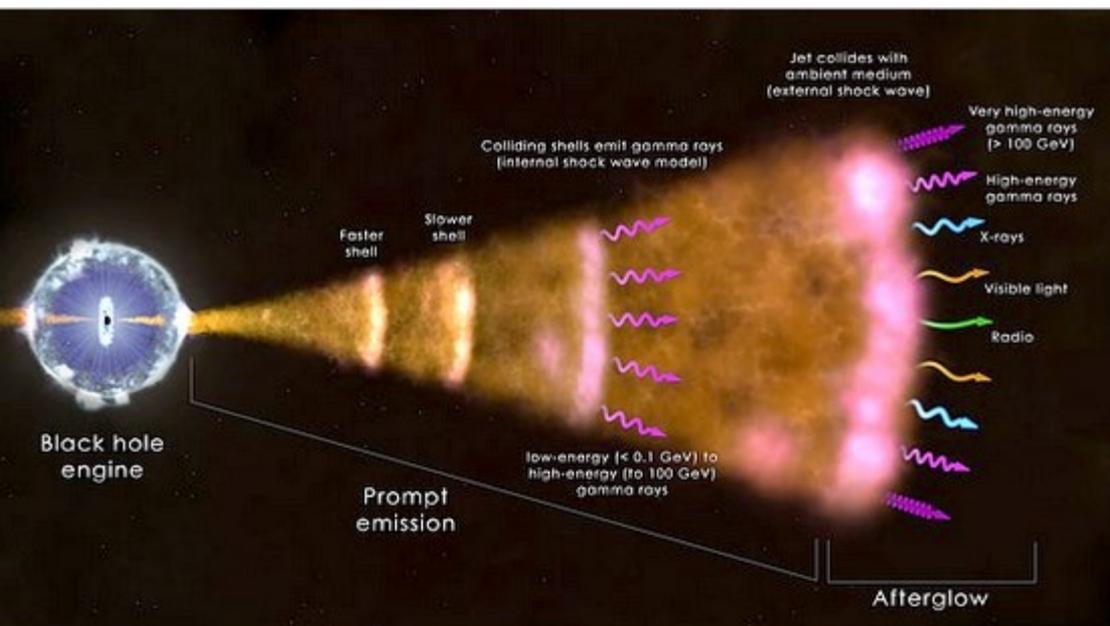




COLLÈGE  
DE FRANCE  
—1530—

*Chaire Galaxies et Cosmologie*

# Sursauts Gamma (GRB): Théories



Françoise Combes



# Diversité des modèles

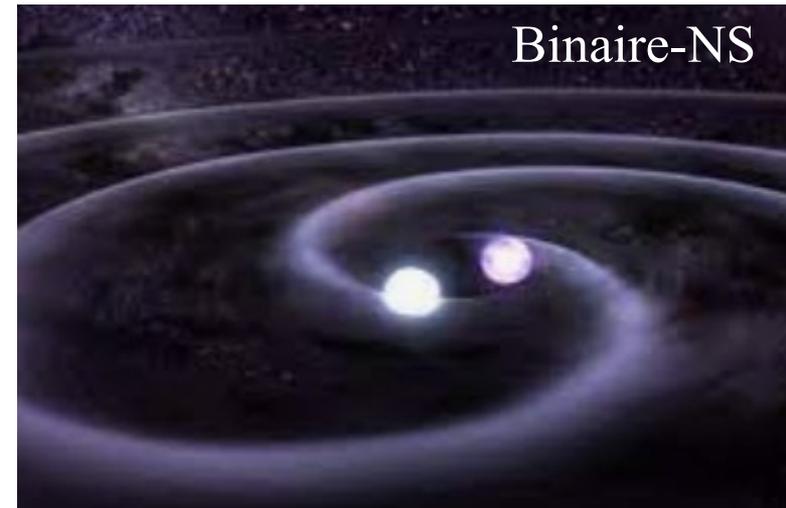
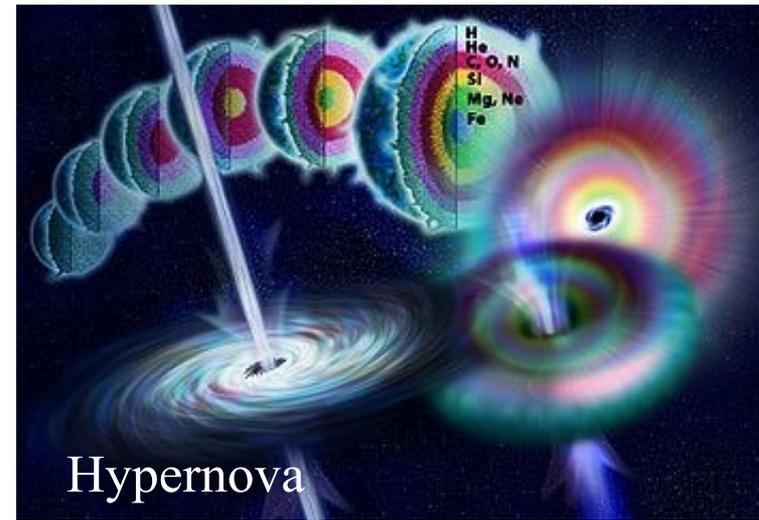
→ Contraintes des observations

→ 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  $2$ - $10^\circ$

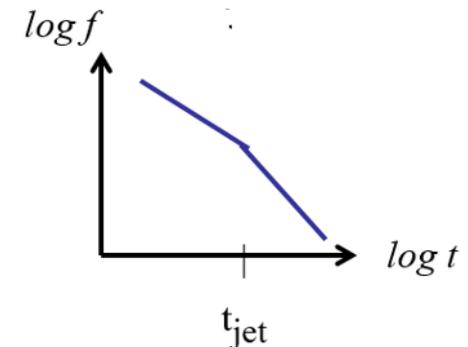
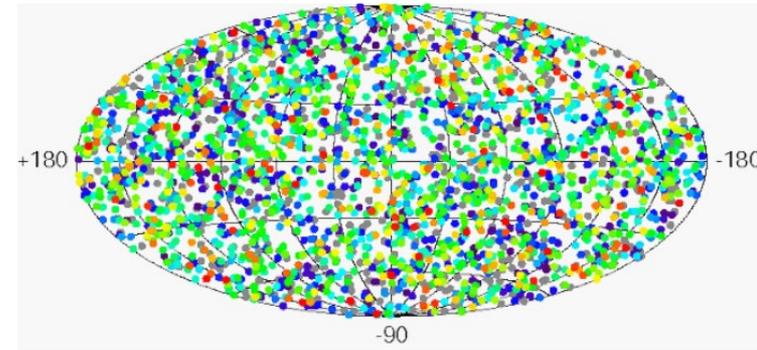
Beaming, réduction de  $100$ - $10^3 \rightarrow 10^{48}$ - $10^{52}$  erg

Ultra- relativiste:

$V$  superluminique pour GRB 030329

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

$\Gamma$  plutôt  $100$ - $700$ !



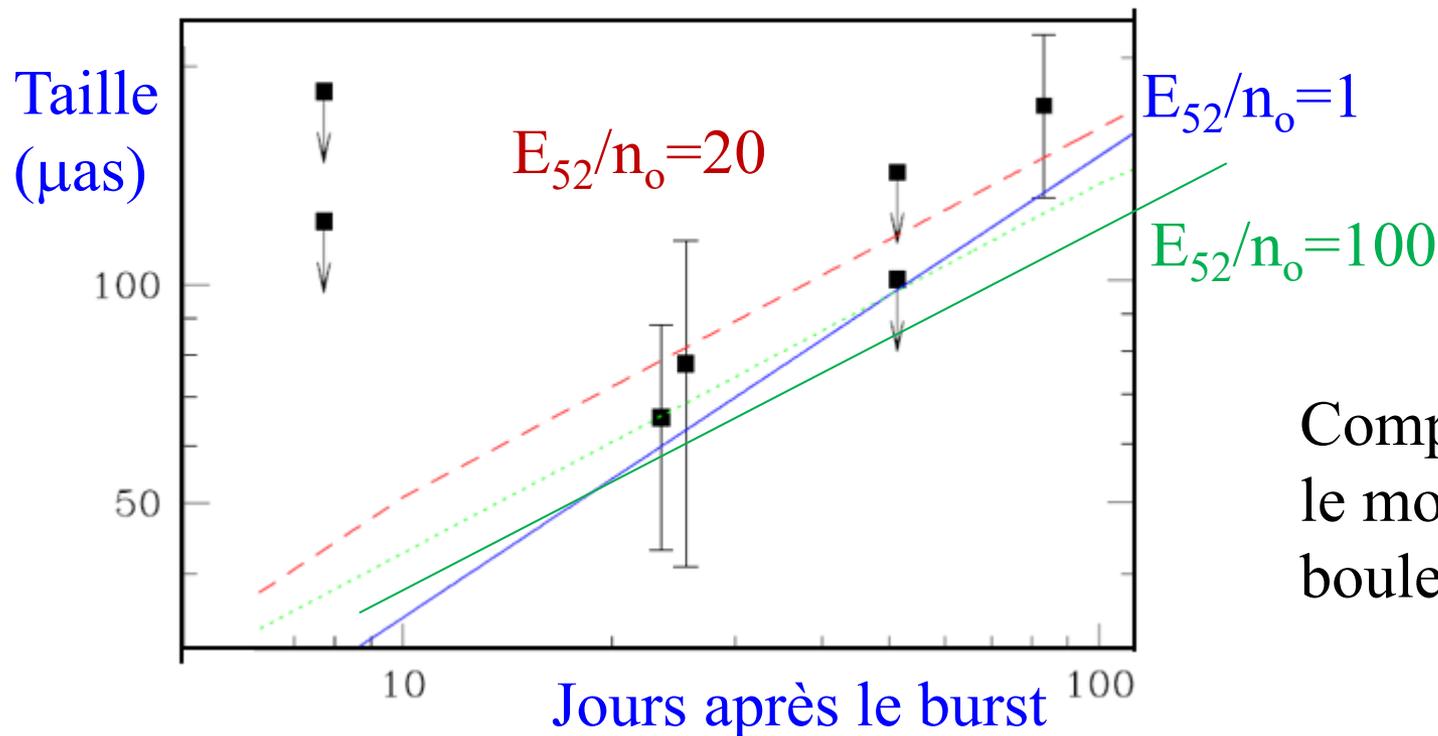
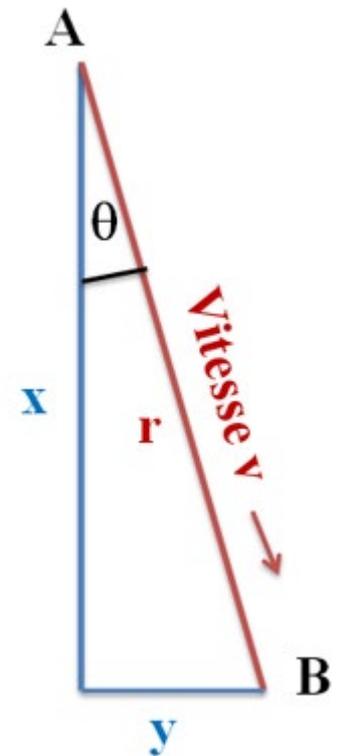
# Vitesse superluminique

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

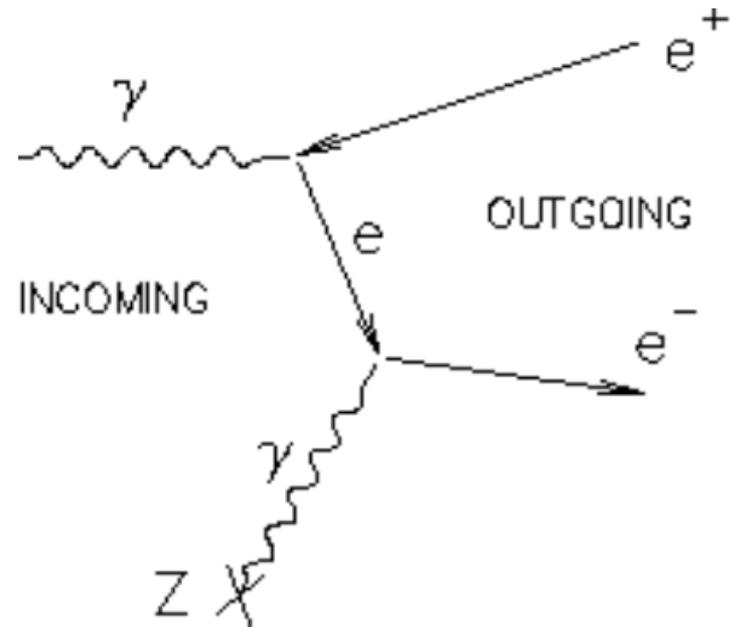
# Problème de compacité

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

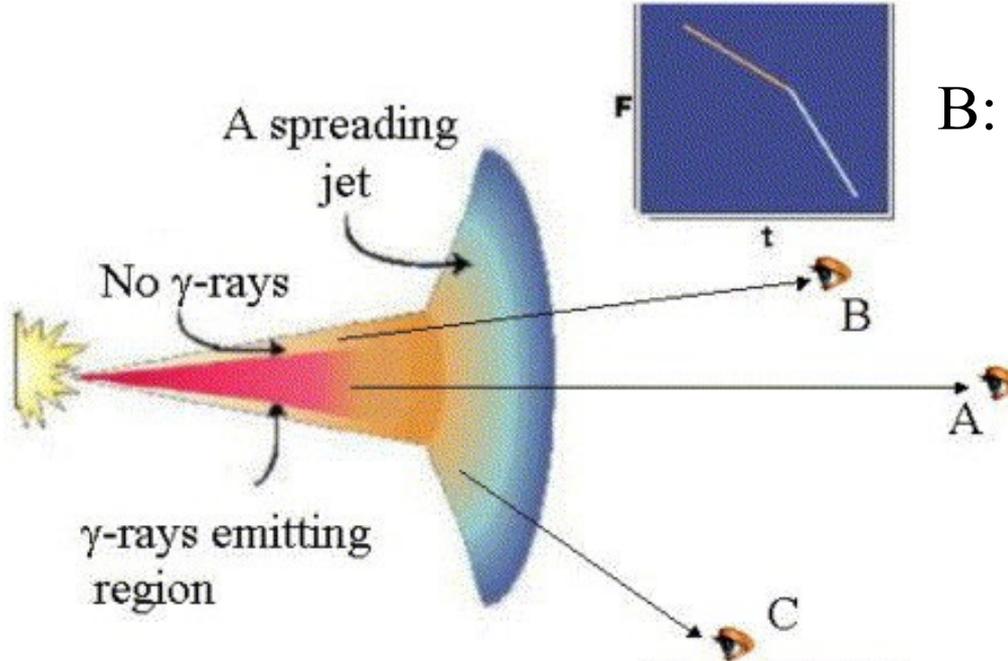
Les rayons de grande énergie (GeV) ne peuvent sortir que si les  $\gamma$  mous ( $< \text{MeV}$ ) n'existent pas →  $\Gamma > 100$

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

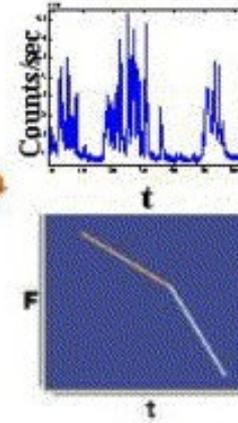
*Zou & Piran 2010*



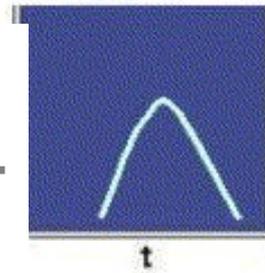
# Structure du jet: cassure



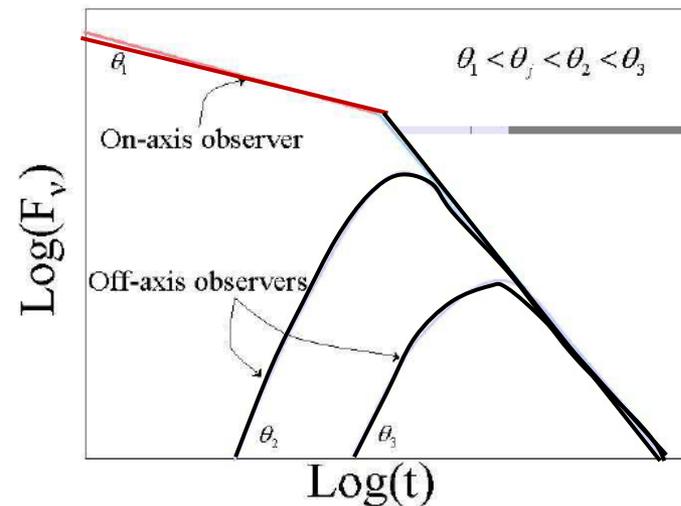
B: pas de gamma + afterglow



A: GRB + afterglow



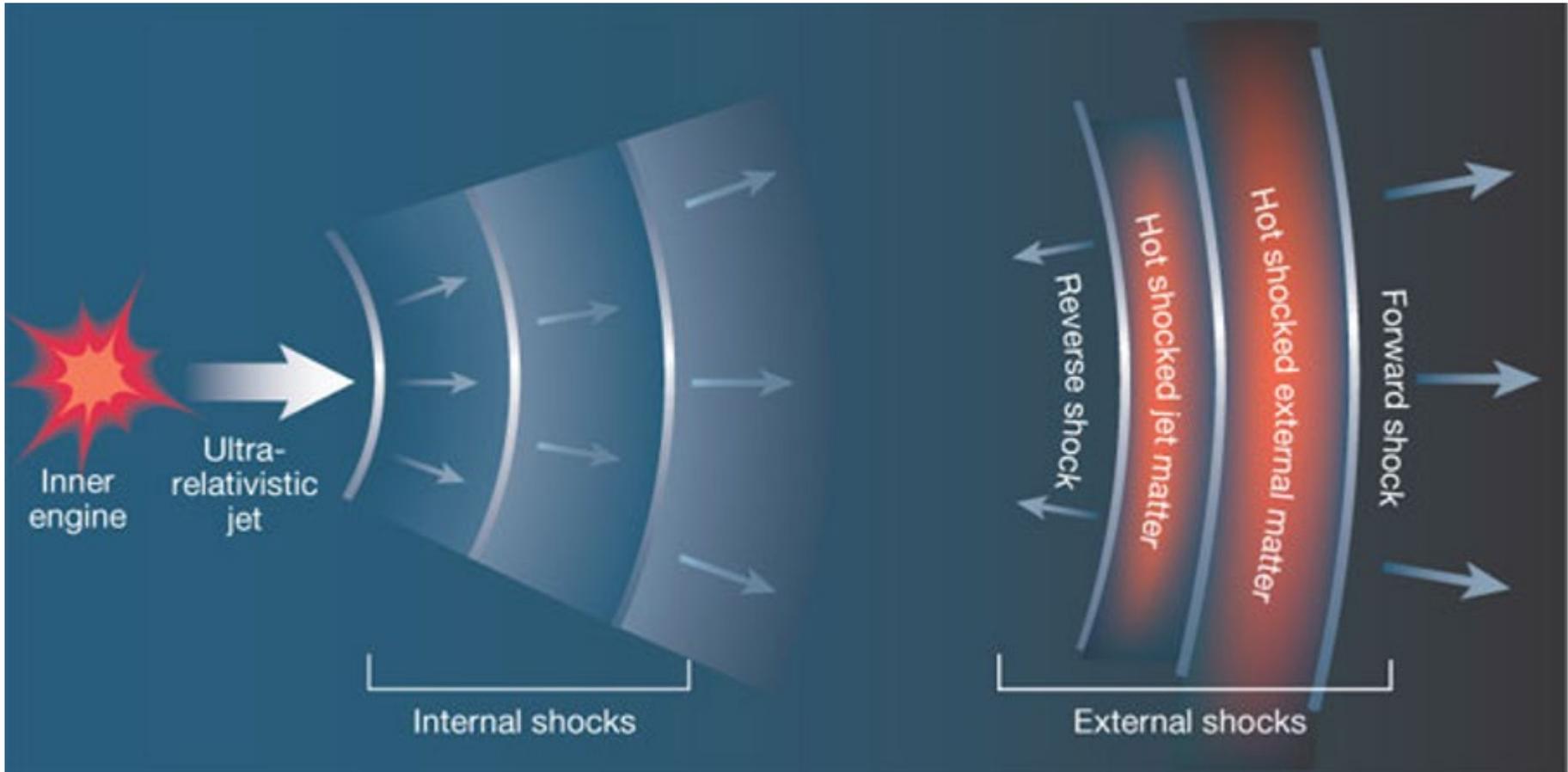
C: observateur off-axis,  
Uniquement afterglow,  
après la cassure, et expansion du jet



# Beaming et Structure du jet

Ondes de choc: internes pour le sursaut principal

Chocs externes: afterglow



# Bimodalité des observations

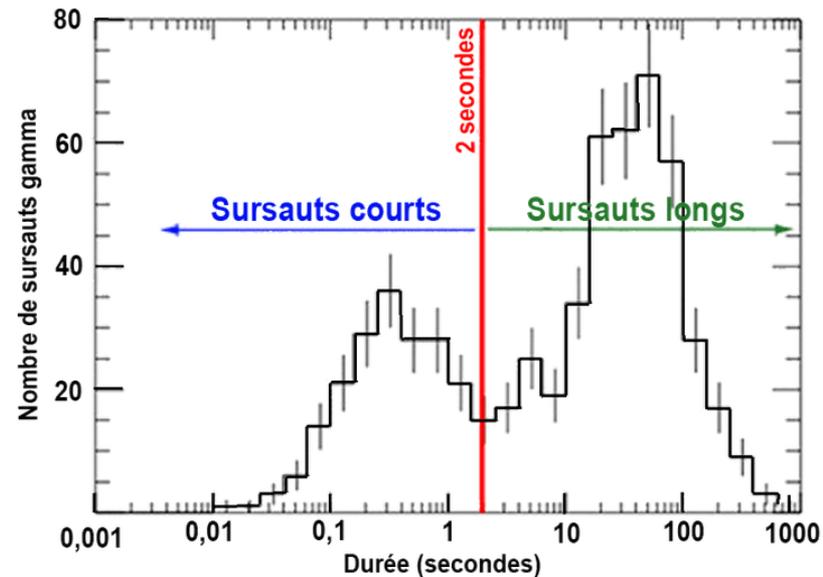
Durée des sursauts: permet de distinguer les deux types de sources (séparation par 2s)

**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  $z \sim 9$

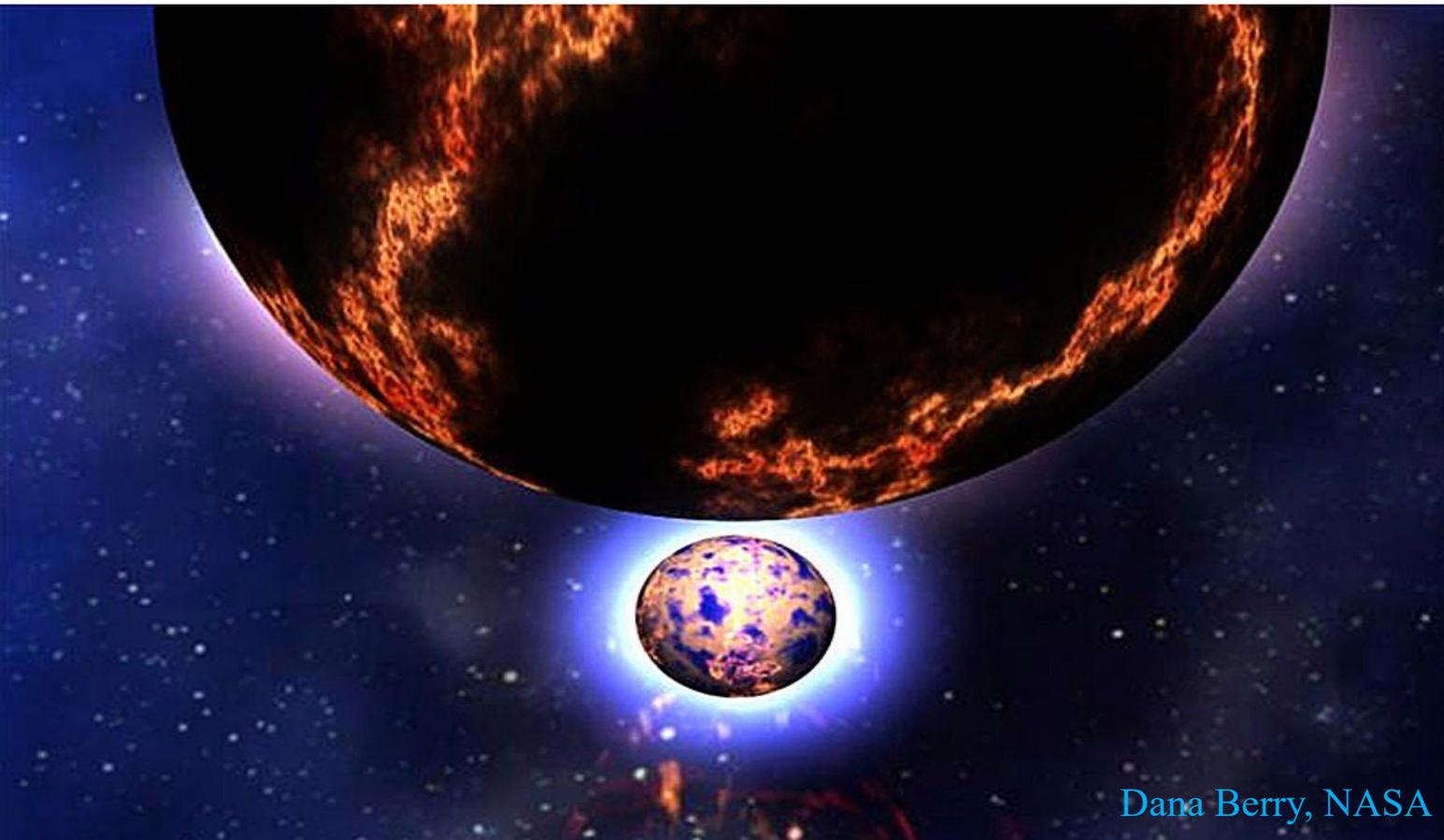
**GRB980425/SN1998bw**

**GRB030329/SN2003dh**

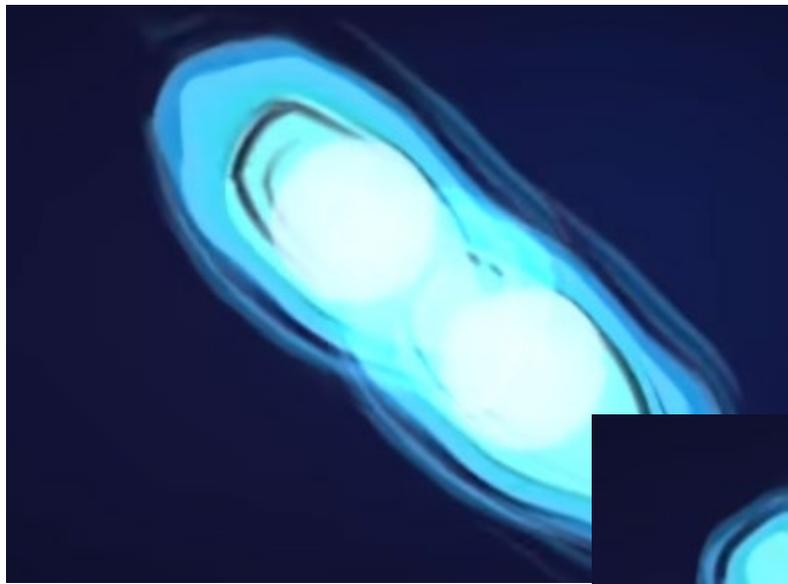
# GRBs courts: fusion d'étoiles à neutrons

