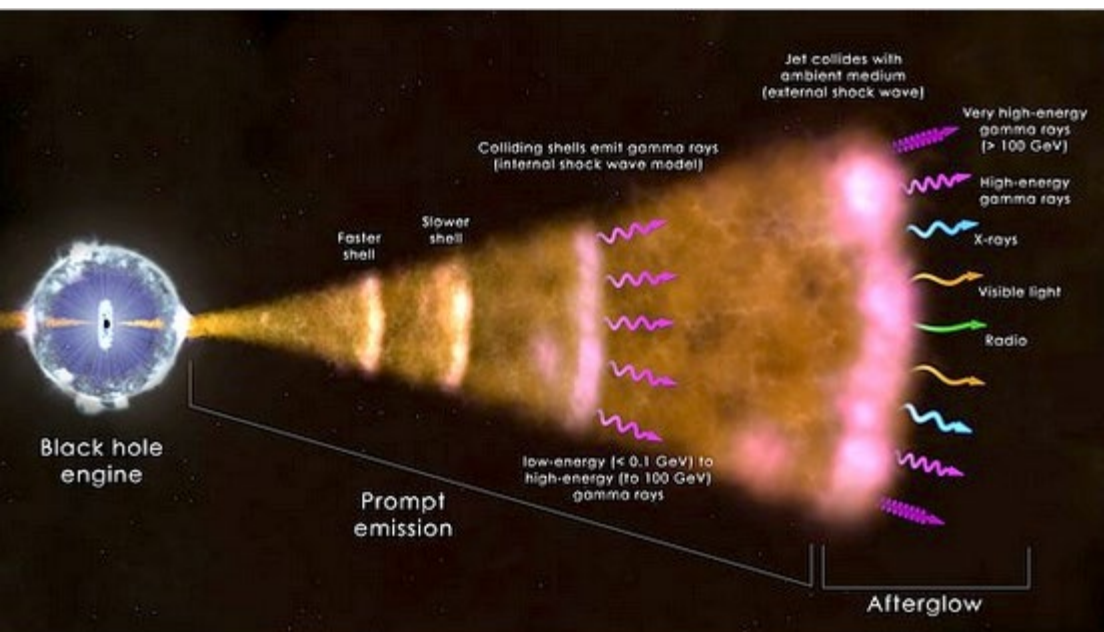




COLLÈGE
DE FRANCE
—1530—

Chaire Galaxies et Cosmologie

Sursauts Gamma (GRB): Théories



Françoise Combes



Diversité des modèles

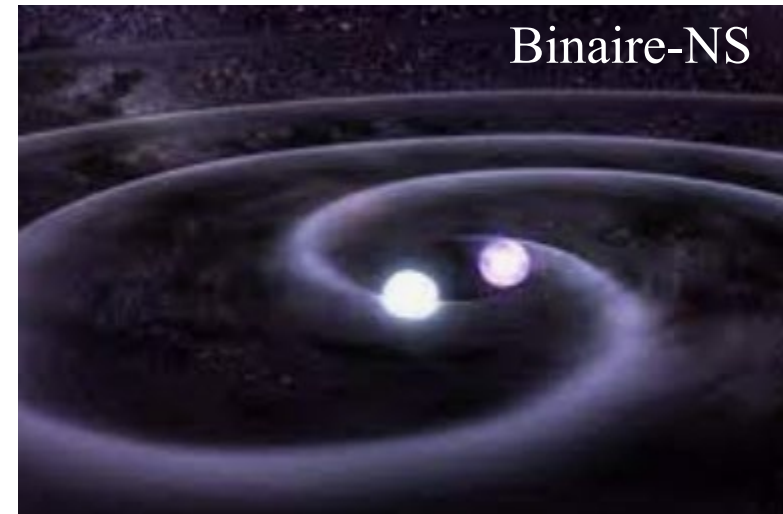
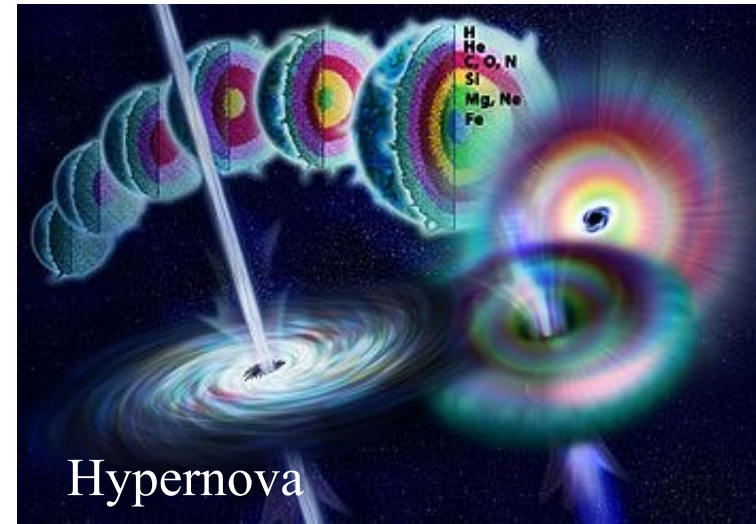
→ Contraintes des observations

→ Deux catégories de sursauts

→ Afterglows et environnement

→ Mécanismes de rayonnement

→ Simulations numériques



Contraintes des observations

Sources cosmologiques: isotropie,
 $N(>f) \sim f^{-3/2}$

Luminosités 10^{48} - 10^{55} erg

Mais cassure de la courbe de lumière \rightarrow jet

\rightarrow Ouverture 2 - 10°

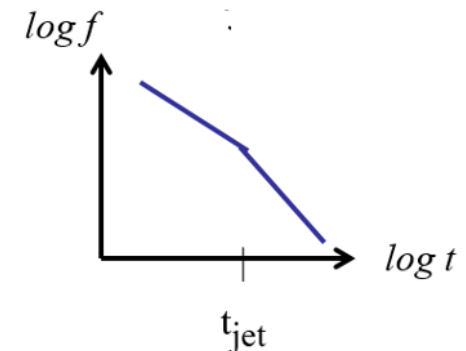
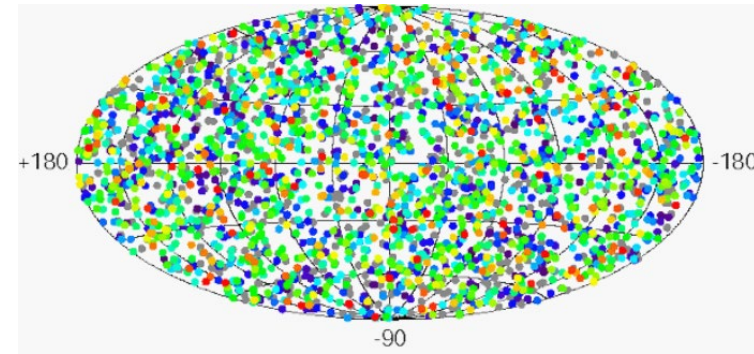
Beaming, réduction de 100 - $10^3 \rightarrow 10^{48}$ - 10^{52} erg

Ultra- relativiste:

V superluminique pour GRB 030329

Γ pas trop petit, pour éviter l'annihilation $\gamma \gamma \rightarrow$ paires $e^- e^+$

Γ plutôt 100 - 700 !



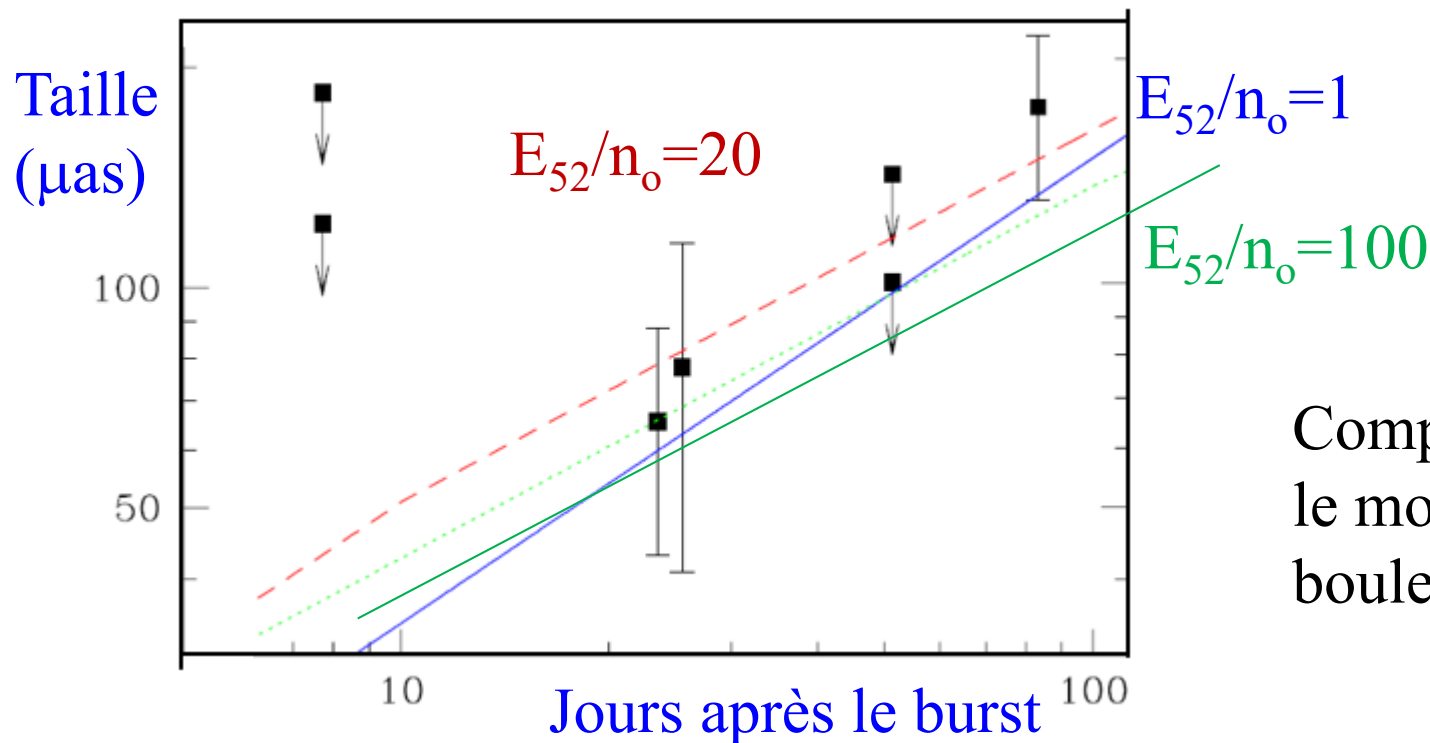
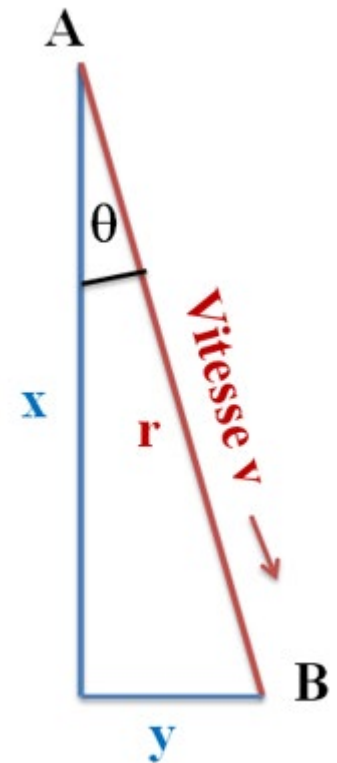
Vitesse superluminique

Un GRB 030329 observé en VLBI ($z=0.1685$)

Flux (cm) 50 fois plus fort que tout autre objet

0.07mas (0.2 pc) 25 j après le burst, et 0.17 mas (0.5 pc)

83 jours après le burst $\rightarrow V=3-5c$



Compatible avec le modèle de la boule de feu

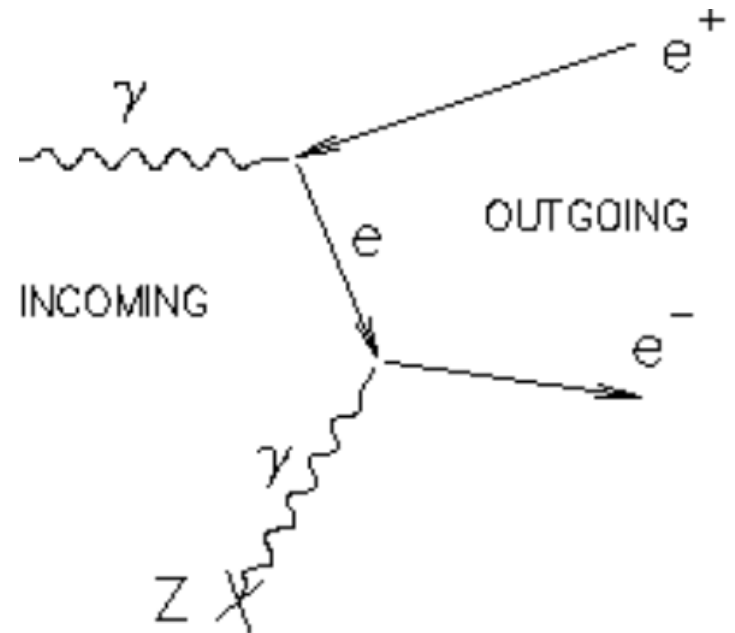
Problème de compacité

Grande variabilité → boule de feu très petite (ms ou 300km)
Flux énorme, grande densité de radiation

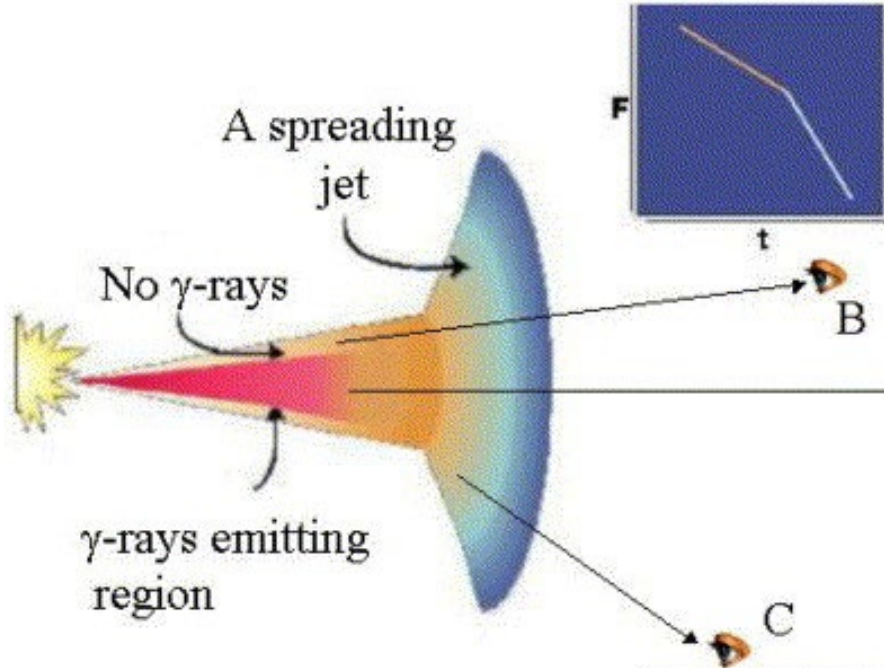
Les rayons de grande énergie (GeV) ne peuvent sortir que si les γ mous ($< \text{MeV}$) n'existent pas → $\Gamma > 100$

Il faut que le milieu
soit optiquement mince vis-à-vis
du processus de formation de
Paires

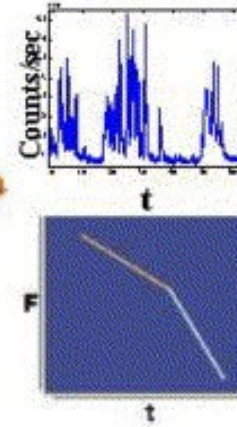
Zou & Piran 2010



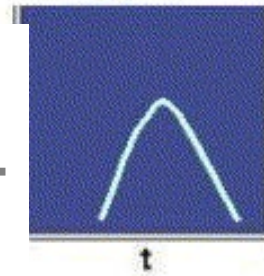
Structure du jet: cassure



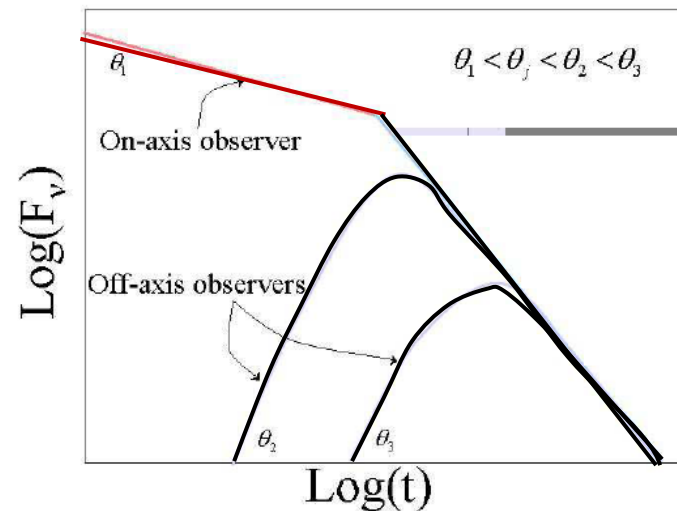
B: pas de gamma + afterglow



A: GRB + afterglow



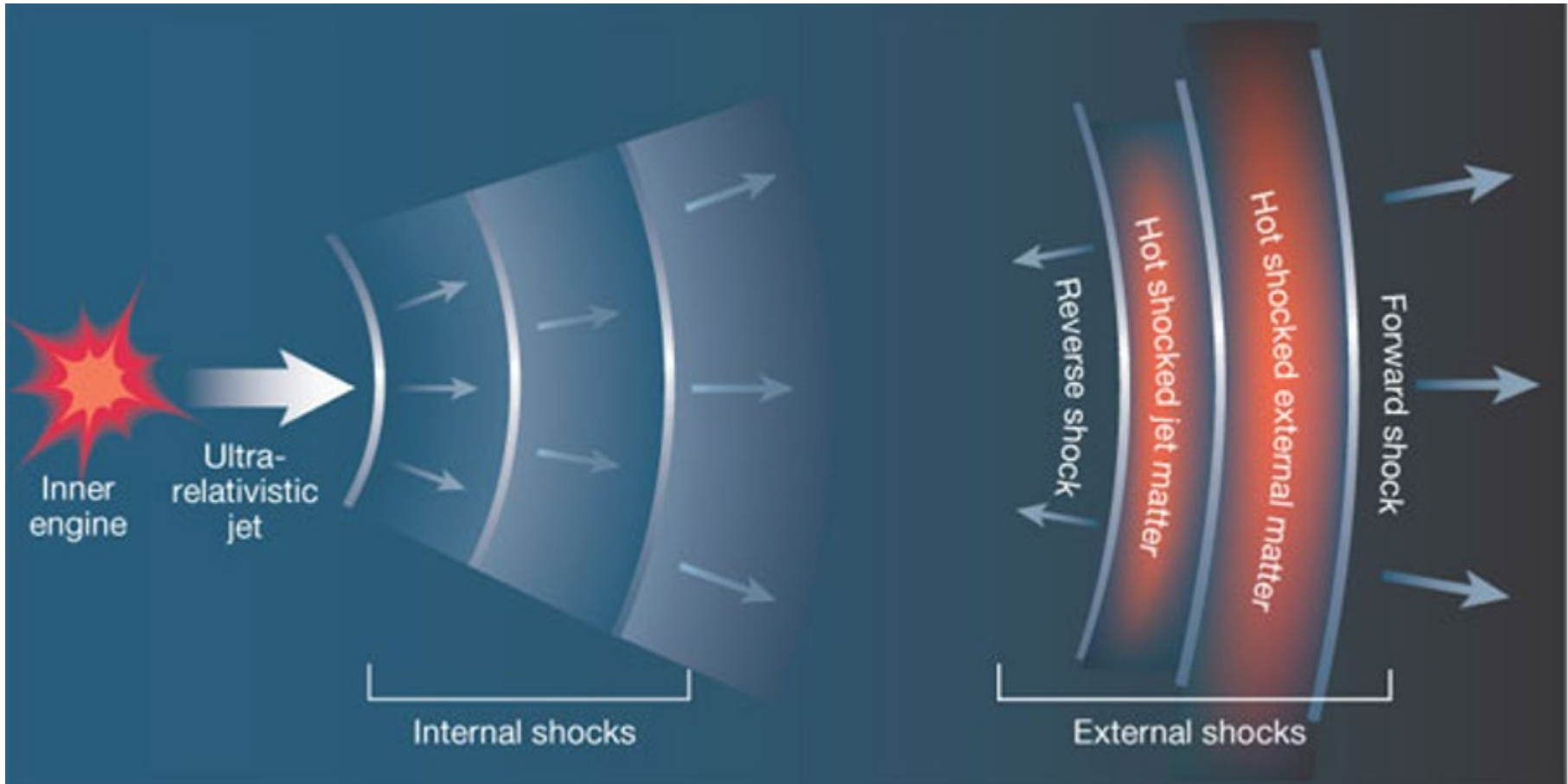
C: observateur off-axis,
Uniquement afterglow,
après la cassure, et expansion du jet



Beaming et Structure du jet

Ondes de choc: internes pour le sursaut principal

Chocs externes: afterglow



Bimodalité des observations

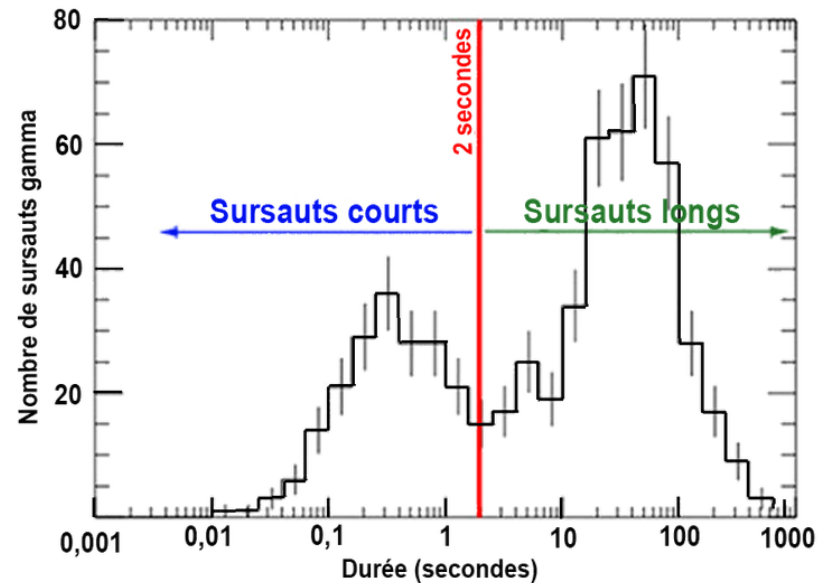
Durée des sursauts: permet de distinguer les deux types de sources (séparation par 2s)

GRB Longs: Hypernovae, ou collapsar

GRB Courts: fusion d'objets compacts

Les deux sont cataclysmiques

L'objet central final peut toutefois prolonger l'action par des vents, jet ultra-relativiste, accréation, chocs, spin-down et perte d'énergie cinétique



GRB longs: effondrement d'une supernova

Etoile très massive $> 50 M_{\odot}$

Cœur de Fer

SN type Ic (WR sans enveloppe)

Forme un trou noir

Galaxies-hôte bleues

Formation d'étoiles

Faible métallicité

Grand $z \sim 9$

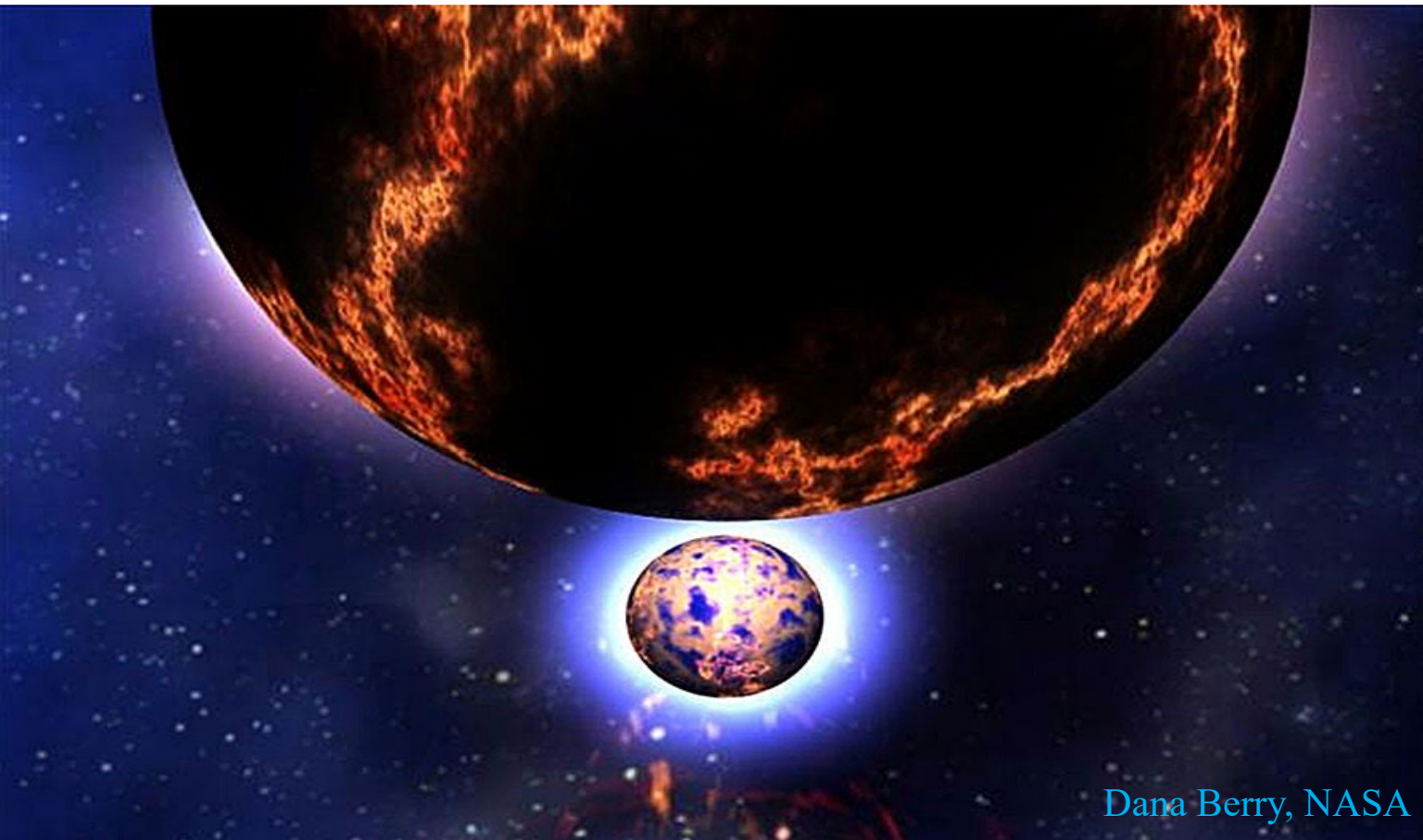
GRB980425/SN1998bw

GRB030329/SN2003dh

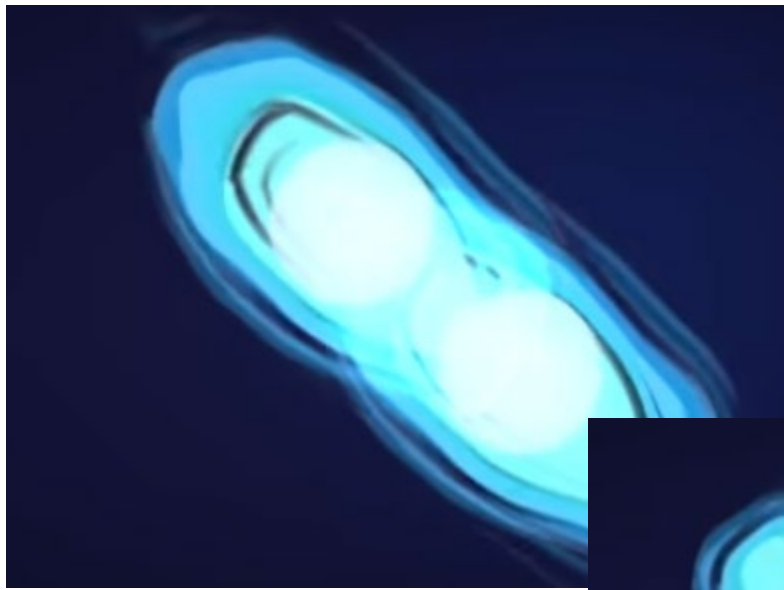
GRBs courts: fusion d'étoiles à neutrons

