



Observatoire  
de Paris



## Université Paris Sciences et Lettres

Observatoire de Paris

Mémoire de  
Diplôme Universitaire « Structuration de l'Univers »  
Astronomie

Présentée et soutenue par  
**Mme Amandine LEMAIRE**

Le 23 juin 2024

**Bilan des Observations de GRB 221009 – Apports des premiers résultats**

Mémoire dirigée par Pierre Cristofari

JURY :

Président du jury

M. [Prénom Nom, grade, laboratoire, établissement de rattachement]

Rapporteurs

M. [Prénom Nom, grade, laboratoire, établissement de rattachement]

Examineurs

M. [Prénom Nom, grade, laboratoire, établissement de rattachement]



## Remerciements

---

Je remercie M. Pierre Cristofari pour ses précieux conseils.

Je remercie également M. David Fayolle pour sa relecture attentive et son soutien.

# Table des matières

---

Introduction .....	9
Chapitre I. Contexte général sur les sursauts gamma (GRB) .....	10
I.1. Que sont les sursaut gamma ? .....	10
I.2. Historique de leur découverte .....	11
I.3. L'émission prompte (Prompt émission) .....	13
I.3.1. Courbe de lumière .....	13
I.3.2. Durée .....	14
I.3.3. Spectre d'énergie .....	14
I.4. L'émission rémanente (Afterglow) .....	16
I.4.1. Courbe de lumière .....	16
I.4.2. Spectre d'énergie .....	17
I.4.3. Evaluation du redshift $z$ .....	18
I.5. Discussion sur les galaxies hôtes .....	19
I.6. Modèles de progéniteur .....	19
I.6.1. Progéniteur de type Collapsar .....	20
I.6.2. Progéniteur de type Merger .....	20
I.7. Tensions entre Théories et Observations .....	20
I.7.1. La problématique .....	20
I.7.2. Le modèle standard (boule-de-feu) .....	22
I.7.3. Mécanismes d'émission .....	24
I.8. Ce que nous apporte l'étude des GRB .....	27
I.8.1. Sonde cosmologique .....	27
I.8.2. Comportement des particules relativistes et ultra-relativistes .....	28
I.8.3. Apport aux théories physiques .....	28
Chapitre II. Comment s'inscrit la découverte de GRB 221009A dans ce contexte ? .....	30
II.1. Détail sur sa détection .....	30
II.2. The B.O.A.T. (The Brightest Of All Time) .....	32
II.2.1. Emission prompte .....	32
II.2.2. Distance .....	34
II.2.3. Rémanence .....	34
II.2.3.1. Domaine X .....	34
II.2.3.2. Domaine optique et infrarouge .....	36
II.2.3.3. Domaine radio .....	38
II.2.4. Conclusion partielle .....	39

II.2.5. Détection d'électrons très énergétiques .....	39
Chapitre III. Pour quelle raison GRB 221009A est the B.O.A.T ? .....	41
III.1. Problématiques.....	41
III.1.1. Introduction sur les GRB énergétiques .....	41
III.1.2. Questions ouvertes sur GRB 221009A .....	42
III.2. Energie isotrope $E_{\text{iso}}$ et Luminosité isotrope $L_{\text{iso}}$ .....	42
III.3. Discussion sur l'occurrence du phénomène.....	44
III.3.1. Récurrence en luminosité.....	44
III.3.2. Récurrence énergétique .....	46
III.4. Discussion sur la distance .....	46
III.5. Supernova progénitrice ? .....	48
III.6. Galaxie hôte .....	49
III.7. Hypothèses sur la structure du jet.....	50
III.8. Implications sur la détection de VHE.....	52
III.8.1. Emission de photons en Téraélectronvolt .....	52
III.8.2. Emission de neutrino .....	52
III.8.3. Violation de l'Invariance de Lorentz ? .....	53
III.8.4. Utilisation des résultats pour alimenter les modèles ALP .....	53
Conclusion .....	54
Références bibliographiques .....	56

## Table des illustrations

Figure 1	Courbe de lumière gamma du sursaut enregistré le 02/07/1967 par VELA. Le sursaut est bref constitué de deux pics. En ordonné, le nombre de coup par secondes (counts/second) représente le nombre de photons gamma reçus par seconde sur le capteur ( <a href="http://apod.nasa.gov/htmltest/jbonnell/www/firstburst.gif">http://apod.nasa.gov/htmltest/jbonnell/www/firstburst.gif</a> ) .....	11
Figure 2	Carte de distribution des sursauts sur le ciel. L'échelle de couleur représente globalement l'intensité lumineuse du rayonnement reçu sur le capteur, ici dans la gamme d'énergie 50-300 keV ( <a href="https://gammaray.nsstc.nasa.gov/batse/grb/skymap/">https://gammaray.nsstc.nasa.gov/batse/grb/skymap/</a> ).....	12
Figure 3	Différentes courbes de lumière ( <a href="https://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/objects/grbs/grb_profiles.html">https://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/objects/grbs/grb_profiles.html</a> ) .....	13
Figure 4	<i>A gauche</i> : la distribution en durée des sursauts observés par BATSE (source : <a href="http://www.batse.msfc.nasa.gov/batse/grb/duration/">http://www.batse.msfc.nasa.gov/batse/grb/duration/</a> ). <i>A droite</i> : diagramme durée $T_{90}$ – dureté HR. Le rapport de dureté HR est le rapport des fluences dans les bandes (100-300 keV) sur (50-100 keV). Ce diagramme montre que les sursauts courts ont tendance à avoir un spectre plus énergétique (plus durs) que les longs.....	14
Figure 5	<i>En haut</i> : Le spectre des photons est exprimé en photons/cm <sup>2</sup> /s/MeV (c'est-à-dire le nombre moyen de photons par unité de surface de détecteur et par unité d'énergie). <i>Au milieu</i> : Le spectre $E^2N_E$ exprimé en erg/cm <sup>2</sup> /s, où chaque photon est pondéré par son énergie au carré. Le spectre $E^2N_E$ est également appelé spectre $\nu F_\nu$ , en référence à la densité de flux spectral $F_\nu$ exprimée en erg/cm <sup>2</sup> /s/Hz (Briggs et al 1999). <i>En bas</i> : Distribution énergétique des photons (spectre énergétique) du Soleil. Les allures sont très différentes .....	15
Figure 6	Courbe de lumière typique de rémanence pour le modèle physique « boule de feu » (Hascoët 2023; Zhang et al. 2006). $\alpha$ représente les valeurs typique des pentes. On constate deux cassures de pente entre une décroissance « normale » (3) et une atténuation plus forte après quelques jours (4). .....	17
Figure 7	Exemple de spectre correspondant à une émission synchrotron (Sari, Piran, et Narayan 1998) .....	18
Figure 8	Distribution des <i>redshift</i> mesurés par BeppoSAX, HETE-2 et Swift-GBM (Gomboc 2012 d'après De Cia 2011).....	19
Figure 9	<i>A droite</i> – Schéma du modèle de boule de feu (Atteia & Mochkovitch 2004). <i>A gauche</i> – Evolution de la courbe de lumière en fonction du temps du fait de l'ouverture du jet (Duque 2021)....	22
Figure 10	Le modèle boule-de-feu, quel que soit le progéniteur, forme ici un trou noir. A partir du disque d'accrétion, la matière est relargué sous forme de deux jets.(Gomboc 2012).....	23
Figure 11	Visibilité d'un sursaut gamma en fonction de l'ouverture du jet. Un angle de 0,1 rad correspond à $\approx 6^\circ$ de demi-ouverture. Un angle de 0,015 rad correspond à $\approx 0,8^\circ$ de demi-ouverture. Certains exemples de sursaut gamma correspondant avec ces angles théoriques sont données. (Sato et al. 2023).....	24
Figure 12	Emissions multi-fréquentielles produites par les rayons cosmiques interagissant avec le milieu stellaire (Dell'Ova 2022, thèse) .....	25
Figure 13	Schéma de production de rayonnements gamma, de neutrino, et de photons de moindre énergie dans un jet par différent phénomènes (Spurio 2014). ( $\nu$ : neutrino ; $\mu$ : muon) .....	25
Figure 14	Schématization de l'émission Synchrotron (source : Wikipédia) .....	26
Figure 15	Schématization de l'émission Compton Inverse (source : Wikipédia) .....	26

Figure 16 La lumière d'un sursaut gamma et de sa rémanence traverse l'Univers pour atteindre la Terre. Se faisant elle interagit avec le milieu interstellaire, sa galaxie hôte, et d'autres facteurs absorbants. Toute ces interactions peuvent être « imprimée » dans le spectre et fournir des informations. Par exemple, les régions de nuage de gaz de l'Univers primordial, en s'effondrant sont supposés former des étoiles massives de la population III (les premières étoiles). Ces premières étoiles pourraient donc créer des GRB. Les sursauts gamma seraient alors plus anciens que les premières galaxies actives (quasar) alimentées par des trous noirs supermassifs.(Gomboc 2012) .....	27
Figure 17 Panorama non exhaustif des missions d'observations (au sol ou dans l'espace) capables de détecter des évènements comme des sursauts gamma en fonction du domaine observé (Dagoneau 2020).....	30
Figure 18 Photographie du Télescope H.E.S.S. ....	31
Figure 19 Courbe de lumière par Konus-WIND/ART-XC (Frederiks et al. 2023). ....	32
Figure 20 Courbe de lumière par Fermi-GBM (Lesage et al. 2023).....	33
Figure 21 Comparaison de GRB 221009 avec la rémanence de tous les GRB détectés par Swift-XRT. (à gauche) le flux brut sans correction. (à droite) La luminosité rapporté à la distance.(Williams et al. 2023).....	34
Figure 22 Image XRT PC-mode 0.8 – 5.0 keV illustrant l'écho lumineux de la poussière à différents temps (Williams et al. 2023) .....	35
Figure 23 Imagerie de la rémanence par le JWST (le 22/10/22) et le HST (le 04/12/22). On noter l'image du HST la présence de la galaxie hôte (A. J. Levan et al. 2023). ....	36
Figure 24 Image composite issue du HST et JWST de GRB 221009A après 330 jours (le 04/09/23). On voit clairement la rémanence dans galaxie hôte (Sears et al. 2025) .....	36
Figure 25 Rémanence optique mesurée sans correction (Kann et al. 2023).....	37
Figure 26 (à gauche) Rémanence en Optique/NIR de différentes GRB avec la même correction vis à vis de l'extinction par les poussières. (à droite) Même échantillons mais rapporté à une distance $z=1$ (Kann et al. 2023) .....	38
Figure 27 Spectre fréquentiel à différentes époques avec la simulation d'une loi de puissance représentant un choc frontal en trait continu (modèle <i>boule-de-feu</i> ) (d'après Laskar et al. 2023). On constate que l'émission radio à un flux plus important que le modèle. De même la décroissance en optique est plus forte. Le modèle <i>boule de feu</i> avec choc frontal n'est pas adapté à l'émission de la rémanence de GRB 221009A. ....	39
Figure 28 Courbe de lumière radio dans plusieurs fréquences en fonction du temps. Les courbes représentent les différentes lois de puissances proposées afin de rendre compte des observations.(Rhodes et al. 2024) .....	40
Figure 29 Histogrammes du redshift et de l' <i>Eiso</i> des sursauts gamma observés par Fermi (en rouge), par Konus (en bleu), et ceux détectés par les deux télescopes (en vert) (Atteia et al. 2017) .....	41
Figure 30 Lien entre l'énergie lumineuse isotrope, la luminosité isotrope en fonction du pic d'énergie au repos sur un échantillon de 315 GRB longs issus de Konus-WIND. GRB 221009A est représentée par une étoile. Les barres grisées représentent l'intervalle de confiance à 90% et 65% (Frederiks et al. 2023) .....	43
Figure 32 Représentation similaire de la relation d'Amati à partir d'un échantillon de 355 GRB longs (jaune) et énergétique (vert) (Lan et al. 2023).....	43
Figure 32 Recensement des GRB mesurées sur 55 ans par différentes missions. En abscisse, la fluence normalisée (dans la gamme d'énergie keV). En ordonnée, le nombre d'objet cumulé. Les étoiles	

représentent la fluence de GRB 221009A mesuré par les satellites Konus-WIND et Fermi-GBM. (Burns et al. 2023).....	44
Figure 33 Courbe de distribution du nombre de GRB par an en fonction de leur Fluence S d'après (Burns et al. 2023). En bleu la population est représentée par des sursauts à distance $z \approx 10$ et d'angle d'ouverture $\theta \approx 6^\circ$ . En vert la répartition proposé par Finke & Razzaque pour des sursaut à $z \approx 0.38$ et $\theta \approx 0,8^\circ$ (Finke et Razzaque 2024).....	45
Figure 34 Courts et longs sursauts détectés par Fermi-GBM depuis 2017 dont le décalage vers le rouge $z$ a pu être mesuré (Lesage et al. 2023). La courbe verte représenterait la limite basse.....	47
Figure 35 Distribution ( <i>et histogramme de nombre cumulé en haut et à droite</i> ) de la puissance lumineuse en fonction de la distance pour 355 sursauts (Lan et al. 2023) .....	47
Figure 36 ( <i>à gauche</i> ) Rayon effectif de la galaxie en fonction de la magnitude dans un certain type de filtre. ( <i>à droite</i> ) Rayon effective en fonction de la masse stellaire. En bleu les galaxies de GRB courts à $z < 1$ . En rouge les galaxies de GRB longs à $z < 1$ .(A. J. Levan et al. 2023) .....	49
Figure 37 Représentation du l'énergie du sursaut en fonction des caractéristiques de leur galaxie hôte. En jaune, les sursauts longs. En bleu, les sursauts courts. En vert, les sursaut très énergétiques (courts et longs). En rouge, GRB 221009A.(Lan et al. 2023) .....	50
Figure 38 Illustration schématique de la structure du jet avec en bleu un cœur d'électron relativiste et en rouge un jet de matière (proton principalement) dans un état moins relativiste. Le tout entouré d'une « coquille » de vent magnétique (B. T. Zhang et al. 2025) .....	51
Figure 39 Schématisation d'émission de neutrinos (différents types) au sein d'un jet relativiste (Sharma 2024).....	53
Figure 40 Nombres de publications scientifique associées à différents sursauts gamma marquants (Source: arXiv.org) .....	55

## Table des tableaux

---

Tableau 1 Principale grandeurs tirées de l'émission prompte de GRB 221009A .....	33
--	----

## Introduction

---

Les sursauts gamma (GRB – *Gamma Ray Burst*) sont des signaux très lumineux transitoires, non répétitifs, d'origine cosmologique. Ils ont été découverts en 1967, et font l'objet d'études intensives depuis les années 1990.

Ils se composent de deux phases : la **phase prompte**, très variable et diversifiée, avec des spectres non thermiques dont l'énergie atteint plusieurs centaines de keV, et durant jusqu'à plusieurs centaines de secondes ; et la **phase de rémanence**, durant plusieurs jours à plusieurs mois et plus régulière, observée des domaines radio aux domaines d'énergie plus élevées. Les GRB sont associés à des jets ultrarelativistes lancés par des objets compacts. Ce sont les phénomènes électromagnétiques les plus énergétiques connus. L'émission prompte est produite par la dissipation d'énergie au sein du jet, par des mécanismes encore mal connus. La rémanence est associée à la décélération continue du jet dans l'environnement stellaire autour de la source, produisant un choc violent à partir duquel les particules accélérées rayonnent principalement par processus synchrotron.

Il existe globalement deux types de sursauts gamma suivant leur durée : les GRB courts durent moins de 2 s et sont produits lors de la fusion d'objets compacts ; Les GRB longs sont produits lors de l'effondrement d'étoiles massives, ils sont généralement moins énergétiques que les GRB courts.

Le 22 octobre 2022 a été observé le sursaut gamma le plus lumineux jamais enregistré sur Terre. GRB221009A a été nommé en conséquence *The B.O.A.T. – The Brightest Of All Time*. Bien que le caractère immuable de ce qualificatif fasse débat, ce sursaut gamma long est sans nul doute le plus lumineux. La très grande quantité de données enregistrées par différents capteurs (au sol et dans l'espace) permet aux chercheurs encore aujourd'hui d'étudier ce phénomène et de mieux comprendre le comportement des sursauts gamma.

Nous tenterons dans ce document de fournir au lecteur un aperçu non exhaustif des observations faites de GRB 221009A et des travaux réalisés à ce jour.

Pour ce faire, nous introduisons les sursauts gamma dans le Chapitre I, en décrivant les différentes observations qui sont faites de leurs phase prompte et rémanente ; les théories avancées sur leurs sources et leurs origines ; et les modèles théoriques qui font consensus pour expliquer l'émission de lumière qu'ils produisent.

Dans le Chapitre II, nous décrivons les observations faites des émissions gamma de la phase prompte de GRB 221009A par différentes missions stellaires, et les enregistrements des émissions dans différentes longueurs d'ondes de la phase rémanente (à la fois sur Terre et dans l'espace). On s'intéressera tout particulièrement à l'apport de l'astronomie multi messenger, puisque ce GRB a pu faire l'objet d'une recherche d'émission de neutrinos.

Enfin, nous nous intéresserons à ce qui fait la particularité de GRB 221009A et le hisse au titre de « *The B.O.A.T.* ». Nous regrouperons les questions que soulève GRB 221009A aux astrophysiciens spécialistes du domaine. Comment les observations de ce sursaut gamma si particulier peuvent-elles remettre en question des théories acquises depuis une trentaine d'année ? Comment les chercheurs sont mis à l'épreuve par l'explication des observations par des phénomènes physique ?

# Chapitre I. Contexte général sur les sursauts gamma (GRB)

---

## I.1. Que sont les sursaut gamma ?

Les sursauts gamma (ou *Gamma Ray Burst*, noté GRB<sup>1</sup>) sont parmi les événements les plus puissants de l'Univers. Il s'agit de bouffée de rayonnement gamma de courte durée (quelques secondes à quelques minutes) que l'on appelle « **l'émission prompte** ». Au court d'un sursaut, l'énergie libérée sous forme de lumière dans le domaine gamma peut atteindre jusqu'à  $10^{44}$  Joules, ce qui équivaut à l'énergie totale que rayonnera notre Soleil pendant 10 milliards d'année.

On pense que ces événements explosifs sont liés à la mort d'étoiles ou à la fusion d'objets compacts. Nous détaillerons cela dans le chapitre I.6.

Après le sursaut gamma a lieu ce que l'on appelle la « **rémanence** ». Il s'agit d'une émission de lumière dans tout le spectre, du X au radio. Cette rémanence intervient en générale après l'émission prompte, et dure plus longtemps : la lumière émise dans le domaine X peut durer plusieurs jours ; et dans le domaine radio plusieurs années.

A l'échelle d'une galaxie, les sursauts gamma sont des événements exceptionnels et rares (tous les 10 000 ans à un million d'années), mais à l'échelle de l'Univers visible, on en détecte environ un par jour. Ils font partie des objets astronomiques les plus lointains connus. Le sursaut le plus lointain enregistré se situera à un décalage spectral vers le rouge (décalage des raies spectrales vers le rouge du fait de l'expansion de l'Univers) à  $z \approx 9.06$ , mais la mesure est incertaine. Le plus lointain mesuré avec certitude (car une spectroscopie de sa galaxie d'origine a pu être faite) est GRB 090423A qui présente un décalage spectral (redshift)  $z \approx 8,2$ , soit lorsque l'Univers avait 630 millions d'années après le Big Bang. Aujourd'hui l'Univers à 13,7 milliards d'années.

Les sursauts gamma nous permettent d'étudier les mécanismes de fin de vie des étoiles et par là comment se forme notre Univers. Ils peuvent être des points de repère et des sondes de l'Univers, car les événements lointains nous renseignent sur la composition de galaxies plus jeunes, et donc sur l'Univers plus jeune. Certains pensent que grâce aux sursauts gamma les plus lointains (donc les plus anciens) on pourrait détecter des étoiles de population III, les premières étoiles de l'Univers, dont la lumière nous est invisible car leur luminosité est extrêmement faible conjugué à une distance importante.

Par ailleurs, l'étude des sursauts gamma et la confrontation des observations aux théories permet de tester la physique des particules et la physique quantique. Les sursaut gamma se comportent comme des accélérateurs de particules (protons, électrons, neutrons...), en mettant en jeu des gammes d'énergie considérables. Reproduire ces mécanismes sur Terre est impossible. Il n'y a qu'en observant la lumière et les particules nous parvenant que l'on peut étudier la physique des particules de très haute énergie et les interactions qu'elle peuvent avoir entre-elles ou avec la lumière. Par exemple des protons provenant d'un sursaut qui entre en collision peuvent produire des neutrinos très énergétiques détectables sur Terre. Nous détaillerons cela dans le chapitre I.8.

Et enfin, certaines catégories de phénomènes à l'origine de sursauts gamma sont susceptibles de produire également des ondes gravitationnelles (ondes de déformation de l'espace-temps). Cela a pu être vérifié par la concomitance exacte d'un sursaut associé à la fusion de deux étoiles à neutrons le 17 août 2017. L'étude des sursauts gamma ouvre donc la possibilité d'une astronomie multi-messagers.

---

<sup>1</sup> Nous utiliserons souvent la notation GRB qui est la dénomination catalogue utilisé par les scientifiques pour répertorier les événements : GRB associé à sa date de détection AAMMJJ, puis A pour premier détecté de la journée, B pour le second, etc. Par exemple le second sursaut gamma détecté le 12 Juin 2025 sera répertorié GRB 250612B

## I.2. Historique de leur découverte

La découverte du phénomène de sursaut gamma fut fortuite. Le rayonnement gamma est bloqué par l'atmosphère. Ce n'est qu'avec des télescopes spatiaux munis de capteurs de photons gamma que l'on peut détecter un rayonnement gamma.

Ainsi l'observation du premier sursaut a été réalisée par un programme de surveillance militaire américain, le programme VELA, destiné à la veille des essais nucléaires post-guerre froide de 1963 à 1984. Ceux-ci étaient en effet interdits<sup>2</sup> (sur terre ou sous eau), et le programme permettait de surveiller le bon respect de cette interdiction. Le programme VELA était constitué d'un réseau de satellites permettant de couvrir l'ensemble du globe, et la présence d'un essai nucléaire pouvait être détectée indirectement par sa lumière émise dans le domaine X et gamma.

Le 2 juillet 1967, un flash de lumière gamma d'origine indéterminée, a été détecté par la constellation VELA. Ce flash ne correspondait pas à la signature d'un essai nucléaire, et son origine provenait de l'espace, en dehors du système solaire. Par la suite, 73 sursauts gamma ont été enregistrés jusqu'à la fin de la mission en 1984. Le programme étant un programme militaire secret, ces découvertes n'ont été publiées qu'à partir de 1973. En Figure 1 est représenté la courbe de lumière de GRB 670702 tel que le détecteur a pu l'enregistrer.

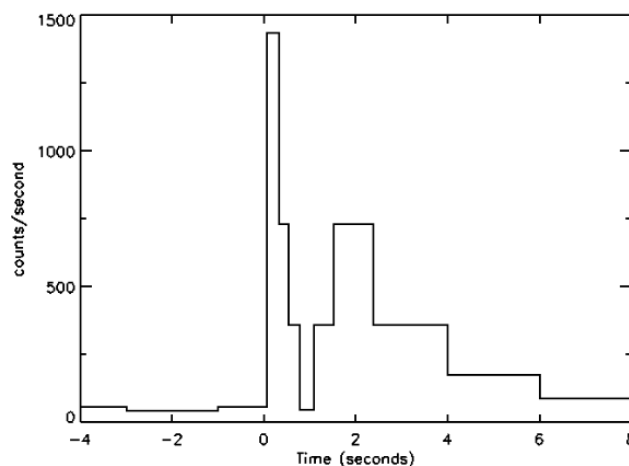


Figure 1 Courbe de lumière gamma du sursaut enregistré le 02/07/1967 par VELA. Le sursaut est bref constitué de deux pics. En ordonné, le nombre de coup par secondes (counts/second) représente le nombre de photons gamma reçus par seconde sur le capteur (<http://apod.nasa.gov/htmltest/jbonnell/www/firstburst.gif>)

Pendant très longtemps, la détection des sursauts gamma se faisait par le seul biais des courbes de lumière gamma reçues. Il n'était pas possible d'en mesurer la distance, et l'emplacement de l'origine du sursaut n'était également pas possible car l'évènement est bref et unique, et les capacités de préciser sa position dans le ciel étaient insuffisantes à l'époque. De même on ignorait l'existence de la rémanence. D'aucun pensait que pour libérer une telle quantité de lumière, le phénomène d'origine devait être issu de la galaxie. Ce n'est qu'en 1991, avec la mission BATSE, spécialement dédié à l'étude des sursauts gamma, que son origine cosmologique est confirmée. Le satellite BATSE permettait de localiser la direction du sursaut avec une précision de l'ordre du degré. Les capteurs bien plus sensibles du satellite permettaient la détection d'un sursaut par jour environs. En Figure 2, la distribution des

---

<sup>2</sup> A la suite du traité d'interdiction partielle des essais nucléaires du 5 août 1963. La France ne signe ce traité qu'en 1974.

sursauts détectés par la mission BATSE pendant 9 ans. Sa distribution sur tout l'hémisphère montre clairement son origine cosmologique.

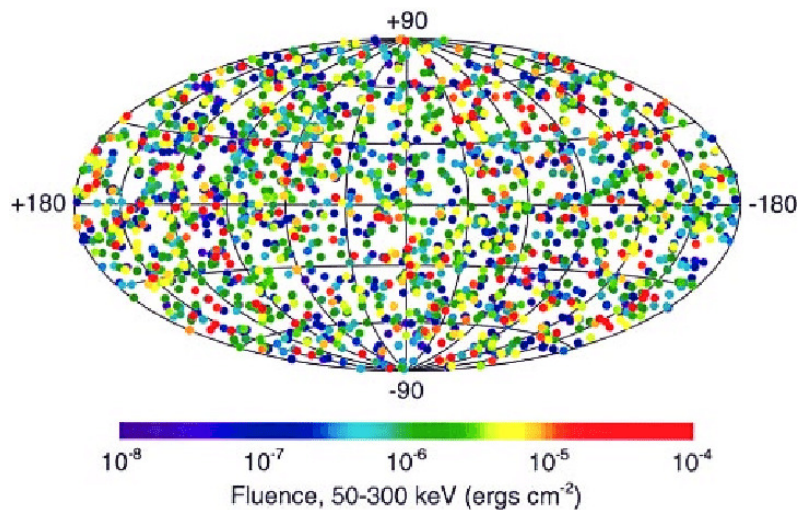


Figure 2 Carte de distribution des sursauts sur le ciel. L'échelle de couleur représente globalement l'intensité lumineuse du rayonnement reçu sur le capteur, ici dans la gamme d'énergie 50-300 keV<sup>3</sup> (<https://gammaray.nsstc.nasa.gov/batse/grb/skymap/>)

La présence d'un rayonnement dans le domaine X et radio était suspecté par les modèles permettant d'expliquer le phénomène de sursaut gamma. Mais les événements astronomiques transitoires dans le domaine X et radio sont très fréquents, et la localisation encore imprécise de BATSE ne permettait pas de relier directement ce type d'émission à un sursaut.

La mission BeppoSAX viendra apporter plusieurs améliorations grâce à un capteur gamma couvrant la quasi-totalité du ciel ; un réseau de détecteur X permettant de localiser la source à la minute d'arc près ; un système d'alerte, nommé GRB Monitor, permettant d'avertir les télescopes au sol de la localisation pour une mesure du spectre du visible au radio.

C'est ainsi que le 28 février 1997, la première rémanence associée à un sursaut gamma a pu être observée dans les domaines X et visible. Son observation a commencé 8 h après l'alerte de GRB Monitor. Comme l'émission est longue, elle a été nommée *afterglow* (rémanence en français) et fut distingué de l'émission gamma prompte – *prompt emission* en anglais.

Actuellement le satellite SWIFT est capable de mesurer la rémanence directement après l'émission prompte, et la précision en direction est encore améliorée. Plus aucunes informations ne sont perdues.

Enfin, la première mesure de distance par le biais du décalage spectral vers le rouge a pu être faite peu après grâce au spectre dans le domaine optique/visible de GRB 970508A. Le décalage vers le rouge des raies d'absorption du FeII, MgI et MgII a permis d'évaluer un *redshift*  $z$  entre 0,767 et 0,835. A la fin de la rémanence, le spectre de la galaxie présente au même endroit présentait un *redshift* de 0,835.

C'était là la confirmation irréfutable de l'origine cosmologique des sursauts gamma.

