brillants

# Contraintes observationnelles sur le scénario théorique

- **Variabilité rapide** (observée au moins jusqu'à  $\Delta t_{\text{var}} \simeq 10 \text{ ms}$ ) : **source compacte (NS, BH stellaire)**

$$\text{Causalité : } R \leq c\Delta t_{\text{var}} \simeq 3000 \text{ km} \left( \frac{\Delta t_{\text{var}}}{10 \text{ ms}} \right)$$

- **Energie libérée** sous forme de photons gamma très élevée : **effondrement gravitationnel**

- **Fusion nucléaire** dans les étoiles :  $\Delta E_{\text{nuc}} = \epsilon_{\text{nuc}} f \overline{M} c^2$  (Soleil:  $\sim 2 \cdot 10^{51}$  erg)

$\overline{M} c^2$  : énergie de masse de l'étoile (Soleil:  $1.8 \cdot 10^{54}$  erg)

$f$  : fraction de la masse en fusion (Soleil:  $\sim 10\%$ )

$\epsilon_{\text{nuc}}$  : efficacité de la fusion nucléaire (fusion H :  $0.7\%$ )

Echelle de temps longue :  $t_{\text{nuc}} = \Delta E_{\text{nuc}} / L$ , Soleil :  $\sim 10$  Gyr)

$E_{\gamma, \text{true}} \sim 10^{49-52}$  erg?

# Contraintes observationnelles sur le scénario théorique

- **Variabilité rapide** (observée au moins jusqu'à  $\Delta t_{\text{var}} \simeq 10 \text{ ms}$ ) : **source compacte (NS, BH stellaire)**

$$\text{Causalité : } R \leq c\Delta t_{\text{var}} \simeq 3000 \text{ km} \left( \frac{\Delta t_{\text{var}}}{10 \text{ ms}} \right)$$

- **Energie libérée** sous forme de photons gamma très élevée : **effondrement gravitationnel**

- Fusion nucléaire dans les étoiles :  $\Delta E_{\text{nuc}} = \epsilon_{\text{nuc}} f M c^2$  (Soleil:  $\sim 2 \cdot 10^{51}$  erg)

Echelle de temps longue :  $t_{\text{nuc}} = \Delta E_{\text{nuc}}/L$ , Soleil :  $\sim 10$  Gyr)

- **Accrétion** sur un objet compact :  $\Delta E_{\text{acc}} = \epsilon_{\text{acc}} f M c^2$  (BH de  $10 M_{\odot}$  accrétant  $1 M_{\odot}$  :  $\sim 10^{53}$  erg )

$\overline{M}c^2$  : énergie de masse de l'objet compact  
(BH de  $10 M_{\odot}$  :  $1.8 \cdot 10^{55}$  erg)

$\overline{f}$  : masse accrétée =  $fM$   
(BH de  $10 M_{\odot}$  accrétant  $1 M_{\odot}$  :  $f \sim 10\%$ )

$\overline{\epsilon}_{\text{acc}}$  : efficacité de l'accrétion (BH sans rotation :  $\sim 6\%$ )

Sources permanentes (e.g. binaires X) :  $t_{\text{acc}} = M/\dot{m}$  (BH de  $10 M_{\odot}$  :  $< 0.1 M_{\odot}/\text{Myr}$  (Eddington))

$E_{\gamma, \text{true}} \sim 10^{49-52}$  erg?

# Contraintes observationnelles sur le scénario théorique

- **Variabilité rapide** (observée au moins jusqu'à  $\Delta t_{\text{var}} \simeq 10 \text{ ms}$ ) : **source compacte (NS, BH stellaire)**

$$\text{Causalité : } R \leq c\Delta t_{\text{var}} \simeq 3000 \text{ km} \left( \frac{\Delta t_{\text{var}}}{10 \text{ ms}} \right)$$

- **Energie libérée** sous forme de photons gamma très élevée : **effondrement gravitationnel**

- Fusion nucléaire dans les étoiles :  $\Delta E_{\text{nuc}} = \epsilon_{\text{nuc}} f M c^2$  (Soleil:  $\sim 2 \cdot 10^{51}$  erg)

Echelle de temps longue :  $t_{\text{nuc}} = \Delta E_{\text{nuc}}/L$ , Soleil :  $\sim 10$  Gyr)

- Accrétion sur un objet compact :  $\Delta E_{\text{acc}} = \epsilon_{\text{acc}} f M c^2$  (BH de  $10 M_{\odot}$  accrétant  $1 M_{\odot}$  :  $\sim 10^{53}$  erg)

Sources permanentes (e.g. binaires X) :  $t_{\text{acc}} = M/\dot{m}$  (BH de  $10 M_{\odot}$  :  $< 0.1 M_{\odot}/\text{Myr}$  (Eddington))

- **Effondrement gravitationnel** pour former un objet compact stellaire :  $\Delta E_{\text{grav}} \simeq \Xi M c^2$   
(  $\sim 3 \cdot 10^{53}$  erg pour la formation d'une étoile à neutrons)

$M c^2$  : énergie de masse de l'objet compact formé ( $1.8 \cdot 10^{54}$  erg par masse solaire)

$\Xi = GM/Rc^2$  : compacité de l'objet formé (0.1 à 1 pour NS  $\rightarrow$  BH)

$E_{\gamma, \text{true}} \sim 10^{49-52}$  erg?

# Contraintes observationnelles sur le scénario théorique

- **Variabilité rapide** (observée au moins jusqu'à  $\Delta t_{\text{var}} \simeq 10 \text{ ms}$ ) : **source compacte (NS, BH stellaire)**

$$\text{Causalité : } R \leq c\Delta t_{\text{var}} \simeq 3000 \text{ km} \left( \frac{\Delta t_{\text{var}}}{10 \text{ ms}} \right)$$

- **Energie libérée** sous forme de photons gamma très élevée : **effondrement gravitationnel**

- **Effondrement gravitationnel** pour former un objet compact stellaire :  $\Delta E_{\text{grav}} \simeq \Xi M c^2$   
(  $\sim 3 \cdot 10^{53}$  erg pour la formation d'une étoile à neutrons)

$M c^2$  : énergie de masse de l'objet compact formé ( $1.8 \cdot 10^{54}$  erg par masse solaire)

$\Xi = GM/Rc^2$  : compacité de l'objet formé (0.1 à 1 pour NS  $\rightarrow$  BH)

Deux canaux principaux :

- Effondrement d'une étoile massive :
  - \* corrélé à la formation d'étoiles (temps de vie des étoiles massives)
  - \* phénomène transitoire :  $t_{\text{ff}} \ll 1 \text{ s}$
- Coalescence d'un système binaire de deux objets compacts (BH/NS, e.g. BNS)
  - \* pas corrélé à la formation d'étoiles (durée très longue de la phase spiralante)
  - \* phénomène transitoire :  $t_{\text{K}} \sim 1 \text{ ms}$

$E_{\gamma, \text{true}} \sim 10^{49-52} \text{ erg?}$



# Contraintes observationnelles sur le scénario théorique

- **Variabilité rapide** (observée au moins jusqu'à  $\Delta t_{\text{var}} \simeq 10 \text{ ms}$ ) : **source compacte (NS, BH stellaire)**

$$\text{Causalité : } R \leq c\Delta t_{\text{var}} \simeq 3000 \text{ km} \left( \frac{\Delta t_{\text{var}}}{10 \text{ ms}} \right)$$

- **Energie libérée** sous forme de photons gamma très élevée : **effondrement gravitationnel**

- **Effondrement gravitationnel** pour former un objet compact stellaire :  $\Delta E_{\text{grav}} \simeq \Xi M c^2$   
(  $\sim 3 \cdot 10^{53}$  erg pour la formation d'une étoile à neutrons)

$M c^2$  : énergie de masse de l'objet compact formé ( $1.8 \cdot 10^{54}$  erg par masse solaire)

$\Xi = GM/Rc^2$  : compacité de l'objet formé (0.1 à 1 pour NS  $\rightarrow$  BH)

Deux canaux principaux : *il y a justement deux classes de sursauts gamma*

- Effondrement d'une étoile massive :
  - \* corrélé à la formation d'étoiles (temps de vie des étoiles massives)
  - \* phénomène transitoire :  $t_{\text{ff}} \ll 1 \text{ s}$
- Coalescence d'un système binaire de deux objets compacts (BH/NS, e.g. BNS)
  - \* pas corrélé à la formation d'étoiles (durée très longue de la phase spiralante)
  - \* phénomène transitoire :  $t_{\text{K}} \sim 1 \text{ ms}$

Sursauts longs  
& hypernovae

Sursauts courts  
& kilonovae

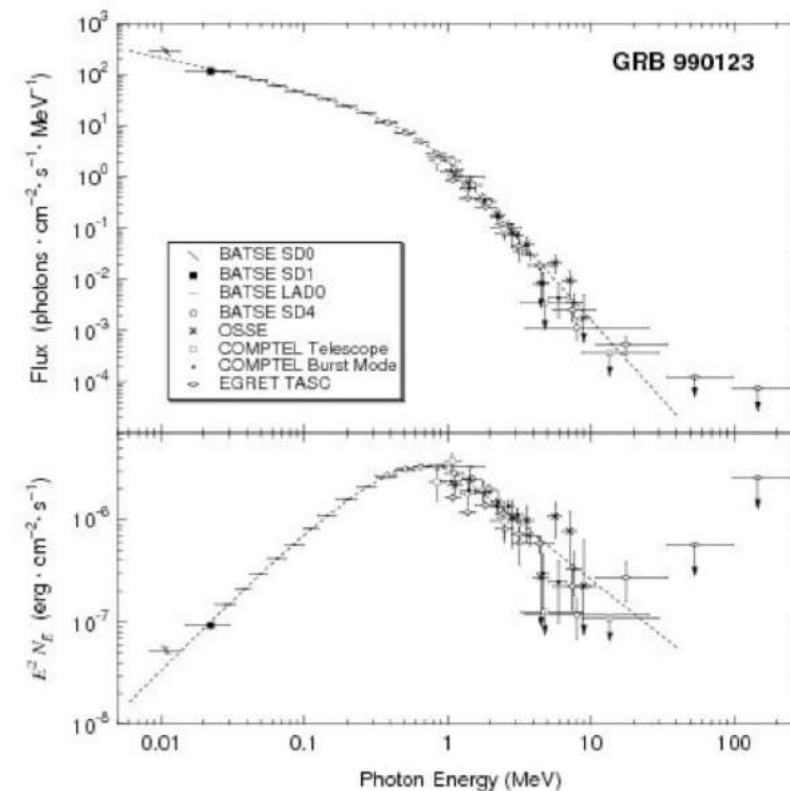
$E_{\gamma, \text{true}} \sim 10^{49-52} \text{ erg?}$

# Contraintes observationnelles sur le scénario théorique

- **Variabilité rapide + énergie libérée :** formation d'un BH stellaire (ou NS ?) dans un effondrement gravitationnel
- **Spectre rayonné non thermique et s'étendant bien au-delà de 511 keV : mouvement relativiste !**

Estimations anciennes (Lithwick & Sari 2001 :  $\Gamma > 100$  )

Sursauts Fermi GBM+LAT : on peut mesurer  $\Gamma$

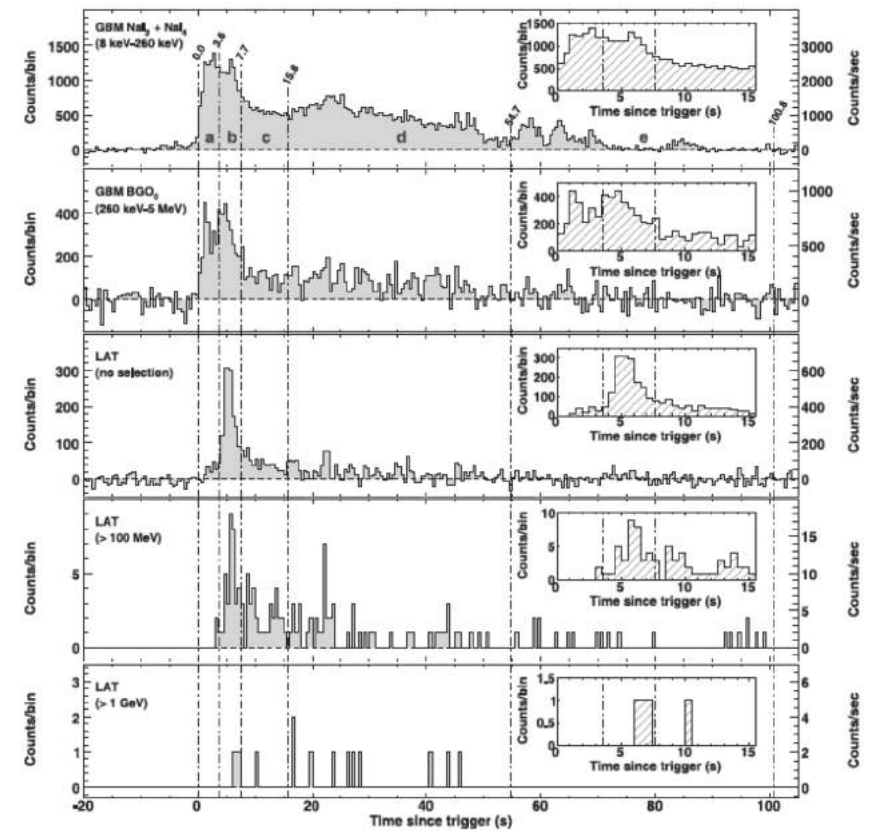


# Mesure du facteur de Lorentz d'un sursaut gamma

$$\gamma\gamma \rightarrow e^+e^-$$

- Fermi collaboration :

- GRB 080916C :  $\Gamma_{\min} \geq 887$  (Abdo et al. 09)
- GRB 090510 :  $\Gamma_{\min} \geq 1200$  (Ackerman et al. 10)



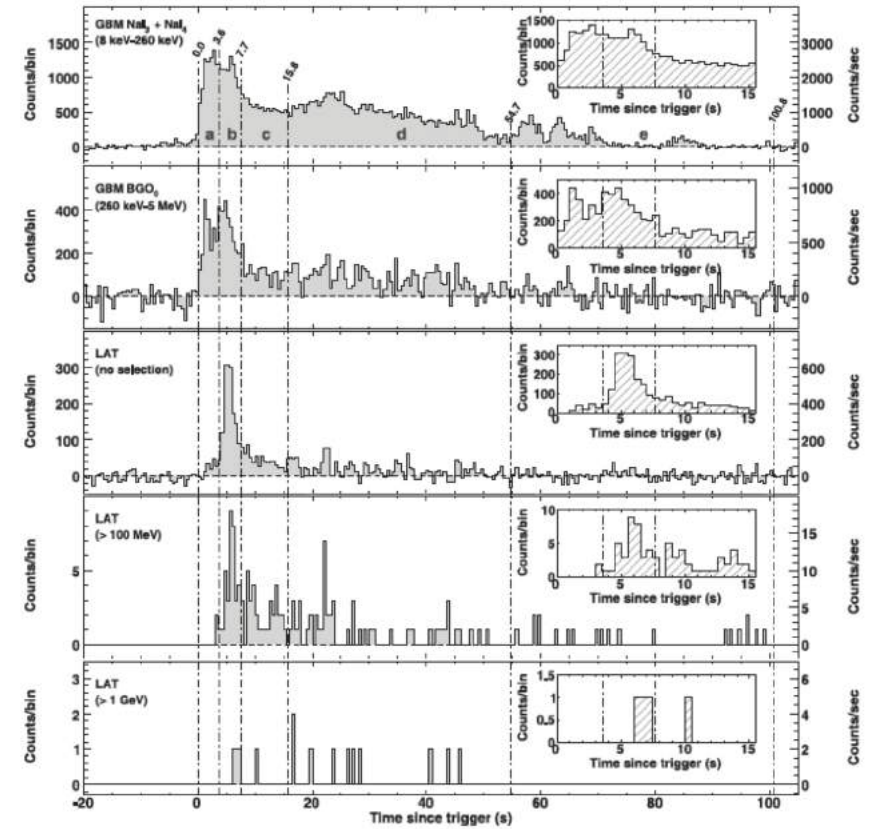
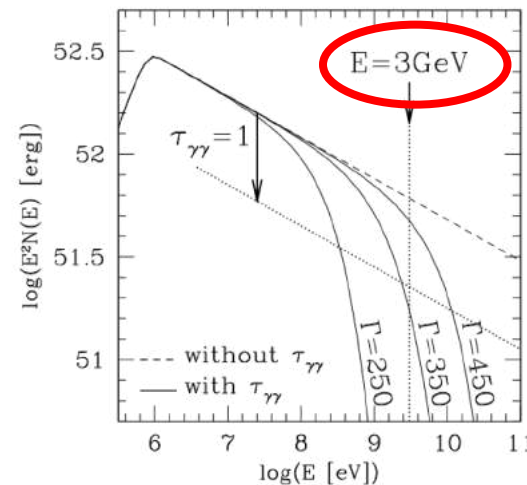
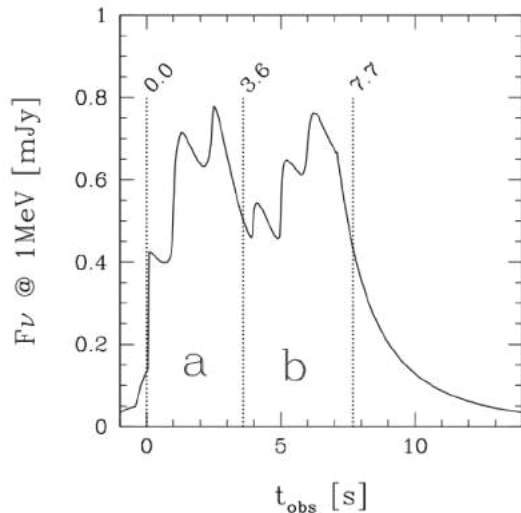
GRB080916C

# Mesure du facteur de Lorentz d'un sursaut gamma

$$\gamma\gamma \rightarrow e^+e^-$$

- Fermi collaboration :
  - GRB 080916C :  $\Gamma_{\min} \geq 887$  (Abdo et al. 09)
  - GRB 090510 :  $\Gamma_{\min} \geq 1200$  (Ackerman et al. 10)
- Calcul plus détaillé (prenant en compte la géométrie précise du champ de rayonnement) : réduction d'un facteur  $\sim 3$

GRB 080916C :  $\Gamma_{\min} \sim 360$   
(Hascoët, Daigne, Mochkovitch & Vennin, 2012)



GRB080916C

# Mesure du facteur de Lorentz d'un sursaut gamma

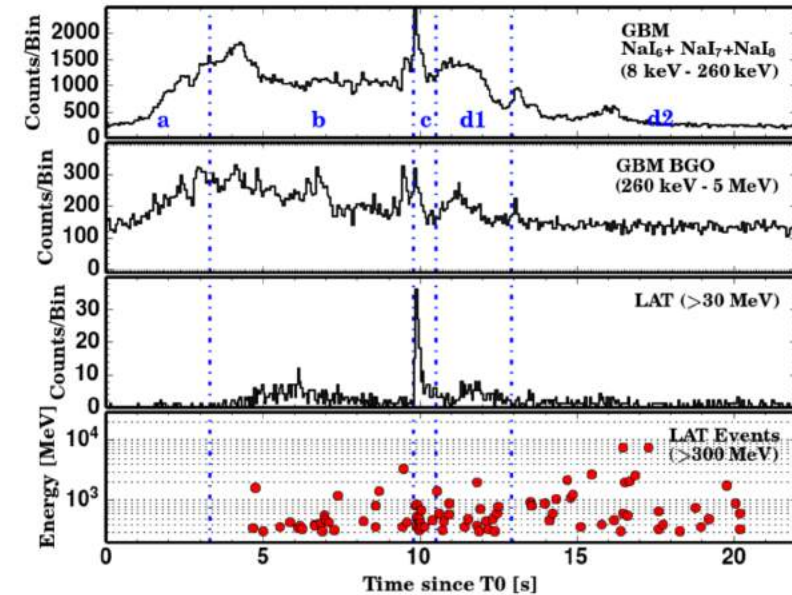
$$\gamma\gamma \rightarrow e^+e^-$$

- Fermi collaboration :
  - GRB 080916C :  $\Gamma_{\min} \geq 887$  (Abdo et al. 09)
  - GRB 090510 :  $\Gamma_{\min} \geq 1200$  (Ackerman et al. 10)
- Calcul plus détaillé (prenant en compte la géométrie précise du champ de rayonnement) : réduction d'un facteur  $\sim 3$