Moins nombreux que les longs GRBs
Aucune supernova en coincidence
Plus faible redshift < 1.3

Galaxies-hôte
de tous types



GRBs courts: scénario

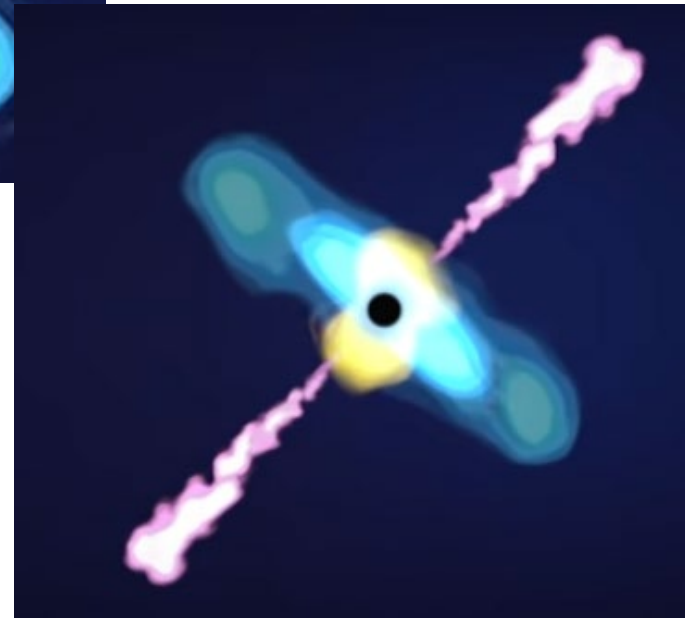


Fusion de deux
étoiles à
neutrons

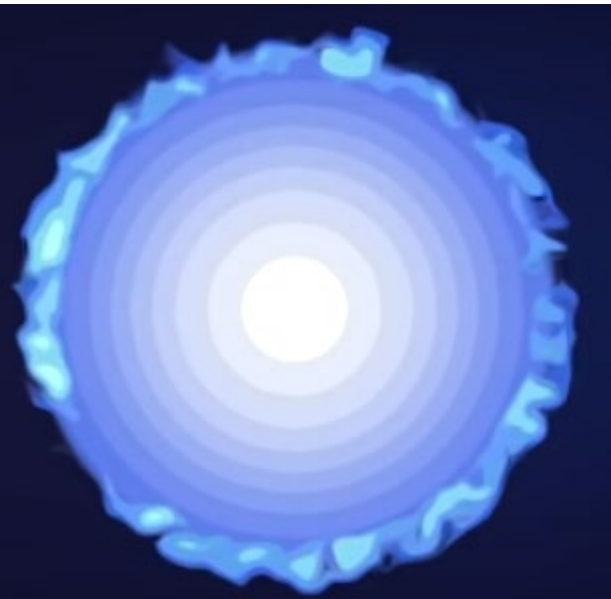


Effondrement
du cœur en
trou noir +
disque d'accrétion

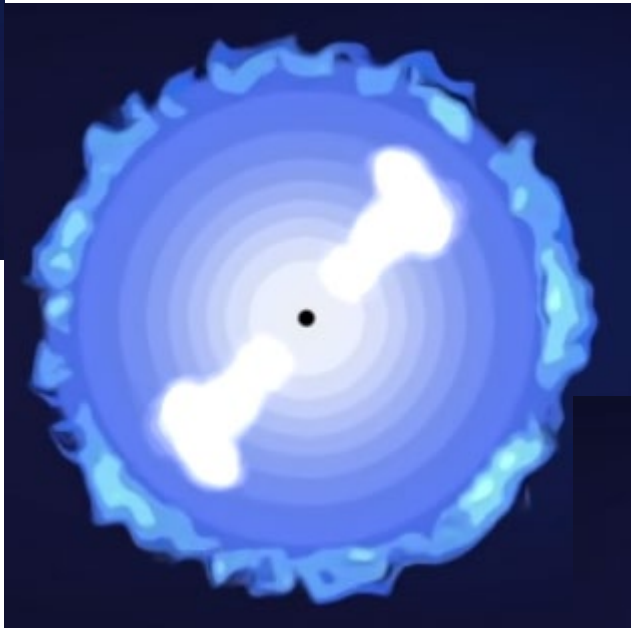
Ejection du jet
de particules
relativistes



GRBs longs: scénario

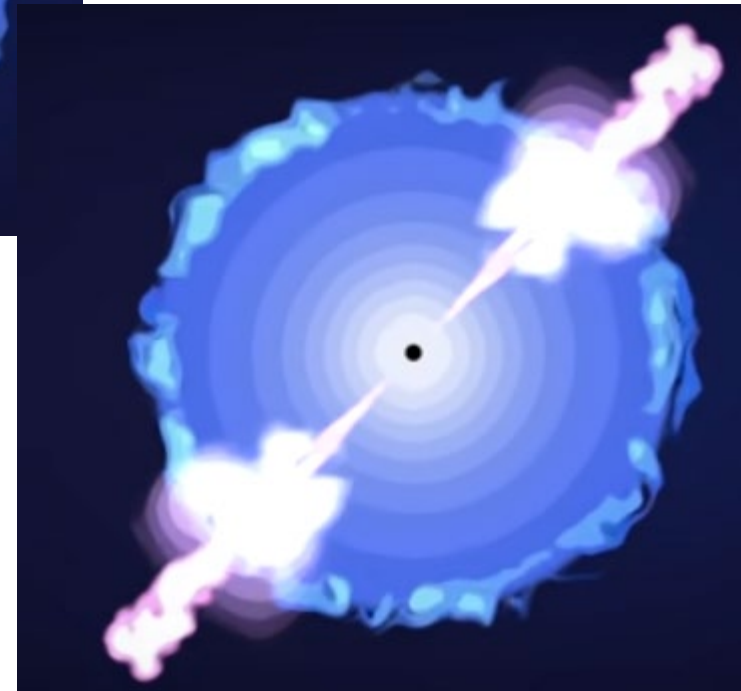


Explosion d'une étoile massive en supernova



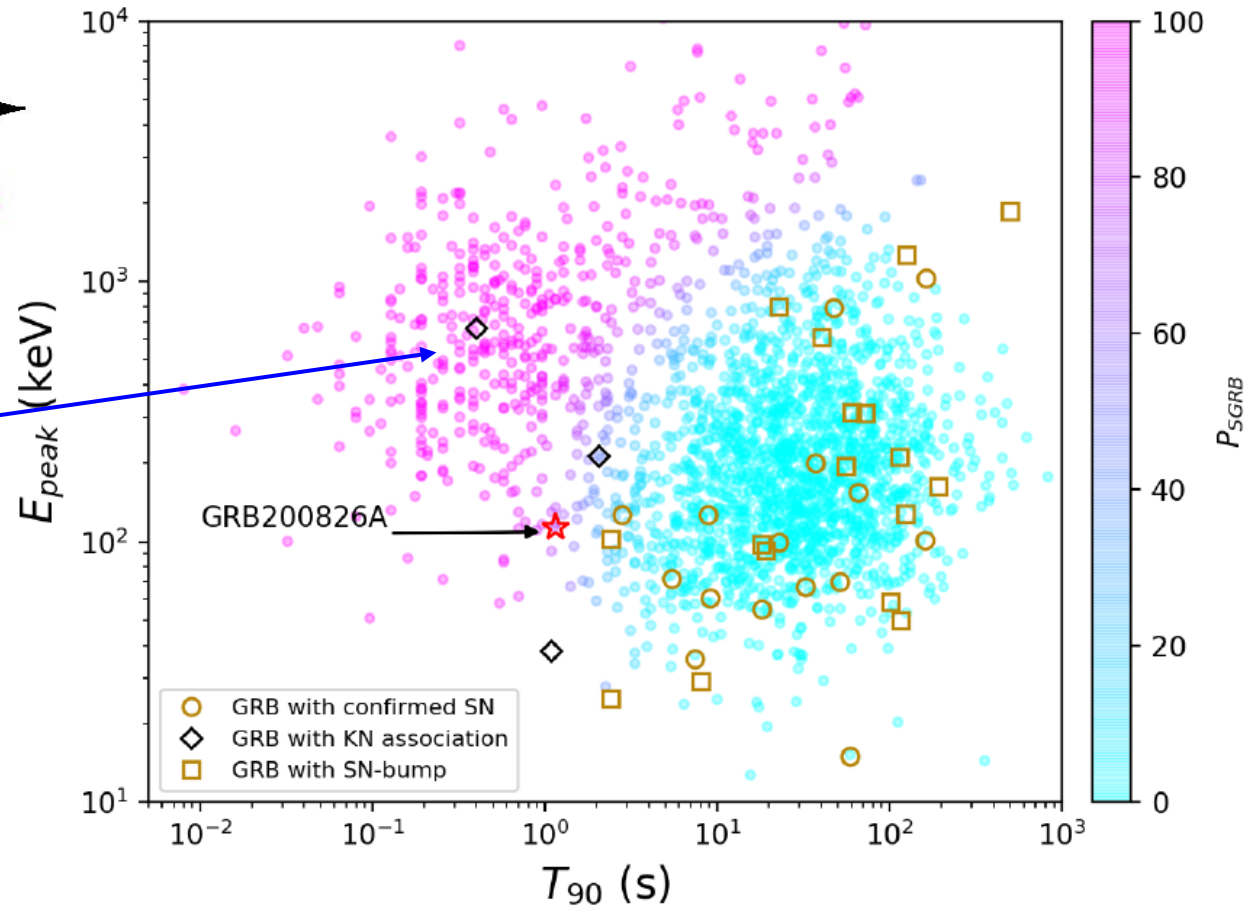
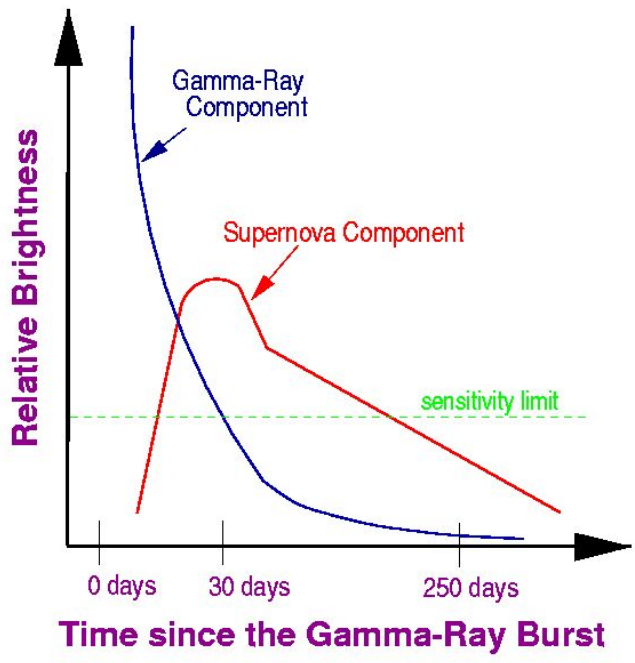
Effondrement du cœur en trou noir

Ejection du jet de particules relativistes au-delà de la nébuleuse



SN: aussi des GRB courts

GRB200826A: court par sa durée $< 1s$,
mais E_{peak} faible



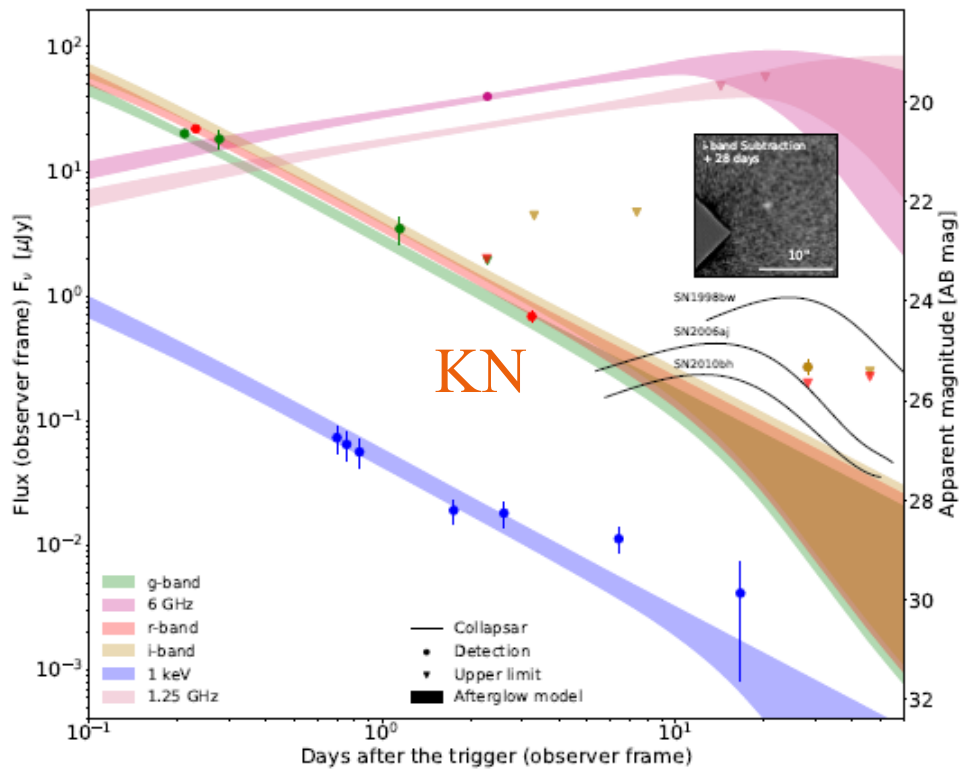
◇ KN Kilonova

SN confirmé par
spectro o ou
bosse □

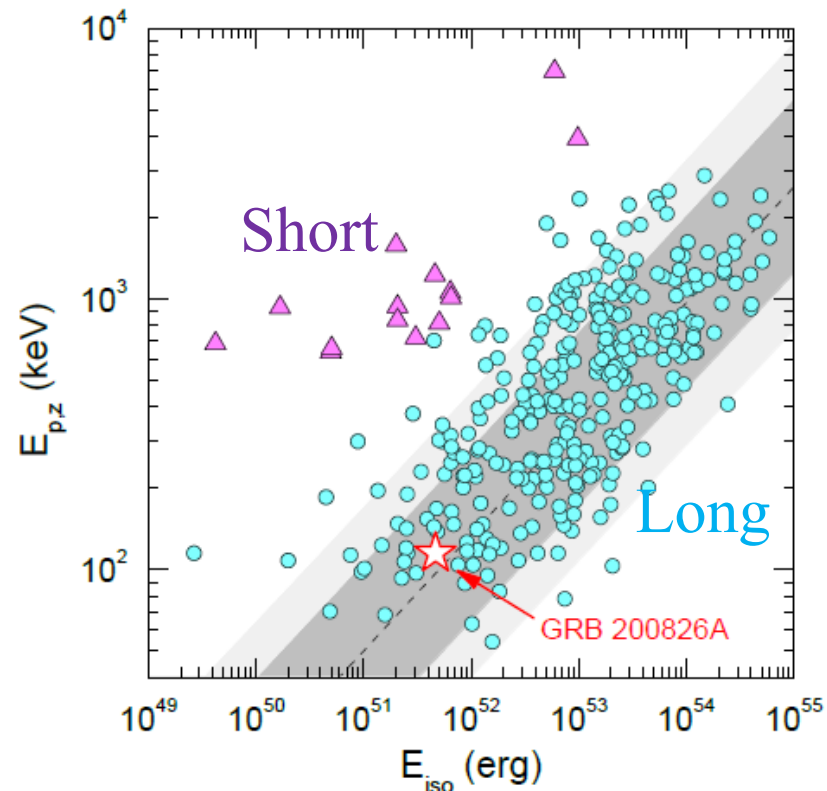
GRB200826A: une supernova

L'afterflow après 10 jours, montre la signature d'une SN
(optique avec GEMINI)

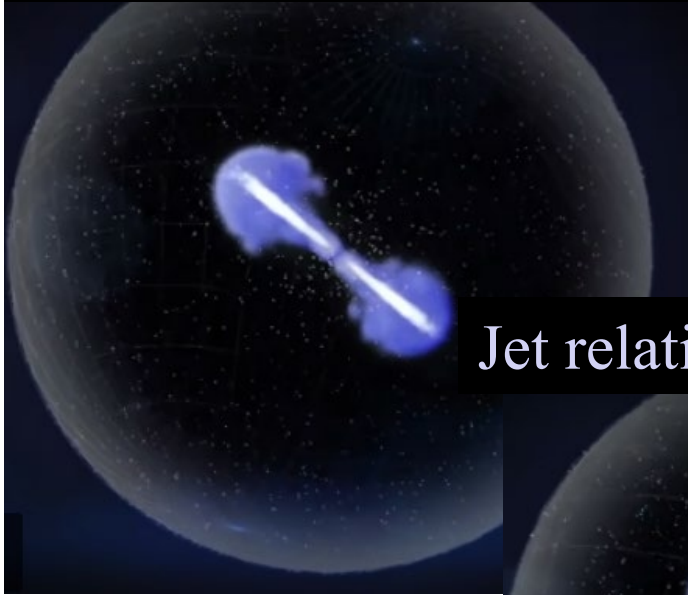
Galaxie hôte identifiée, avec le spectre d'une SN



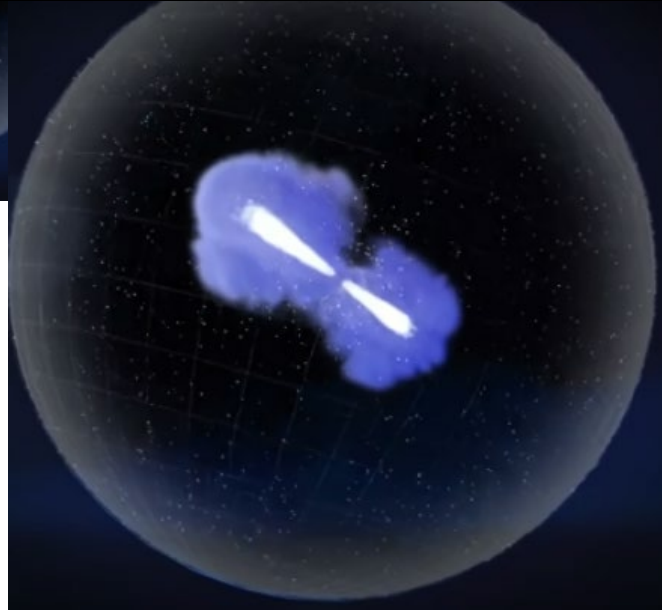
Relation de Amati



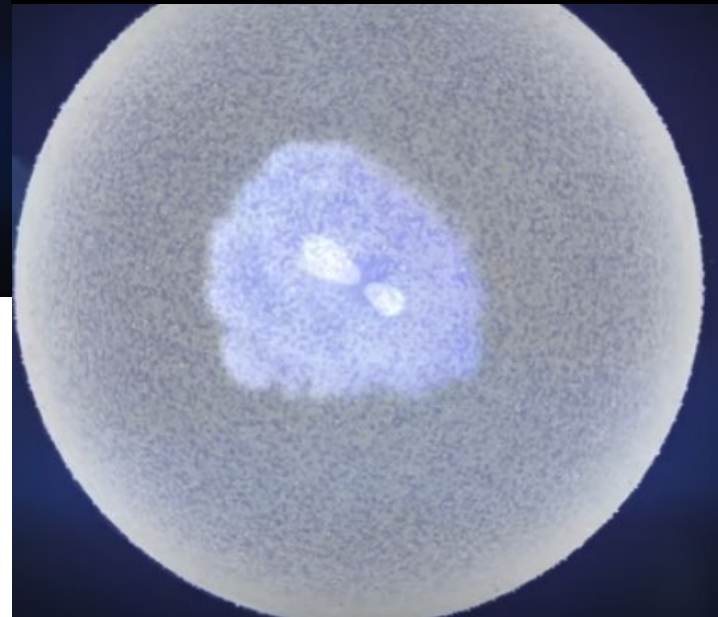
Nébuleuse de supernova



Jet relativiste peu énergétique



Jet perdu pour les rayons γ



Supernova: GRB manqués

Il existe beaucoup plus de SN que de GRB
100 à 1000 fois plus

Même pris en compte le beaming

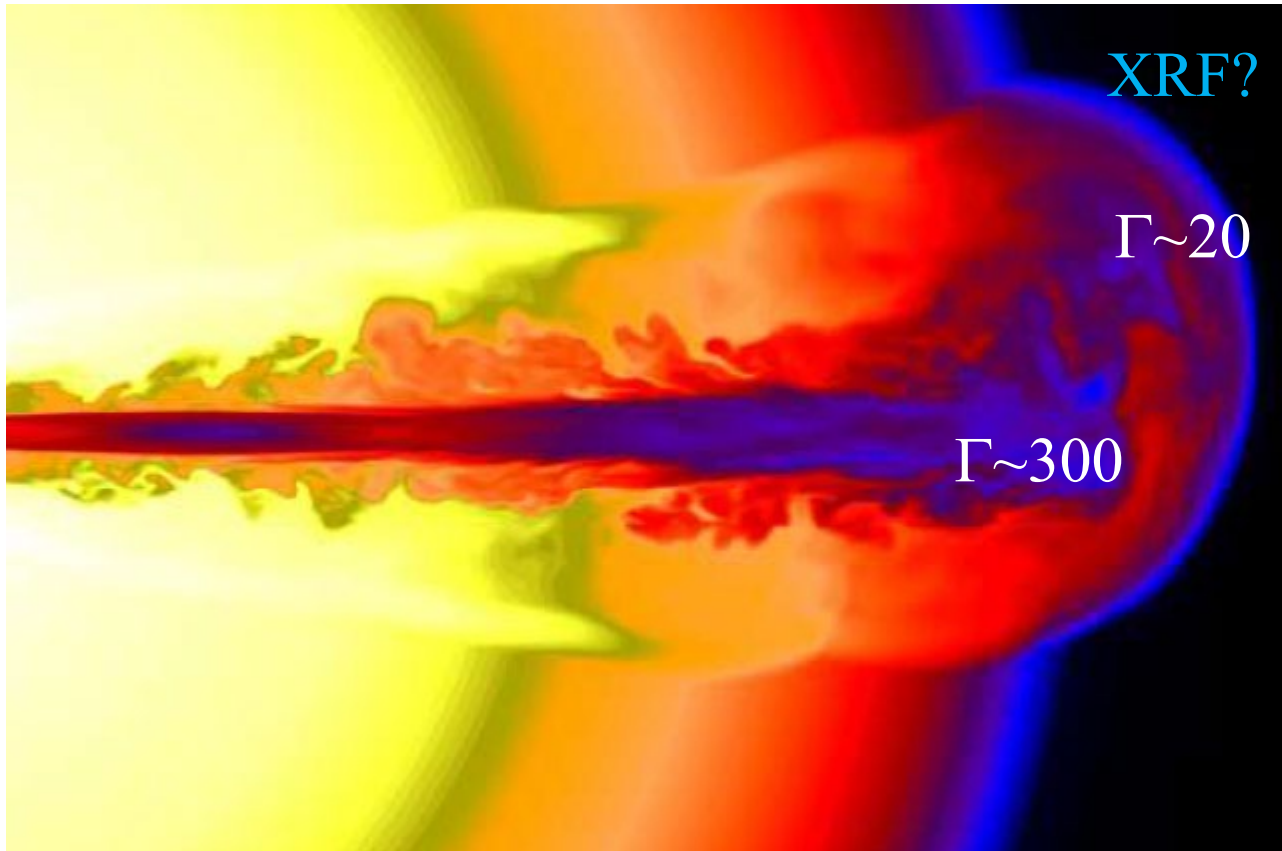
→ Les jets ne sont pas tous
capables de sortir en gamma

Masse, Rotation, Métallicité

Jet sortant d'une étoile Wolf-rayet

WR, $R=10^6$ km Phase (1Myr) de forts vents stellaires
Enveloppes H, He éjectées, SN Ibc
Le cœur s'effondre en trou noir

