

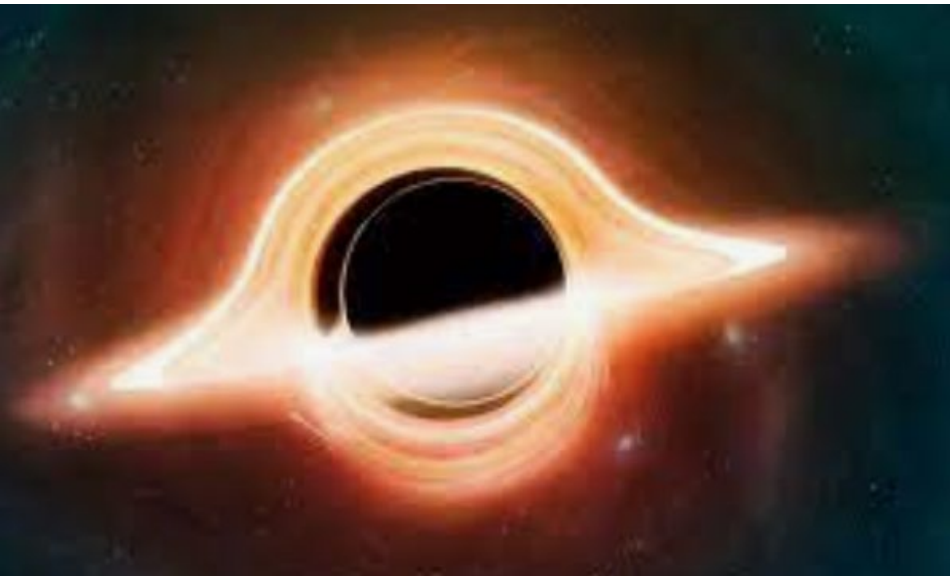


COLLÈGE  
DE FRANCE  
—1530—

*Chaire Galaxies et Cosmologie*

**ETOILES et TROUS NOIRS**

## Supernovae et trous noirs



**Françoise Combes**



Laboratoire d'Étude du Rayonnement et de la Matière en Astrophysique

# Plan de l'exposé

## 1- Les supernovae

Détails de l'explosion, divers types

Asymétries, et ondes gravitationnelles

## 2- Les trous noirs

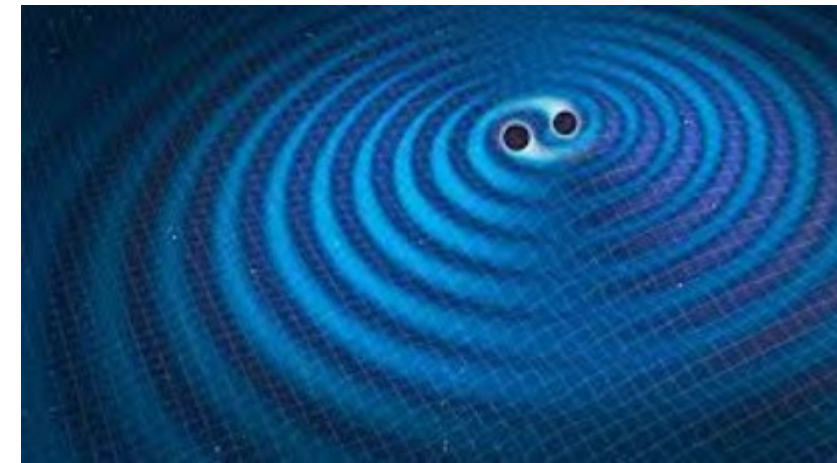
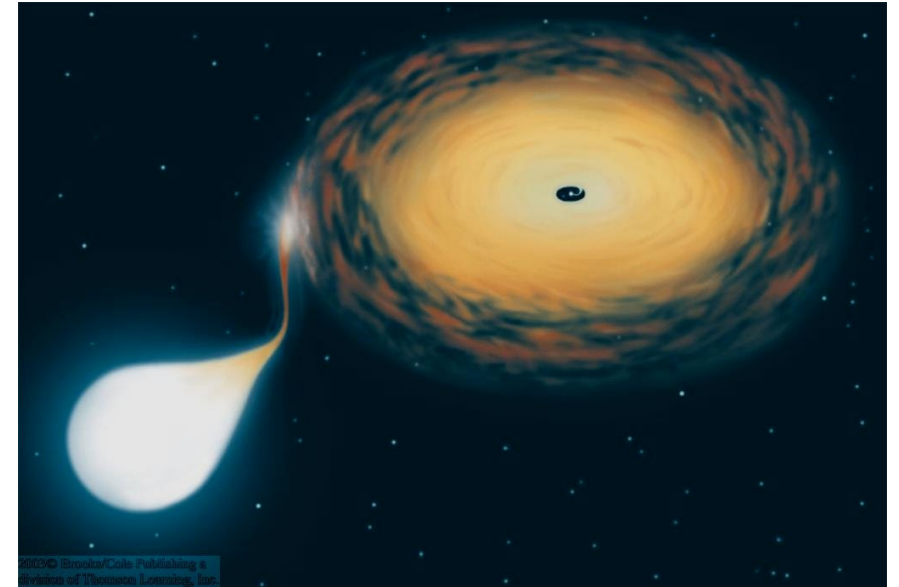
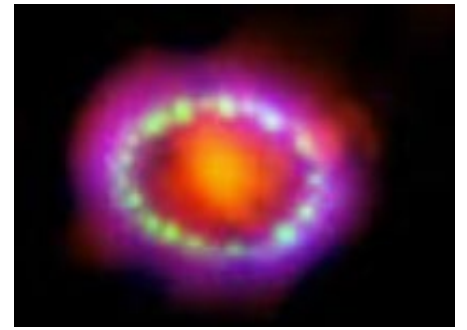
Distribution des masses