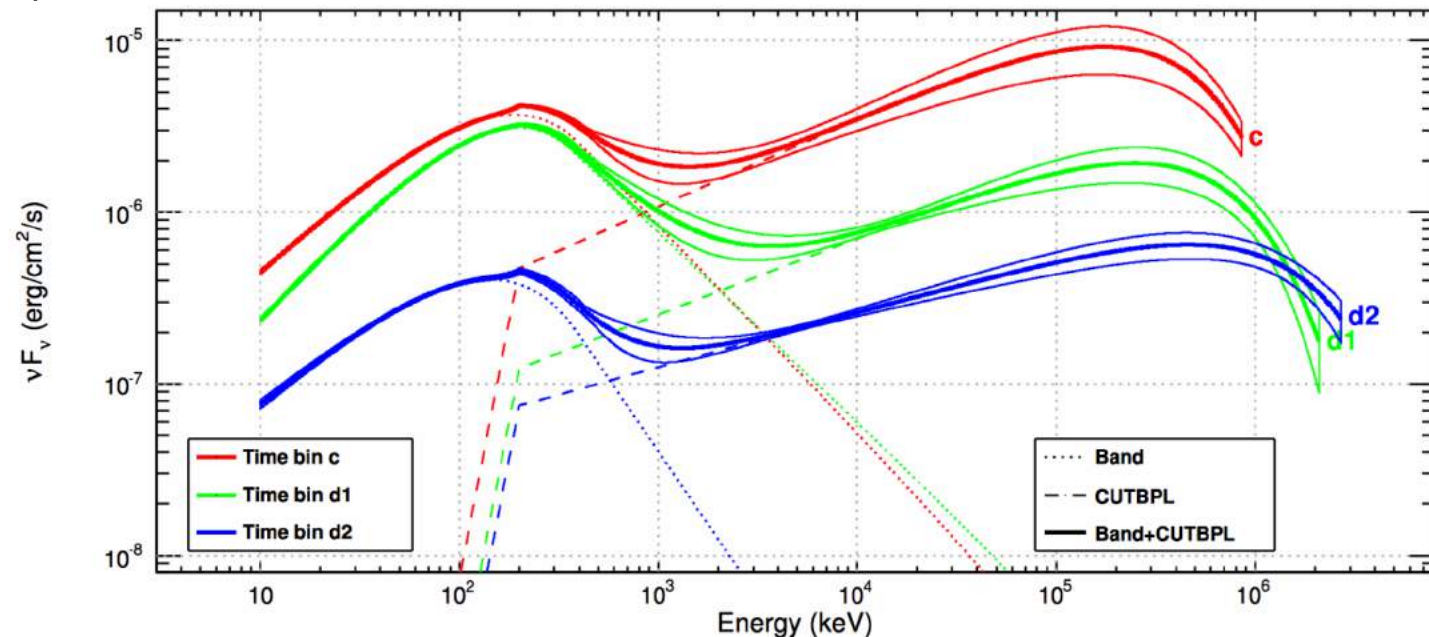
GRB 080916C :  $\Gamma_{\min} \sim 360$   
(Hascoët, Daigne, Mochkovitch & Vennin, 2012)

GRB 090510 :  $\Gamma_{\min} \sim 230$   
(Yassine, Piron, Daigne & Mochkovitch, 2017)

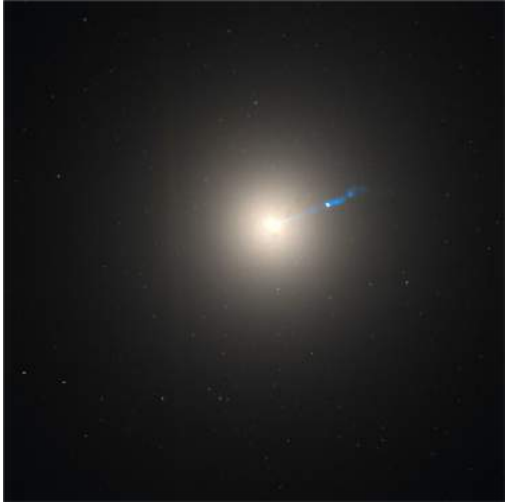
Cette second analyse confirme aussi  
une émission à grande distance :  $\sim 10^{14}$  cm



GRB090510

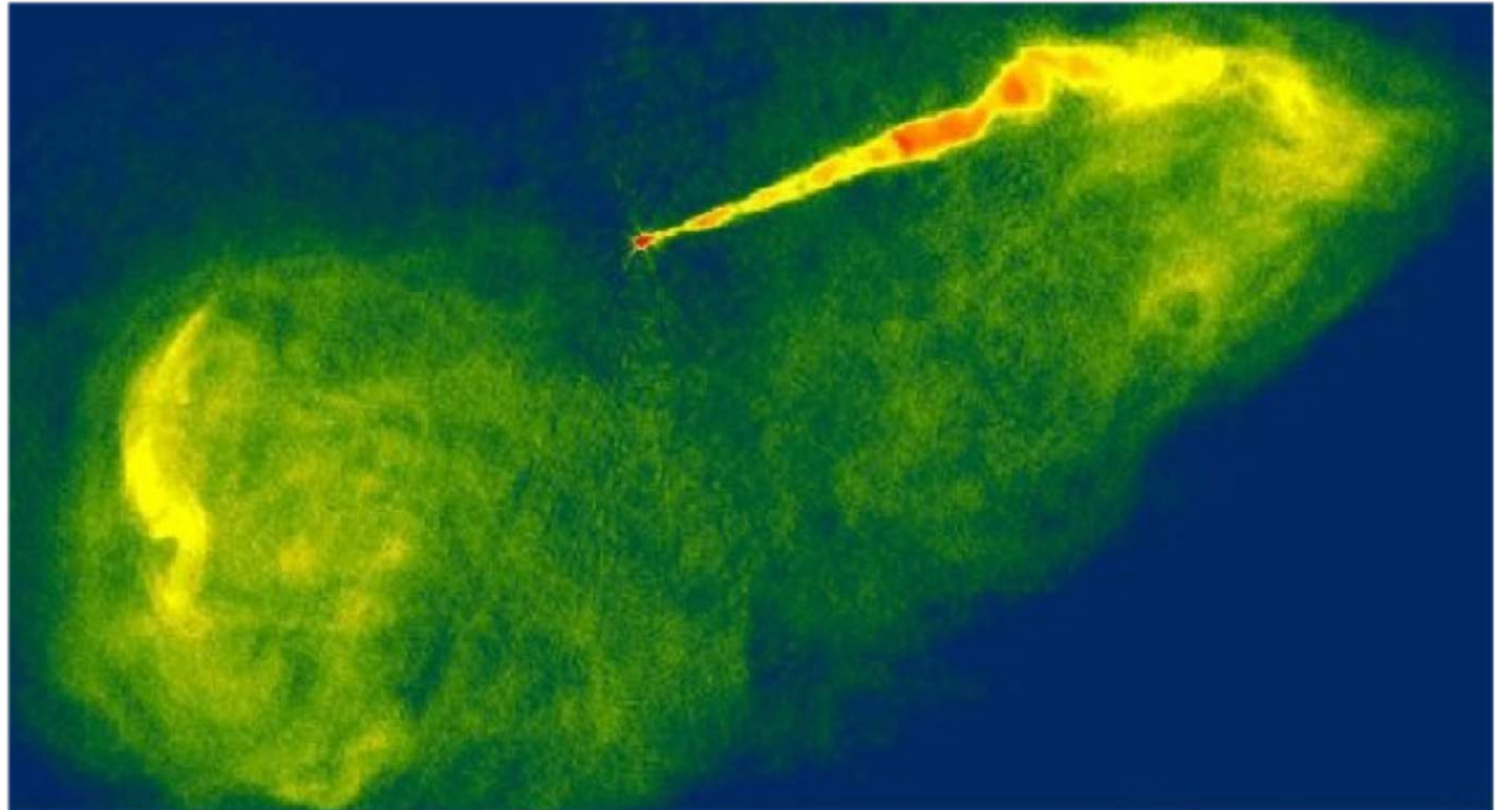


# Jets relativistes



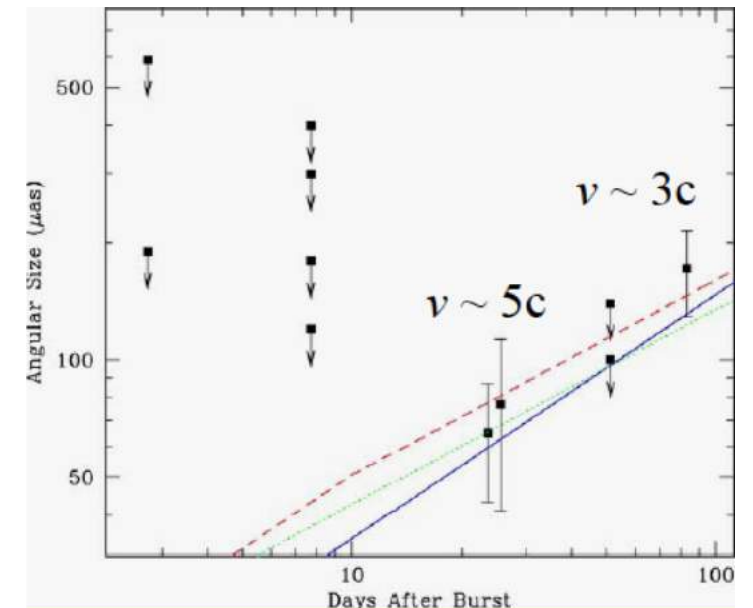
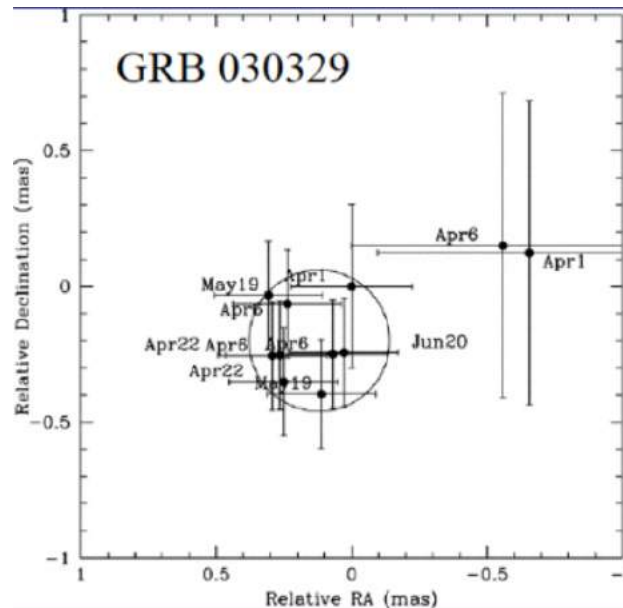
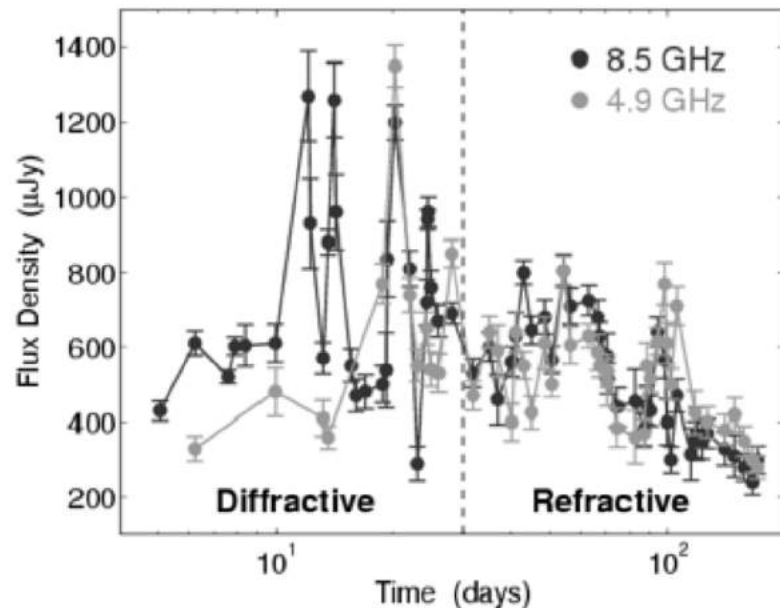
M87 (Visible - HST)

M87 (radio - VLA)



- GRB 030329 : sursaut long à  $z = 0.17$ , supernova associée

Suivi de long terme de l'afterglow radio : mouvement apparent superluminaire !  
= preuve directe du mouvement relativiste



VLBI : 0.1 mas en 80 jours pour une source à  $\sim 0.8$  Gpc  
(Taylor et al. 2004)

# Contraintes observationnelles sur le scénario théorique

- **Variabilité rapide + énergie libérée :** formation d'un BH stellaire (ou NS ?) dans un effondrement gravitationnel
- **Spectre rayonné non thermique et s'étendant bien au-delà de 511 keV : mouvement relativiste !**
- **Variabilité dans la courbe de lumière n'évolue pas dans le temps : dissipation interne au jet**

(argument : Rees & Meszaros 1994 ; Piran 1995 ; simulation : Kobayashi et al. 1997, Daigne et al. 1998)

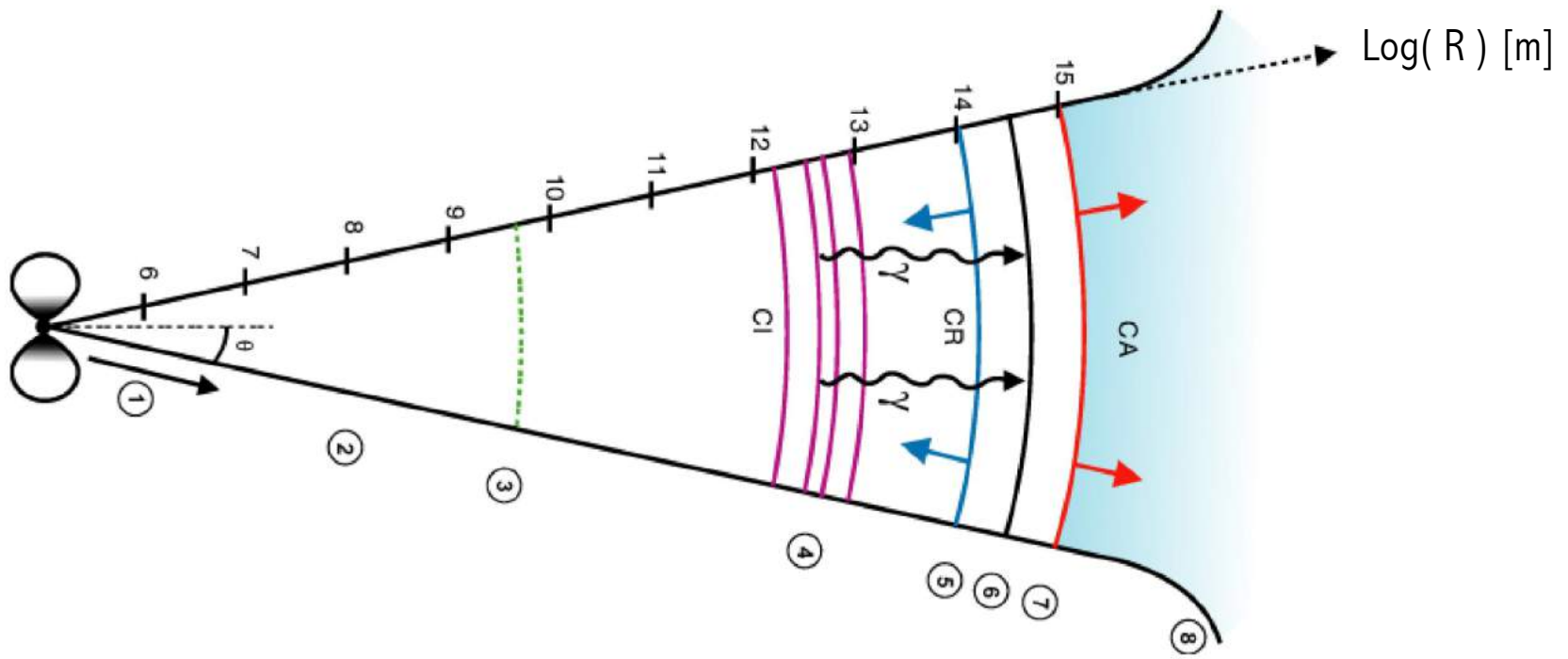


# Contraintes observationnelles sur le scénario théorique

- Variabilité rapide + énergie libérée : formation d'un BH stellaire (ou NS ?) dans un effondrement gravitationnel
- Spectre rayonné non thermique et s'étendant bien au-delà de 511 keV : mouvement relativiste !
- Variabilité dans la courbe de lumière n'évolue pas dans le temps : dissipation interne au jet
- Rémanence (afterglow) : échelles de temps beaucoup plus longues, variabilité plus faible = freinage du jet par le milieu extérieur

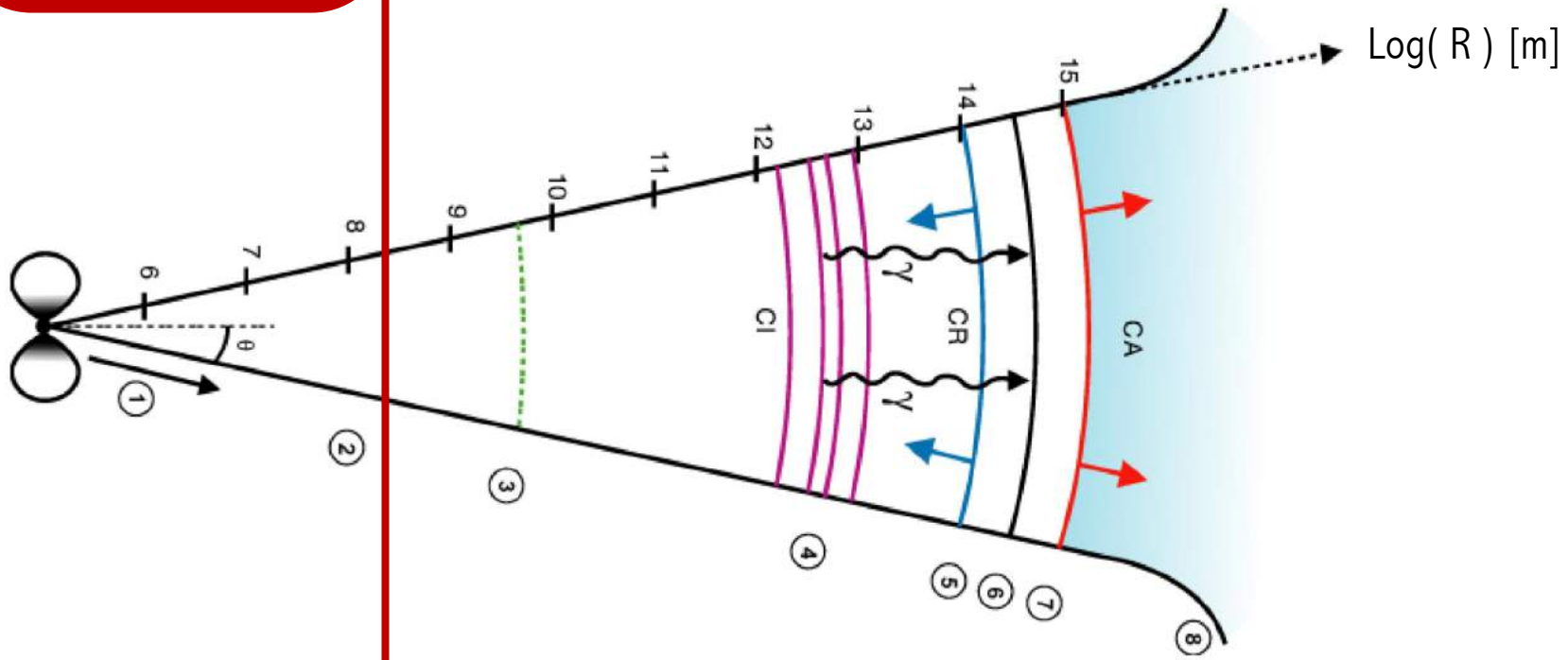
(Rees & Meszaros 1993)

# Scénario théorique



# Scénario théorique

Evènement initial  
Ejection relativiste



## Lumière :

- hypernova, kilonova
- source centrale : rien !