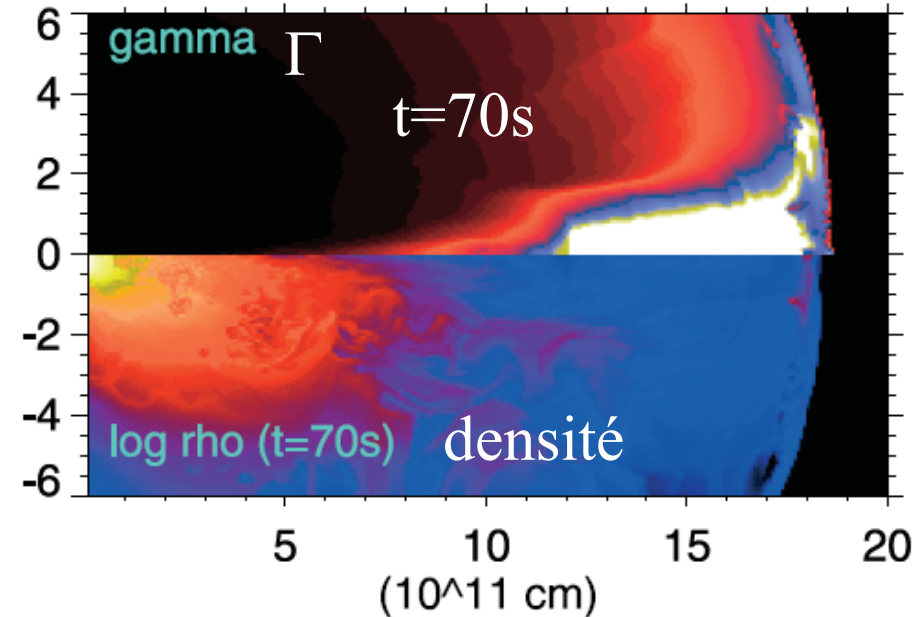
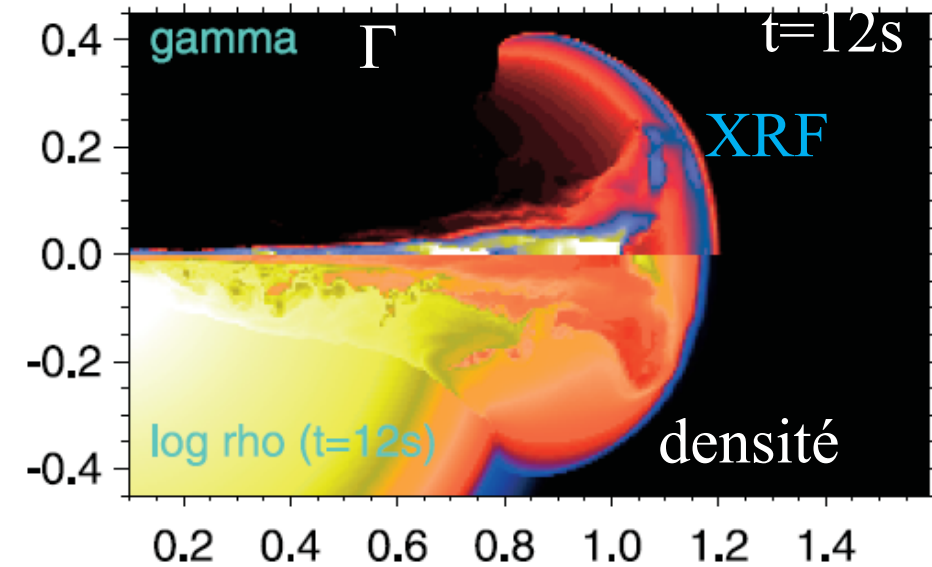
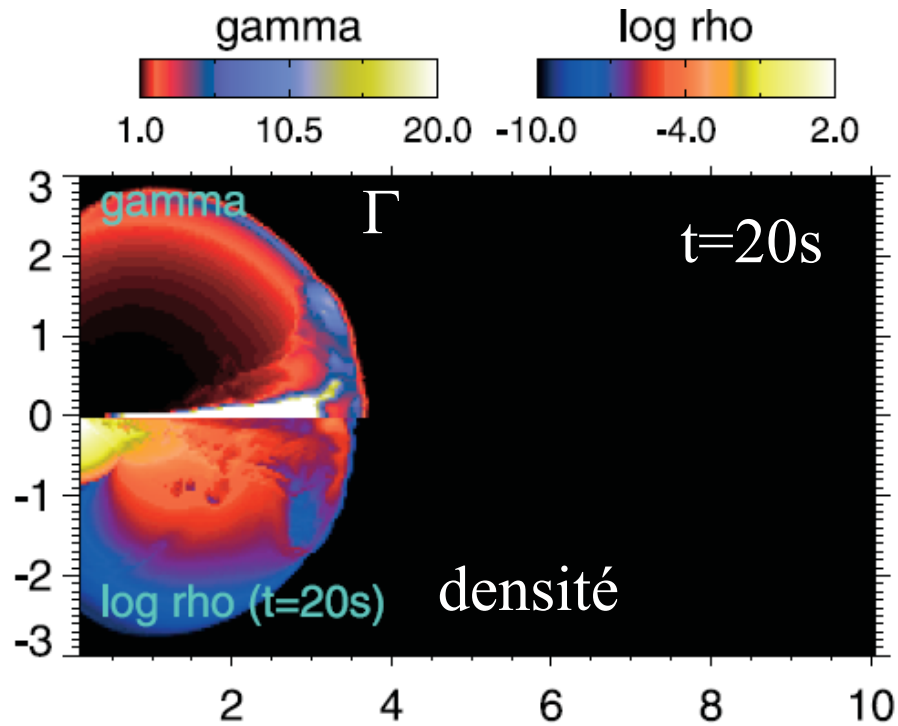
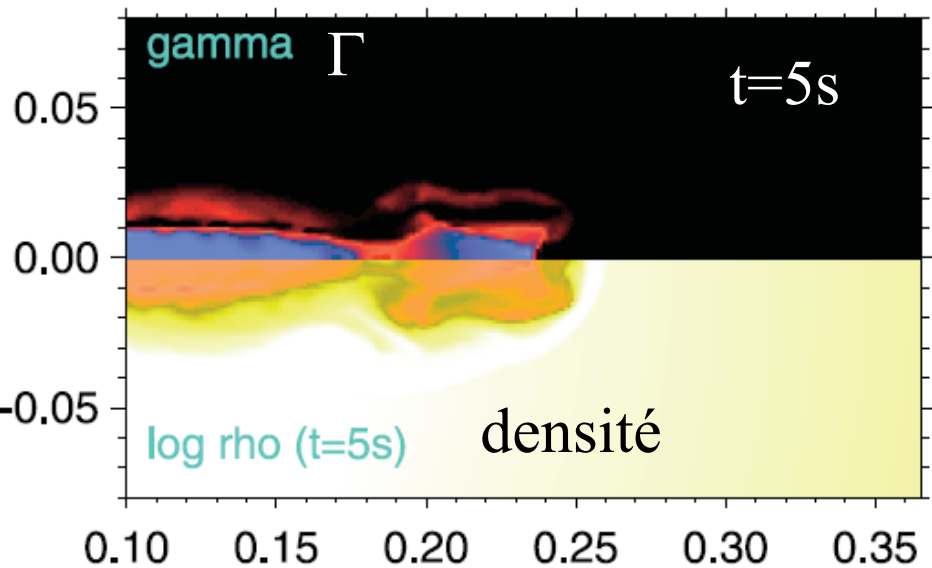
$>20 M_{\odot}$



Pour un GRB,
-- Rotation
-- Masse
-- métallicité faible

Zhang, Woosley, Heger 2004

Model 2A



Certains S-GRB: sursauts de magnétars

Certains se répètent: une 3^{ème} catégorie de GRB?

→ SGR « Soft Gamma-ray Repeaters » 3-4 connus dans la MW

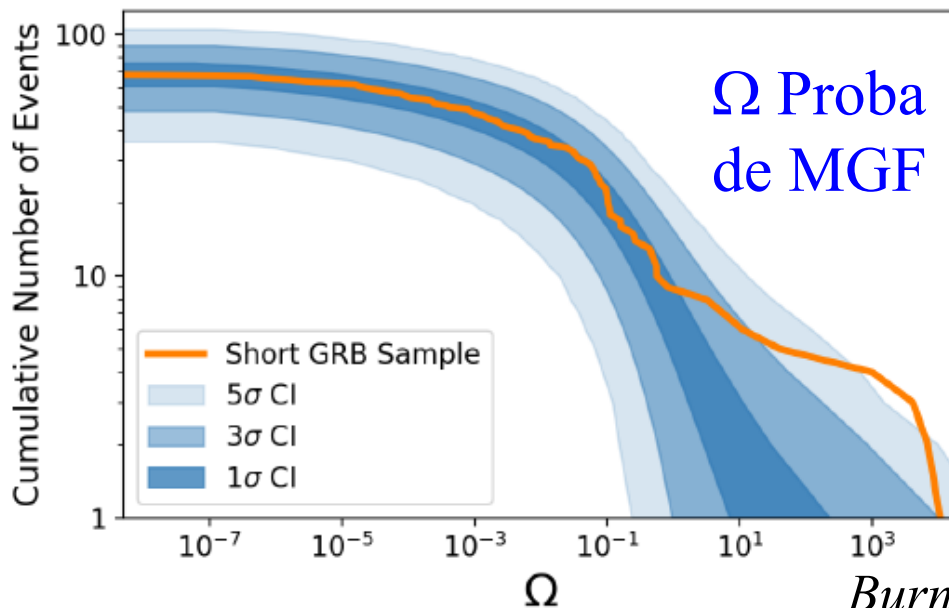
Les magnétars ont des sursauts géants (MGF)

Incompatibles avec une fusion BNS ou BHNS (pas de GW)

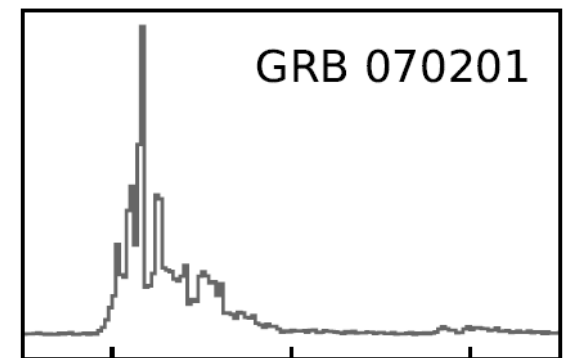
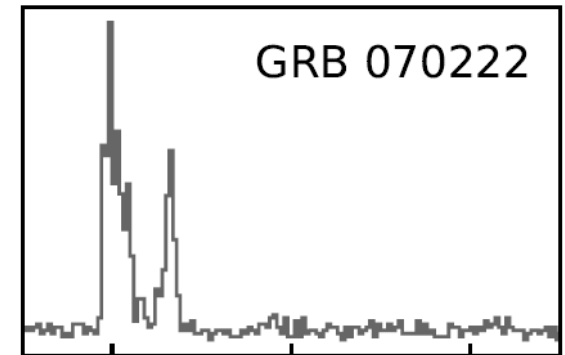
GRB070222 prototype + 4 locaux (<5 Mpc)

Fréquence $3.8 \cdot 10^5 / \text{Gpc}^3 / \text{an}$

→ les plus abondants!

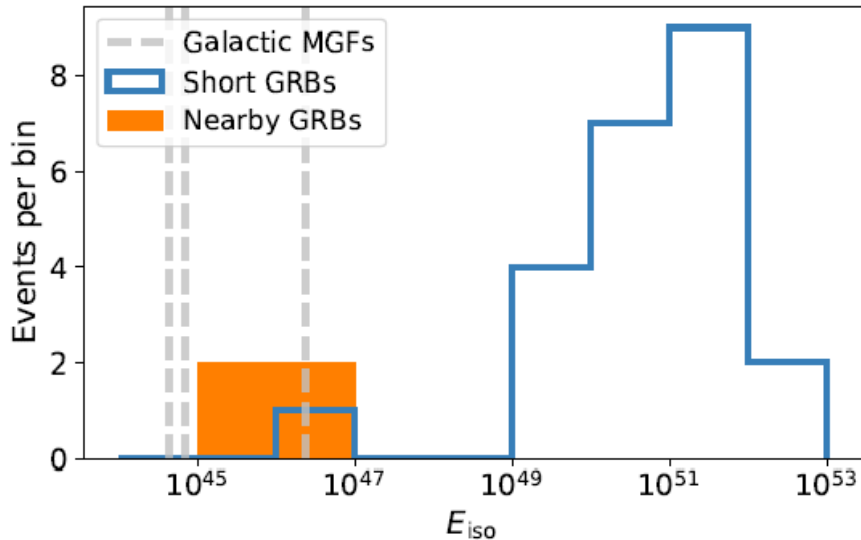
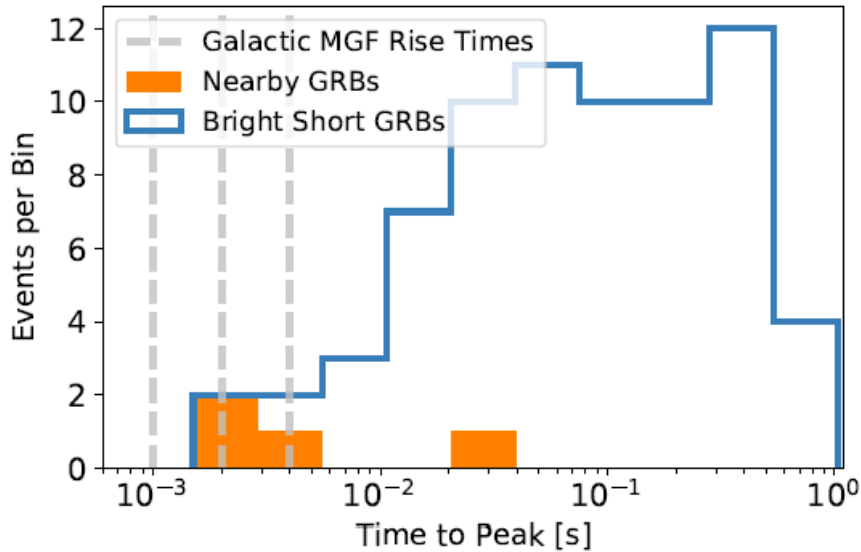


Burns et al 2021



Temps (sec)

Statistiques des S-GRB



4 S-GRB sont des MGF
Incompatibles avec des fusions
d'objets compacts
Population jeune d'étoiles

→ 2% des S-GRB

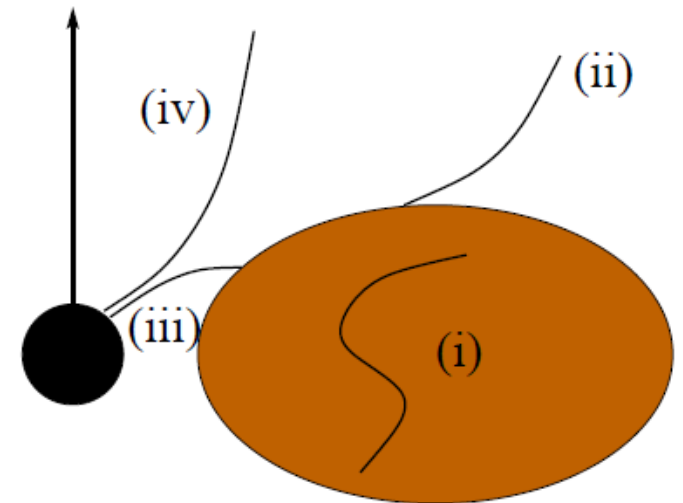
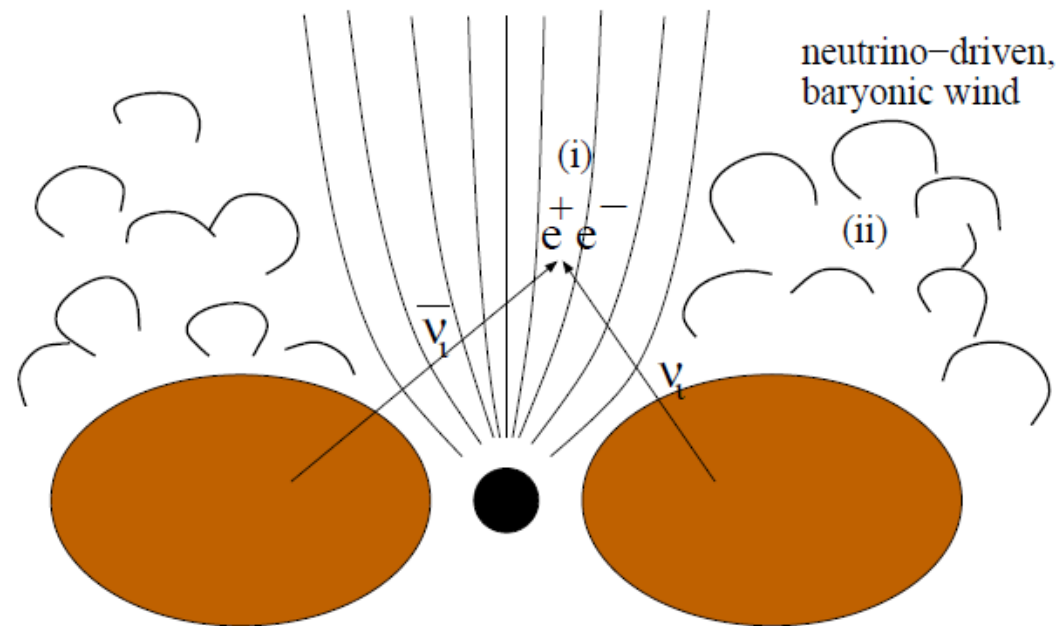
Objets faibles difficiles à détecter
à grande distance > 5 Mpc
Pourtant **plus fréquents**

Explosions de CC-SN
 $>0.5\%$ deviennent magnétars
0.02 flare/an

Mécanisme pour extraire l'énergie

Neutrinos s'annihilent autour
du trou noir restant → paires
→ Boule de feu → jet collimaté

Lignes de champ B à travers
le disque/tore
peuvent transférer l'énergie
de liaison en rayonnement
(Poynting) + spin du BH

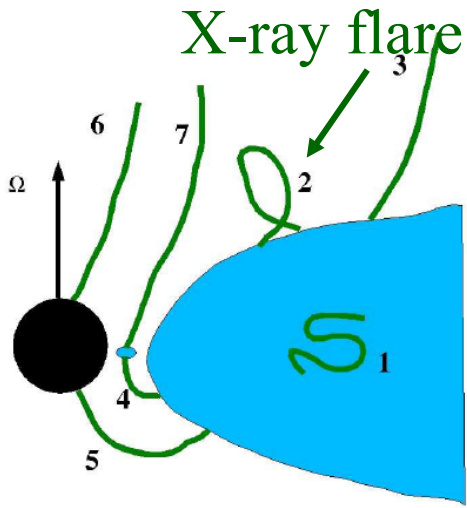


Le jet est automatiquement
collimaté, si les champs dominant

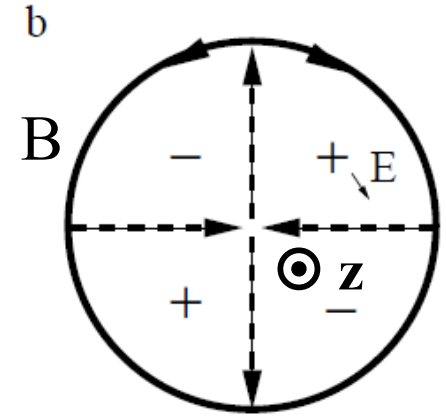
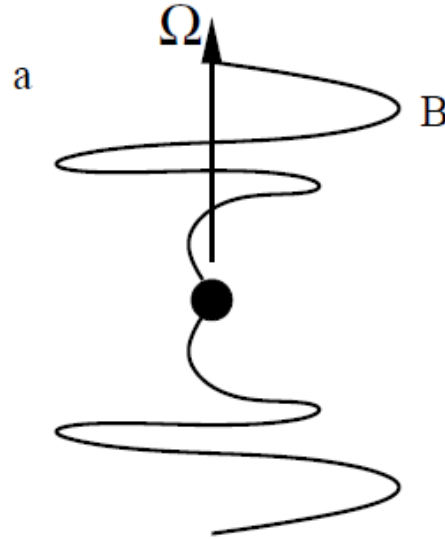
a

b

Energie électromagnétique



Après 100s, 10^7 km

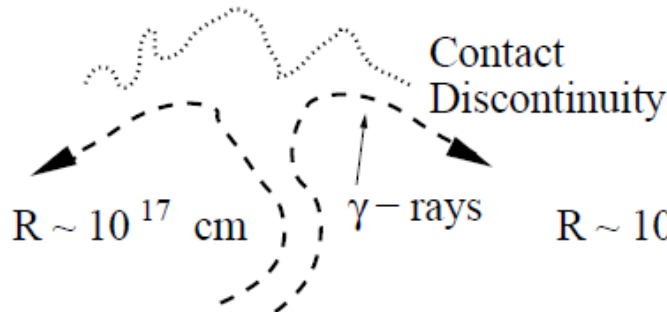


Modèle où l'énergie EM domine l'énergie cinétique des particules

Champ B poloidal devient toroidal à 100km
 $\Gamma \sim 3 \cdot 10^4$ tombe à 100
 après 100sec