---

<sup>3</sup> eV : électron volt : Energie cinétique acquise par un électron accéléré depuis le repos par une différence de potentiel d'un volt.  $1 \text{ eV} \approx 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

### I.3. L'émission prompt (Prompt émission)

Lors de l'émission prompt d'un sursaut, on ne reçoit que de la lumière gamma. Les capteurs des satellites reçoivent donc des photons de très haute fréquence. Et ces photons sont dans un état d'énergie élevé, du keV ( $10^6$  eV) au TeV ( $10^{12}$  eV). Pour détecter des photons avec un tel niveau d'énergie, il faudrait que la source soit distante de plus de 1 gigaparsec, ce qui confirme l'origine cosmologique des sursauts gamma.

On décrit dans cette section les différentes grandeurs mesurées et les informations tirées des capteurs de lumière gamma.

#### I.3.1. Courbe de lumière

L'énergie typique des photons reçus lors d'un sursaut gamma peut atteindre plusieurs téra-électrons volts (TeV= $10^{12}$  eV). Les capteurs de photons gamma (dont nous ne détaillerons pas leur fonctionnement ici) mesure la quantité de photons reçu en fonction du temps sur toute la surface du capteur.

On en déduit ce qu'on appelle la courbe de lumière, exprimé en coups par seconde, en fonction du temps. Les sursauts n'ont pas des courbes de lumières typiques. En dehors de la présence de pics, chaque sursaut présente une courbe différente comme on peut le voir sur les exemples de la Figure 3 issues du satellite VELA.

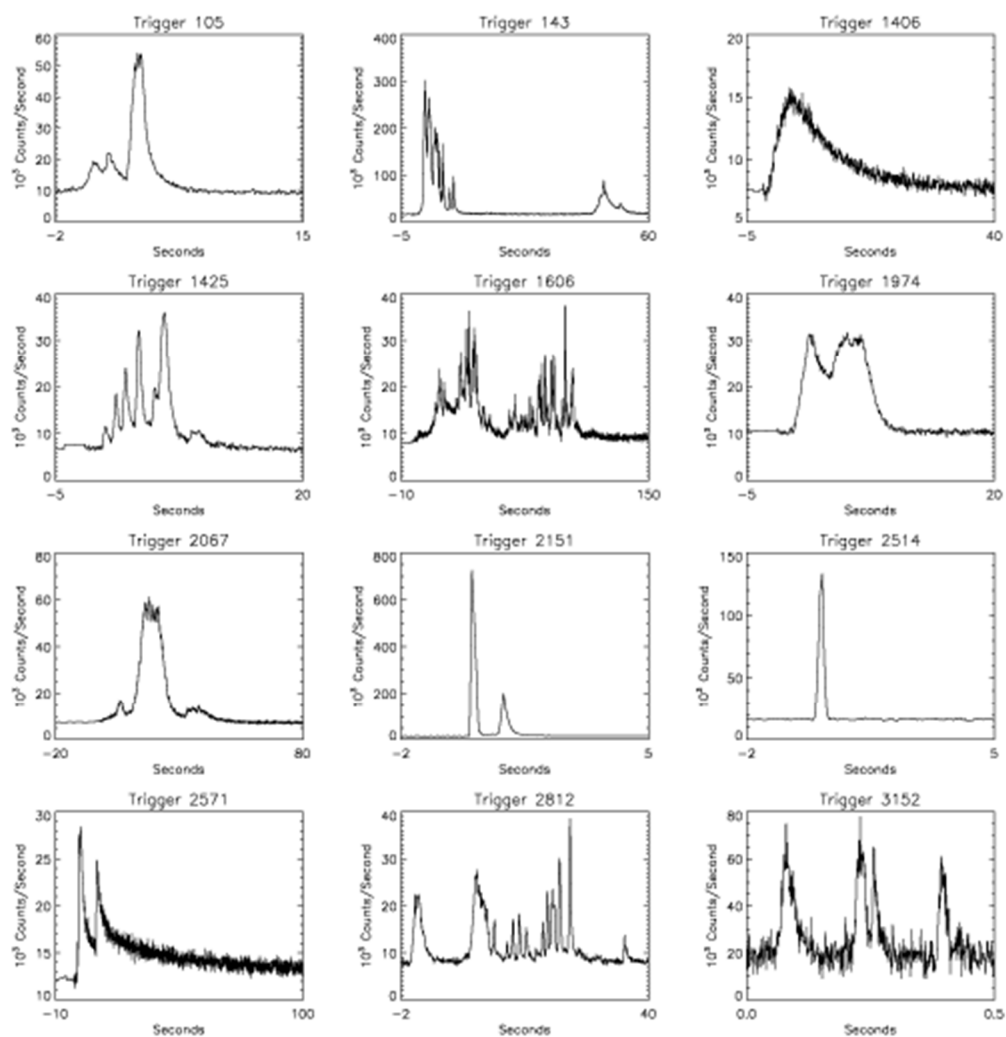


Figure 3 Différentes courbes de lumière  
([https://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/objects/grbs/grb\\_profiles.html](https://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/objects/grbs/grb_profiles.html))

A partir du nombre de photons reçus par seconde, et de leur niveau d'énergie, il est possible de déterminer la **fluence**. Il s'agit de l'énergie totale transportée par les photons gamma détectés, par unité de surface. Elle est généralement exprimée en  $\text{erg}/\text{cm}^2$  (l' $\text{erg}^4$  ou  $\text{ergon}$  est une unité d'énergie plus adaptée ici à la représentation que l'électron volt). On représente la fluence sur toute la gamme d'énergie des photons (par exemple de 0 à 1 TeV), ou suivant une gamme d'énergie spécifique (par exemple 10-1000 keV).

La fluence peut être comprise comme le flux intégré dans le temps du signal gamma et constitue la première étape pour déterminer l'énergétique de la source du sursaut. La fluence des GRB est comprise entre  $10^{-2}$  à  $10^{-7} \text{ erg}/\text{cm}^2$  (la limite inférieure étant due aux limitations des capteurs).

A partir de cela, on peut déterminer l'**évolution du flux de photon en fonction du temps**, et également le **spectre énergétique** (voir I.3.3).

### I.3.2. Durée

Rapidement, il a pu être constaté que se dégageait deux types de sursauts gamma :

- Une population de sursaut court, dont la durée médiane est de 0,3 secondes ;
- Et une population de sursaut long, dont la durée médiane est de 30 secondes.

On peut le caractériser via un graphique de distribution représentant le nombre de sursaut en fonction de  $T_{90}$ , qui représente la durée pendant laquelle le flux de photons dépasse de 5% à 95% le bruit de fond des photons (reçus en permanence par les capteurs). En Figure 4 la représentation de cette distribution pour les sursauts enregistrés par la mission BATSE. On y voit immédiatement les sursauts courts dont  $T_{90} \leq 2 \text{ s}$  et les longs dont  $T_{90} \geq 2 \text{ s}$ .

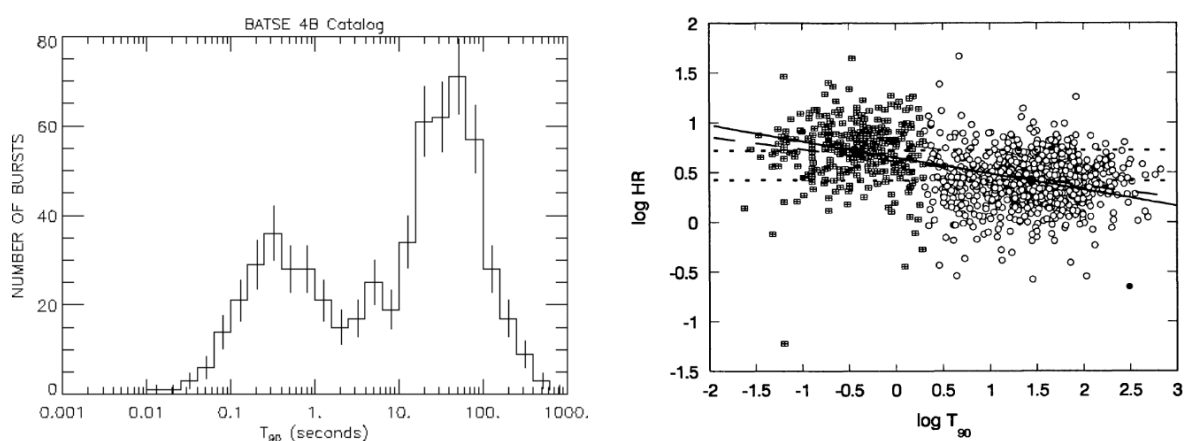


Figure 4 A gauche : la distribution en durée des sursauts observés par BATSE (source : <http://www.batse.msfc.nasa.gov/batse/grb/duration/>). A droite : diagramme durée  $T_{90}$  – dureté HR. Le rapport de dureté HR est le rapport des fluences dans les bandes (100-300 keV) sur (50-100 keV). Ce diagramme montre que les sursauts courts ont tendance à avoir un spectre plus énergétique (plus durs) que les longs.

### I.3.3. Spectre d'énergie

Les spectres représentent la distribution d'énergie du rayonnement. Ils sont nécessaires pour comprendre la physique du phénomène permettant d'expliquer le signal reçu. On donne en Figure 5 un exemple pour GRB 990123.

<sup>4</sup> 1 erg =  $10^{-7}$  Joules =  $6,2415 \cdot 10^{11}$  eV

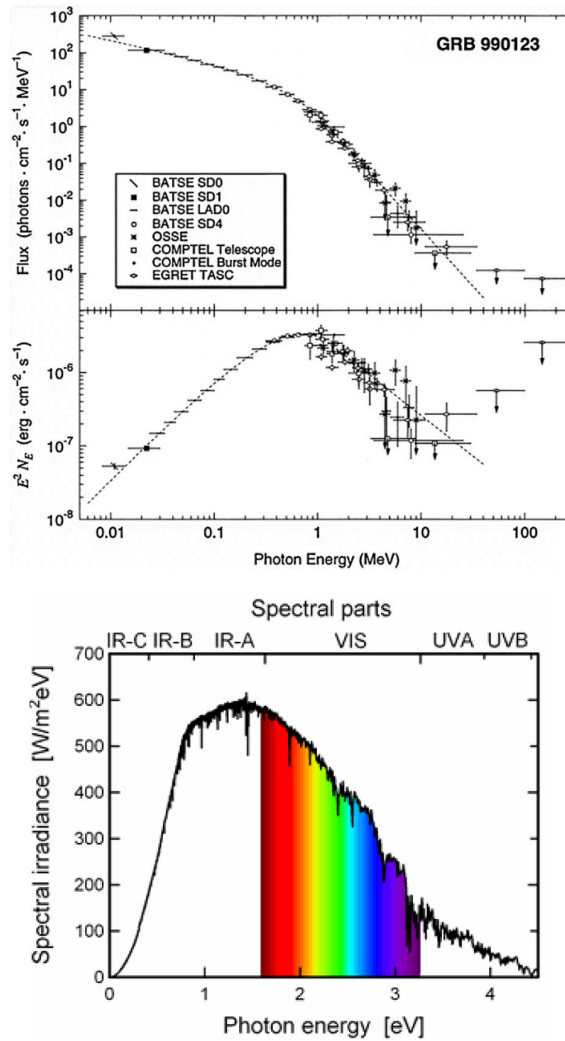


Figure 5 *En haut* : Le spectre des photons est exprimé en photons/cm<sup>2</sup>/s/MeV (c'est-à-dire le nombre moyen de photons par unité de surface de détecteur et par unité d'énergie). *Au milieu* : Le spectre  $E^2N_E$  exprimé en erg/cm<sup>2</sup>/s, où chaque photon est pondéré par son énergie au carré. Le spectre  $E^2N_E$  est également appelé spectre  $\nu F_\nu$ , en référence à la densité de flux spectral  $F_\nu$  exprimée en erg/cm<sup>2</sup>/s/Hz (Briggs et al 1999). *En bas*: Distribution énergétique des photons (spectre énergétique) du Soleil. Les allures sont très différentes

Contrairement aux courbes de lumière, les spectres d'énergie du rayonnement gamma des GRB sont plus homogènes. On retrouve beaucoup de similitudes dans le spectre de différents GRB.

Tout d'abord l'allure du spectre ne correspond pas à celle d'un rayonnement issu par l'échauffement d'un corps, comme par exemple le spectre d'un corps noir. En effet, le spectre continu d'un corps noir (comme une étoile par exemple) est issu de la transformation de l'énergie thermique en énergie électromagnétique sous forme de rayonnement.

Ici le spectre est caractéristique d'un **rayonnement issu de l'accélération de particules**. On dit qu'il s'agit d'un **rayonnement non thermique**.

En général l'allure du spectre semble suivre un modèle mathématique de type loi de puissance de type Band (Band et al 1993) :

$$B\left(\frac{E}{E_0}\right) = A \begin{cases} \left(\frac{E}{E_0}\right)^\alpha e^{-(2+\alpha)x}, x < x_b \\ \left(\frac{E}{E_0}\right)^\beta x_b^{\alpha-\beta} e^{-(2+\alpha)x_b}, x > x_b \end{cases} \quad (1)$$

Avec  $x_b = \frac{\alpha-\beta}{2+\alpha}$  ;

$E$  l'énergie du photon.

Ce modèle est uniquement empirique et ne reflète pas de processus physique particulier. Le spectre s'exprime par le biais d'indices spectraux,  $\alpha$  et  $\beta$ , représentant « la quantité » de photons émis à basse et haute énergie, par rapport à une énergie de référence, l'énergie de coupure noté  $E_0$  :

- Plus  $\alpha$  est élevé, plus la source émet des photons de basse énergie.
- Plus  $\beta$  est élevé, plus la source émet des photons de haute énergie.
- En général les valeurs tournent autour de :  $\alpha \sim -1$ ,  $\beta \sim -2.3$ ,  $E_0 \sim 200$  keV. Il est en effet plus difficile de produire des photons de haute énergie que des photons de basse énergie.

Les GRB sont rarement représentés uniquement par une loi de puissance de type Band. Des efforts particuliers sont fournis pour essayer de décrire avec précision ces spectres par des lois mathématiques reflétant des phénomènes physiques.

Enfin, à partir du spectre, et de la distance, on évalue également une grandeur théorique d'énergie totale libérée. Il ne s'agit pas de l'énergie réelle de la source, mais d'une analogie. On considère que la source rayonne dans toutes les directions de la même façon, comme une étoile par exemple. C'est l'énergie libérée de façon isotrope en lumière gamma,  $E_{iso}$ . Typiquement  $E_{iso}$  des sursauts est comprise entre  $10^{49}$  et  $10^{55}$  erg, soit jusque 10 000 fois plus qu'une supernova !

## I.4. L'émission rémanente (Afterglow)

À la suite de l'émission prompte, un rayonnement est détecté dans un large domaine spectral allant du X pendant quelques jours, à l'optique pendant quelques mois, jusqu'au radio pendant quelques années.

### I.4.1. Courbe de lumière

Les courbes de lumière des rémanences sont également très variées, mais il est plus fréquent d'observer des comportements similaires. On appelle cela une courbe de lumière canonique. La Figure 6 schématise les différentes phases typiques d'une courbe de lumière, par exemple dans le domaine des rayons X, d'une émission rémanente :

1. Suite à la fin de l'émission prompte gamma, se produit une décroissance rapide du flux de lumière X ;
2. Souvent on constate également un plateau ;
3. Après quelques heures, et pendant un jour, la rémanence entame sa phase de décroissance dite « normale ». Cette phase est assez longue. On dit « normale » car c'est seulement à partir de quelques heures que BeppoSAX était capable d'enregistrer la rémanence. On ne connaissait donc la courbe de lumière qu'à partir de cette phase jusqu'en 2000. Les missions Swift (2004) et HETE-2 (2000) qui ont permis de mesurer la rémanence plus tôt.
4. Enfin, dans certain cas, une atténuation plus forte est détectée après quelques jours.
5. Parfois on détecte des pics additionnels à divers moment, appelé « flares ».

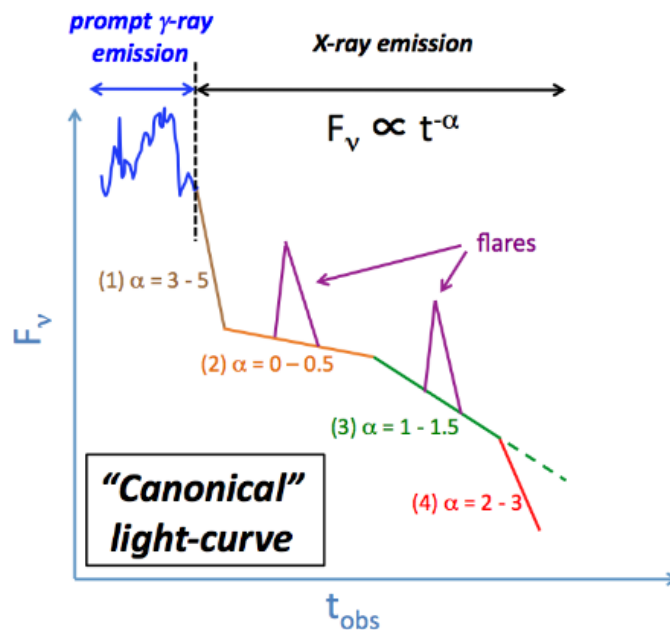


Figure 6 Courbe de lumière typique de rémanence pour le modèle physique « boule de feu » (Hascoët 2023; Zhang et al. 2006).  $\alpha$  représente les valeurs typique des pentes. On constate deux cassures de pente entre une décroissance « normale » (3) et une atténuation plus forte après quelques jours (4).

Les courbes de lumière dans le domaine visible ou radio ont également ce type de décroissance.

Une fois la courbe de lumière reçue, il faut également corriger les absorptions potentielles : en effet la lumière dans les domaines moins énergétiques est souvent absorbée par la poussière et la matière sur son chemin vers la Terre, et en particulier par la poussière de la Voie Lactée. Des corrections sont à apporter pour supprimer les absorptions et tenter de reconstituer les courbes de lumière émises à la source.

Un certain nombre de rémanence peuvent s'écarter du schéma canonique typique. De plus lorsque l'on dispose d'observation dans toutes les longueurs d'ondes (X, optique, radio) on constate que les évolutions temporelles peuvent être très différentes : les décroissances et les ruptures de pentes ne se font pas au même temps dans tout le spectre. On appelle cela un comportement chromatique.

La complexité et la diversité des cas est un véritable défi pour les chercheurs qui souhaitent contraindre les modèles théoriques, les phénomènes physiques, derrière ces observations. En effet, un modèle théorique de la rémanence doit permettre de reproduire le comportement canonique décrit ci-dessus, mais également les comportements plus inhabituels, et ce dans toutes les longueurs d'onde. On constate une grande diversité dans les sursauts gamma, due à des structures ou des environnements parfois très différents. Nous reviendrons sur les modèles théoriques en **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**

## I.4.2. Spectre d'énergie

Le spectre d'une rémanence est la représentation de la densité de flux reçu dans toutes les fréquences, c'est-à-dire du domaine X au radio. Ce type de courbe permet de caler des modèles théoriques représentant les phénomènes liés à la rémanence et au sursaut gamma (Amati et al. 2002). Ci-dessous un exemple de spectre multi-fréquentiel de rémanence expliqué par une émission synchrotron (cf I.7.3).

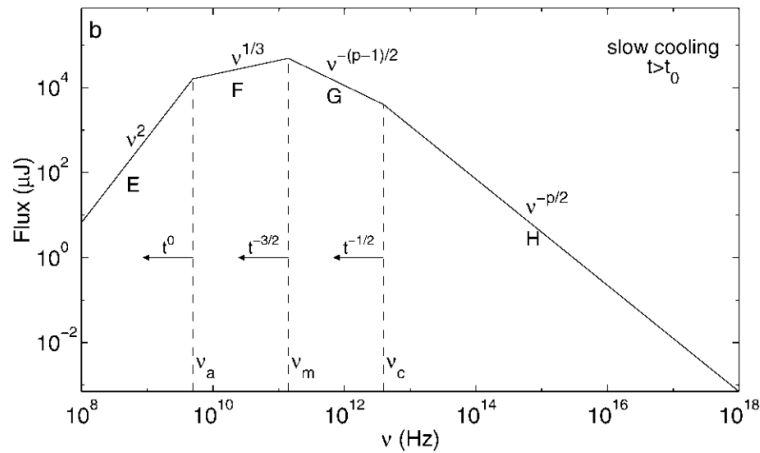


Figure 7 Exemple de spectre correspondant à une émission synchrotron (Sari, Piran, et Narayan 1998)

### I.4.3. Evaluation du redshift z

Grace à la découverte du phénomène de rémanence suite à la mission Beppo-SAX, et l'enregistrement des spectres X et optiques, il est désormais possible de mesurer distance d'un sursaut gamma.

La première distance d'un sursaut gamma a pu être mesurée grâce à GRB 970508. La luminosité de la rémanence dans l'optique était très forte pendant plusieurs jours et un spectre a pu en être fait. A partir du décalage vers le rouge des raies d'absorption du FeII, et MgII un *redshift* à  $z \approx 0.835$  a pu être déterminé. C'était d'ailleurs la preuve définitive de l'origine cosmique des sursauts gamma.

Aujourd'hui la mesure du *redshift* est réalisée dès que possible. Il faut effectivement qu'un spectre de la rémanence puisse être déterminé et soit assez lumineux pour détecter des raies d'absorption. Cela peut également être estimé par le biais du redshift de la galaxie où se trouve le sursaut gamma (si la direction est suffisamment précise). Pour ce dernier cas, le spectre de la galaxie est plutôt mesuré par le biais du Hubble Space Telescope, du James Webb Space Telescope, ou de télescopes terrestres.

Les sursauts gamma font partie des phénomènes astronomiques les plus distants mesurés. La gamme de *redshift* mesurés s'étend de  $z \approx 0.0085$  pour GRB 980405, à  $z \approx 8,2$  pour GRB 090423<sup>5</sup> (soit lorsque l'Univers avait 0,6 milliards d'années). La Figure 8 représente la distribution des *redshifts* de sursauts gamma mesurés par Fermi-LAT et Swift-GBM. En comparaison la plus lointaine galaxie connue se situerait à  $z \approx 10.3$ . Le quasar<sup>6</sup> le plus lointain est mesuré à  $z \approx 7.085$ .

On constate que les GRB courts ( $T_{90} < 2$  s) ont une médiane autour de  $z \approx 0,8$ . Les GRB long ( $T_{90} > 2$  s) ont une médiane autour de  $z \approx 2,2$ . On pourrait penser que les GRB court sont plus proches. Néanmoins il ne faut pas oublier le biais de sensibilité des capteurs. Les GRB courts sont en général moins lumineux, donc si un sursaut court à grand  $z$  se produit, il est possible qu'il ne soit pas détecté sur Terre.

<sup>5</sup> La distance de GRB 090429B à  $z \approx 9.4$  n'est pas confirmée.

<sup>6</sup> Quasar : Emission électromagnétique produite par friction des gaz et poussières s'effondrant dans le disque d'accrétion de gaz d'un trou noir supermassif. Un quasar possède également deux jets.

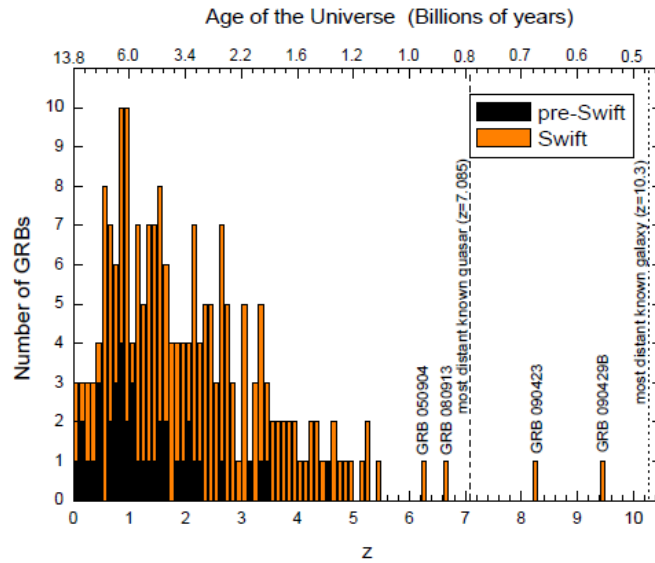


Figure 8 Distribution des *redshift* mesurés par BeppoSAX, HETE-2 et Swift-GBM (Gomboc 2012 d'après De Cia 2011)

### I.5. Discussion sur les galaxies hôtes

Les mesures de redshift de la rémanence (en raie d'absorption) concordent souvent avec le redshift mesuré (en raie d'émission) d'une galaxie qui se trouve dans la même direction. On peut donc relier la présence du sursaut gamma à la galaxie dans laquelle il se situe.

Les galaxies hôtes des GRB longs sont généralement des galaxies naines avec un taux de formation stellaire élevé (Christensen et al. 2004 ; Savaglio et al. 2009). De plus, si la résolution des images de la galaxie hôte, et la localisation du GRB sont suffisamment précises, on peut replacer la position du GRB dans la galaxie. On constate souvent que ces derniers se situent dans des régions à forte concentration d'étoiles jeune (Bloom et al. 2002 ; Fruchter et al. 2006).

Pour les sursauts courts, les paramètres caractéristiques des galaxies hôtes (tailles, type, taux de formation d'étoile...) sont plus variés et aucune tendance ne se dégage. Ils peuvent avoir lieu dans des galaxies jeunes ou vieilles, sans limite de métallicité. Certains GRB courts sont retrouvés dans des galaxies avec un taux de formation d'étoile élevé mais qui possède des étoiles vieilles. De plus la position du sursaut n'est pas nécessairement associée à une région spécifique de la galaxie. On pourrait penser que les GRB court serait distant du centre de leur galaxie, car comme l'évoquera dans la section suivante, les sursauts courts peuvent être engendré par la fusion d'objets compacts. Les objets compacts (trou noirs, étoiles à neutrons) sont des objets anciens qui peuvent se situer dans les régions les plus anciennes et les moins actives de la galaxie, c'est-à-dire sur les bords. Or, bien que ce soit souvent le cas, les sursauts courts ne se trouvent pas systématiquement dans ces régions (Fox et al. 2005 ; Troja et al. 2008)

### I.6. Modèles de progéniteur

La source des GRB ne peut pas être observée directement. Les théories se basent sur des observations indirectes des courbes de lumière et sur l'utilisation d'autres informations indirectes comme l'émission de neutrinos ou d'ondes gravitationnelles.

On pense que les sursauts gamma courts et longs ont une origine différente :

- Les sursauts longs seraient associés à l'effondrement gravitationnel d'étoiles massive – Progéniteur de type *Collapsar*;
- Les sursauts courts seraient associés à la coalescence d'objet compact comme deux étoiles à neutrons, ou une étoile à neutron et un trou noir – Progéniteur de type *Merger*.

## I.6.1. Progéniteur de type Collapsar

Les sursauts longs sont généralement associés à l'effondrement du cœur d'une étoile supermassive dont l'hydrogène de l'enveloppe a été consommé. Il s'agit d'une classe spécifique de supernovae de type Ib/Ic ([Pian et al. 2000](#); [Soderberg 2006](#); [Ripa 2011](#); [Hascoët 2023](#)). Le sursaut de lumière gamma intervient après la supernova. Comme les sursauts sont très lumineux, leurs lumières se confondent souvent avec celle de la supernova. Parfois, il y a un retard entre la détection du sursaut et la supernova, ce qui rend cette dernière invisible. Il est donc complexe de détecter le signal de la supernova dans la courbe de lumière de l'émission prompte.

Seulement quelques dizaines de GRB longs ont pu être associés à des supernovas avérées, comme par exemple SN 1998bw, une supernova proche et très lumineuse associée à GRB 980425 ([Pian et al. 2000](#)). Mais la découverte d'une supernova associée à un sursaut gamma n'est pas systématique. Toutes les supernovae de type Ib/Ic ne donnent pas lieu à un sursaut gamma.

Il a d'ailleurs pu être constaté que certains GRB longs seraient associés à la coalescence d'objets compacts. On peut d'ailleurs citer le cas de GRB 230307A, deuxième GRB long le plus lumineux ([A. Levan et al. 2023](#); [Cheong et al. 2024](#); [Du et al. 2024](#); [Wang et al. 2024](#); [Gillanders et Smartt 2025](#)) et GRB 211211A ([Rastinejad et al. 2022](#); [Yang et al. 2022](#); [O'Connor et al. 2023](#)), pouvant être associés à une kilonova<sup>7</sup>.