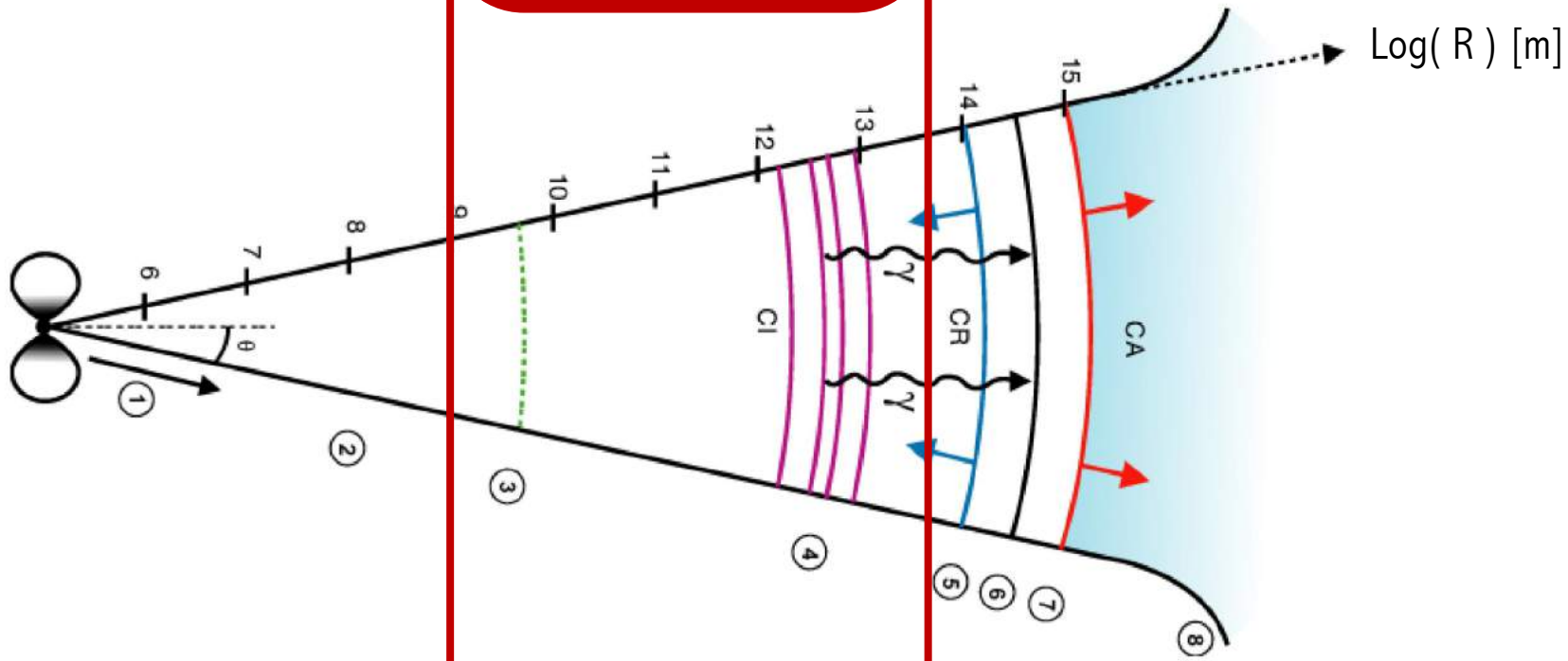
## Ondes gravitationnelles :

- principalement pour les coalescences

## Neutrinos :

- MeV : principalement pour les effondrements d'étoiles massives
- GeV-100 TeV : jet

# Scénario théorique



À grande distance :  
- photosphère  
(le jet devient transparent à son propre rayonnement)  
- dissipation interne :  
émission du **GRB**

## Dissipation ?

- chocs
- reconnection magnétique

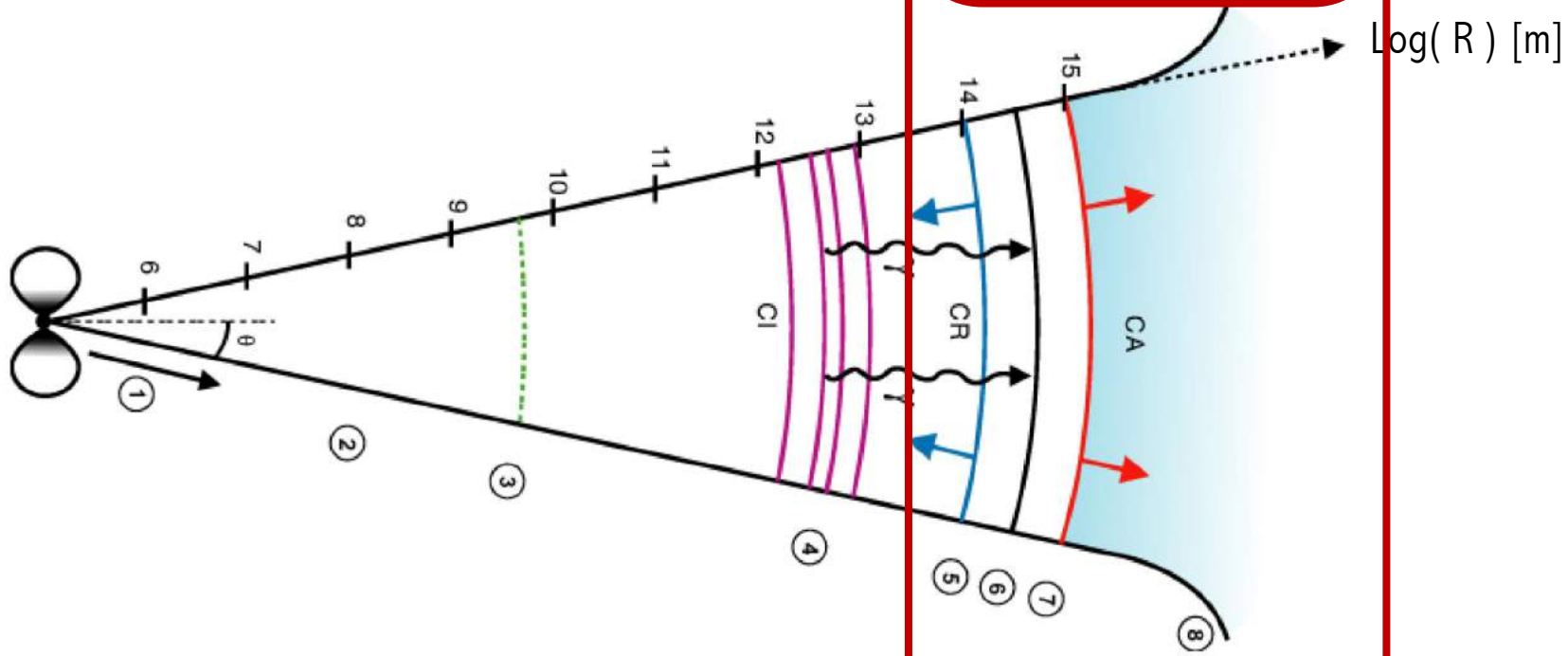
## Rayonnement de particules accélérées

Particules : électrons (+ protons ?)

## Processus d'accélération ?

Processus de rayonnement ?  
(optiquement mince/épais ?  
Synchrotron/IC/ autre ?)

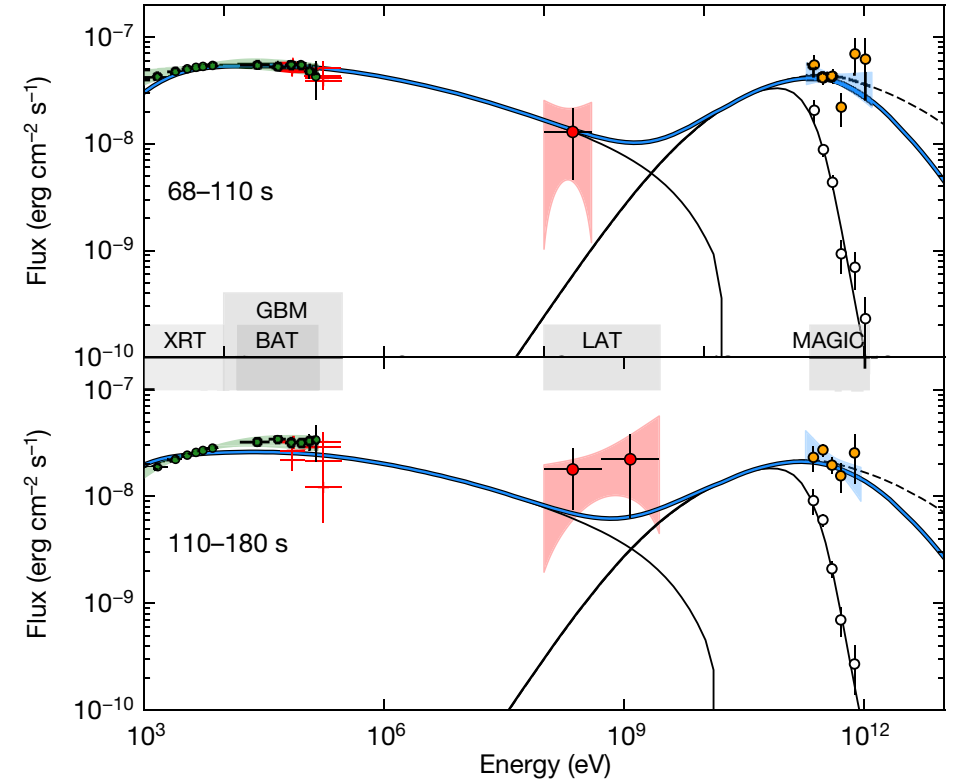
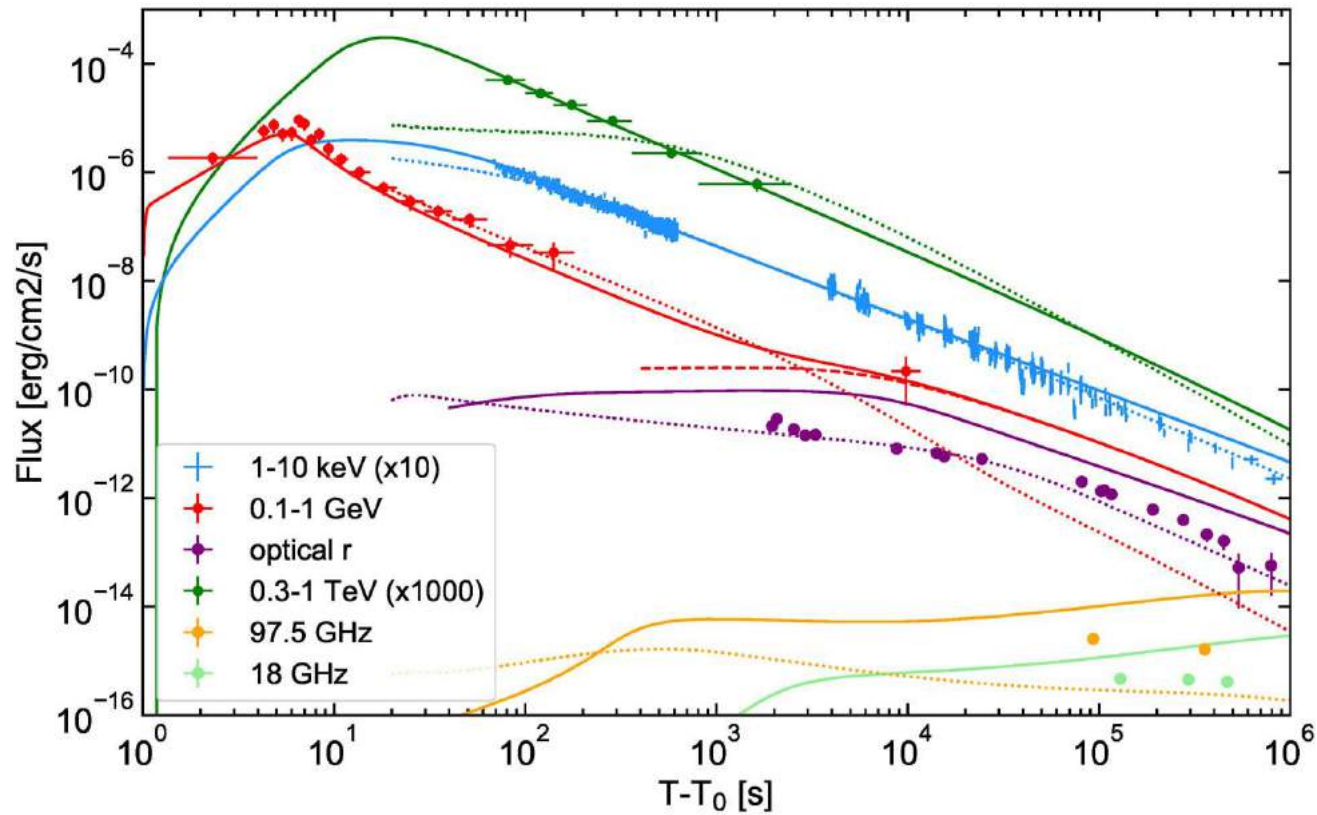
# Scénario théorique



À encore plus grande distance :  
- freinage du jet  
- émission de l'**afterglow**

- Source dominante de l'émission :  
choc avant  
= rayonnement syn/IC  
d'électrons accélérés au choc
- Autres contributions ?  
(choc en retour)
- Origine de la variabilité observée ?
- Evolution de long terme ?  
(à quoi ressemble un reste de GRB)

# Afterglow (rémanence)



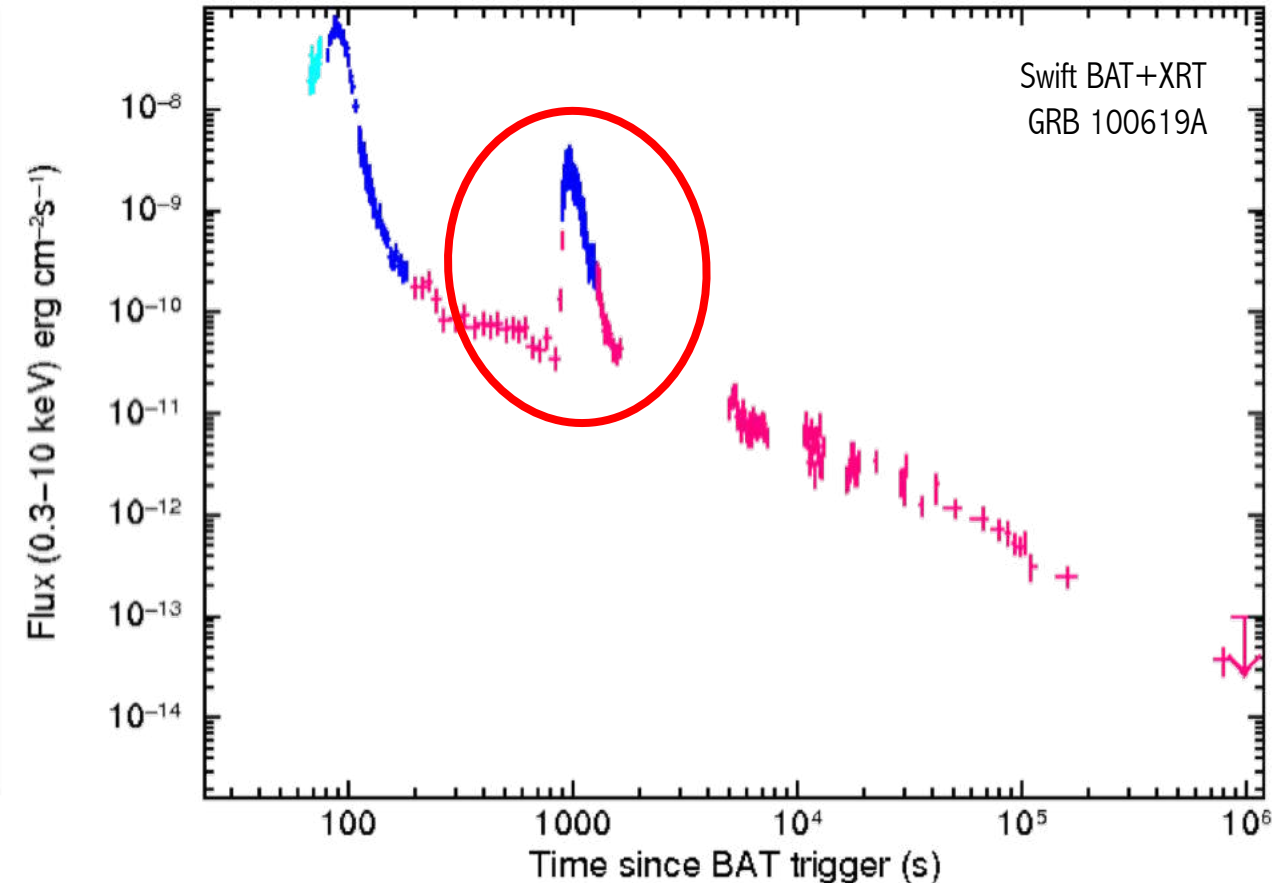
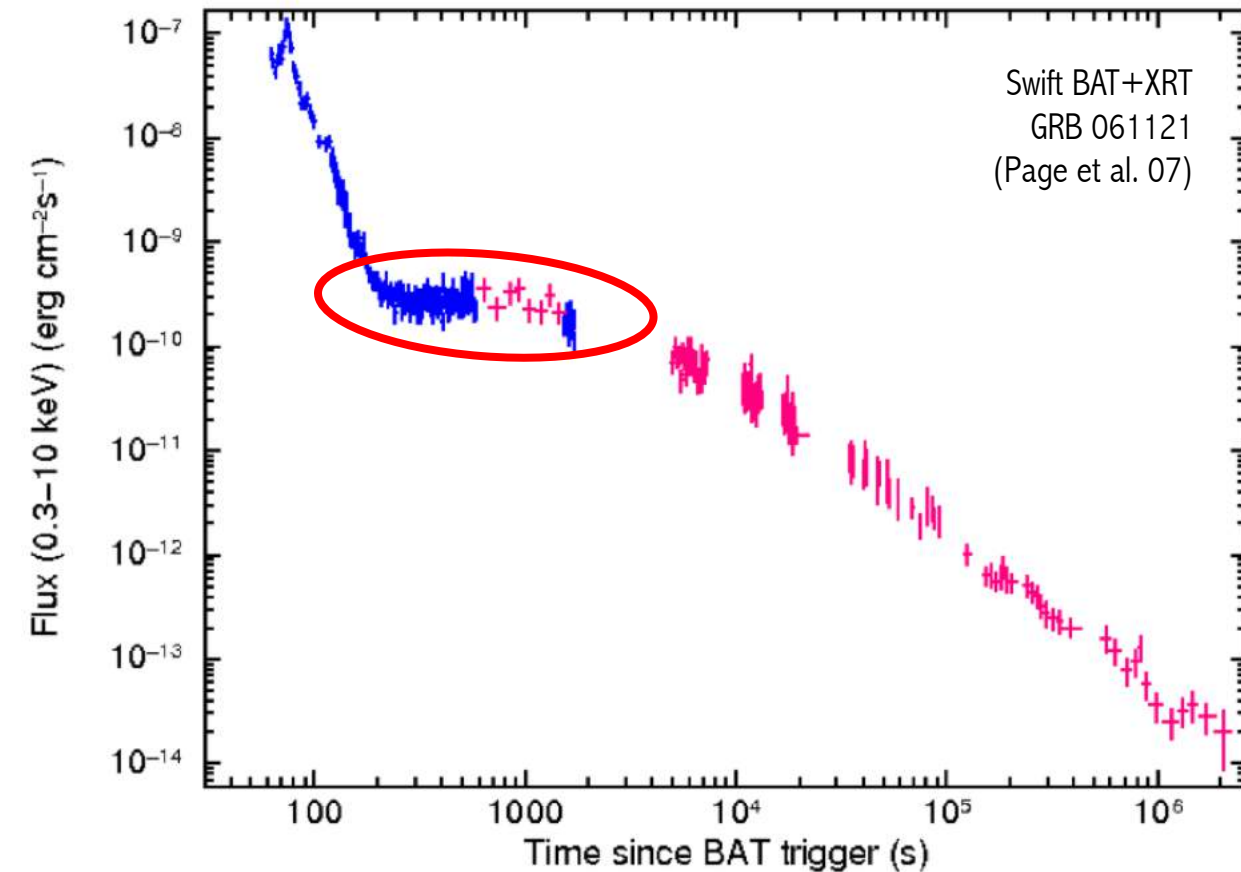
## GRB 190114C observé de la radio au TeV (MAGIC) !

L'essentiel de l'émission est bien reproduit par l'émission syn+IC d'électrons accélérés au choc avant.

(MAGIC collab. 2019a,b)

# Afterglow (rémanence)

- La rémanence est la phase du scénario la mieux comprise
- Il reste cependant de délicates questions ouvertes, principalement liées à la rémanence précoce : plateaux, flares



- **Physique plus délicate que pour la rémanence : nature du processus de dissipation ?**
- Dépend en particulier de la magnétisation à grande distance : chocs ou reconnection ?
- Deux grandes familles de modèles :
  - Émission produite à la photosphère

Problème : le spectre devrait être thermique – mécanisme de dissipation sub-photosphérique à comprendre

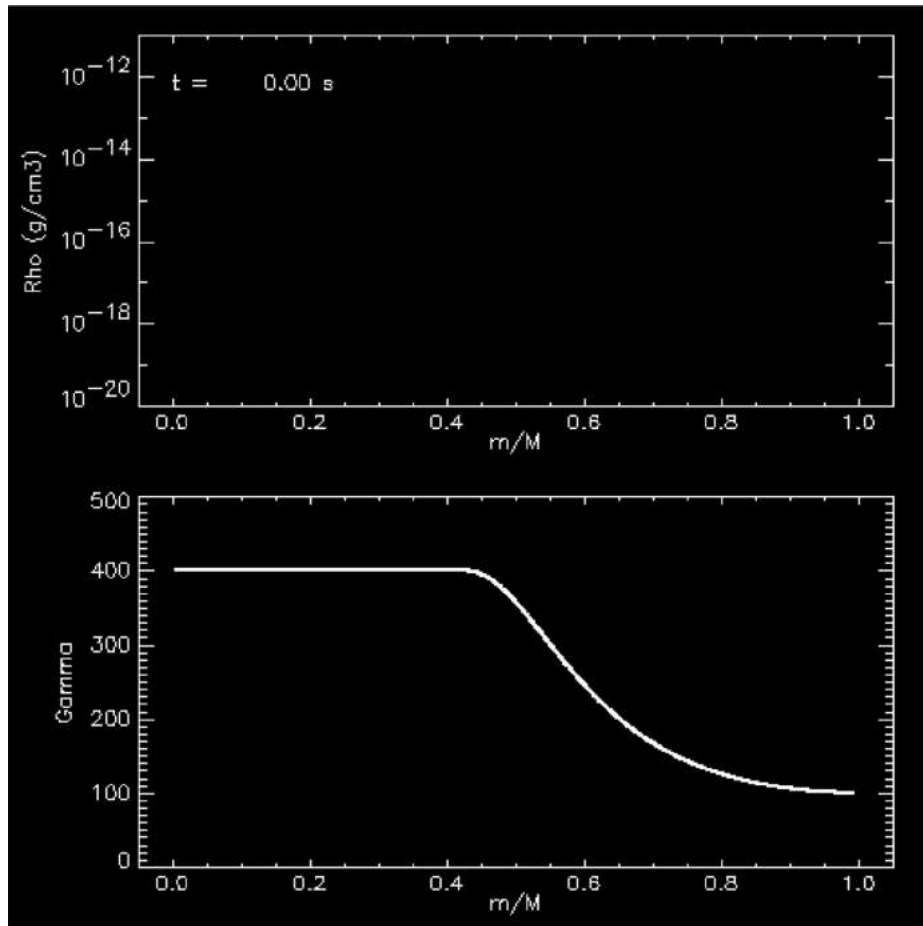
- Emission produite au-dessus de la photosphère  
= électrons accélérés dans des chocs ou de la reconnection.