$R \sim 10^7$ cm

$R \sim 10^{12}$ cm



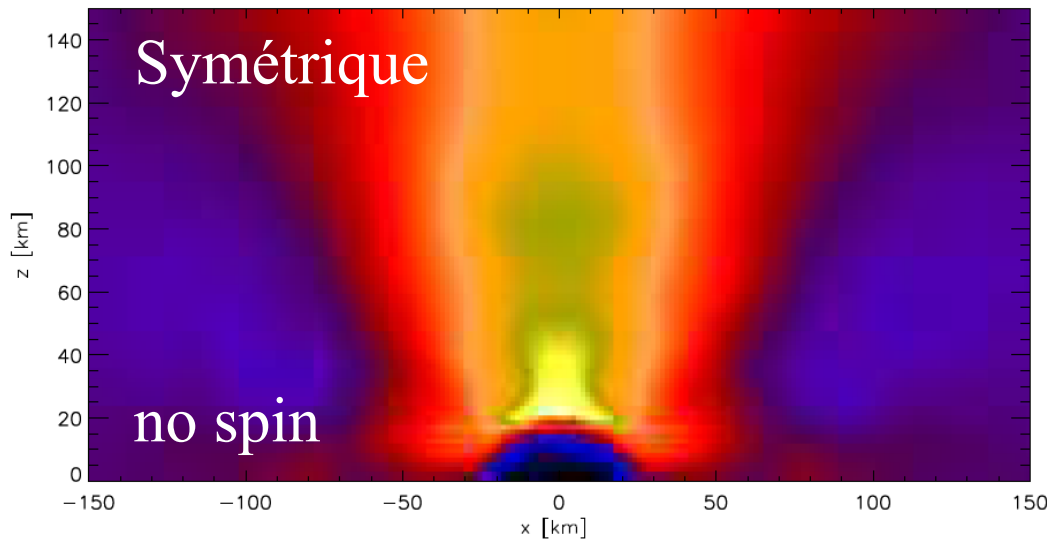
$R \sim 10^{18}$ cm

E provenant du spin du BH

Blanford 2002

Energie extraite

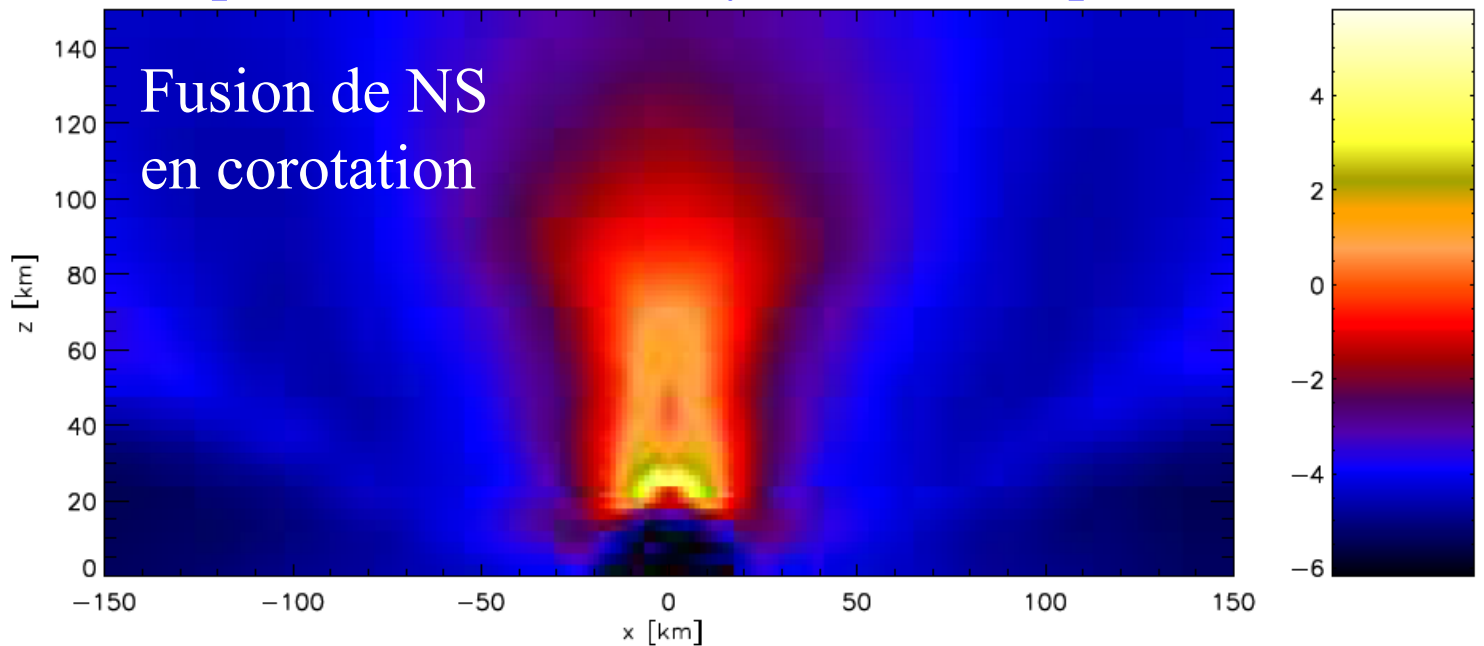
$$\nu\bar{\nu} \rightarrow e^+e^-$$



Fusion de NS
t=18ms

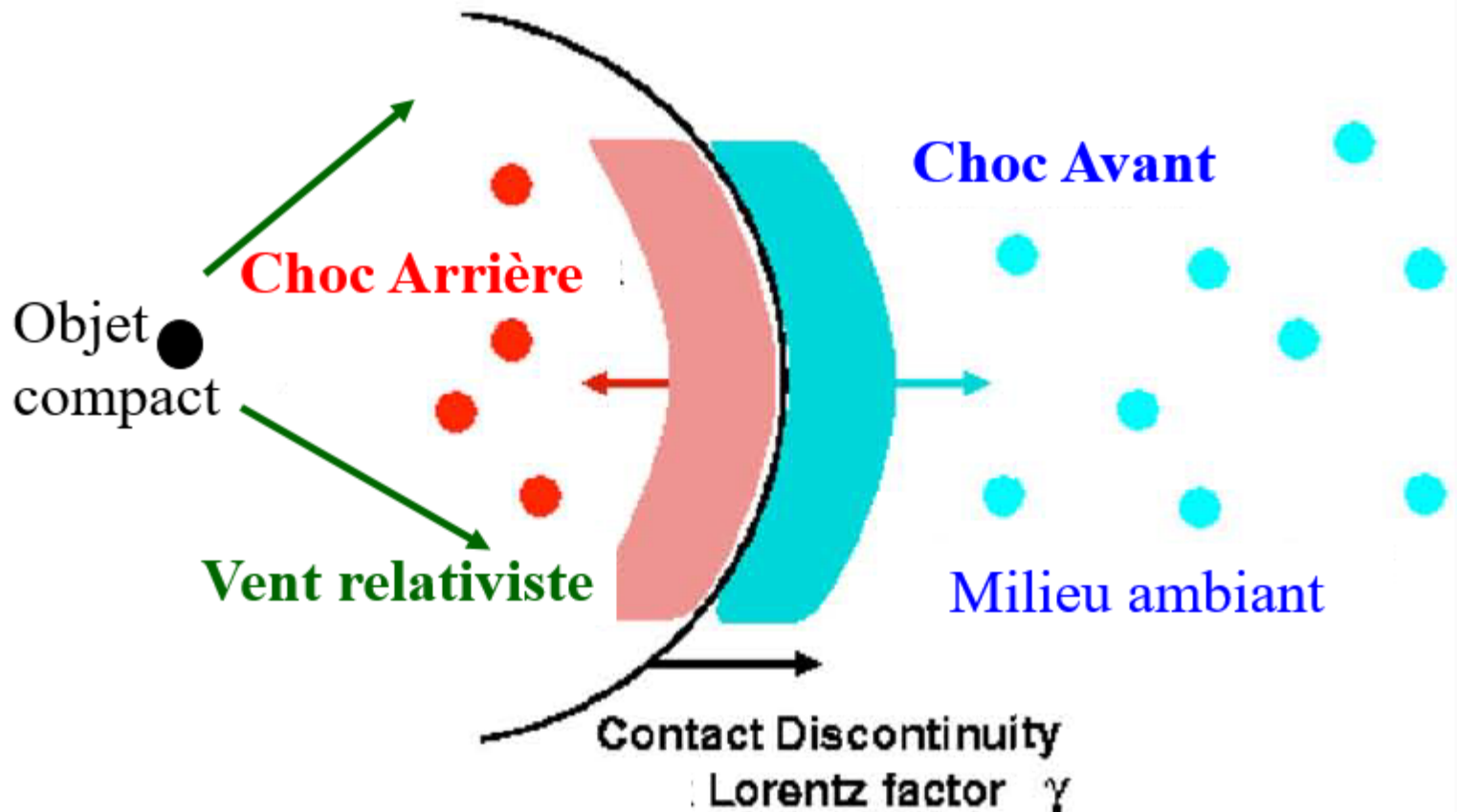
Rosswog et al 2003

Rotation, spin nécessaires → dynamo, champ B

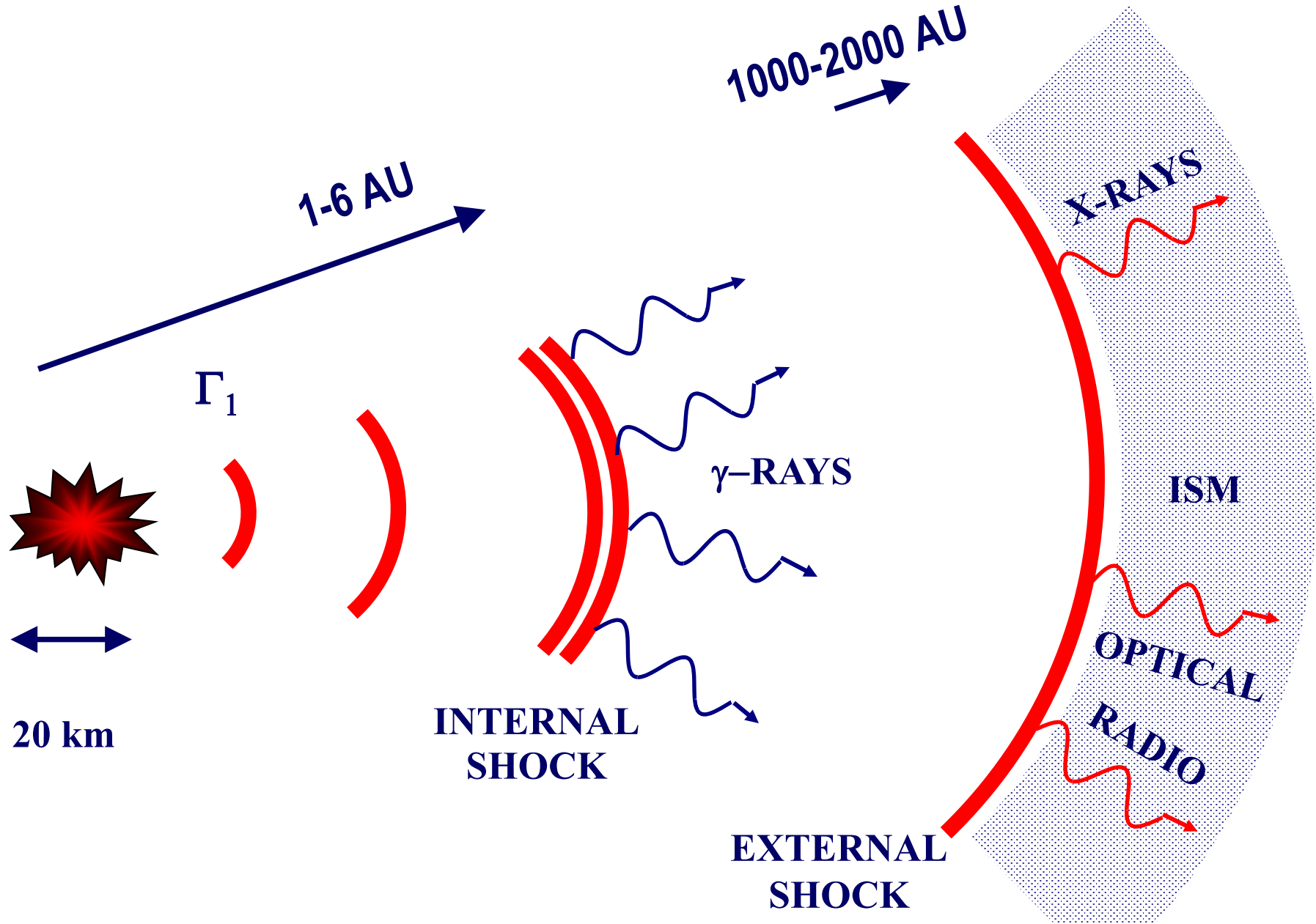


Afterglow: chocs « forward/reverse »

Grande variabilité → boule de feu très petite (ms ou 300km)
Flux énorme, grande densité de radiation

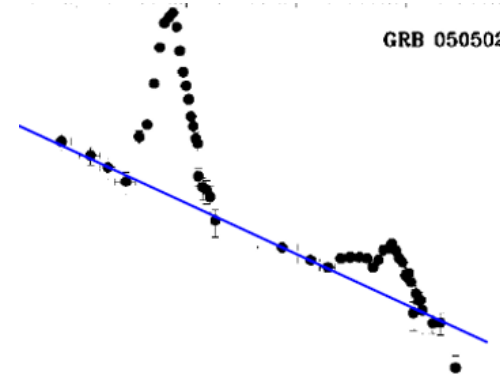
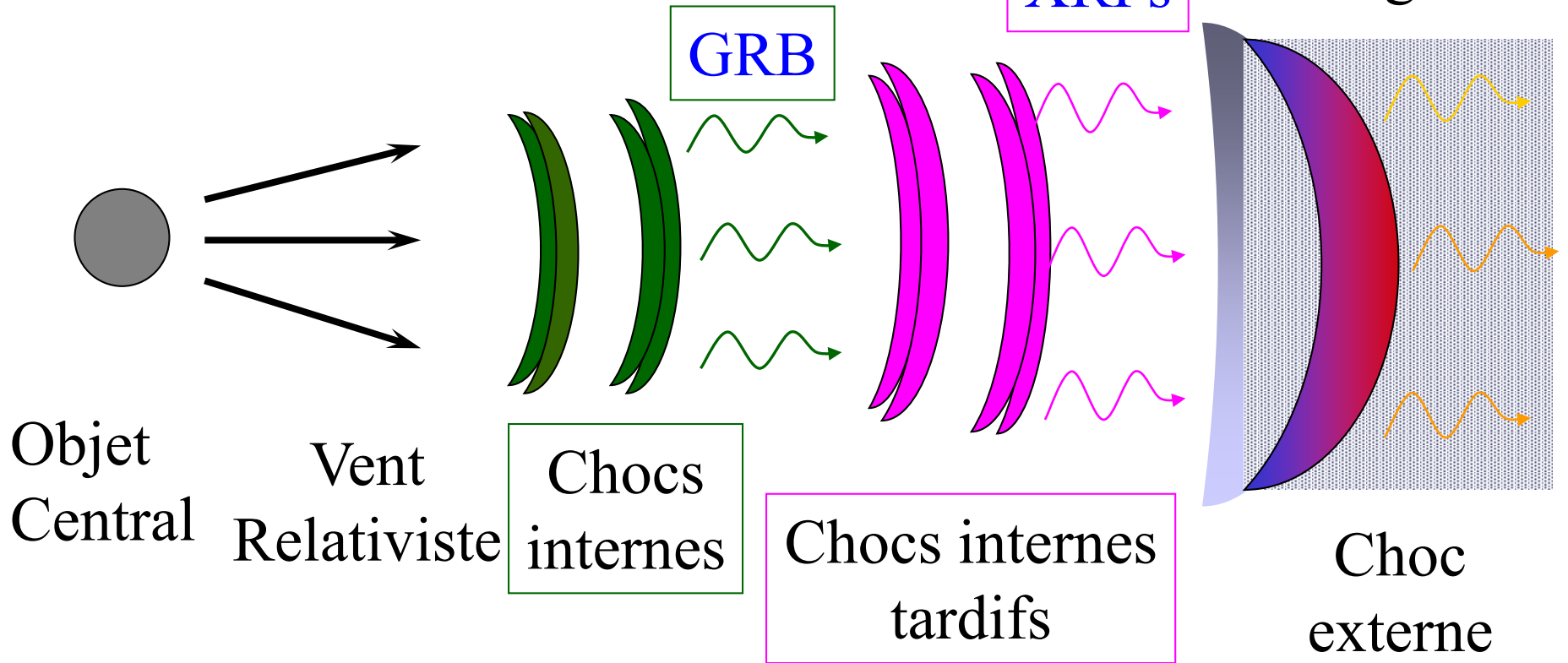


Modèle de chocs (boule de feu)



Chocs internes et externes +flares X

Selon les éjecta déjà présents,
dûs à plusieurs bouffées relativistes



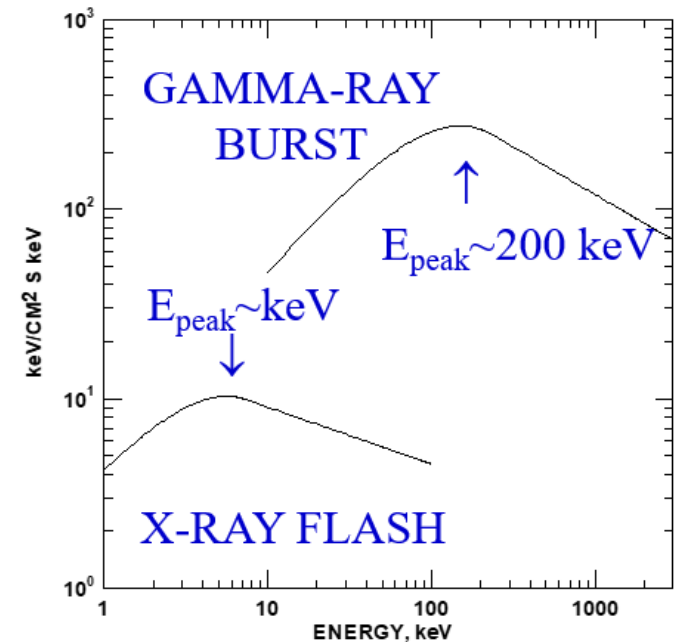
Distribution de l'énergie

DURANT LE SURSAUT

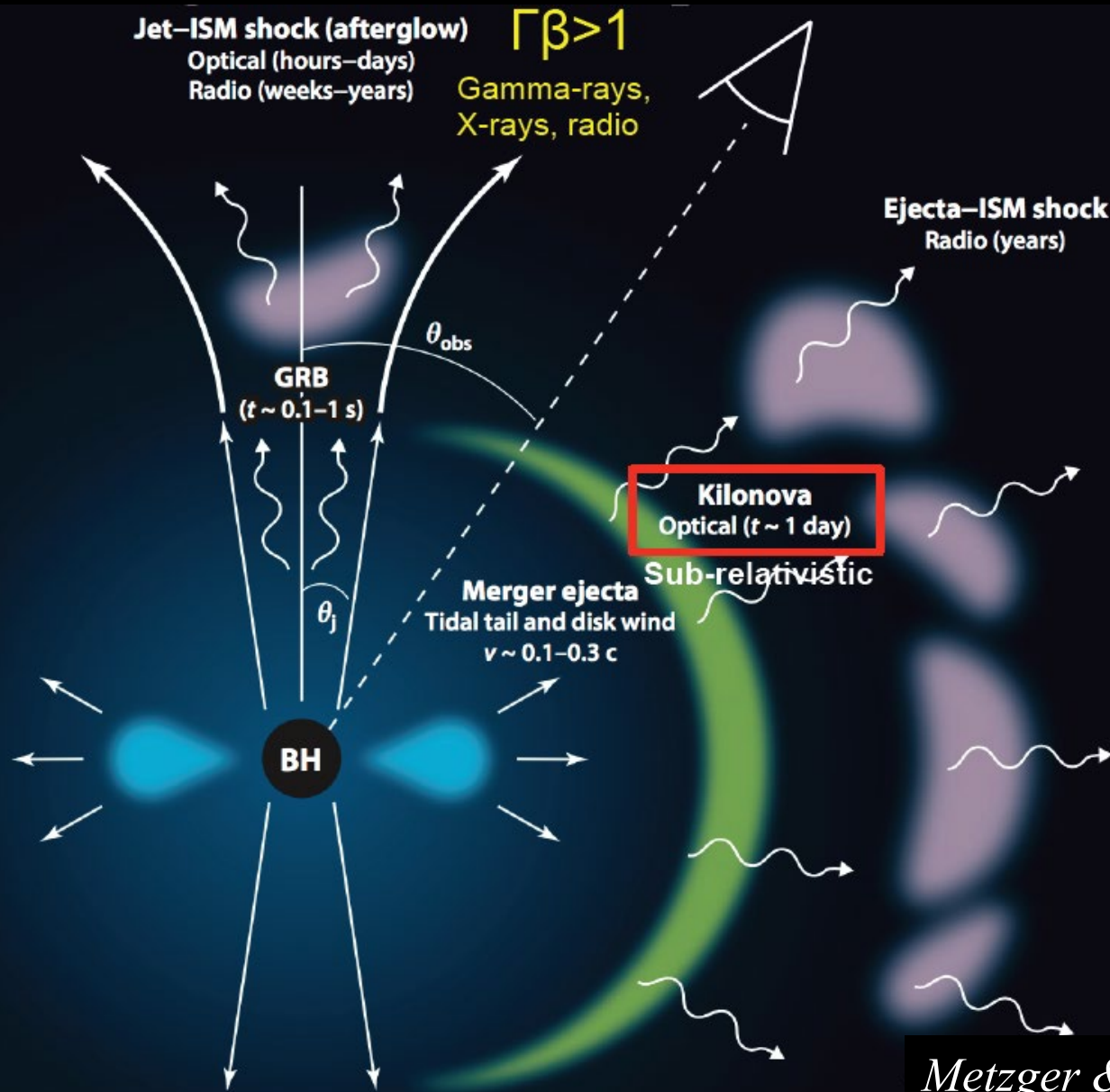
- 1 **>25 keV γ rays: 65%**
- 2 **1-10 keV X-rays: 7%**
- 3 **Optical: 0.1%**
- 4 **Radio ?**
- 5 **MeV/GeV/TeV ν ? >10%?**
- 6 **Gravitational radiation ?**

AFTERGLOW

- 1 **>25 keV γ rays: 7%**
- 2 **1-10 keV X-rays: 9%**
- 3 **Optical: 2%**
- 4 **Radio: 0.05%**



Kilonova après une fusion NS-NS



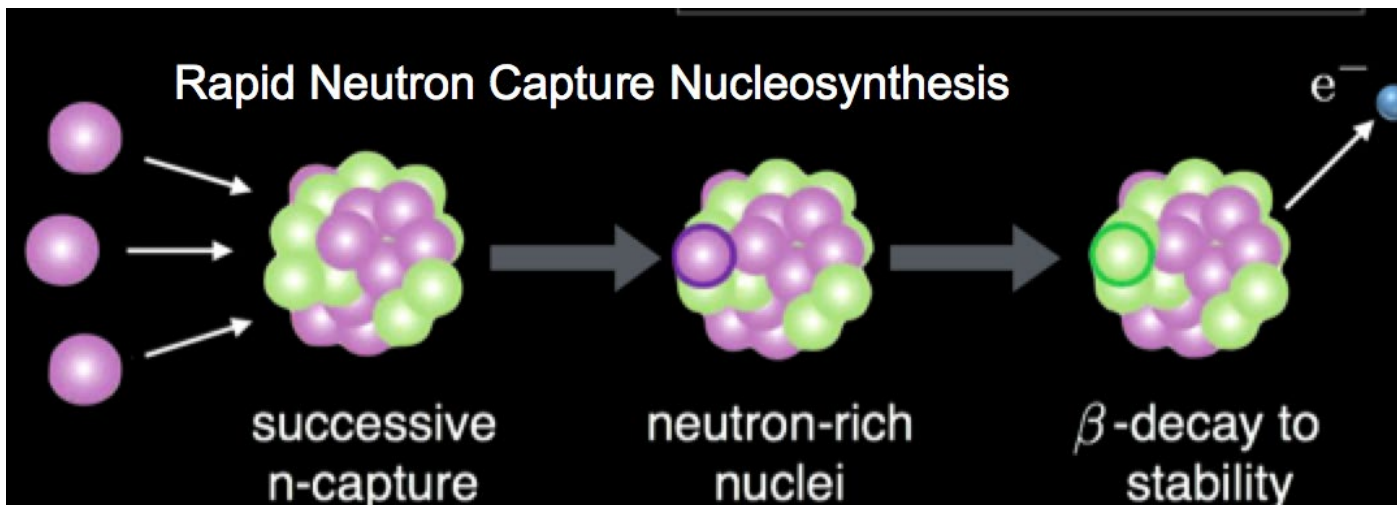
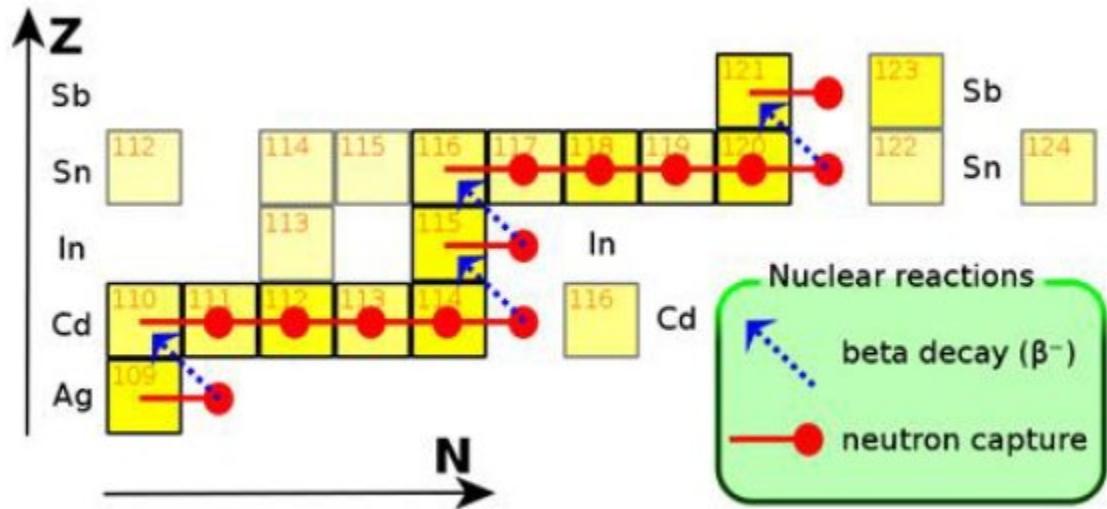
Nucléosynthèse: r-process

$T > 10^9 \text{K}$, $N_n > 10^{22} / \text{cm}^3$

Les neutrons peuvent être absorbés jusqu'à ce que l'énergie de séparation = 0

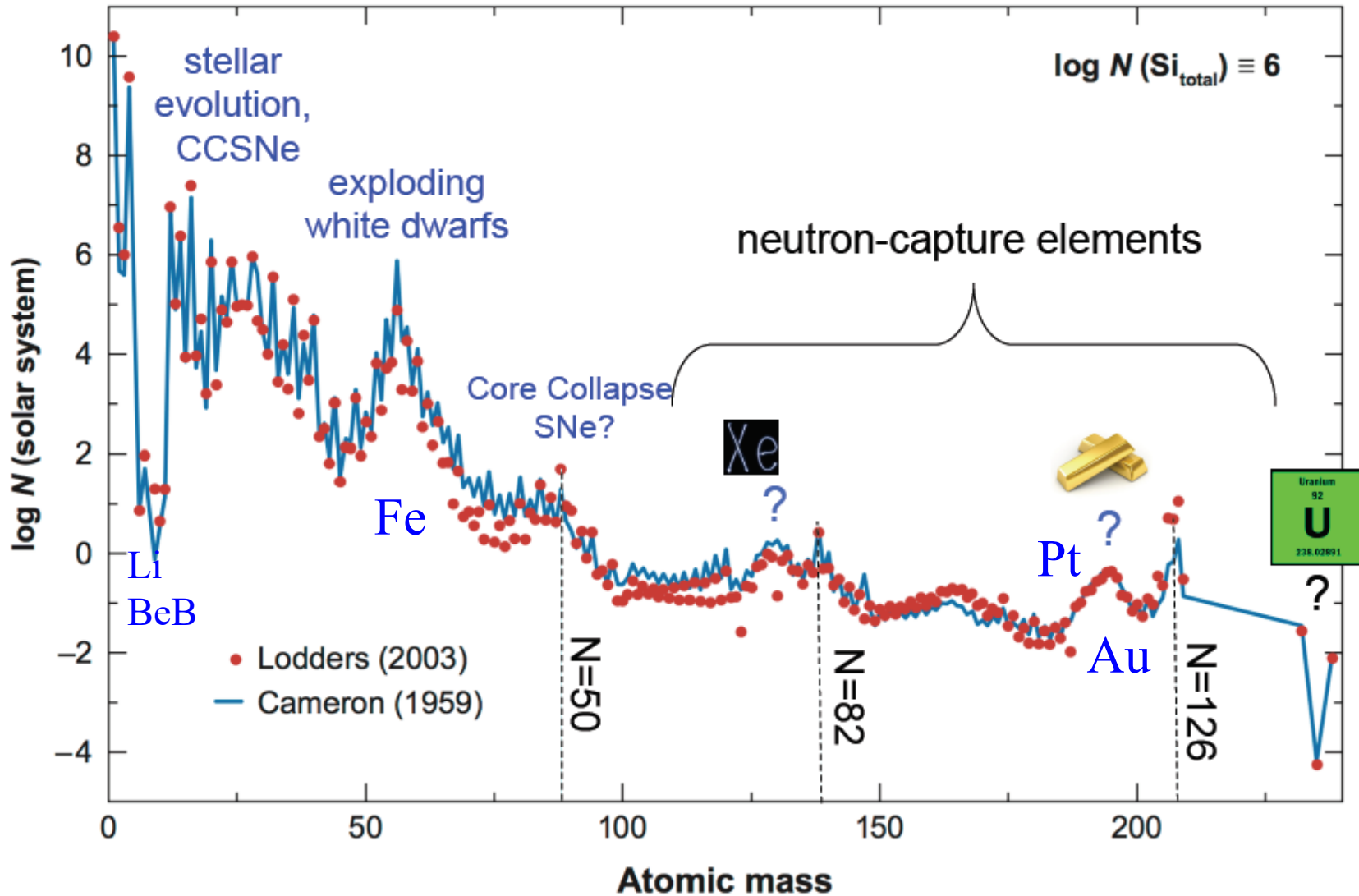
→ Radioactivité β

Puis autre ligne d'accrétion des neutrons


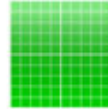
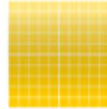
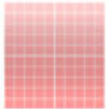
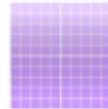



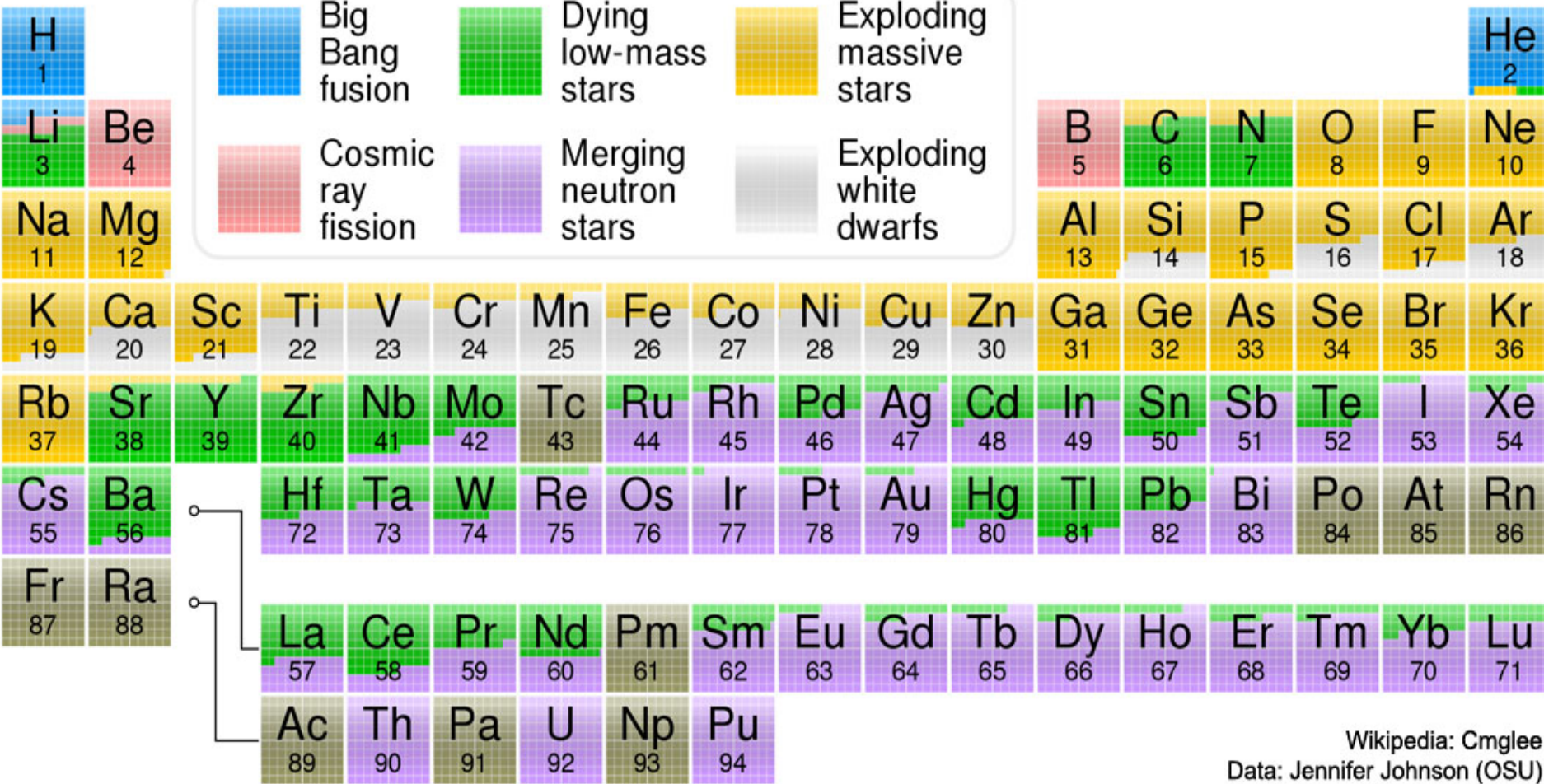
Comment sont formés les éléments?