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

Galaxies-hôte  
de tous types



# GRBs courts: scénario

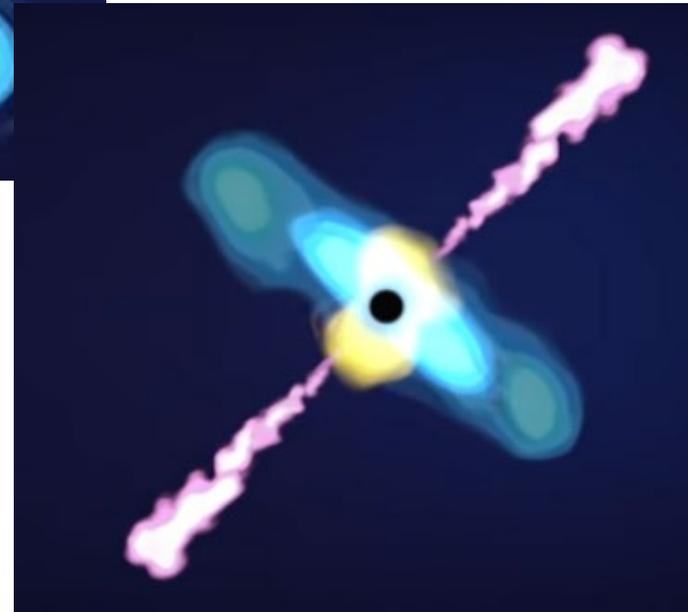


Fusion de deux  
étoiles à  
neutrons

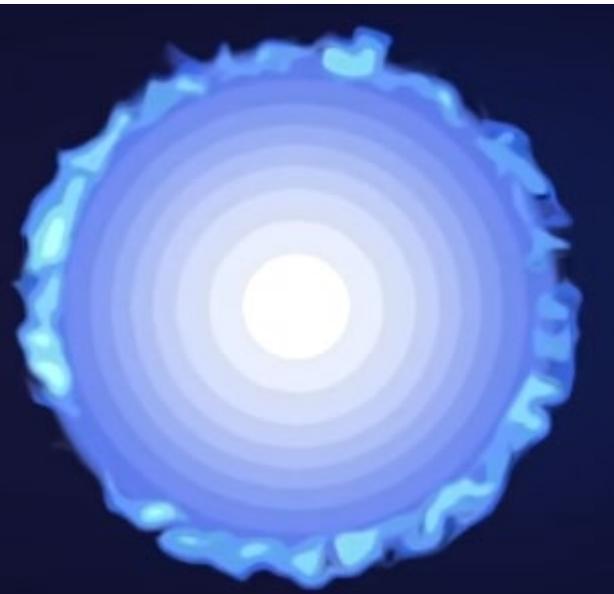


Effondrement  
du cœur en  
trou noir +  
disque d'accrétion

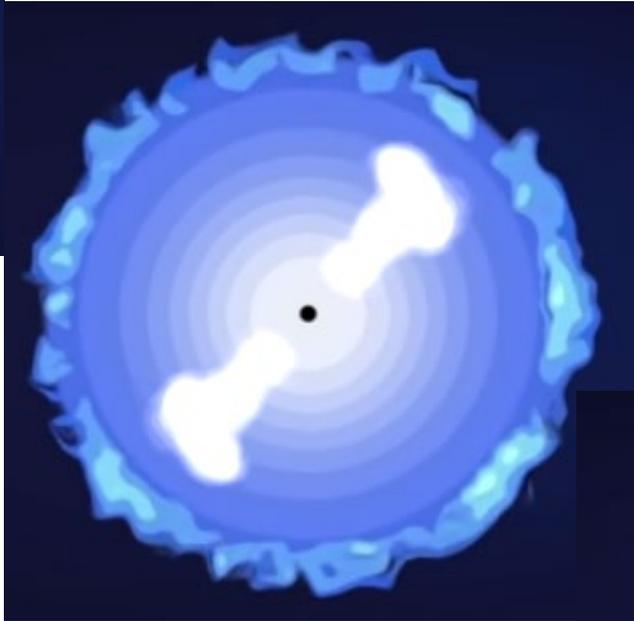
Ejection du jet  
de particules  
relativistes



# GRBs longs: scénario

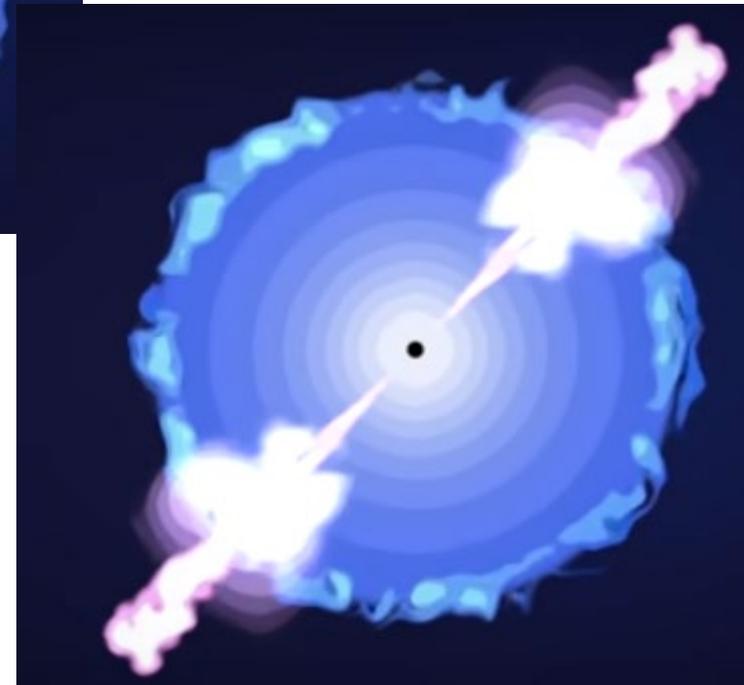


Explosion d'une étoile massive en supernova

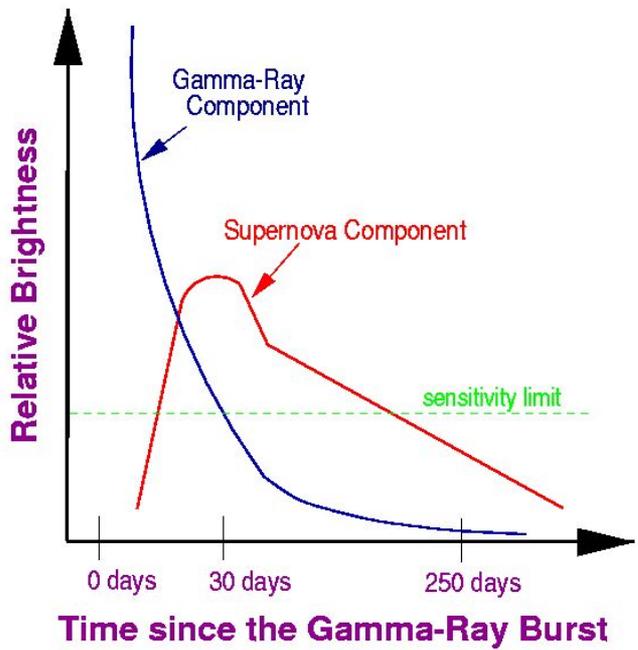


Effondrement du cœur en trou noir

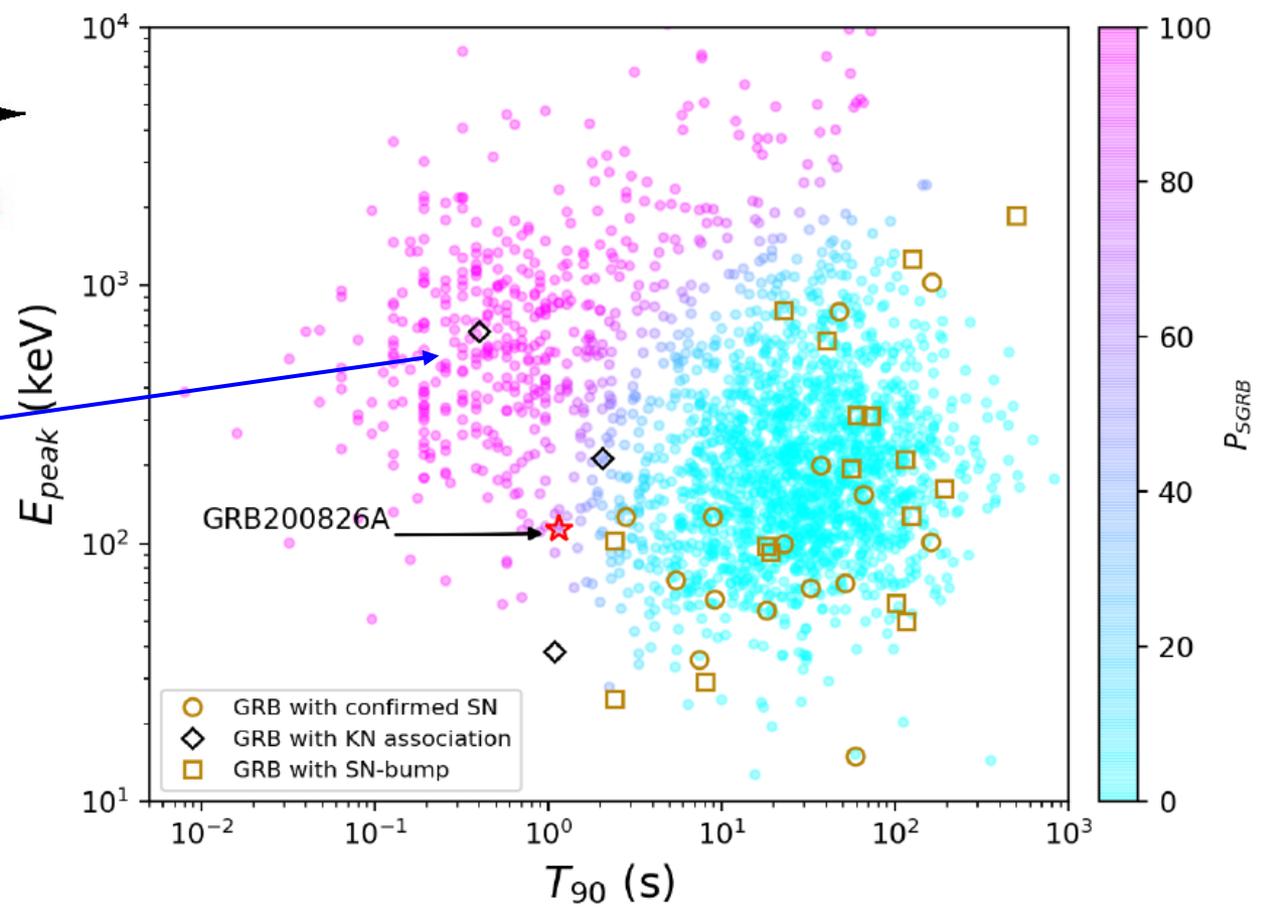
Ejection du jet de particules relativistes au-delà de la nébuleuse



# SN: aussi des GRB courts



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



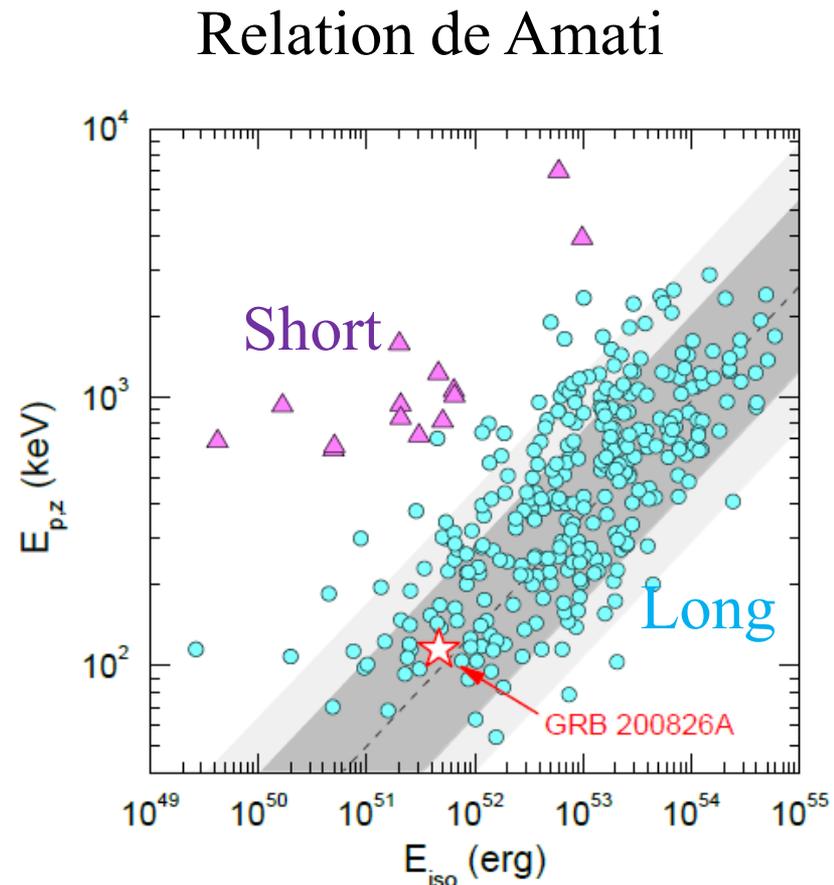
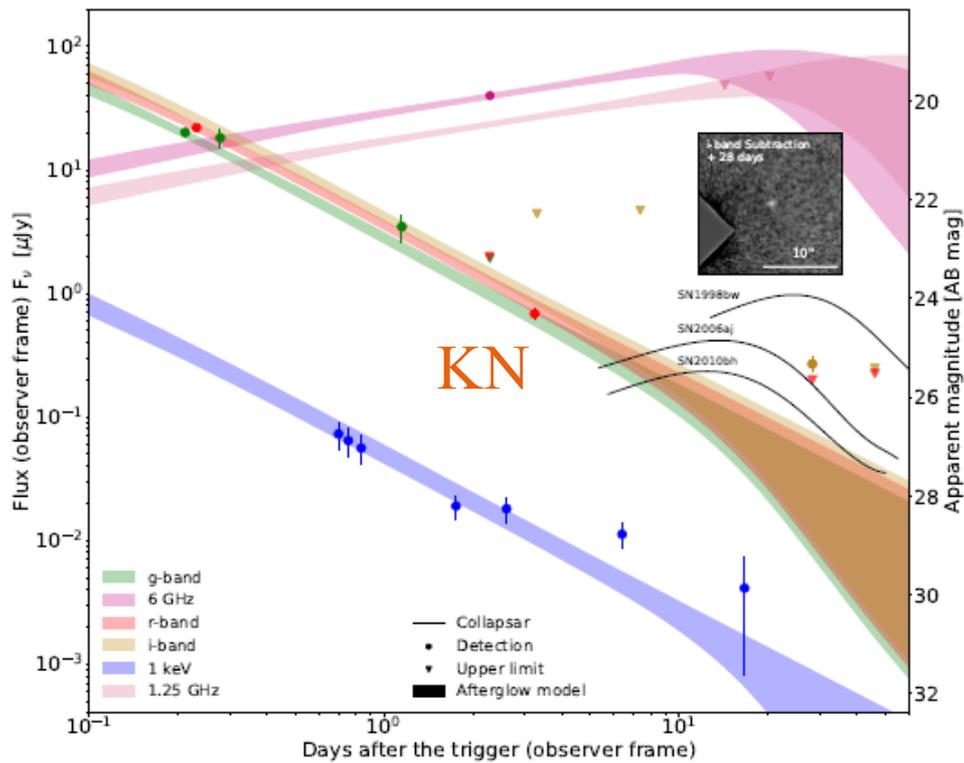
◇ KN Kilonova

SN confirmé par  
spectro o ou  
bosse □

# GRB200826A: une supernova

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

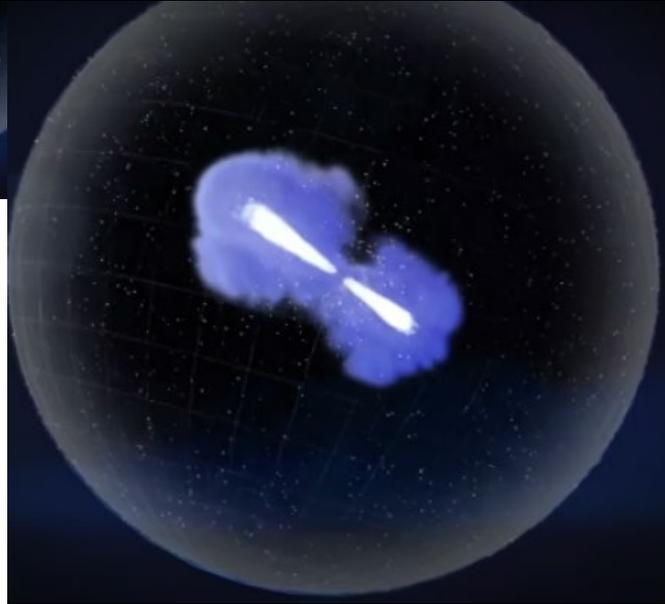
Galaxie hôte identifiée, avec le spectre d'une SN



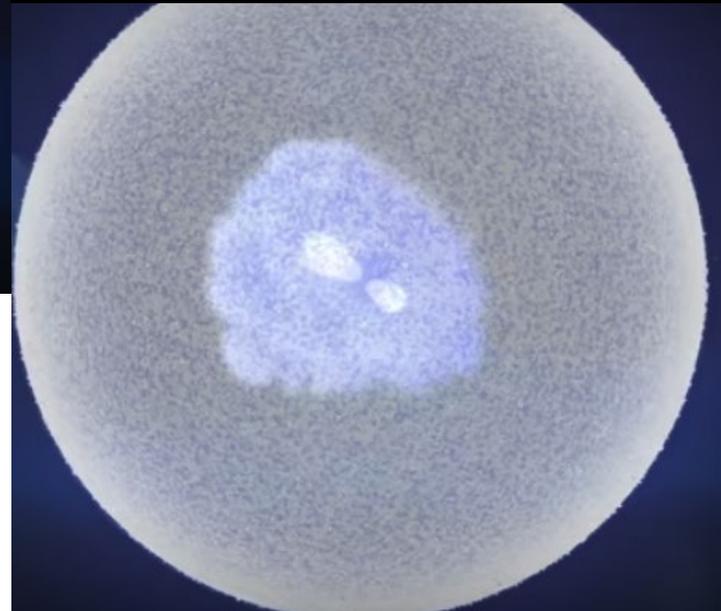
Nébuleuse de supernova



Jet relativiste peu énergétique



Jet perdu pour les rayons  $\gamma$



## Supernova: GRB manqués

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

Même pris en compte le beaming

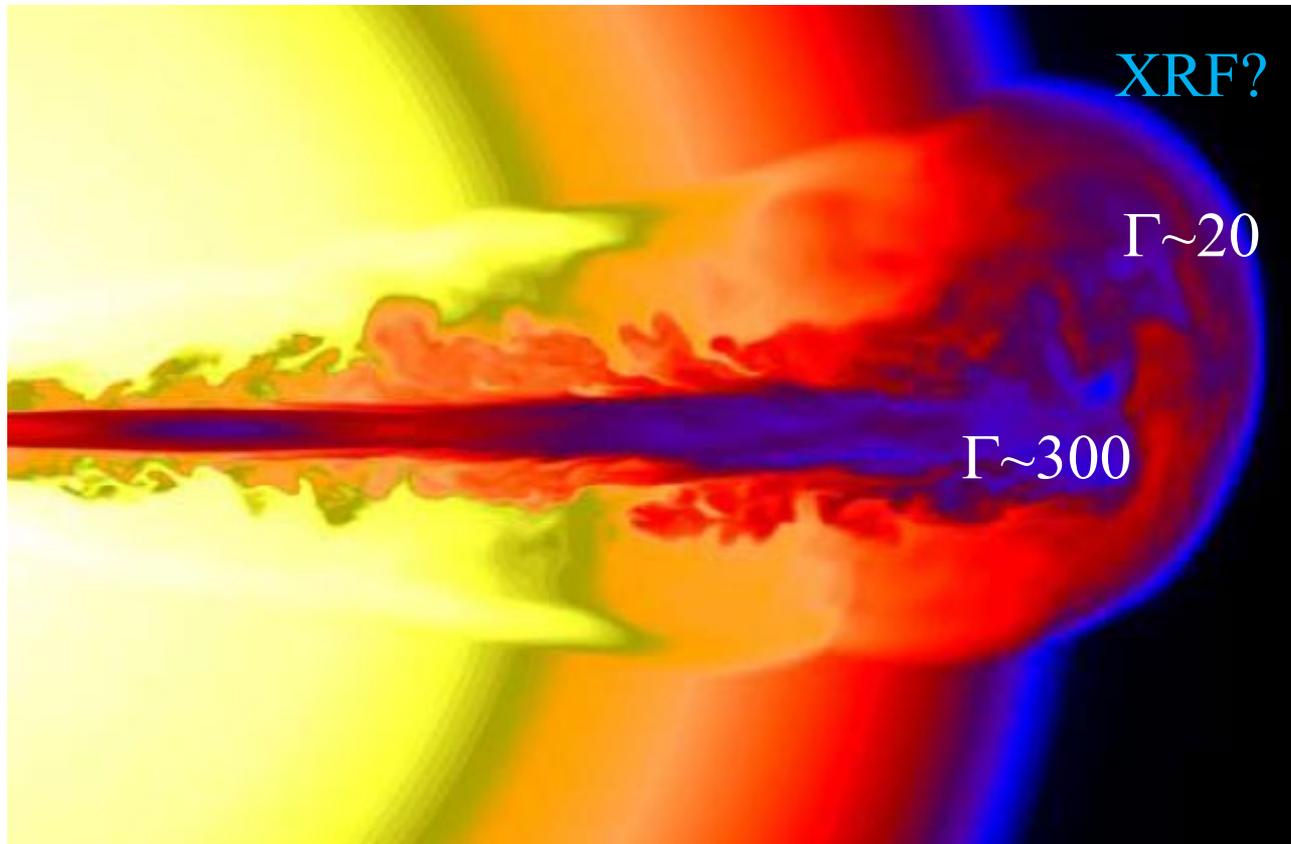
→ Les jets ne sont pas tous  
capables de sortir en gamma