Également il est possible que dans certains cas un sursaut long puisse être associé à un magnétar, une étoile à neutrons nouvellement formée, en rotation rapide et hautement magnétisée ([Usov 1992](#)).

## I.6.2. Progéniteur de type Merger

Les sursauts courts ont pu être associés à la coalescence d'un système binaire de deux étoiles à neutrons ou d'une étoile à neutron et d'un trou noir. Le plus célèbre sursaut gamma court issu d'un *Merger* est GRB 170817A. Cela fut confirmée par mesure d'ondes gravitationnelles provenant de la kilonova (AT2017gfo) issue de la fusion de deux étoiles à neutrons ([LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration et al. 2017](#)).

Le fait que les sursauts courts ne sélectionnent pas un type de galaxie en particulier (contrairement aux sursauts longs) supporte l'hypothèse d'un progéniteur de type *Merger*. En effet, le délai entre la formation du système binaire et sa coalescence est au minimum de quelques centaines de millions d'années ([Kalogera et al. 2004](#)). Les sursauts courts sont donc issus d'objets anciens. Ces objets anciens généralement dérivent dans des zones lointaines du centre de la galaxie et peu active, car les supernovae donnant naissance à ces objets compacts pourraient communiquer une vitesse élevée ( $100-1000 \text{ km.s}^{-1}$ ) au système binaire. Le système dérive donc vers l'extérieur de sa galaxie. Ceci est en accord avec les constats faits pour certains sursauts courts ([Troja et al. 2008](#)). Néanmoins il a pu être constaté des sursauts gamma courts clairement associés à une supernova ! On peut citer le cas de GRB 200826A ([Ahumada et al. 2021](#); [Rossi et al. 2022](#)).

## I.7. Tensions entre Théories et Observations

### I.7.1. La problématique

Une source qui rayonne dans le domaine gamma est conditionnée par une quantité d'énergie et une taille. Pour émettre une quantité aussi importante, la densité de photon des GRB doit théoriquement

---

<sup>7</sup> Kilonova : Un rayonnement électromagnétique produit lors de la fusion d'étoiles à neutron, ou d'une étoile à neutron et d'un trou noir. Ce rayonnement est émis du fait de la désintégration d'ions lourds produits par processus r et éjectés de façon relativement isotrope pendant le processus de fusion.

être si élevée que cela la rendrait opaque au rayonnement gamma. Le spectre devrait alors être celui d'un corps noir, comme pour une étoile. Or le spectre des GRB est non thermique.

De plus, pour des états d'énergie supérieur à 511 keV (énergie de masse de l'électron), les photons gamma s'annihilent par réaction  $\gamma + \gamma \rightarrow e^- + e^+$  (2). On ne devrait donc pas recevoir autant de photon de très haute énergie (GeV au TeV).

Cette contradiction est appelée le problème de compacité.

Pour résoudre ce problème, il faut que les particules (électron, protons, ...) soient dans un état ultra-relativiste, c'est-à-dire que leur vitesse soit extrêmement proche de celle de la lumière. Le rayonnement gamma engendré par ces particules ultra-relativistes permet de diminuer l'interaction  $\gamma\gamma$  (2), car les photons deviennent quasi-parallèles entre eux. Il y a donc moins de chance de choc.

On caractérise les particules ultra-relativistes dans la théorie de la relativité par le **facteur de Lorentz**  $\Gamma$ , qui représente le rapport de la vitesse de la particule avec la célérité de la lumière.

$$\Gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (2)$$

Pour des particules dans un état relativiste, on peut constater un facteur de Lorentz  $\Gamma = 22,366$ , cela veut dire que la particule à une vitesse égale à 99,9% celle de la lumière. Les particules ultra-relativistes peuvent avoir un facteur de Lorentz  $\Gamma \geq 100$ ...

Une autre problématique est le bilan énergétique du sursaut gamma. On a dit que l'énergie sous forme de rayonnement gamma estimée en assimilant la source à un rayonnement isotrope  $E_{iso}$  était colossale (cf. I.3.3). Elle peut atteindre 10 000 fois celle d'une supernova. Aucun modèle connu ne permet de produire de telles énergies.

Pour atteindre une gamme d'énergie similaire, il faut que celle-ci soit collimatée sous forme de jet (Rees, 1966). Donc le disque d'accrétion du trou noir formé à la source du sursaut gamma, produit deux jets de matière dans des directions opposées, et dans un état ultra-relativiste. Le jet à un demi-angle d'ouverture  $\theta_{jet}$ . Cet angle est extrêmement difficile à estimer.

En considérant  $\theta_{jet} \approx 5^\circ$ , alors l'énergie réelle d'une source est donnée par :

$$E_{réelle} = \frac{2\Omega}{4\pi} \cdot E_{iso} \approx \frac{2\pi\theta_{jet}^2}{4\pi} \cdot E_{iso} \approx 4 \cdot 10^{-3} E_{iso} \quad (3)$$

Ainsi l'énergie réelle des sursauts serait plutôt comprise entre  $10^{34}$  et  $10^{46}$  J selon l'angle d'ouverture  $\theta_{jet}$ . Ce bilan énergétique correspond plus à ce qu'engendrera un *collapsar* ou un *merger* (ou un magnétar).

Cela permet également d'expliquer que la rémanence intervient après l'émission prompte. En effet, le jet de particule dans un état ultra-relativiste émet de la lumière gamma selon différents procédés (cf. I.7.3). Au fur et à mesure que les particules s'éloignent de la source, et comme elle perdent de l'énergie sous forme de lumière, elles ralentissent, et l'angle d'ouverture du jet augmente (car  $\Gamma \propto \frac{1}{\theta_{jet}}$ ).

La densité et la vitesse des particules les isolaient jusqu'à présent du milieu interstellaire, mais comme leur vitesse devient plus faible, ces particules commencent à interagir avec la matière, les photons, et les autres particules présentes dans le milieu interstellaire autour de la source. Ces interactions sont la source de la rémanence. La lumière émise l'est principalement dans le domaine X, mais également dans l'optique et dans le radio.

Ce modèle théorique du sursaut gamma est appelé **modèle boule-de-feu** (*fireball model*).

## I.7.2. Le modèle standard (boule-de-feu)

Le modèle standard, ou modèle boule-de-feu, est une théorie permettant de décrire les mécanismes d'émission des sursauts gamma, et ce quel qu'en soit le type de progéniteur (*collapsar* ou *merger*).

A l'intérieur des deux jets émis par la source se produisent des chocs internes, mais également des chocs externes avec le milieu interstellaire environnant. Ces théories ont été introduites par Rees & Mészáros en 1992 et 1994. Les Figure 9 et Figure 10 représentent une vue schématique du comportement du jet en fonction de la distance avec sa source (trou noir ou objet compact).

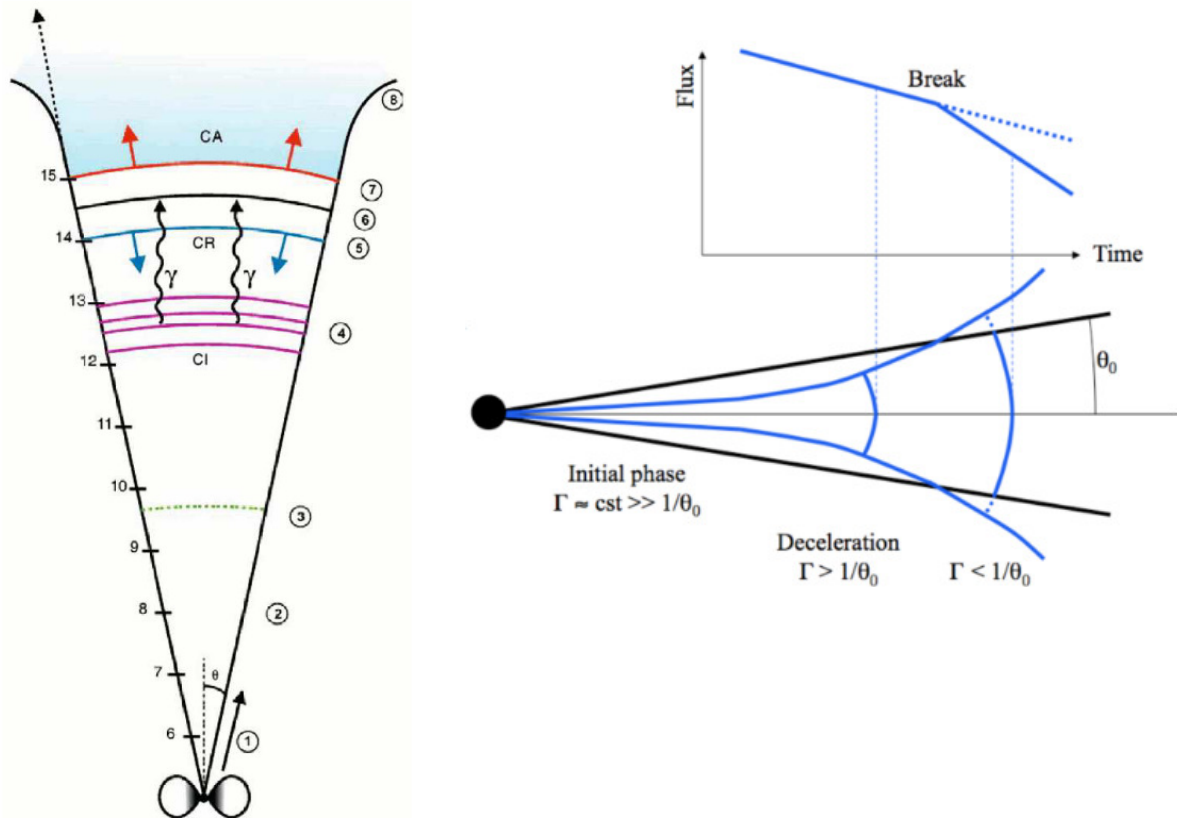


Figure 9 *A gauche* – Schéma du modèle de boule de feu (Atteia & Mochkovitch 2004). *A droite* – Evolution de la courbe de lumière en fonction du temps du fait de l'ouverture du jet (Duque 2021)

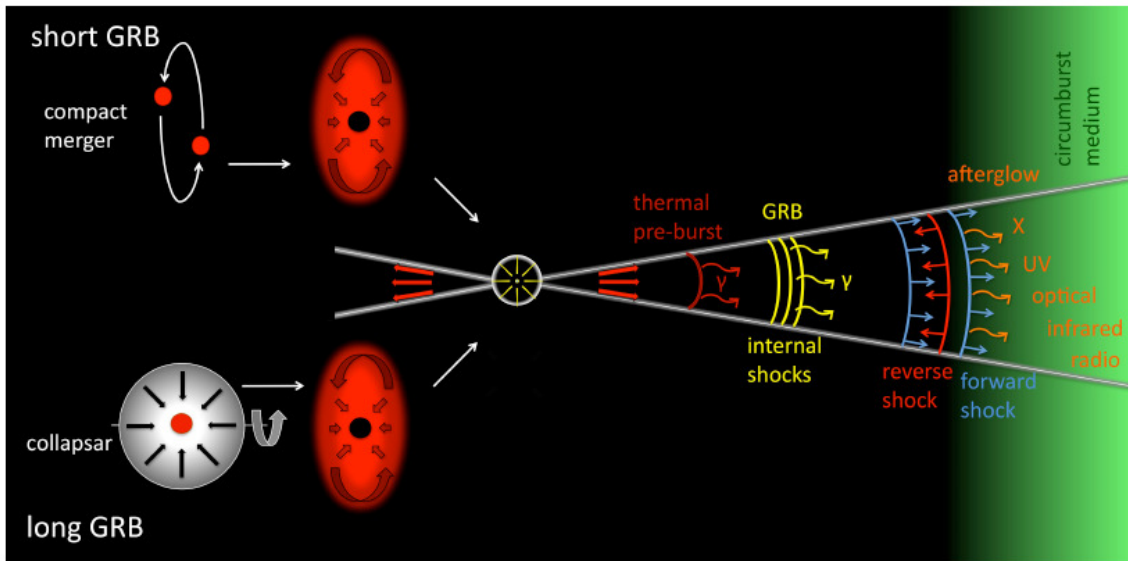


Figure 10 Le modèle boule-de-feu, quel que soit le progéniteur, est basé sur la formation d'un trou noir. A partir du disque d'accrétion, la matière est expulsée sous forme de deux jets. (Gomboc 2012)

On résume les différentes étapes du modèle à partir de la Figure 9 :

1. Formation de l'objet compact suite à l'effondrement d'une étoile supermassive ou la coalescence de deux objets compacts. C'est le moteur central.
2. Les deux jets de matières produit sont accélérés à des facteurs de Lorentz supérieur à 100. A cette étape, il n'y a pas encore de lumière émise. On dit que le jet est opaque.
3. L'éjecta devient transparent. Une émission  $\gamma$  quasi-thermique peut être émise lors du percement de la photosphère.
4. Dissipation interne d'énergie par choc interne entre différentes « vagues de particules » qui ont des vitesses différentes et qui se rencontrent. Les particules émettent alors un rayonnement gamma très énergétique. C'est **l'émission prompte**.
5. Un choc retour (CR - *reverse shock*) se propage à l'intérieur du jet relativiste lorsque le freinage du jet par le milieu extérieur devient suffisant. Ce dernier s'oppose au « vagues » qui vont vers l'avant. Cela peut causer d'autres chocs internes, donc du rayonnement.
6. Il y a formation d'une discontinuité entre le jet et le milieu extérieur.
7. Un choc avant (CA - *forward shock*) balaye le milieu extérieur. L'énergie dissipé sous forme de rayonnement dans toutes les longueurs d'onde correspond au début de **la rémanence**.
8. Lorsque la vitesse des particules a suffisamment diminué (càd le facteur de Lorentz a diminué), l'angle d'ouverture du jet augmente fortement. L'émission rémanente se poursuit dans toutes les directions. On peut observer une rupture de pente sur la courbe de lumière quand  $\Gamma \approx \frac{1}{\theta_{jet}}$ . (Figure 9 à gauche)

En résumé, les sursauts gamma sont des jets de particules émises à des vitesses proches de celle de la lumière, et produisant de la lumière dans le domaine gamma. **Comme le jet est collimaté dans une direction, on ne voit que les sursauts gamma qui par chance sont dirigés vers la Terre !** Une fois les particules suffisamment ralenties, l'angle du jet augmente. C'est le début de la rémanence, et donc les directions d'émission augmente. En théorie, il est possible d'observer une rémanence sans avoir observé l'émission prompte. C'est ce qu'on appelle une rémanence orpheline.

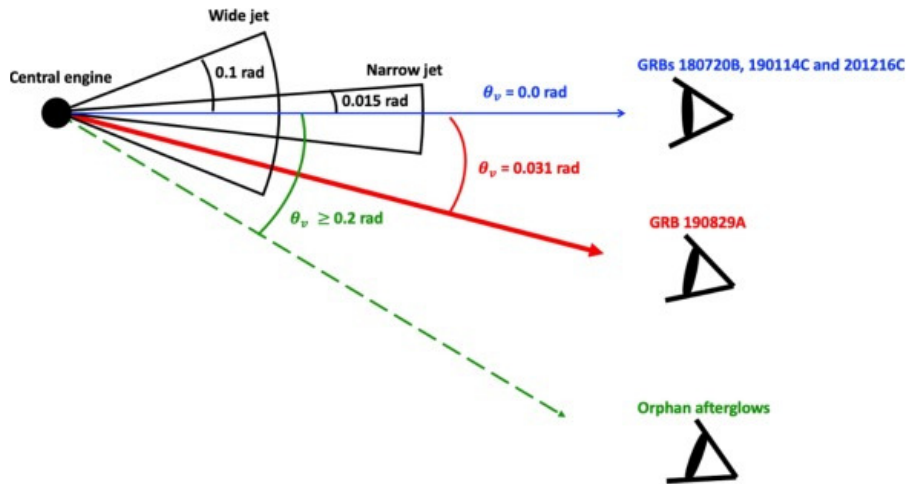


Figure 11 Visibilité d'un sursaut gamma en fonction de l'ouverture du jet. Un angle de 0,1 rad correspond à  $\approx 6^\circ$  de demi-ouverture. Un angle de 0,015 rad correspond à  $\approx 0,8^\circ$  de demi-ouverture. Certains exemples de sursaut gamma correspondant avec ces angles théoriques sont données. (Sato et al. 2023)

Toutefois, dans le cas de jet très énergétique, le modèle standard permet difficilement d'expliquer les spectres observés. Notamment leur décroissance plus faible avec le temps, ou le fait que la cassure de pente n'intervient pas simultanément dans toutes les longueurs d'onde (cf I.4.2 Figure 6). Le modèle standard suppose que le champ magnétique autour du jet soit constant.

Certains chercheurs invoquent alors des champs magnétiques variables notamment à cause de vents émis par la source, et étudient le magnéto-hydrodynamisme (Pe'er 2024).

### I.7.3. Mécanismes d'émission

Pour comprendre certains éléments de la suite du document, nous introduisons ici une liste non exhaustive de processus d'émission de lumière qui entrent en jeu dans les différentes phases du modèle boule-de-feu. Ces principes sont ceux que les chercheurs tentent de reproduire, grâce aux spectres observés, via des lois de puissances mathématiques pouvant représenter ces phénomènes.

En Figure 12, on retrouve différents mécanismes émetteurs, causés par des électrons et des protons, en fonction de la gamme d'énergie du rayonnement émis (donc par extension de la longueur d'onde de la lumière émise), et du flux de photons émis (en  $\text{erg.s}^{-1}.\text{cm}^{-2}$ )

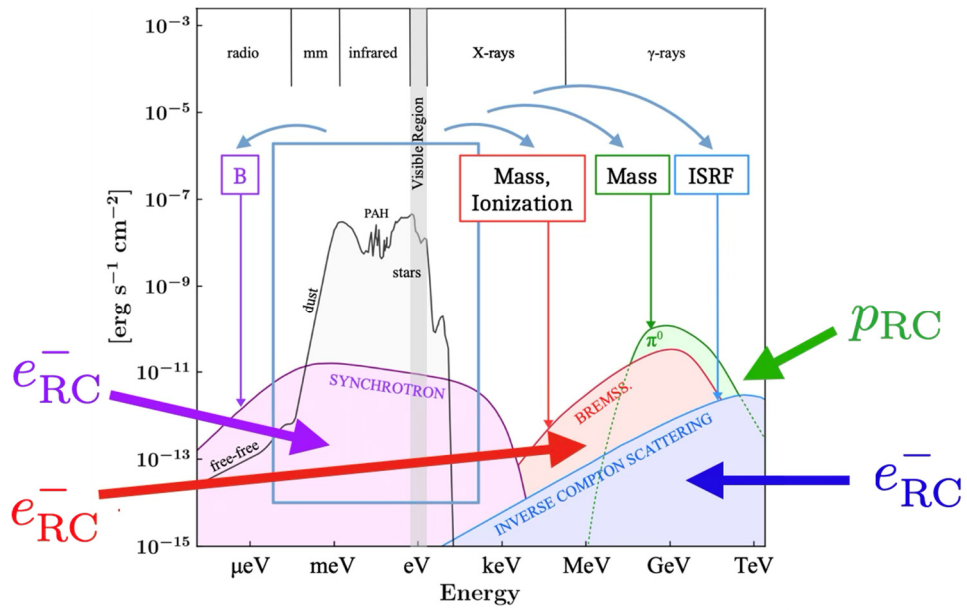


Figure 12 Emissions multi-fréquentielles produites par les rayons cosmiques interagissant avec le milieu stellaire (Dell'Ova 2022, thèse)

Pendant l'émission prompt d'un sursaut gamma (Figure 13), on retrouve principalement des émissions par diffusion Compton Inverse (et potentiellement un peu de  $\pi^0$ ). Durant la rémanence, c'est l'émission Synchrotron qui domine. L'émission Bremsstrahlung est minoritaire au sein des GRB.

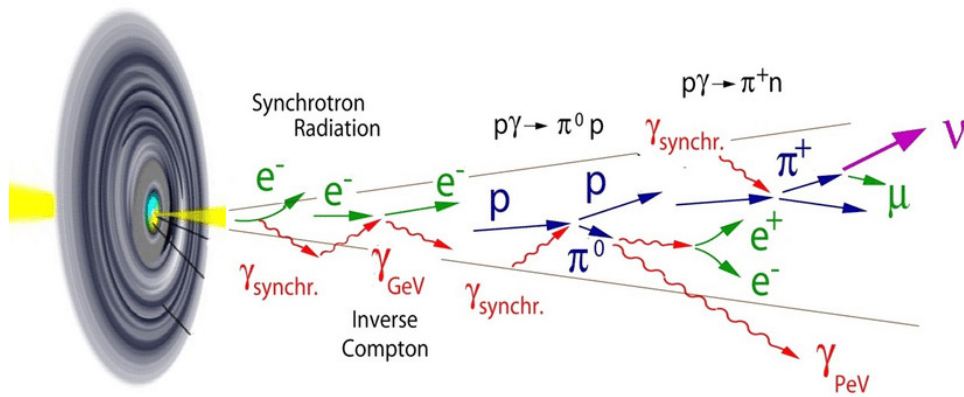


Figure 13 Schéma de production de rayonnements gamma, de neutrino, et de photons de moindre énergie dans un jet par différents phénomènes (Spurio 2014). ( $\nu$  : neutrino ;  $\mu$  : muon)

### Diffusion Compton inverse

Déviations de trajectoire issues de la collision d'un photon de faible énergie avec un électron de haute énergie (potentiellement dans un état ultra-relativiste). Le photon arrache de l'énergie à l'électron et produit un photon de plus haute énergie (fréquence dans le domaine gamma).

## Emission Synchrotron

Emission de photon dans le domaine Radio, Infra-rouge et Visible lors de l'accélération d'électron par l'action d'un champ magnétique

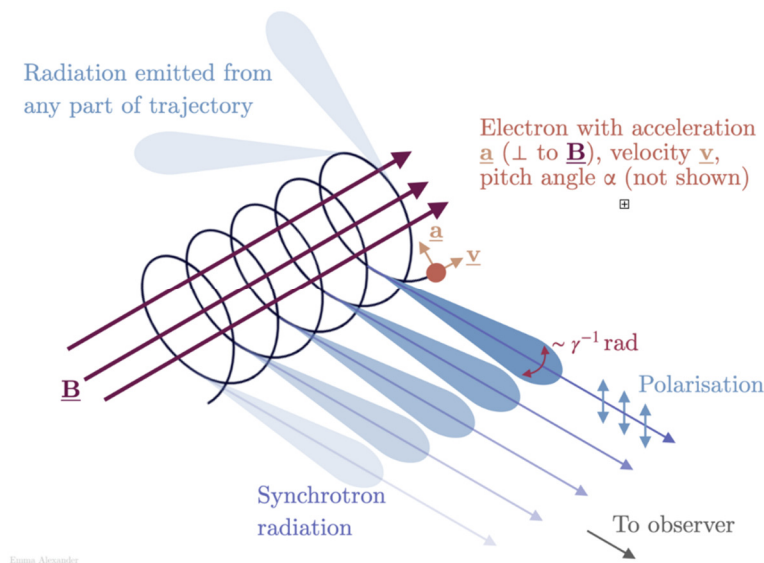


Figure 14 Schématisation de l'émission Synchrotron (source : Wikipédia)

## Emission synchrotron self-Compton

Emission Compton inverse à partir de photon issu de l'émission Synchrotron. Globalement, c'est le même phénomène qui s'auto-alimente.

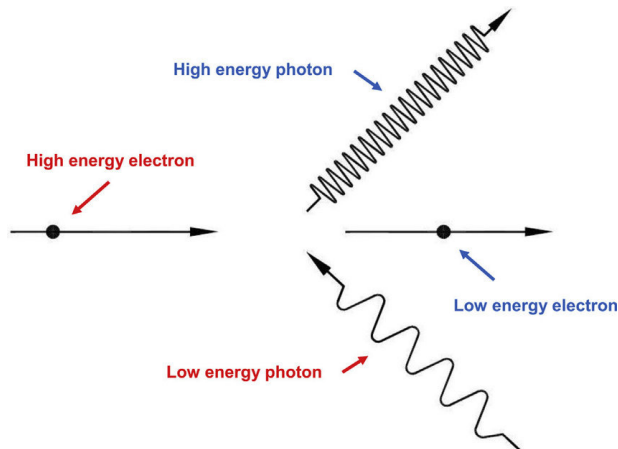


Figure 15 Schématisation de l'émission Compton Inverse (source : Wikipédia)

Ainsi à partir des courbes de lumières reçues pendant l'émission prompte et la rémanence, et des spectres énergétiques, les spécialistes des sursauts gamma tentent d'identifier les mécanismes responsables de ces émissions. Les courbes d'émission de ces mécanismes (comme sur la Figure 12) peuvent être reproduit par des lois de puissances mathématiques. Nous avons commencé à aborder ces lois mathématiques en I.3.3. Elles sont caractérisées par des puissances, dont la valeur peut être rattaché à une émission de photons de haute énergie ou de basse énergie. Nous ne rentrerons pas dans les détails, mais on peut citer les plus courantes comme la loi de puissance « brisée » (5) ou la loi de puissance « avec cut-off exponentiel » (6) permettant d'exprimer l'évolution de l'énergie  $E$  d'un photon.

$$(5) \propto \begin{cases} \left(\frac{E}{E_b}\right)^{\gamma_1} & \text{si } E < E_b \\ \left(\frac{E}{E_b}\right)^{\gamma_2} & \text{si } E > E_b \end{cases} \text{ avec } E_b \text{ l'énergie de rupture de pente}$$

$$(6) \propto \left(\frac{E}{E_b}\right)^{-\gamma} e^{-(\lambda E)^\alpha}$$

## I.8. Ce que nous apporte l'étude des GRB

### I.8.1. Sonde cosmologique

D'après (Gomboc 2012)

L'extrême luminosité des GRB permet leur détection à plus de 13 milliards d'années-lumière, donc à des périodes de l'Univers jeune. Ils sont des outils précieux pour sonder l'univers lointain. Ils permettent d'étudier l'évolution de l'Univers : des sursauts relativement proches dans l'Univers actuel, aux explosions de jeunes étoiles extrêmement massives dans les premières galaxies de l'Univers primordial.

La découverte de GRB à  $z > 8$  (soit 12,5 milliards d'années-lumière) établit que des étoiles massives naissaient, évoluaient et mouraient sous forme de GRB moins de 650 millions d'années après le Big Bang. Les GRB sont donc d'une grande importance pour une meilleure compréhension des premières époques cosmiques, des toutes premières générations d'étoiles massives et des galaxies dans leurs premiers stades de formation.

La lumière des GRB illumine les galaxies lointaines, et révèle les propriétés de leur environnement et de la matière dans leur champ de vision. Ceci en fait des outils cosmologiques uniques pour l'étude des propriétés des galaxies à fort décalage vers le rouge et permet l'étude de l'enrichissement chimique de l'Univers.

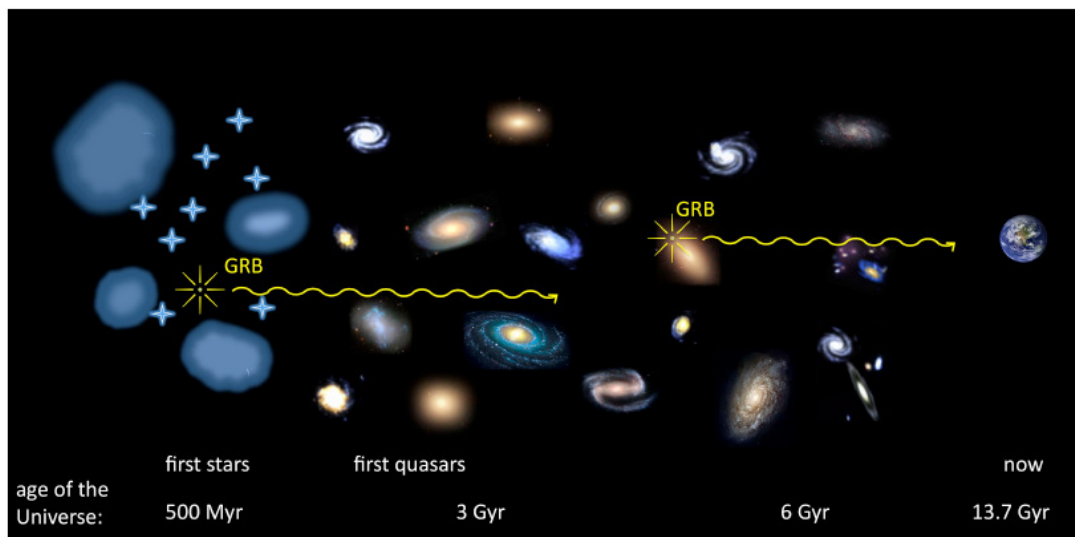


Figure 16 La lumière d'un sursaut gamma et de sa rémanence traverse l'Univers pour atteindre la Terre. Se faisant elle interagit avec le milieu interstellaire, sa galaxie hôte, et d'autres facteurs absorbants. Toute ces interactions peuvent être « imprimée » dans le spectre et fournir des informations. Par exemple, les régions de nuage de gaz de l'Univers primordial, en s'effondrant sont supposés former des étoiles massives de la population III (les premières étoiles). Ces premières étoiles pourraient donc créer des GRB. Les sursauts gamma seraient alors plus anciens que les premières galaxies actives (quasar) alimentées par des trous noirs supermassifs. (Gomboc 2012)

## I.8.2. Comportement des particules relativistes et ultra-relativistes

Comme on a pu le voir, les jets relativistes sont constitués de particules dans un état relativiste à ultra-relativiste, donc à des vitesses proches de celle de la lumière et dans des niveaux d'énergies élevés. Ces états étant non-reproductible sur Terre, en particulier pour des photons, il est intéressant d'observer les émissions des sursauts gamma pour comprendre le comportement des particules dans un état relativiste.