Big Bang



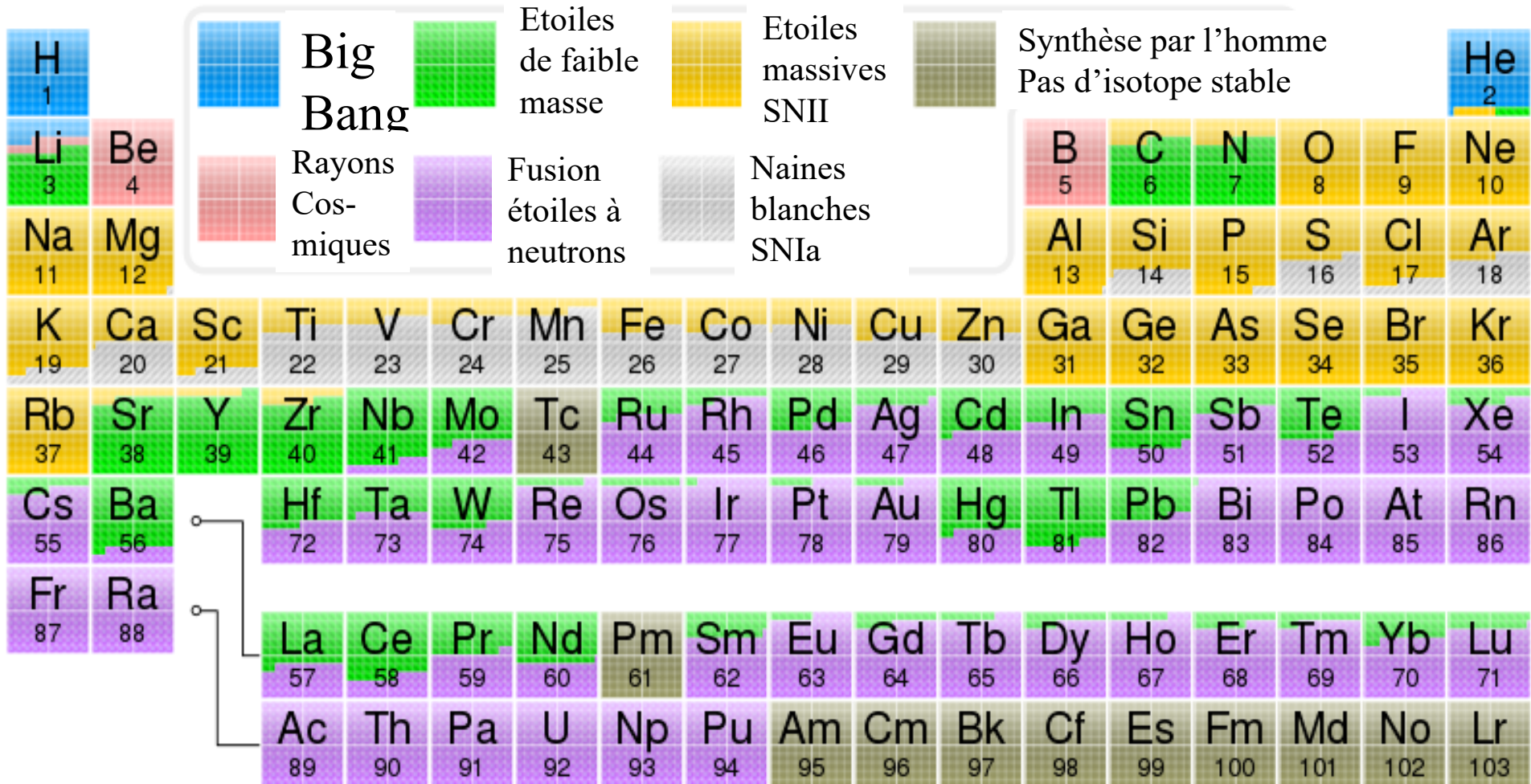
Les éléments formés dans les fusions d'étoiles à neutron

 Big Bang fusion	 Dying low-mass stars	 Exploding massive stars
 Cosmic ray fission	 Merging neutron stars	 Exploding white dwarfs



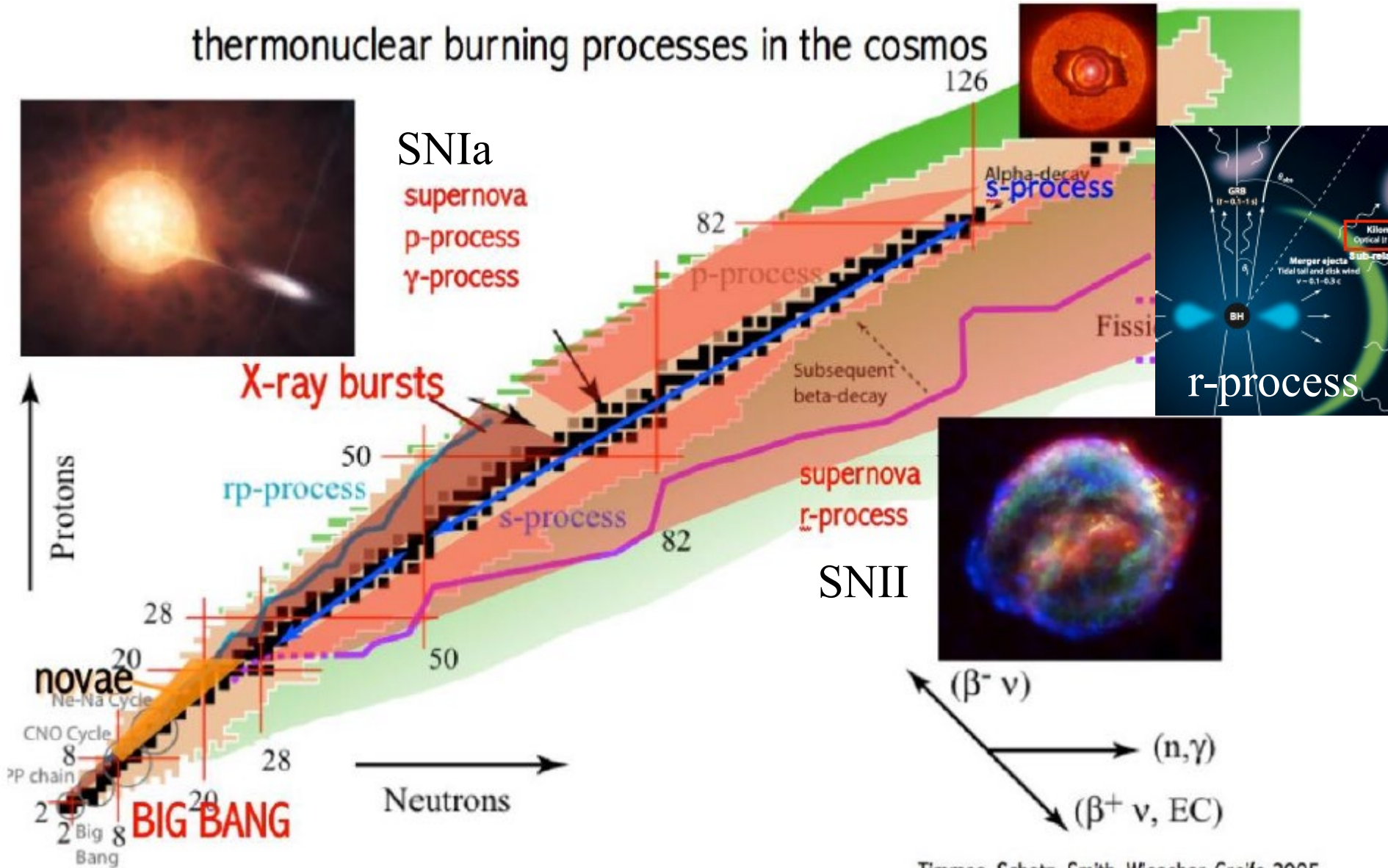
Wikipedia: Cmglee
Data: Jennifer Johnson (OSU)

Les éléments formés dans les fusions d'étoiles à neutron



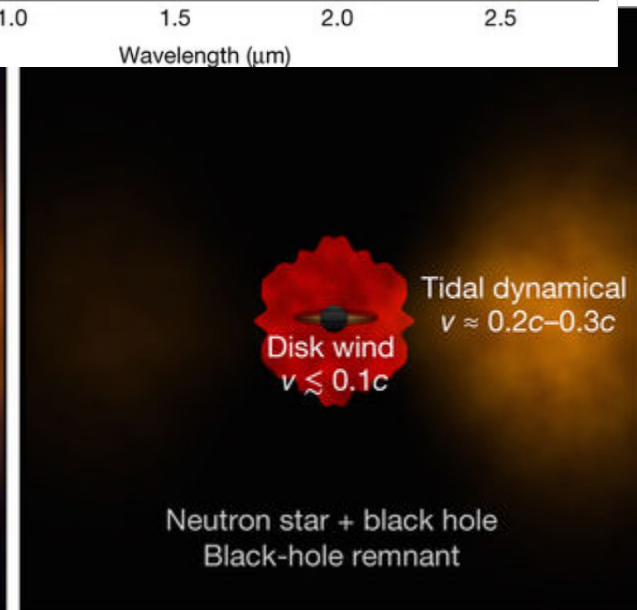
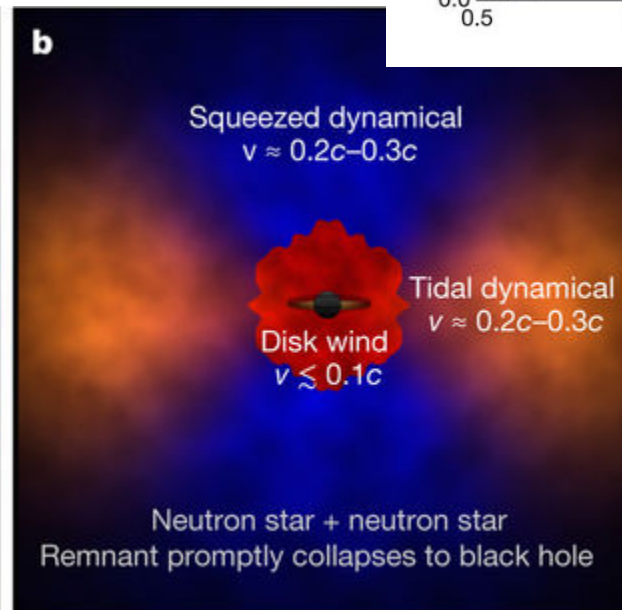
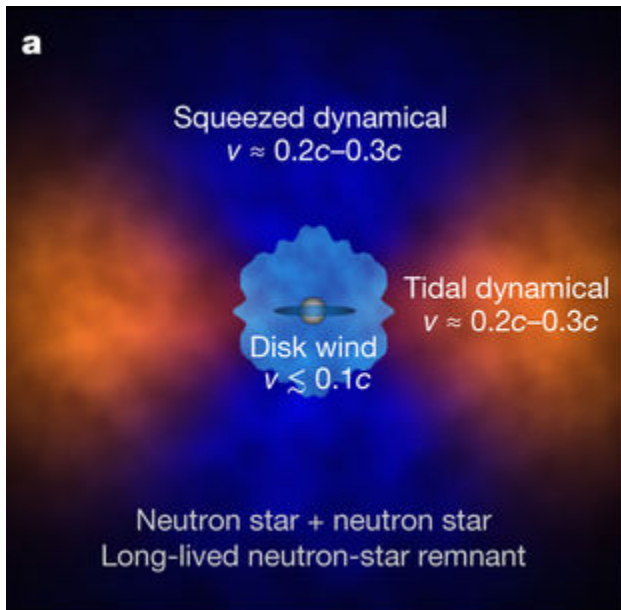
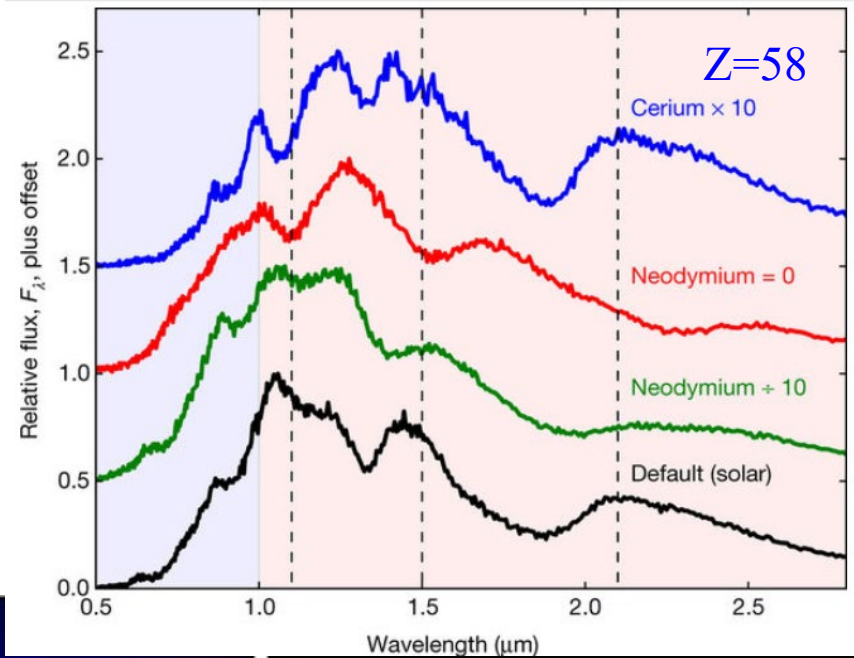
Les SN et GRB jouent un grand rôle

thermonuclear burning processes in the cosmos



GRB170817: Les diverses possibilités

Deux composantes dans la kilonova
 Le spectre observé tranche Nd($Z=60$)
 La($Z=57$)



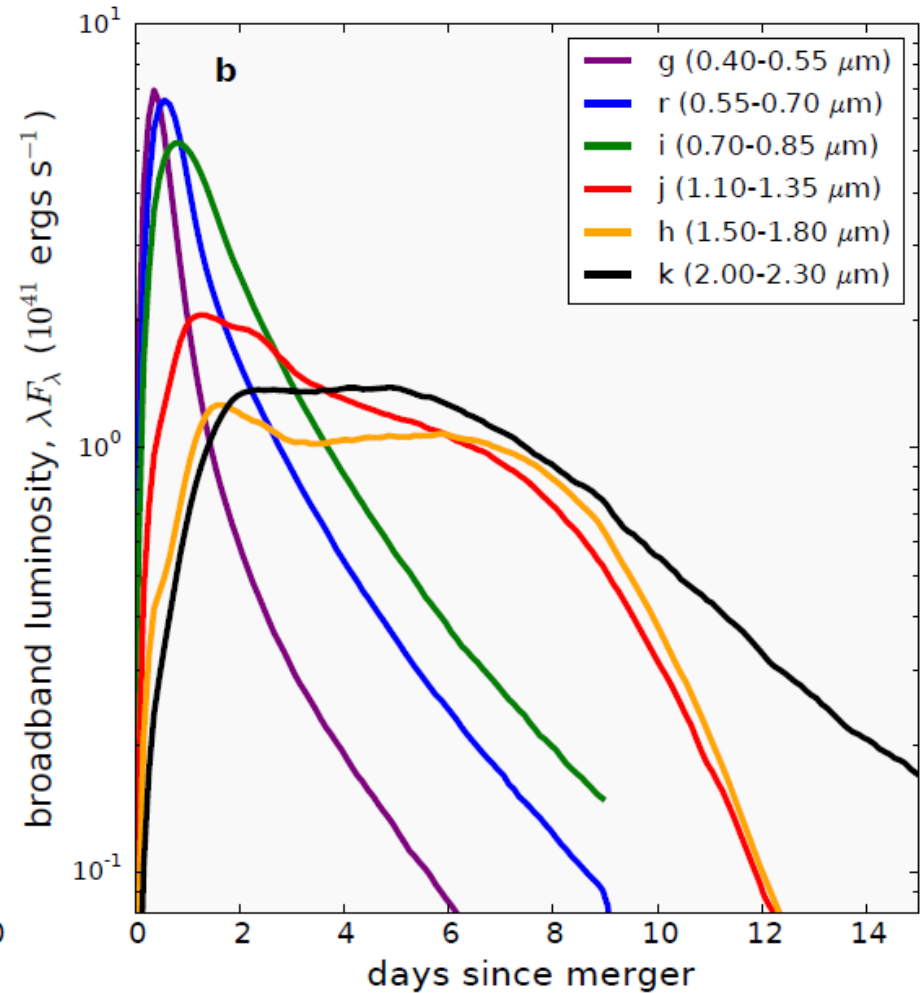
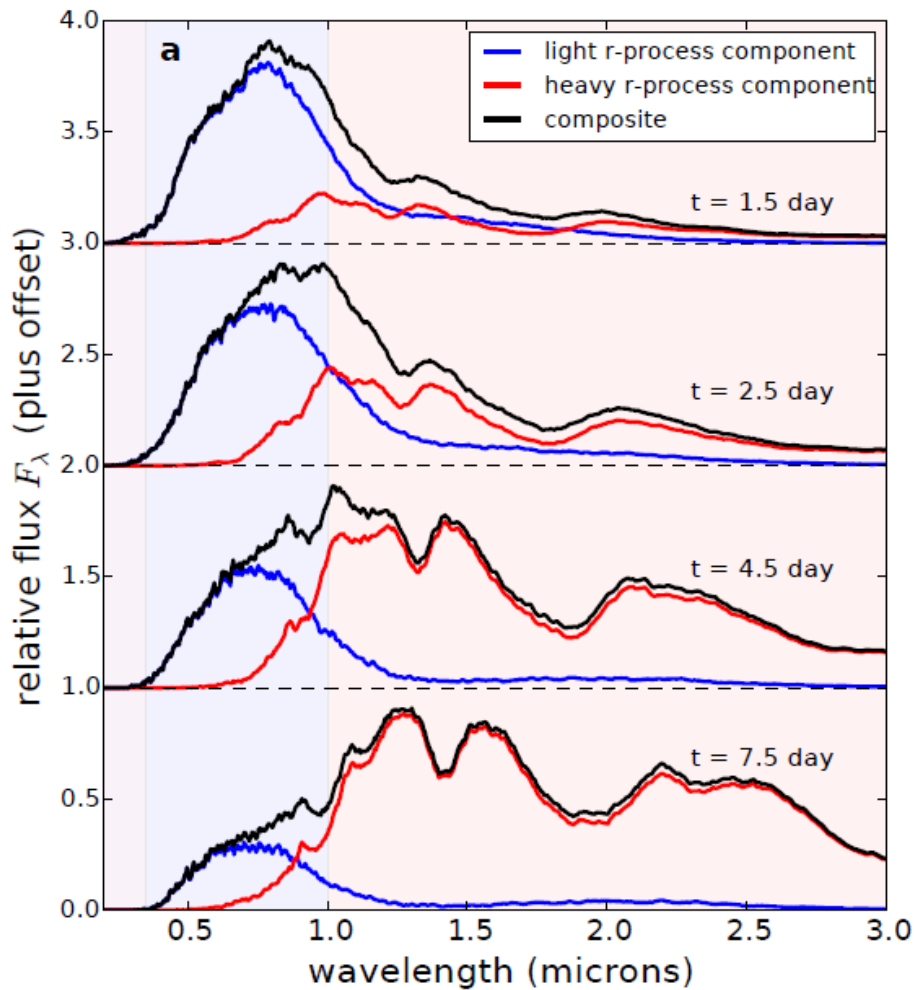
Rouge: riche en éléments r-process les plus lourds $A > 140$

Bleu: éléments les plus légers $A < 140$

Kasen et al 2017

GRB170817A 1.7 sec après GW170817

La signature des éléments lourds arrive plus tard



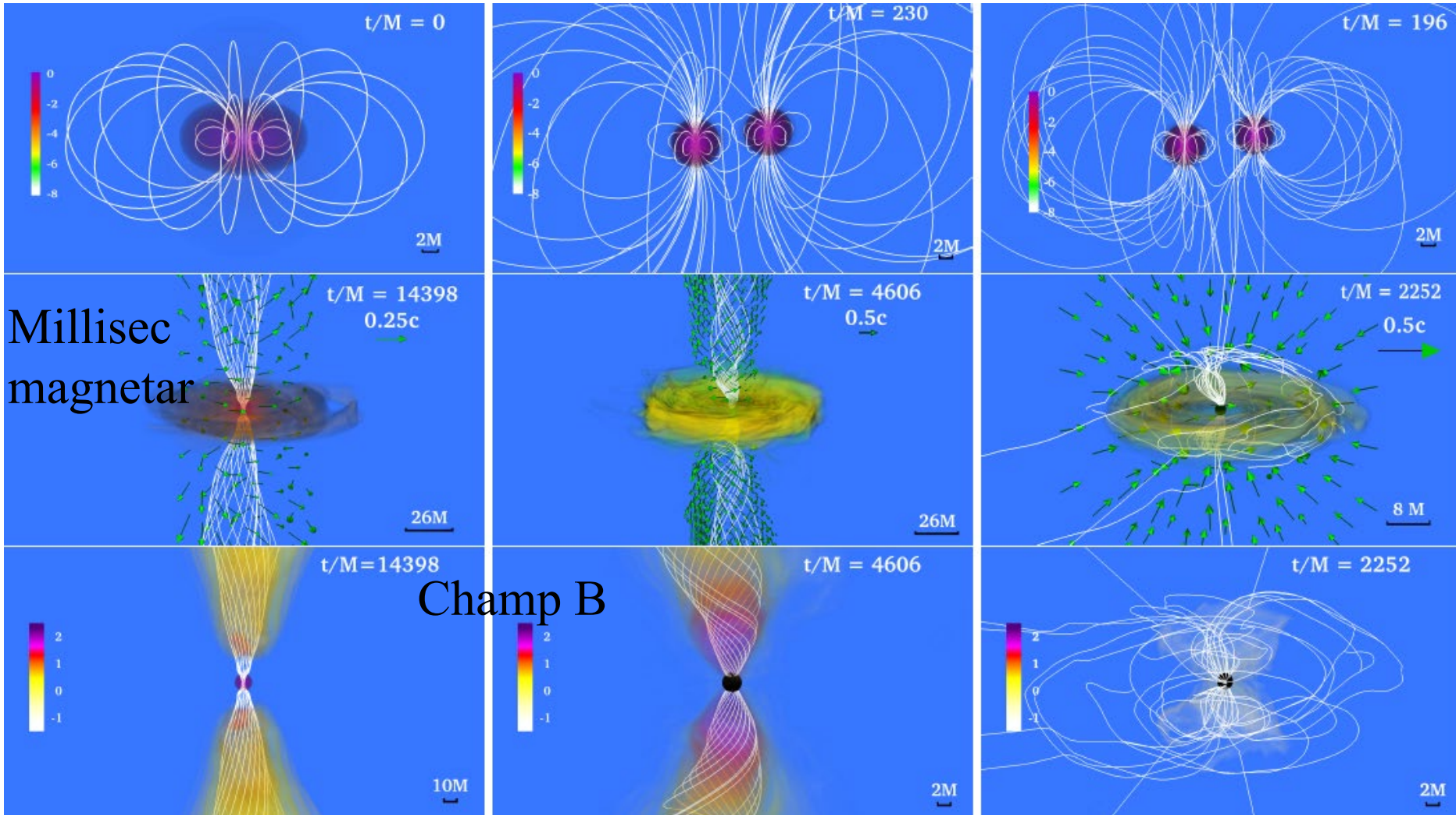
Effondrement ou non, retardé ou rapide

Retardé: Champ B fort \rightarrow GRB Si trou noir, pas de GRB

Non effondré

Effondrement retardé,

rapide



GR-MHD simulations: EOS? *Ruiz & Shapiro 2017*

Le rayonnement rémanent

NGC 4993
HST ACS WFC3
ACS/WFC F606W
WFC3/IR F110W
WFC3/IR F160W



NGC 4993 (MUSE)
Lyman et al 2017

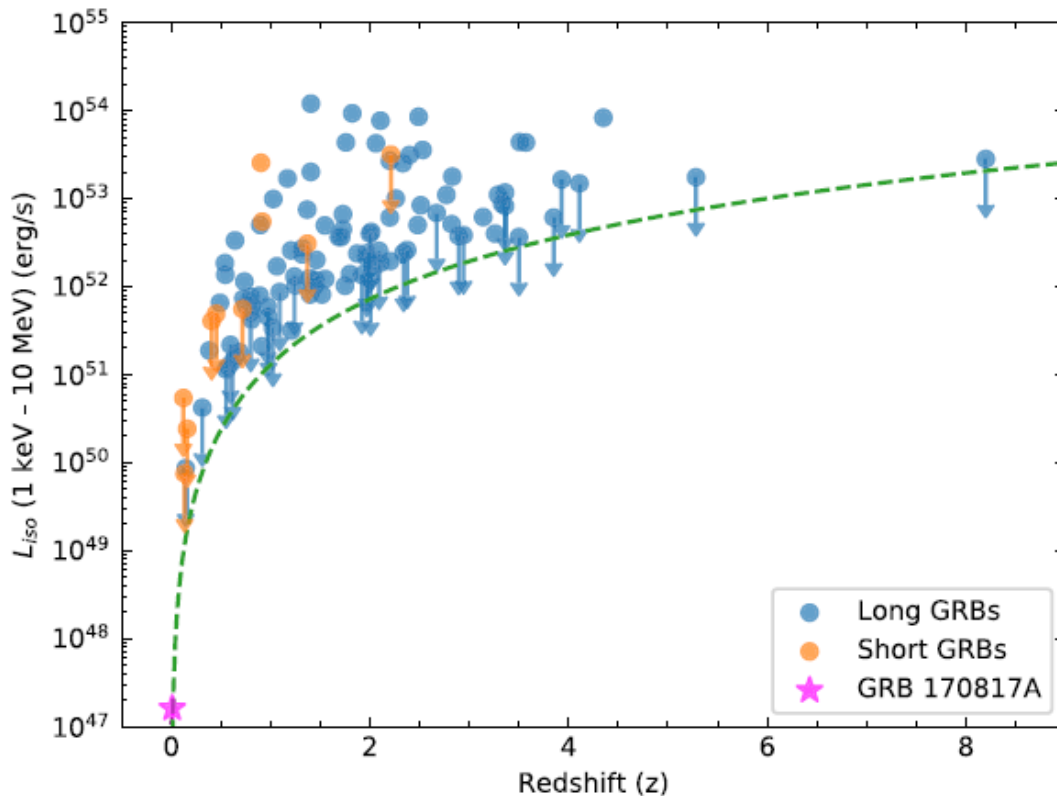


17 Août 2017

Rayons gamma
Tanvir et al 2017



Pourquoi GRB170817 si faible?