Problème : le spectre est également mal reproduit par le modèle le plus simple (rayonnement synchrotron)

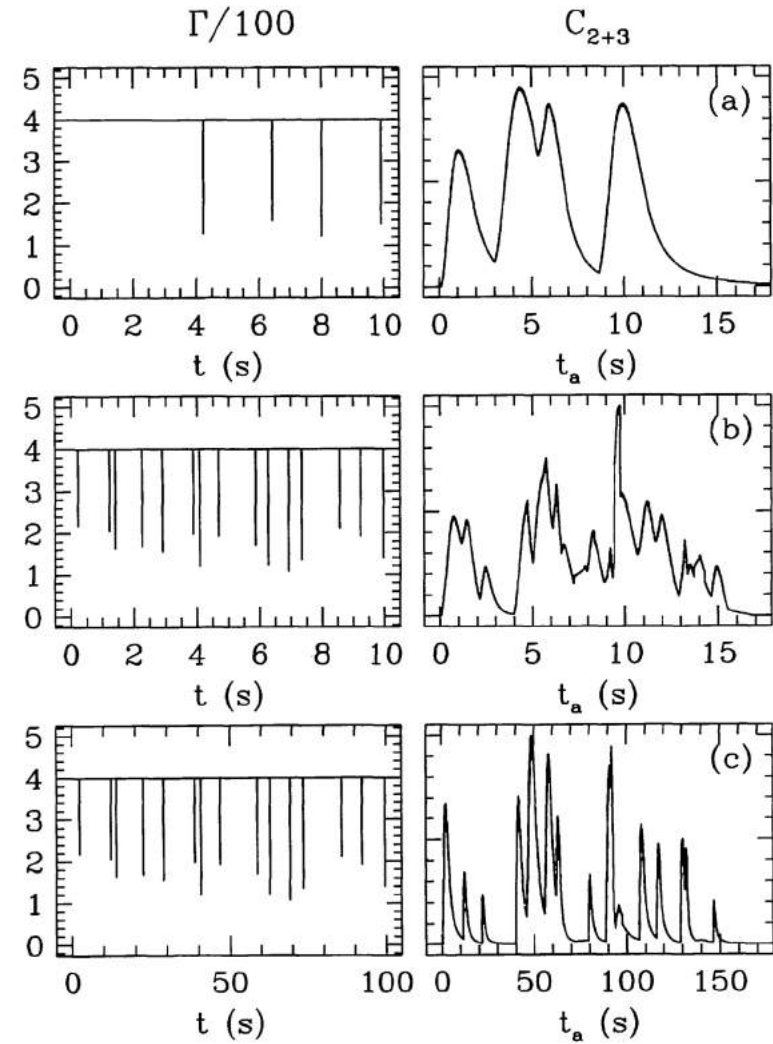


# Sursaut gamma

- Exemple du mécanisme des chocs internes

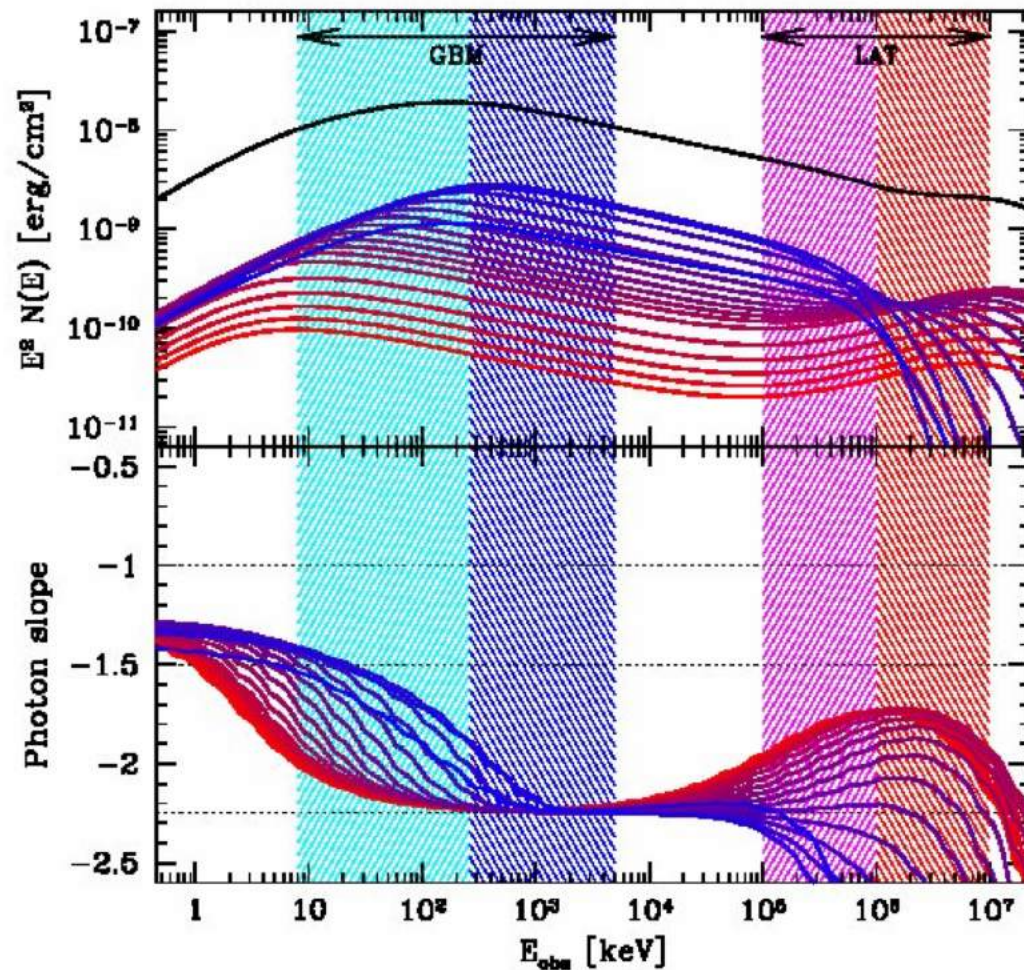
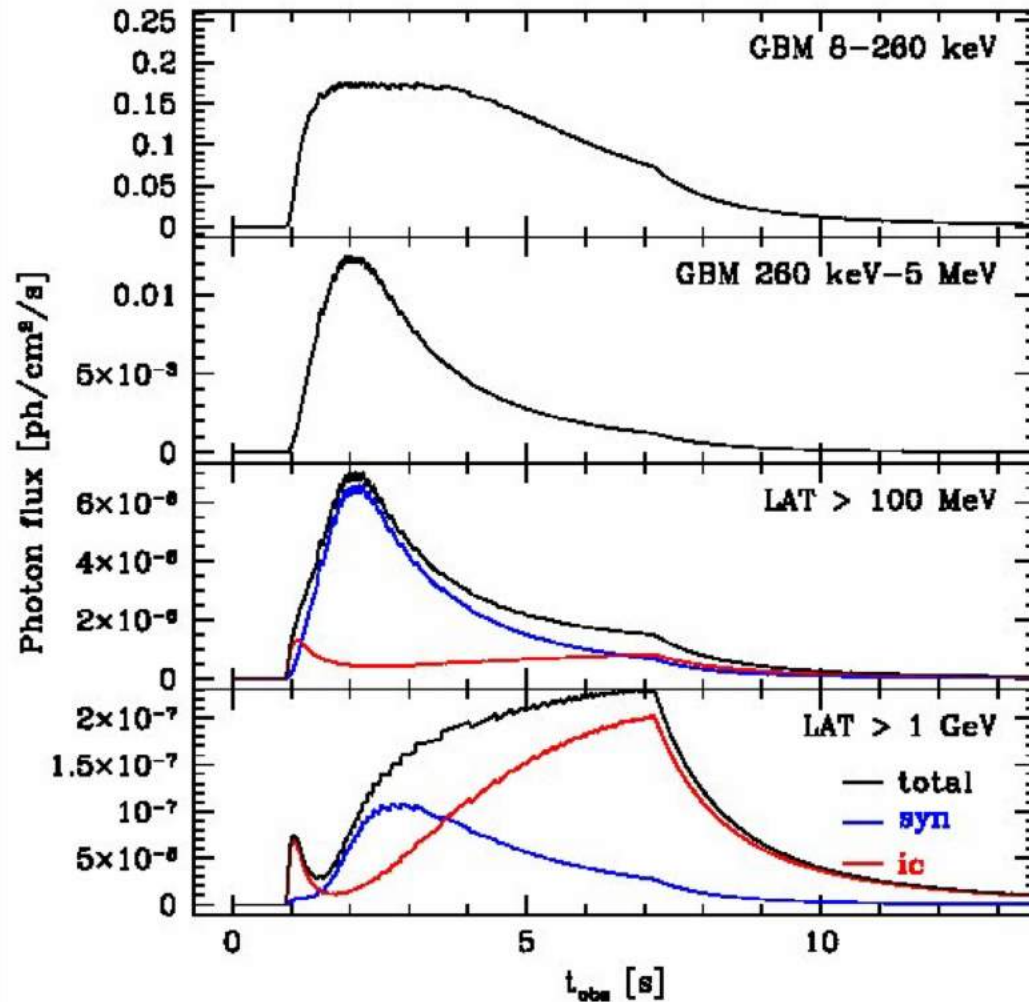


Daigne & Mochkovitch 2000



Daigne & Mochkovitch 1998

- Exemple du mécanisme des chocs internes

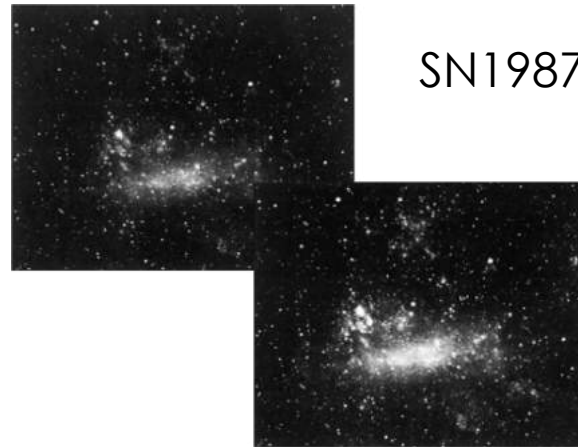
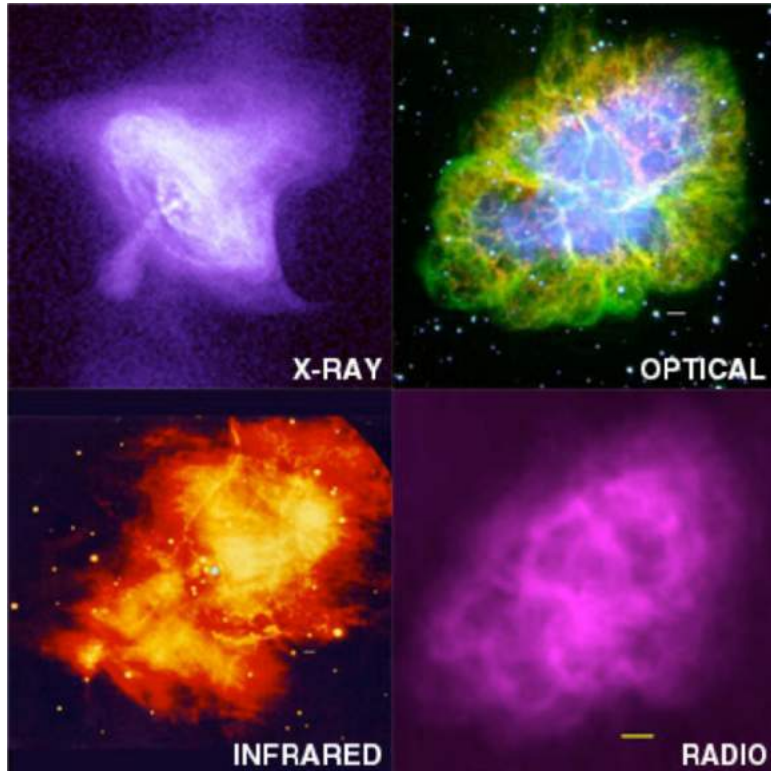


- **Sursauts longs : de nombreuses preuves observationnelles du lien avec l'effondrement de certaines étoiles massives** (cf. cours et séminaire de la semaine dernière)

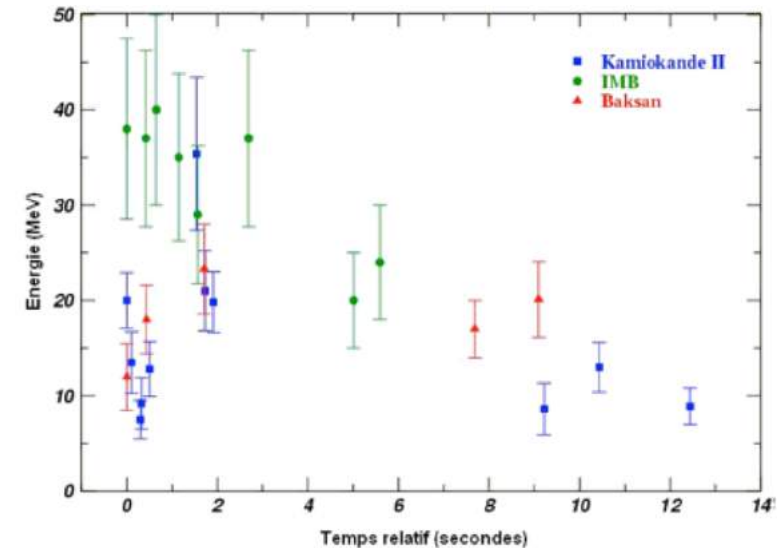
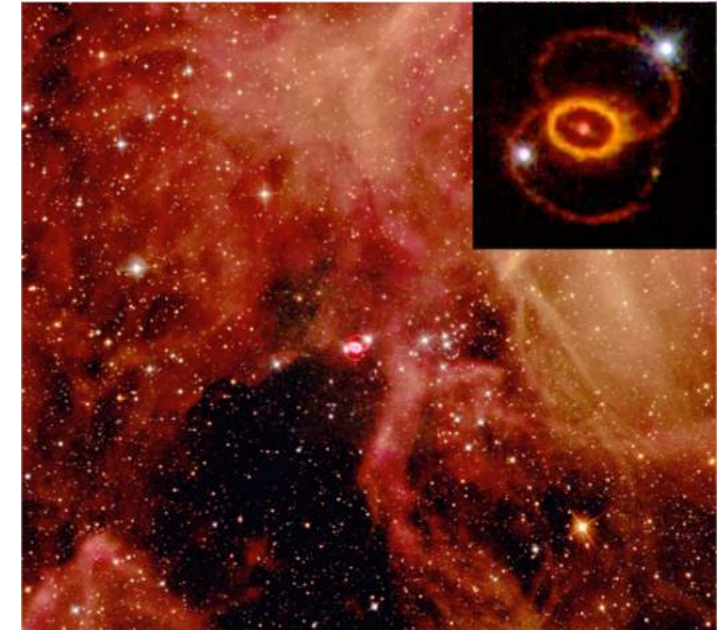
# Événement initial / moteur central

- **Sursauts longs : un problème théorique très difficile**
  - Les supernovae « standard » ne sont pas encore parfaitement comprises même si le scénario global est validé (SN15054/Crabe ; SN1987A)

énergie libérée dans le collapse : qq  $10^{53}$  erg  
99% : neutrinos ; 1% énergie cinétique (SNR) ;  $10^{-4}$  lumière



La nébuleuse du Crabe (M1)



- **Sursauts longs : un problème théorique très difficile**
  - Les supernovae « standard » ne sont pas encore parfaitement comprises

SELF-CONSISTENT 3D SUPERNOVA MODELS FROM  $-7$  MINUTES TO  $+7$  SECONDS:  
A 1-BETHE EXPLOSION OF A  $\sim 19 M_{\odot}$  PROGENITOR

ROBERT BOLLIG,<sup>1</sup> NAVEEN YADAV,<sup>1,2</sup> DANIEL KRESSE,<sup>1,3</sup> HANS THOMAS JANKA,<sup>1</sup> BERNHARD MÜLLER,<sup>4,5,6</sup> AND  
ALEXANDER HEGER<sup>4,5,7,8</sup>

<sup>1</sup>Max Planck Institute for Astrophysics, Karl-Schwarzschild-Str. 1, 85748 Garching, Germany

<sup>2</sup>Excellence Cluster ORIGINS, Boltzmannstr. 2, 85748 Garching, Germany

<sup>3</sup>Physik-Department, Technische Universität München, James-Frank-Str. 1, 85748 Garching, Germany

<sup>4</sup>School of Physics and Astronomy, Monash University, Victoria 3800, Australia

<sup>5</sup>Australian Research Council Centre of Excellence for Gravitational Wave Discovery (OzGrav), Clayton, VIC 3800, Australia

<sup>6</sup>Astrophysics Research Centre, School of Mathematics and Physics, Queen's University Belfast, BT7 1NN, Belfast, Northern Ireland

<sup>7</sup>Center of Excellence for Astrophysics in Three Dimensions (ASTRO-3D), Australia

<sup>8</sup>Joint Institute for Nuclear Astrophysics, 1 Cyclotron Laboratory, National Superconducting Cyclotron Laboratory, Michigan State University, East Lansing, MI 48824-1321, USA

(Received 00, 00, 2020; Revised 00, 00, 2020; Accepted 00, 00, 2020)

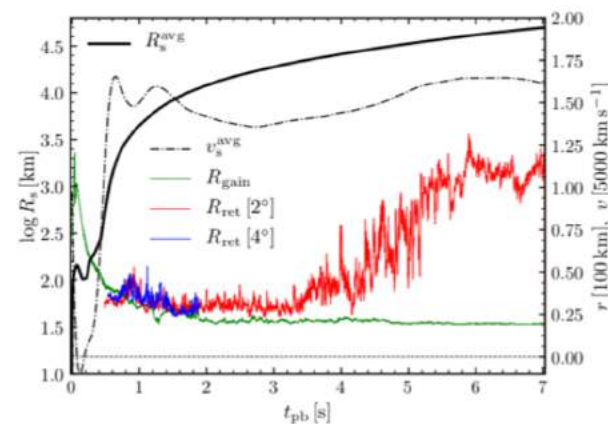
Submitted to ApJ

ABSTRACT

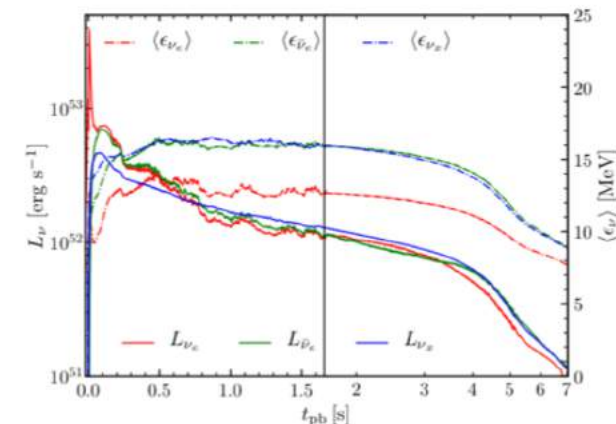
To date, modern three-dimensional (3D) supernova (SN) simulations have not demonstrated that explosion energies of  $10^{51}$  erg (= 1 bethe = 1B) or more are possible for neutrino-driven SNe of typical progenitors. We present the first such model, considering a non-rotating, solar-metallicity  $18.88 M_{\odot}$  progenitor, whose final 7 minutes of convective oxygen-shell burning were simulated in 3D and showed a violent oxygen-neon shell merger prior to collapse. A large set of 3D SN-models was computed with the PROMETHEUS-VERTEX code, whose improved convergence of the two-moment equations with Boltzmann closure allows now to fully exploit the implicit neutrino-transport treatment. The calculations include a nuclear-burning network with 23 species. We vary the angular grid resolution and consider different nuclear equations of state and muon formation in the proto-neutron star (PNS), which requires six-species transport with coupling of all neutrino flavors across all energy-momentum groups. Refined neutrino transport was applied until  $\sim 2$ s after bounce. In one case the simulation was continued to  $>7$ s with an approximate treatment of neutrino effects that allows for seamless continuation without transients. A spherically symmetric neutrino-driven wind does not develop. Instead, accretion downflows to the PNS and outflows of neutrino-heated matter establish a monotonic rise of the explosion energy until  $\sim 7$ s post bounce, when the outgoing shock reaches  $\sim 50,000$  km and enters the He-layer. The converged value of the explosion energy at infinity (with overburden subtracted) is  $\sim 1$ B and the ejected  $^{56}\text{Ni}$  mass  $\leq 0.087 M_{\odot}$ , both in the ballpark of SN 1987A. The final NS mass and kick are about  $1.65 M_{\odot}$  and  $>450 \text{ km s}^{-1}$ , respectively.