Néanmoins les sursauts gamma sont des événements courts, seule la lumière nous parvient rapidement. Les particules accélérées étant plus lente et susceptibles d'interagir, elles mettront des années, voire des millions d'années pour parvenir jusqu'à la Terre. Donc l'étude du comportement des particules en état relativiste se fait de façon indirecte, via la lumière qu'elles émettent.

En particulier, les rayons cosmiques (particules) accélérés issus de sursauts gamma peuvent interagir avec les photons du fond cosmologique ou avec d'autres baryons par des processus hadroniques. De cette interaction résulterait selon la théorie, l'émission de neutrinos de haute énergie. Dès 1997, il a été suggéré que ces neutrinos pourraient atteindre des énergies de l'ordre du PeV (Péta électronvolt,  $10^{15}\text{eV}$ ) (Waxman et Bahcall 1997). Il serait donc possible de détecter des neutrinos issus des sursauts gamma. Les observatoires de neutrinos IceCube et ANTARES n'ont pourtant pas pu associer à ce jour de neutrinos à un sursaut gamma.

## I.8.3. Apport aux théories physiques

Grace au satellite Fermi-LAT, on a pu constater que pour certains sursauts, il y a un décalage entre l'arrivée de photons dans un état d'énergie GeV (Giga électronvolt) et MeV (Méga électronvolt). Ce constat n'était pas prévu par les modèles théoriques. La présence d'un tel décalage a été utilisé pour imposer des contraintes fortes sur la Violation de l'Invariance de Lorentz (LIV en anglais).

L'invariance de Lorentz est un principe de symétrie et d'invariance de certaines quantités physiques (comme la charge électrique, la vitesse de la lumière, l'action...) par transformation de Lorentz. C'est un des principes fondamentaux de la théorie de la relativité, qui stipule que certaines quantités physiques ne changent pas lors d'un changement de référentiels (inertiels).

Or dans certaines théories destinées à unifier la physique quantique et la théorie de la relativité, comme par exemple la gravitation quantique, il est prédit que cette invariance peut ne pas être respectée.

Par exemple, à des niveaux d'énergie supérieur ou égal à l'énergie de Planck  $\sim 1,22 \cdot 10^{19}$  GeV, il pourrait y avoir dispersion de la lumière dans le vide (c'est-à-dire une dépendance de vitesse de la lumière avec l'énergie du photon). Les sursaut gamma produisant des photons très énergétiques sont donc adaptés à la réalisation de tests de violation de l'invariance de Lorentz. A ce jour une dépendance de la vitesse de la lumière à l'énergie n'a pas pu être démontré (Vigliano et Longo 2024).

De plus, la théorie de la relativité prévoit la production d'onde gravitationnelle par des objets ayant une forte inertie. Ce serait le cas pour des événements exceptionnels comme la coalescence d'objets compacts. L'étude des GRB courts permet d'affiner les modèles de formation et de propagation des ondes gravitationnelles.

La détection conjointe de GRB-GW170817<sup>8</sup> a eu une importance capitale pour la physique fondamentale, car elle a permis de borner le rapport entre la vitesse des ondes gravitationnelle et celle de la lumière :

$$-3 \cdot 10^{-15} \leq \frac{\Delta v}{v_{EM}} \leq 7 \cdot 10^{-16}$$

---

<sup>8</sup> GW : Gravitationnal Waves

Cela a permis de fixer de nouvelles limites aux violations de l'invariance de Lorentz et de tester à nouveau le principe d'équivalence<sup>9</sup> en contraignant le délai de Shapiro<sup>10</sup> avec le même ordre de grandeur pour les rayonnements gravitationnel et électromagnétique ([LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration et al. 2017](#)). Ces résultats sans précédents ont eu d'importantes répercussions sur certains modèles de matière noire et d'énergie noire, excluant certaines théories de la gravitation quantique viables jusqu'alors. À ce jour, aucune autre détection conjointe d'onde gravitationnelle et de GRB n'a pu être réalisée.

---

<sup>9</sup> Le principe d'équivalence de la théorie de la relativité impliquerait que les ondes gravitationnelles se déplacent à la même vitesse que la lumière, et sont modifiées de la même façon par un champ gravitationnel que les ondes électromagnétiques. La gravitation quantique impliquerait une variation de l'électromagnétisme suivant le champ de gravitation. Donc une non-isotropie de la vitesse de la lumière liée à l'action du champ de gravitation.

<sup>10</sup> Le retard Shapiro est le retard que prend l'onde lumineuse sous l'effet de déviation du trajet par un champ de gravitation, à vitesse de la lumière constante. Ce retard est confirmé en 2003 par l'expérience de communications de la NASA entre la Terre et la mission Cassini-Huygens en orbite de Jupiter. Le signal était dévié par le champ gravitationnel du Soleil. Par principe d'équivalence, les ondes gravitationnelles sont déviées de la même façon que les ondes lumineuses selon la théorie de la relativité générale.

# Chapitre II. Comment s'inscrit la découverte de GRB 221009A dans ce contexte ?

## II.1. Détail sur sa détection

Le 9 octobre 2022 à approximativement 13 :16 :59.99 UTC (que l'on appellera  $T_0$ ), le sursaut gamma dénommé GRB 221009A a été détecté par de nombreuses missions spatiales du domaine gamma au radio comme : Fermi (GBM and LAT; Veres et al. 2022; Lesage et al. 2022; Bissaldi et al. 2022; Pillera et al. 2022), Konus- Wind (Svinkin et al. 2022; Frederiks et al. 2022), INTEGRAL (SPI-ACS; Gotz et al. 2022), GRBAlpha (Ripa et al. 2022), SIRI-2 (Mitchell et al. 2022), GECAM- C (Liu et al. 2022), BepiColombo destiné à l'observation de Mercure (MGNS; Kozyrev et al. 2022), AGILE (MCAL and GRID; Ursi et al. 2022; Piano et al. 2022), Insight-HXMT (Tan et al. 2022), Solar Orbiter destiné à l'observation du Soleil (STIX; Xiao et al. 2022), Spektr-RG (ART-XC; Lapshov et al. 2022), IXPE (Negro et a. 2022a,b), etc... Il se situe dans la constellation du Sagittaire à une ascension droite  $19^h 13^m 03.48^s$ , et une déclinaison de  $+19^\circ 46' 24.6''$ . Cela implique qu'il est proche du plan Galactique.

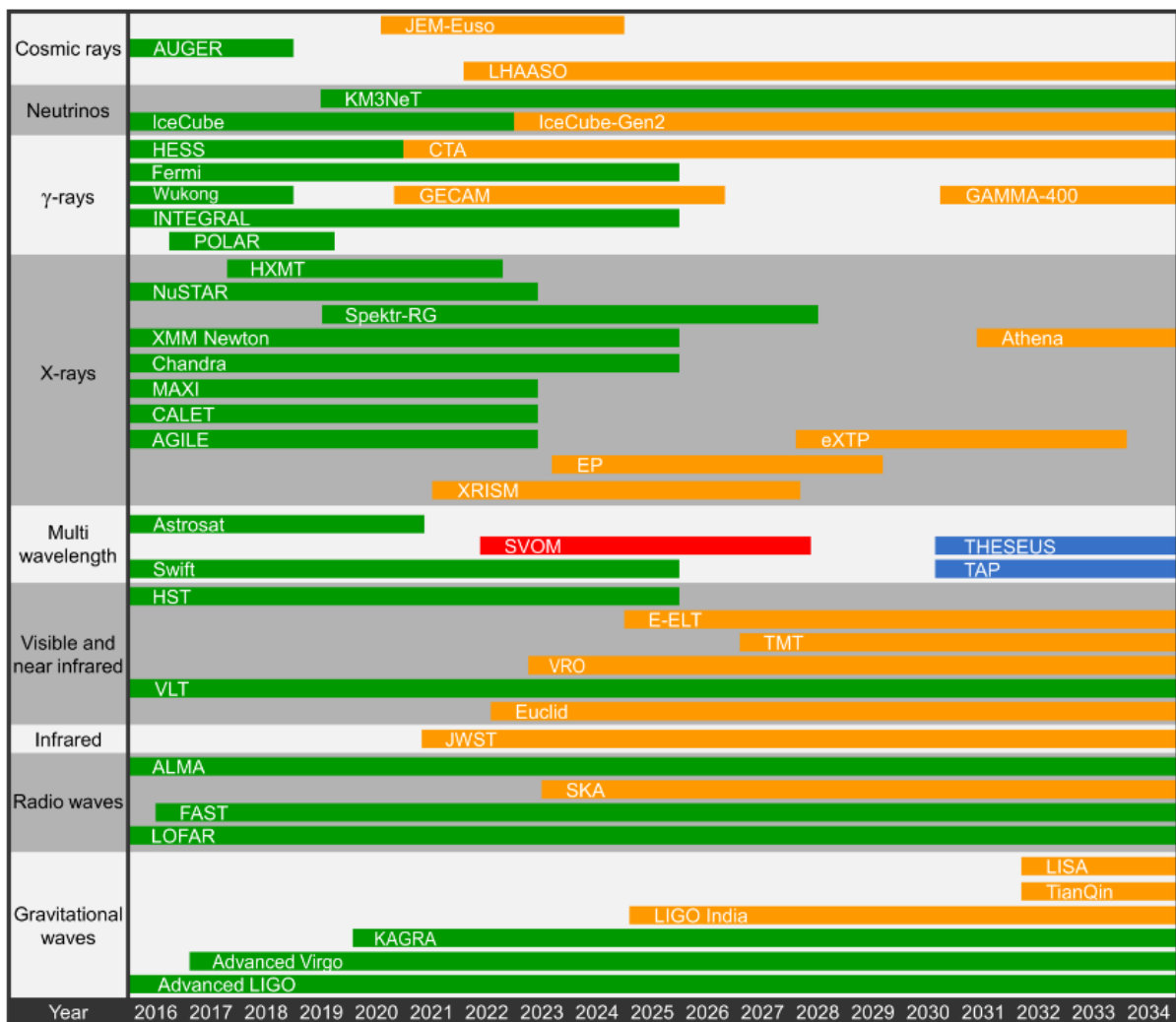


Figure 17 Panorama non exhaustif des missions d'observations (au sol ou dans l'espace) capables de détecter des événements comme des sursauts gamma en fonction du domaine observé (Dagoneau 2020)

Les premières analyses du sursaut montre tout de suite que son émission prompt est la plus intense jamais mesurée. Elle sature d'ailleurs la capacité de la plupart des capteurs et a perturbé la ionosphère proche (60-100 km d'altitude) ([Hayes et Gallagher 2022](#)).

Environ 53 minutes plus tard, la rémanence, également très lumineuse, a été détecté par l'observatoire the Neil Gehrels Swift Burst Alert Telescope, BAT; X-Ray Telescope, XRT; and Ultraviolet/Optical Telescope, UVOT ([Dichiara et al. 2022](#); [Krimm et al. 2022](#)). Les instruments du télescope Swift ont d'ailleurs poursuivi leurs observations dans le domaine radio durant les 4 mois précédant  $T_0$  ([Williams et al. 2023](#); [Laskar et al. 2023](#); [Rhodes et al. 2024](#)).

C'est également la première fois que l'on détecte et on étudie le spectre de la rémanence d'un sursaut gamma dans l'optique et l'infrarouge par les télescopes Hubble ([Levan et al. 2022a](#)) et James Webb Space Telescope pendant un an ([Fulton et al. 2023](#); [A. J. Levan et al. 2023](#); [Sears et al. 2025](#)).

Sur Terre, de nombreux télescopes ont également détectés l'évènement suite à l'alerte de Fermi et Swift. L'observation se fait alors dans des gammes de longueur d'onde du rayon X au Radio et ce pendant plusieurs mois, comme par exemple le Very Large Telescope ([de Ugarte Postigo et al. 2022b](#); [Castro-Tirado et al. 2022](#); [Izzo et al. 2022](#); [Malesani et al. 2023](#)), le réseau VLBI européen ([Giarratana et al. 2024](#)), la collaboration GRANDMA ([Kann et al. 2023](#)), divers radio-télescope ([Rhodes et al. 2024](#)), etc.

Deux jours plus tard, dans la nuit du 11 octobre 2022, le réseau de télescope gamma à lumière Cherenkov H.E.S.S. (High Energy Stereoscopic System), situé en Namibie, a également observé le phénomène. Néanmoins les conditions atmosphériques n'étaient pas optimales ([H.E.S.S. Collab. 2023](#)).



Figure 18 Photographie du Télescope H.E.S.S.

Une recherche d'émission de neutrino dans la direction de ce sursaut gamma a également fait l'objet d'étude par les détecteurs IceCube et KM3NeT ([The IceCube Collaboration 2022](#); [KM3NeT Collaboration 2022](#)).

Enfin on notera que l'émission de photon gamma de très haute énergie a été détecté 20 000 secondes avant la détection du télescope Fermi-GBM, par le détecteur Cherenkov LHAASO (Large High Altitude Air Shower Observatory) situé en Chine, dans la province du Sichuan ([LHAASO 2023](#)). Des milliers de rayon gamma de niveau d'énergie supérieur à 0,5 TeV ont été détecté sur la période d'observation  $T_0-20\ 000\text{ s}$  à  $T_0+6\ 000\text{ s}$ .

## II.2. The B.O.A.T. (The Brightest Of All Time)

### II.2.1. Emission prompt

L'émission prompt de lumière gamma détectée par les télescopes Fermi Gamma-ray Space Telescope, GBM ([Lesage et al. 2023](#)) ; Konus-WIND ([Frederiks et al. 2023](#)), et SWIFT(XRay Telescope, XRT, et Ultraviolet/Optical Telescope,UVOT) ([Williams et al. 2023](#)) a été enregistré sur une période de 600 seconds environs.

La courbe de lumière brute issues des télescopes Fermi et Konus (en Figure 19 et Figure 20), captée dans plusieurs gammes d'énergie du domaine gamma peut être décomposée comme suit :

- Un Pic Initial (I ou IP) ;
- Une période calme de 43 s (II) ;
- La phase principale constitué de 3 pics (III-IV ou P1+P2+P3)  
Cette phase dure une centaine de secondes. L'énergie moyenne de pic sur cette phase est estimée à  $E_p \approx 2,6$  MeV et une fluence moyenne de  $(0.21 \pm 0.017)$  erg  $\text{cm}^{-2}$  ;
- Une phase de décroissance (V) ;
- Un pic final (VI-VII ou P4) présentant une structure globale complexe avec d'une durée totale de plus de 300 s ;
- La rémanence enregistrée à partir de  $T_0+600$  s jusqu'à aujourd'hui.

On notera par ailleurs que, suivant les observatoires, on peut constater ce que l'on appelle un « Bad Time Interval », c'est-à-dire la période de l'émission prompt où l'émission est la plus forte mais les pics s'additionnent entre eux. Il y a donc plusieurs pics détectés qui se superposent et ceux-ci peuvent être différents d'un observatoire à un autre (cf [Kim et al, 2024, KPLO](#)). Cela complique l'exploitation, et peut expliquer que certaines grandeurs estimées à partir des courbes de lumière ont des valeurs différentes suivant les articles. Par ailleurs, on constate sur la courbe de lumière que le début de la rémanence se superpose avec la fin de l'émission prompt ([Axelsson et al. 2024; Lesage et al. 2023](#)).

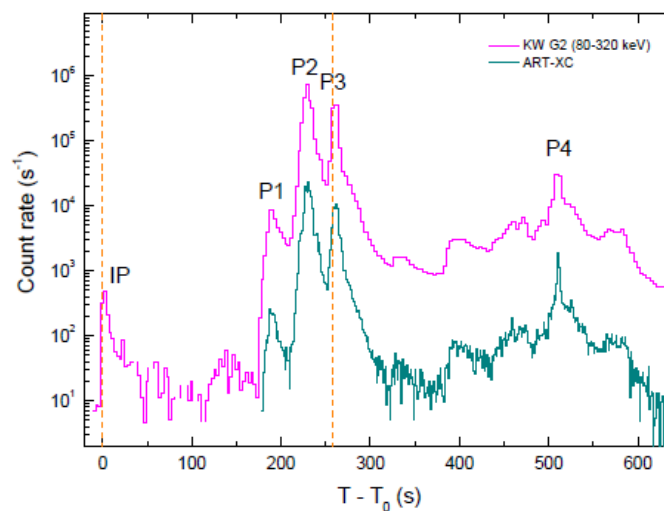


Figure 19 Courbe de lumière par Konus-WIND/ART-XC ([Frederiks et al. 2023](#)).

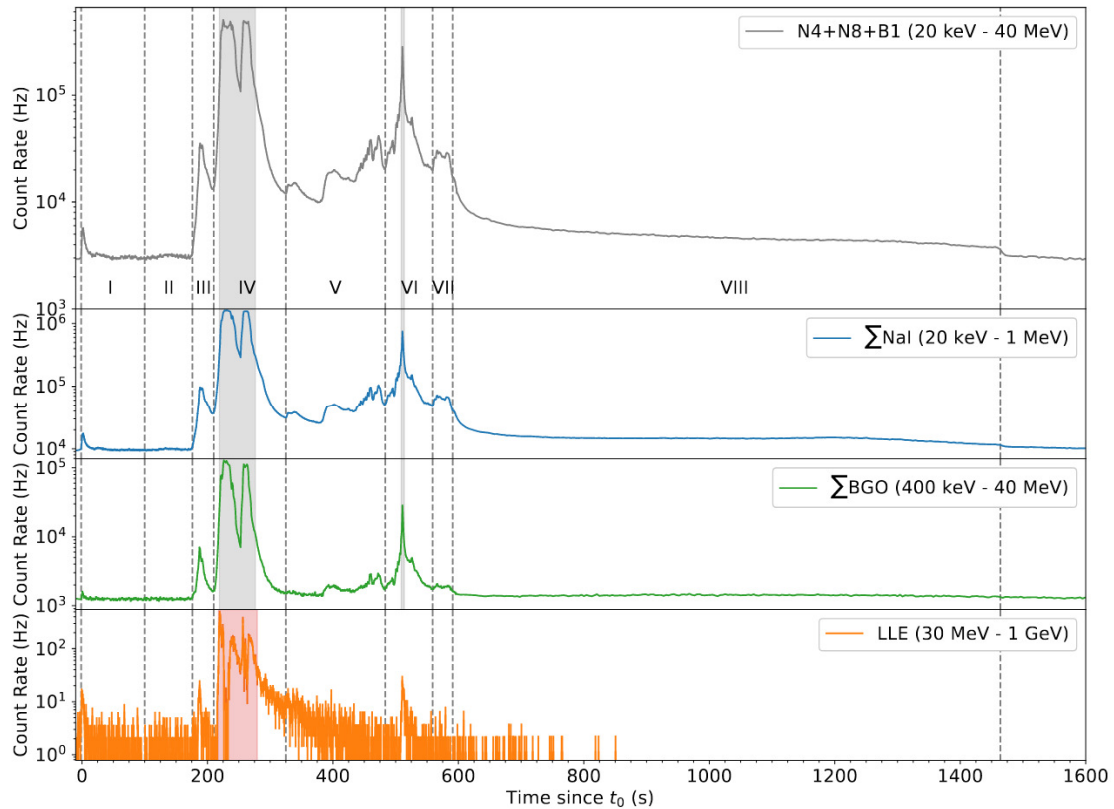


Figure 20 Courbe de lumière par Fermi-GBM (Lesage et al. 2023)

A partir de ces éléments, et de la distance estimée (voir section suivante), on peut tirer différentes grandeurs caractéristiques de la puissance du sursaut gamma récapitulées dans le Tableau 1.

Tableau 1 Principales grandeurs tirées de l'émission prompt de GRB 221009A

Durée totale de l'émission prompt enregistrée	~600 s
$T_{90}$	~289 s (ce qui en fait un sursaut long)
Flux de lumière au pic le plus fort <sup>11</sup>	$1.10^{-2}$ à $3.10^{-2}$ erg.cm <sup>-2</sup> .s <sup>-1</sup>
Fluence S (dans la gamme 20 keV-10 MeV) <sup>12</sup>	0,2 erg.cm <sup>-2</sup>
Energie de pic moyenne $E_p$	2600 à 2800 keV
Energie isotrope $E_{\gamma,iso}$	$1.2.10^{55}$ à $1.5.10^{55}$ erg (soit $10^{48}$ J) <sup>13</sup>
Luminosité isotrope $L_{iso}$ (sur un intervalle de 1.024 s)	$1.10^{54}$ à $2.1.10^{54}$ erg.s <sup>-1</sup> (soit $10^{47}$ J/s)

<sup>11</sup> Différentes valeurs sont obtenues par différentes sources/chercheurs, du fait de la complexité des analyses et des potentielles variations des émissions de la source.

<sup>12</sup> Flux de photons en fonction de la surface du capteur de l'instrument

<sup>13</sup> Rappel : 1 erg =  $10^{-7}$ J = 624 GeV

GRB 221009A est le sursaut gamma le plus lumineux jamais enregistré depuis le début des campagnes d'enregistrement : Il possède une fluence 10 fois supérieur au précédent record détenu à l'époque par GRB 130427A (Tsvetkova et al. 2017) (détrôné depuis par GRB 230307A en restant toutefois du même ordre de grandeur (Dalessi et al. 2023)). Il possède également une énergie isotrope 2 fois supérieure à GRB 090323 (Tsvetkova et al. 2017).

Une supernova libère environ  $10^{44} \text{ J} = 10^{51} \text{ erg}$ , ce qui peut représenter l'entièreté de l'énergie libérée par le Soleil en 10 milliards d'années. GRB 221009A a libéré l'énergie de 10 000 supernovæ en quelques secondes !

## II.2.2. Distance

La distance de l'évènement a été estimée à partir des données Optique et Rayon X de la rémanence et du spectre de la galaxie hôte par le VLT et le JWST (de Ugarte Postigo, Izzo, L., et al. 2022; Malesani et al. 2025).

Cette distance est évaluée à  $z \approx 0,151$  (décalage vers le rouge – redshift). Ce qui représente une distance lumière de 747 Mpc, soit environ 2.4 Milliard d'années-lumière.

Bien que cette distance soit très grande, GRB 221009A fait partit des sursauts gamma les plus proches enregistrés, notamment pour un sursaut gamma long. Nous détaillerons ces éléments dans le chapitre III.4.

## II.2.3. Rémanence

### II.2.3.1. Domaine X

Les télescopes Swift X-Ray Telescope (XRT), Monitor of All-sky X-ray Image (MAXI) et Neutron Star Interior Composition Explorer (NICER) sont des instruments de mesure de rayonnement X mou (gamme d'énergie faible à moyenne entre 0.2 et 30 keV). Les différents enregistrements du rayonnement X issus de la rémanence de GRB 221009A sont récapitulés par Williams et al. 2023. Ces enregistrements ont débuté quelques heures après T0, pendant plusieurs jours.

En comparant cette rémanence avec celles d'autres GRB détectés par Swift, il est clair que GRB 221009A est très lumineuse (Figure 21). Toutefois, rapporté en fonction de leur distance, la luminosité de la rémanence dans le domaine X mou (de faible énergie) est certes vers l'extrémité la plus lumineuse, mais parfaitement cohérente avec la distribution existante. D'ailleurs Lan et al. 2023 ont évalué la loi de puissance de cette décroissance et celle-ci se situe dans la même gamme que d'autres rémanences de GRB très énergétiques ( $E_{iso} \geq 10^{54} \text{ erg} \approx 10^{47} \text{ J}$ ).

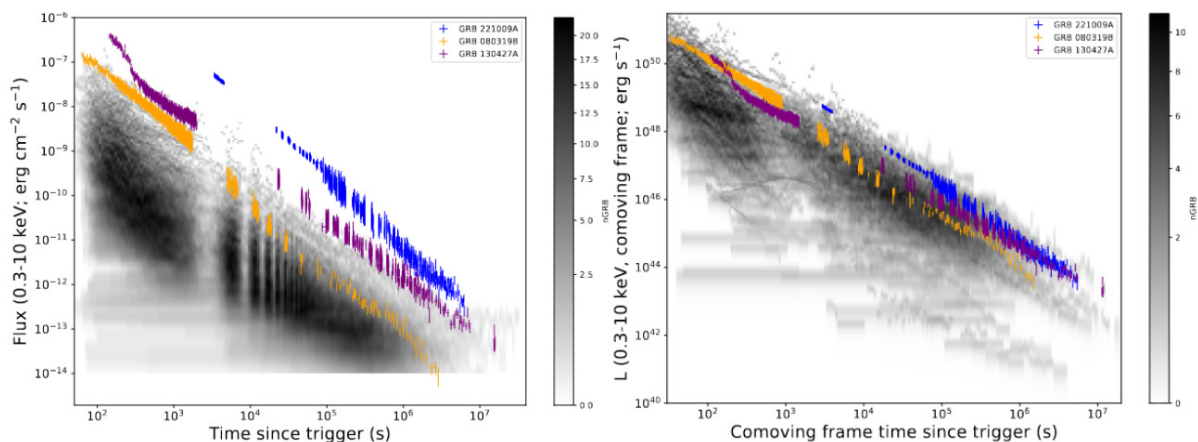


Figure 21 Comparaison de GRB 221009 avec la rémanence de tous les GRB détectés par Swift-XRT. (à gauche) le flux brut sans correction. (à droite) La luminosité rapporté à la distance.(Williams et al. 2023)

Pour expliquer son allure, le modèle standard dit « boule-de-feu » (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**), impliquerai que le milieu interstellaire autour du sursaut soit peu riche en matière. Cela est contre-intuitif, puisque comme on a pu le décrire au *Chapitre I*, les sursauts longs seraient issus de l'effondrement d'étoiles très massives. Ce type d'étoiles jeunes sont plutôt retrouvées dans des galaxies jeunes, donc riches en matière...

Le défi est d'expliquer l'allure de la rémanence par une autre structure du jet et d'autres phénomènes physiques, complémentaires au modèle consensuel. Nous détaillerons ces tentatives dans le *Chapitre III*.

Autre fait marquant issu des observations dans le domaine X : étant donné que le sursaut gamma est proche du plan Galactique, le rayonnement X émis par le sursaut se réfléchit sur la poussière de la Voie Lactée, et cause une diffusion lumineuse que l'on appelle « échos lumineux ». Ces échos rendent visibles l'émission X de la rémanence sur plusieurs jours. Ils permettent alors de recréer une carte de la poussière dans notre galaxie (comme un radar) et de collecter des informations sur GRB 221009A. L'imagerie de cet écho est représentée en Figure 22.