**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

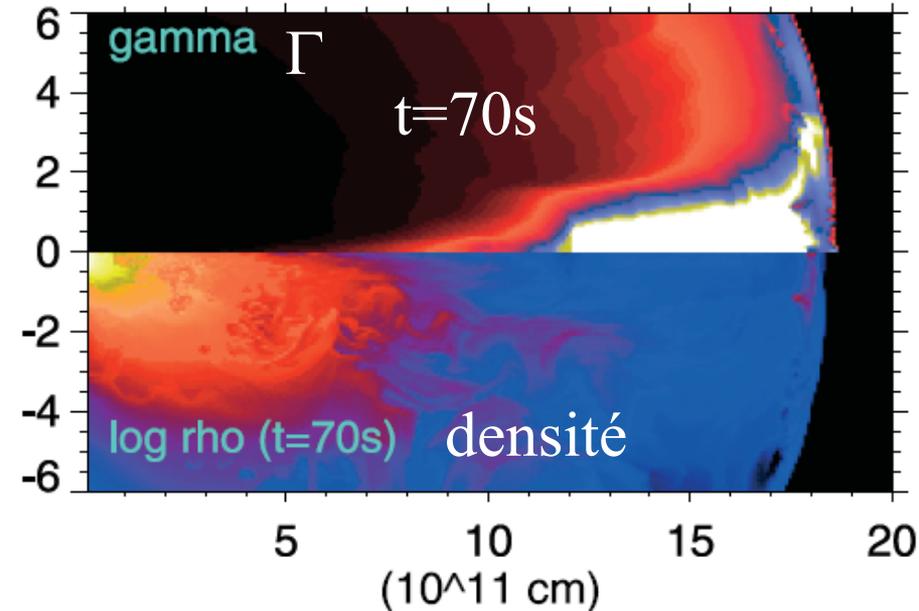
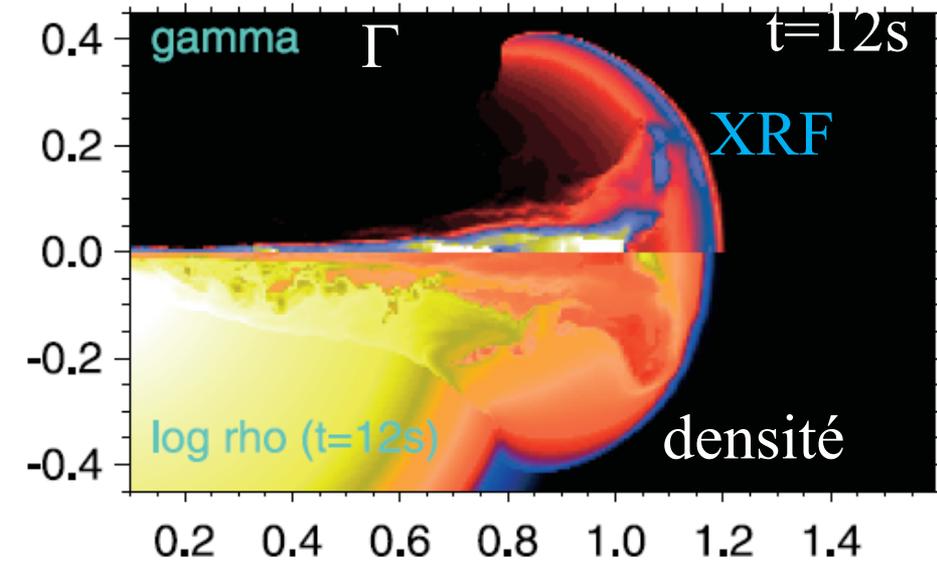
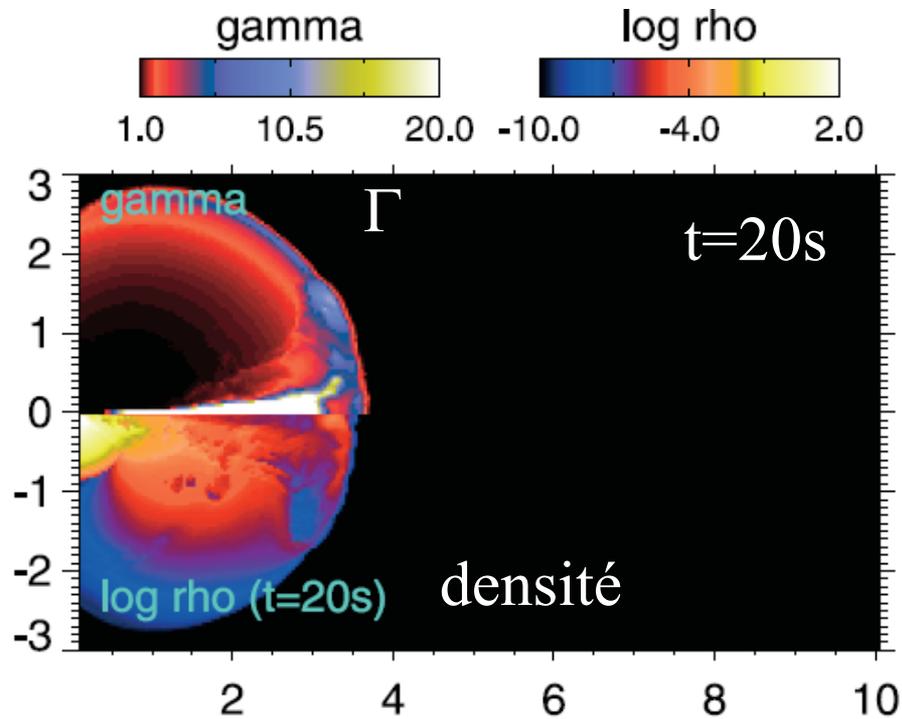
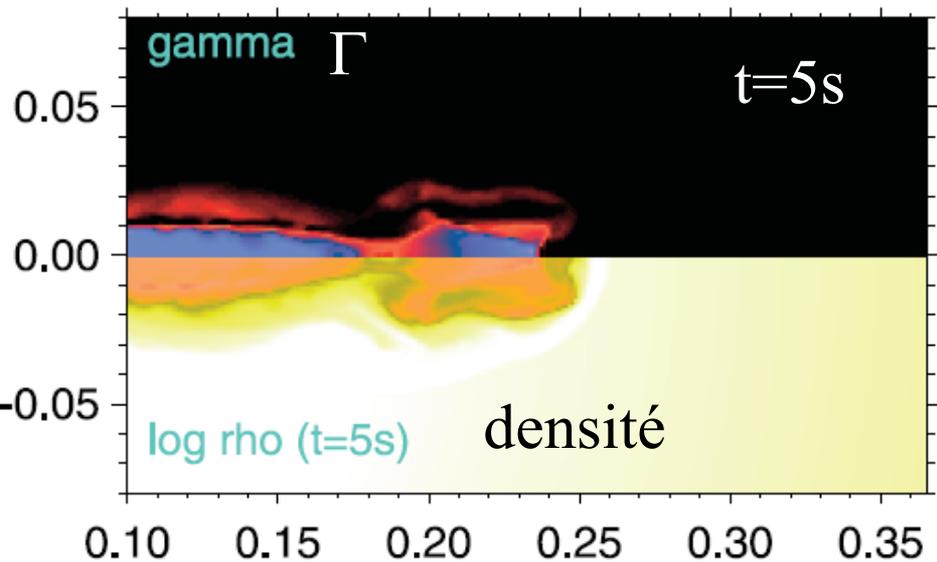
$>20 M_{\odot}$



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

*Zhang, Woosley, Heger 2004*

# Model 2A



R(WR)

Zhang, Woosley, Heger 2004

# Certains S-GRB: sursauts de magnétars

Certains se répètent: une 3<sup>ème</sup> catégorie de GRB?

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

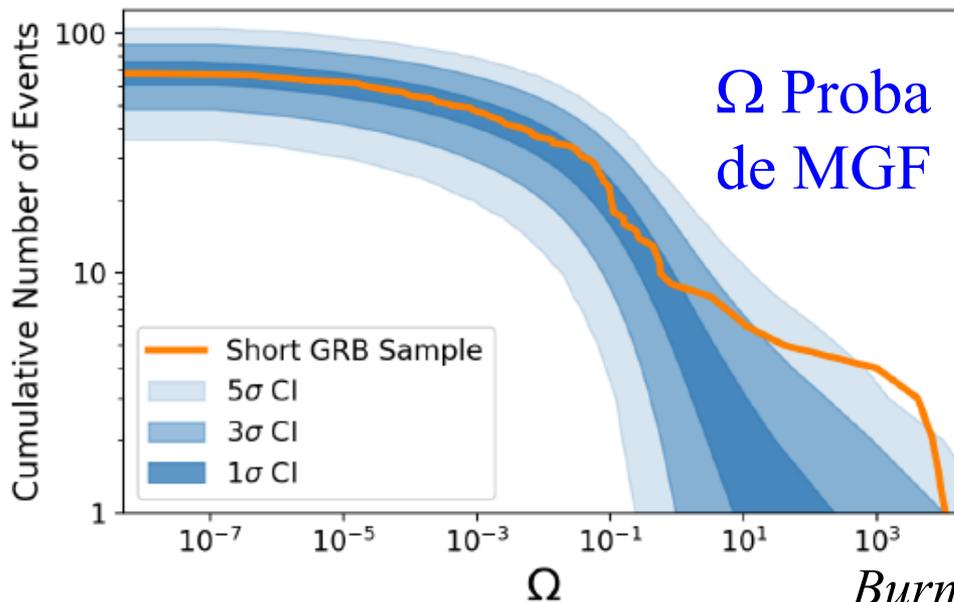
Les magnétars ont des sursauts géants (MGF)

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

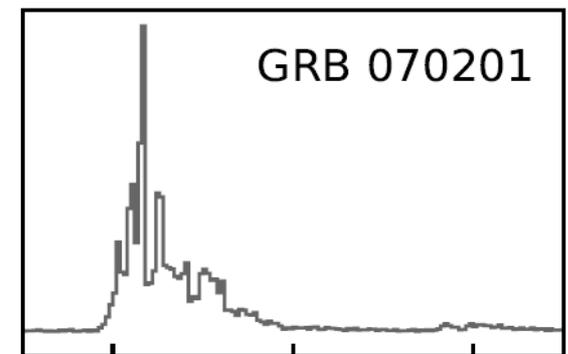
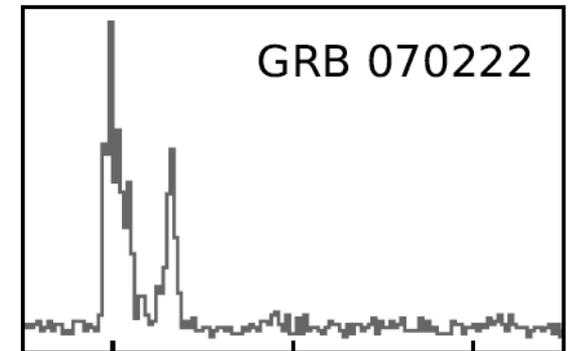
GRB070222 prototype + 4 locaux (<5 Mpc)

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

→ les plus abondants!

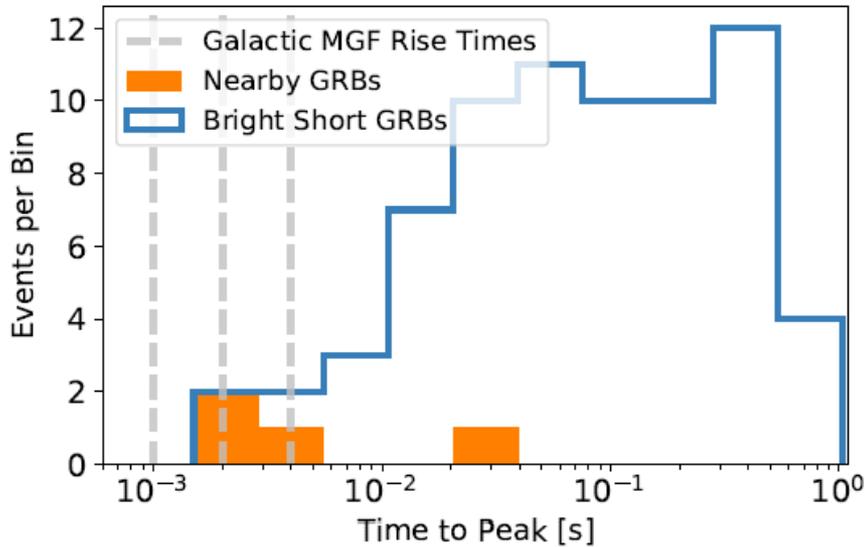


*Burns et al 2021*



Temps (sec)

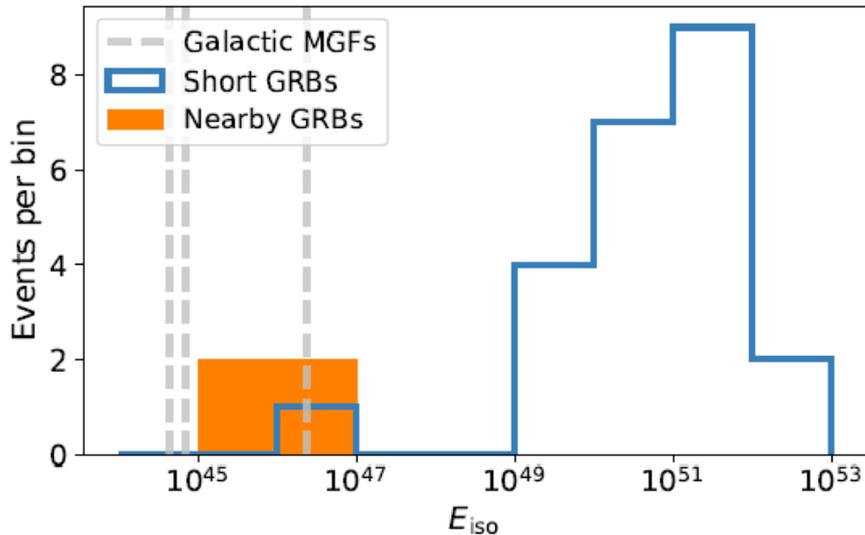
# Statistiques des S-GRB



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**

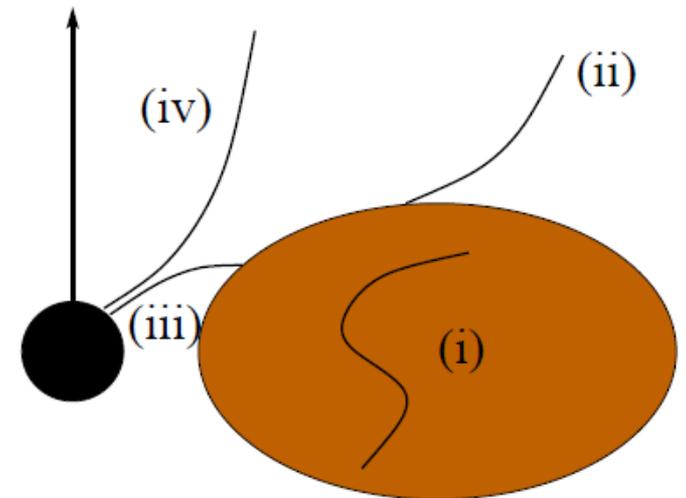
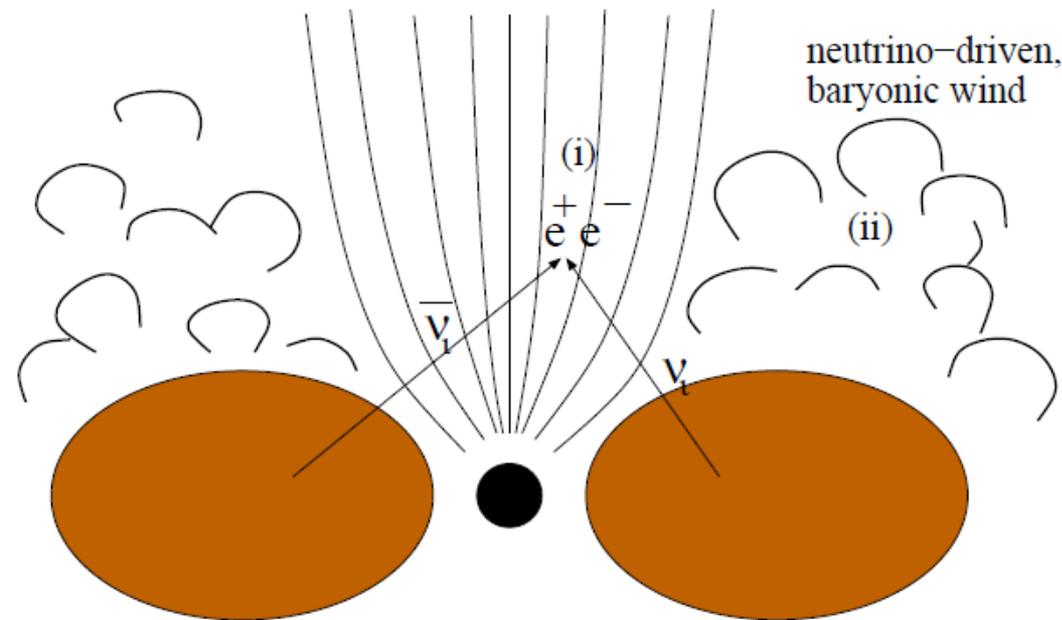


Explosions de CC-SN  
 $>0.5\%$  deviennent magnétars  
0.02 flare/an

# 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

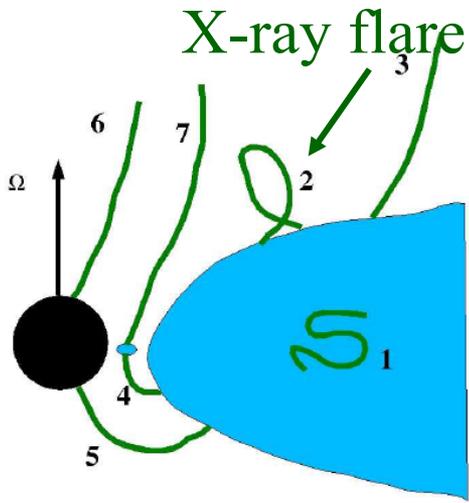


Le jet est automatiquement  
collimaté, si les champs dominant

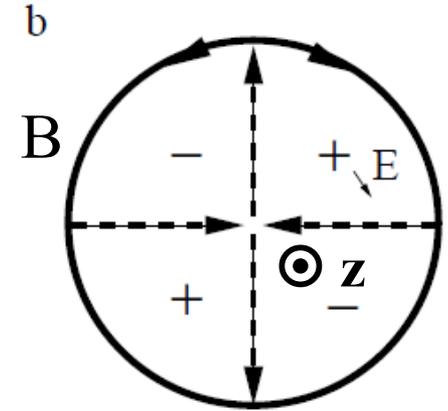
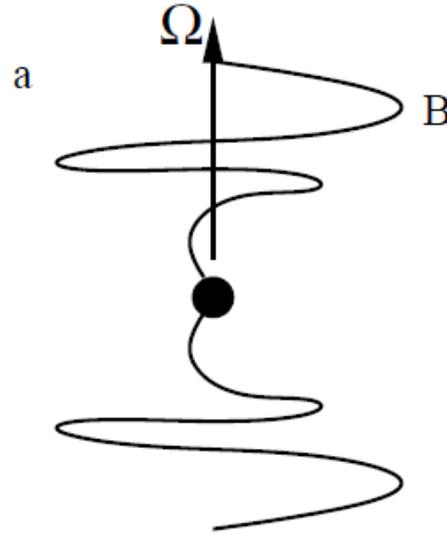
a

b

# Energie électromagnétique



Après 100s,  $10^7$ km

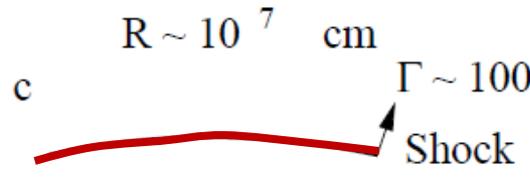


Modèle où l'énergie EM domine l'énergie cinétique des particules

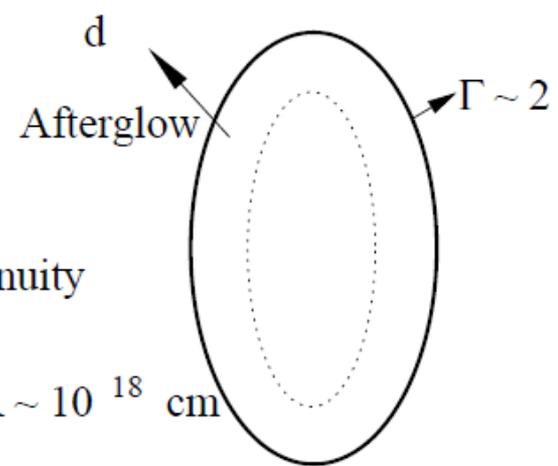
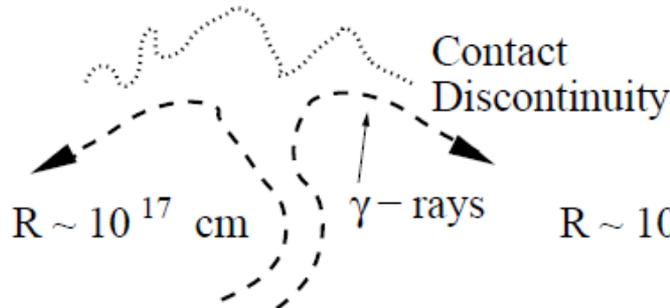
Champ B poloidal devient toroidal à 100km  
 $\Gamma \sim 3 \cdot 10^4$  tombe à 100  
 après 100sec