**Keywords:** Supernovae: general — supernovae: individual (SN 1987A) — neutrinos — hydrodynamics — instabilities

Choc



Emission de neutrinos



Beaucoup de progrès récents dans la simulation détaillée des supernovae : ici le groupe de Garching (Allemagne).

- **Sursauts longs : un problème théorique très difficile**

- Les supernovae « standard » ne sont pas encore parfaitement comprises
- Les sursauts gamma longs ne représentent qu'une toute petite fraction des effondrements d'étoiles massives

Quelles conditions particulières pour avoir un jet ultra-relativiste ?

- rôle de la masse ?
- rôle de la métallicité ? (cf. séminaire de Susanna Vergani)
- rôle de la rotation ? de la binarité ?

Les observations montrent de plus clairement que l'efficacité des étoiles à produire des sursauts gamma évolue au cours du temps (e.g. Palmerio & [Daigne 2021](#))

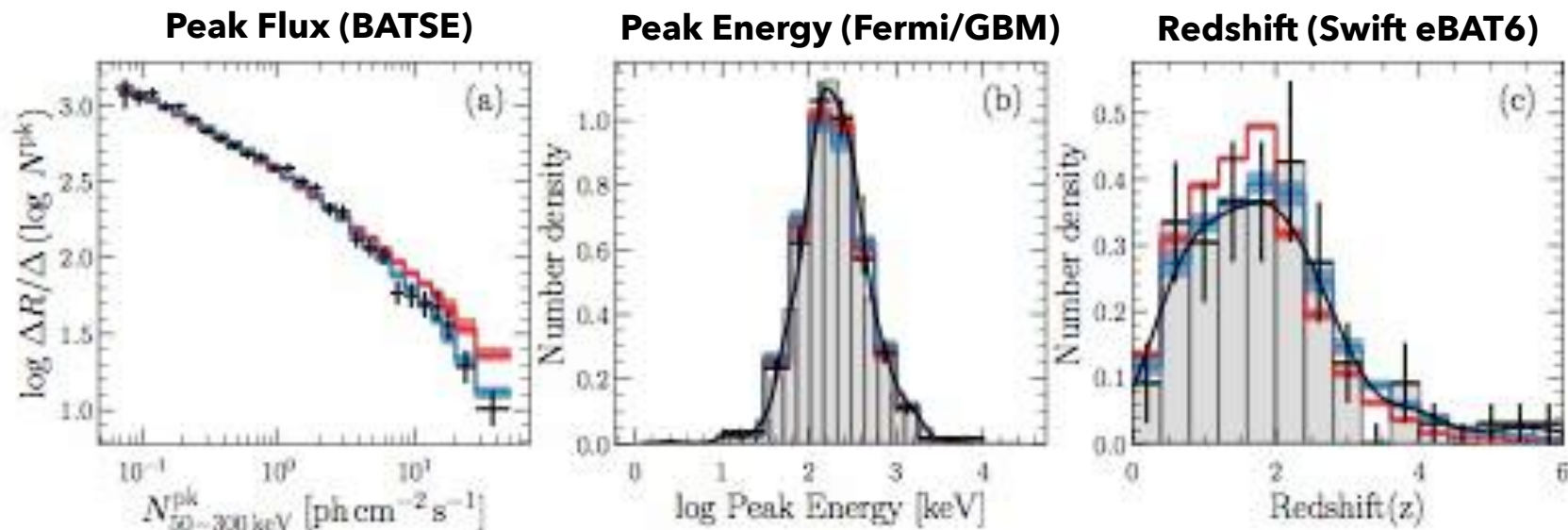
- **Sursauts longs : un problème théorique très difficile**

- Les sursauts gamma longs ne représentent qu'une toute petite fraction des effondrements d'étoiles massives

Quelles conditions particulières pour avoir un jet ultra-relativiste ?

- rôle de la masse ?
- de la métallicité ? (cf. séminaire de Susanna Vergani)
- rôle de la rotation ? de la binarité ?

Les observations montrent de plus clairement que l'efficacité des étoiles à produire des sursauts gamma évolue au cours du temps.



Red: model without evolution

Blue: model with evolution (here: com. rate)

- **Sursauts longs : un problème théorique très difficile**

- La population des sursauts gamma longs montre en plus une grande diversité :  
sursauts proches avec/sans SN ;  
sursauts « mous » ;  
sursauts « sous-lumineux », etc.

Pour plusieurs de ces sous classes : très peu de détections de rémanences et donc de mesure de  $z$ .

- SVOM (lancement mi-2023) devrait contribuer à améliorer cette situation.

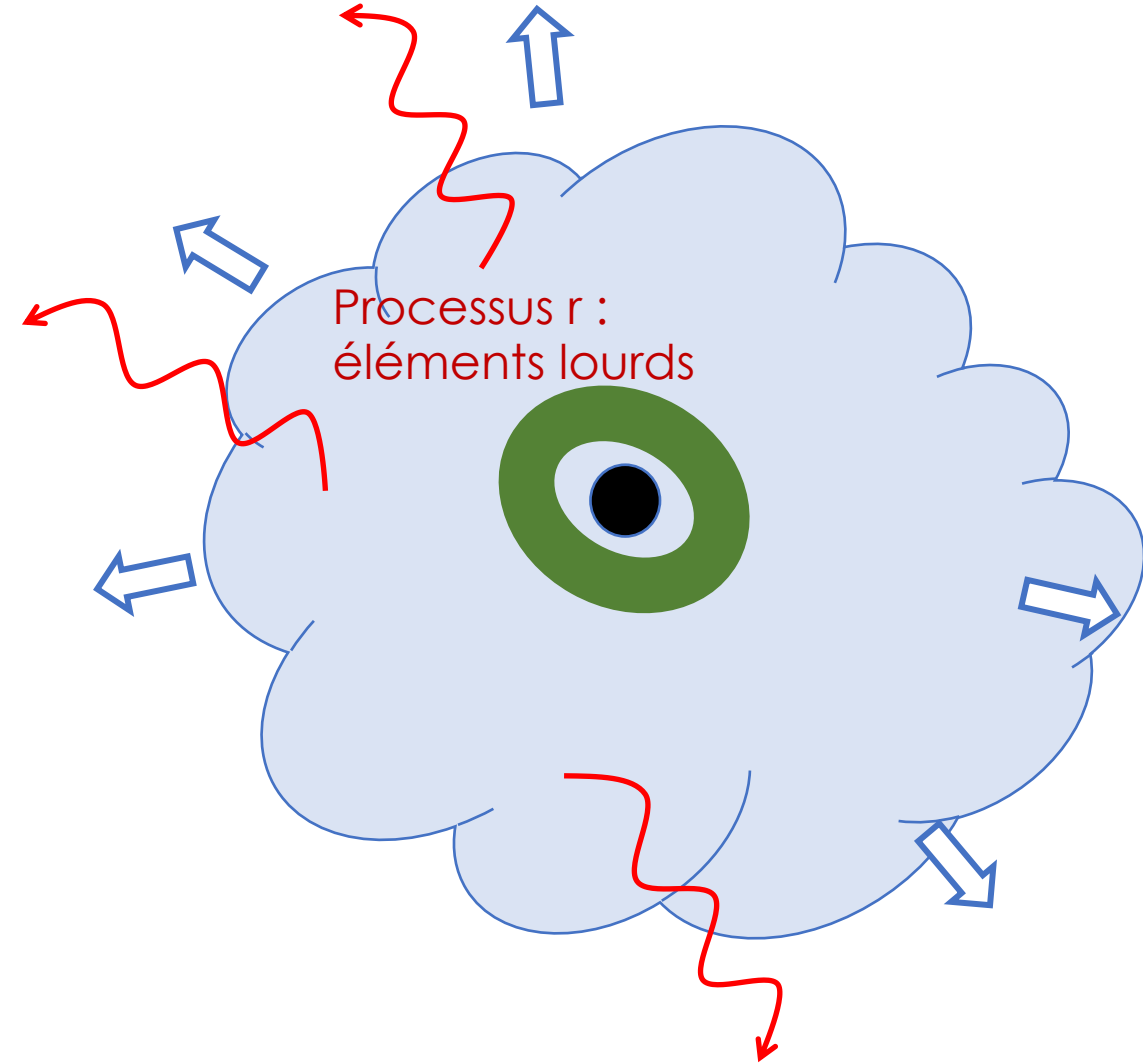
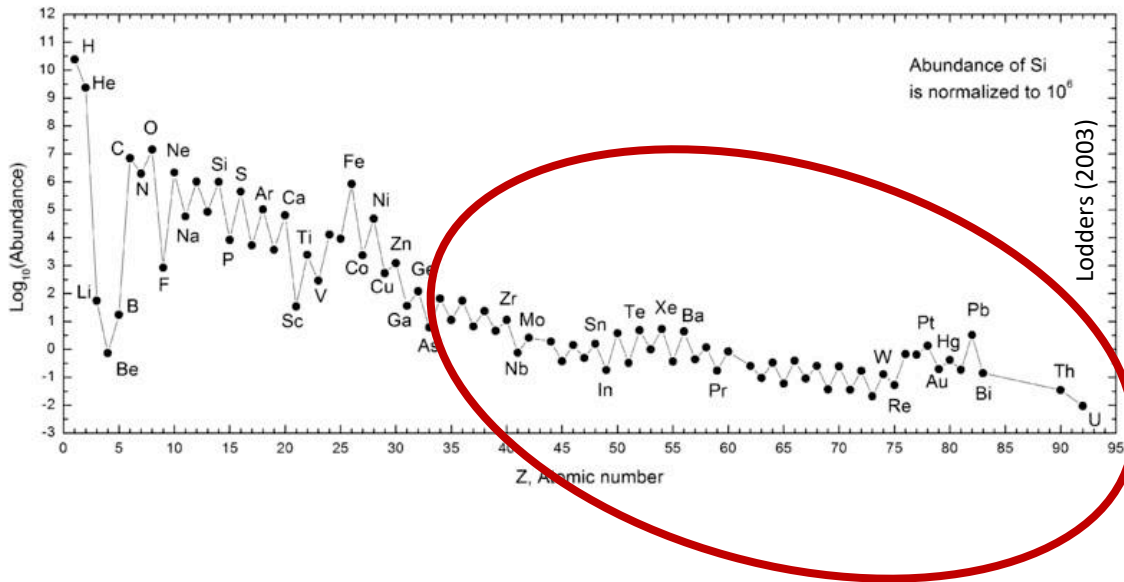




# Événement initial / moteur central

- Sursauts courts : la révolution 170817

Kilonova ?  
(visible et infrarouge)



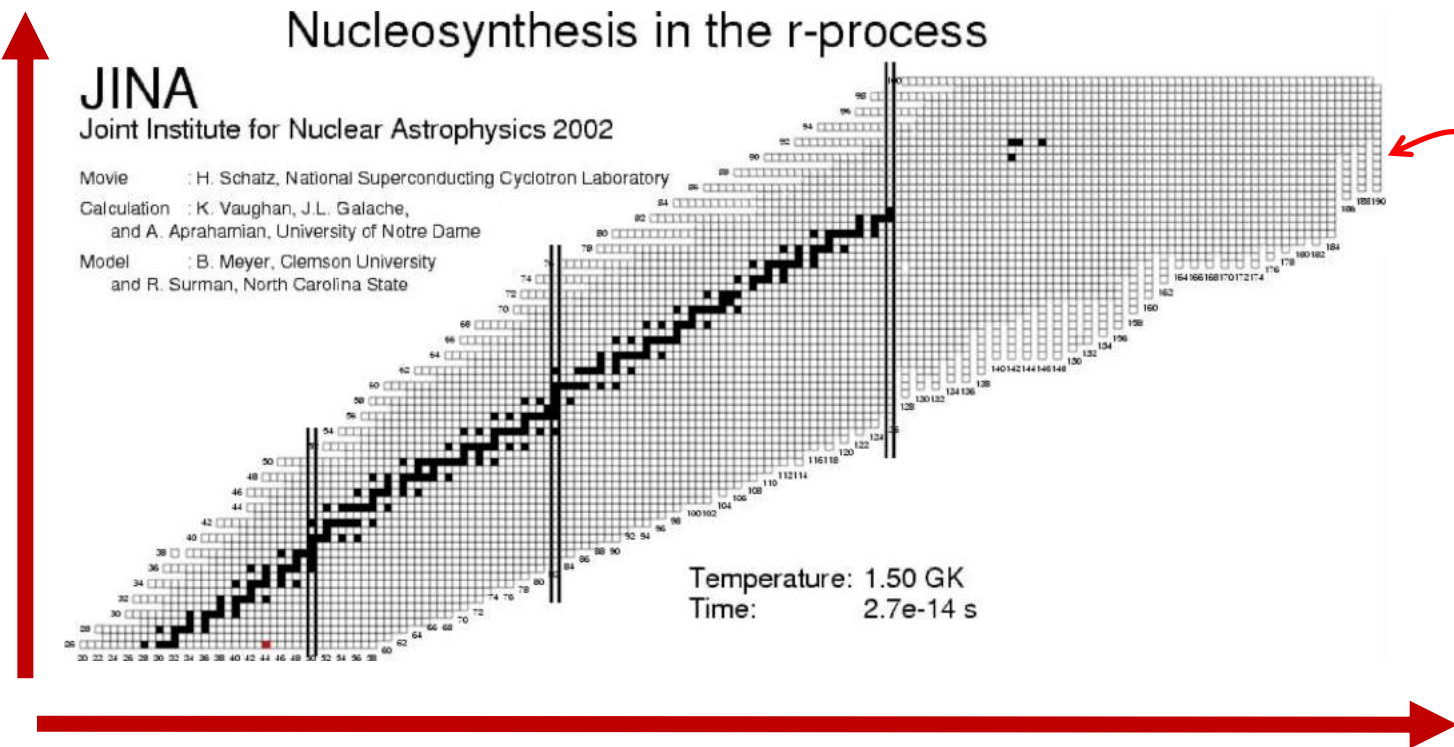
Prédictions théoriques pré-août 2017

# Événement initial / moteur central

## ■ Sursauts courts : la révolution 170817

Kilonova ?  
(visible et infrarouge)

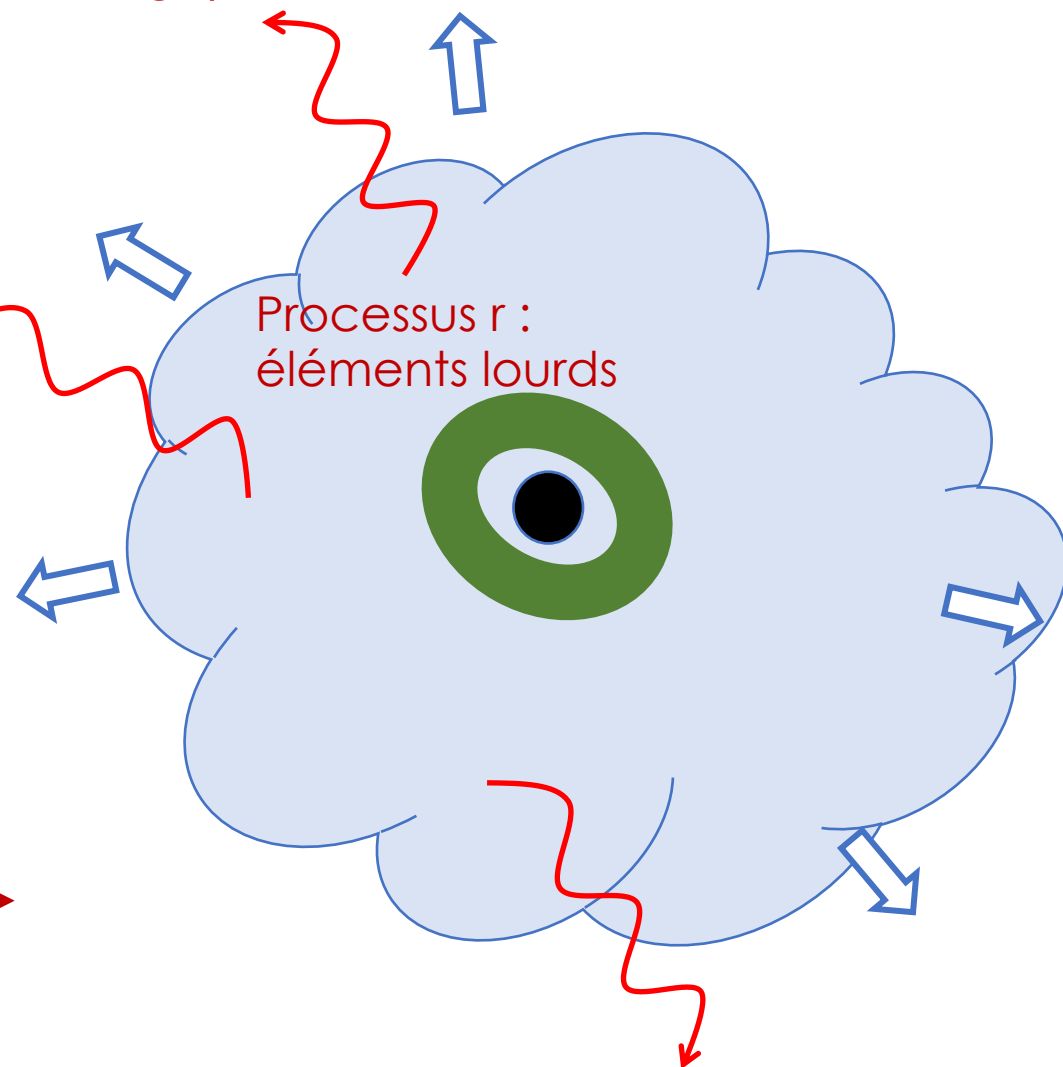
Nombre de protons Z



Nombre de neutrons  $N = A - Z$

↖ Désintégrations  $\beta$  : N diminue de 1, Z augmente de 1

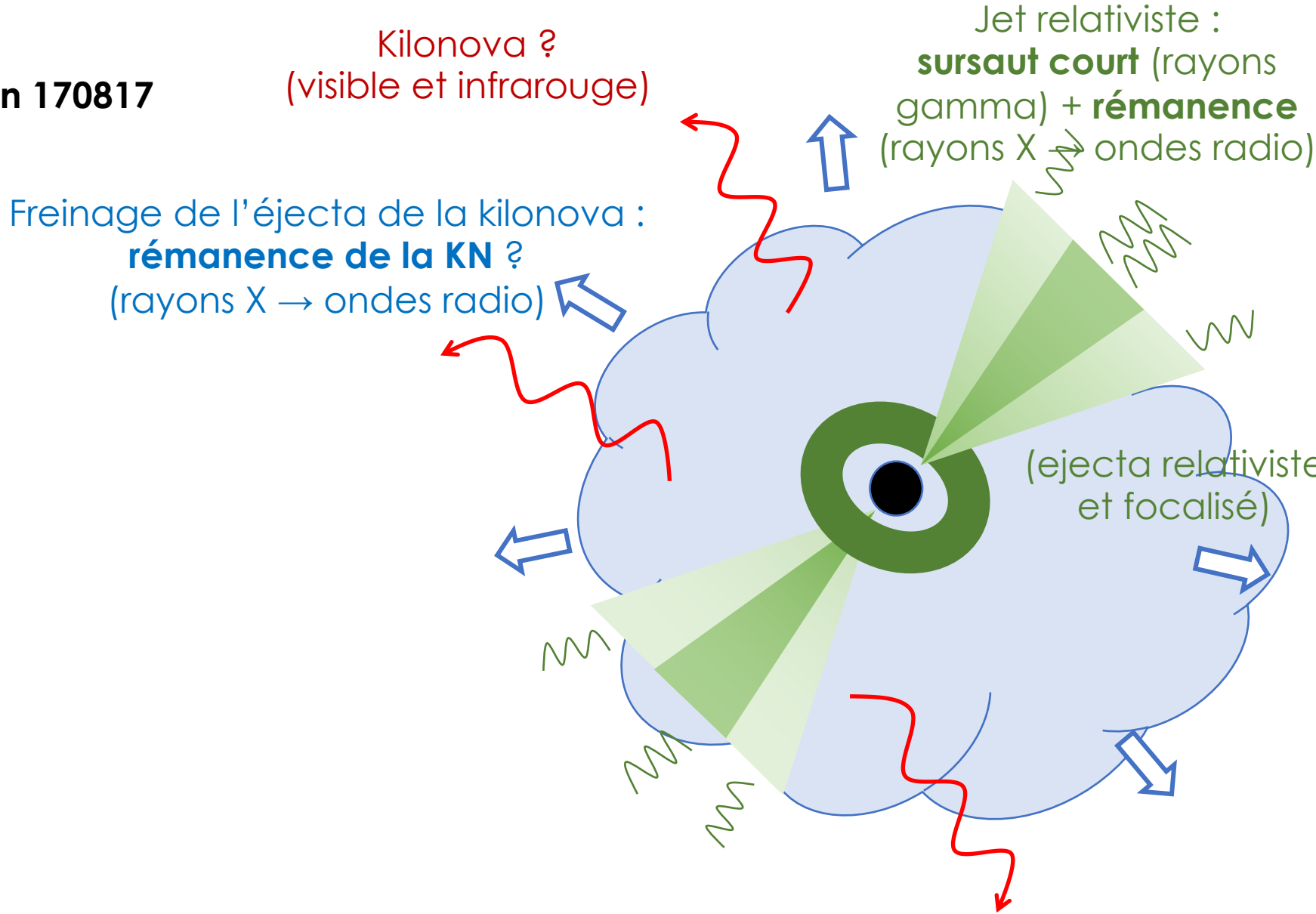
→ Captures de neutrons (N augmente, Z constant)