Abbott et al 2017

Biais de detection
Et difficulté d'obtenir
une distance pour
des sursauts courts

Certains attribués à
des galaxies lointaines
pourraient être dus à
des galaxies proches
+ offset

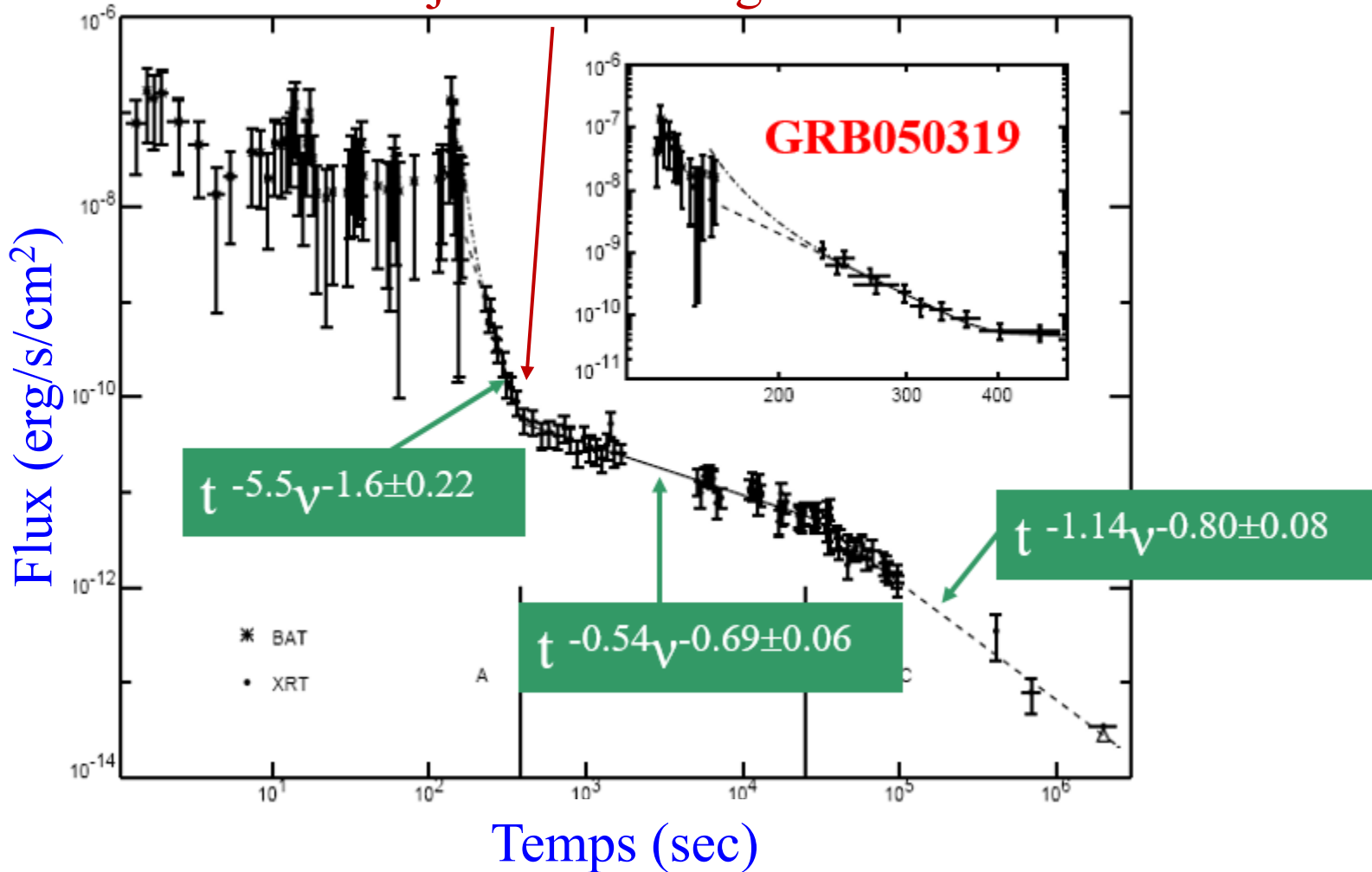
→ Il faudrait reconsidérer
les attributions

**Taux de fusions en 2018-19 des NS-NS était de 0.04-100
Aujourd'hui 1-50 !**

Plateau X et réinjection

1^{ère} phase: soft
Continuation du burst
Puis plus hard-> jet

Ré-injection d'énergie?



Accélération dans les chocs

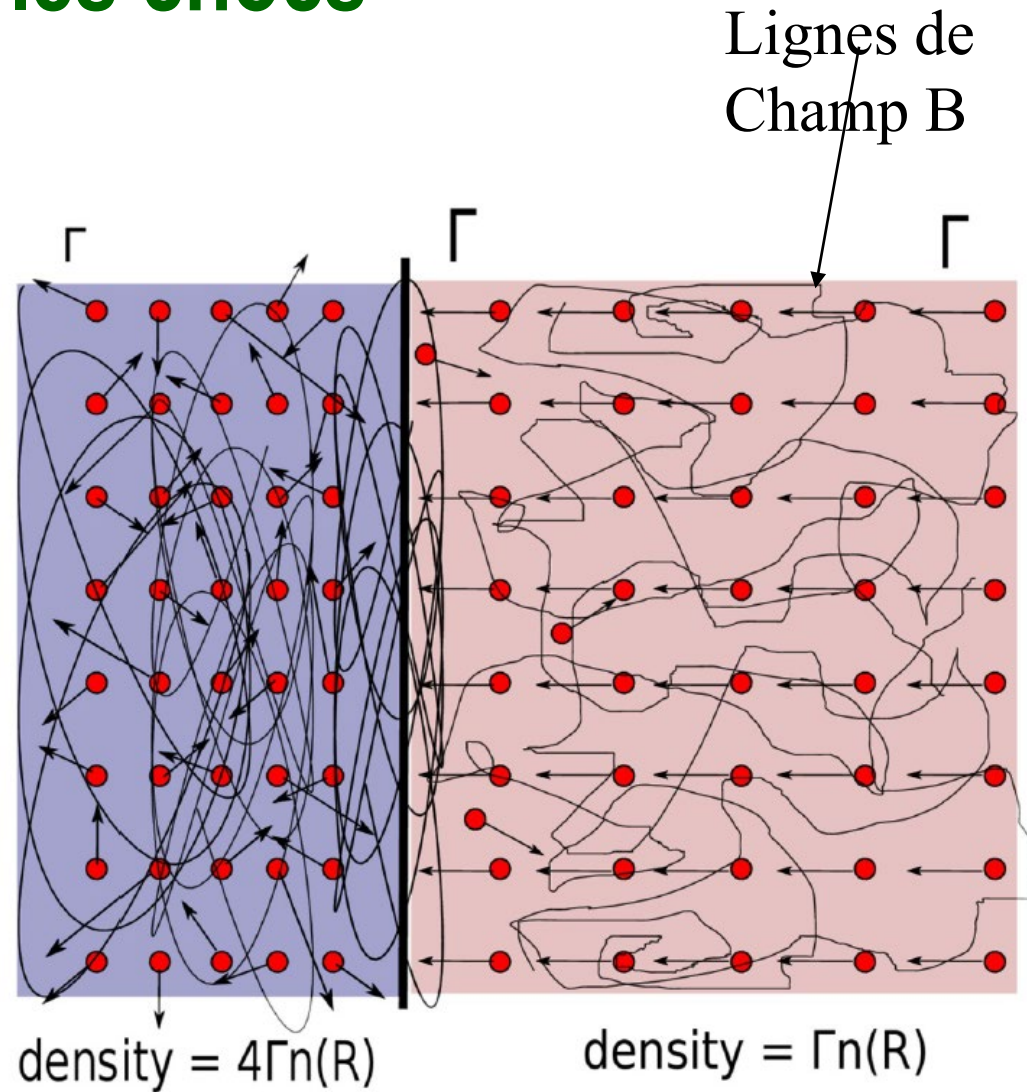
Fluide se déplaçant avec le facteur de Lorentz Γ

Après le choc, la vitesse des particules est randomisée
La densité est multipliée par 4

Dans le référentiel au repos, Énergie $\Gamma^2 mc^2$

Compression, accroissement de B, accélération des particules

$$E \propto nR^3 \Gamma^2 \rightarrow R \propto (E/n)^{1/3} \Gamma^{-2/3}$$



Référentiel du fluide

Plusieurs chocs

Le jet arrive (région 4) avec Γ_0

Deux chocs se succèdent: **en bleu le choc** qui s'avance dans le milieu ambiant n_1 , avec γ_2

En rose, le choc inverse

Avec $\gamma_3 = \gamma_2$ et

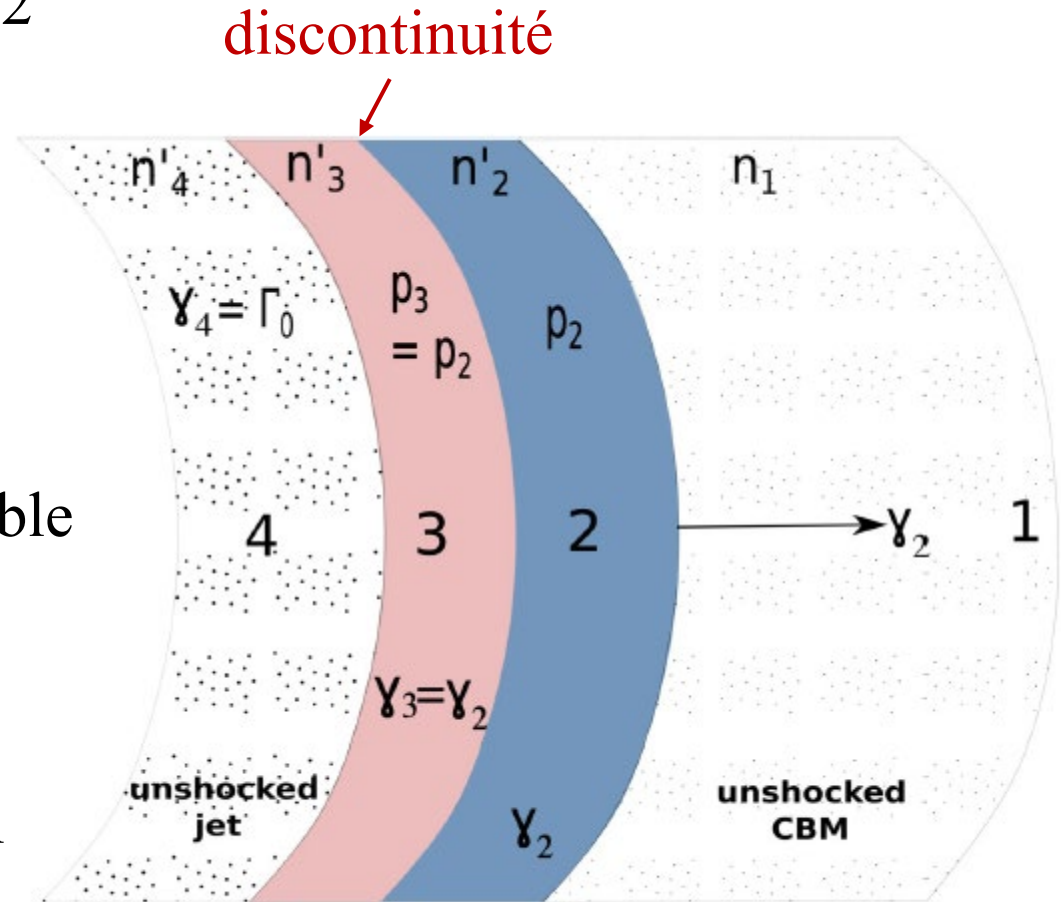
Même pression $p_3 = p_2$

Mais densités différentes

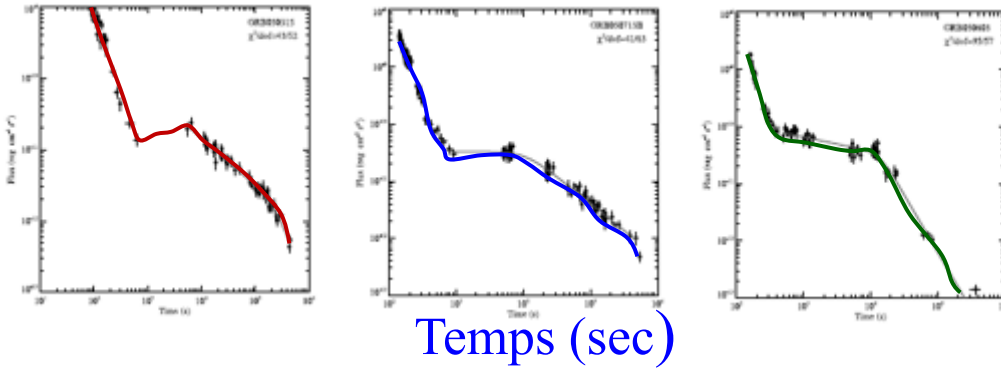
Energie magnétique σ faible

Le reverse choc décélère et chauffe les éjecta

→ Observation d'un flash optique (GRB990123)



Plateau dans les X

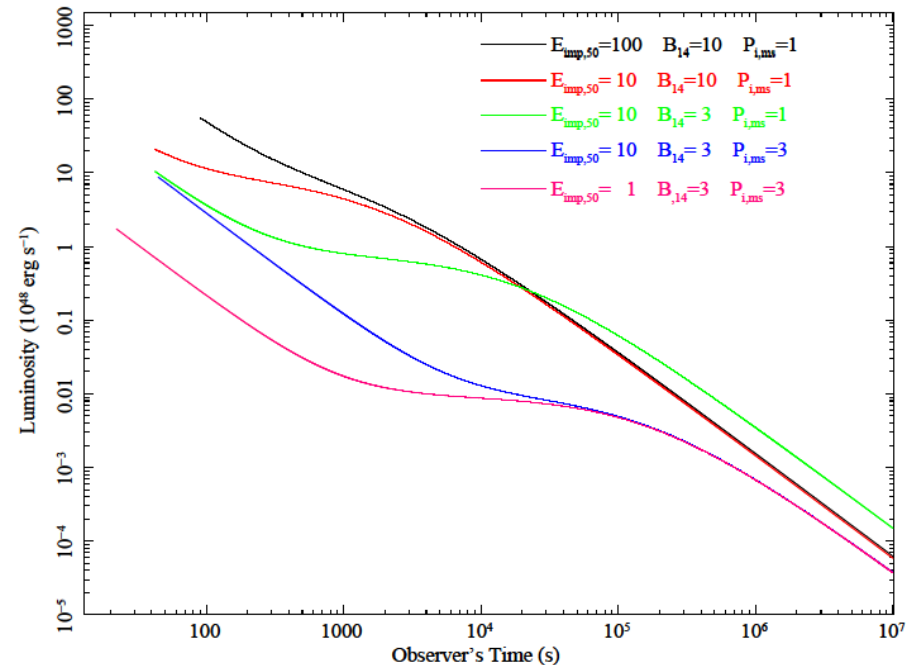


Dans 50% des sources

Ré-injection continue d'énergie,
simulée par Dall'Osso et al 2011

Ré-injection d'énergie par le
spin-down de la magnétar,
Ou bien r-process et
radioactivité des éléments?

Beaucoup moins d'énergie
disponible si trou noir central



Evolution de l'afterglow

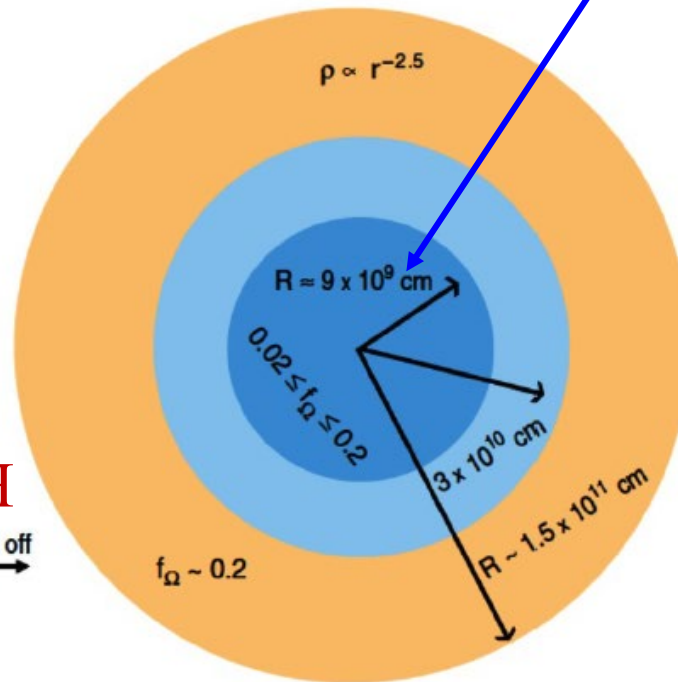
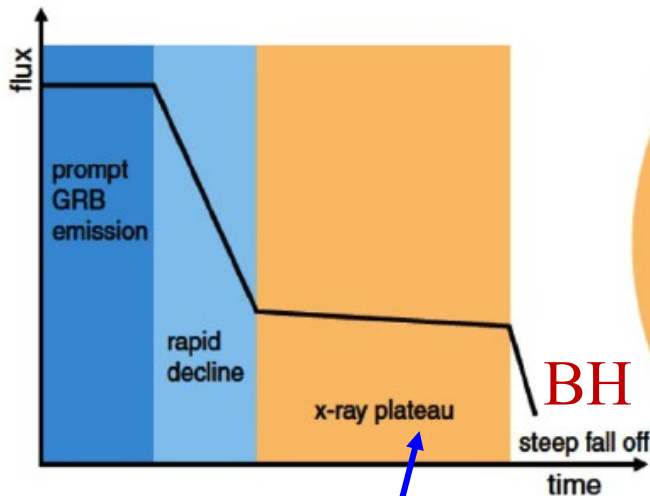
Rapide sursaut, descente brusque, plateau, et décroissance finale de l'émission X \rightarrow signature BH ou magnétar?

Conséquences en rayon: rotation? (BH: J/M plus grand)

Plateau: énergie venant du vent du magnétar

Décroissance, lorsque le magnétar s'effondre en trou noir

$$0.02 < f_{\Omega} < 0.2$$



Paramètre de spin

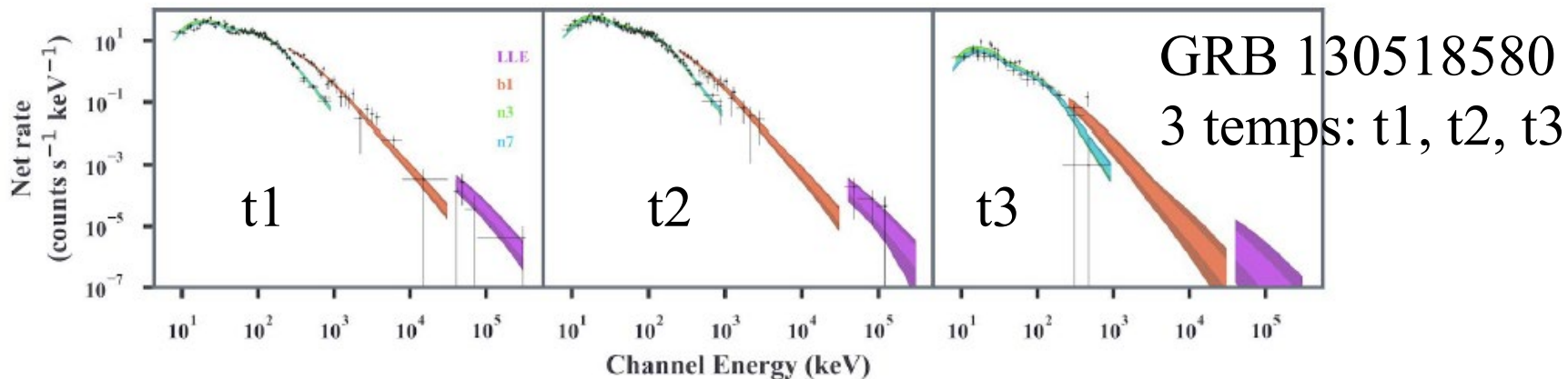
$$f_{\Omega} = \Omega / \Omega_k$$

Ω_k = képlérien

XRF \rightarrow Magnétar

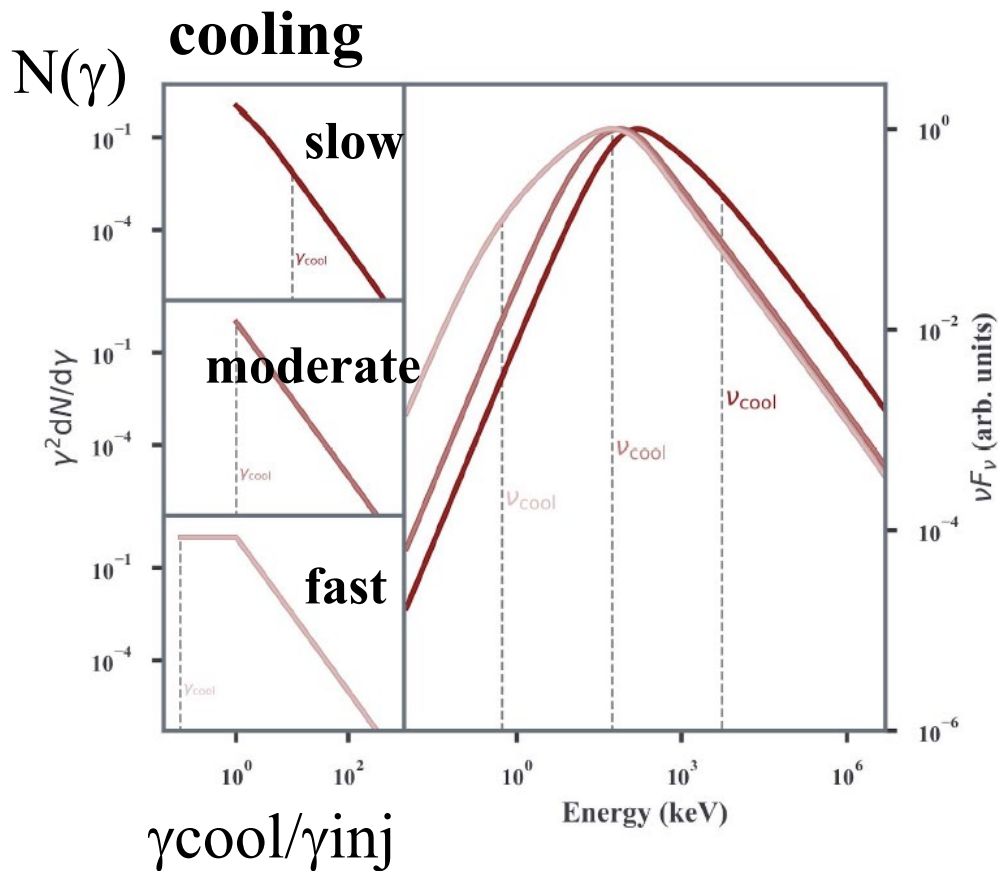
Kumar & Zhang 2015

Energie provenant de l'accrétion, ou spin-down du magnétar



Mécanismes d'émission: synchrotron

Problème: les pentes
des lois de puissance à
basse énergie trop fortes?