E provenant du spin du BH

*Blanford 2002*

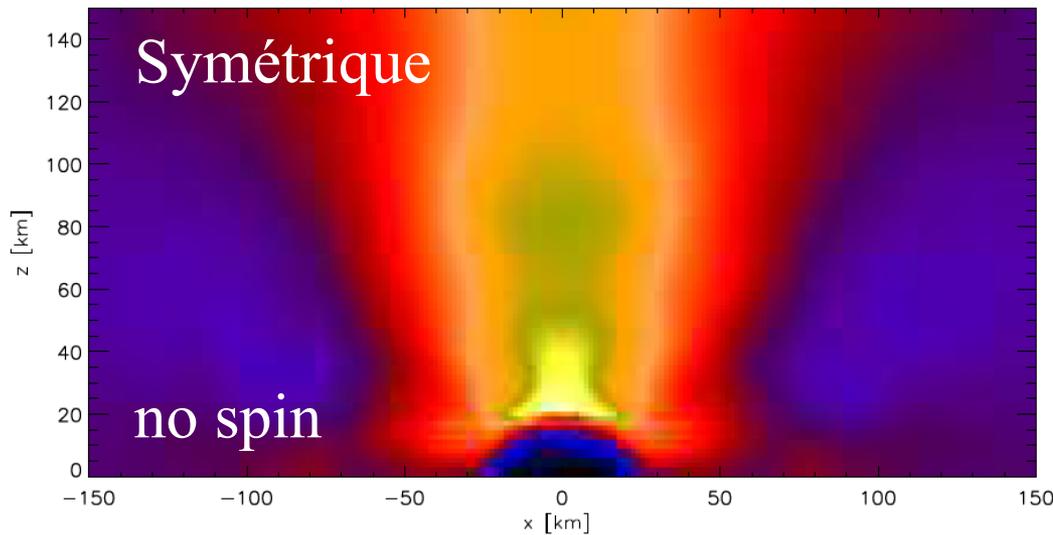


$R \sim 10^{12}$  cm

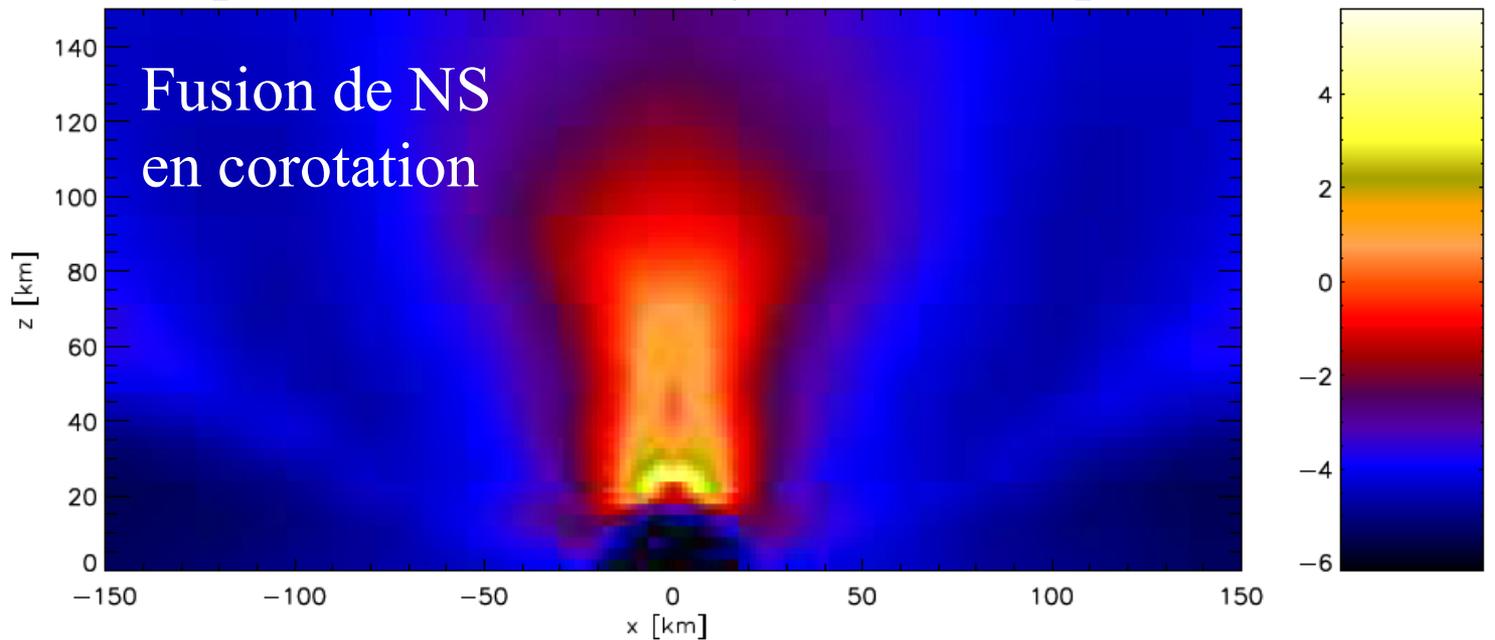


# Energie extraite

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

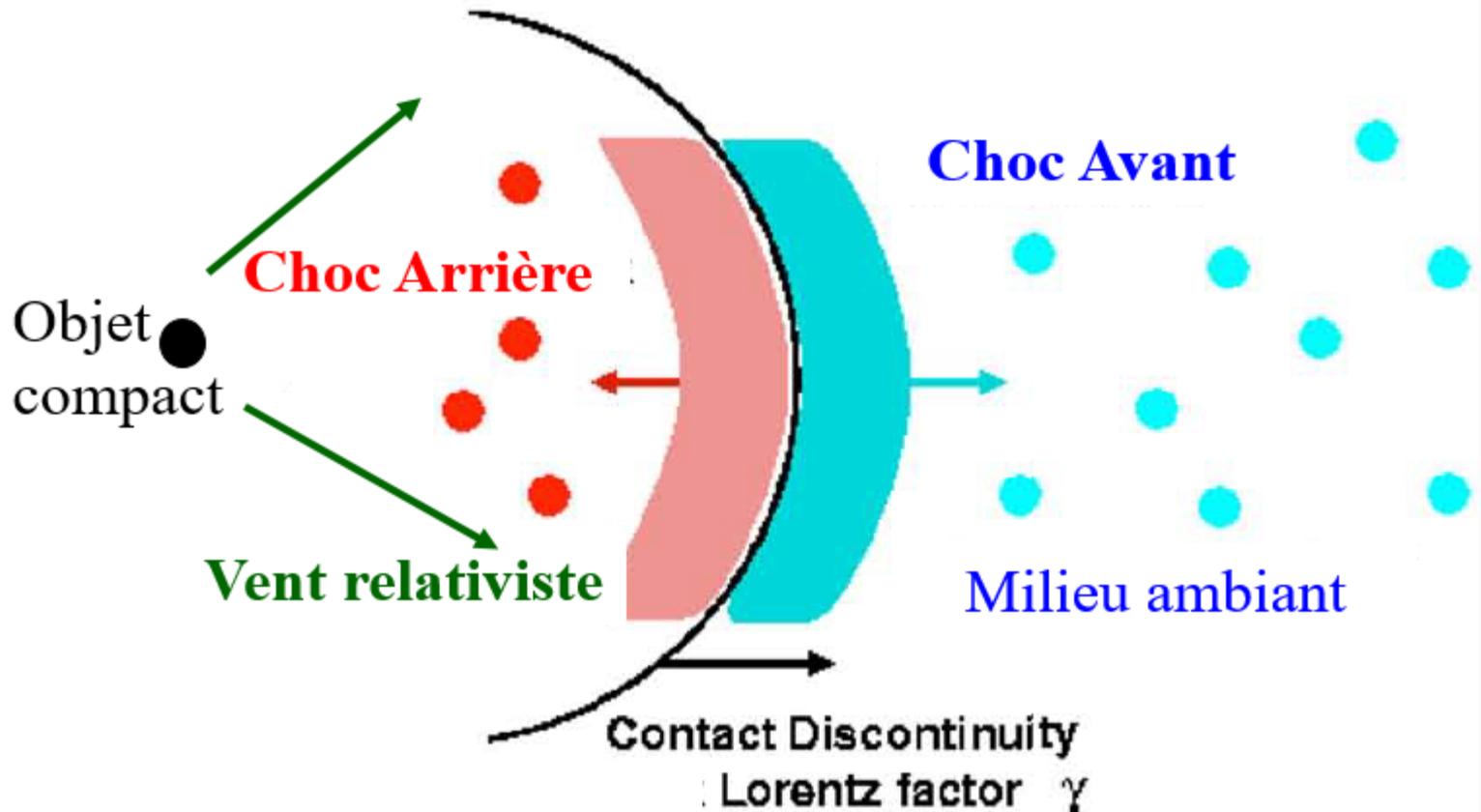


Rotation, spin nécessaires  $\rightarrow$  dynamo, champ B

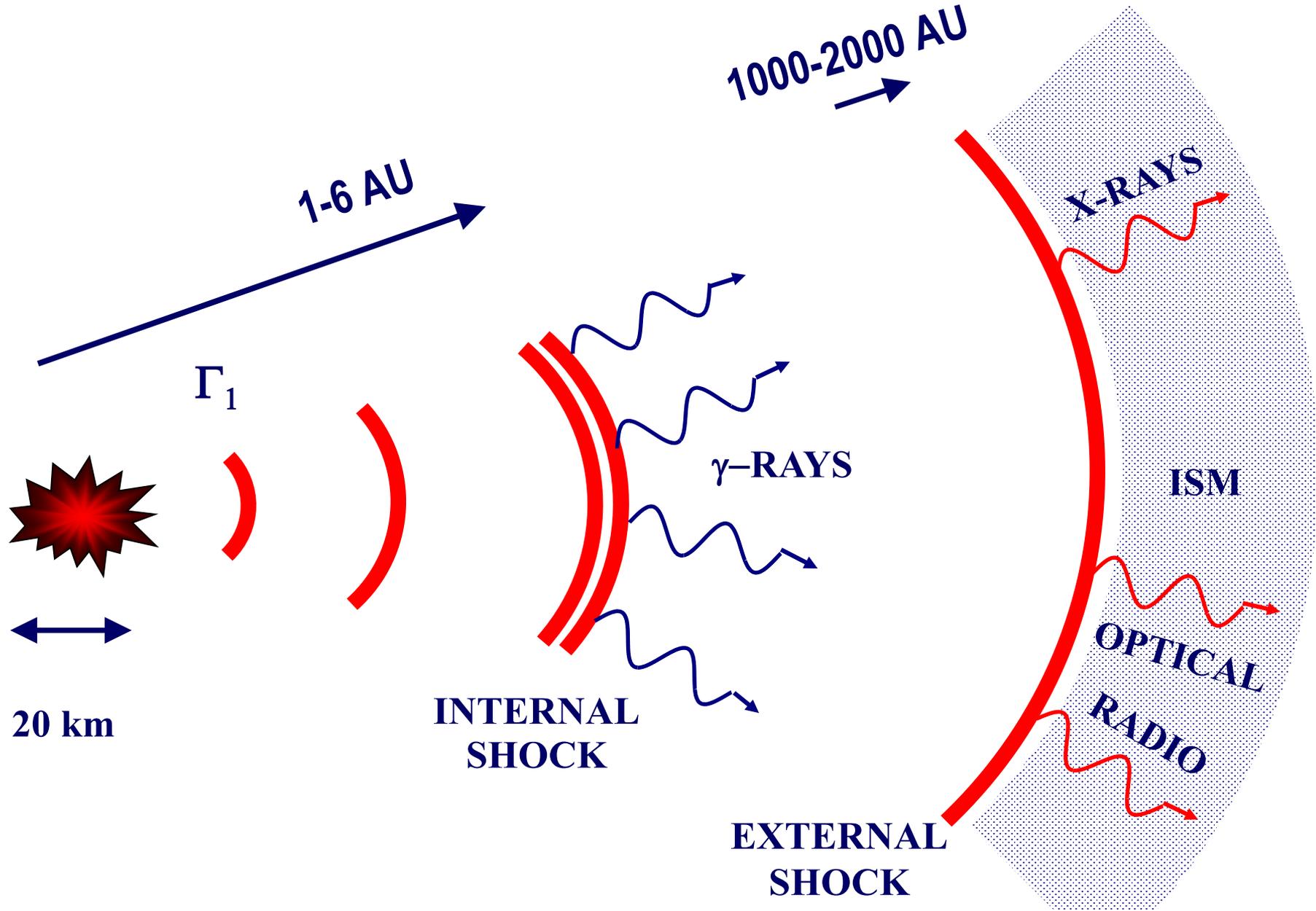


# Afterglow: chocs « forward/reverse »

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

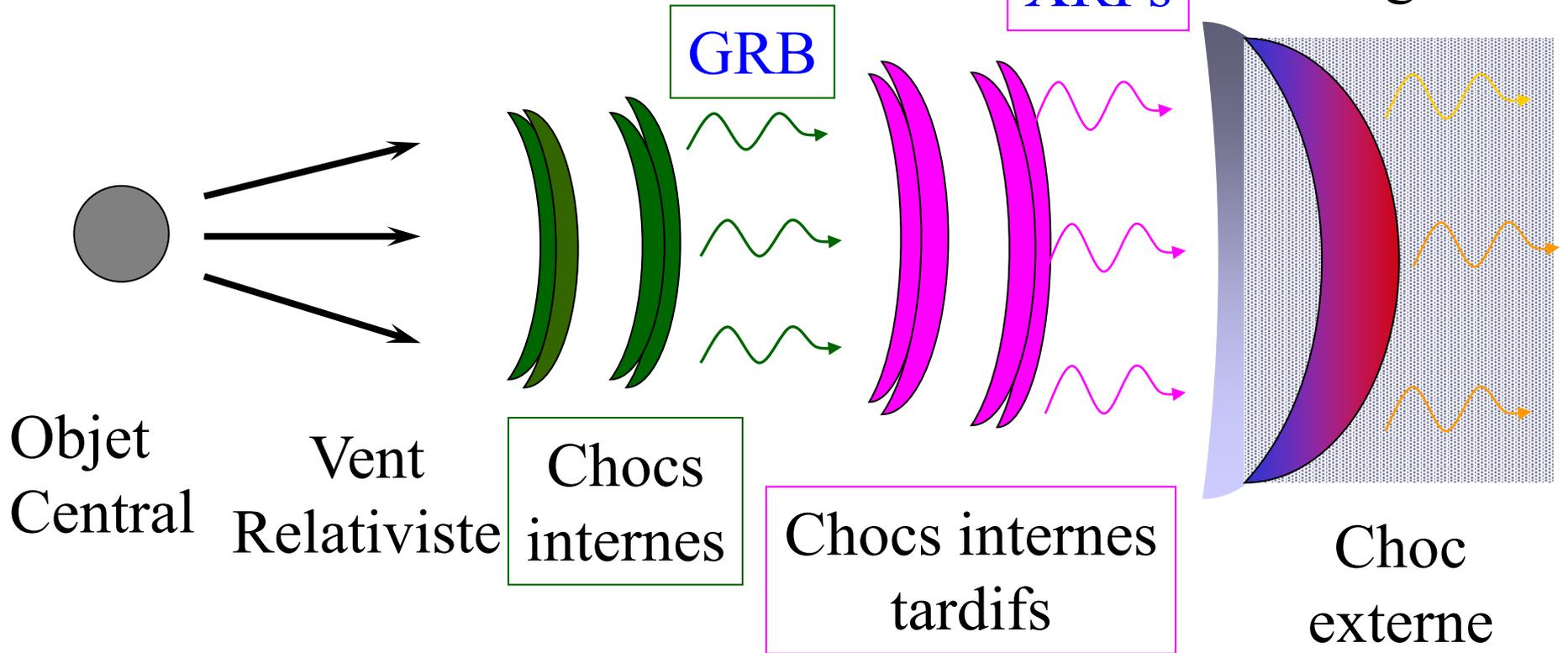
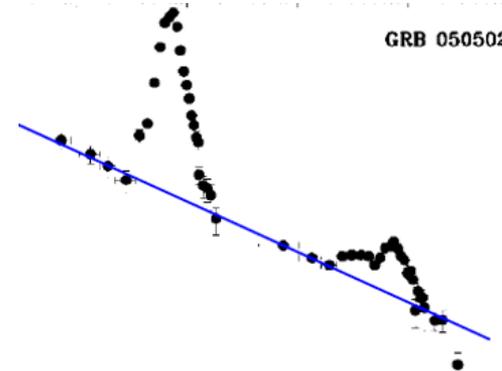


# Modèle de chocs (boule de feu)



# Chocs internes et externes +flares X

Selon les éjecta déjà présents,  
dûs à plusieurs bouffées relativistes



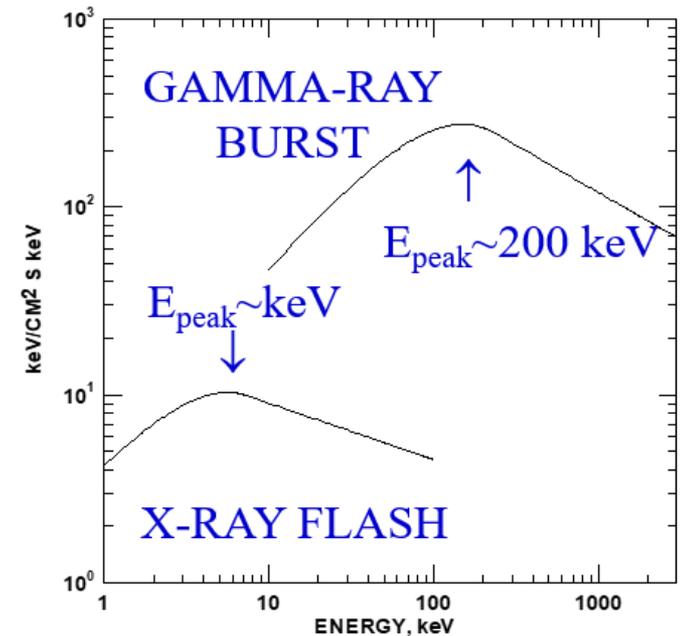
# Distribution de l'énergie

## DURANT LE SURSAUT

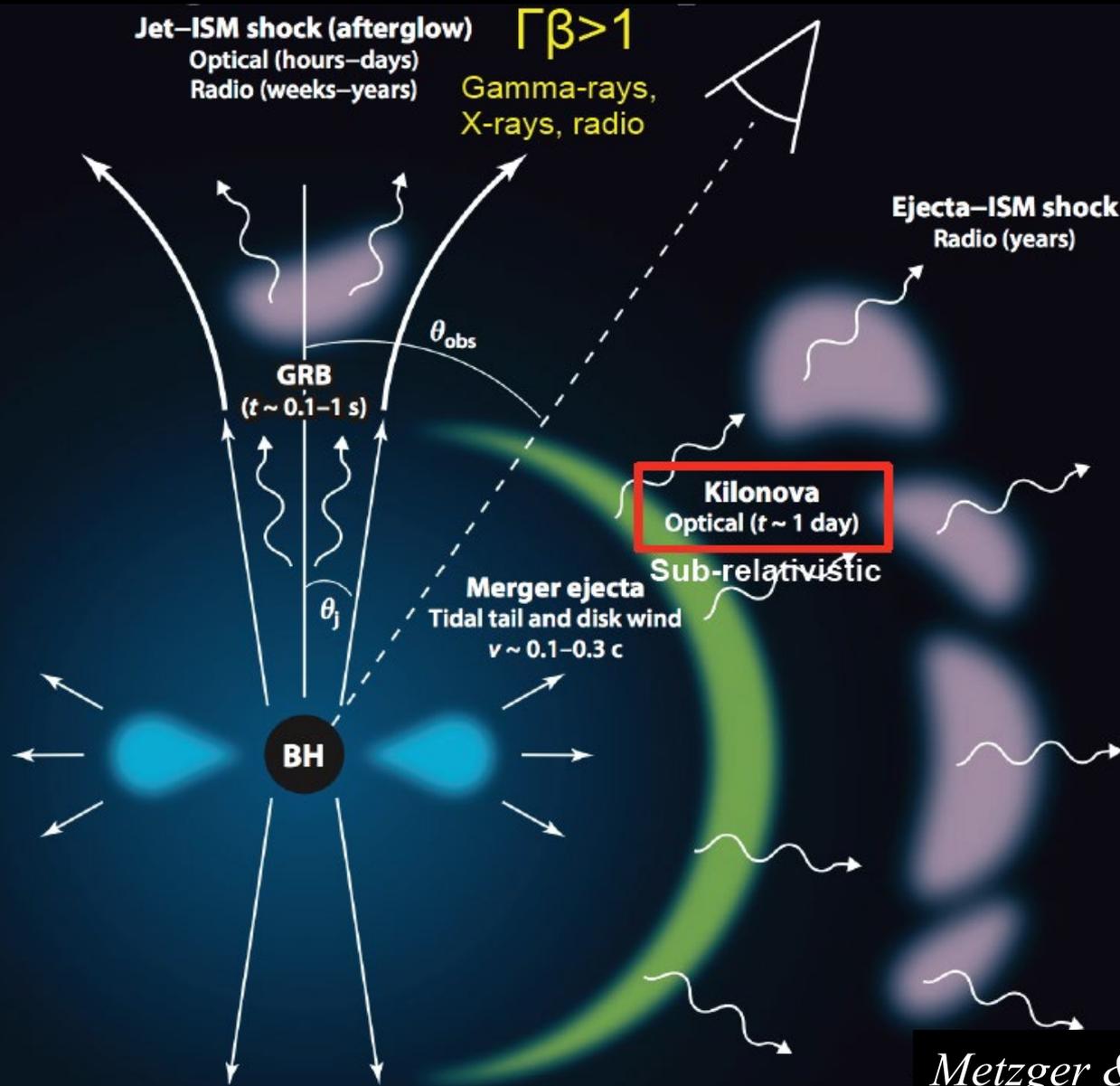
- 1 **>25 keV  $\gamma$  rays: 65%**
- 2 **1-10 keV X-rays: 7%**
- 3 **Optical: 0.1%**
- 4 **Radio ?**
- 5 **MeV/GeV/TeV  $\nu$  ? >10%?**
- 6 **Gravitational radiation ?**

## AFTERGLOW

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



# Kilonova après une fusion NS-NS



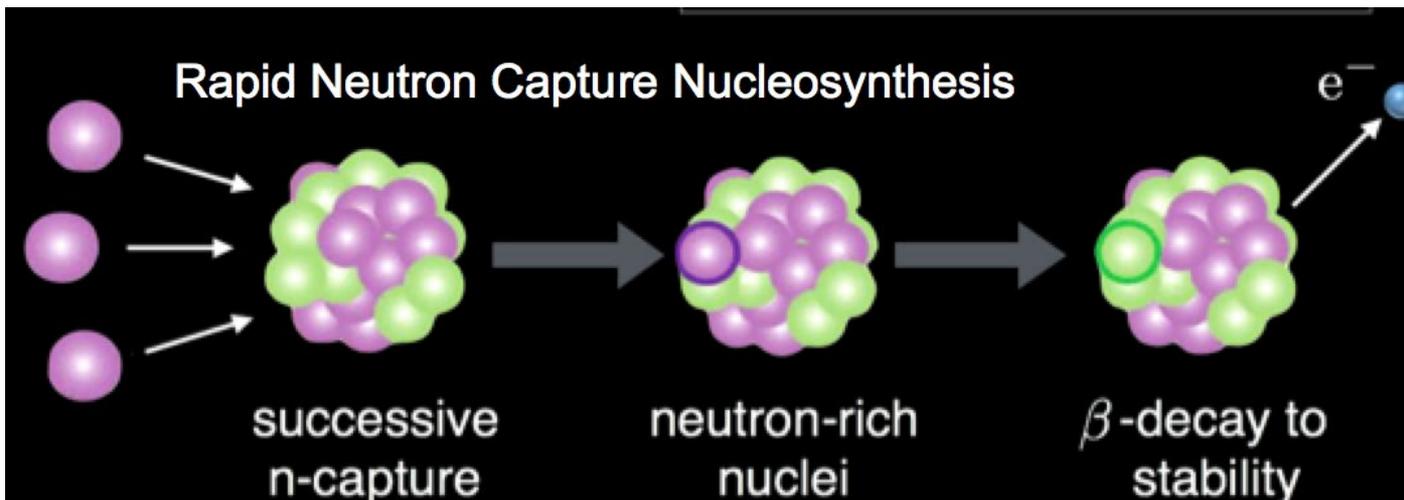
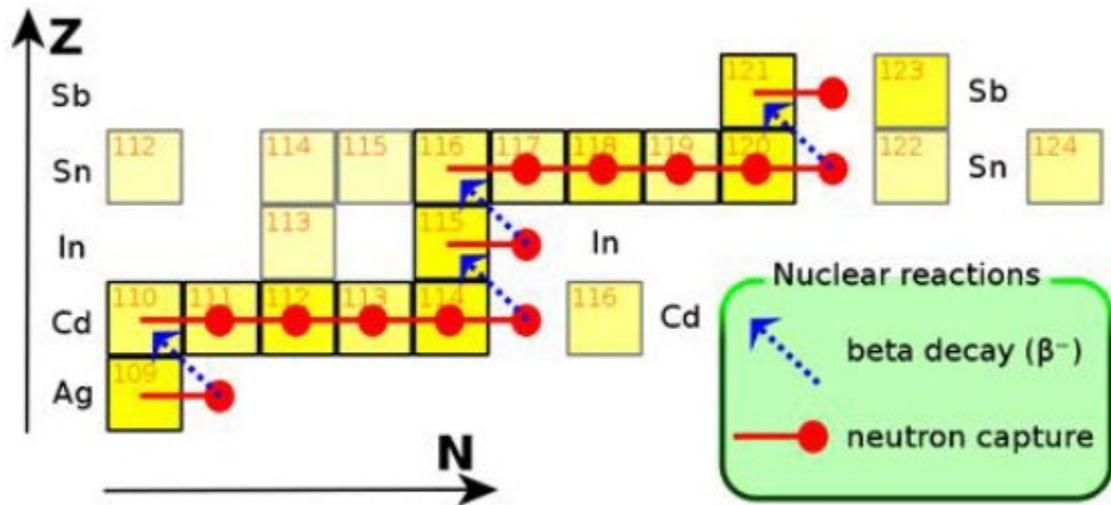
# Nucléosynthèse: r-process

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

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

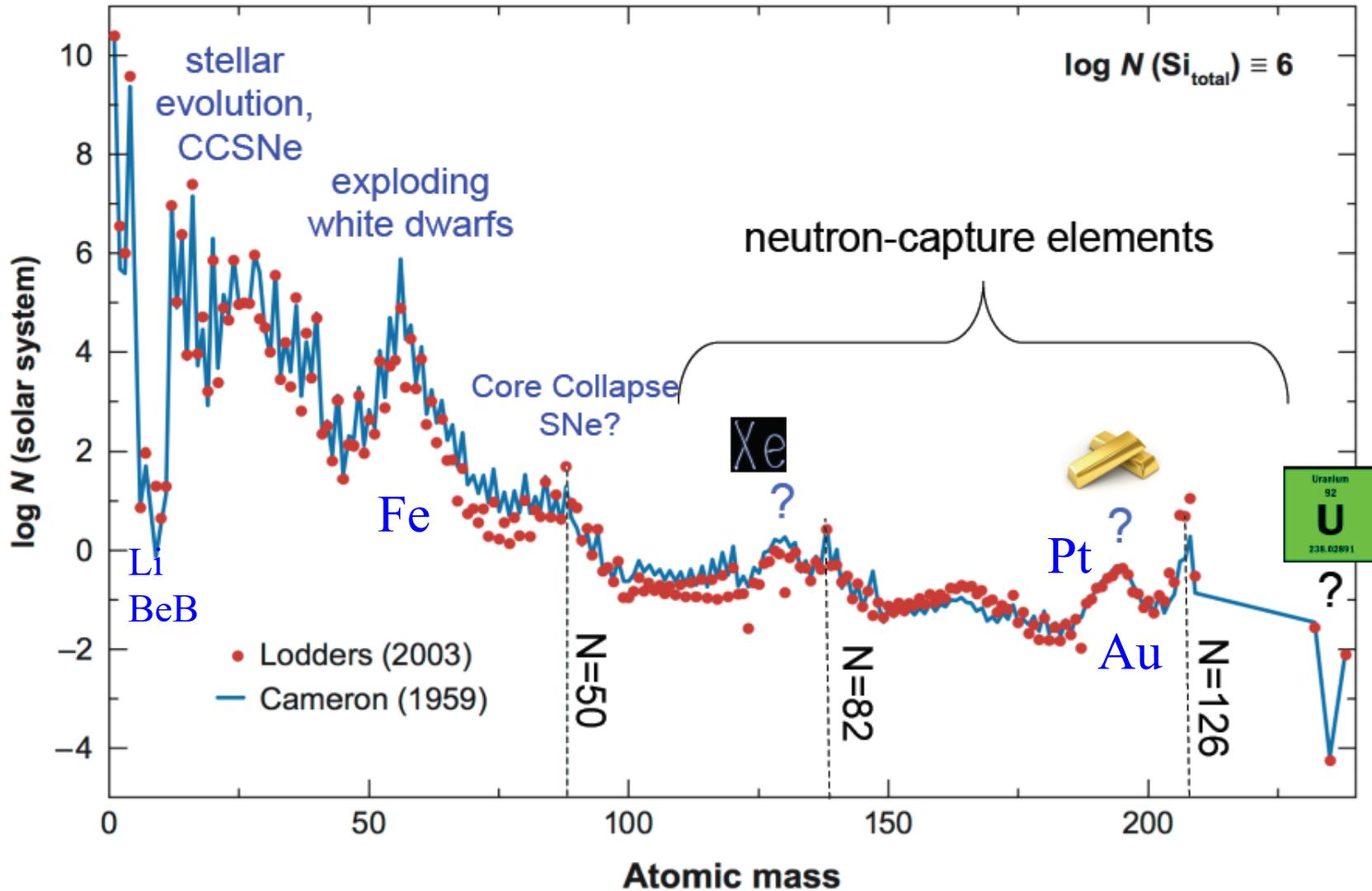
→ Radioactivité  $\beta$

Puis autre ligne d'accrétion des neutrons

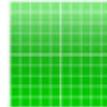
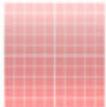