Prédictions théoriques pré-août 2017

# Événement initial / moteur central

- **Sursauts courts : la révolution 170817**



Prédictions théoriques pré-août 2017

## ▪ Sursauts courts : la révolution 170817

**170817 :**

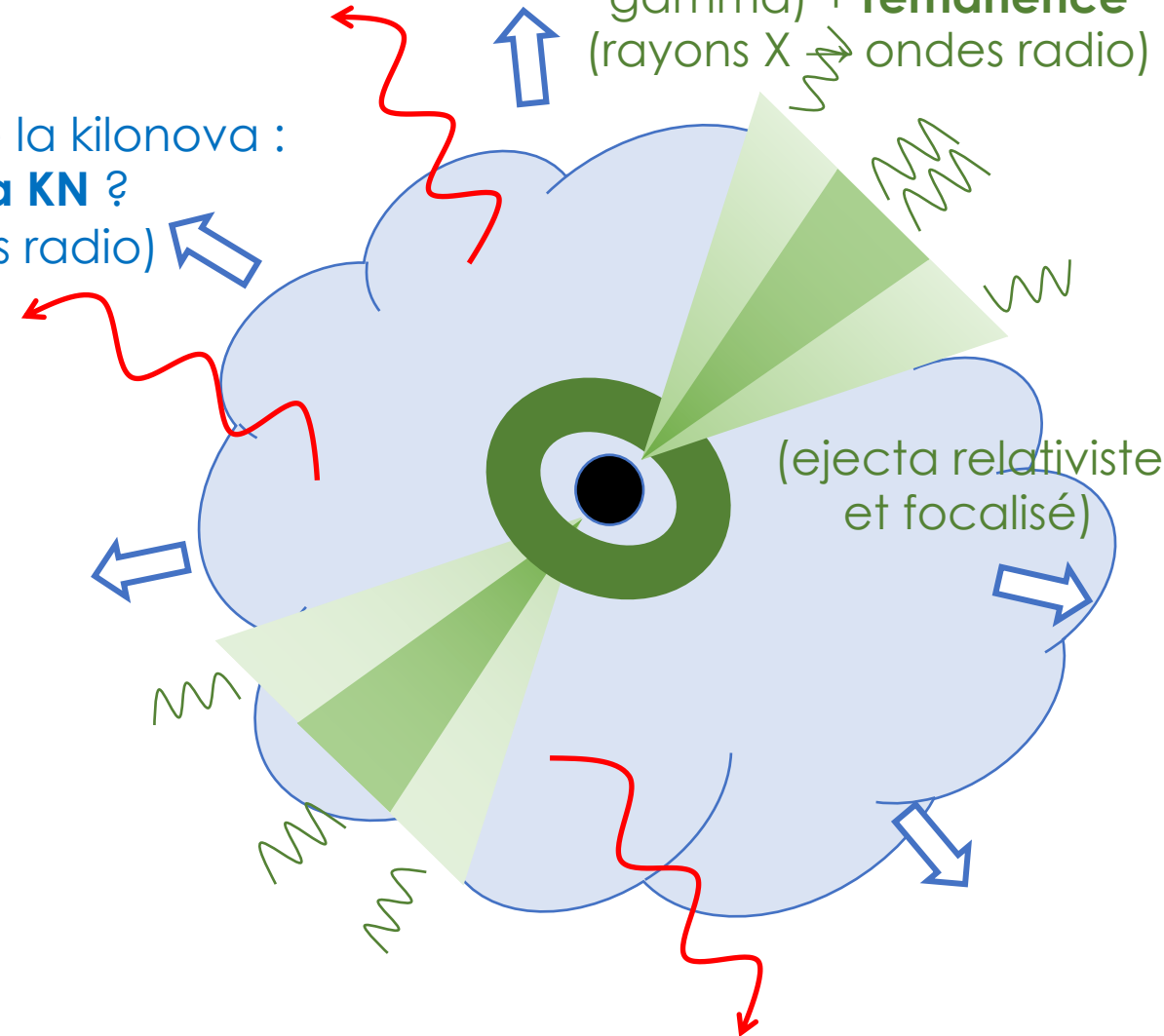
- émission gravitationnelle de la fusion d'une BNS
- kilonova
- sursaut gamma court
- rémanence

**Pouvoir prédictif de la physique !**

Kilonova ?  
(visible et infrarouge)

Freinage de l'éjecta de la kilonova :  
**rémanence de la KN ?**  
(rayons X → ondes radio)

Jet relativiste :  
**sursaut court** (rayons gamma) + **rémanence**  
(rayons X → ondes radio)



Prédictions théoriques pré-août 2017

- **Ondes gravitationnelles : caractérisation du système initial**
- Phase spiralante EN+EN détectée pendant >100 s
- Analyse : **deux étoiles à neutrons**, masse totale =  $2.7\text{-}2.8 M_{\odot}$
- Beaucoup d'autres informations : **distance, orientation, déformabilité, ...**
- Signal post-merger non détecté : nature de l'objet final ?

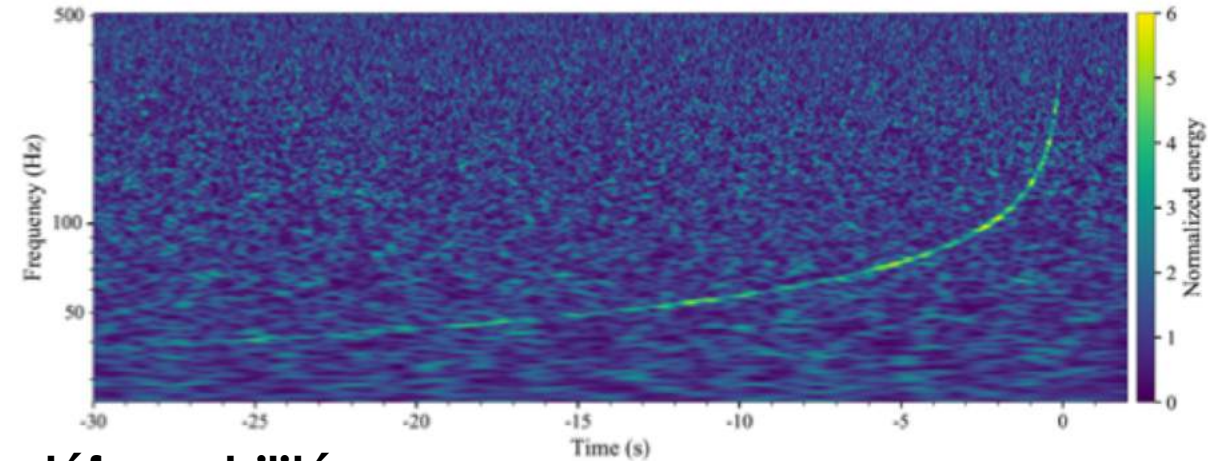


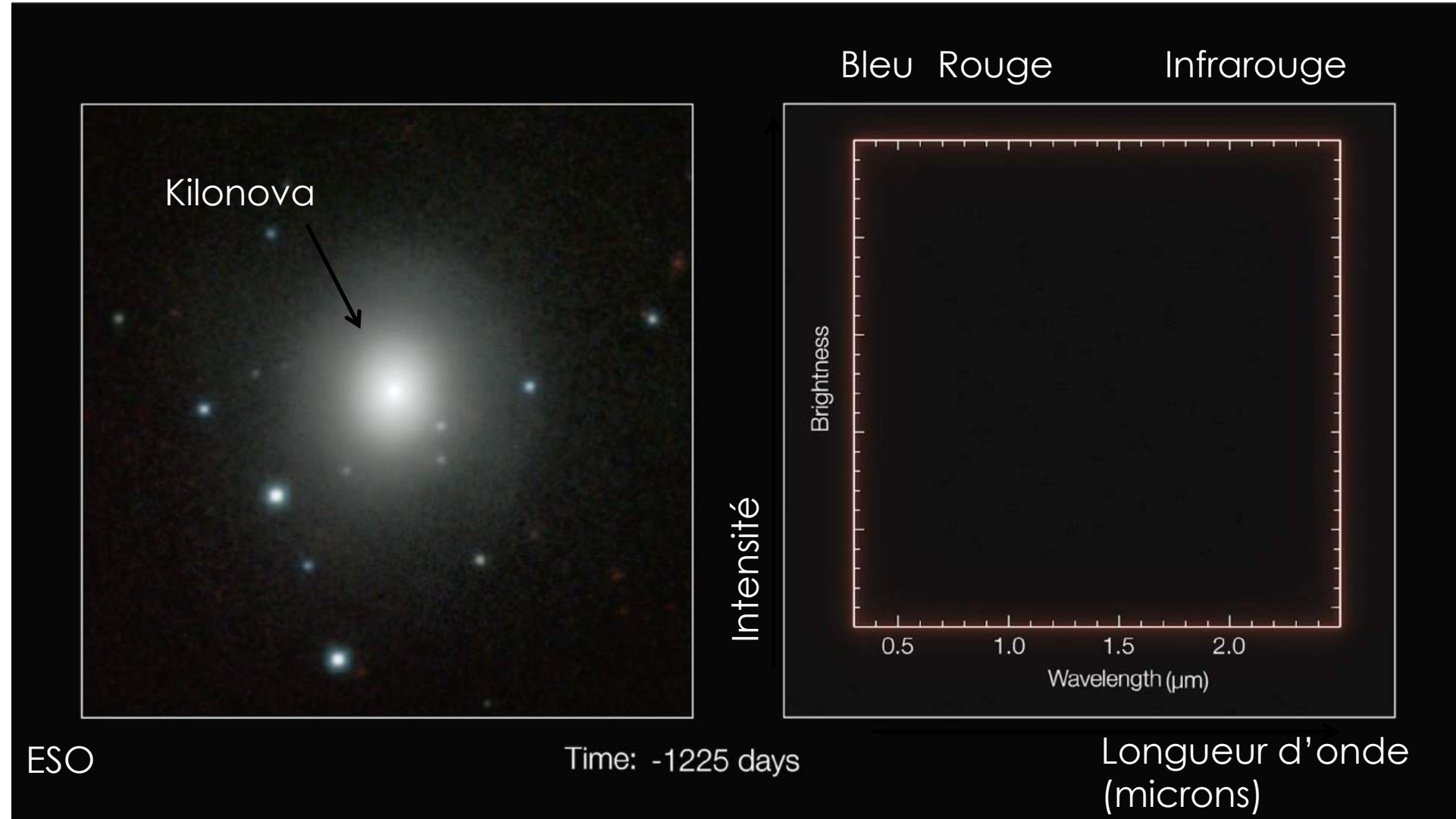
TABLE I. Source properties for GW170817: we give ranges encompassing the 90% credible intervals for different assumptions of the waveform model to bound systematic uncertainty. The mass values are quoted in the frame of the source, accounting for uncertainty in the source redshift.

	Low-spin priors ( $ \chi  \leq 0.05$ )	High-spin priors ( $ \chi  \leq 0.89$ )
Primary mass $m_1$	$1.36\text{--}1.60 M_{\odot}$	$1.36\text{--}2.26 M_{\odot}$
Secondary mass $m_2$	$1.17\text{--}1.36 M_{\odot}$	$0.86\text{--}1.36 M_{\odot}$
Chirp mass $\mathcal{M}$	$1.188^{+0.004}_{-0.002} M_{\odot}$	$1.188^{+0.004}_{-0.002} M_{\odot}$
Mass ratio $m_2/m_1$	$0.7\text{--}1.0$	$0.4\text{--}1.0$
Total mass $m_{\text{tot}}$	$2.74^{+0.04}_{-0.01} M_{\odot}$	$2.82^{+0.47}_{-0.09} M_{\odot}$
Radiated energy $E_{\text{rad}}$	$> 0.025 M_{\odot} c^2$	$> 0.025 M_{\odot} c^2$
Luminosity distance $D_L$	$40^{+8}_{-14}$ Mpc	$40^{+8}_{-14}$ Mpc
Viewing angle $\Theta$	$\leq 55^{\circ}$	$\leq 56^{\circ}$
Using NGC 4993 location	$\leq 28^{\circ}$	$\leq 28^{\circ}$
Combined dimensionless tidal deformability $\tilde{\Lambda}$	$\leq 800$	$\leq 700$
Dimensionless tidal deformability $\Lambda(1.4M_{\odot})$	$\leq 800$	$\leq 1400$

- **Kilonova : éjection pendant la coalescence & nucléosynthèse**

- L'analyse de la lumière confirme la synthèse d'éléments lourds.

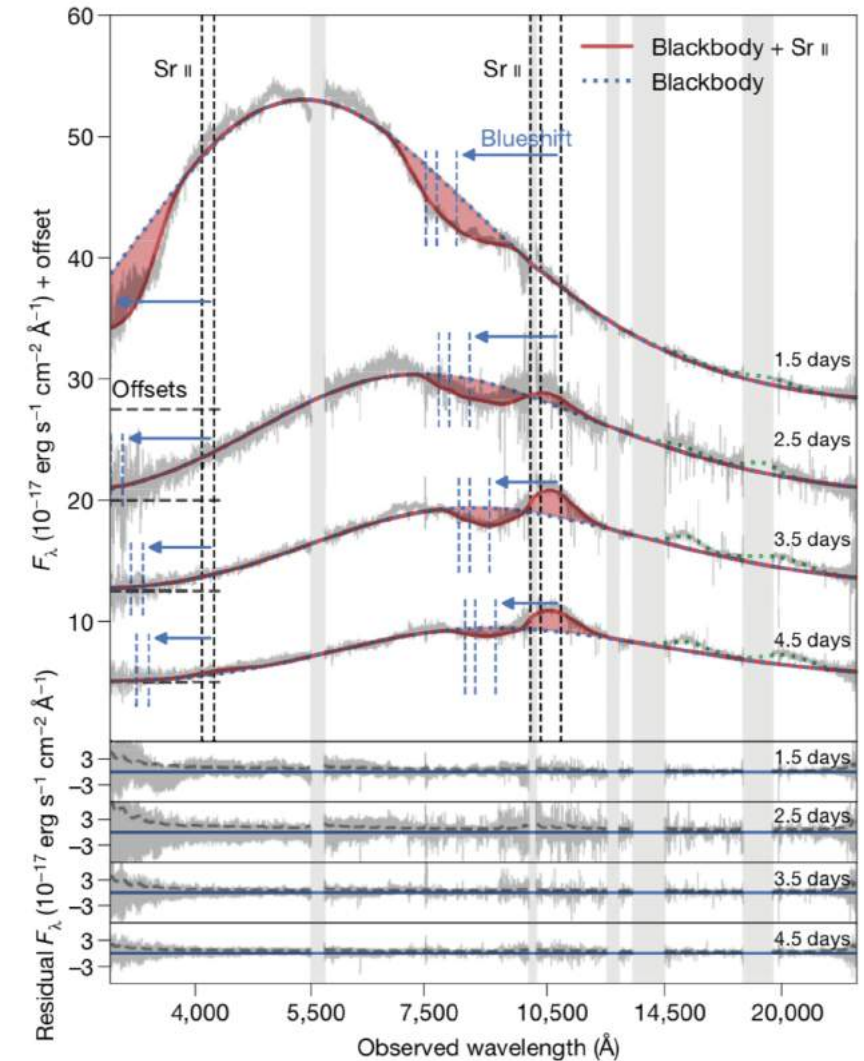
- Elle permet de préciser la géométrie des éjections pendant la coalescence.



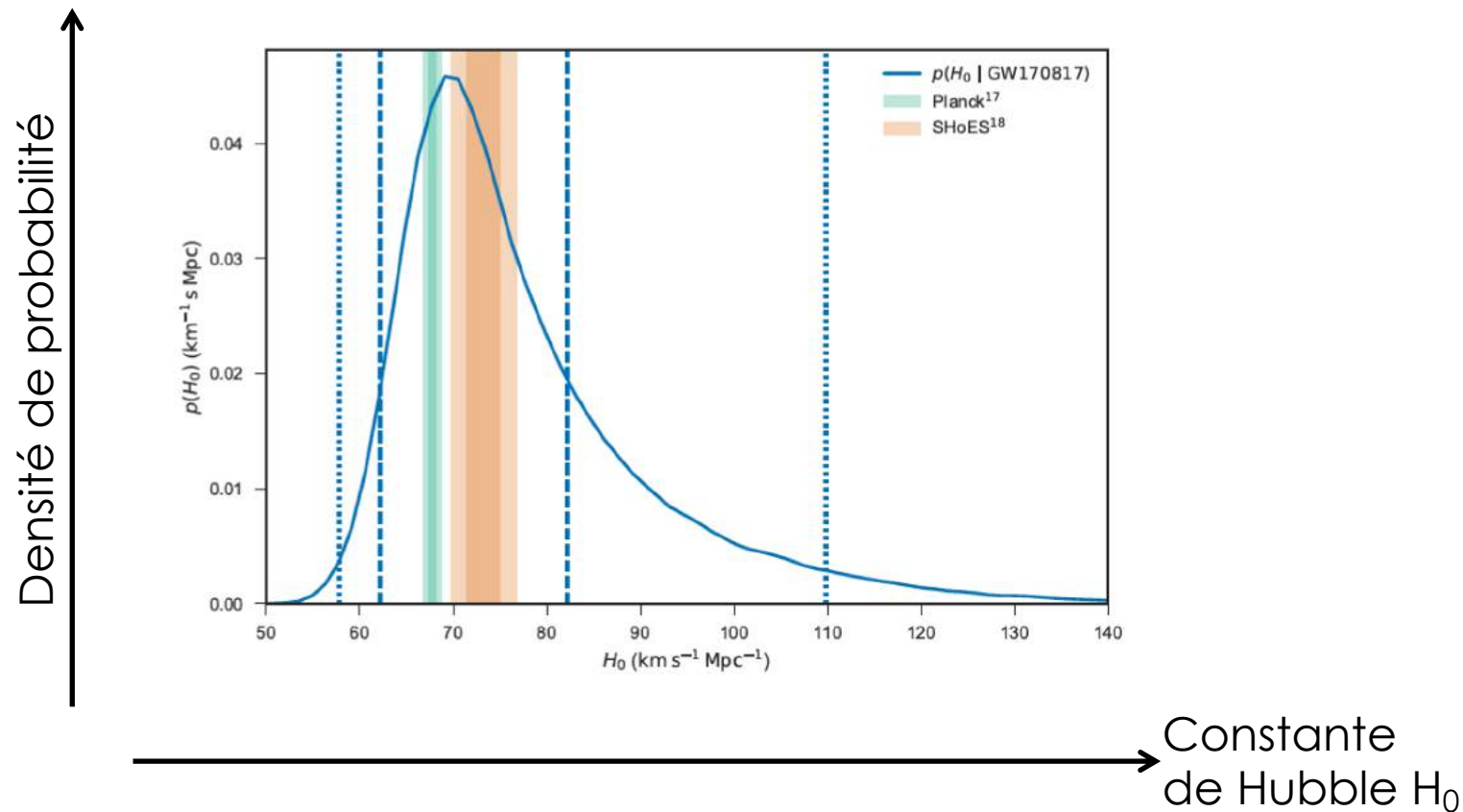
## ■ Kilonova : éjection pendant la coalescence & nucléosynthèse

Le spectre de la kilonova contient encore beaucoup d'information qui demanderont des années pour être extraites.

**Fig. 4 | Spectral series of AT2017gfo 1.5–4.5 days after the merger.** Data are shown in grey and have been smoothed slightly. Top panel, a model (solid red lines) consisting of a blackbody (blue dotted lines) with P Cygni profiles (red transparent fill) for the Sr lines. The rest (vertical black dashed lines) and observed (vertical blue dashed lines) positions of the model's Sr lines are shown, with the blueshift indicated by arrows. Green dotted lines show the Gaussian emission profiles added to ensure the overall continuum is not biased. A vertical offset has been applied to each spectrum for clarity, with zero flux indicated by the dashed horizontal line segments. Bottom panels show the residuals between model and data.



- Kilonova (visible/IR) + ondes gravitationnelles : mesure de la constante de Hubble !