Evolution, Binaires X

## 3- Contraintes observationnelles

Sursauts X,  $\gamma$ , radio

Ondes gravitationnelles



# SN1987A: la mieux connue

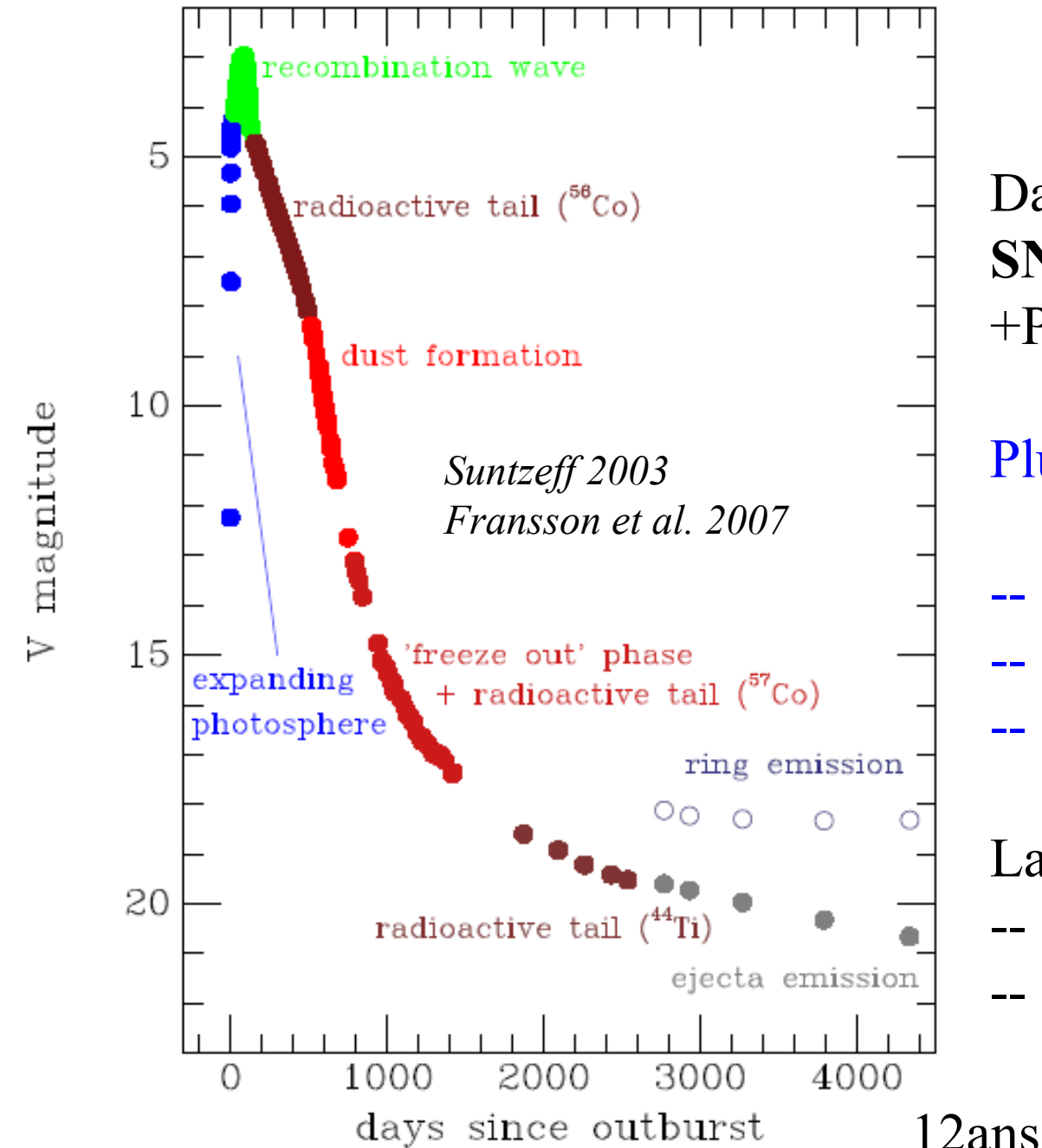
Dans le Grand Nuage de Magellan, la supernova **SN-II (riche en H)** la plus observée de tous les temps  
+ Progéniteur connu: supergéante bleue  $20 M_{\odot}$