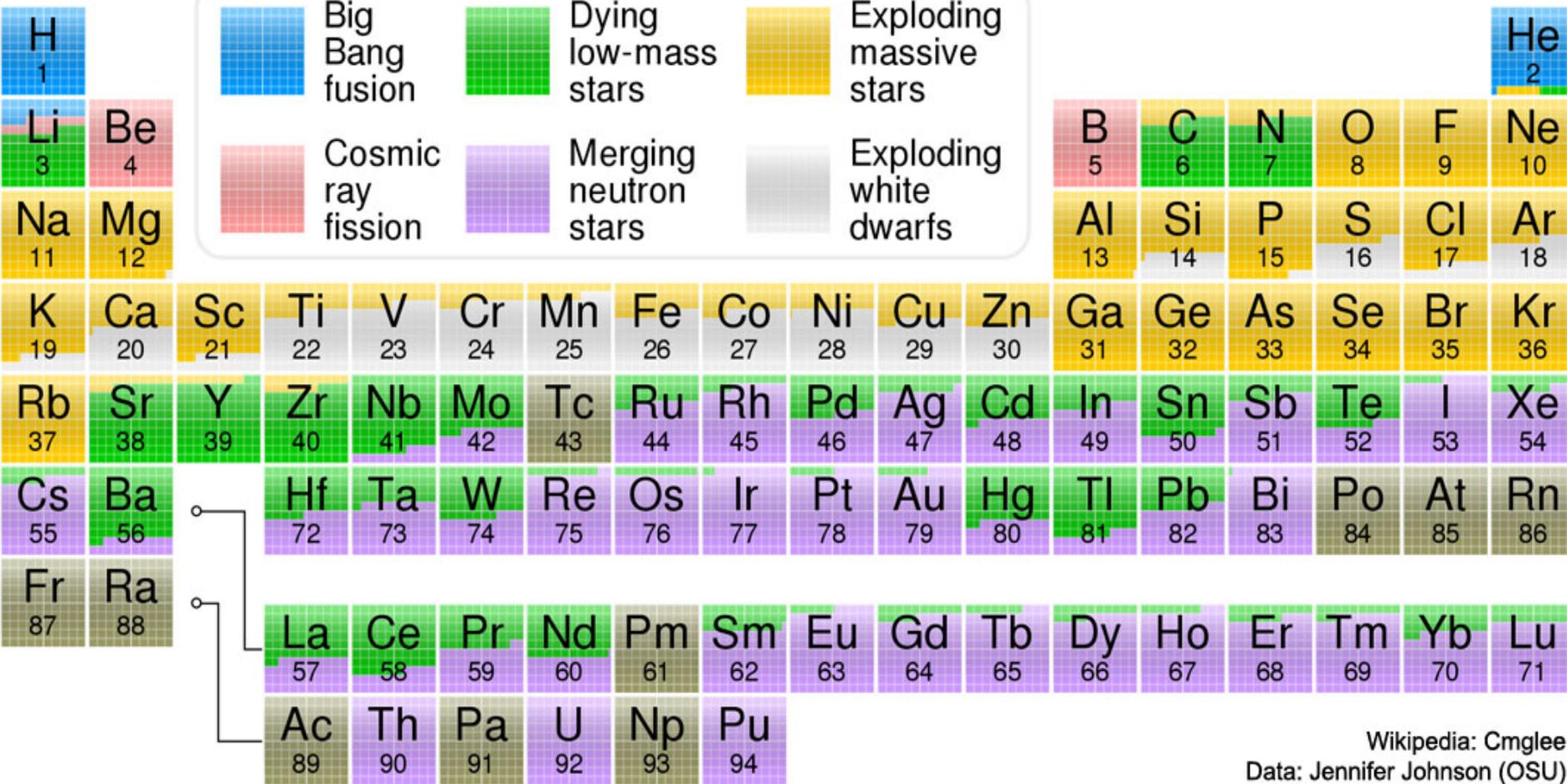
# Comment sont formés les éléments?

Big Bang



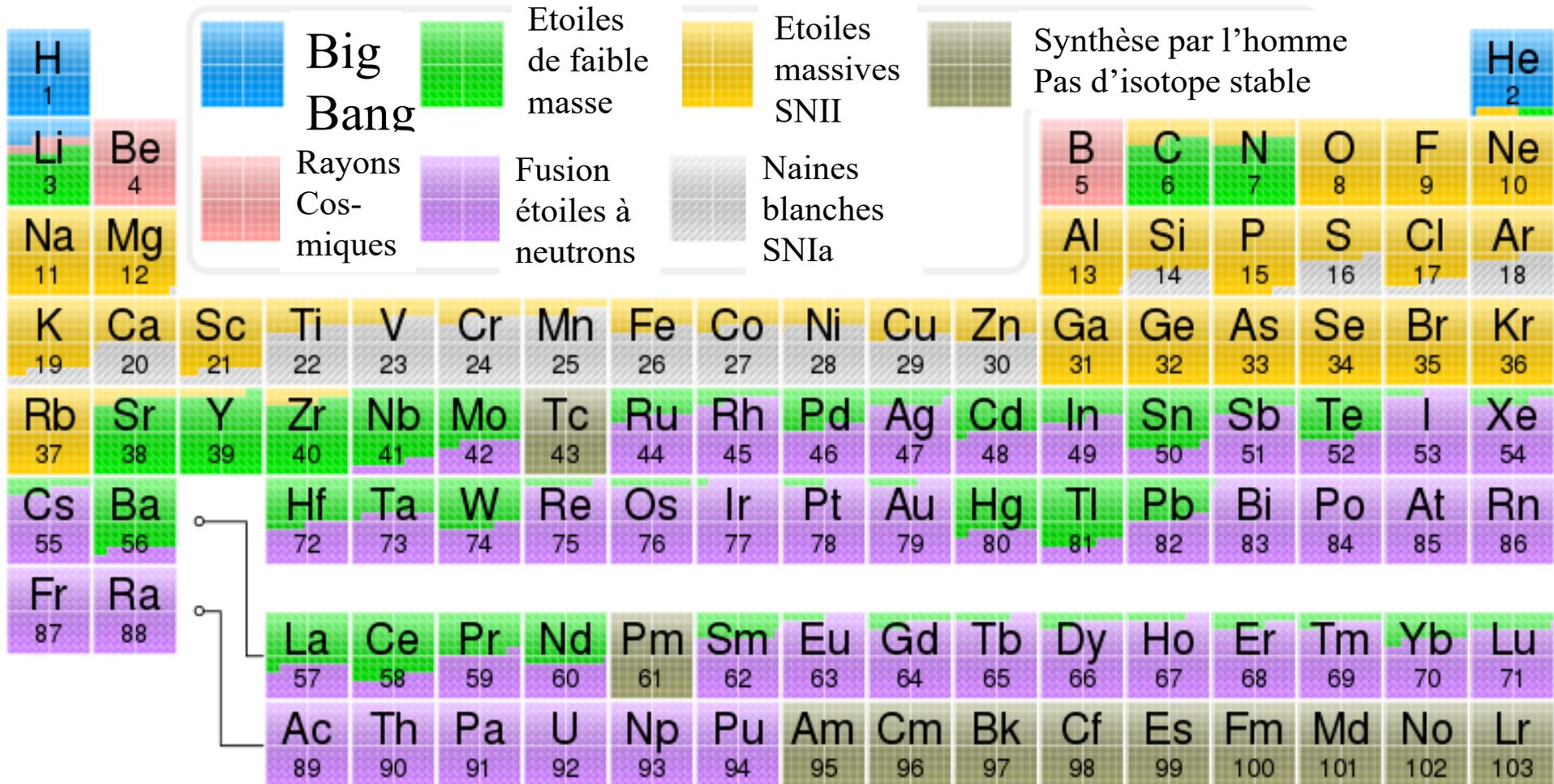
# Les éléments formés dans les fusions d'étoiles à neutron

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



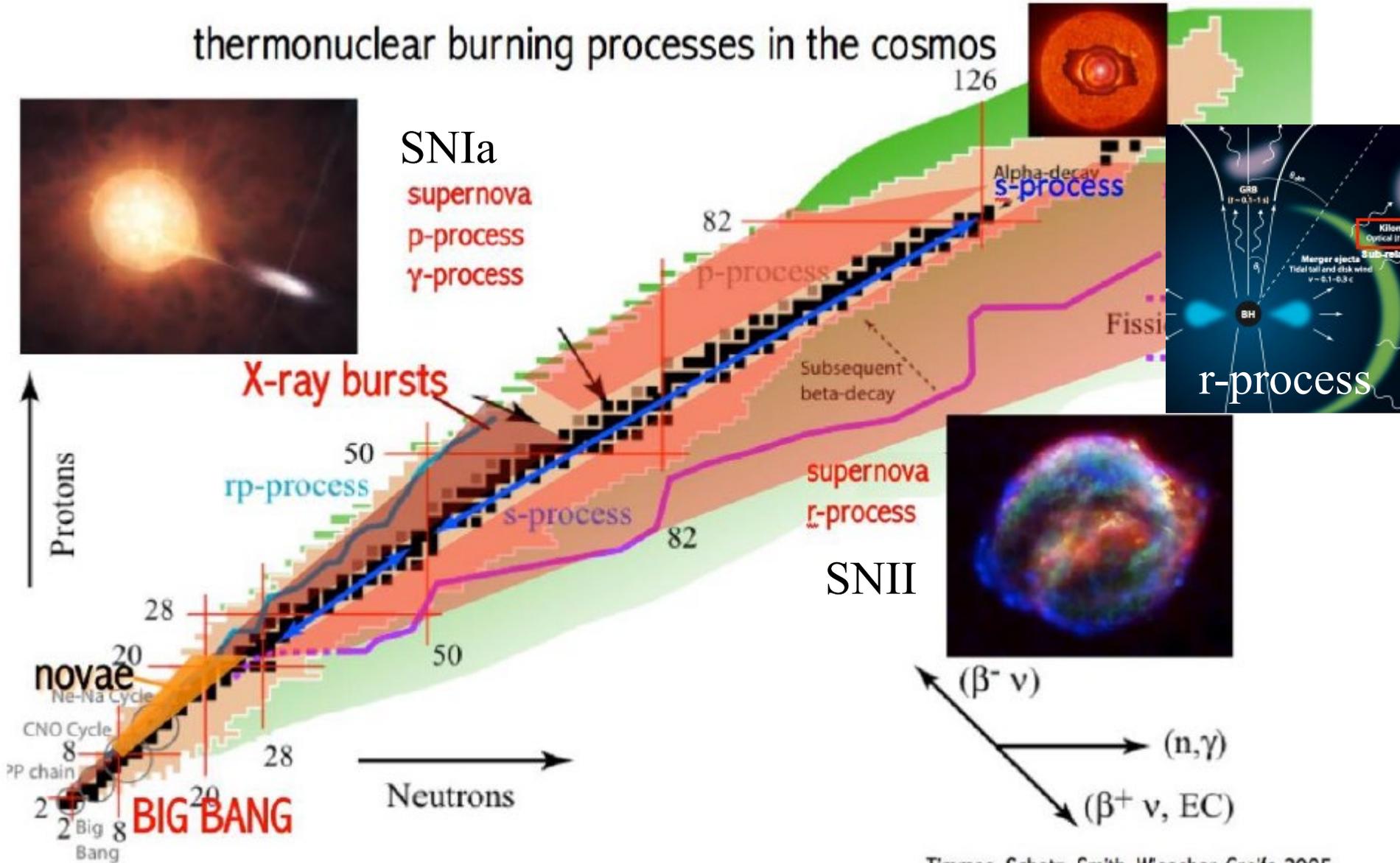
Wikipedia: Cmglee  
Data: Jennifer Johnson (OSU)

# Les éléments formés dans les fusions d'étoiles à neutron



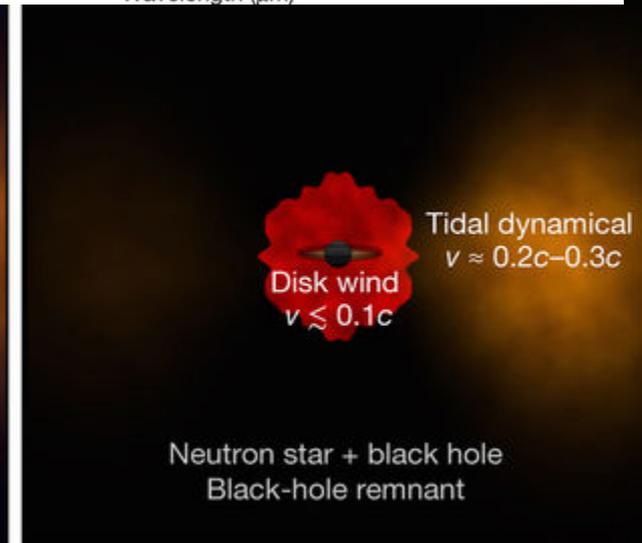
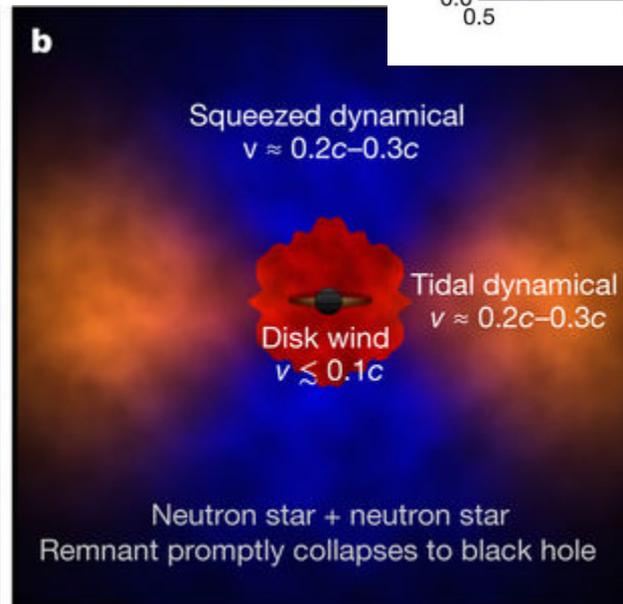
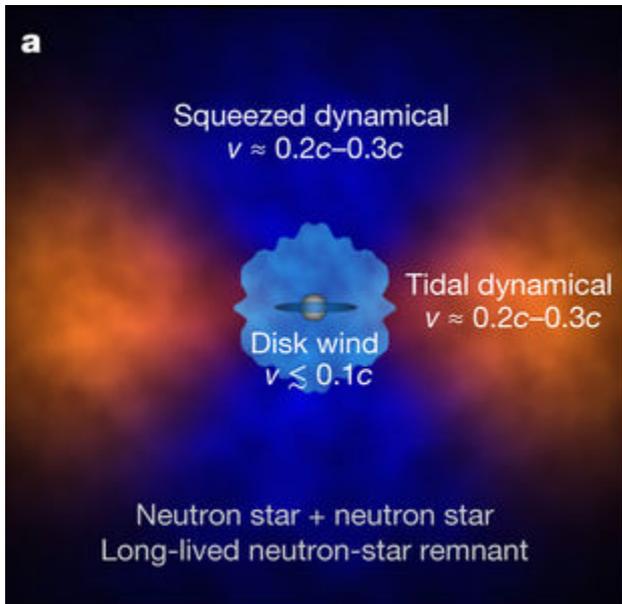
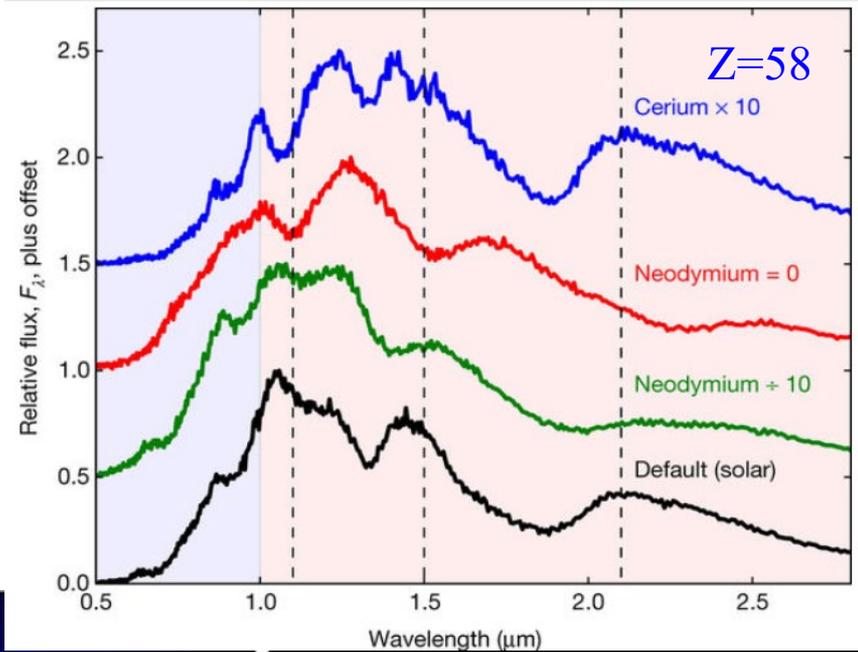
# Les SN et GRB jouent un grand rôle

thermonuclear burning processes in the cosmos



# GRB170817: Les diverses possibilités

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



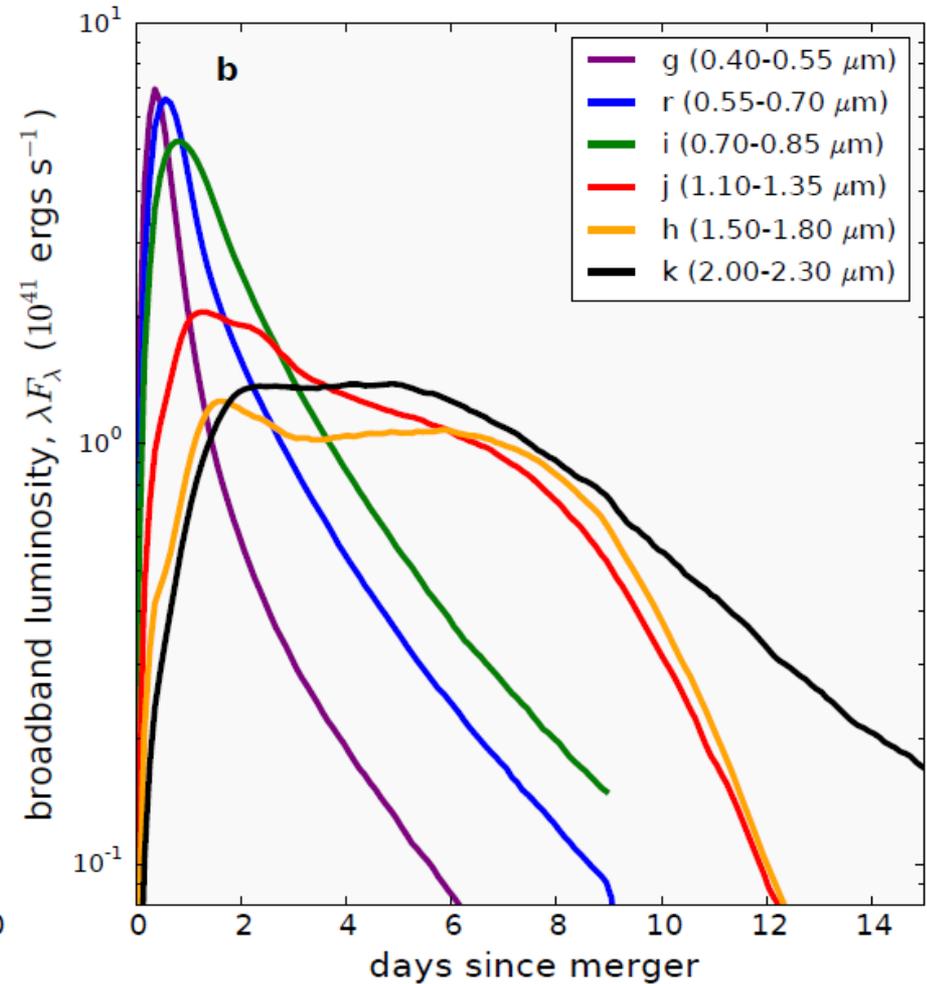
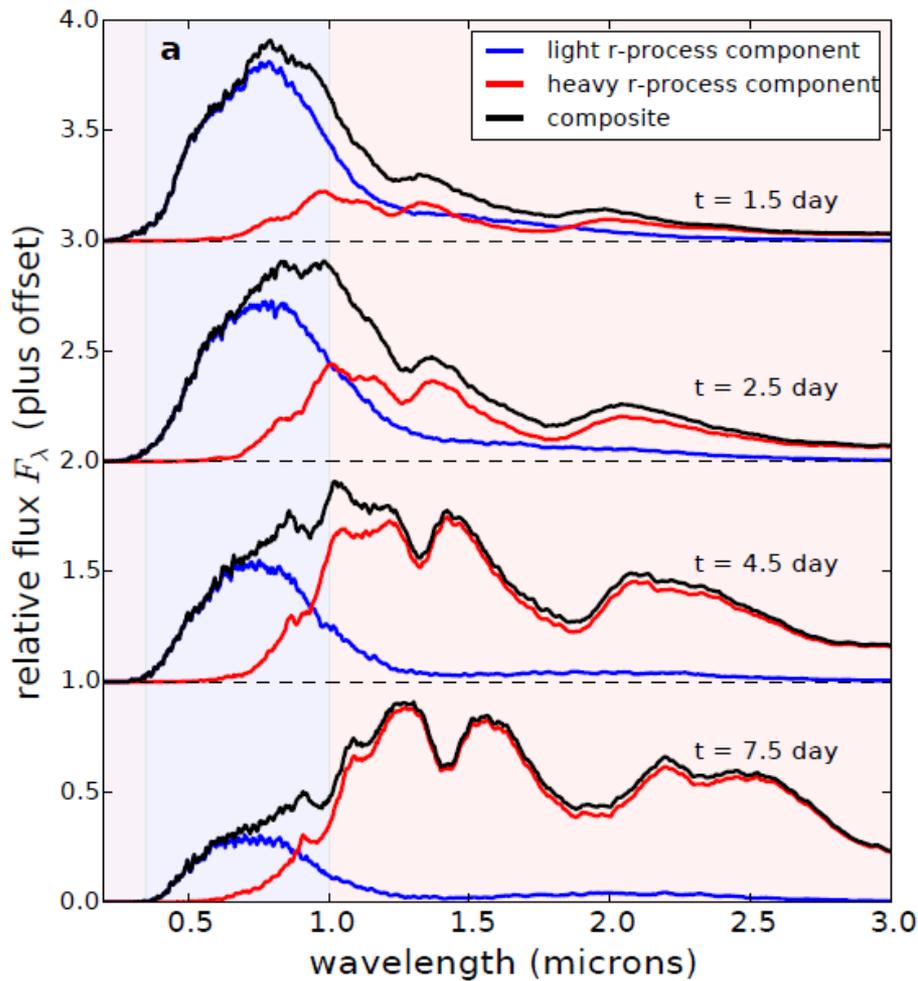
Rouge: riche en éléments r-process les plus lourds  $A > 140$

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



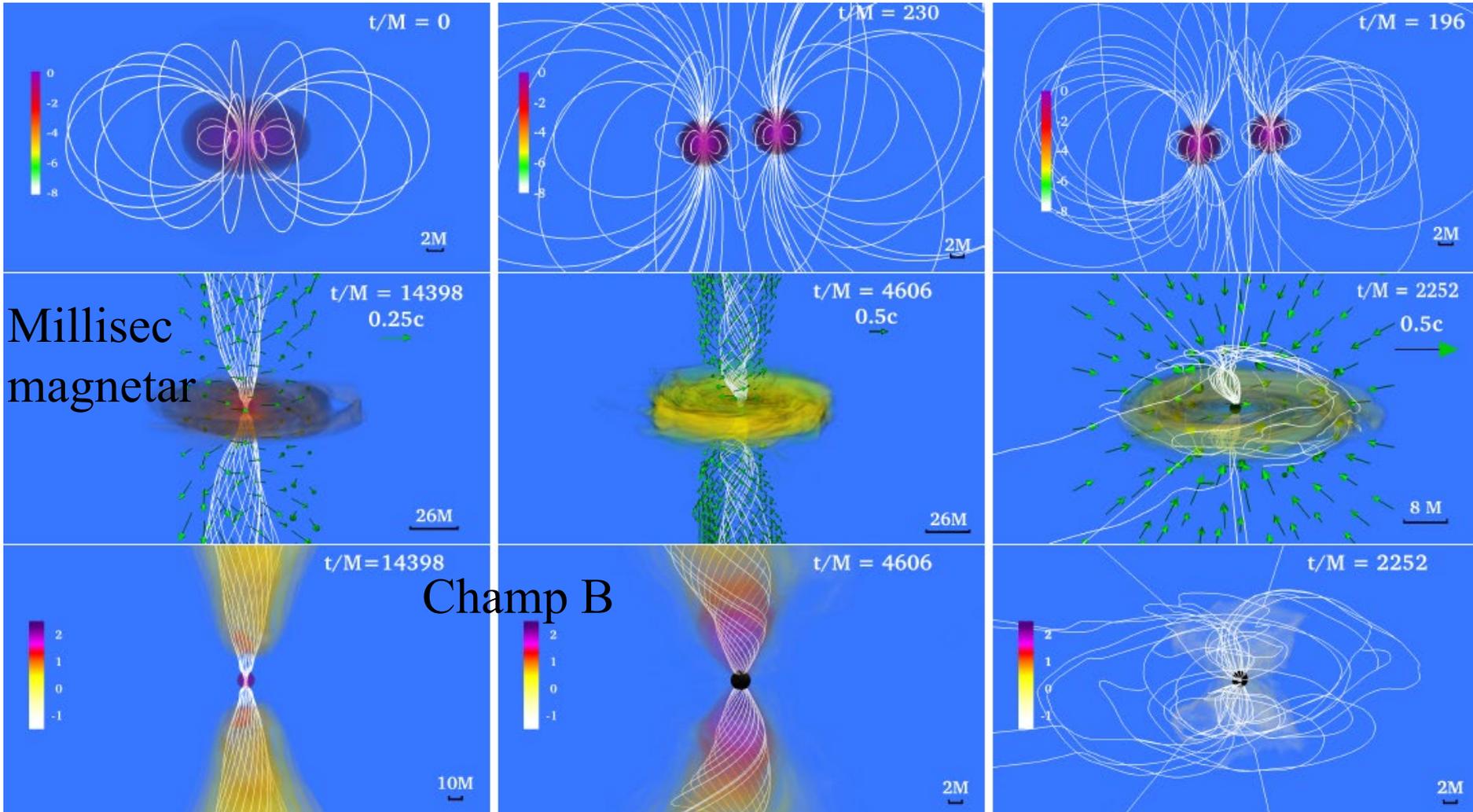
# Effondrement ou non, retardé ou rapide