Plusieurs GRB

Prenant en compte la perte d'énergie
→ Champ B, et énergie des jets
et mini-jets

Loi dans le temps mesurée par Fermi
durant qqes secondes du sursaut
+ z connu → 19 GRB, divers temps

Spectre injecte $Q(\gamma) \sim \gamma^{-p}$

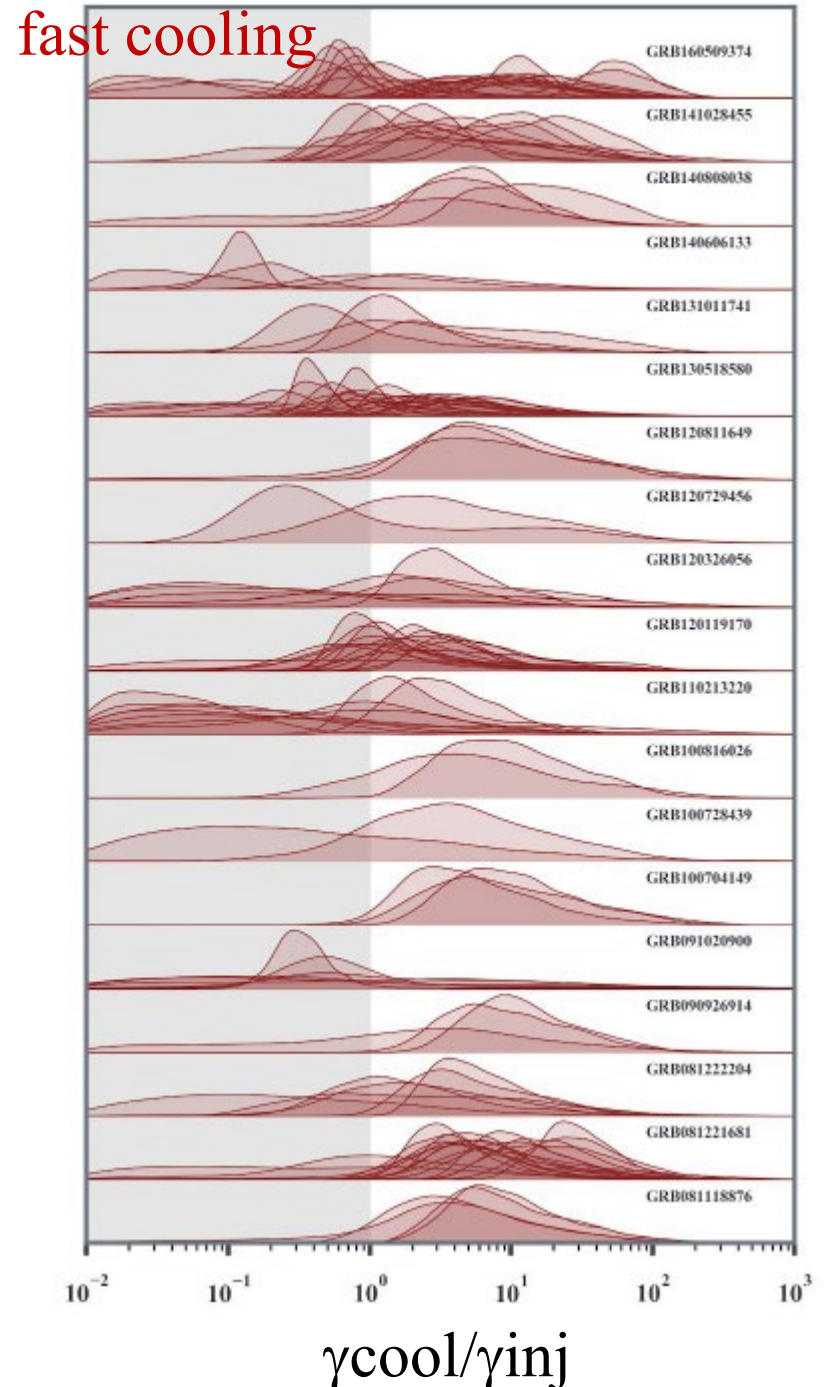
$\gamma_{\text{inj}} < \gamma < \gamma_{\text{max}}$

Refroidissement jusqu'à γ_{cool}

95% des spectres fittés

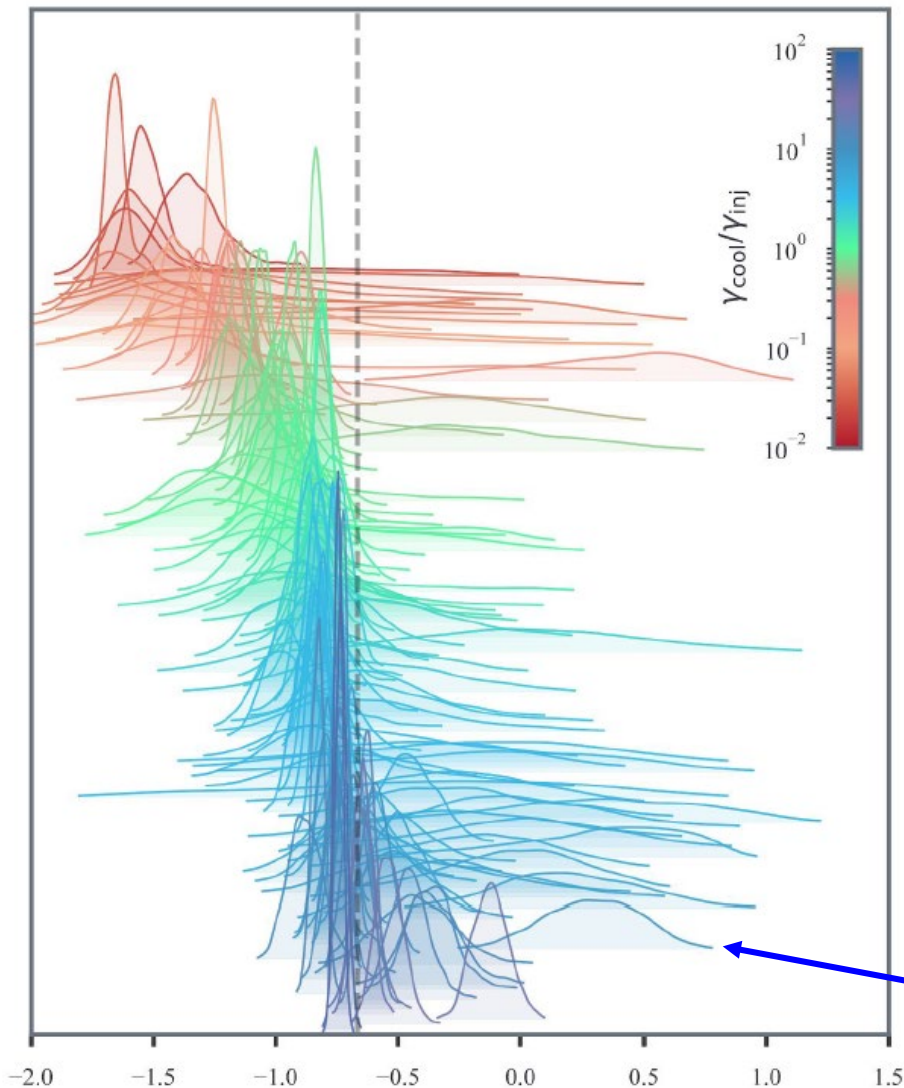
$p=3.5$

$10^{-2} \text{ G} < B < 10^2 \text{ G}$



Ligne de la mort

$$\alpha = -2/3$$



α Pente à basse énergie

Lorsque $\alpha > -2/3$
Synchrotron impossible?
→ Ligne de la mort

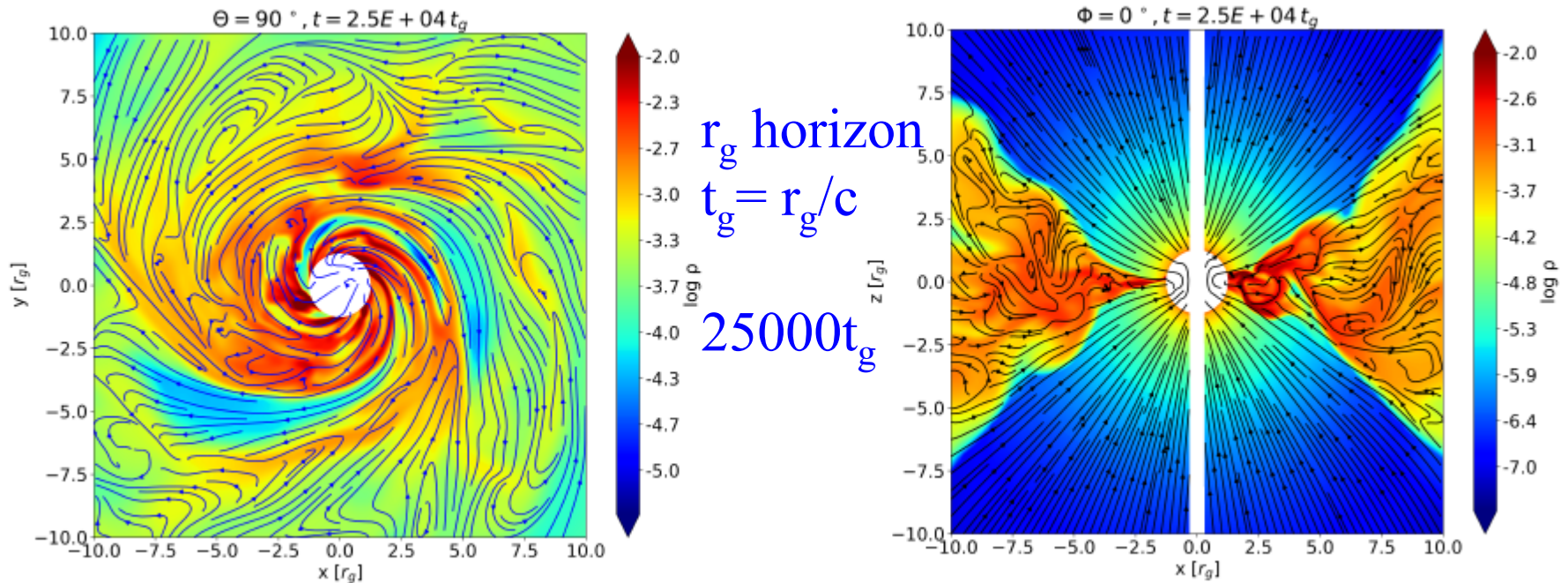
En fait, ce n'est pas une
impossibilité

Auparavant l'émission
était réputée thermique
pour $\alpha \sim 1$
(boule de feu)

→ Pas obligatoire
Plusieurs spectres au-delà

Accrétion dans les GRB longs

Nécessaire pour avoir des émissions γ



MAD « Magnetically Arrested Disk »

La région arrêtée lance des jets verticalement

Instabilités magnéto-rotationnelles MRI

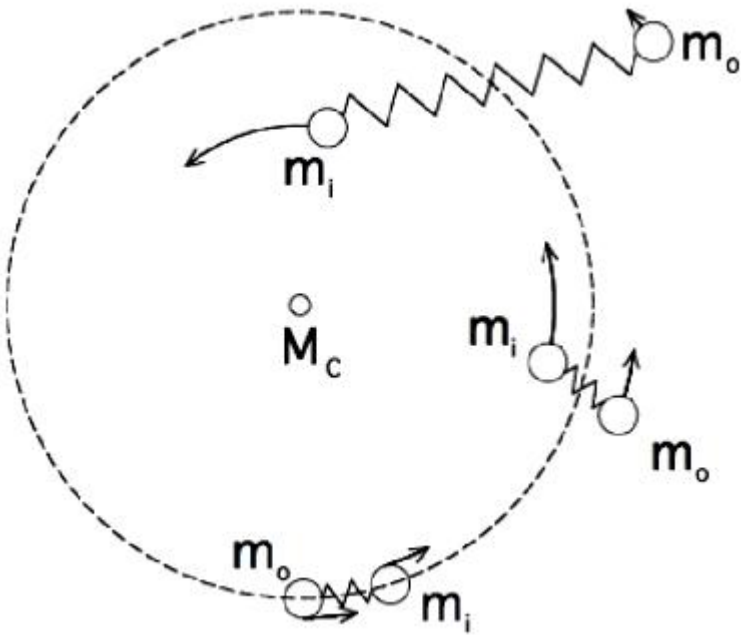
Echanges de tubes de champ toroidal

Autres accrétions: SANE « Not Arrested »

Le trou noir
résultat de
l'effondrement
doit tourner
 $a > 0.5$ pour rendre
compte des jets

Instabilité Magnéto-rotationnelle (MRI)

Balbus & Hawley 1991



La présence de champ magnétique dans un milieu ionisé: équivaut à lier les particules entre elles → ressorts

La rotation différentielle fait que m_i tourne plus vite (Ω supérieur, Période plus courte)

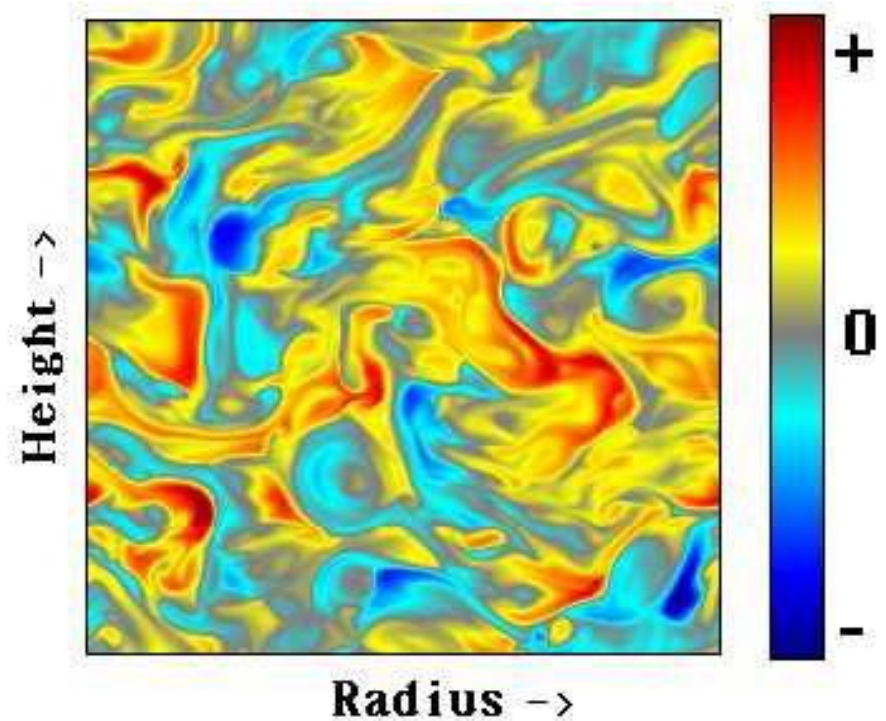
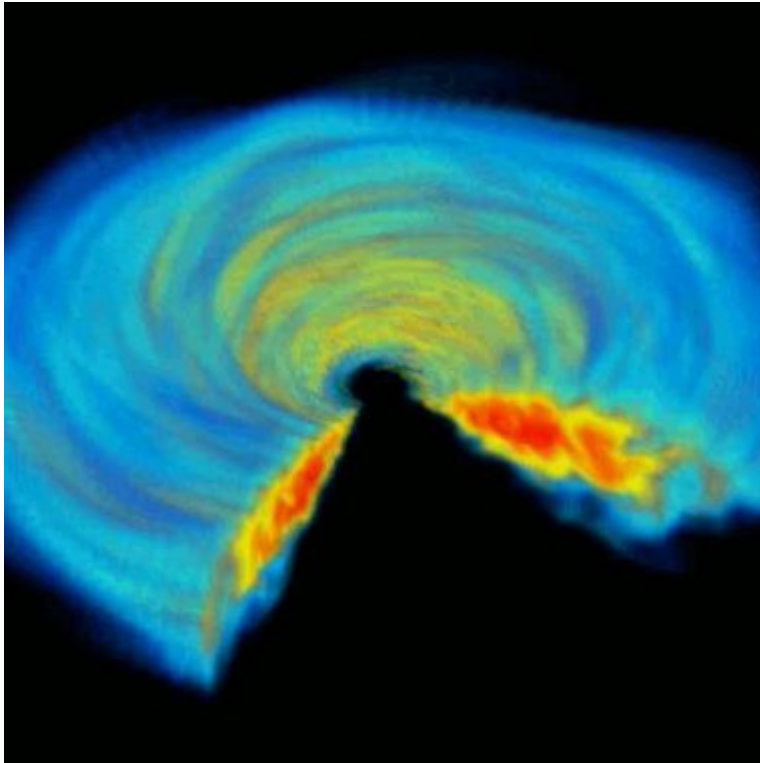
m_i tend à accélérer m_o , et à lui donner du moment angulaire.
Pourtant c'est m_o qui en a le plus!
 m_i tombe vers le centre et tourne de plus en plus vite!!

→ Instabilité très rapide, même (et surtout) pour B très faible

Simulations de la MRI

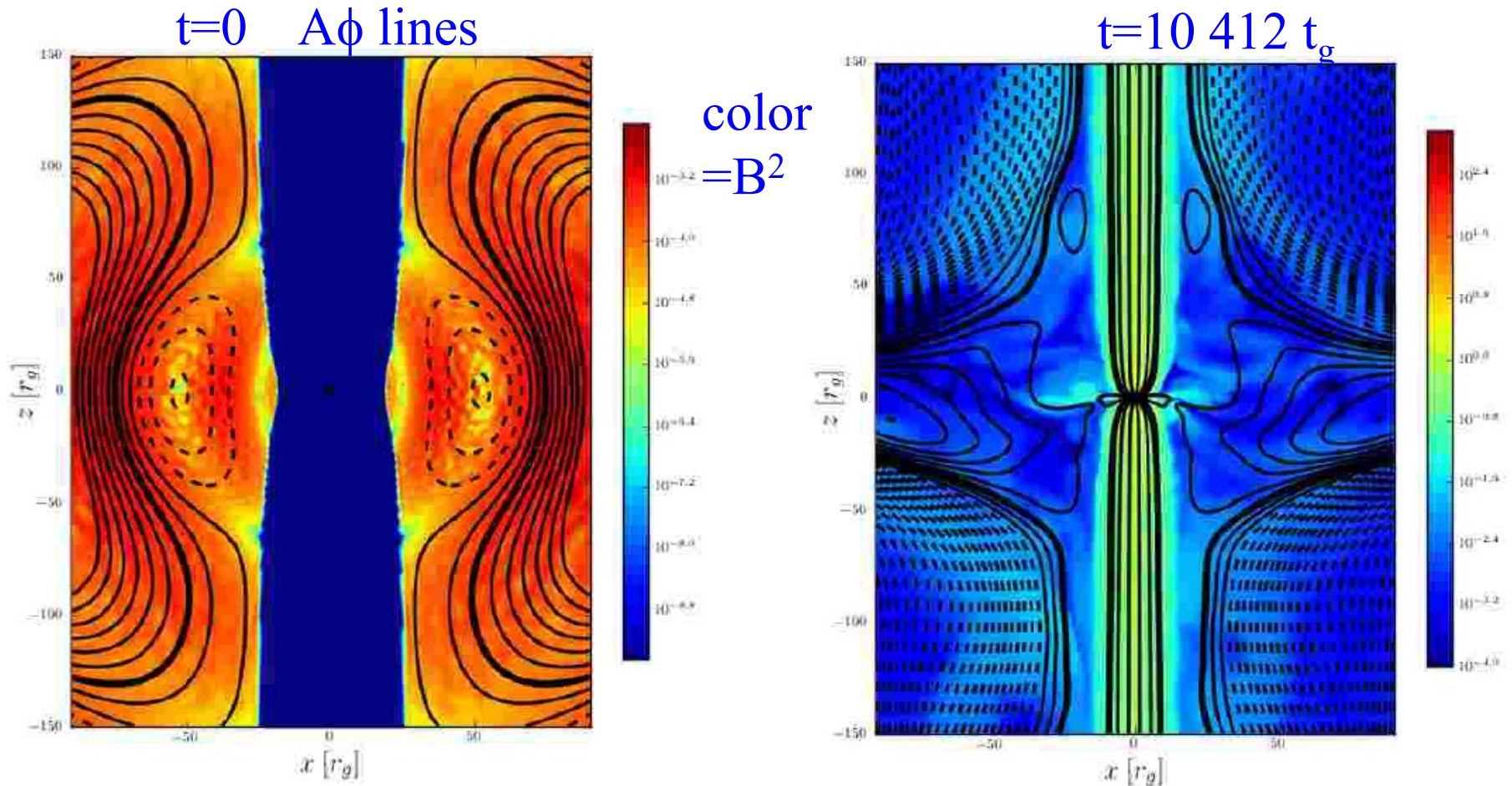
John Hawley

Visualisation 3D du disque
d'accrétion simulé avec MRI



Coupe du disque d'accrétion
Rouge, L supérieur à Keplérien
Bleu, L inférieur

Disques magnétiques saturés



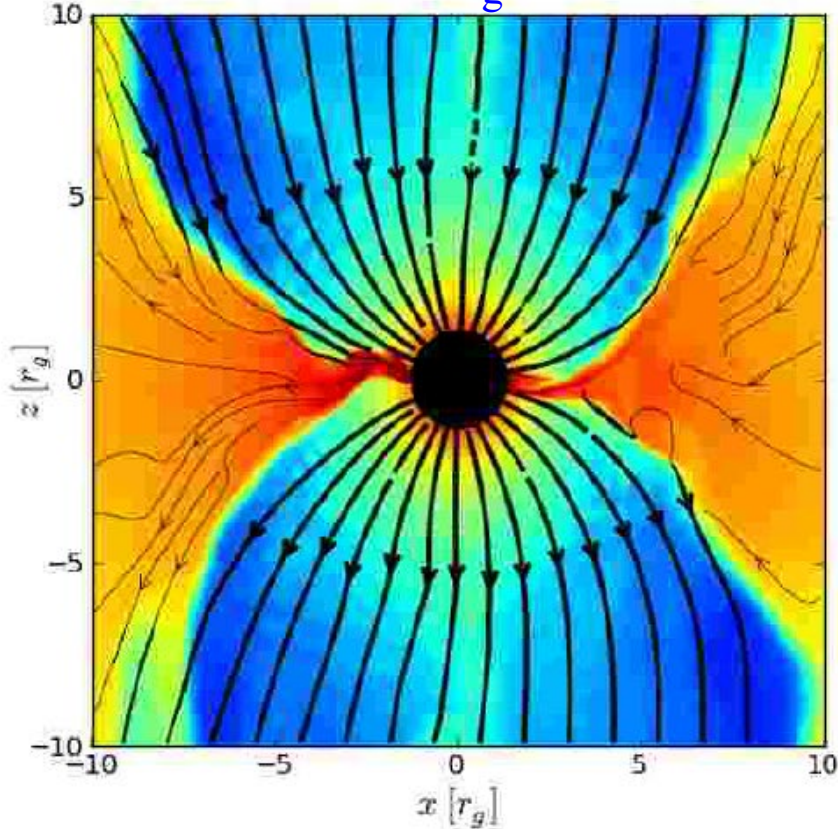
GR-MHD, disque initialement épais $H/R \sim 1$

Champ B dominant \rightarrow **MAD** Magnetically Arrested Disk

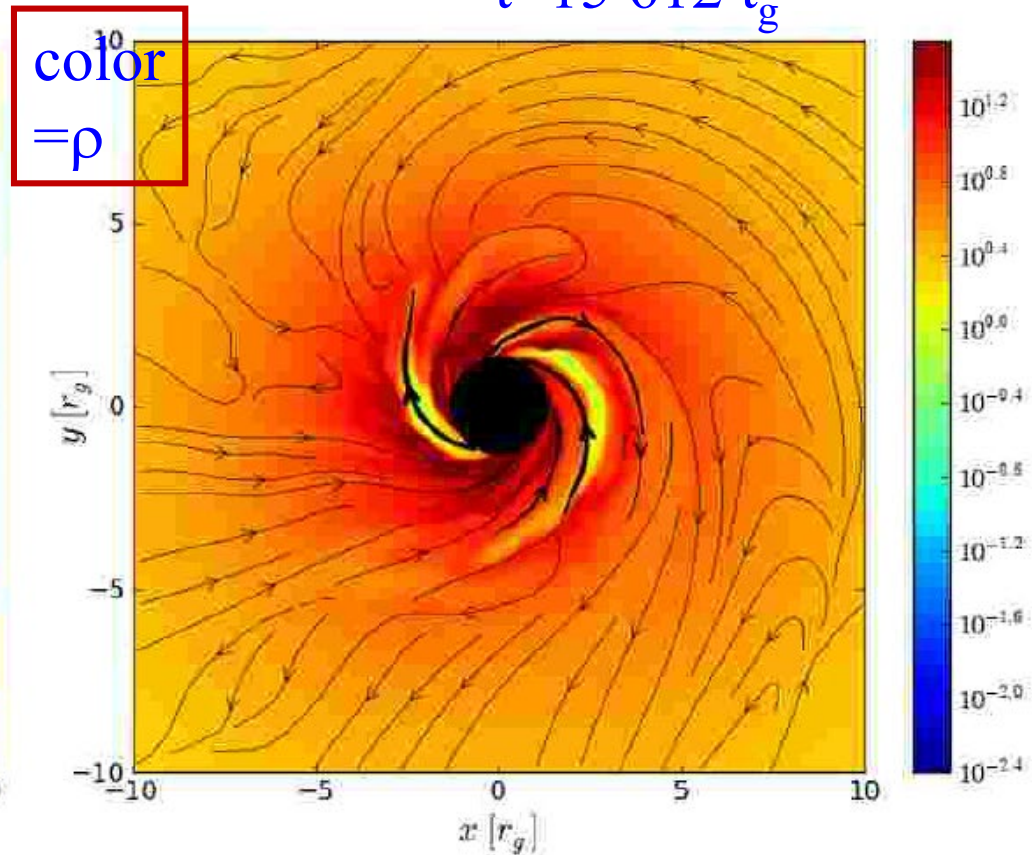
disque étouffé $H/R \ll 1$ jet 100% efficace si $a > 0.9$