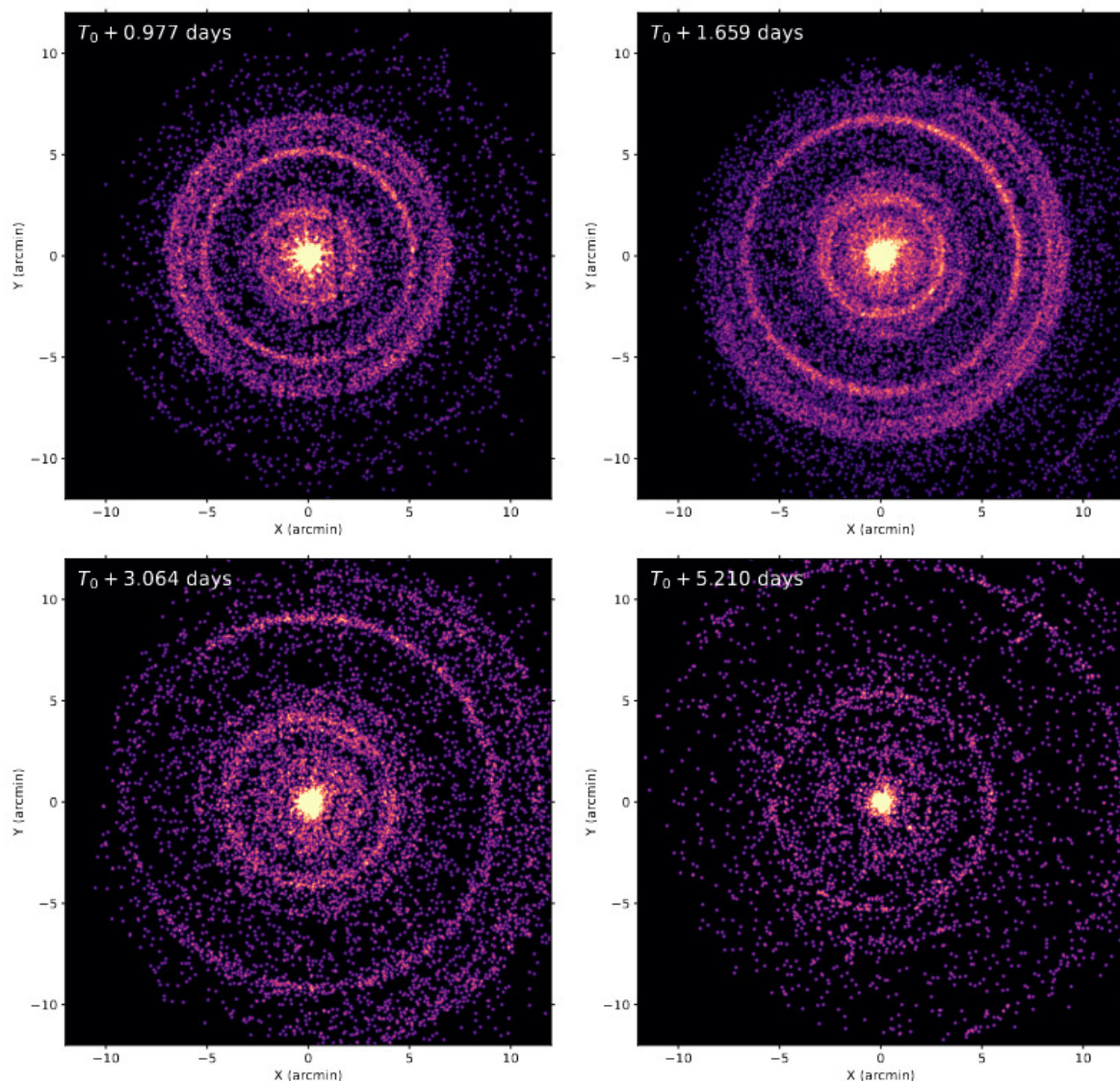


Figure 22 Image XRT PC-mode 0.8 – 5.0 keV illustrant l'écho lumineux de la poussière à différents temps (Williams et al. 2023)

### II.2.3.2. Domaine optique et infrarouge

La rémanence dans le domaine Optique et proche infrarouge (NIR) a été observé jusqu'à 20 jours après l'émission prompt par le réseau GRANDMA (Kann et al. 2023) et l'observatoire Pan-STARRS notamment (Fulton et al. 2023). De plus, c'est le premier spectre d'un sursaut gamma enregistré par le James Webb Space Telescope (JWST) et le Hubble Space Telescope (HST) (A. J. Levan et al. 2023; Sears et al. 2025).

Ces derniers ont pu réaliser des images grâce aux instruments MIRI (Mid-Infrared Instrument) et NIRSPEC (Near Infrared Spectrograph) en proche et moyen infrarouge (Figure 23 et Figure 24).

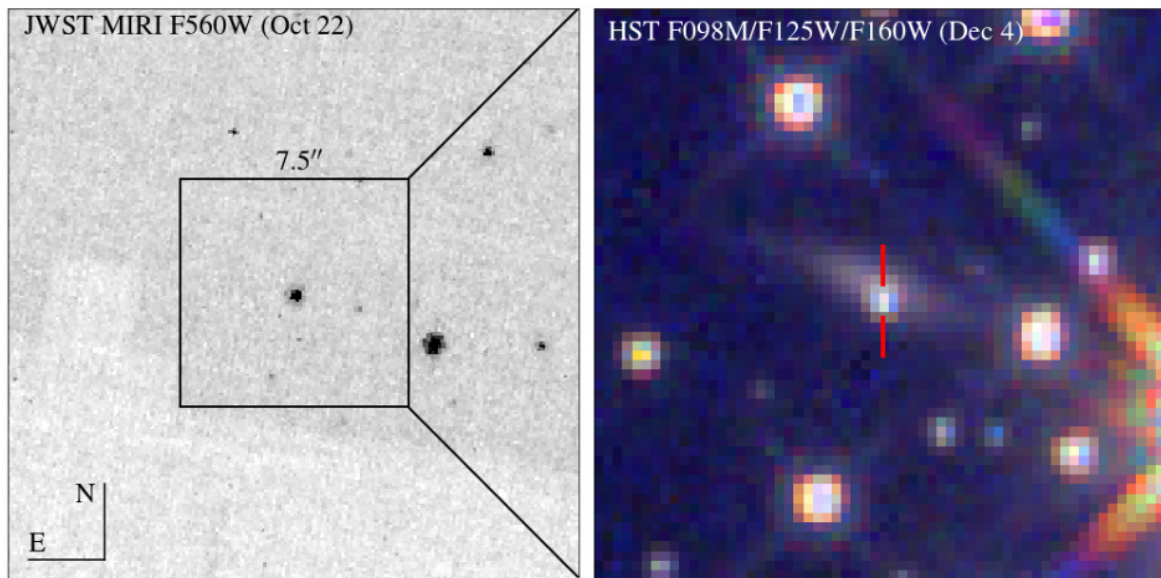


Figure 23 Imagerie de la rémanence par le JWST (le 22/10/22) et le HST (le 04/12/22). On note l'image du HST la présence de la galaxie hôte (A. J. Levan et al. 2023).

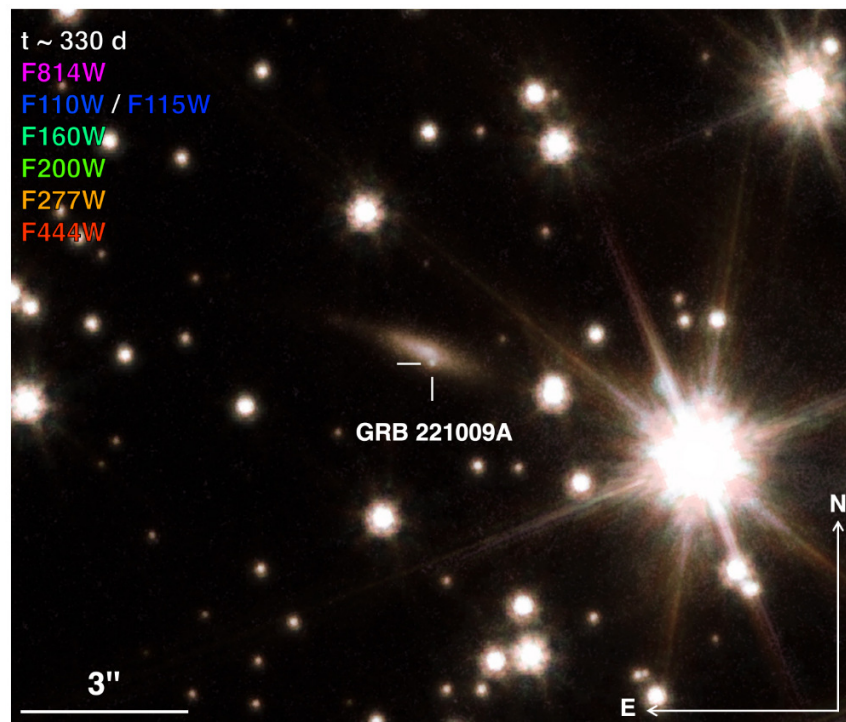


Figure 24 Image composite issue du HST et JWST de GRB 221009A après 330 jours (le 04/09/23). On voit clairement la rémanence dans galaxie hôte (Sears et al. 2025)

Levan et al tentent de reproduire le spectre mesuré par des lois de puissance non thermiques et thermiques, en prenant en compte l'extinction par la poussière/matière de la Voie Lactée et de la galaxie hôte. La rémanence optique/IR diffère de celle observée dans les rayons X. Ceci peut suggérer que les rayonnements dans les différentes longueurs d'ondes seraient dus à différents mécanismes.

GRANDMA (Global Rapid Advanced Network for Multi-messenger Addicts) est un réseau collaboratif de télescopes, axé sur le suivi électromagnétique des événements potentiellement émetteurs d'ondes gravitationnelles et d'autres phénomènes transitoires tels que les sursauts gamma. Son réseau comprend 36 télescopes provenant de 30 observatoires, 42 institutions et des groupes de 18 pays. A noter que cette campagne de relevés a également impliqué un réseau d'astronome amateur dans la collecte d'images de GRB 221009A.

De leurs observations, Kann et al., constatent que la rémanence est très lumineuse (Figure 25). Les courbes de lumière dans les différentes gammes de longueur d'ondes n'ont pas le même comportement, et notamment pas les mêmes ruptures de pente (break). De plus, l'atténuation au fil du temps est très lente.

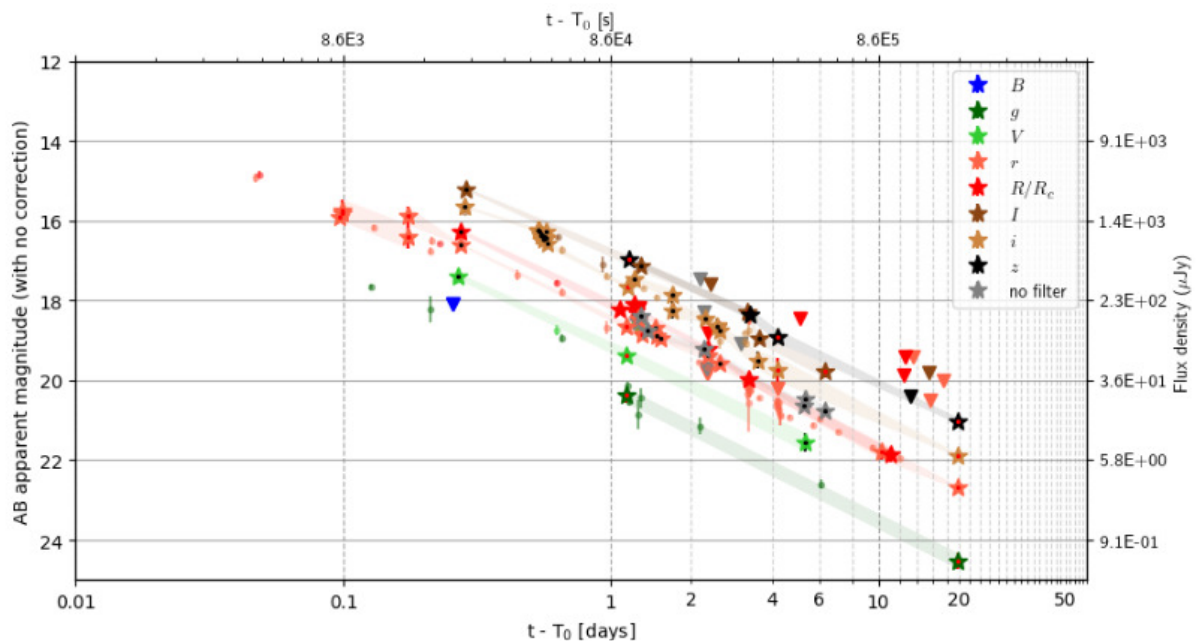


Figure 25 Rémanence optique mesurée sans correction (Kann et al. 2023)

En comparant la courbe de lumière Optique/NIR avec la rémanence de 170 autres GRB, il apparaît évident que GRB 221009A possède la rémanence la plus lumineuse jamais enregistrée. Néanmoins malgré qu'il soit extrêmement énergétique, si l'on ramène l'échantillons à une distance constante, et en prenant en compte l'extinction provoqué par la poussière de la Voie Lactée + galaxie hôte, la rémanence optique/proche infrarouge n'est pas si exceptionnelle par rapport à d'autres GRB. Ces analyses rejoignent les conclusions de Williams et al. dans le domaine X.

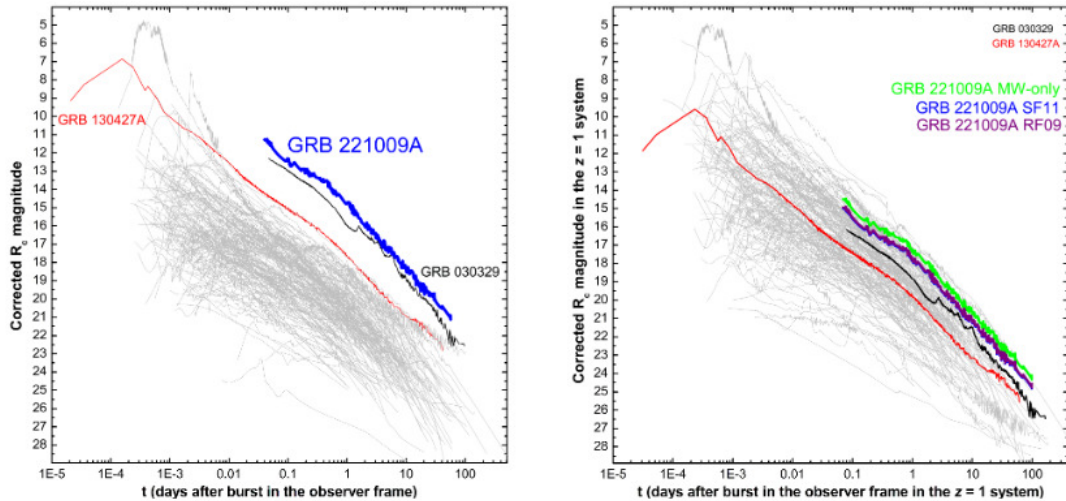


Figure 26 (à gauche) Rémanence en Optique/NIR de différentes GRB avec la même correction vis à vis de l'extinction par les poussières. (à droite) Même échantillons mais rapporté à une distance  $z=1$  (Kann et al. 2023)

### II.2.3.3. Domaine radio

Rhodes et al. présentent l'observation de la rémanence dans le domaine radio multi-fréquence jusqu'à 457 jours après  $T_0$  (Rhodes et al. 2024).

La courbe de lumière présente un pic à 15.5 GHz le premier jour (Bright et al. 2023) puis une décroissance marquée. Ce comportement est apparemment divergent par rapport à des rémanences classique d'autres GRB long qui possèdent plusieurs pics en radio les semaines, voire les mois, suivants l'émission prompte. Ces pics sont généralement attribués des chocs inverse dans le jet. Il peut également y avoir d'autres phénomènes à l'origine de ces chocs (par ex. chocs dans des directions radiales dus à des structures de jet particulières).

Les modélisations des observations par un modèle d'émission standard de type émission synchrotron (modèle boule-de-feu) ne permet pas de retrouver les spectres radio observés, surtout à long terme. Cela est probablement lié au fait que la structure du jet de GRB 221009A est plus complexe et que plusieurs mécanismes d'émission entrent en jeu.

Sur la Figure 28 est représenté sur plusieurs jours, les courbes de lumière radio dans différentes gammes fréquentielles émises par la rémanence de GRB 221009A. Selon Rhodes et al, le meilleurs modèle de loi de puissance permettant de caler ces courbes est une combinaison de l'action d'un choc inverse (*reverse shock*), un choc frontal (*forward shock*) et un choc supplémentaire (*extra shock*). Ce dernier pourrait représenter une émission hors axe et mette donc du temps à entrer dans notre champ de vision. Ou bien il pourrait être causé par un flux de particules dans un état moins relativiste que la composante principale du jet, provoquant ainsi un choc plus tardif. Ces modèles peuvent liés à une structure particulière du jet qui sera détaillé au paragraphe III.7.

Ces modélisations semblent fonctionner en radio et rayons X, mais sont plus délicates à faire correspondre aux observations optiques.

De même Laskar et al. 2023 ont réalisé des observations radio très basses fréquences ( $\leq 1$  GHz) sur plusieurs jours/mois après le sursaut à l'aide d'un réseau de radio télescope<sup>14</sup> (Figure 27).

<sup>14</sup> Pour le domaine radio, les télescopes utilisés dans cette étude sont : GRMT, MeerKAT, VLA, VLBA, ATCA, ALMA, NOEMA, SMA. Les données couvrent alors une bande fréquentielle allant de 400 MHz à 290 GHz sur différentes époques.

Là encore l'équipe de chercheur tente d'expliquer les courbes de lumière reçues par un modèle de choc frontal lors de la décélération du jet relativiste. L'hypothèse de choc frontal ne permet pas de concilier le signal radio et optique. Il a été proposé qu'un modèle à trois chocs permettrait de rendre compte des émissions radio.

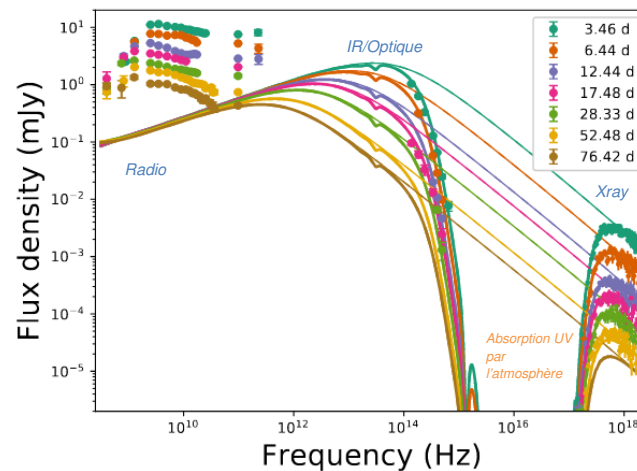


Figure 27 Spectre fréquentiel à différentes époques avec la simulation d'une loi de puissance représentant un choc frontal en trait continu (modèle *boule-de-feu*) (d'après [Laskar et al. 2023](#)). On constate que l'émission radio a un flux plus important que le modèle. De même la décroissance en optique est plus forte. Le modèle *boule de feu* avec choc frontal n'est pas adapté à l'émission de la rémanence de GRB 221009A.

## II.2.4. Conclusion partielle

On retrouve là encore, comme en optique ou en X, une difficulté de reproduire le rayonnement électromagnétique de GRB 221009A par les scénarios classiques... De plus, le modèle théorique standard de *boule-de-feu* ne permet pas de décrire complètement l'émission de ce sursaut. Comment trouver un modèle théorique adapté ? Quels seraient les phénomènes supplémentaires en jeu ? Est-ce que la structure du jet de GRB 221009A est particulière ?

GRB 221009A restera probablement détectable par radiotélescopes pendant des années, offrant l'opportunité de suivre le cycle d'émission complet d'un puissant jet relativiste.

## II.2.5. Détection d'électrons très énergétiques

Le Large High Altitude Air Shower Observatory (LHAASO)<sup>15</sup> en Chine a détecté plus de 64 000 photons dans un état d'énergie supérieur à 0,2 TeV, au cours des 3000 premières secondes. Le flux de photons (TeV) a débuté plusieurs minutes après l'émission prompte, puis a atteint un pic de flux environ 10 secondes plus tard avant de décroître ([Cao et al. 2023](#)). Le photon le plus énergétique détecté est de 18 TeV ([Huang, Y et al, GCN Circular,36677 \(2022\)](#)) ce qui en fait le premier photon détecté au-dessus de 10 TeV.

Il a également été détecté un photon de 10TeV pendant la rémanence, ce qui en fait le photon le plus énergétique détectés pendant une rémanence ([LHAASO 2023](#)).

Nous discuterons des implications de ces observations dans le paragraphe III.8.

<sup>15</sup> L'expérience LHAASO est l'association d'un détecteur de rayon Cherenkov aquatique de 78 000 m<sup>2</sup> et de 1 200 détecteurs à muon de 5 200 autres détecteurs sur une surface de 1,3 km de diamètre.

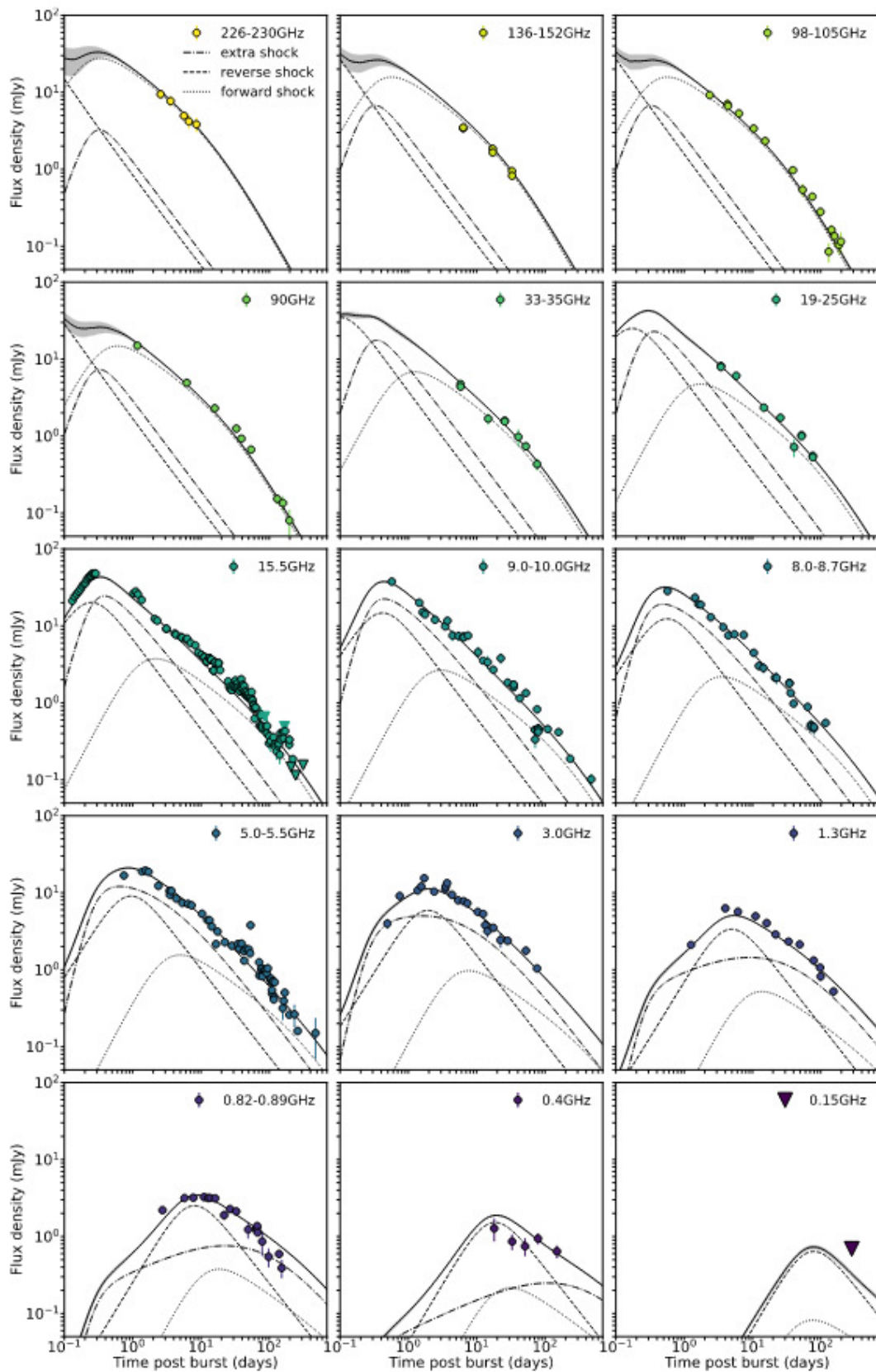


Figure 28 Courbe de lumière radio dans plusieurs fréquences en fonction du temps. Les courbes représentent les différentes lois de puissances proposées afin de rendre compte des observations. (Rhodes et al. 2024)

# Chapitre III. Pour quelle raison GRB 221009A est the B.O.A.T ?

## III.1. Problématiques

### III.1.1. Introduction sur les GRB énergétiques

Parmi l'ensemble des GRB détectées, une sous-classe de GRB très énergétiques ( $E_{iso} > 2 \cdot 10^{52} \text{ erg}$ ), apparaissent plus longs que la moyenne, avec une fluence plus grande et une énergie maximale atteinte plus grande. Toutefois rien n'indique que cela soit dû à un type d'évènement spécifique étant donné que ce type de sursaut intervient à différent redshift<sup>16</sup> et sans spécificité dans leur galaxie hôte (Atteia et al. 2017). Néanmoins  $E_{iso}$ <sup>17</sup> étant dépendant de la taille du réservoir d'énergie alimentant le jet, de l'efficacité radiative du jet et de l'angle d'ouverture du faisceau du jet, les astrophysicien.nes se posent les questions suivantes :

- Est-ce que tous les GRB énergétiques ont la même structure de jet ? Et donc relèveraient-ils d'un même type de source ?
- Est-ce que l'énergie libérée par unité d'angle solide est similaire pour tous les GRB ? Et donc les processus dissipatifs et radiatifs seraient-ils similaires ?
- Est-ce que l'énergie rayonnée est similaire pour tous les GRB ? Les GRB énergétiques auraient-ils un type de jet particulier à faible angle d'ouverture ?

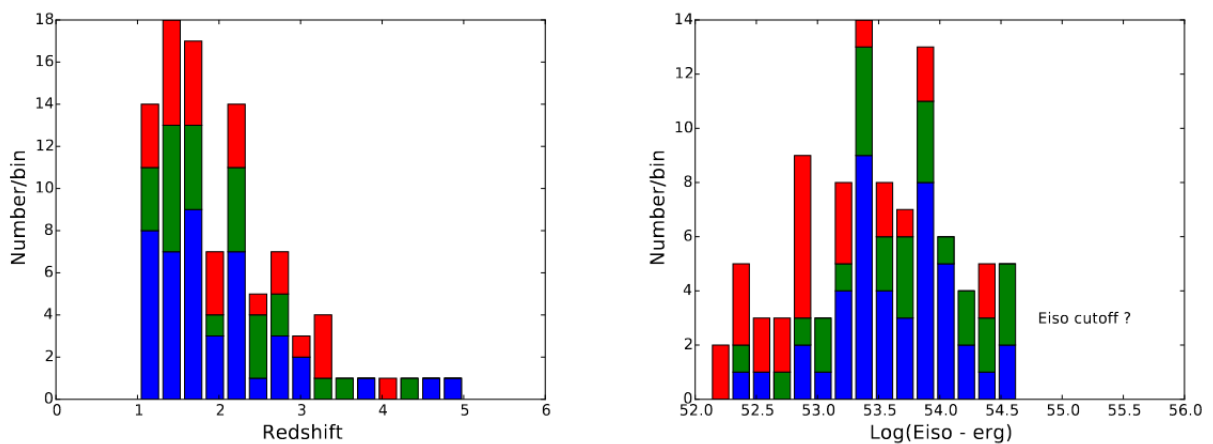


Figure 29 Histogrammes du redshift et de  $E_{iso}$  des sursauts gamma observés par Fermi (en rouge), par Konus (en bleu), et ceux détectés par les deux télescopes (en vert) (Atteia et al. 2017)

De ces questions, et à partir de l'échantillons de GRB très énergétiques, il était extrapolé jusqu'à récemment que le modèle dit « boule-de-feu » (cf. I.7.2) ne permettrait pas de produire une énergie de plus de  $1 \cdot 10^{54} \text{ erg}$  à  $3,8 \cdot 10^{54} \text{ erg}$ <sup>18</sup>. Cela à cause de propriétés intrinsèques mal connues de la source (Atteia et al. 2017; Dado et Dar 2022). **GRB 221009A possédant une énergie isotropique de l'ordre  $10^{55} \text{ erg}$  vient il remettre cela en question ?** Nous aborderons notamment cette question en III.2.