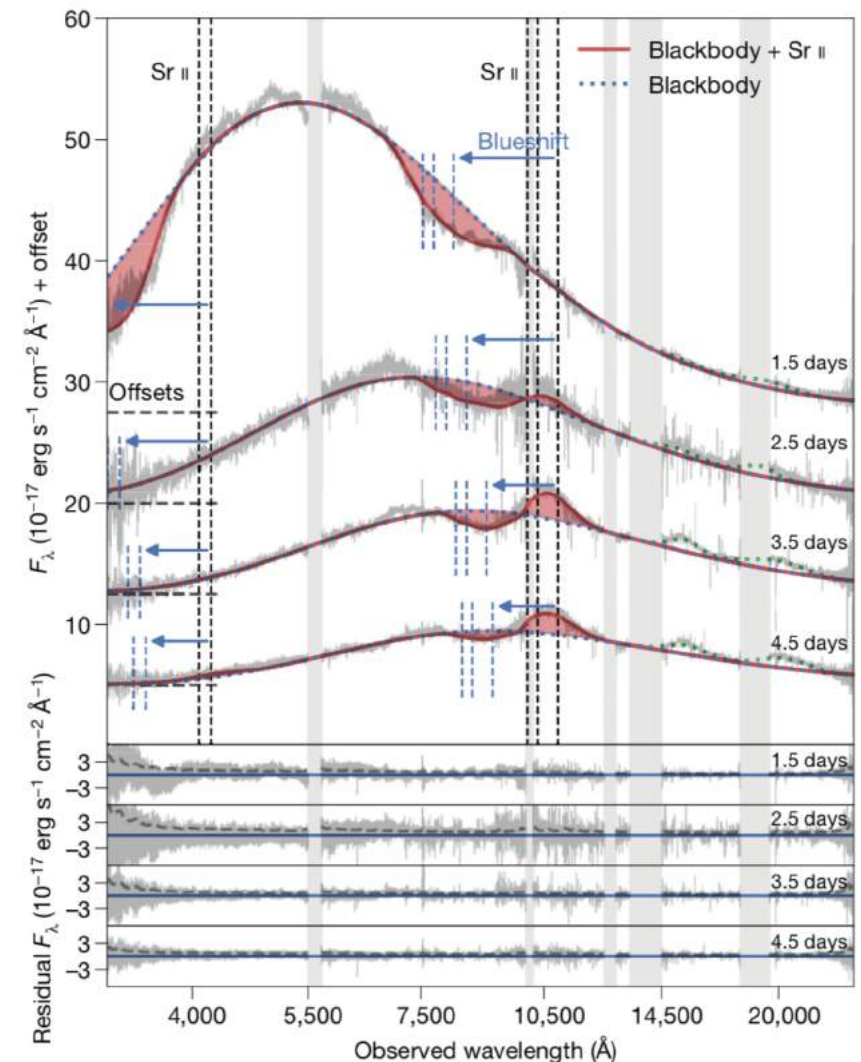
$$H_0 = 70.0^{+12.0}_{-8.0} \text{ km.s}^{-1}.\text{Mpc}^{-1}$$



## ■ Kilonova : éjection pendant la coalescence & nucléosynthèse

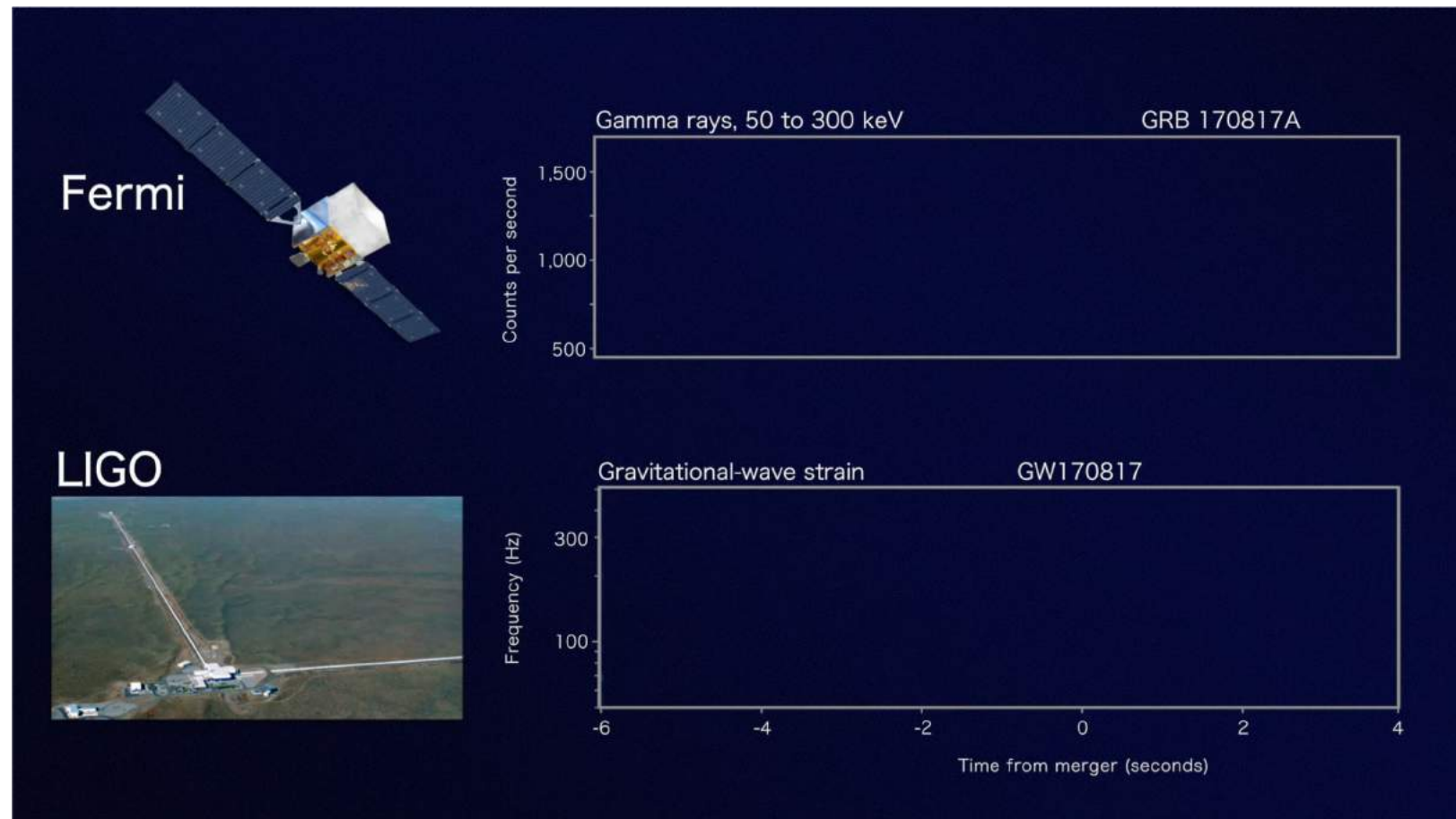
Le spectre de la kilonova contient encore beaucoup d'information qui demanderont des années pour être extraites.

**Fig. 4 | Spectral series of AT2017gfo 1.5–4.5 days after the merger.** Data are shown in grey and have been smoothed slightly. Top panel, a model (solid red lines) consisting of a blackbody (blue dotted lines) with P Cygni profiles (red transparent fill) for the Sr lines. The rest (vertical black dashed lines) and observed (vertical blue dashed lines) positions of the model's Sr lines are shown, with the blueshift indicated by arrows. Green dotted lines show the Gaussian emission profiles added to ensure the overall continuum is not biased. A vertical offset has been applied to each spectrum for clarity, with zero flux indicated by the dashed horizontal line segments. Bottom panels show the residuals between model and data.



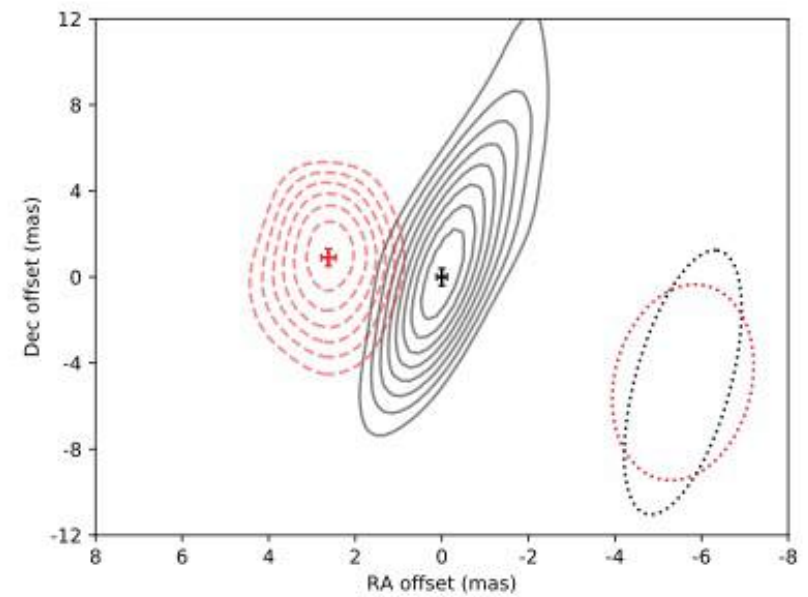
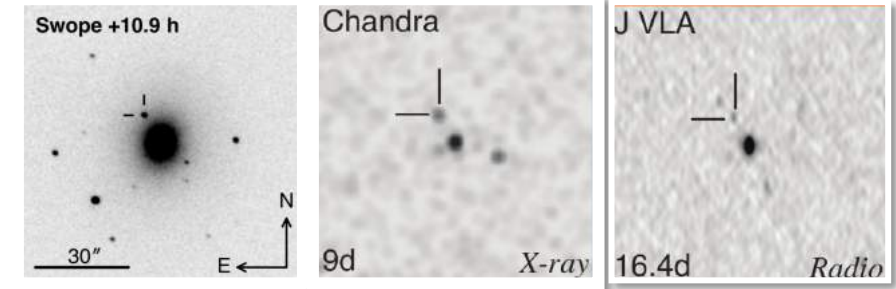
# 170817 : complémentarité des messagers

- **Sursaut gamma : physique de l'éjecta relativiste**
- Le sursaut gamma est atypique : trop faible pour sa distance
- Pour la première fois on sonde le jet relativiste sur le côté !
- Délai GW-GRB : teste la vitesse de propagation des ondes gravitationnelles !



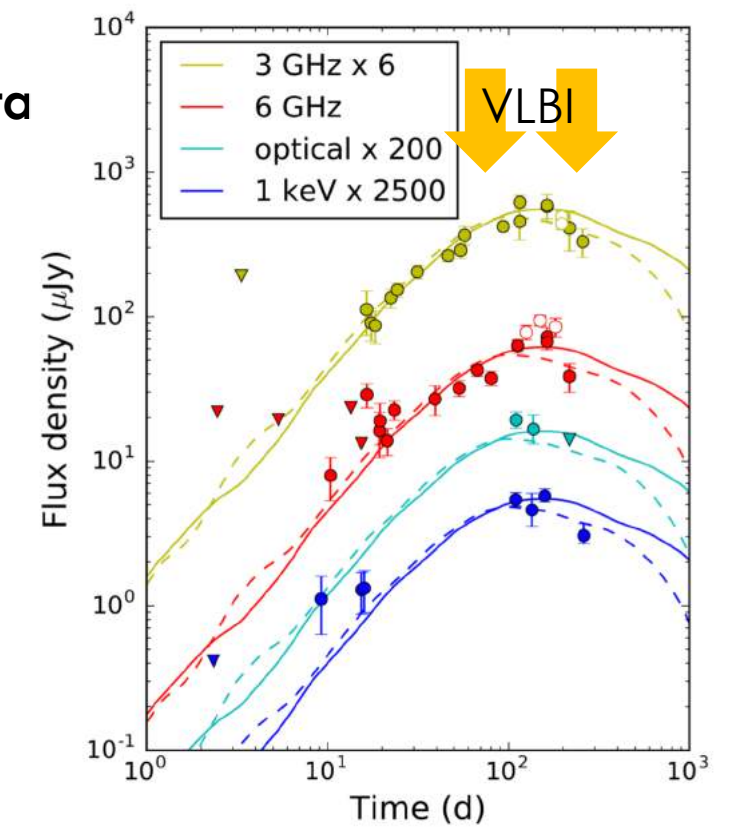
# 170817 : complémentarité des messagers

- Rémanence : physique du freinage de l'éjecta relativiste
- Toujours détectée aujourd'hui, presque quatre ans après !
- Observation VLBI : confirme que l'on observe l'émergence d'un jet relativiste vu de côté ! **Pour la première fois nous pouvons étudier en détail la géométrie du jet.**
- **Forme de la courbe de lumière (montée très lente) : géométrie de l'éjecta**

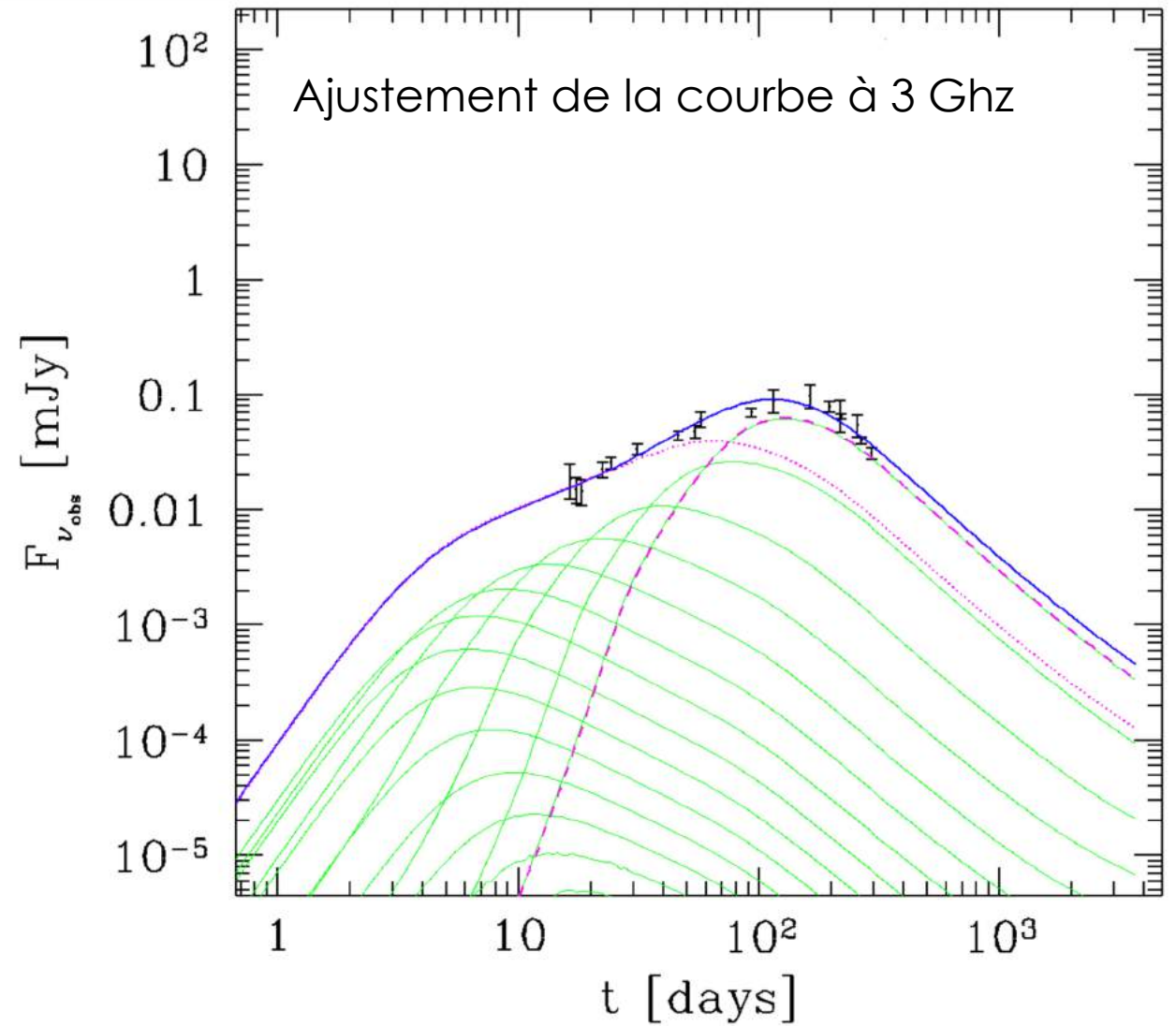
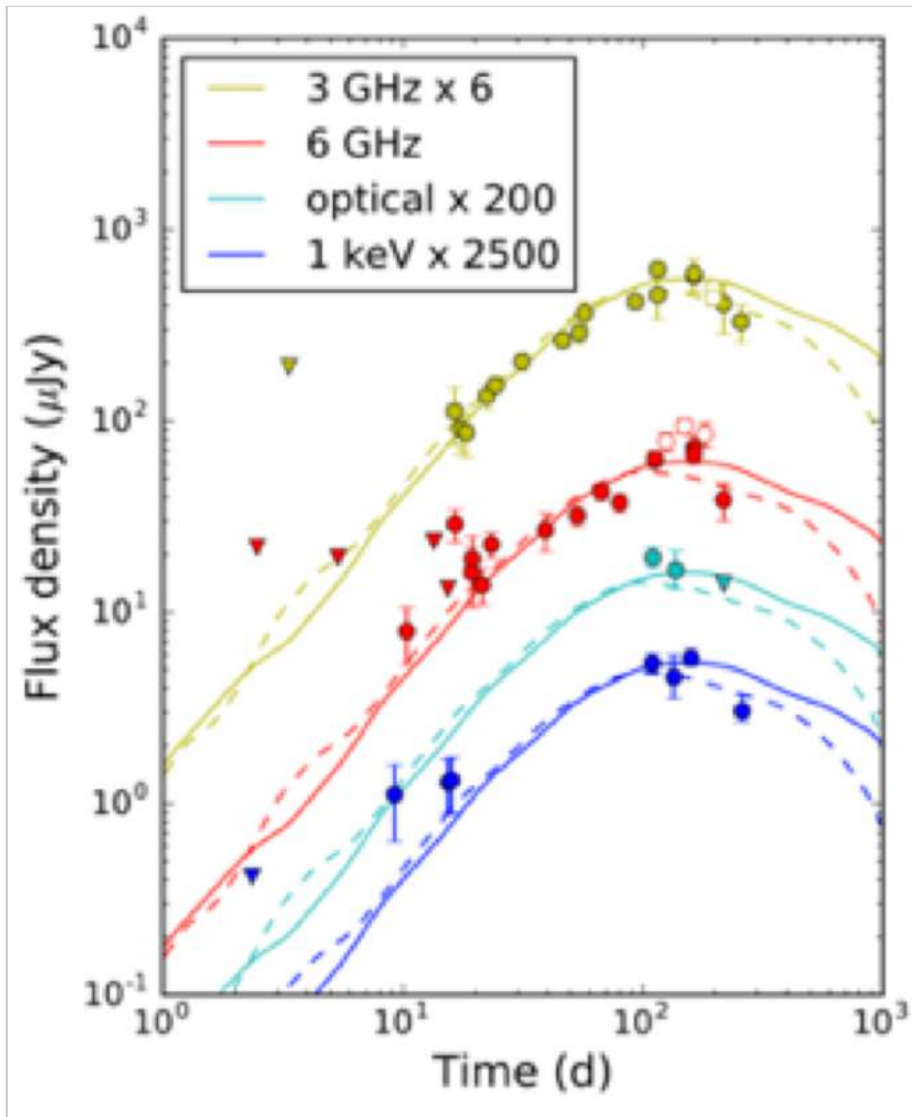


Mooley et al. 2018

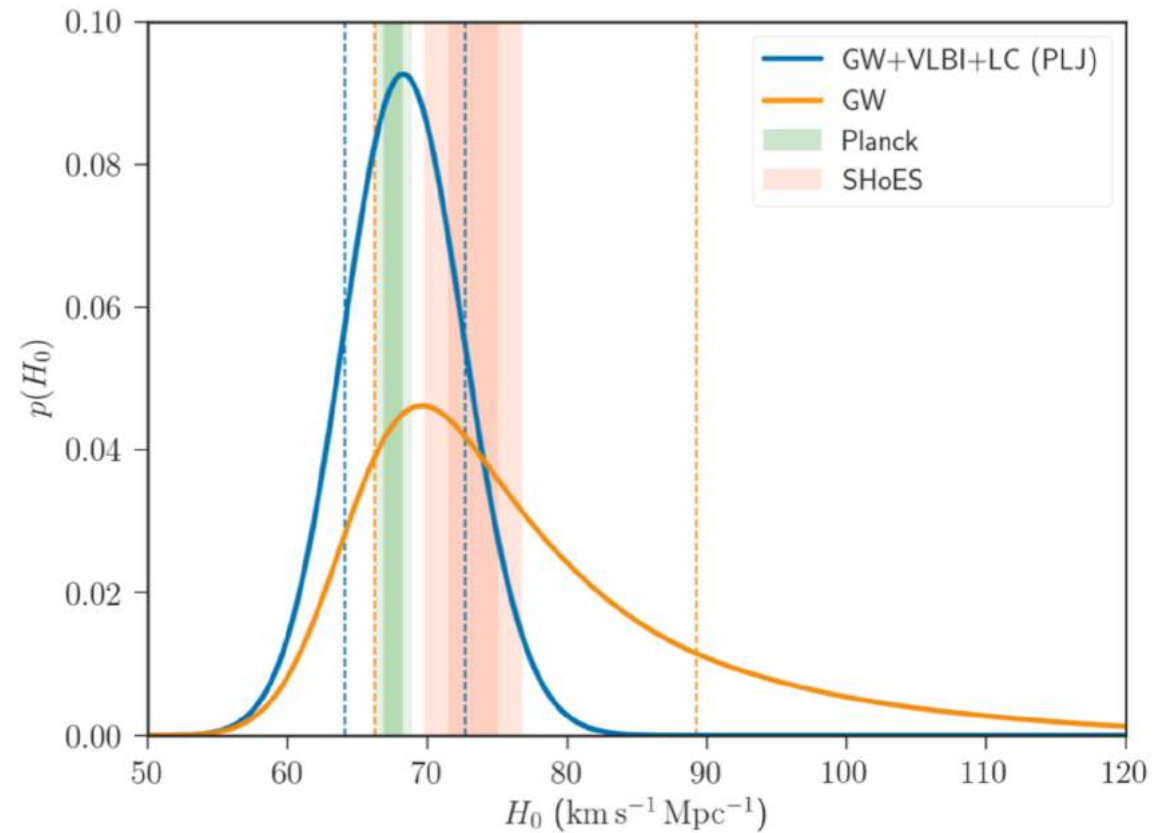
**Mouvement apparent super-luminique !**