Jets produits

$t=15612t_g$ B lines



$t=15\ 612 t_g$

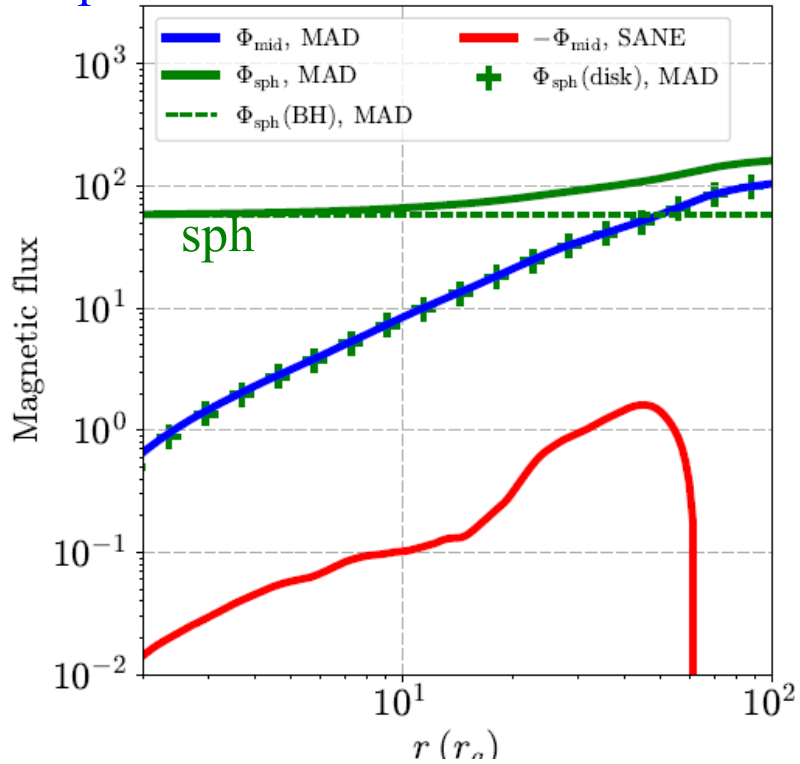


color
 $=\rho$

Instabilités RT \rightarrow QPO, avec période $70 t_g$

Energie pompée de l'énergie cinétique de rotation du trou noir

midplane



Comparaison MAD/SANE

SANE: Standard and Normal Evolution

MAD: sub-kepler SANE: kepler

Asymétrie, et propagation de bulles magnétisées

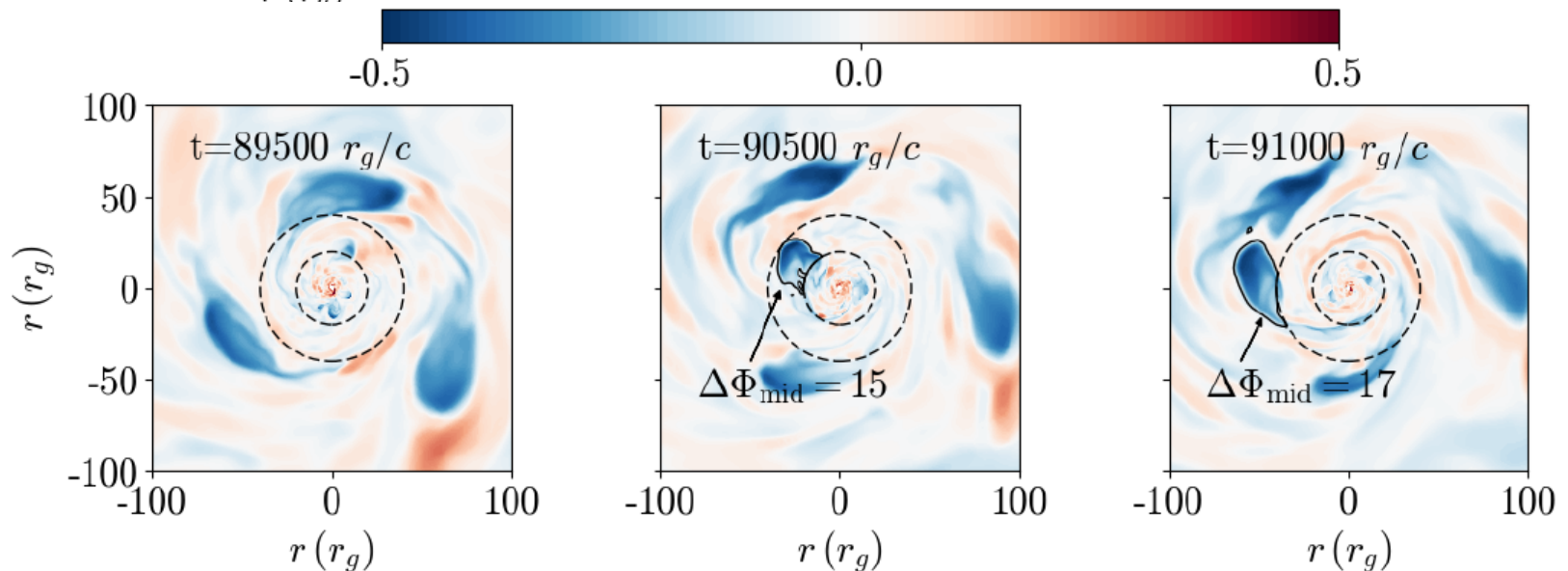
Bulle bleue entourée d'un contour plein

Rayons $20r_g$, $40r_g$ en pointillés

MRI persiste

$$r^2 B^\theta$$

Begelman et al 2021



Production de jets et GRB170817

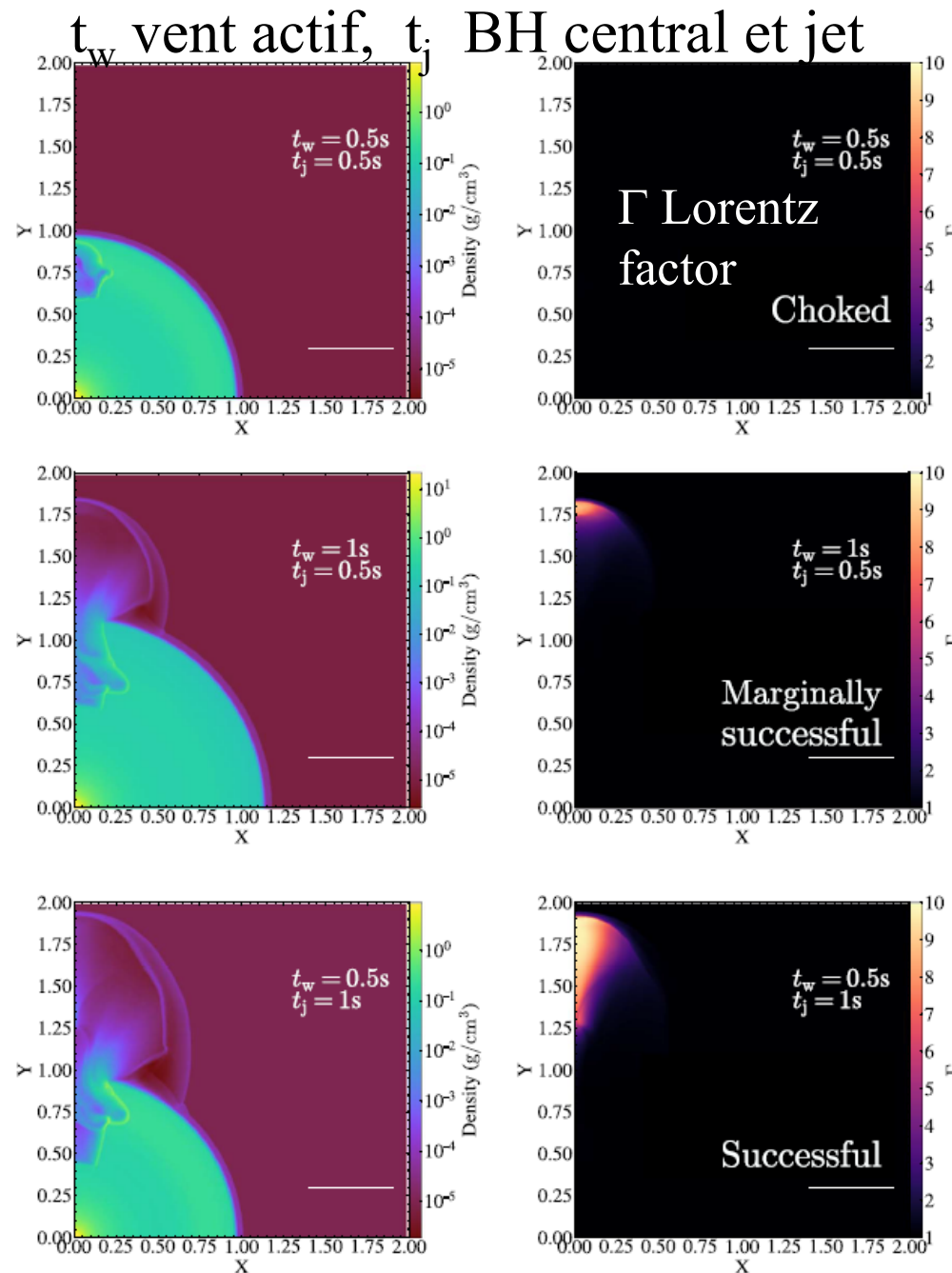
Champ B amené vers le centre
accrétion \rightarrow MAD
MRI partiel + RTI, accrétion
trou noir central, + jets

Compétition t_{collapse}
Interaction jet-vent

Accrétion critique, et vitesse
minimum, pour que le GRB
soit visible

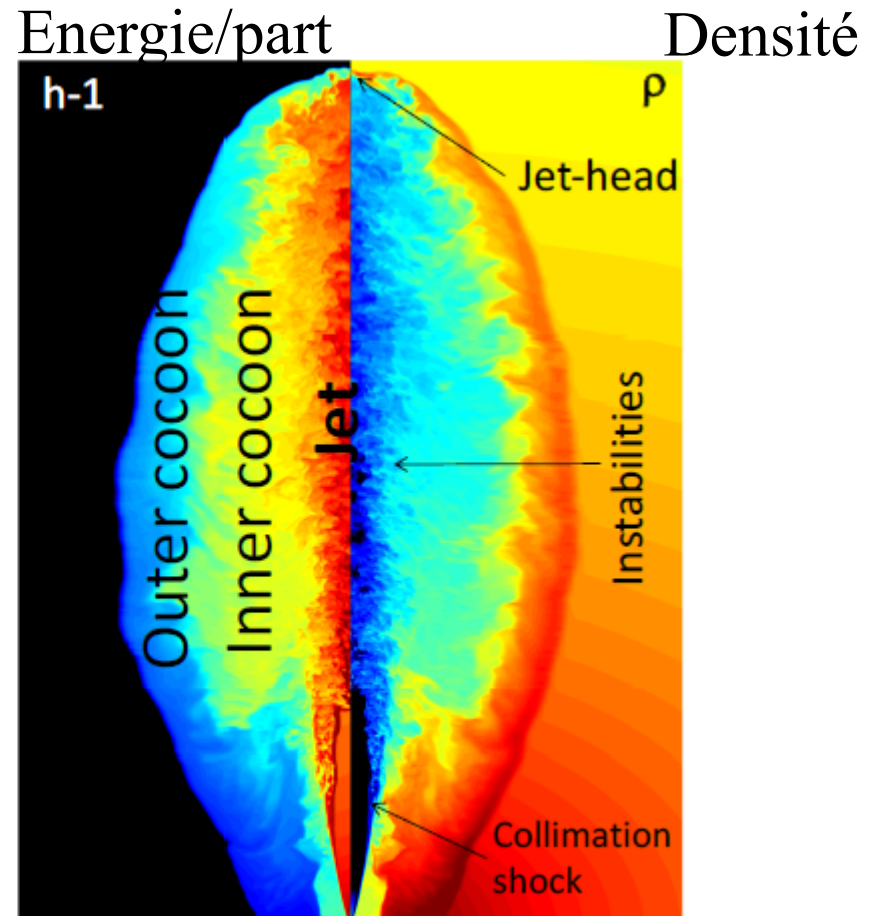
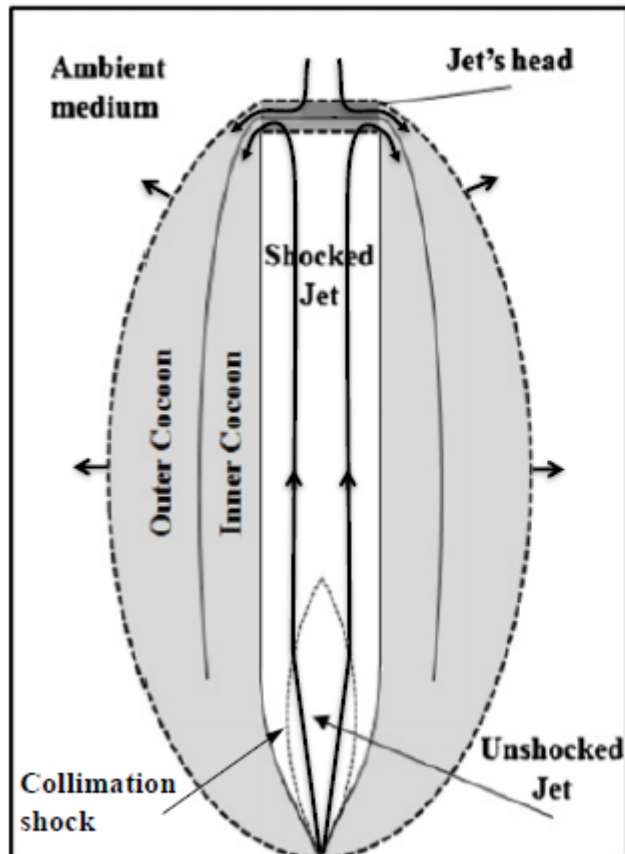
\rightarrow 1.7 s entre la fusion et le jet
Vue off-axis de 15°

Murugua-Berthier et al 2021



Géométrie jet-cocon

Le jet interagit avec le milieu ambiant, la matière redescend pour former le cocon, à partir des éjecta (+choc arrière, inner), bulle haute pression
→ collimation

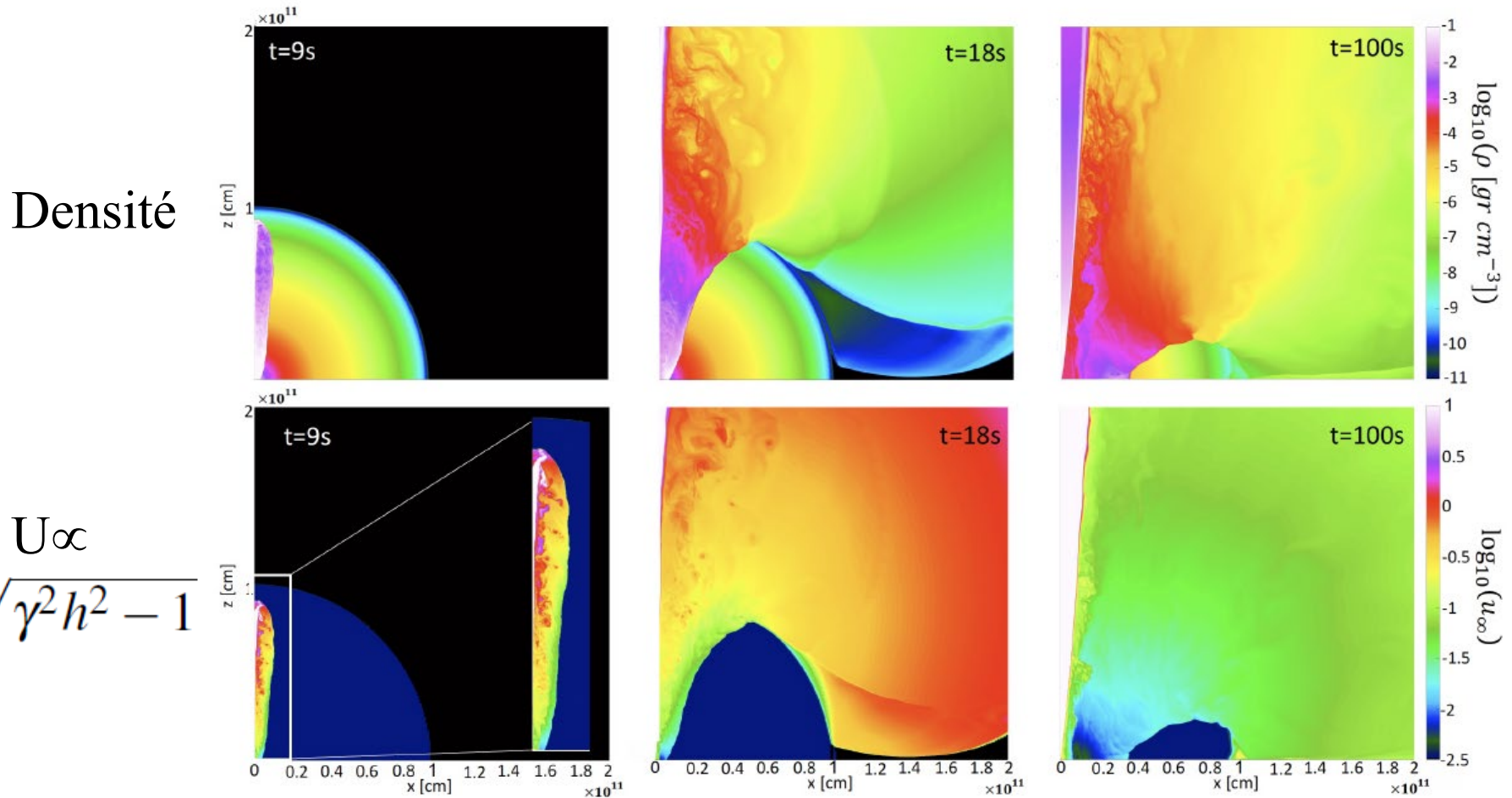


Outer: ejecta, milieu plus froid et dense

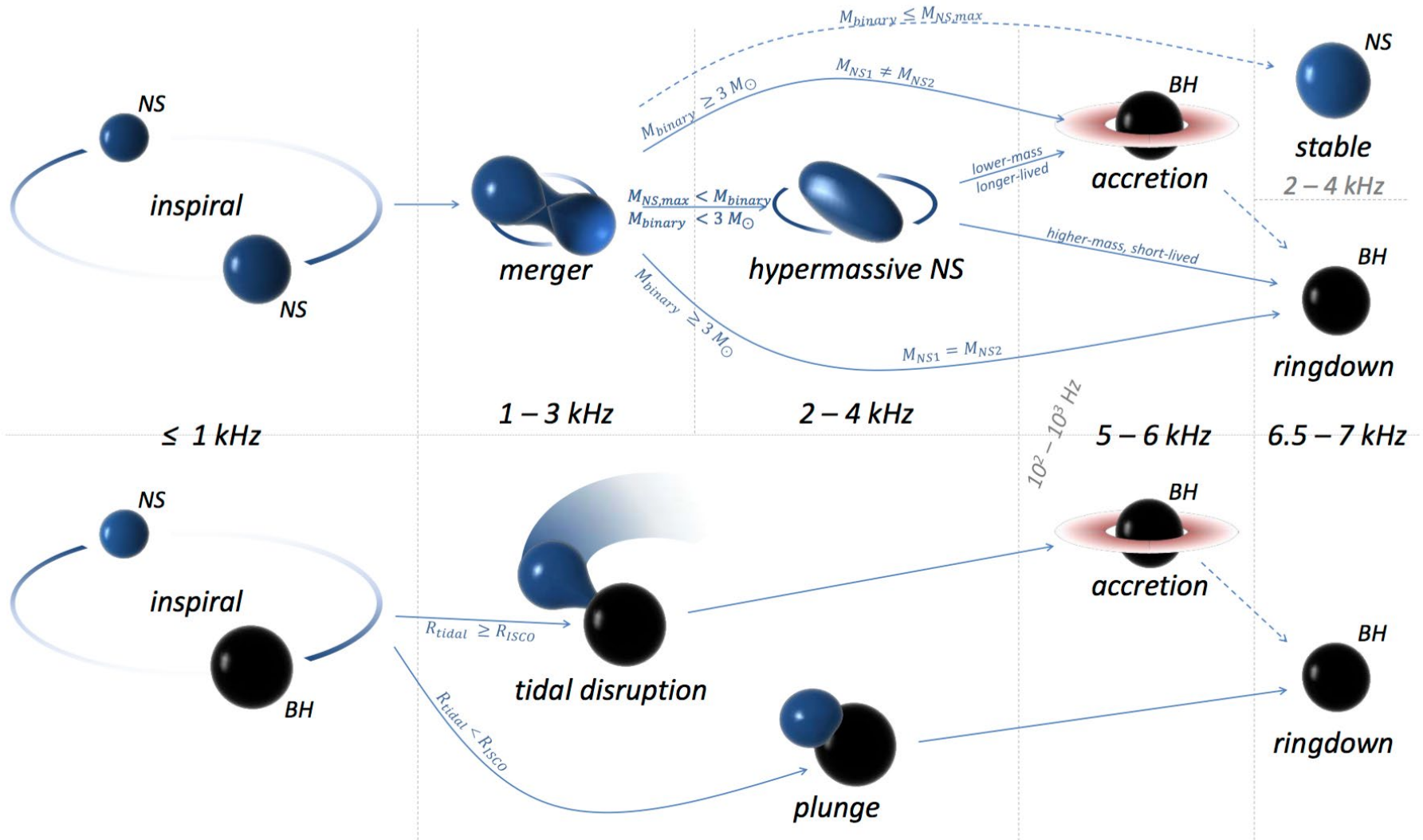
Nakar 2020

Simulations jet de GRB long

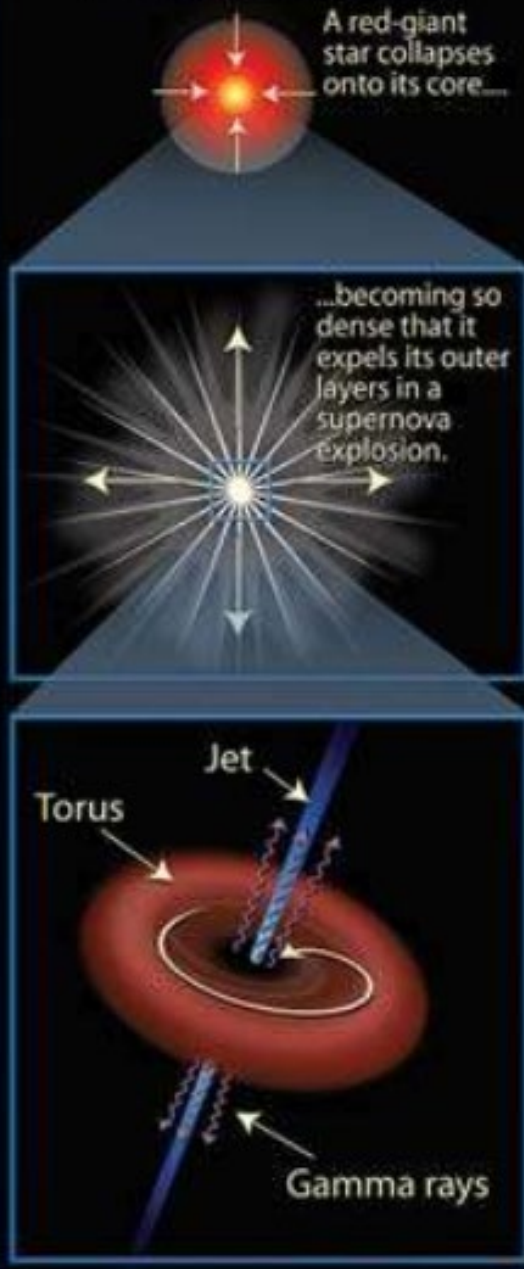
Dans la supernova, la majorité de l'énergie est éjectée de façon sphérique dans l'explosion (sub-relativiste). Jet = 0.01-0.1 %
Semblable rapport d'énergie pour GRB170817 (court)



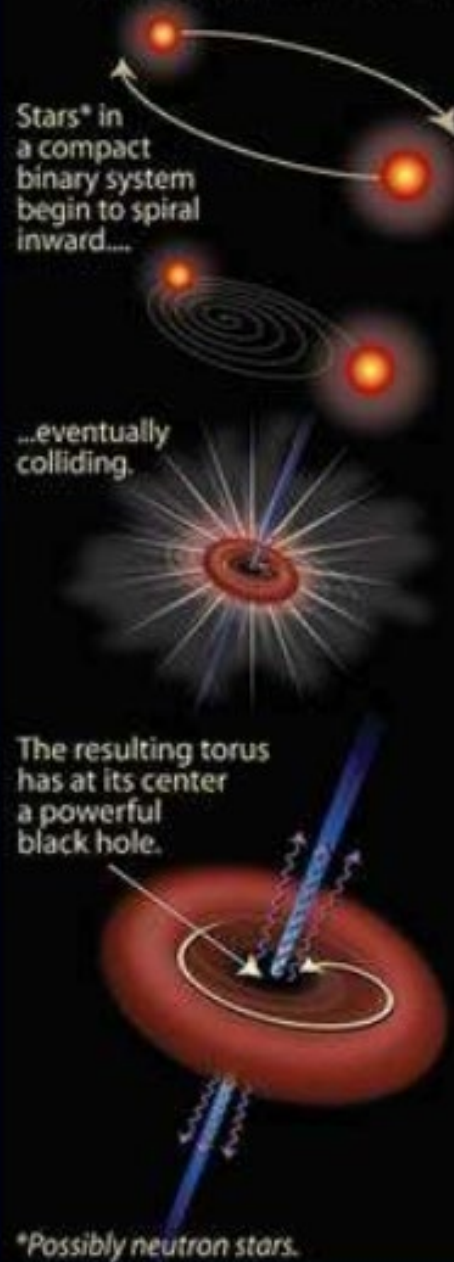
Deux possibilités: NS-NS, BH-NS



Long gamma-ray burst (>2 seconds' duration)



Short gamma-ray burst (<2 seconds' duration)



GRB longs

Etoile massive en fin de vie → Géante rouge
Effondrement
explosion SN
→ NS ou BH
Champ B et rotation forts

GRB courts

Objets compacts binaires
→ fusion,
→ Ondes gravitationnelles
→ NS ou BH
Champ B et rotation forts

Résumé

Les GRB courts à distinguer des
flares de magnétars → SGR

Longs: effondrement, collapsar

Courts: fusions NS-NS, BH-NS

→ Afterglow, presque universel
Réinjection d'énergie, cassure du jet

→ Mécanismes; boule de feu
thermique (photosphère), chocs
Synchrotron

→ Simulations: GR-MHD

Sursaut gamma long



Sursaut gamma court