<sup>16</sup> Redshift : décalage vers le rouge

<sup>17</sup>  $E_{iso}$  : énergie électromagnétique rayonnée de façon isotrope (cf I.3.3).

<sup>18</sup>  $10^{54} \text{ erg} = 10^{46} \text{ J}$

### III.1.2. Questions ouvertes sur GRB 221009A

De l'analyse de ce contexte et des différentes données présentés au *Chapitre II*, il ressort plusieurs questions :

**Par rapport à l'ensemble des sursauts mesurés et en particuliers la population de sursauts très énergétiques :**

- Quel est la représentativité de ce sursaut ultra-énergétique par rapport à l'ensemble des sursauts mesurés jusqu'à aujourd'hui ?
- Comment cette représentativité des GRB énergétiques est remise en question par l'occurrence de GRB 221009A ?
- Est-ce que d'autres GRB très énergétiques se comportent comme GRB 221009A ?
- Est-ce que les GRB lointaines sont plus énergétiques que les GRB proches ?

**Par rapport à son origine :**

- Pour quelle raison GRB 221009A est-il aussi énergétique ?
- Est-ce que sa galaxie hôte est particulière ?
- De quel type de progéniteur est-il issu ? Et est-ce que ce dernier est exceptionnel ?

**Par rapport à l'émission et la structure du jet relativiste :**

- Pour quelle raison la décroissance de la rémanence au fil du temps est lente et ne suis pas les modèles typiquement observés pour les GRB (Figure 6) ?
- Est-il possible de reproduire les courbes de lumière dans les différentes gammes de longueur d'onde avec les modèles standards décrivant la rémanence ?
- Quel est la physique du jet pouvant expliquer les observations ? Et est que des sursauts similaires à GRB 221009 ont la même structure ?
- Les modèles physiques connus d'émission de photons très énergétiques ne permettent pas d'expliquer la grande quantité de photons TeV mesurées. D'où provient cette sur-quantité ? D'une structure de jet particulière ? De phénomène quantique non envisagés jusqu'à présent ?

A ces nombreuses questions, il est difficile de répondre séparément, car tous ces éléments sont intriqués, de la source jusqu'à la rémanence. Nous tenterons de présenter dans ce chapitre l'état des lieux des travaux actuels. La tâche étant ardue du fait du couplage entre chaque paramètre, nous constaterons que les conclusions ne sont pas fermées.

### III.2. Energie isotrope $E_{iso}$ et Luminosité isotrope $L_{iso}$

En ce qui concerne l'énergie lumineuse libérée  $E_{iso}$  et le pic de luminosité  $L_{iso}$  (dérivée de la fluence et du pic du flux de lumière), on peut replacer GRB 221009A dans l'échantillon de sursauts gamma connus (dont  $E_{iso}$  et  $L_{iso}$  ont pu être évalués).

C'est ce que ([Frederiks et al. 2023](#)) ont réalisés à partir d'un échantillon de 315 GRB longs issus de la base de données du télescope Konus-WIND (Figure 30). Ils en font plusieurs constats :

- Les GRB longs les plus énergétiques ont tendance à se situer à de fort redshift ;
- Il y a une relation entre l'énergie de pic et l'énergie lumineuse libérée<sup>19</sup> ([Amati et al. 2002](#)). C'est-à-dire que les GRB énergétiques ont un spectre plus dur (photons de niveau d'énergie élevé) que les GRB moins énergétique ;

---

<sup>19</sup> *Energie de pic spectrales du jet intégré dans le référentiel de l'observateur :  $E_{p,i,z} \approx (1+z)E_p$  moyenné sur 600 s et  $E_{p,p,z} \approx (1+z)E_p$  au pic de luminosité.*

- GRB 221009A suit également la même relation.

En élargissant l'échantillon à partir d'autres télescopes (*Beppo-SAX*, *Konus-WIND*, *BATSE*, *HETE*, *Swift* et *Fermi*) on peut également analyser la représentativité de GRB 221009A en fonction d'autres GRB très énergétiques (Lan et al. 2023; Atteia et al. 2025). Ici l'échantillon de GRB très énergétiques est fixé pour  $E_{iso} > 10^{53} \text{ erg}$ . Le constat reste le même, avec la particularité que les GRB longs et courts ne suivent pas la même tendance (Figure 31).

Dans tous les cas, GRB 221009A ne contrevient pas à cette relation.

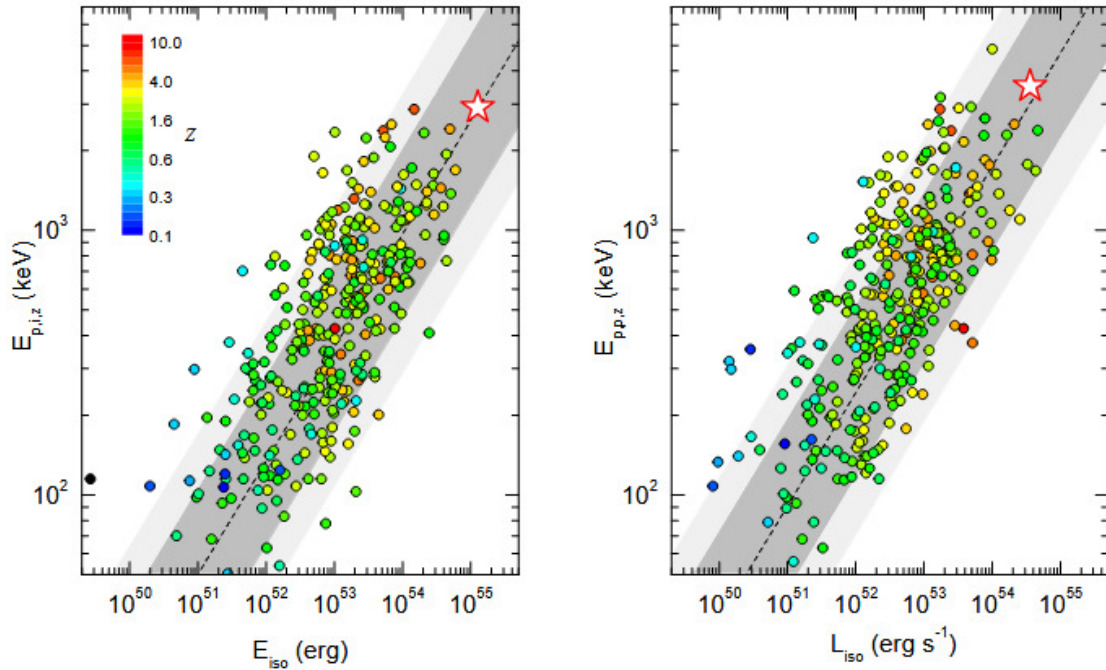


Figure 30 Lien entre l'énergie lumineuse isotrope, la luminosité isotrope en fonction du pic d'énergie au repos sur un échantillon de 315 GRB longs issus de Konus-WIND. GRB 221009A est représentée par une étoile. Les barres grisées représentent l'intervalle de confiance à 90% et 65% (Frederiks et al. 2023)

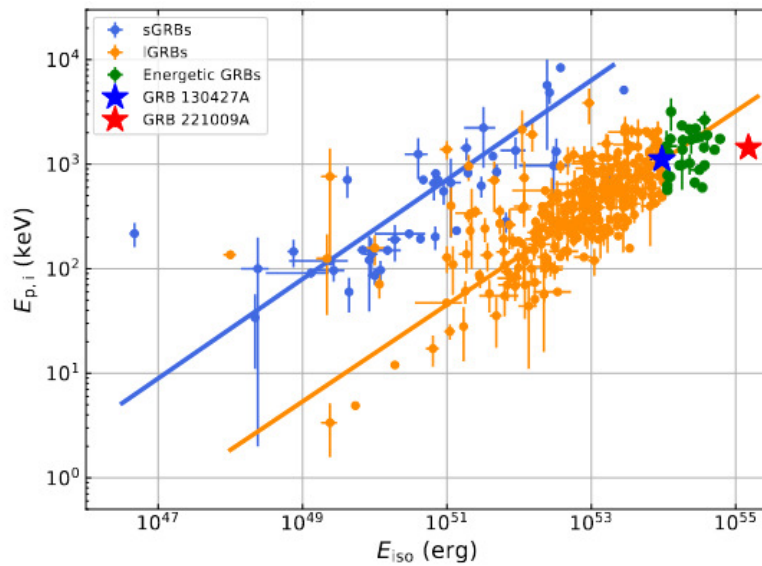


Figure 31 Représentation similaire de la relation d'Amati à partir d'un échantillon de 355 GRB longs (jaune) et énergétique (vert) (Lan et al. 2023)

### III.3. Discussion sur l'occurrence du phénomène

#### III.3.1. Récurrence en luminosité

Nous avons pu voir que GRB 221009A est un évènement extraordinaire. Il possède le plus grand flux de photons jamais mesuré sur Terre, tant en pic, que sur toute sa durée. Il détient également le record d'énergie lumineuse libérée  $E_{iso}$  et c'est l'un des plus lumineux  $L_{iso}$ . On rappelle que le début des missions dédiées au sursaut gamma remonte à 55 ans.

On peut alors se poser la question de la récurrence d'un tel phénomène. Est-ce que GRB 221009A est unique ? Si non, peut-on estimer la fréquence d'apparition de ce type d'évènements ?

Cette discussion a été ouverte par plusieurs groupes de chercheurs. En Figure 32 on retrouve le nombre de sursauts cumulés par an en fonction de leur fluence mesurée, par plusieurs missions d'observation sur une durée de 55 ans (depuis la première mission Vela). Sans prendre en compte GRB 221009A on constate une décroissance  $N \propto S^{-3/2}$  pour des fluences  $S$  supérieures à  $10^{-5}$  erg.cm<sup>-2</sup> (Meszaros & Meszaros 1995).

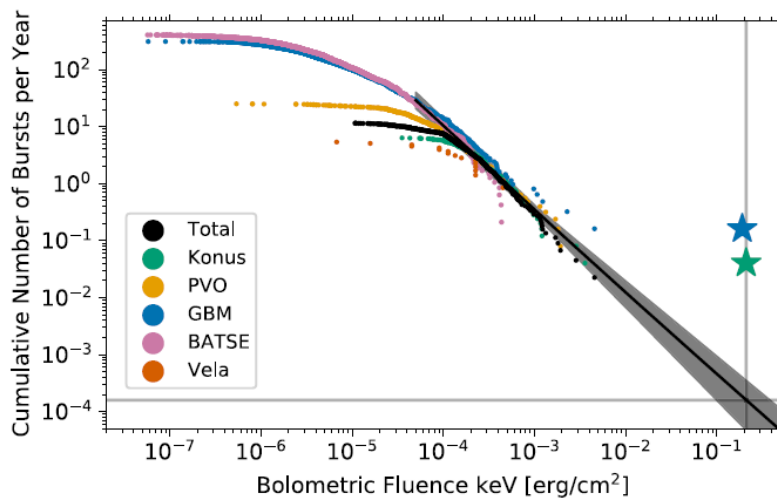


Figure 32 Recensement des GRB mesurées sur 55 ans par différentes missions. En abscisse, la fluence normalisée (dans la gamme d'énergie keV). En ordonnée, le nombre d'objet cumulé. Les étoiles représentent la fluence de GRB 221009A mesuré par les satellites Konus-WIND et Fermi-GBM. (Burns et al. 2023)

Pour des fluences basses ( $S < 10^{-5}$  erg.cm<sup>-2</sup>), le plateau constaté pourrait s'expliquer par :

- Soit une capacité insuffisante de détection par les capteurs, entraînant un asymptote ;
- Soit à un biais de distance mesuré par rapport à la distance réelle du fait de sa faible luminosité.

Pour les évènements très lumineux ( $S > 10^{-5}$  erg.cm<sup>-2</sup>) on peut déduire le taux de décroissance suivant :

$$R_{GRB}(S) = 9.967 \cdot 10^{-6} \times S^{-3/2}$$

L'inverse de ce taux donne la récurrence temporelle pour une fluence donnée :

$$\tau(S) = 1.003 \cdot 10^5 \times S^{+3/2}$$

Et donc à partir de cette décroissance extrapolée, un évènement similaire à GRB 221009A ( $S=0,2$  erg.cm<sup>-2</sup>) a une période de retour de 9200 ans ( $\pm 2000$  ans) (Burns et al. 2023). Soit, sur les 55 ans d'observations des sursauts gamma, la probabilité d'observation d'un évènement similaire est de 0,005. Malesani et al. 2025 et O'Connor et al. 2023 effectuent un calcul similaire, et obtiennent des taux de récurrence de 22 à 122 ans et de 300 à 1 100 ans, respectivement. Mais ces derniers n'utilisent pas un échantillon aussi important. Williams et al. 2023 retrouve une récurrence de 1000 ans, à distance similaire, en utilisant un modèle de répartition des GRB dans le ciel visible.

Finke et Razzaque 2024 envisagent que cette récurrence peut être affinée en considérant une certaine population de sursaut gamma. En effet Finke et Razzaque tentent de démontrer qu'une population de GRB proche ( $z \lesssim 0.38$ ) et avec un jet étroit ( $\theta_{\text{jet}} \sim 0.8^\circ$ ) suivent une courbe de distribution différente (courbe verte de la Figure 33).

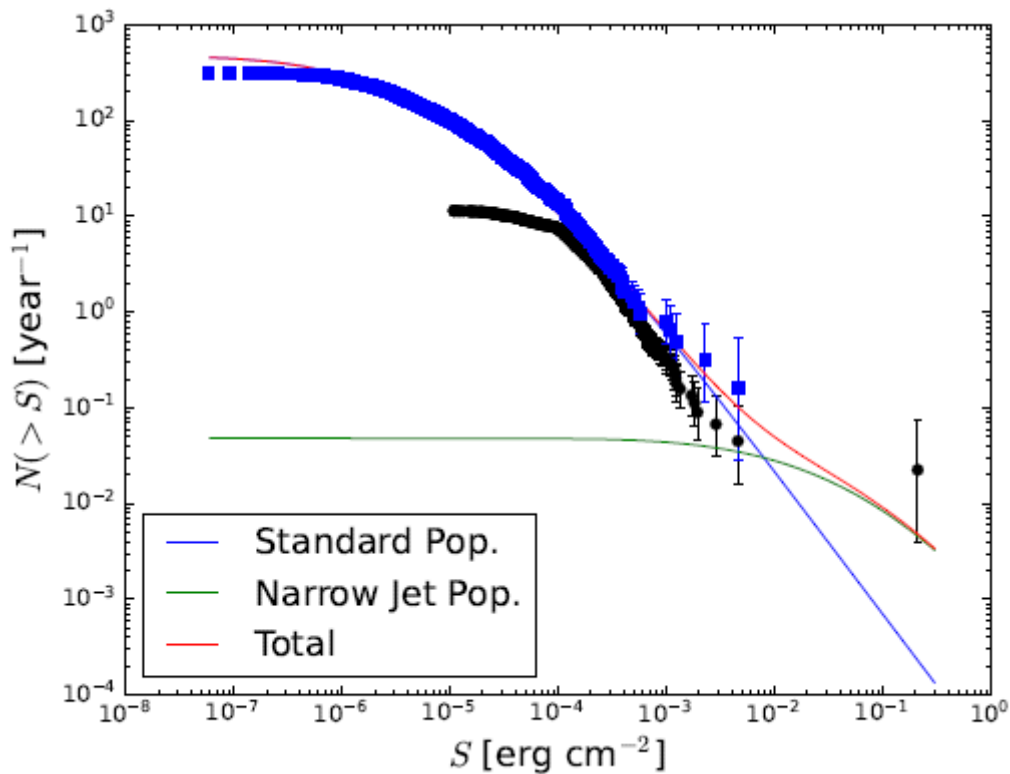


Figure 33 Courbe de distribution du nombre de GRB par an en fonction de leur Fluence  $S$  d'après (Burns et al. 2023). En bleu la population est représentée par des sursauts à distance  $z \approx 10$  et d'angle d'ouverture  $\theta \approx 6^\circ$ . En vert la répartition proposée par Finke & Razzaque pour des sursauts à  $z \approx 0.38$  et  $\theta \approx 0,8^\circ$  (Finke et Razzaque 2024)

Ainsi la combinaison des deux modèles entraîne la courbe de distribution rouge. La récurrence d'un événement tel que GRB 221009A ou supérieur devient alors de 120 ans (probabilité augmentée de près d'un facteur 100).

Parallèlement, puisque la population de GRB concernée par les modèles de Finke & Razzaque sont des GRB longs à jet très étroit, si le jet n'est pas orienté vers la Terre, alors l'émission prompte n'est pas visible.

En théorie, la rémanence peut être visible, puisque lors du freinage du jet dans le milieu, l'angle d'ouverture augmente, donc au bout d'un certain temps, l'angle sera suffisamment ouvert pour que de la lumière atteigne la Terre (rémanence orpheline). Toutefois l'émission de la rémanence seule ne peut pas enclencher les détecteurs des télescopes. Si l'alarme, par exemple de Swift, n'est pas déclenchée, alors le réseau d'observatoire et la communauté scientifique ne pourra pas être prévenue. Et donc la rémanence n'est pas mesurée. Il est donc possible qu'il y ait plus de sursaut gamma comme GRB 221009A mais nous ne les observons pas, car leur jet très collimaté n'est pas dirigé vers la Terre.

### III.3.2. Récurrence énergétique

On compte plus de 10 000 sursauts gamma observés, dont seulement 1 000 environ sont bien localisés, mais moins de 500 sursauts ont des valeurs d'énergie isotrope équivalente  $E_{iso}$  déterminées.

Parmi ces 500 sursauts, 20 sursauts ont une  $E_{iso}$  comprise d'un facteur 5 sous celle de GRB 221009A et environ 3 sursauts à un facteur 2. Sur le 10 000 sursauts gamma observés, il est probable que certains possèdent une  $E_{iso}$  supérieure à celle de GRB 221009A, mais comme le décalage vers le rouge ou le spectre n'a pas pu être mesuré, il n'est pas possible d'estimer une récurrence pertinente ([Burns et al. 2023](#)).

Deux sursauts gamma connus présentent un  $L_{iso}$  supérieur à celui de GRB 221009A. De la même manière, d'autres sont peut-être plus lumineux mais  $L_{iso}$  n'a pas pu être estimé.

[Williams et al. 2023](#) estime la récurrence d'un événement avec une telle énergie à 1000 ans, pour une distance similaire, en utilisant un modèle de répartition des GRB dans le ciel visible.

### III.4. Discussion sur la distance

Par rapport à la distance, il est communément admis le contexte suivant (cf. I.6) :

- Les sursauts courts seraient causés par la coalescence d'objet compacts (étoiles à neutrons, trous noir), donc un phénomène qui prend du temps à se réaliser. Leurs galaxies d'origine sont parfois des galaxies anciennes, fortement soumises à l'expansion de l'Univers ;
- Les sursauts longs seraient causés par l'effondrement d'étoiles supermassives. Donc des étoiles jeunes, retrouvées couramment dans des zones actives de galaxies plus jeunes, donc à une distance plus faible.

Or, d'après [Hascoët 2023](#), le redshift médian des sursauts détectés par Swift est plus élevé pour les longs ( $z \approx 2.5$ ) que pour les courts ( $z \approx 0.4$ ). Ceci serait dû aux biais observationnels suivants :

- Même si les sursauts longs et courts ont des luminosités équivalentes, les sursauts courts sont moins énergétiques. A grande distance :
  - (i) le flux de photons reçus d'un sursaut court est plus faible et les photons ont perdu de l'énergie, ce qui limite leur probabilité de détection ;
  - (ii) le nombre total de photons reçus est beaucoup plus faible, conduisant à une localisation de l'évènement plus grossière, ce qui complique la recherche d'une rémanence, d'une galaxie hôte et la mesure du bilan énergétique.
- La rémanence des sursauts courts est moins lumineuse que celle des sursauts longs : les mesures de redshift passent donc obligatoirement par l'identification de la galaxie hôte, dont le redshift est mesuré par raies d'émission.
- A l'inverse pour les sursauts longs le redshift est souvent mesuré par raies d'absorption détectées dans le spectre de la rémanence.

Lorsque l'on se restreint aux mesures par raies d'émission de la galaxie hôte, le redshift médian des sursauts longs retombe à  $z \approx 0.5$  ([Wanderman & Piran 2010](#)), proche de la valeur médiane des sursauts courts.

C'est ce que l'on peut retrouver sur les Figure 34 et Figure 35. [Lesage et al. 2023](#) ont représenté l'énergie isotrope  $E_{iso}$  et la luminosité isotrope  $L_{iso}$  de sursauts longs et courts en fonction de leur redshift  $z$ . On constate qu'il y a peu de discrimination entre les deux populations vis-à-vis de la distance. Toutefois les sursauts courts n'étant pas assez puissants pour être mesuré à grande distance, il y a peu de points à grand  $z$ .

Sur cette représentation GRB 221009A se distingue par sa puissance. Et c'est également le sursaut le plus énergétique à faible distance.

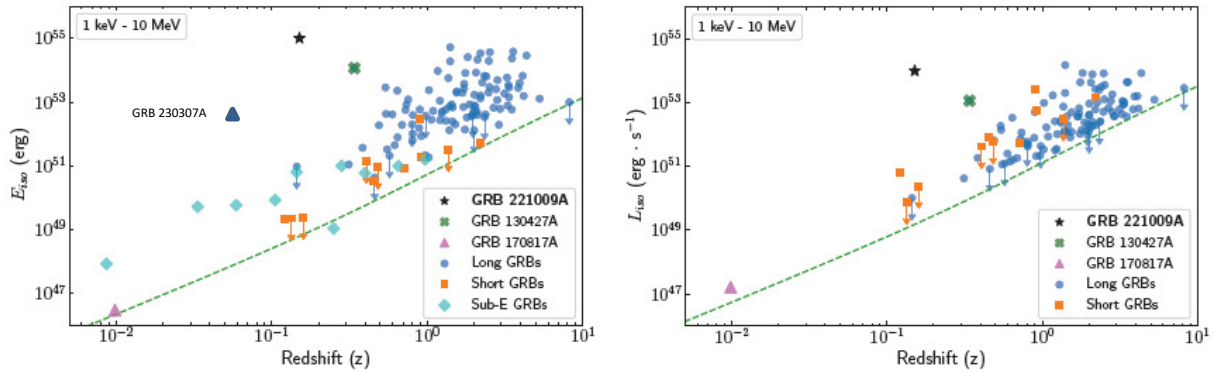


Figure 34 Courts et longs sursauts détectés par Fermi-GBM depuis 2017 dont le décalage vers le rouge  $z$  a pu être mesuré (Lesage et al. 2023). La courbe verte représenterait la limite basse.

Selon Atteia et al. 2025, il y aurait environ 2000 fois plus de sursauts gamma vers  $z = 6,3$  que vers  $z = 0,151$  (qui est le décalage vers le rouge de GRB 221009A).

Il est donc surprenant qu'un seul sursaut gamma avec un  $E_{iso} > 10^{55}$  erg ait été détecté si près de la Terre. Une hypothèse invoquée par Bloom 2022 est l'amplification de la lumière reçue par effet de lentille gravitationnelle par un objet stellaire intermédiaire. Cette possibilité est motivée par la proximité de GRB 221009A avec le plan Galactique. En effet, la masse de matière contenue dans le plan de notre galaxie peut engendrer une déviation de la lumière, comme une lentille. Et dans certains cas, cette déflexion peut engendrer une concentration des faisceaux lumineux, et donc une amplification de l'intensité lumineuse. Mais la probabilité de lentille s'est révélée très faible.

L'autre hypothèse, qui a déjà été évoquée, repose sur l'existence d'une population de sursauts gamma à jet étroit, supposés présents uniquement en dessous de  $z \approx 0,38$  (Finke et Razzaque 2024). Compte tenu de leur rayonnement élevé et de leur origine locale, les sursauts gamma de cette population pourrait être détectés typiquement à un rythme d'environ 3 par siècle.

**Une question persiste : Pourquoi y aurait-il une population de GRB longs à faible  $z$  avec un jet étroit ? Cette question reste sans réponse.**

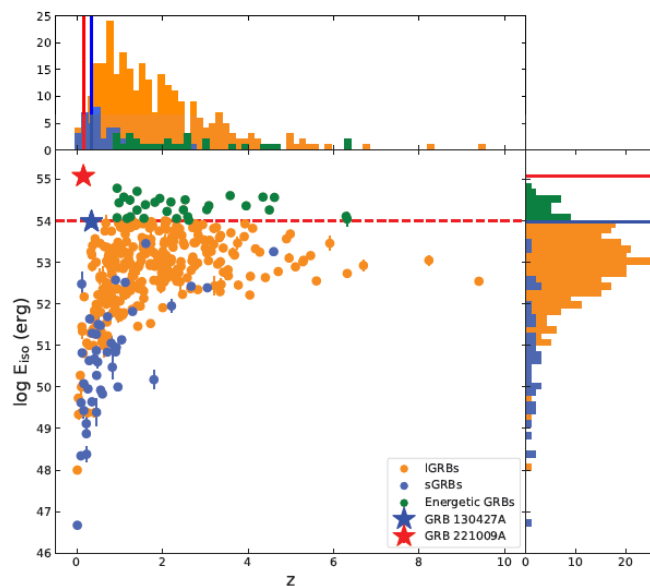


Figure 35 Distribution (et histogramme de nombre cumulé en haut et à droite) de la puissance lumineuse en fonction de la distance pour 355 sursauts (Lan et al. 2023)

### III.5. Supernova progénitrice ?

La détection à partir de la courbe de lumière (de l'émission prompte ou de la rémanence) du type de progéniteur à l'origine d'un sursaut gamma n'est pas chose aisée. Cela dépend de la qualité du signal, de l'extinction provoqué par les poussières des galaxies se situant sur le trajet de la lumière, de la faible contribution de la signature du ou des progéniteurs dans les courbes de lumière, etc...

Les chercheurs possèdent entre-autres deux méthodologies pour tenter de retrouver la source d'un sursaut gamma long (en supposant qu'il s'agit d'une supernova) :

- A partir de l'émission prompte, détecter une signature thermique dans les prémisses de la courbe de lumière ;
- A partir de la rémanence, retrouver des similarités avec d'autres supernovæ avérées ;

Malgré cela les résultats probants sont rares. C'est pourquoi il n'y a pas de supernova identifiée pour chaque sursaut gamma long.

A partir de l'émission prompte acquise par Fermi-GBM, [Lesage et al. 2023](#) se sont particulièrement intéressés au pic initial ou *Triggering pulse 1* (cf II.2.1) qui intervient dans les toutes premières secondes ( $T_0-1$  s à  $T_0+43$  s).

La signature de ce pic pourrait correspondre selon eux au spectre d'un corps noir multicolore (c'est-à-dire un corps noir avec plusieurs températures). Il s'agirait d'un spectre thermique que l'on peut rattacher à une étoile. A partir du facteur de Lorentz (voir I.7.1) et de la distance  $z$  du sursaut, il estime le rayon de l'étoile à  $10^{13}$ - $10^{14}$  cm. Cela correspond au rayon d'une étoile de type Wolf-Rayet. Ce sont des étoiles de plusieurs dizaines à centaines de masse solaire, extrêmement dense car de faible taille, qui ont expulsées la majorité de leur matière par vent solaire avant d'exploser en supernova. Le type de supernova qui en découle est de type Ib. Cela est cohérent avec ce qui est vu au chapitre II.2.1.

Grace au télescope au sol Pan-STARRS, [Fulton et al. 2023](#) analysent la courbe de lumière optique et X dans plusieurs fréquences. Ils tentent d'expliquer le flux de lumière par la présence d'une supernova de type Ic, et de retrouver des similarités avec d'autres supernovae associées à des GRB. Ils concluent à la présence d'une supernova riche en nickel nommé SN 2022xiw ([Postigo et al. 2022](#)). Mais la concordance n'est pas optimum pour toutes les longueurs d'onde, notamment le jaune.

A partir du spectre de la rémanence du JWST, [A. J. Levan et al. 2023](#) sont plus prudents. Il est possible qu'une supernova, associée à une émission prédominante dans le bleu, soit à l'origine de GRB 221009A. Mais cette dernière n'est pas visible. Elle serait alors peu lumineuse. Les données sont insuffisamment précises pour en être sûr. De plus le spectre d'émission est faible en raie métallique généralement retrouvée dans des étoiles jeunes. Des données plus récentes du HST et JWST, après un an d'observation, montrent enfin une cassure dans les spectres des domaines Optique et NIR après 50 jours, renforçant la présence d'une supernova peu lumineuse dans un environnement de faible métallicité ([Sears et al. 2025](#)). Ils ouvrent alors d'autres possibilités. En effet, il est possible que l'effondrement de l'étoile source directement en trou-noir n'engendre pas d'explosion supernova.