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

Non effondré

Effondrement retardé,

rapide



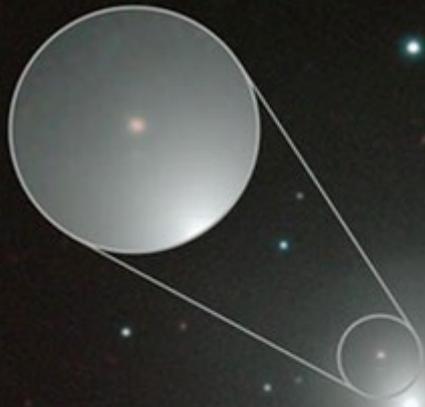
GR-MHD simulations: EOS? Ruiz & Shapiro 2017

# Le rayonnement rémanent

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



NGC 4993 (MUSE)  
*Lyman et al 2017*

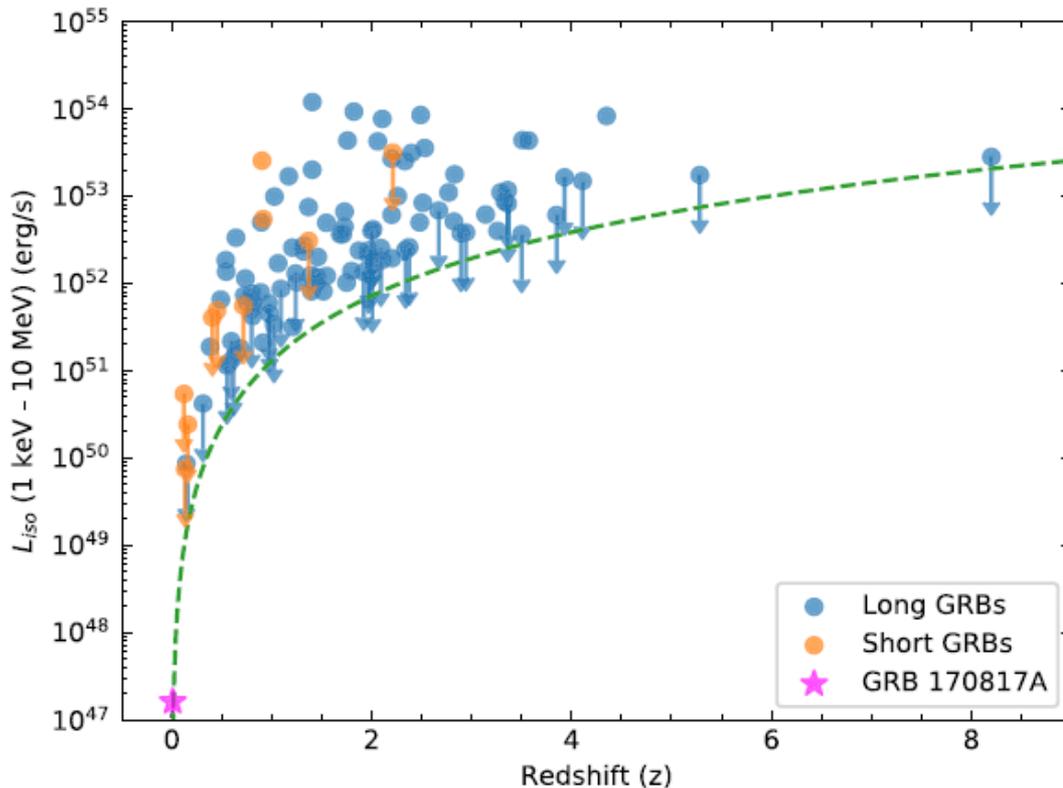


*17 Août 2017*

*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

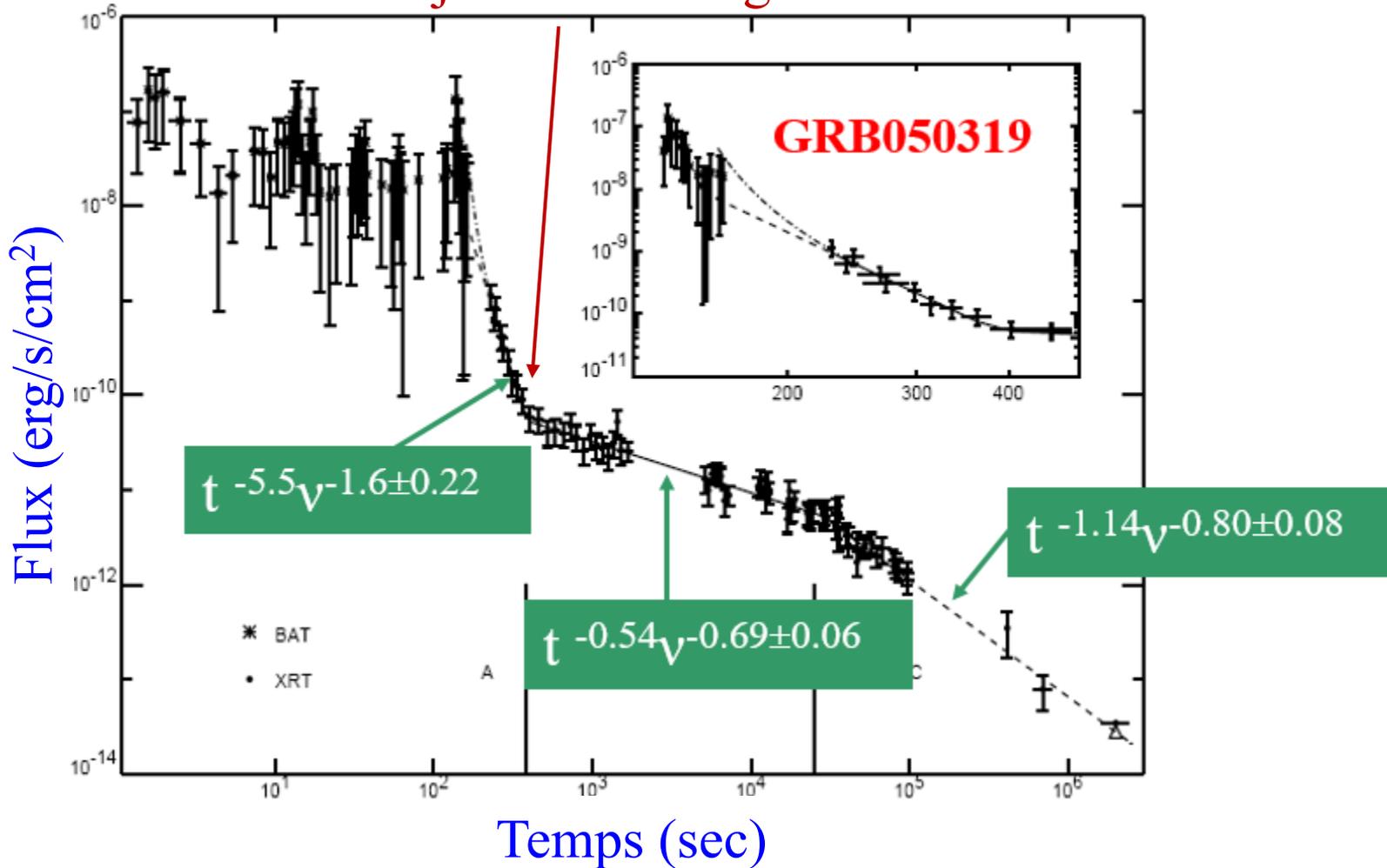
→ Il faudrait reconsidérer  
les attributions

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

# Plateau X et réinjection

1<sup>ère</sup> phase: soft  
Continuation du burst  
Puis plus hard-> jet

Ré-injection d'énergie?



# Accélération dans les chocs

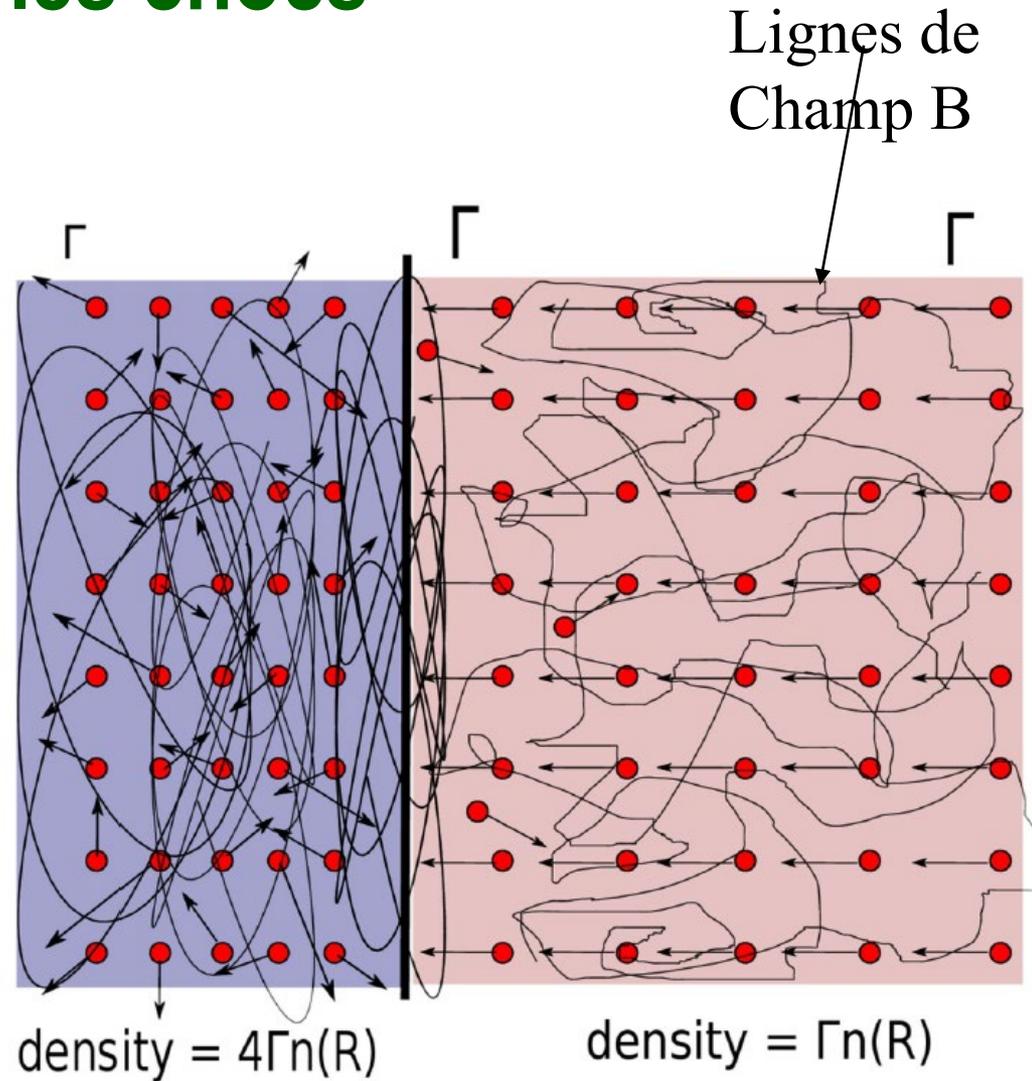
Fluide se déplaçant avec le facteur de Lorentz  $\Gamma$

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  $\Gamma_0$

Deux chocs se succèdent: **en bleu le choc** qui s'avance dans le milieu ambiant  $n_1$ , avec  $\gamma_2$

**En rose, le choc inverse**

Avec  $\gamma_3 = \gamma_2$  et

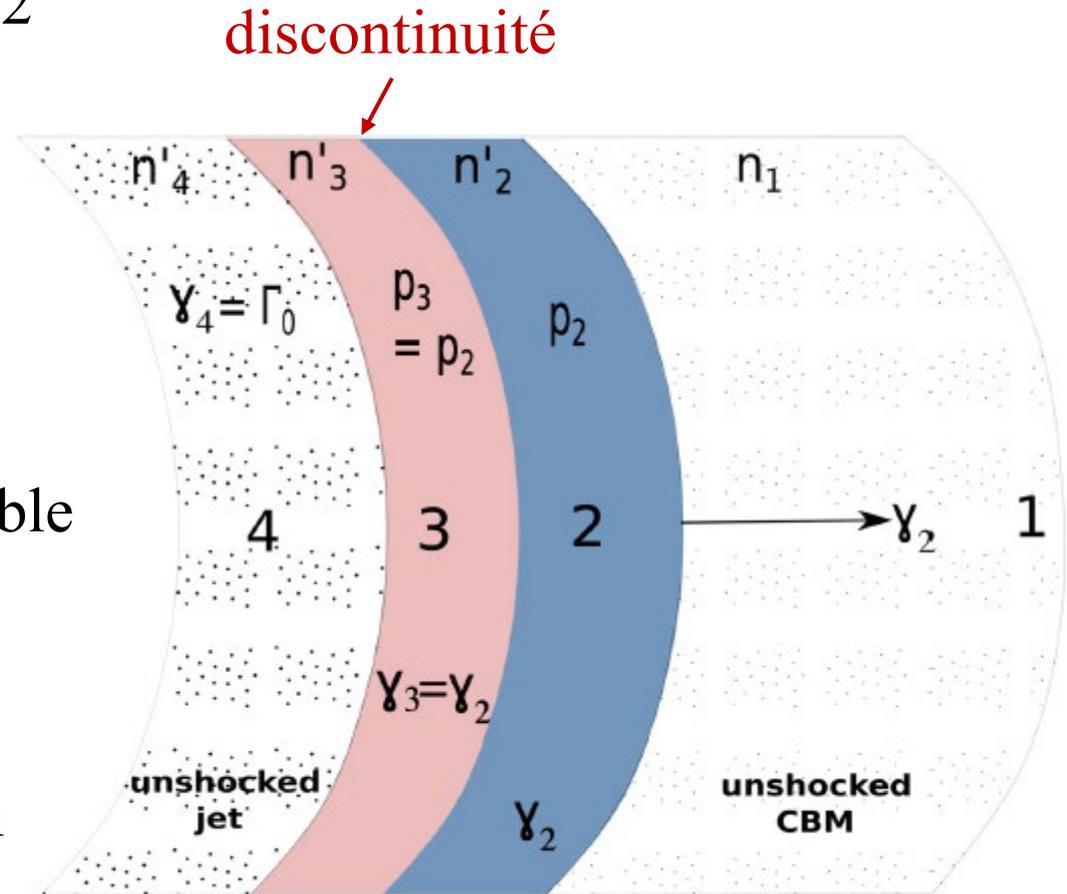
Même pression  $p_3 = p_2$

Mais densités différentes

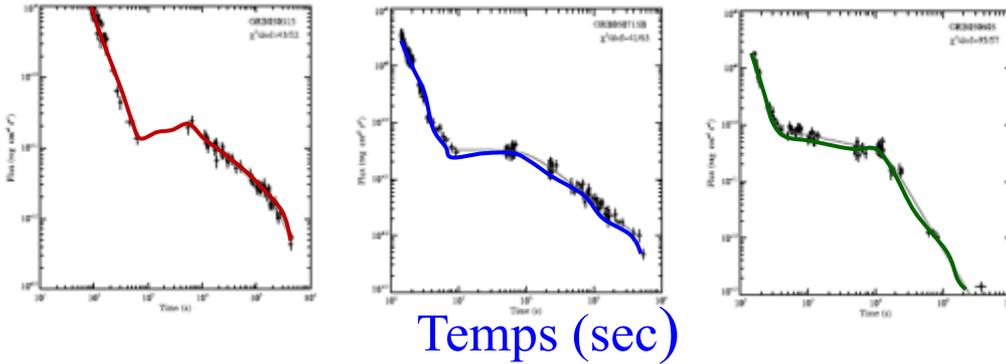
Energie magnétique  $\sigma$  faible

Le reverse choc décélère et chauffe les éjecta

→ Observation d'un flash optique (GRB990123)



# Plateau dans les X

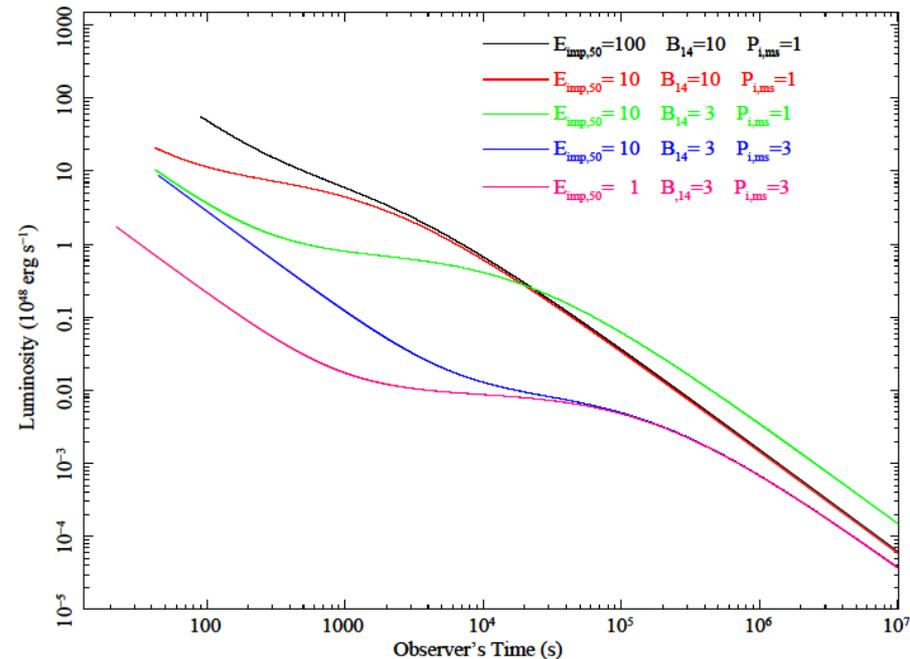


Dans 50% des sources

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



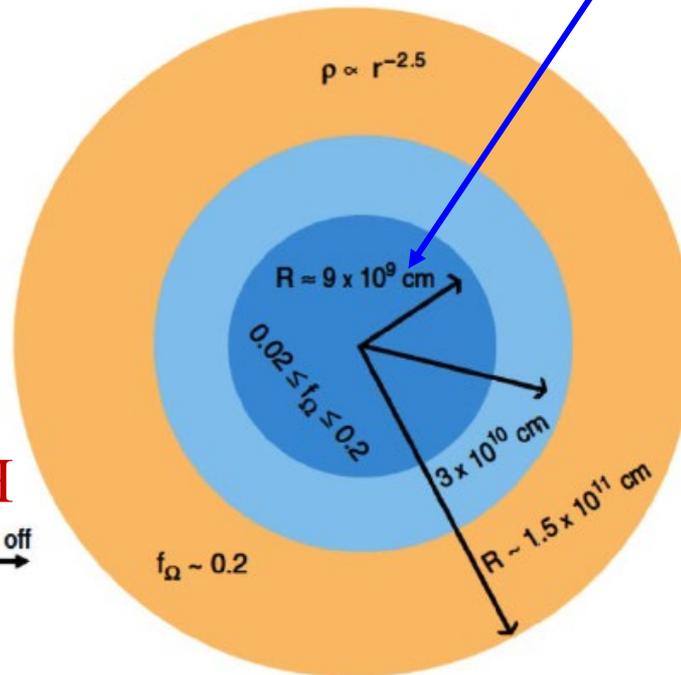
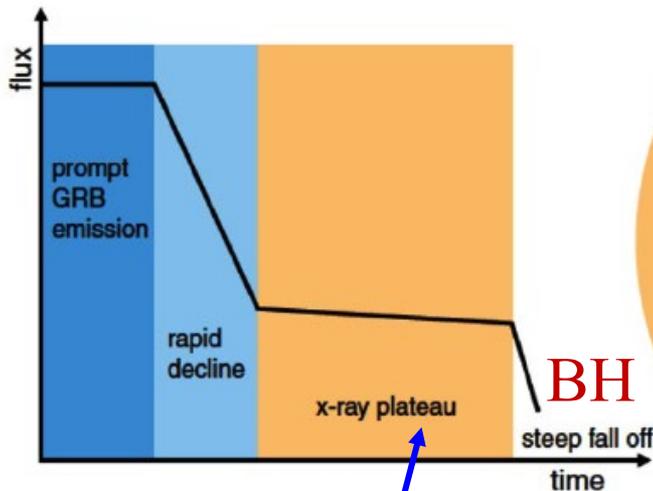
# Evolution de l'afterglow