Alexander et al. 2018



- Kilonova (visible/IR) + ondes gravitationnelles : mesure de la constante de Hubble !
- Rémanence : meilleure connaissance de l'angle de vue = améliore la mesure de  $H_0$



Hotokezaka et al. 2019

# 170817 : complémentarité des messagers

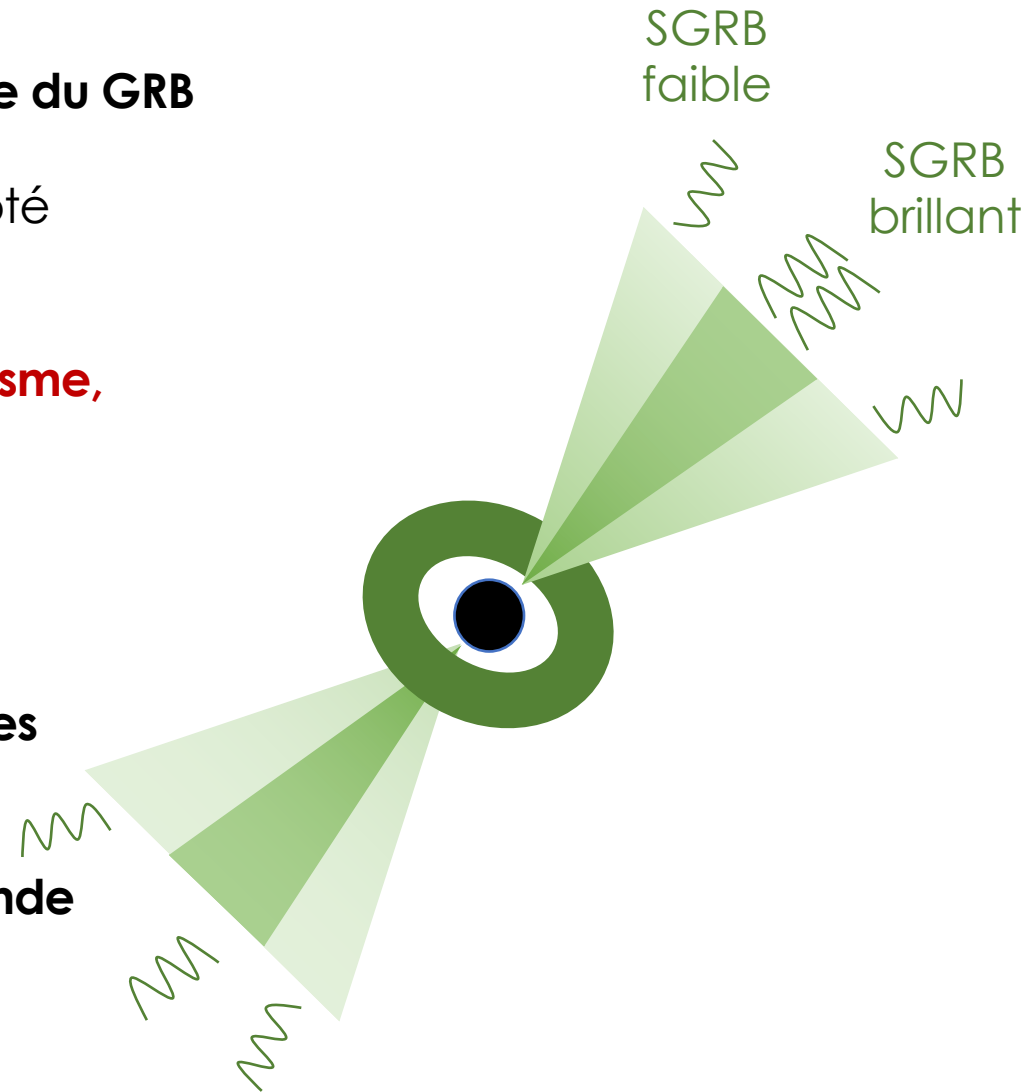
- **Géométrie du jet révélée par la rémanence : l'énigme de l'origine du GRB**
- Nous ne détectons pas un GRB produit par le jet central vu de côté (argument de compacité : Matsumoto & Piran).
- **Nous détectons une émission gamma due à un nouveau mécanisme, qui se produit dans les régions latérales.**

**Shock breakout lorsque le jet « perfore » l'éjecta de la kilonova ?**

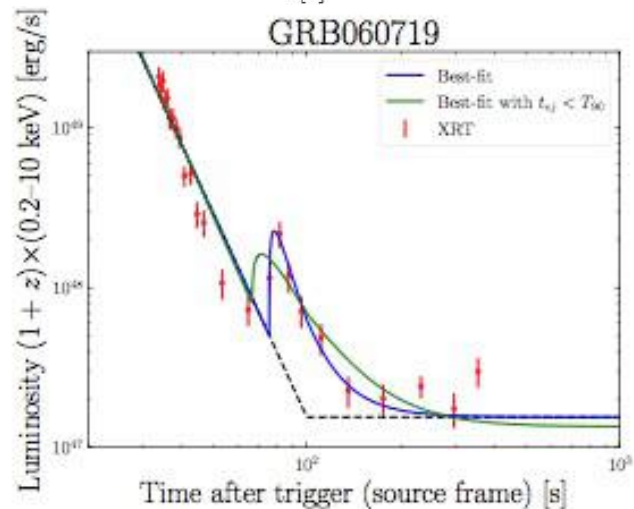
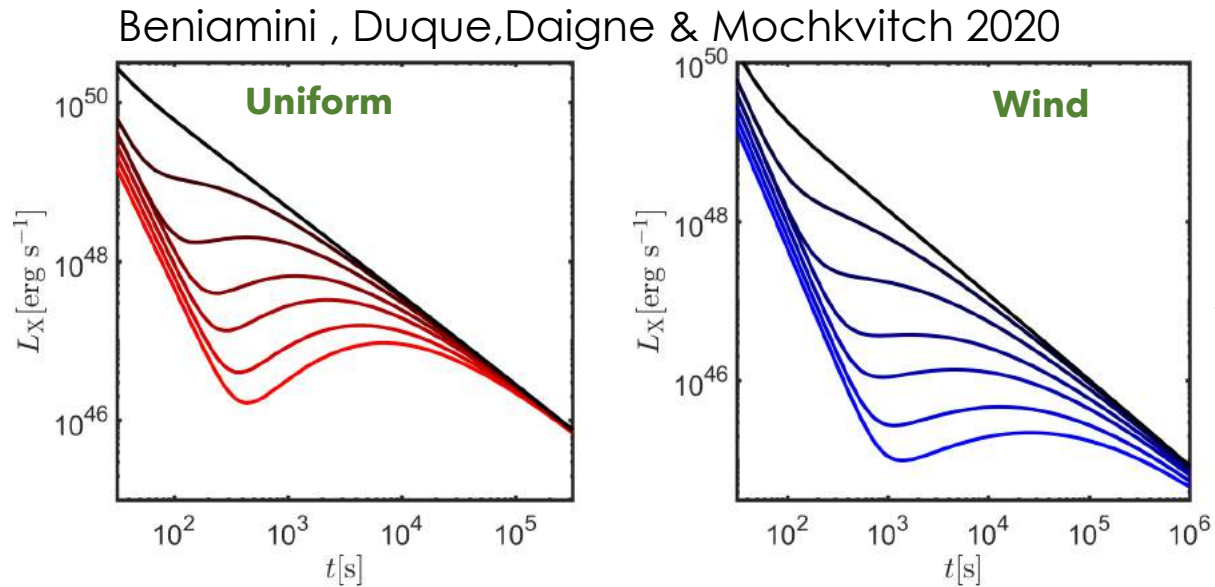
- Etape suivant (O4 ? O5 ? ET ?) : association d'ondes gravitationnelles et d'un « vrai » sursaut gamma court.

**Difficile car les événements de face sont rares : il faut une très grande sensibilité pour voir dans un grand volume.**

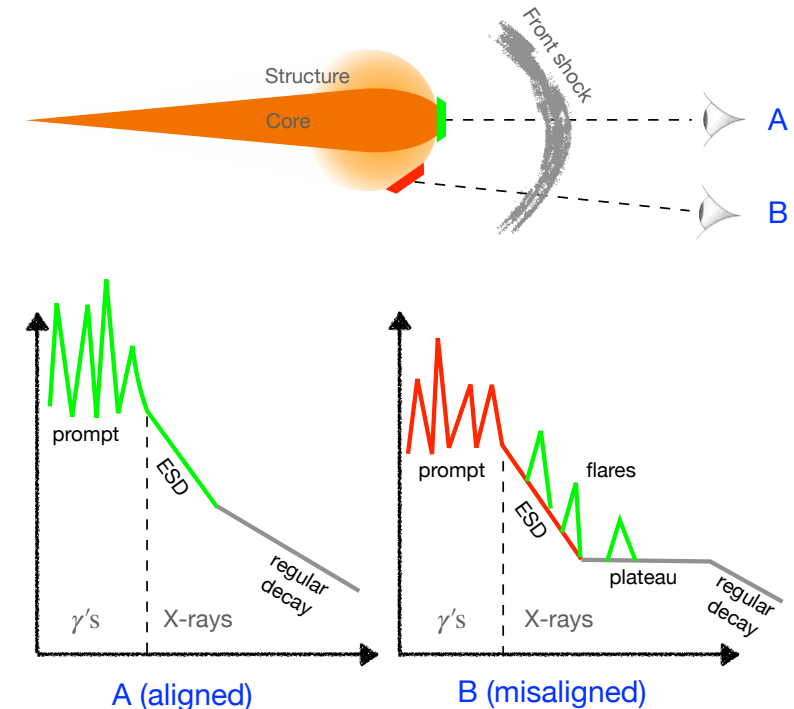
**(Einstein Telescope ?)**



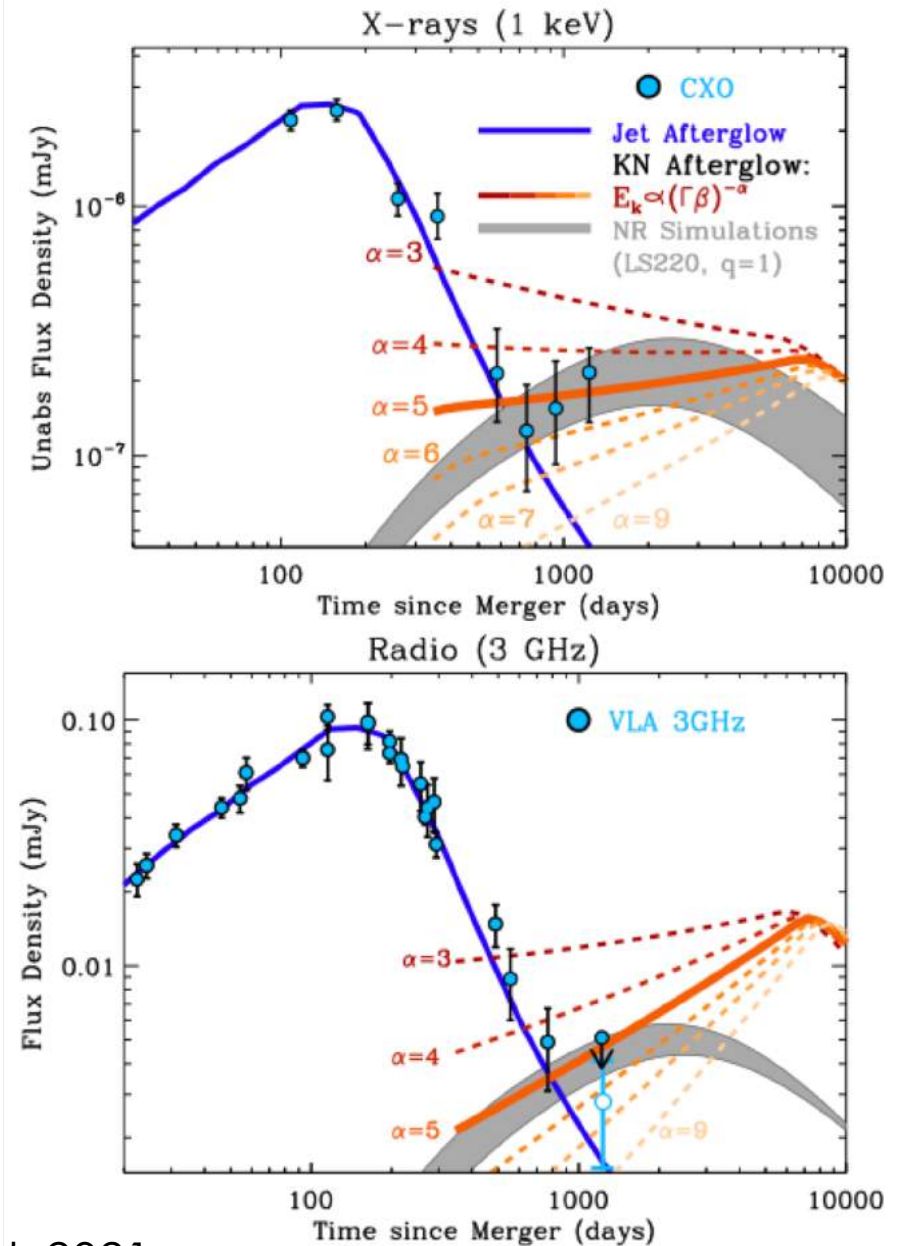
- Géométrie du jet révélée par la rémanence : retour sur les plateaux et les flares



Même jet  
Même environnement  
Angle de vue qui augmente (jusqu'à  $\sim 10/\Gamma$ )



- Rémanence tardive : émergence d'une nouvelle composante ?



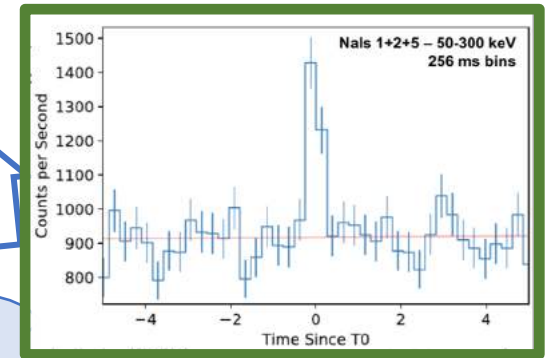


# La révolution 170817

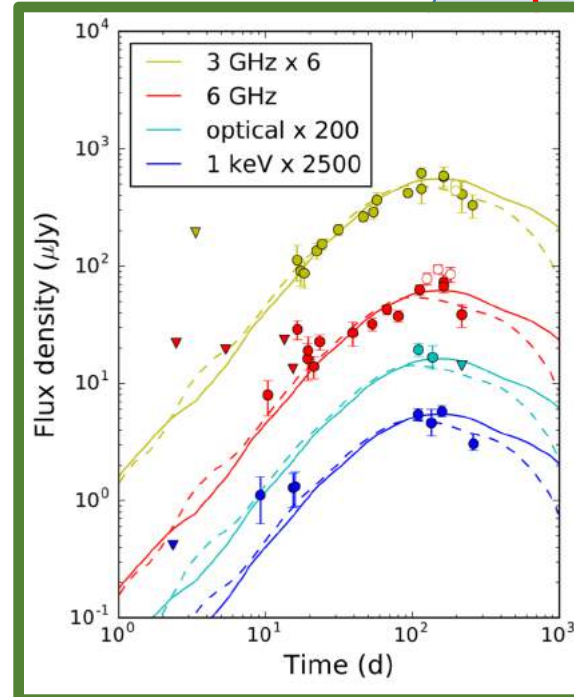
Kilonova



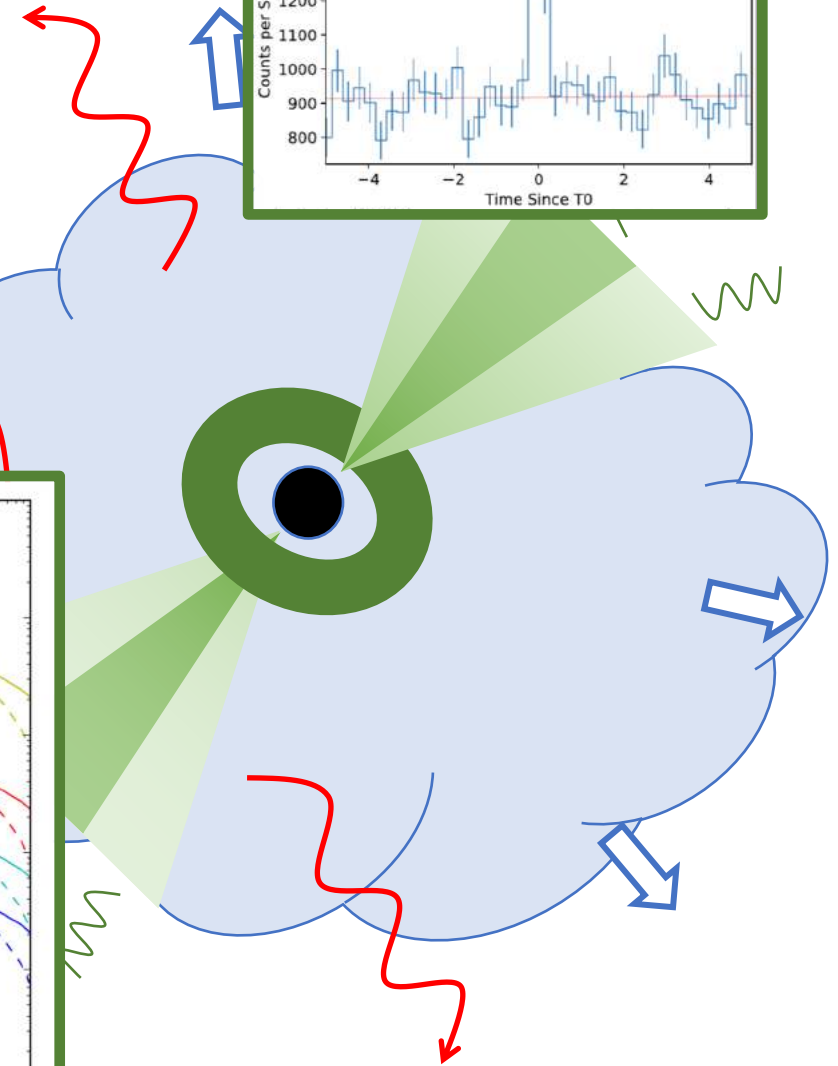
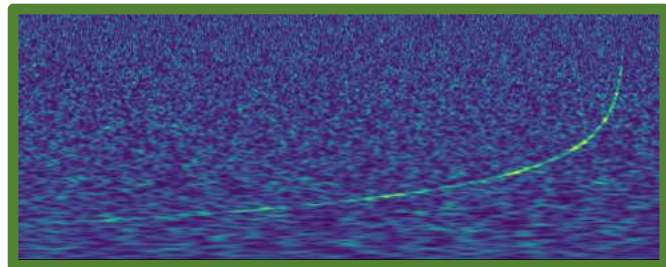
GRB



Afterglow



GW



# En guise de conclusion

Kandinsky - Composition 8 - 1923  
Guggenheim Museum, New-York



# En guise de conclusion

Coalescences : sursauts courts + kilonova

Kandinsky - Composition 8 - 1923  
Guggenheim Museum, New-York



Effondrement d'une étoile massive :  
sursauts gamma longs + hypernova

# En guise de conclusion

Kandinsky - Composition 8- 1923  
Guggenheim Museum, New-York



Kandinsky - Curves and sharp angles - 1923  
Guggenheim Museum, New-York

Jet relativiste:  
freinage par le milieu extérieur  
= rémanence (afterglow)

Jet relativiste:  
dissipation interne  
= sursaut gamma (GRB)

# En guise de conclusion

Kandinsky - Composition 8 - 1923  
Guggenheim Museum, New-York



Kandinsky - Curves and sharp angles - 1923  
Guggenheim Museum, New-York

Encore beaucoup à découvrir !