De plus les GRB long peuvent également être associés à une fusion d'objets compacts, comme c'est le cas pour le deuxième sursaut gamma long le plus lumineux GRB 230307A ([A. Levan et al. 2023](#); [Cheong et al. 2024](#); [Du et al. 2024](#); [Wang et al. 2024](#); [Gillanders et Smartt 2025](#)).

Une hypothèse moins conventionnelle serait que GRB 221009A ne soit pas un sursaut gamma long mais un sursauteur gamma mou issue d'un magnétar d'origine Galactique, donc dans la Voie Lactée ([Navia et al. 2024](#)).

### III.6. Galaxie hôte

Le spectre de la galaxie hôte observé par le JWST permet de définir une magnitude absolue assez typique pour une galaxie hôte d'un sursaut gamma long. De même, à partir du spectre dans différents filtres de couleurs, la masse stellaire équivalente et la taille de la galaxie hôte ont été estimées. Elles sont cohérentes avec celles d'autres sursaut gamma (A. J. Levan et al. 2023). Les propriétés déduites du Very Large Telescope conduisent à un taux de formation d'étoiles et une métallicité cohérentes avec celles des hôtes de sursauts gamma longs à faible  $z$  (Malesani et al. 2025).

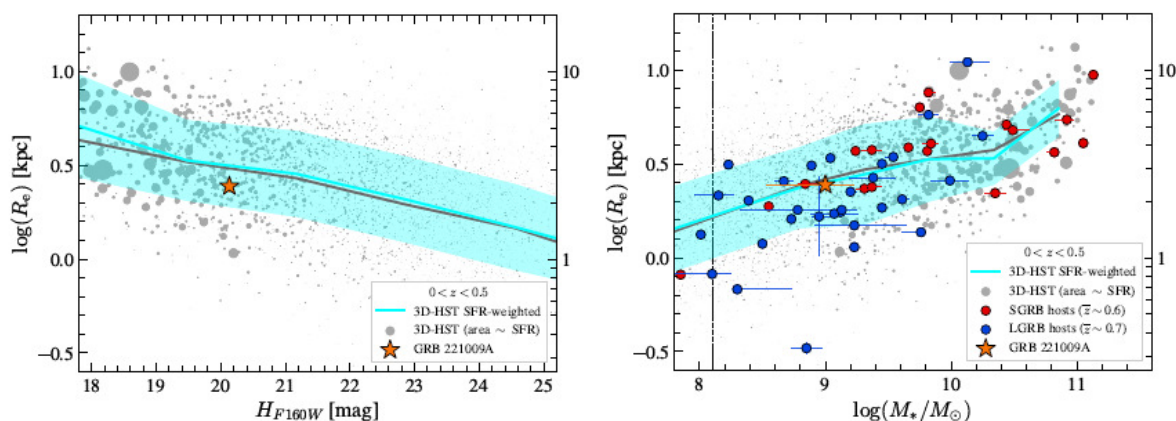


Figure 36 (à gauche) Rayon effectif de la galaxie en fonction de la magnitude dans un certain type de filtre. (à droite) Rayon effective en fonction de la masse stellaire. En bleu les galaxies de GRB courts à  $z < 1$ . En rouge les galaxies de GRB longs à  $z < 1$ . (A. J. Levan et al. 2023)

Lan et al. 2023 s'intéressent en particulier aux sursauts très énergétiques ( $E_{iso} \geq 10^{54}$  erg<sup>20</sup>). Est-ce que la galaxie hôte de ce type de sursauts présentent des caractéristiques particulières ? Est-ce que la galaxie de GRB 221009A correspond à ces caractéristiques ?

Ils font la comparaison des galaxies des GRB très énergétique avec d'autres suivant 4 critères :

- la masse stellaire,
- le taux de formation d'étoile SFR,
- la métallicité,
- le décalage du sursaut par rapport au centre.

Bien que peu de données soit disponibles sur ces propriétés, la Figure 37 montre qu'il n'existe pas de différence systématique entre les GRB énergétiques et les autres GRB longs « normaux », ce qui indique que les GRB énergétiques ne proviennent probablement pas de systèmes particuliers.

Ainsi la galaxie hôte associée à GRB 221009A, tant en localisation que caractéristiques, semblent très typiques de celles d'autres sursauts gamma longs. Cela suggère que l'environnement galactique de GRB 221009A n'est pas la cause de ses propriétés extrêmes et, en particulier, rien ne prouve qu'il soit né dans un système à très faible métallicité.

<sup>20</sup>  $10^{54}$  erg  $\approx 10^{47}$  J

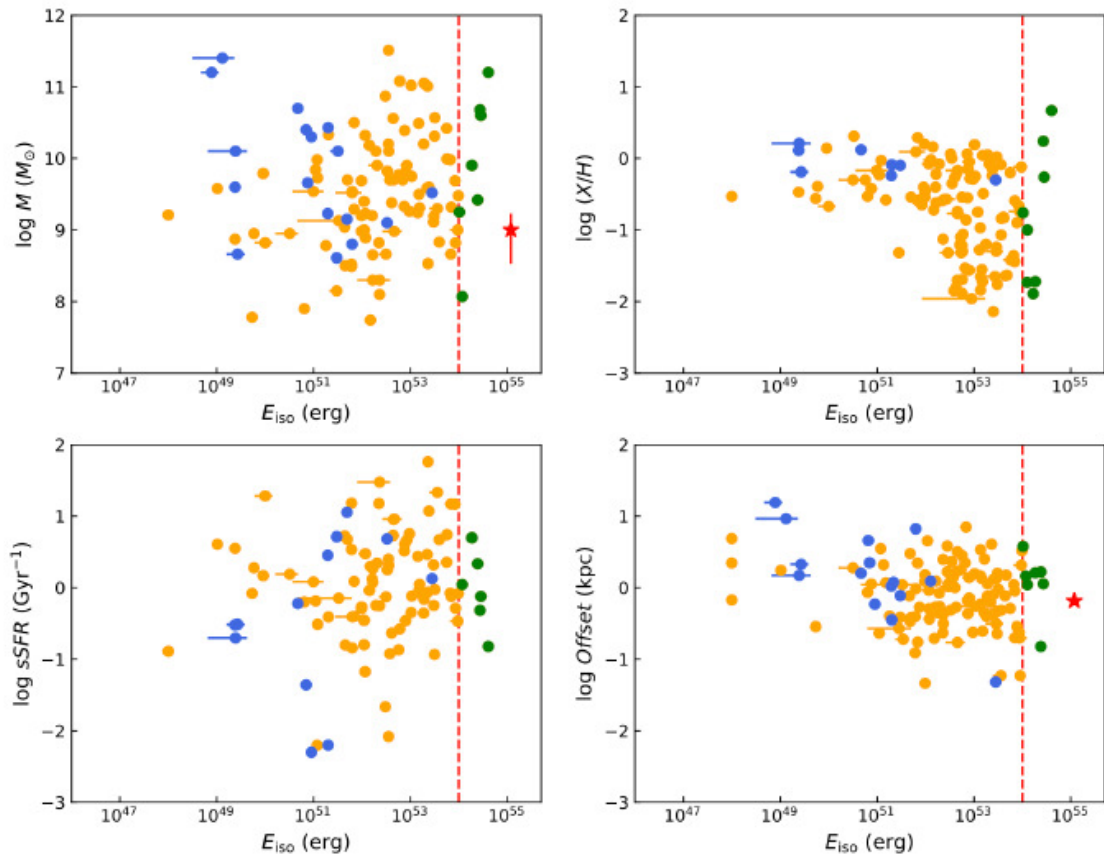


Figure 37 Représentation de l'énergie du sursaut en fonction des caractéristiques de leur galaxie hôte. En jaune, les sursauts longs. En bleu, les sursauts courts. En vert, les sursaut très énergétiques (courts et longs). En rouge, GRB 221009A. (Lan et al. 2023)

### III.7. Hypothèses sur la structure du jet

Nous avons vu que, bien que GRB 221009A soit le sursaut le plus lumineux jamais enregistré, sa particularité ne provient peut-être pas de sa source, et encore moins de sa galaxie. A partir des éléments particuliers des courbes de lumière du gamma au radio, de nombreux chercheurs tentent de reproduire les phénomènes physiques (et quantique) en jeu et d'en déduire des particularités sur la structure du jet de matière expulsé par le moteur central/ trou noir.

L'établissement d'un modèle est un des plus grands défi car il doit prendre en compte l'extinction galactique due à l'alignement avec le plan de la Voie Lactée, l'extinction et la contamination par la galaxie hôte, et par la supernova éventuellement. Au risque d'avoir un modèle incomplet, chaque longueur d'onde d'émission ne peut être regardée séparément puisque l'ensemble des phénomènes sont liés.

De nombreux articles s'accordent actuellement pour dire que l'angle d'ouverture du jet relativiste de GRB 221009A est exceptionnellement faible (Atteia et al. 2025; Burns et al. 2023; Frederiks et al. 2023; Kann et al. 2023; Laskar et al. 2023; Negro et al. 2023; Williams et al. 2023). Cela s'est déjà vu pour d'autres GRB.

En effet un jet de faible angle pourrait à la fois produire une émission prompt très brillante, tout en produisant une énergie cinétique totale plus typique, de l'ordre de  $10^{51}$ - $10^{53}$  erg. La collimation du jet permet de revoir le bilan énergétique intrinsèque par la relation (3) et (4) où  $\theta_{jet} \sim 1/\Gamma$  est l'angle d'ouverture du jet (Sari, Piran, et Halpern 1999; Tsvetkova et al. 2017).

$$E_\gamma \approx E_{iso}(1 - \cos \theta_{jet}) \approx \frac{\theta_{jet}^2}{2} E_{iso} \quad (4)$$

Parmi la population de GRB connues, pour que GRB 221009A atteigne un bilan énergétique parmi les plus élevés ( $E_\gamma > 10^{51}$  erg  $\approx 10^{44}$  J), un facteur de correction de collimation ( $1 - \cos \theta_{jet}$ ) d'environ 1 000 est nécessaire, ce qui correspond à demi-angle d'ouverture de moins de 2,6°. Suivant les auteurs et le type d'émission étudié, le demi-angle d'ouverture estimé pour GRB 221009A va de 0,7° (LHAASO 2023) à maximum  $>10^\circ$  (Kann et al. 2023).

En faisant l'hypothèse que cette énergie corrigée par effet de collimation ne dépasse pas les distributions connues des classes de collapsars (cf.1.6.1), ces observations nous permettent de comprendre ce qui a pu se produire pour GRB 221009A.

En raison de conditions inhabituelles, soit dans la formation et la propagation du jet, soit dans les propriétés de l'étoile progénitrice et/ou de son milieu environnant, le cœur du jet a atteint une vitesse particulièrement élevée tout en restant étroitement collimaté. Cette collimation a été maintenue depuis le percement de la photosphère de l'étoile jusqu'au choc externe avec le milieu.

Afin de mieux expliquer les décroissances lentes des courbes de lumière mais également les caractéristiques exceptionnelles de l'émission promptes, plusieurs articles évoquent avec succès la possibilité d'un jet constitué de plusieurs couches (Sato et al. 2023; O'Connor et al. 2023; Rhodes et al. 2024; B. Zhang, Wang, et Zheng 2024; B. T. Zhang et al. 2025). Nous avons déjà évoqué les interprétations dans le domaine radio de la présence de plusieurs chocs de différentes origines (II.2.3.3 Domaine radio).

Le jet présenterait une structure comme schématisé par la Figure 39 :

- un jet étroit (angle de demi-ouverture  $\leq 1^\circ$ ), dominée par flux Poynting, c'est-à-dire dans une direction spécifique du fait qu'un champ magnétique fort, exerce une pression suffisante pour confiner le plasma. Les particules de ce jet sont dans un état ultra-relativiste ;
- un jet plus large contenant de la matière, c'est-à-dire à minima des protons, et peut-être même des éléments plus lourds. Ce milieu forme comme un cocon. Il est dans un état moins relativiste
- Le tout contraint par des vents magnétiques.

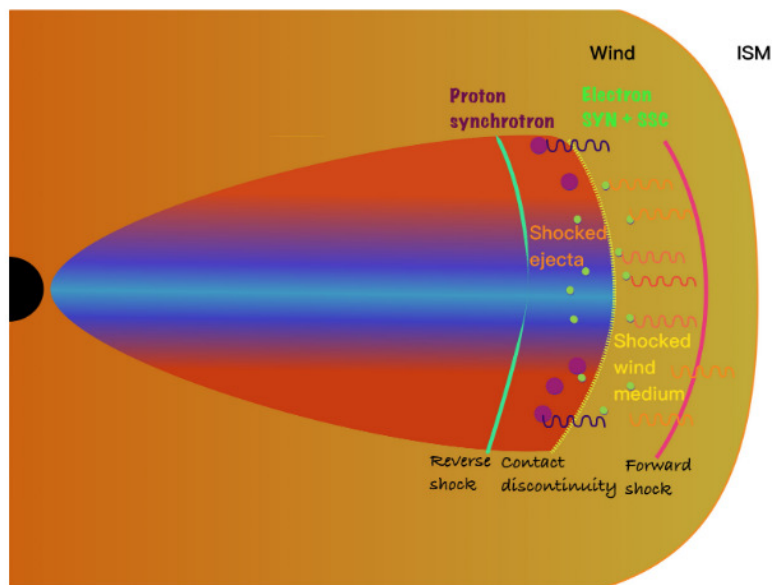


Figure 38 Illustration schématique de la structure du jet avec en bleu un cœur d'électron relativiste et en rouge un jet de matière (proton principalement) dans un état moins relativiste. Le tout entouré d'une « coquille » de vent magnétique (B. T. Zhang et al. 2025)

## III.8. Implications sur la détection de VHE

### III.8.1. Emission de photons en Téraélectronvolt

Ces particularités du jet permettraient d'expliquer également le nombre accru de photon gamma (plus de 64 000 en 3000 secondes) dans un état d'énergie supérieur au TeV qui a pu être mesuré par LHAASO (cf II.2.5). Ces photons sont aussi appelés VHE (Very High Energy photon – photons de très haute énergie).

Le spectre de VHE émis par GRB 221009A évolue dans le temps ([LHAASO 2023](#)) :

- Il est initialement doux, c'est-à-dire moyennement énergétique (GeV à 5 TeV) ;
- Puis deviennent durs (jusqu'à 18 TeV),
- Et enfin sa décroissance est raide.

Cette évolution est difficile à expliquer uniquement par un modèle d'émission de photon gamma de type Synchrotron Self-Compton (cf I.7.3 Mécanismes d'émission). Pour l'expliquer il faut un jet fin ([LHAASO 2023](#)) et introduire d'autres sources d'émission.

La combinaison de l'émission Synchrotron Self-Compton (par des électrons du jet collimaté) lors des chocs frontal et interne, et de l'émission synchrotron (par proton de la composante large du jet) durant le choc inverse (Figure 38) pourrait expliquer à la fois le flux de photons VHE et son évolution avec le temps ([B. T. Zhang et al. 2023, 2025](#)) :

- Les VHE captés durant les premiers instants pourrait être issus des photons de l'émission prompte par émission synchrotron self-Compton.
- L'émission synchrotron issus des protons de la composante large du jet, lors du choc inverse, permettrait d'expliquer le flux de VHE détecté par LHAASO entre 500 et 800 secondes.
- La décroissance rapide est toutefois encore mal expliquée.

### III.8.2. Emission de neutrino

Le jet relativiste produit des rayons cosmiques, c'est-à-dire des particules (protons, neutrons, électrons...) très énergétique dans un état relativiste.

**Avant l'émission prompte**, les collisions internes de protons et de neutrons sous la photosphère ont été considérées comme une source d'émission de neutrinos de l'ordre du GeV ([Murase et al., 2013](#) ; [Bahcall et Mészáros, 2000](#) ; [Bartos et al., 2013](#) ; [Murase et al., 2022](#)). L'observation de ce type de neutrinos issus de GRB permet d'améliorer les théories sur les supernovas.

**Pendant l'émission prompte**, l'interaction de ces rayons cosmiques à l'intérieur du jet (via des collision proton-proton ou proton-photon gamma) produit également des neutrinos

**Au début de la rémanence**, les chocs inverses qui se forment pendant la phase de rémanence entraînerait l'accélération des rayons cosmiques et se faisant produiraient des neutrinos de très haute énergie (>TeV), par interactions avec des photons optiques UV.

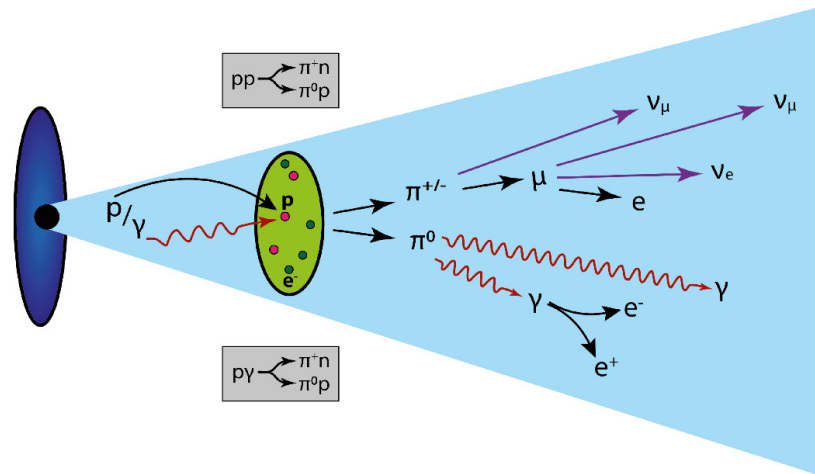


Figure 39 Schématisation d'émission de neutrinos (différents types) au sein d'un jet relativiste (Sharma 2024)

Suivant cette théorie, il devrait y avoir une forte émission de neutrinos dans la direction des GRB longs issus de ces trois sources.

Le détecteur de neutrino IceCube en Antarctique est constitué de plus de 80 détecteurs de neutrinos sous la glace. Il est particulièrement conçu pour détecter des neutrinos TeV et plus.

L'émission de neutrinos pendant les 104 premières secondes de la phase prompte des GRB ne représente que moins de 1 % (ou  $\leq 24$  %) du flux de neutrinos observé par IceCube (Abbasi et al. 2022a). Toutefois l'observatoire IceCube n'a pas détecté d'augmentation significative de neutrinos MeV à TeV en direction de GRB 221009A avant, pendant, ou après l'émission prompte...

### III.8.3. Violation de l'Invariance de Lorentz ?

L'invariance de Lorentz, la symétrie fondamentale de la relativité d'Einstein, a résisté à des tests rigoureux au cours du siècle dernier comme décrit en I.8.3. Cependant, des écarts par rapport aux invariances de Lorentz pour des particules dans des états d'énergies plus faible que celle de Planck sont prédits dans de nombreuses théories de la gravité quantique (QG) cherchant à unifier la théorie quantique et la relativité générale.

Une manifestation de la violation de l'invariance de Lorentz (LIV) serai la dépendance de la vitesse de la lumière avec l'énergie du photon.

A partir du temps d'arrivée et du niveau d'énergie des photons de GRB221009A observé par LHASSO, une limite basse de l'énergie QG nécessaire à la LIV a pu être établie (avec une confiance de 95%) (Cao et al. 2023; Piran et Ofengeim 2024). Néanmoins la possibilité d'une violation n'est pas démontrée

### III.8.4. Utilisation des résultats pour alimenter les modèles ALP

En théorie, lors de leur parcours vers la Terre les photons gamma très énergétiques (de l'ordre du TeV) interagissent facilement avec d'autres photons. Pour interpréter la grande quantité de VHE reçus, Chen et al. 2025; Galanti et al. 2024a, 2024b avancent que les photons se comporteraient comme des axions<sup>21</sup> en présence d'un champ magnétique très fort (particules de type axion – Axion Like Particle). Cela leur conférerait un comportement oscillatoire, permettant de réduire leur probabilité d'absorption par la lumière du fond diffus cosmologique.

<sup>21</sup> Les axions sont particules hypothétiques de la physique quantique, introduites pour expliquer la violation de symétrie Charge-Particule. Ce sont des candidats à la composition de la matière noire.

## Conclusion

---

GRB 221009A est un évènement unique ; non seulement un des plus proche mais également le plus énergétique jamais détecté. Ces deux paramètres combinés en font le sursaut gamma le plus brillant jamais observé à ce jour, et probablement pour les prochains millénaires à venir. Avoir pu bénéficier d'instruments capables de le détecter, même par des astronomes amateurs, alors que la probabilité d'apparition supposé d'un tel phénomène est estimée à un tous les quelques siècles ou quelques millénaires, fait de GRB 221009A un évènement tout à fait mémorable. Et ce d'autant plus si on considère que pour être détectable, un GRB doit être orienté vers la Terre. Sa détection pourrait relever de la chance, et cette chance est saisie par les scientifiques pour en apprendre plus sur les modèles et les GRB.

GRB 221009A a notamment permis de faire des avancées remarquables sur la compréhension du phénomène de sursaut gamma :

- Il a confirmé la présence d'une sous-classe de GRB très énergétiques, et questionné l'existence d'une énergie limite capable d'être produite par un sursaut gamma. Cette énergie limite n'a pas été remise en cause à ce jour malgré la puissance de GRB 221009A ;
- Sa grande luminosité et sa formidable énergie ont notamment été décorrélés de sa galaxie hôte, confirmant que les particularités des sursauts gamma ne sont pas nécessairement liées à leur environnement ;
- La présence d'une supernova n'est pas confirmée malgré son bilan énergétique fort ;
- Le bilan énergétique exceptionnel de GRB 221009A implique un facteur de Lorentz important ( $\Gamma > 100$ ), donc un angle d'ouverture du jet relativiste très faible.
- La particularité de sa phase rémanente ouvre d'autres possibilités vis-à-vis du modèle de « boule-de-feu » :
  - Une rupture de pente tardive du spectre rémanent, et à des temps différents suivant les fréquences, impliquerait des mécanismes d'émissions différents ;
  - L'émission synchrotron seule ne permet pas d'expliquer les observations. Les émissions de trois chocs différents pourraient être une explication pour traduire l'allure des spectres dans certaines fréquences. Le premier choc intervient à la décélération du jet dans le milieu interstellaire. Il est associé à un choc retour dirigé vers le jet produisant également un rayonnement. Un troisième choc serait nécessaire mais son mécanisme est encore imprécis.
  - Dans ce contexte, les astrophysiciens ont pu confronter une structure de jet biphasique : Le jet collimaté serait la source principale de l'émission prompte et de la rémanence (lors du choc avant) par diffusion synchrotron et synchrotron self-Compton. Cette partie centrale du jet est entourée d'un jet contenant plus de protons et d'éléments lourds dans un état moins relativiste. Ce milieu serait responsable de l'émission de rayonnement plutôt dans le domaine X mou et radio par émission synchrotron. Dans cette partie ont lieu des chocs avant et retour.
- Grâce à l'astrophysique multi-messagers, GRB 221009A a permis de poser des limites sur l'émission possible de neutrinos par des sursauts gamma, et également sur l'existence de photons ultra-énergétiques ;
- Les physiciens peuvent également questionner leurs théories de comportement quantique des particules dans des conditions extrêmes.

Le sursaut gamma GRB 221009A est sans nul doute le sursaut le plus lumineux jamais enregistré, mais également celui qui a fait couler le plus d'encre jusqu'à aujourd'hui ! Si l'on compare le nombre de publications relatives à GRB 221009A par rapport à d'autres sursauts gamma célèbres, ceux-ci sont bien plus nombreux (plus de 170 en mai 2025, Figure 40, *Source : Base de données ArXiv.org*).

GRB 221009A détrône notamment GRB 170817 qui est le premier sursaut gamma court faisant intervenir l'observation multi-messager et associant la coalescence de deux étoiles à neutrons par détection d'ondes gravitationnelles.

On pourra également citer GRB 230307A, deuxième sursaut gamma long le plus lumineux, apparemment issu d'une fusion d'étoile à neutrons et non d'un collapsar ; et GRB 130427, troisième plus lumineux.

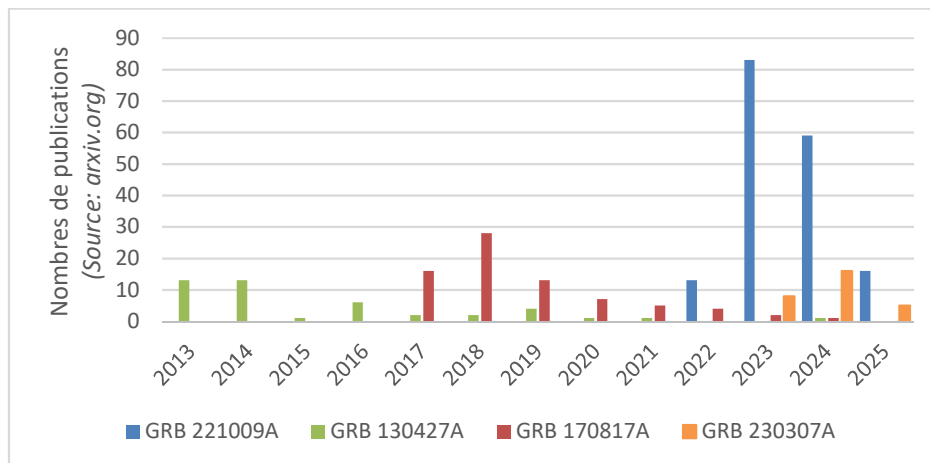


Figure 40 Nombres de publications scientifique associées à différents sursauts gamma marquants (Source: arXiv.org)

D'autres événements exceptionnels sont apparus au fil du temps, remettant en question nos modèles et notre compréhension par des caractéristiques inattendues. Voici quelques exemples notables :

GRB060218 (et SN2006aj) était un sursaut gamma dont la durée était de près de 2 000 s (bien plus longue que les sursauts gamma observés auparavant), et sa galaxie hôte était située à seulement 440 millions d'années-lumière (bien plus près que tous les sursauts observés alors). Ce sursaut était pourtant faiblement énergétique. De plus sa courbe de lumière et la présence d'une composante thermique dans domaine X de son spectre, ont posé de gros défis afin d'y associer la présence d'une supernova.

GRB080319B, également connu sous le nom de « Naked Eye Burst », a été le premier sursaut gamma à avoir une émission optique visible à l'œil nu : avec une magnitude apparente de 5,3, il est resté visible à l'œil humain pendant environ 30 s, battant le record de l'objet le plus lointain observable à l'œil nu.

GRB110328, maintenant appelé « Sw J1644+57 », a d'abord été interprété comme un sursaut gamma, avant d'être reconnu plus tard comme un événement de rupture par effet de marée (*tidal disruption event*, TDE) causé par la destruction d'une étoile par un trou noir supermassif.

Ces exemples, auxquels vient s'ajouter GRB 221009A, font de la recherche sur les sursauts gamma un domaine florissant, qui occupera les astrophysiciens pendant encore plusieurs décennies. De nombreuses missions sol/espace destinées à leurs études sont d'ailleurs toujours en cours ou prévues dans les années à venir. On peut citer entre autres la mission franco-chinoise SVOM (Space-based multi-band astronomical Variable Object Monitor) issu d'une collaboration entre le CNSA et le CNES (<https://www.svom.eu/mission/>). Cette mission a pour objectif d'étudier en particulier les sursauts gamma faiblement énergétiques grâce au télescope ECLAIRs de basse énergie (4-250 keV) à son bord. Cette mission est particulièrement intéressante pour l'étude des sursauts à grand redshift, et donc sonder l'univers ancien.