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

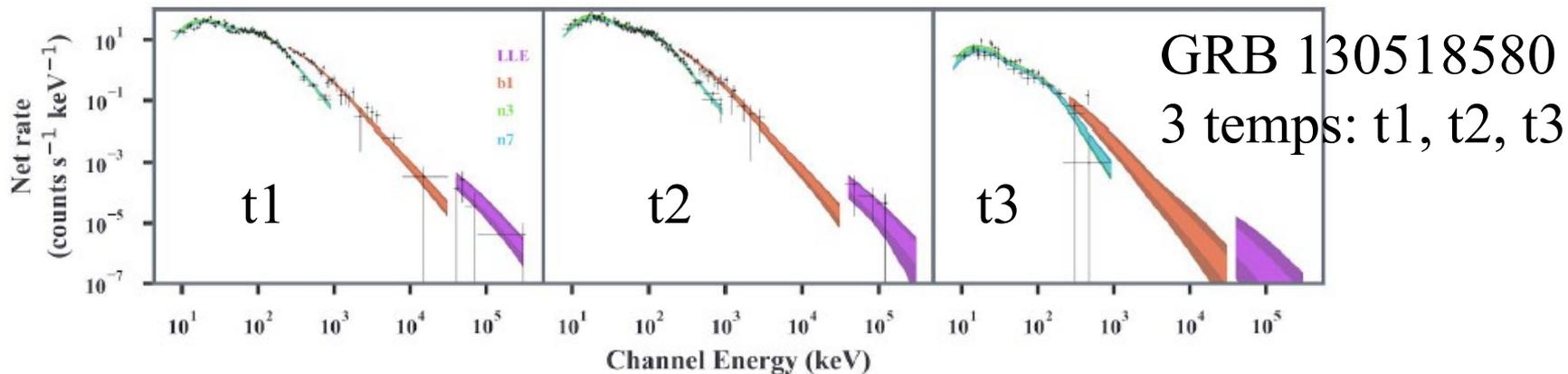
$$f_{\Omega} = \Omega / \Omega_k$$

$\Omega_k$  = képlérien

XRF  $\rightarrow$  Magnétar

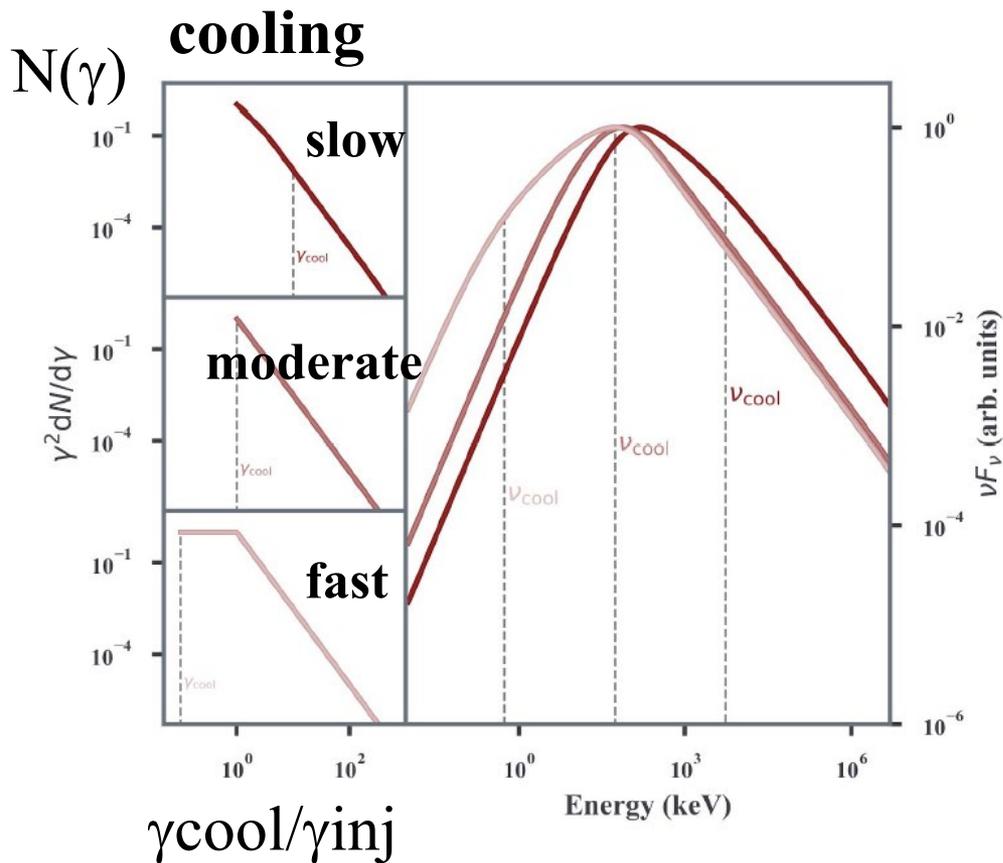
*Kumar & Zhang 2015*

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

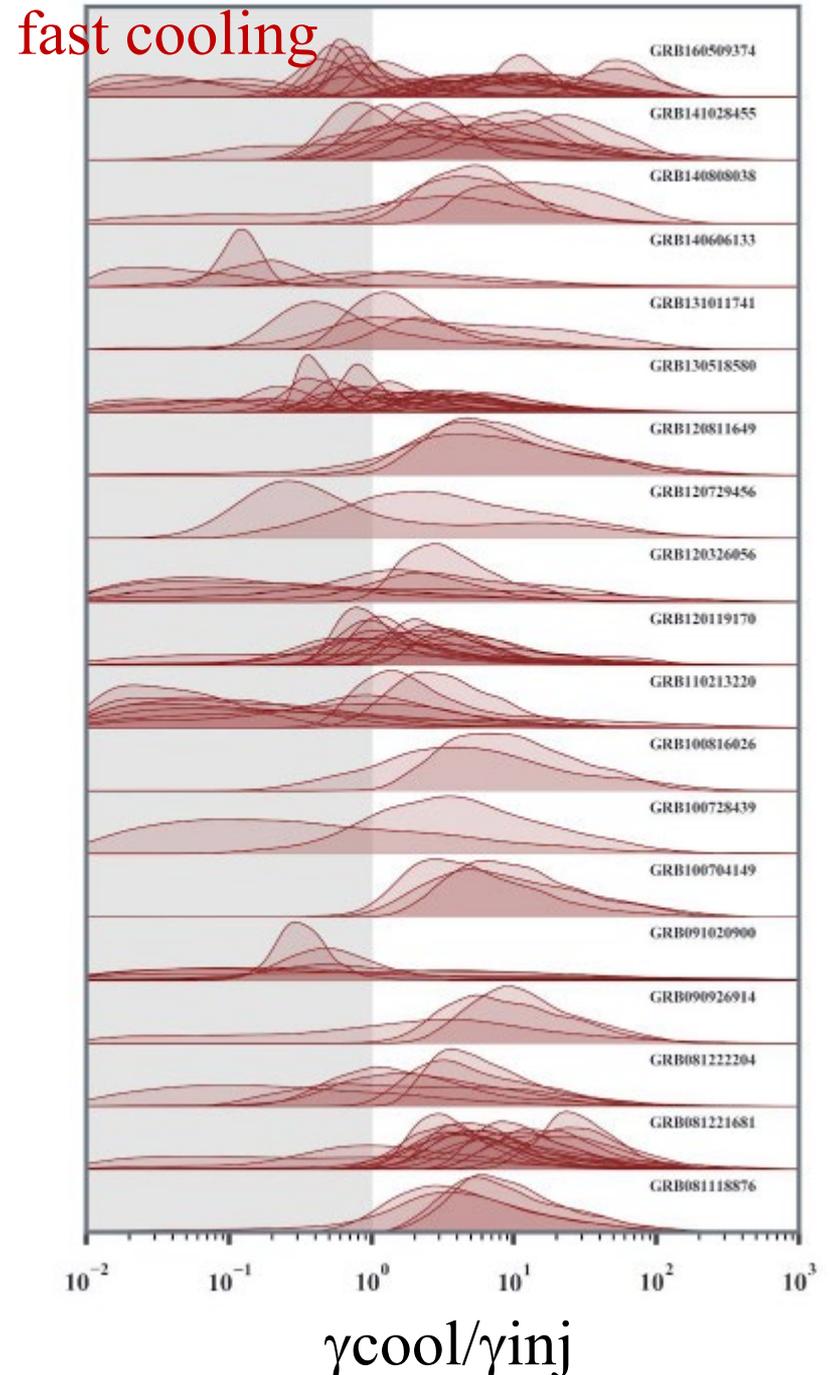
$\gamma_{\text{inj}} < \gamma < \gamma_{\text{max}}$

Refroidissement jusqu'à  $\gamma_{\text{cool}}$

95% des spectres fittés

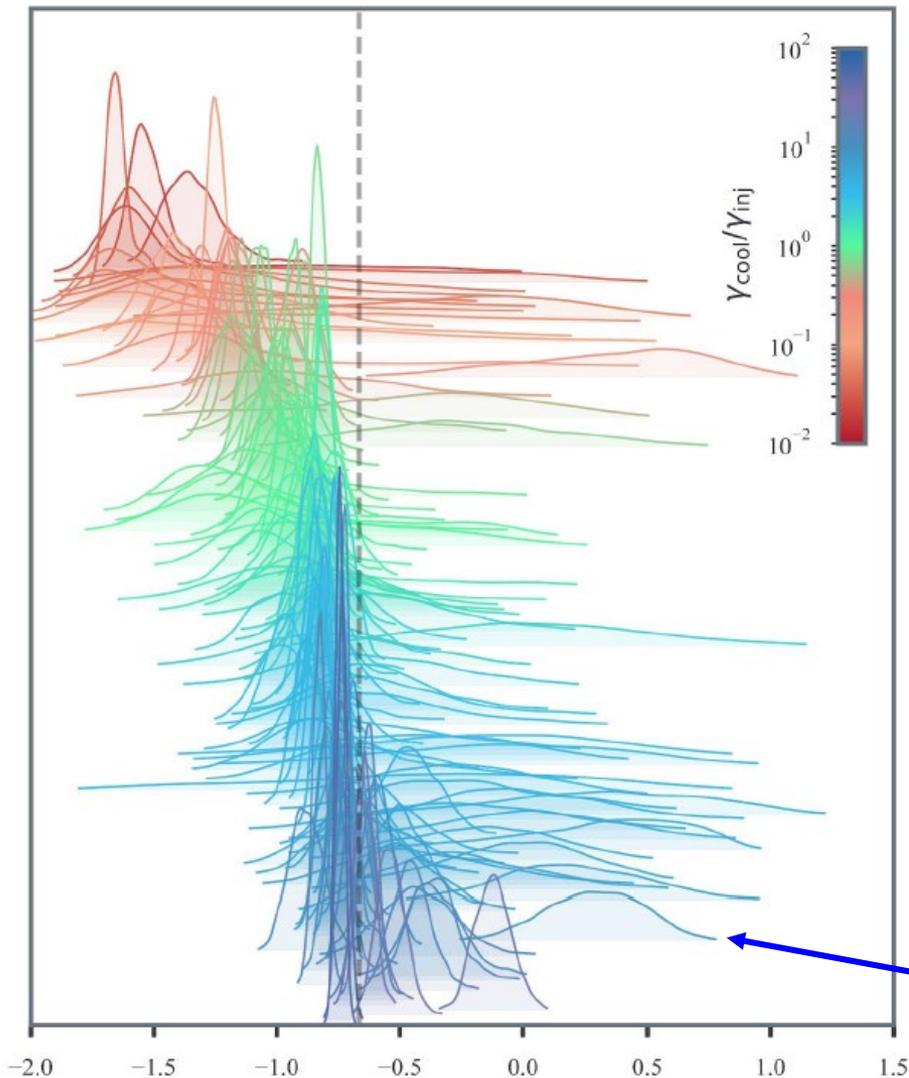
$p=3.5$

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



# Ligne de la mort

$$\alpha = -2/3$$



$\alpha$  Pente à basse énergie

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

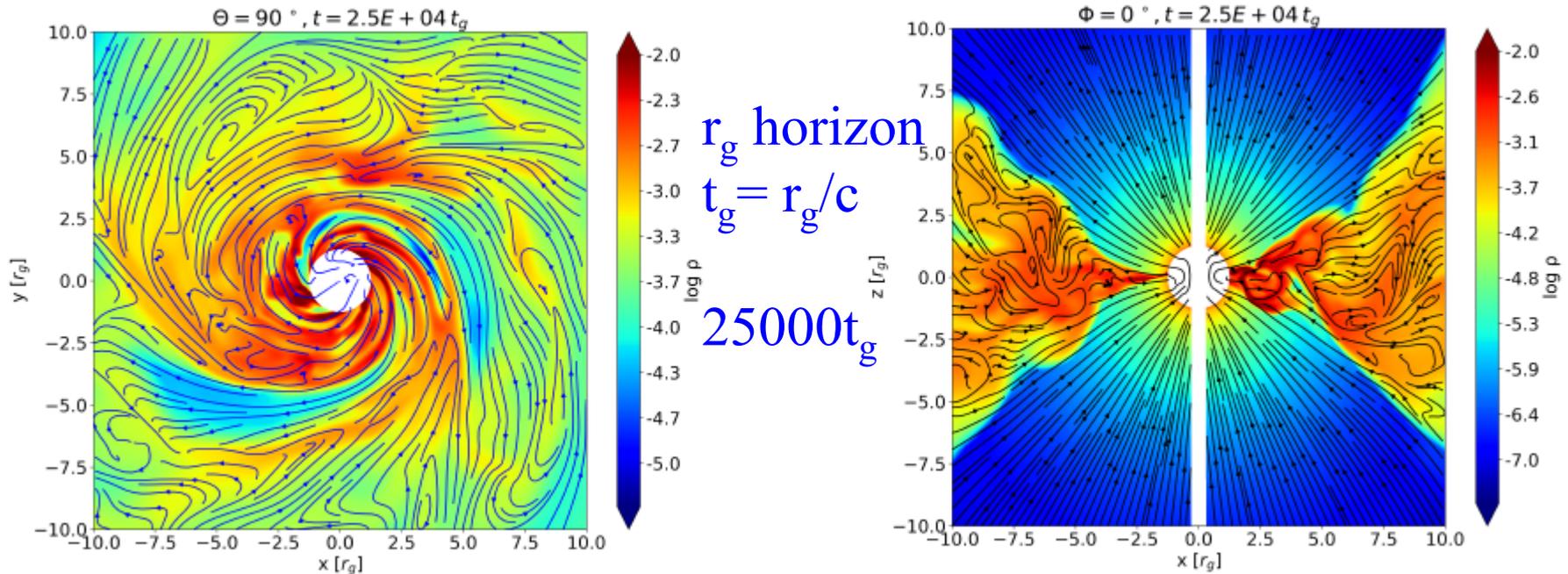
En fait, ce n'est pas une  
impossibilité

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  $\gamma$



MAD « Magnetically Arrested Disk »

La région arrêtée lance des jets verticalement

Instabilités magnéto-rotationnelles MRI

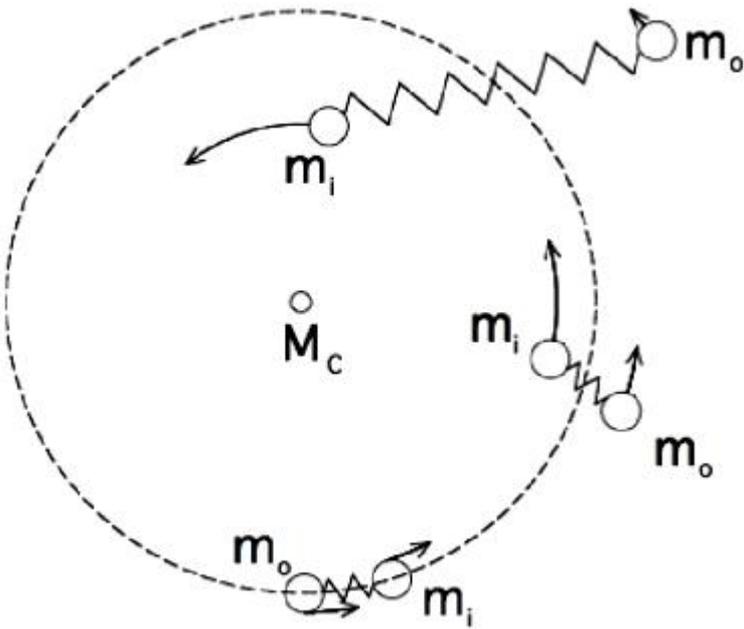
Echanges de tubes de champ toroidal

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 ( $\Omega$  supérieur, Période plus courte)

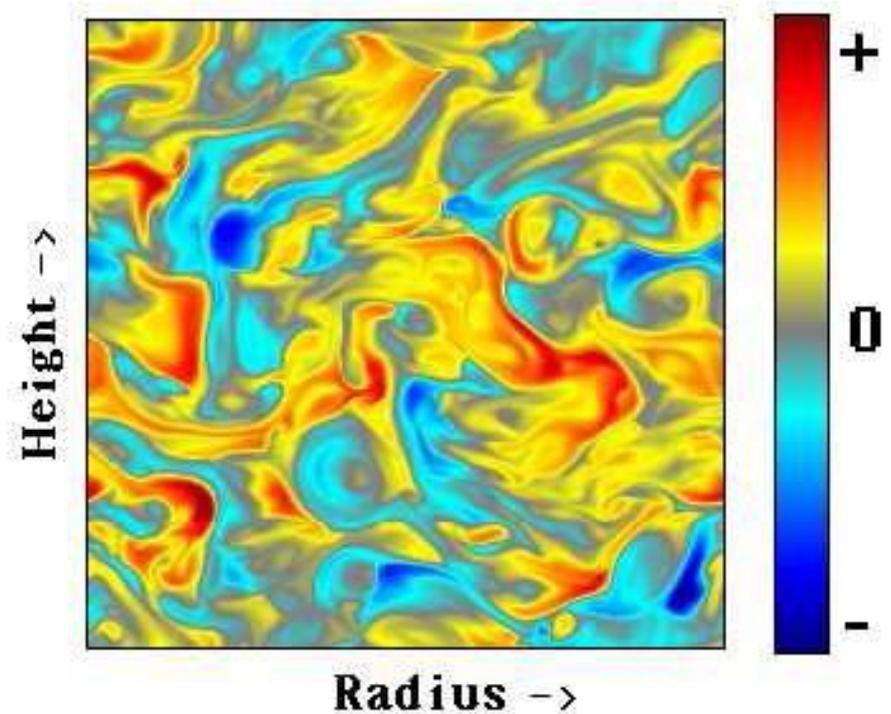
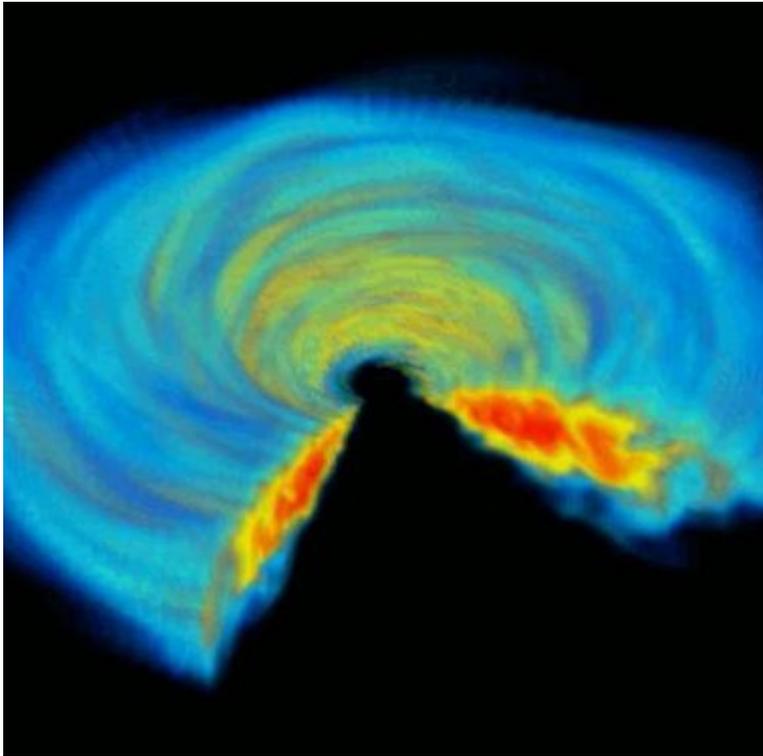
$m_i$  tend à accélérer  $m_o$ , et à lui donner du moment angulaire.  
Pourtant c'est  $m_o$  qui en a le plus!  
 $m_i$  tombe vers le centre et tourne de plus en plus vite!!

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

# Simulations de la MRI

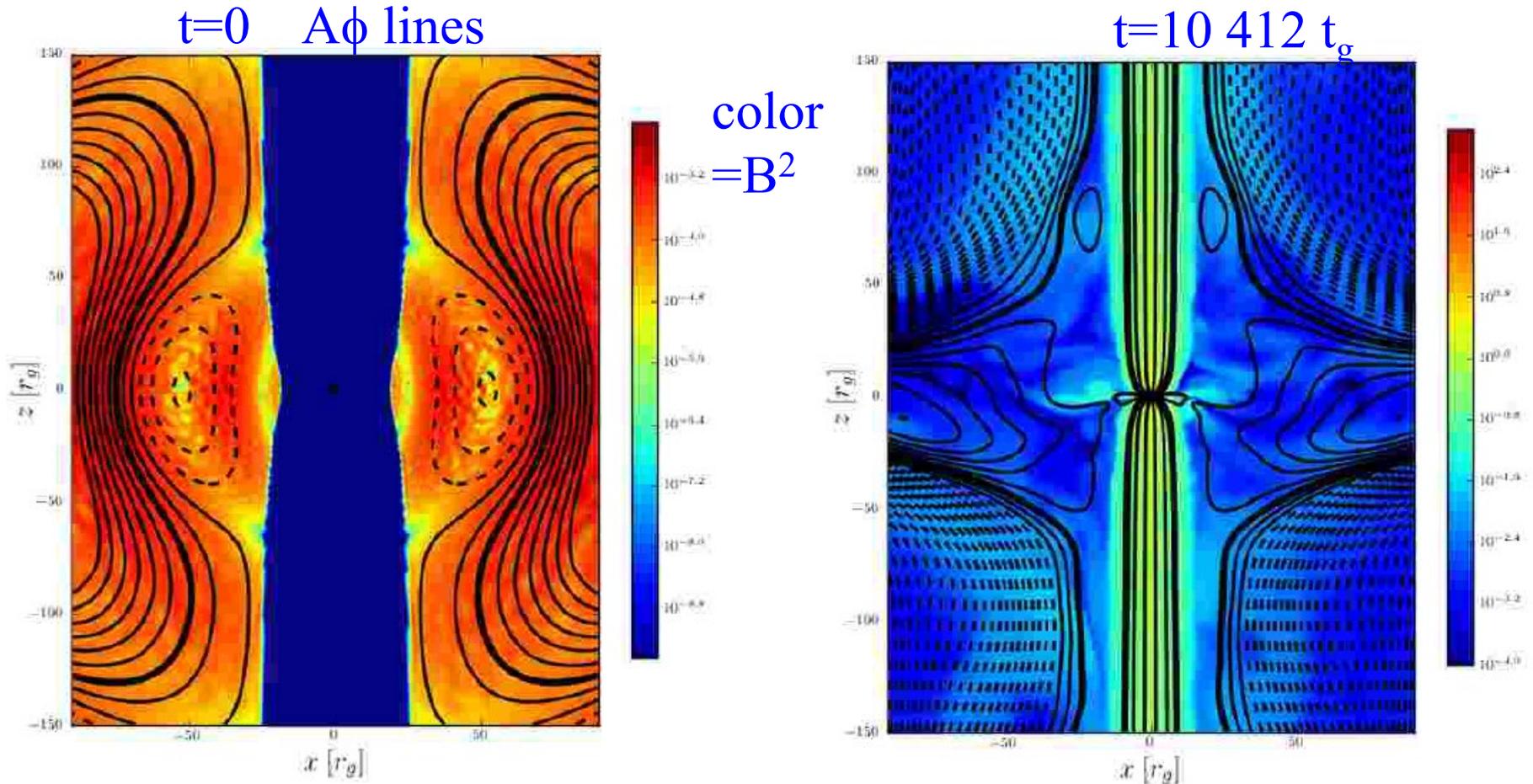
*John Hawley*

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



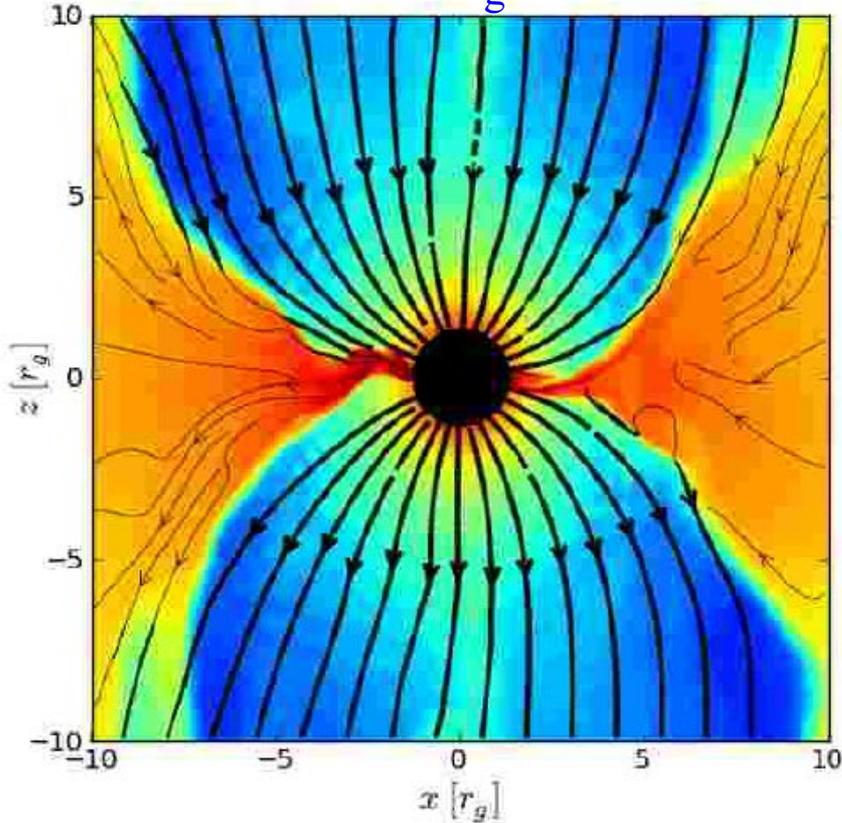
GR-MHD, disque initialement épais  $H/R \sim 1$

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

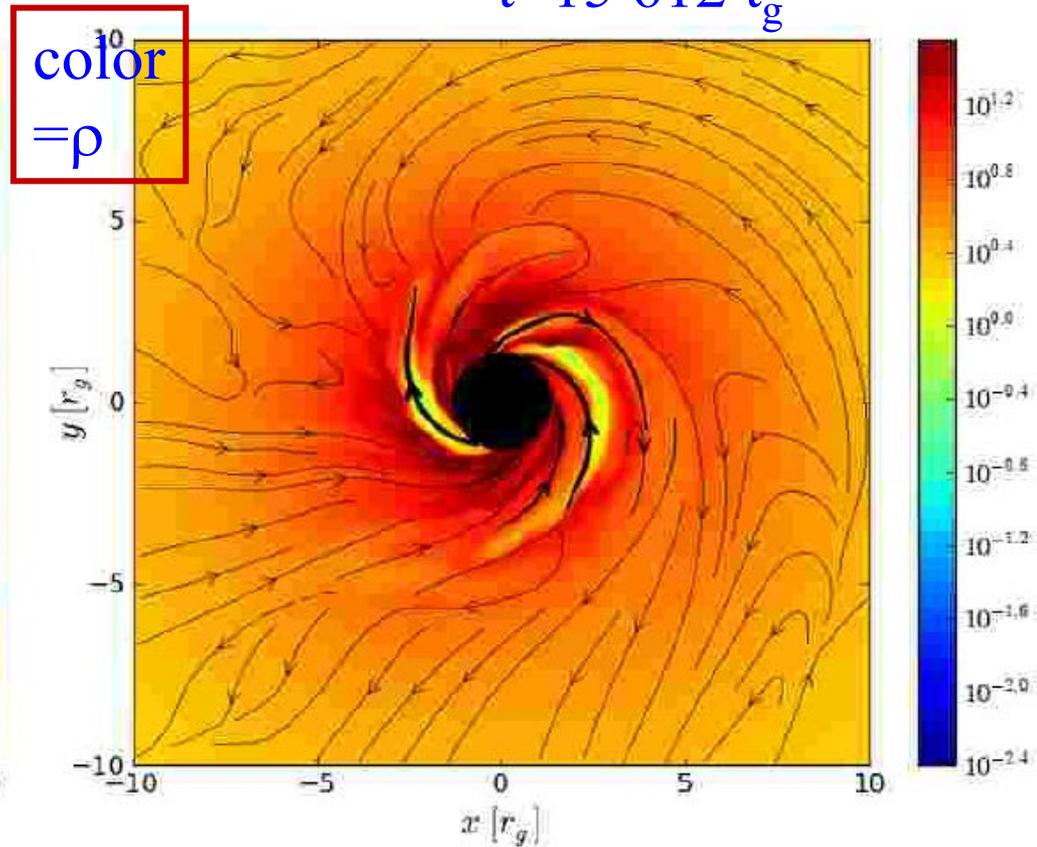
disque étouffé  $H/R \ll 1$  jet 100% efficace si  $a > 0.9$