## Références bibliographiques

---

- Abbasi, R., M. Ackermann, J. Adams, S. K. Agarwalla, N. Aggarwal, J. A. Aguilar, M. Ahlers, et al. 2023. « Limits on Neutrino Emission from GRB 221009A from MeV to PeV Using the IceCube Neutrino Observatory ». *The Astrophysical Journal Letters* 946(1): L26. doi:10.3847/2041-8213/acc077.
- Ahumada, Tomás, Leo P. Singer, Shreya Anand, Michael W. Coughlin, Mansi M. Kasliwal, Geoffrey Ryan, Igor Andreoni, et al. 2021. « Discovery and Confirmation of the Shortest Gamma-Ray Burst from a Collapsar ». *Nature Astronomy* 5(9): 917-27. doi:10.1038/s41550-021-01428-7.
- Amati, L., F. Frontera, M. Tavani, J. J. M. in 't Zand, A. Antonelli, E. Costa, M. Feroci, et al. 2002. « Intrinsic Spectra and Energetics of BeppoSAX Gamma-Ray Bursts with Known Redshifts ». *Astronomy & Astrophysics* 390(1): 81-89. doi:10.1051/0004-6361:20020722.
- Atteia, J.-L., L. Bouchet, J.-P. Dezalay, F. Fortin, O. Godet, S. Guillot, A. Klotz, et al. 2025. « GRB 221009A and the Apparently Most Energetic Gamma-Ray Bursts ». *The Astrophysical Journal* 980(2): 241. doi:10.3847/1538-4357/adadef.
- Atteia, J.-L., V. Heussaff, J.-P. Dezalay, A. Klotz, D. Turpin, A. E. Tsvetkova, D. D. Frederiks, et al. 2017. « The Maximum Isotropic Energy of Gamma-Ray Bursts ». doi:10.3847/1538-4357.
- Axelsson, M., M. Ajello, M. Arimoto, L. Baldini, J. Ballet, M. G. Baring, C. Bartolini, et al. 2024. « GRB 221009A: the B.O.A.T Burst that Shines in Gamma Rays ». doi:10.48550/arXiv.2409.04580.
- Batista, R. Alves, M. A. Amin, G. Barenboim, N. Bartolo, D. Baumann, A. Bauswein, E. Bellini, et al. 2021. « EuCAPT White Paper: Opportunities and Challenges for Theoretical Astroparticle Physics in the Next Decade ». doi:10.48550/arXiv.2110.10074.
- Blanchard, Peter K., V. Ashley Villar, Ryan Chornock, Tanmoy Laskar, Yijia Li, Joel Leja, Justin Pierel, et al. 2023. « JWST Observations of the Extraordinary GRB 221009A Reveal an Ordinary Supernova Without Signs of  $r$ -Process Enrichment in a Low-Metallicity Galaxy ». doi:10.48550/arXiv.2308.14197.
- Bloom, Joshua S. 2022. « Testing a Galactic Lensing Hypothesis with the Prompt Emission of GRB 221009A ». *Research Notes of the AAS* 6(10): 220. doi:10.3847/2515-5172/ac9b5a.
- Bright, Joe S., Lauren Rhodes, Wael Farah, Rob Fender, Alexander J. van der Horst, James K. Leung, David R. A. Williams, et al. 2023. « Precise Measurements of Self-Absorbed Rising Reverse Shock Emission from Gamma-Ray Burst 221009A ». *Nature Astronomy* 7(8): 986-95. doi:10.1038/s41550-023-01997-9.
- Burns, Eric, Dmitry Svinkin, Edward Fenimore, D. Alexander Kann, José Feliciano Agüí Fernández, Dmitry Frederiks, Rachel Hamburg, et al. 2023. « GRB 221009A: The BOAT ». *The Astrophysical Journal Letters* 946(1): L31. doi:10.3847/2041-8213/acc39c.
- Cao, Zhen, F. Aharonian, Q. An, A. Axikegu, Y. X. Bai, Y. W. Bao, D. Bastieri, et al. 2023. « Very High Energy Gamma-Ray Emission beyond 10 TeV from GRB 221009A ». *Science Advances* 9(46): eadj2778. doi:10.1126/sciadv.adj2778.
- Chen, Tong, Yu Gao, Shijie Liu, Ying-nan Mao, et Kechen Wang. 2025. « Limiting on ALP-photon Coupling through GRB221009A ». doi:10.48550/arXiv.2503.18653.
- Cheong, Patrick Chi-Kit, Tetyana Pitik, Luís Felipe Longo Micchi, et David Radice. 2024. « Gamma-Ray Bursts and Kilonovae from the Accretion-Induced Collapse of White Dwarfs ». *arXiv.org*. doi:10.3847/2041-8213/ada1cc.
- Dado, Shlomo, et Arnon Dar. 2022. « The Maximum Isotropic Equivalent Energy Of Gamma Ray Bursts ». *The Astrophysical Journal Letters* 940(1): L4. doi:10.3847/2041-8213/ac98c8.

- Dagoneau, Nicolas. 2020. « Détection de sursauts gamma ultra-longs et traitement d'images embarqué pour le télescope spatial SVOM/ECLAIRs ».
- Dalessi, S., O. J. Roberts, C. Meegan, et Fermi GBM Team. 2023. « GRB 230307A: Fermi GBM Observation of a very bright burst ». *GRB Coordinates Network* 33411: 1.
- de Ugarte Postigo, Izzo, L., Pugliese, G, Xu, D, Schneider, B, Fynbo, J. P. U., Tanvir, N. R, et al. 2022. « GRB 221009A: Redshift from X-shooter/VLT - Astrophysics Data System ». <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2022GCN.32648....1D/abstract> (8 avril 2025).
- de Ugarte Postigo, L. Izzo, C. C. Thoene, J. P. U. Fynbo, J. F. Agui Fernandez, et N. R. Tanvir. 2022. « GRB 221009A: Spectroscopic detection of emerging SN features ». <https://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn3/32800.gcn3> (6 avril 2025).
- Dichiara, S., D. Tsang, E. Troja, D. Neill, J. P. Norris, et Y. H. Yang. 2023. « A Luminous Precursor in the Extremely Bright GRB 230307A ». doi:10.48550/arXiv.2307.02996.
- Du, ZhaoWei, HouJun Lü, Yong Yuan, Xing Yang, et EnWei Liang. 2024. « The Progenitor and Central Engine of a Peculiar GRB 230307A ». *arXiv.org*. <https://arxiv.org/abs/2402.10587v1> (15 avril 2025).
- Duque, Raphaël. 2021. « Compact Object Coalescences and Gamma-Ray Bursts in the Gravitational-Wave Era ».
- Evans, P. A., R. Willingale, J. P. Osborne, P. T. O'Brien, K. L. Page, C. B. Markwardt, S. D. Barthelmy, et al. 2010. « The *Swift* Burst Analyser: I. BAT and XRT Spectral and Flux Evolution of Gamma Ray Bursts ». *Astronomy and Astrophysics* 519: A102. doi:10.1051/0004-6361/201014819.
- Evoli, Carmelo, Dario Grasso, et Luca Maccione. 2007. « Diffuse Neutrino and Gamma-Ray Emissions of the Galaxy above the TeV ». *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* 2007(06): 003-003. doi:10.1088/1475-7516/2007/06/003.
- FERMI Collaboration, M. Axelsson, M. Ajello, M. Arimoto, L. Baldini, J. Ballet, M. G. Baring, et al. 2024. « GRB 221009A: The B.O.A.T Burst That Shines in Gamma Rays ». doi:10.48550/arXiv.2409.04580.
- Finke, Justin, et Soebur Razzaque. 2024. « Is Gamma-Ray Burst 221009A Really a Once-in-10,000 Year Event? » doi:10.48550/arXiv.2407.15940.
- Frederiks, D., D. Svinkin, A. L. Lysenko, S. Molkov, A. Tsvetkova, M. Ulanov, A. Ridnaia, et al. 2023. « Properties of the Extremely Energetic GRB~221009A from Konus-WIND and SRG/ART-XC Observations ». *The Astrophysical Journal Letters* 949(1): L7. doi:10.3847/2041-8213/acd1eb.
- Fulton, M. D., S. J. Smartt, L. Rhodes, M. E. Huber, A. V. Villar, T. Moore, S. Srivastav, et al. 2023. « The Optical Light Curve of GRB 221009A: The Afterglow and the Emerging Supernova ». *The Astrophysical Journal Letters* 946(1): L22. doi:10.3847/2041-8213/acc101.
- Fynbo, J., et D. Malesani. 2007. « GRBs as Probes of Massive Stars Near and Far ». *Proceedings of the International Astronomical Union* 3(S250): 443-56. doi:10.1017/S1743921308020814.
- Galanti, Giorgio, Lara Nava, Marco Roncadelli, Fabrizio Tavecchio, et Giacomo Bonnoli. 2024. « GRB Multi-TeV Detection: Beyond Standard Physics? » doi:10.48550/arXiv.2412.19320.
- Giarratana, S., O. S. Salafia, M. Giroletti, G. Ghirlanda, L. Rhodes, P. Atri, B. Marcote, et al. 2024. « The Expansion of the GRB 221009A Afterglow ». *Astronomy & Astrophysics* 690: A74. doi:10.1051/0004-6361/202348524.
- Gillanders, J. H., et S. J. Smartt. 2025. « Analysis of the JWST spectra of the kilonova AT 2023vfi accompanying GRB 230307A ». doi:10.48550/arXiv.2408.11093.

- Gomboc, A. 2012. « Unveiling the Secrets of Gamma Ray Bursts ». *Contemporary Physics* 53(4): 339-55. doi:10.1080/00107514.2012.701453.
- Granot, Jonathan, et Re'em Sari. 2002. « The Shape of Spectral Breaks in Gamma-Ray Burst Afterglows ». *The Astrophysical Journal* 568(2): 820-29. doi:10.1086/338966.
- H. E. S. S., Collaboration. 2021. « Revealing X-Ray and Gamma Ray Temporal and Spectral Similarities in the GRB 190829A Afterglow ». *Science* 372(6546): 1081-85. doi:10.1126/science.abe8560.
- H. E. S. S., Collaboration, F. Aharonian, F. Ait Benkhali, J. Aschersleben, H. Ashkar, M. Backes, A. Baktash, et al. 2023. « H.E.S.S. Follow-up Observations of GRB221009A ». *The Astrophysical Journal Letters* 946(1): L27. doi:10.3847/2041-8213/acc405.
- Hascoët, Romain. 2023. « Modélisation des sursauts gamma et de leurs rémanences à l'ère des satellites Swift et Fermi ».
- Hayes, Laura A., et Peter T. Gallagher. 2022. « A Significant Sudden Ionospheric Disturbance associated with Gamma-Ray Burst GRB 221009A ». *Research Notes of the AAS* 6(10): 222. doi:10.3847/2515-5172/ac9d2f.
- Jakobsson, P., et J. P. U. Fynbo. 2007. « What Made GRBs 060505 and 060614? » doi:10.48550/arXiv.0704.1421.
- Kalogera, V., C. Kim, D. R. Lorimer, M. Burgay, N. D'Amico, A. Possenti, R. N. Manchester, et al. 2004. « The Cosmic Coalescence Rates for Double Neutron Star Binaries ». *The Astrophysical Journal* 614(2): L137-38. doi:10.1086/425868.
- Kann, D. A., S. Agayeva, V. Aivazyan, S. Alishov, C. M. Andrade, S. Antier, A. Baransky, et al. 2023. « GRANDMA and HXMT Observations of GRB 221009A -- the Standard-Luminosity Afterglow of a Hyper-Luminous Gamma-Ray Burst ». *The Astrophysical Journal Letters* 948(2): L12. doi:10.3847/2041-8213/acc8d0.
- Kim, K. J., S. Y. Kim, D. Paige, J. Grodner, Y. Choi, J. H. Park, Y. K. Kim, et al. 2024. « The GRB221009A Gamma-Ray Burst as Revealed by the Gamma-Ray Spectrometer Onboard the KPLO (Danuri) ». *Scientific Reports* 14(1): 19062. doi:10.1038/s41598-024-69928-w.
- Lan, Lin, He Gao, An Li, Shuo Xiao, Shunke Ai, Zong-Kai Peng, Long Li, et al. 2023. « GRB 221009A: An Ordinary Nearby GRB with Extraordinary Observational Properties ». *The Astrophysical Journal Letters* 949(1): L4. doi:10.3847/2041-8213/accf93.
- Laskar, Tanmoy, Kate D. Alexander, Raffaella Margutti, Tarraneh Eftekhari, Ryan Chornock, Edo Berger, Yvette Cendes, et al. 2023. « The Radio to GeV Afterglow of GRB 221009A ». *The Astrophysical Journal Letters* 946(1): L23. doi:10.3847/2041-8213/acbfad.
- Lesage, S., P. Veres, M. S. Briggs, A. Goldstein, D. Kocevski, E. Burns, C. A. Wilson-Hodge, et al. 2023. « Fermi-GBM Discovery of GRB 221009A: An Extraordinarily Bright GRB from Onset to Afterglow ». *The Astrophysical Journal Letters* 952(2): L42. doi:10.3847/2041-8213/ace5b4.
- Levan, A., B. P. Gompertz, O. S. Salafia, M. Bulla, E. Burns, K. Hotokezaka, L. Izzo, et al. 2023. « JWST Detection of Heavy Neutron Capture Elements in a Compact Object Merger ». *arXiv.org*. doi:10.1038/s41586-023-06759-1.
- Levan, A. J., G. P. Lamb, B. Schneider, J. Hjorth, T. Zafar, A. de Ugarte Postigo, B. Sargent, et al. 2023. « The First JWST Spectrum of a GRB Afterglow: No Bright Supernova in Observations of the Brightest GRB of All Time, GRB 221009A ». *The Astrophysical Journal Letters* 946(1): L28. doi:10.3847/2041-8213/acc2c1.
- LHAASO, Collaboration. 2023. « A tera-electronvolt afterglow from a narrow jet in an extremely bright gamma-ray burst 221009A ». *Science* 380(6652): 1390-96. doi:10.1126/science.adg9328.

- LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration, B. P. Abbott, R. Abbott, T. D. Abbott, F. Acernese, K. Ackley, C. Adams, et al. 2017. « GW170817: Observation of Gravitational Waves from a Binary Neutron Star Inspiral ». *Physical Review Letters* 119(16): 161101. doi:10.1103/PhysRevLett.119.161101.
- Maiolo, Aurélia. 2024. « Les instruments spatiaux ECLAIRs et GRM de SVOM: étalonnage en orbite et analyse spectrale des sursauts gamma ».
- Malesani, D. B., A. J. Levan, L. Izzo, A. de Ugarte Postigo, G. Ghirlanda, K. E. Heintz, D. A. Kann, et al. 2025. « The Brightest GRB Ever Detected: GRB 221009A as a Highly Luminous Event at  $z = 0.151$  ». doi:10.48550/arXiv.2302.07891.
- Moradi, R., C. W. Wang, B. Zhang, Y. Wang, S.-L. Xiong, S.-X. Yi, W.-J. Tan, M. Karlica, et S.-N. Zhang. 2024. « Temporal and Spectral Analysis of the Unique and Second Brightest Gamma-Ray Burst GRB 230307A: Insights from GECAM and Fermi/GBM Observations ». doi:10.48550/arXiv.2410.17189.
- Navia, Carlos, Marcel Oliveira, B. Felicio, et Andre Nepomuceno. 2024. « On the Origin of the Gamma-Ray Burst GRB221009A ». doi:10.48550/arXiv.2410.18131.
- Negro, Michela, Niccoló Di Lalla, Nicola Omodei, Péter Veres, Stefano Silvestri, Alberto Manfreda, Eric Burns, et al. 2023. « The IXPE view of GRB 221009A ». *The Astrophysical Journal Letters* 946(1): L21. doi:10.3847/2041-8213/acba17.
- O'Connor, B., E. Troja, G. Ryan, P. Beniamini, H. van Eerten, J. Granot, S. Dichiara, et al. 2023. « A structured jet explains the extreme GRB 221009A ». doi:10.48550/arXiv.2302.07906.
- Pe'er, Asaf. 2024. « Gamma-Ray Bursts: What Do We Know Today That We Did Not Know 10 Years Ago? » doi:10.48550/arXiv.2412.18681.
- Pe'er, Asaf, et Bing Zhang. 2024. « Physical Conditions That Lead to the Detection of the Pair Annihilation Line in the BOAT GRB221009A ». doi:10.48550/arXiv.2407.16241.
- Pian, E., L. Amati, L. A. Antonelli, R. C. Butler, E. Costa, G. Cusumano, J. Danziger, et al. 2000. « BEPOSAX Observations of GRB 980425: Detection of the Prompt Event and Monitoring of the Error Box ». *The Astrophysical Journal* 536: 778-87. doi:10.1086/308978.
- Piersanti, Mirko, Pietro Ubertini, Roberto Battiston, Angela Bazzano, Giulia D'Angelo, James G. Rodi, Piero Diego, et al. 2023. « Evidence of an Upper Ionospheric Electric Field Perturbation Correlated with a Gamma Ray Burst ». *Nature Communications* 14(1): 7013. doi:10.1038/s41467-023-42551-5.
- Piran, Tsvi, et Dmitry D. Ofengeim. 2024. « Lorentz Invariance Violation Limits from GRB 221009A ». doi:10.48550/arXiv.2308.03031.
- Piron, Frédéric. 2016. « Gamma-Ray Bursts at High and Very High Energies ». *Comptes Rendus. Physique* 17(6): 617-31. doi:10.1016/j.crhy.2016.04.005.
- Rastinejad, Jillian C., Benjamin P. Gompertz, Andrew J. Levan, Wen-fai Fong, Matt Nicholl, Gavin P. Lamb, Daniele B. Malesani, et al. 2022. « A Kilonova Following a Long-Duration Gamma-Ray Burst at 350 Mpc ». *Nature* 612(7939): 223-27. doi:10.1038/s41586-022-05390-w.
- Rhodes, L, A J van der Horst, J S Bright, J K Leung, G E Anderson, R Fender, J F Agúí Fernandez, et al. 2024. « Rocking the BOAT: The Ups and Downs of the Long-Term Radio Light Curve for GRB 221009A ». *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 533(4): 4435-49. doi:10.1093/mnras/stae2050.
- Ripa, Jakub. 2011. « Statistical Analysis of the Observable Data of Gamma-Ray Bursts ». arXiv. <http://arxiv.org/abs/1105.2467> (2 avril 2025).

- Ripa, Jakub, Hiromitsu Takahashi, Yasushi Fukazawa, Norbert Werner, Filip Munz, Andras Pal, Masanori Ohno, et al. 2023. « The peak-flux of GRB 221009A measured with GRBAlpha ». *Astronomy & Astrophysics* 677: L2. doi:10.1051/0004-6361/202346128.
- Rossi, A., B. Rothberg, E. Palazzi, D. A. Kann, P. D'Avanzo, L. Amati, S. Klose, et al. 2022. « The Peculiar Short-Duration GRB 200826A and Its Supernova\* ». *The Astrophysical Journal* 932(1): 1. doi:10.3847/1538-4357/ac60a2.
- Sari, Re'em, Tsvi Piran, et J. P. Halpern. 1999. « Jets in Gamma-Ray Bursts ». *The Astrophysical Journal* 519: L17-20. doi:10.1086/312109.
- Sari, Re'em, Tsvi Piran, et Ramesh Narayan. 1998. « Spectra and Light Curves of Gamma-Ray Burst Afterglows ». *The Astrophysical Journal* 497(1): L17-20. doi:10.1086/311269.
- Sato, Yuri, Kaori Obayashi, B. Theodore Zhang, Shuta J. Tanaka, Kohta Murase, Yutaka Ohira, et Ryo Yamazaki. 2023. « Synchrotron self-compton emission in the two-component jet model for gamma-ray bursts ». *Journal of High Energy Astrophysics* 37: 51-61. doi:10.1016/j.jheap.2022.12.004.
- Sears, Huei, Ryan Chornock, Peter Blanchard, Raffaella Margutti, V. Ashley Villar, Justin Pierel, Patrick J. Vallely, et al. 2025. « Late-time HST and JWST Observations of GRB 221009A: Evidence for a Break in the Light Curve at 50 Days ». doi:10.48550/arXiv.2412.02663.
- Sharma, Ankur. 2024. « Multi-Messenger Connection in High-Energy Neutrino Astronomy ». *Universe* 10(8): 326. doi:10.3390/universe10080326.
- Soderberg, Alicia M. 2006. « A Multi-wavelength Perspective on the GRB-SN Connection ». In , 227-02. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2006AAS...20922702S> (27 avril 2025).
- Spurio, M. 2014. « Gamma-rays, Neutrinos and Particle Astronomy as Messengers of the Universe ». *Acta Polytechnica CTU Proceedings* 1: 13-19. doi:10.14311/APP.2014.01.0013.
- Tak, Donggeun, Z. Lucas Uhm, Gregory S. H. Paek, Myungshin Im, Makoto Arimoto, Hyeonho Choi, Sophia Kim, et al. 2025. « Multiwavelength Afterglow Analysis of GRB 221009A: Unveiling the Evolution of a Cooling Break in a Wind-like Medium ». *The Astrophysical Journal* 978(1): 29. doi:10.3847/1538-4357/ad94f4.
- Tavani, M., G. Piano, A. Bulgarelli, L. Foffano, A. Ursi, F. Verrecchia, C. Pittori, et al. 2023. « AGILE gamma-ray detection of the exceptional GRB 221009A ». *The Astrophysical Journal Letters* 956(1): L23. doi:10.3847/2041-8213/accaff.
- The Cherenkov Telescope Array, Consortium, H. Abdalla, H. Abe, F. Acero, A. Acharyya, R. Adam, I. Agudo, et al. 2021. « Sensitivity of the Cherenkov Telescope Array for probing cosmology and fundamental physics with gamma-ray propagation ». *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* 2021(02): 048-048. doi:10.1088/1475-7516/2021/02/048.
- The LHAASO collaboration. 2024. « Stringent Tests of Lorentz Invariance Violation from LHAASO Observations of GRB 221009A ». *Physical Review Letters* 133(7): 071501. doi:10.1103/PhysRevLett.133.071501.
- Troja, E., A. R. King, P. T. O'Brien, N. Lyons, et G. Cusumano. 2008. « Different progenitors of short hard gamma-ray bursts ». *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters* 385(1): L10-14. doi:10.1111/j.1745-3933.2007.00421.x.
- Tsvetkova, A., D. Frederiks, S. Golenetskii, A. Lysenko, P. Oleynik, V. Pal'shin, D. Svinkin, et al. 2017. « The Konus-Wind Catalog of Gamma-Ray Bursts with Known Redshifts. I. Bursts Detected in the Triggered Mode ». *The Astrophysical Journal* 850: 161. doi:10.3847/1538-4357/aa96af.

- Usov, V. V. 1992. « Millisecond Pulsars with Extremely Strong Magnetic Fields as a Cosmological Source of  $\gamma$ -Ray Bursts ». *Nature* 357(6378): 472-74. doi:10.1038/357472a0.
- Vigliano, Alessandro Armando, et Francesco Longo. 2024. « Gamma-Ray Bursts: 50 Years and Counting! » doi:https://doi.org/10.3390/universe10020057.
- Wang, Xiangyu Ivy, Yun-Wei Yu, Jia Ren, Jun Yang, Ze-Cheng Zou, et Jin-Ping Zhu. 2024. « What Powered the Kilonova-Like Emission After GRB 230307A in the Framework of a Neutron Star-White Dwarf Merger? » *arXiv.org*. doi:10.3847/2041-8213/ad2df6.
- Watson, D., J. P. U. Fynbo, C. C. Thöne, et J. Sollerman. 2007. « No Supernovae Detected in Two Long-Duration Gamma-Ray Bursts ». *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 365(1854): 1269-75. doi:10.1098/RSTA.2006.1994.
- Waxman, Eli, et John Bahcall. 1997. « High Energy Neutrinos from Cosmological Gamma-Ray Burst Fireballs ». *Physical Review Letters* 78(12): 2292-95. doi:10.1103/PhysRevLett.78.2292.
- Wei, Yu-Jia, Jia Ren, Hao-Ning He, Yuan-Pei Yang, Da-Ming Wei, Zi-Gao Dai, et B. Theodore Zhang. 2024. « A Novel Model for the MeV Emission Line in GRB 221009A ». *The Astrophysical Journal Letters* 968(1): L5. doi:10.3847/2041-8213/ad4ce1.
- Williams, Maia A., Jamie A. Kennea, S. Dichiara, Kohei Kobayashi, Wataru B. Iwakiri, Andrew P. Beardmore, P. A. Evans, et al. 2023. « GRB 221009A: Discovery of an Exceptionally Rare Nearby and Energetic Gamma-Ray Burst ». *The Astrophysical Journal Letters* 946(1): L24. doi:10.3847/2041-8213/acbcd1.
- Yang, Jun, Shunke Ai, Bin-Bin Zhang, Bing Zhang, Zi-Ke Liu, Xiangyu Ivy Wang, Yu-Han Yang, et al. 2022. « A Long-Duration Gamma-Ray Burst with a Peculiar Origin ». *Nature* 612(7939): 232-35. doi:10.1038/s41586-022-05403-8.
- Yang, Jun, Xiao-Hong Zhao, Zhenyu Yan, Xiangyu I. Wang, Yan-Qiu Zhang, Zheng-Hua An, Ce Cai, et al. 2023. « Synchrotron Radiation Dominates the Extremely Bright GRB 221009A ». *The Astrophysical Journal Letters* 947(1): L11. doi:10.3847/2041-8213/acc84b.
- Zhang, B. Theodore, Kohta Murase, Kunihito Ioka, Deheng Song, Chengchao Yuan, et Péter Mészáros. 2023. « External Inverse-Compton and Proton Synchrotron Emission from the Reverse Shock as the Origin of VHE Gamma-Rays from the Hyper-Bright GRB 221009A ». *The Astrophysical Journal Letters* 947(1): L14. doi:10.3847/2041-8213/acc79f.
- Zhang, B. Theodore, Kohta Murase, Kunihito Ioka, et Bing Zhang. 2025. « The Origin of Very-High-Energy Gamma-Rays from GRB 221009A: Implications for Reverse Shock Proton Synchrotron Emission ». *Journal of High Energy Astrophysics* 45: 392-408. doi:10.1016/j.jheap.2025.01.007.
- Zhang, Bing. 2024. « On the Duration of Gamma-Ray Bursts ». doi:10.48550/arXiv.2501.00239.
- Zhang, Bing, Xiang-Yu Wang, et Jian-He Zheng. 2024. « The BOAT GRB 221009A: A Poynting-Flux-Dominated Narrow Jet Surrounded by a Matter-Dominated Structured Jet Wing ». doi:10.48550/arXiv.2311.14180.
- Zhang, Bing, et Huirong Yan. 2011. « The Internal-Collision-Induced Magnetic Reconnection and Turbulence (ICMART) Model of Gamma-Ray Bursts ». *The Astrophysical Journal* 726(2): 90. doi:10.1088/0004-637X/726/2/90.
- Zheng, Chao, Yan-Qiu Zhang, Shao-Lin Xiong, Cheng-Kui Li, He Gao, Wang-Chen Xue, Jia-Cong Liu, et al. 2024. « Observation of GRB 221009A Early Afterglow in X-Ray Energy Band ». doi:10.48550/arXiv.2310.10522.

## Bilan des Observations de GRB 221009A – Apports des premiers résultats

---

Les sursauts gamma sont des bouffées de lumière gamma transitoire associée à la coalescence d'objets compacts ou l'effondrement d'étoile supermassive. Leur étude permet de comprendre le fonctionnement de ces phénomènes, d'étudier l'univers lointain, et le comportement des particules et des photons dans des états relativistes extrême. GRB 221009A est le sursaut gamma le plus énergétique et lumineux à ce jour, de deux ordres de grandeur supérieur aux sursauts précédemment détecté. La quantité de donnée reçue dans toutes les fréquences permet d'étudier en profondeur le phénomène, et pose également de nombreuses questions. Nous tenterons ici de faire un état des lieux des observations et des hypothèses avancées pour expliquer GRB 221009A. Nous constaterons notamment que ces données font de lui un évènement extrêmement rare mais précieux car il permet d'alimenter l'étude des mécanismes de jets relativiste pour des sursauts très énergétiques, et alimente des modèles de comportements de particules très énergétiques en état ultra-relativiste. Sa phase rémanente étant toujours détectable, son étude se poursuivra encore quelques années.

---

Mots-clés : Sursaut gamma, GRB, supernova, astronomie gamma

### A review on GRB 221009A observation

---

Gamma-ray bursts are transient phenomena with a pic of gamma-ray light associated with the coalescence of compact objects or the collapse of supermassive stars. Their study allows us to understand these phenomena, to study the distant universe, and the behavior of particles and photons in extreme relativistic states. GRB 221009A is the most energetic and luminous gamma-ray burst to date, by two orders of magnitude greater than previously detected bursts. The amount of data received in all frequencies, allows us to study the phenomenon in-depth, and raises many questions. We will review the observations, and the hypotheses attributed to explain GRB 221009A. This burst is an extremely rare but valuable event. It can fuel the study of relativistic jet mechanisms, of energetic bursts, and feeds models for the study of very high energy gamma-rays. Since its afterglow phase is still detectable, its study will go on for a few more years.

---

Keywords : Gamma-ray burst, GRB, VHE, supernovae