# Jets produits

$t=15612t_g$  B lines



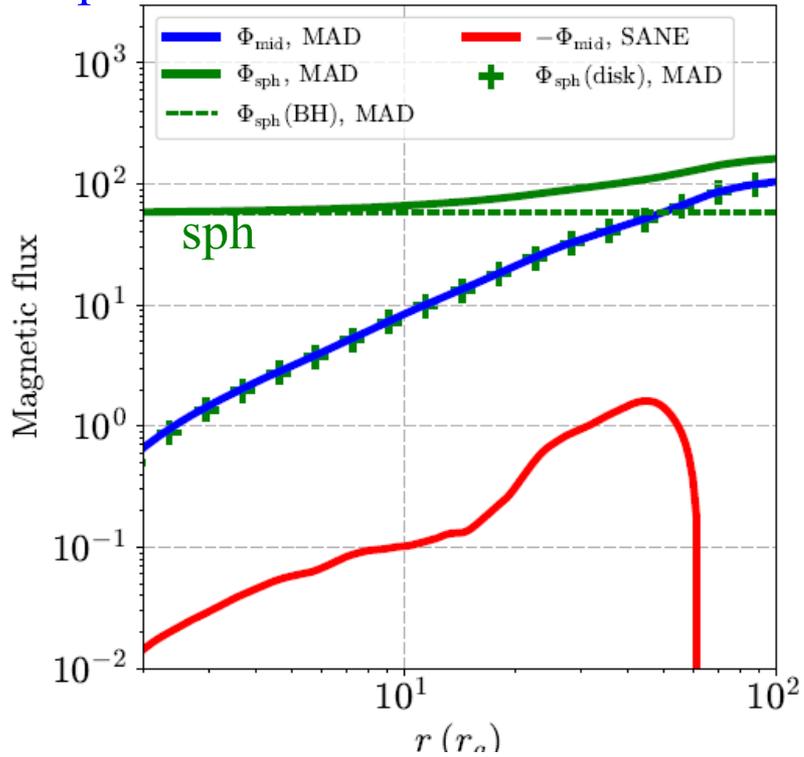
$t=15\ 612 t_g$



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

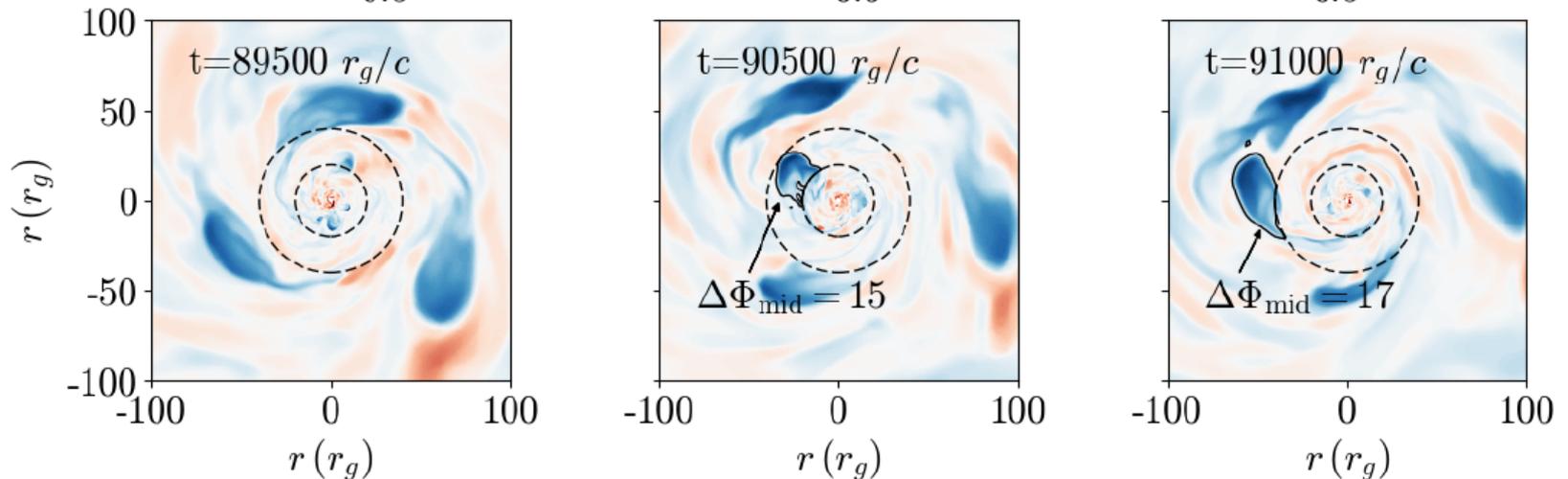
Bulle bleue entourée d'un contour plein

Rayons  $20r_g$ ,  $40r_g$  en pointillés

MRI persiste

$$r^2 B^\theta$$

*Begelman et al 2021*



# Production de jets et GRB170817

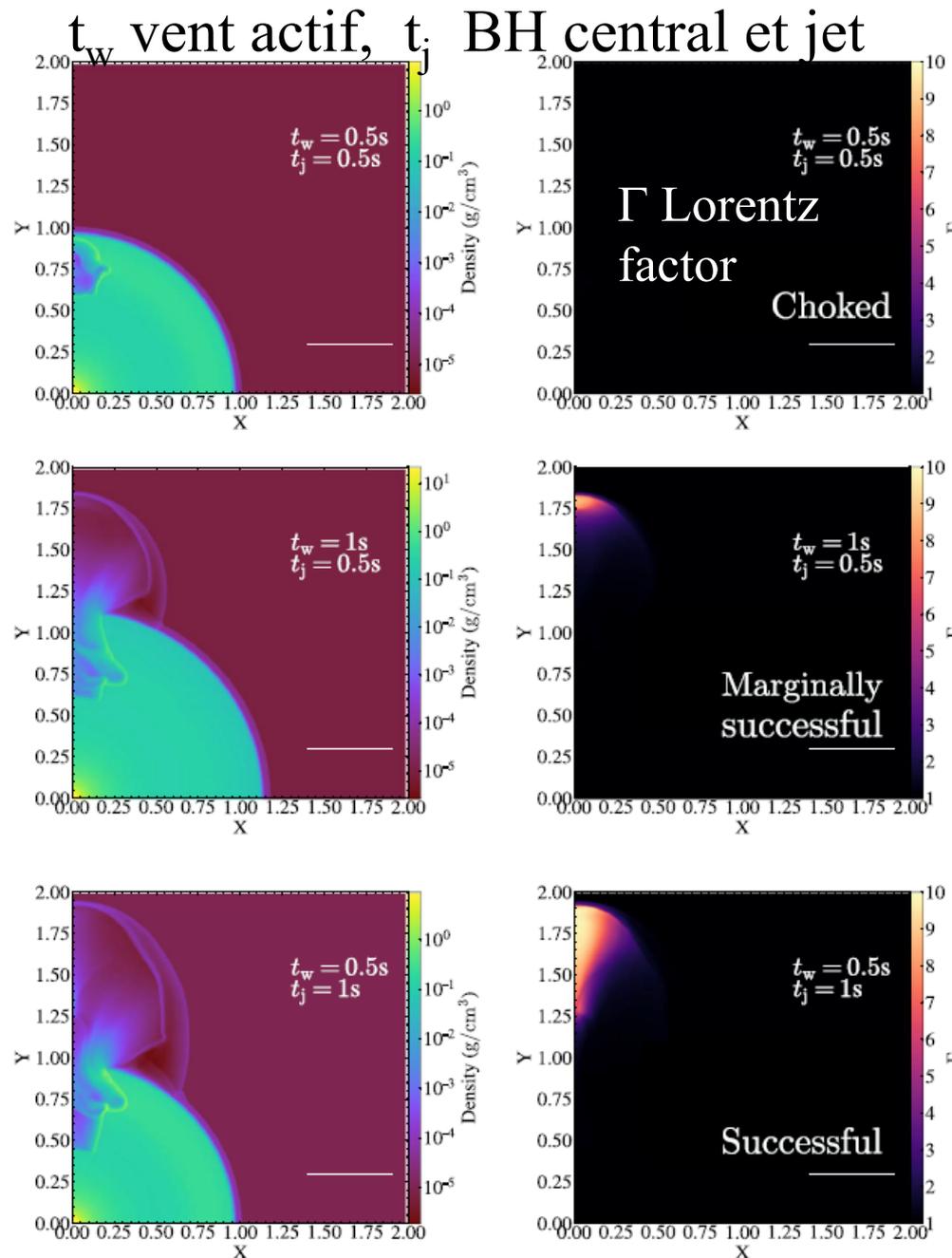
Champ B amené vers le centre  
accrétion  $\rightarrow$  MAD  
MRI partiel + RTI, accrétion  
trou noir central, + jets

**Compétition  $t_{\text{collapse}}$**   
**Interaction jet-vent**

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

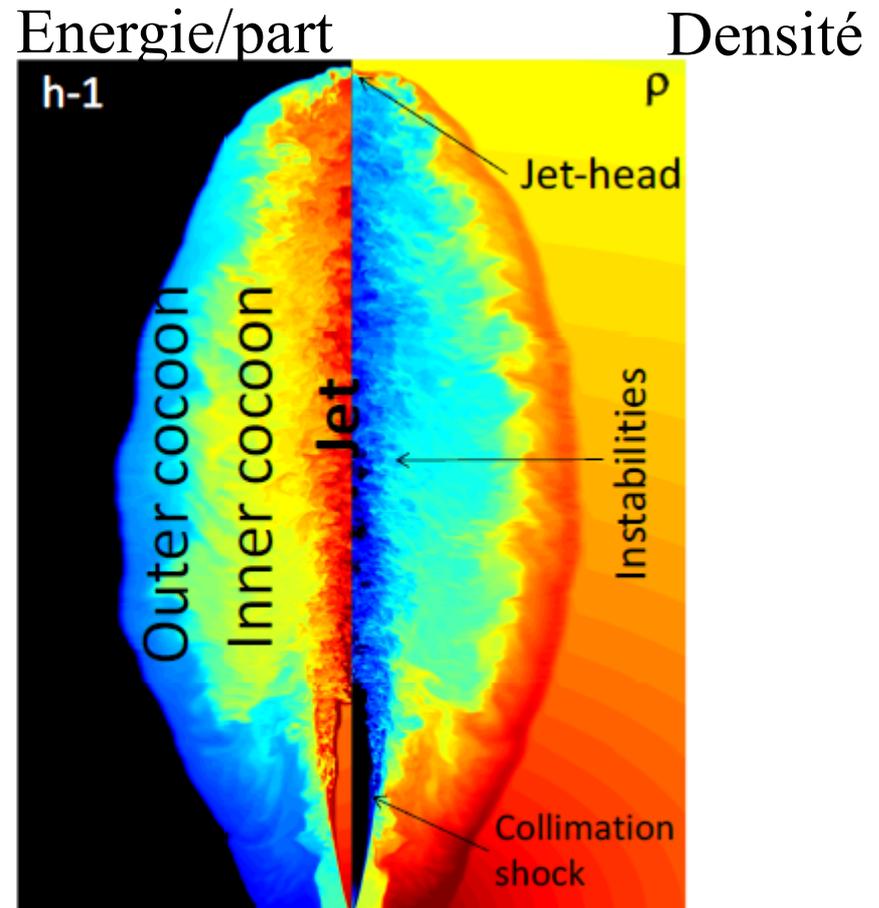
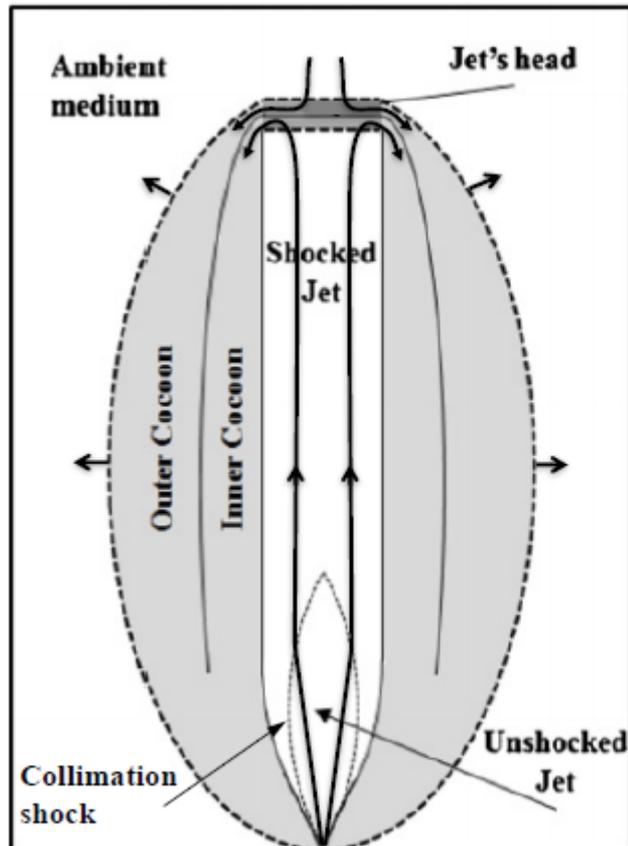
$\rightarrow$  1.7 s entre la fusion et le jet  
Vue off-axis de  $15^\circ$

*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

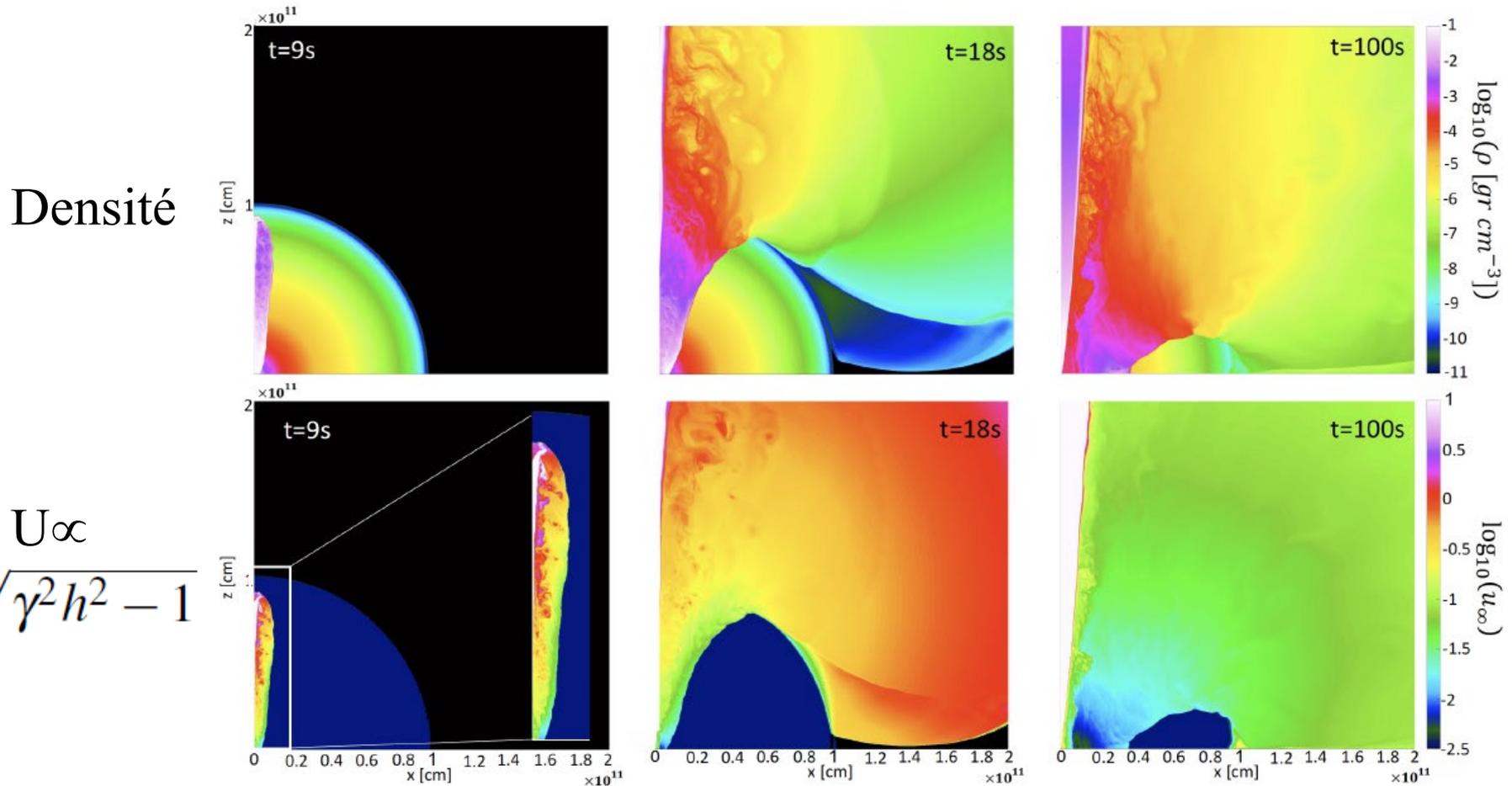


Outer: ejecta, milieu plus froid et dense

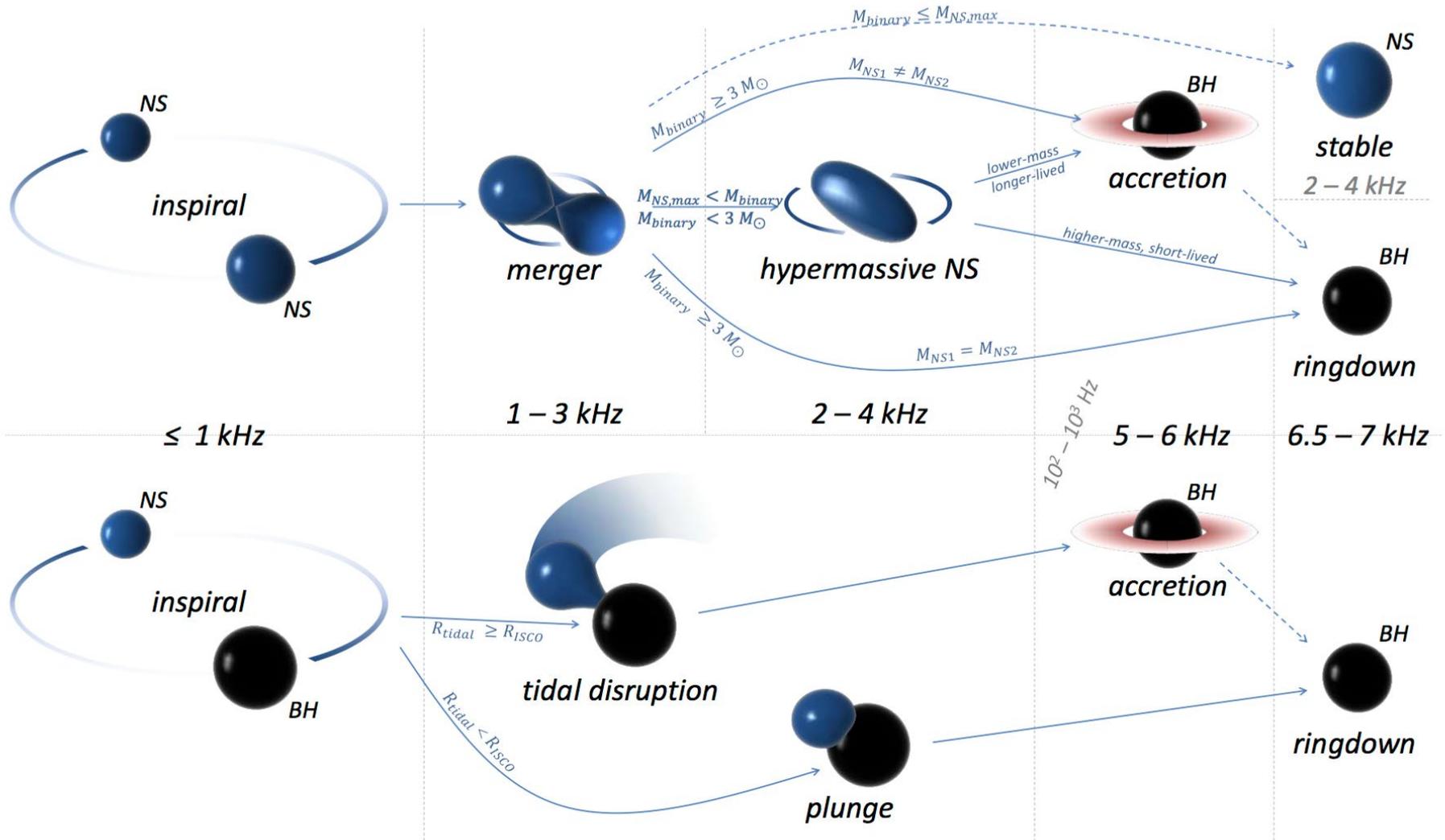
*Nakar 2020*

# Simulations jet de GRB long

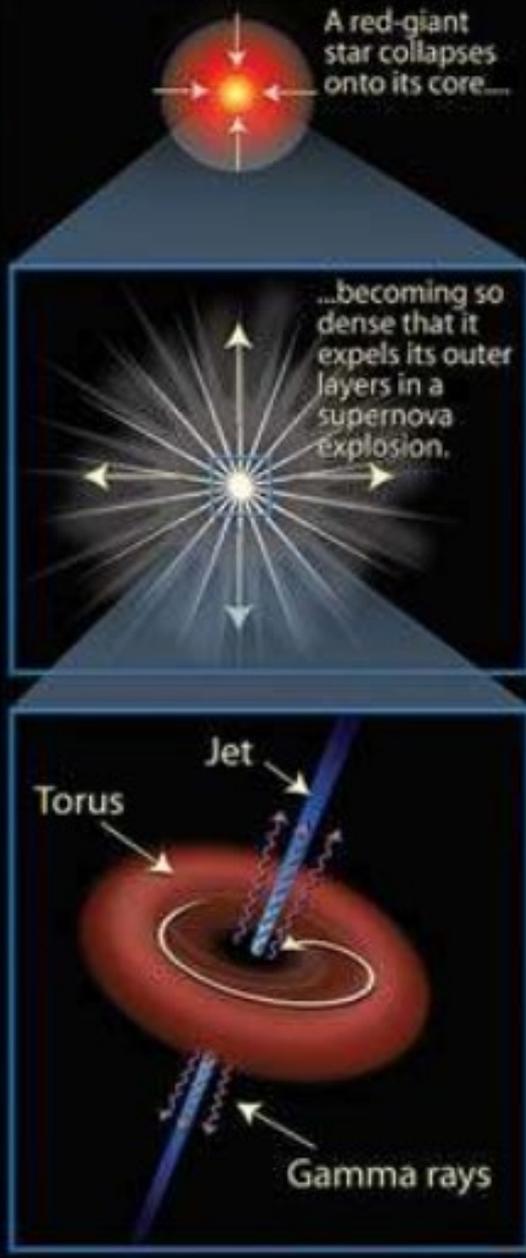
Dans la supernova, la majorité de l'énergie est éjectée de façon sphérique dans l'explosion (sub-relativiste). Jet = 0.01-0.1 %  
Semblable rapport d'énergie pour GRB170817 (court)



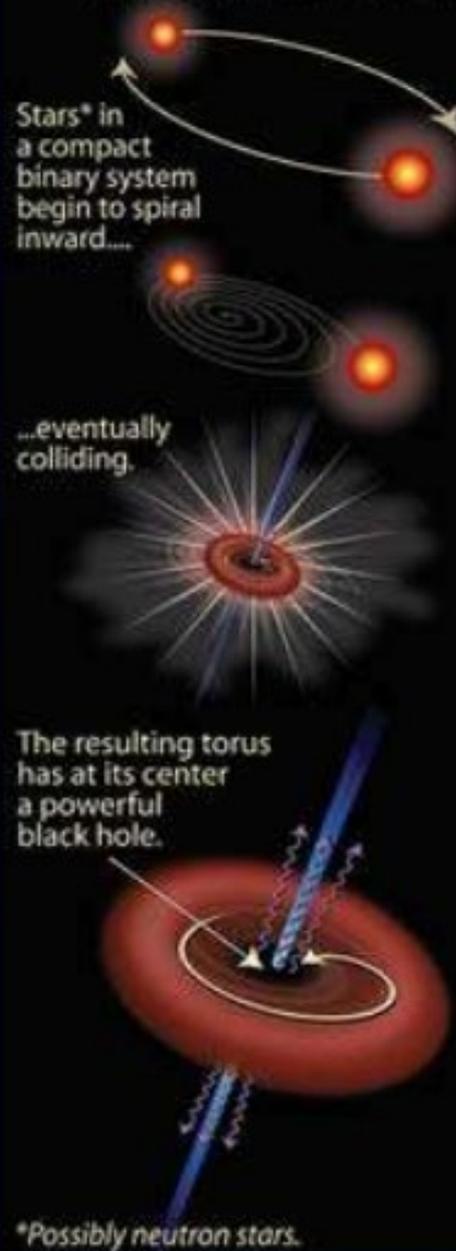
# Deux possibilités: NS-NS, BH-NS



## 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