Plusieurs sortes d'explosion selon la masse

- capture d'électrons  $8-10 M_{\odot}$
- effondrement du cœur de fer  $10-70 M_{\odot}$
- instabilité de paires  $> 70 M_{\odot}$

La forme observée dépend:

- de la binarité
- de l'environnement du milieu interstellaire



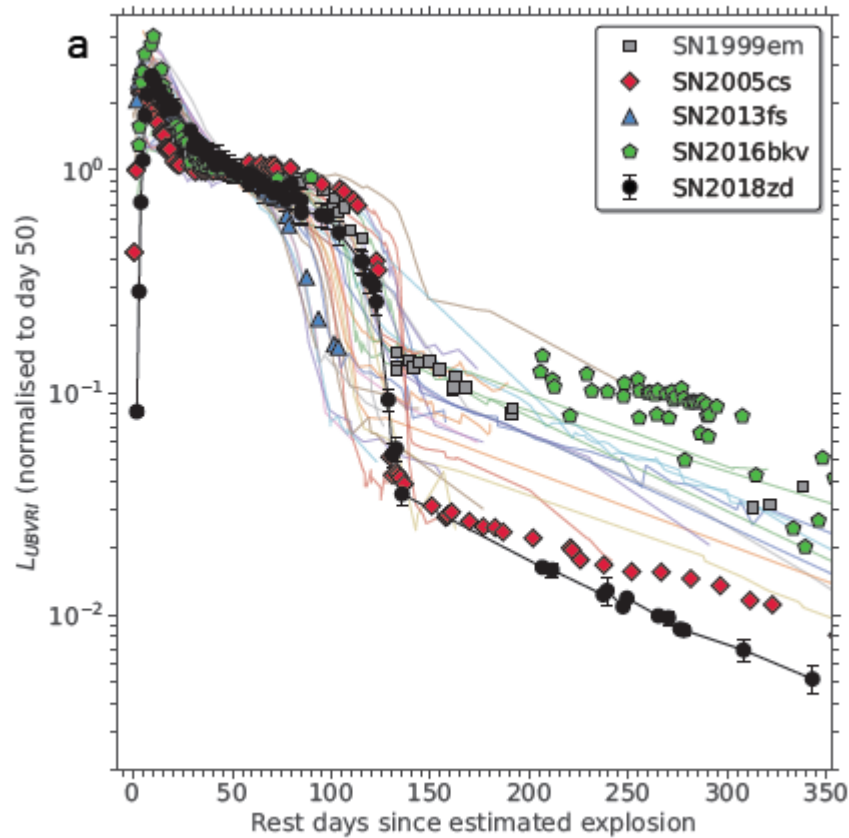
$^{44}\text{Ti}$  63 ans,  $^{57}\text{Co}$  0.75ans

# Par capture d'électrons 8-10 $M_{\odot}$

Etoile super-AGB, avec cœur dégénéré O+Ne+Mg: **SN2018zd**

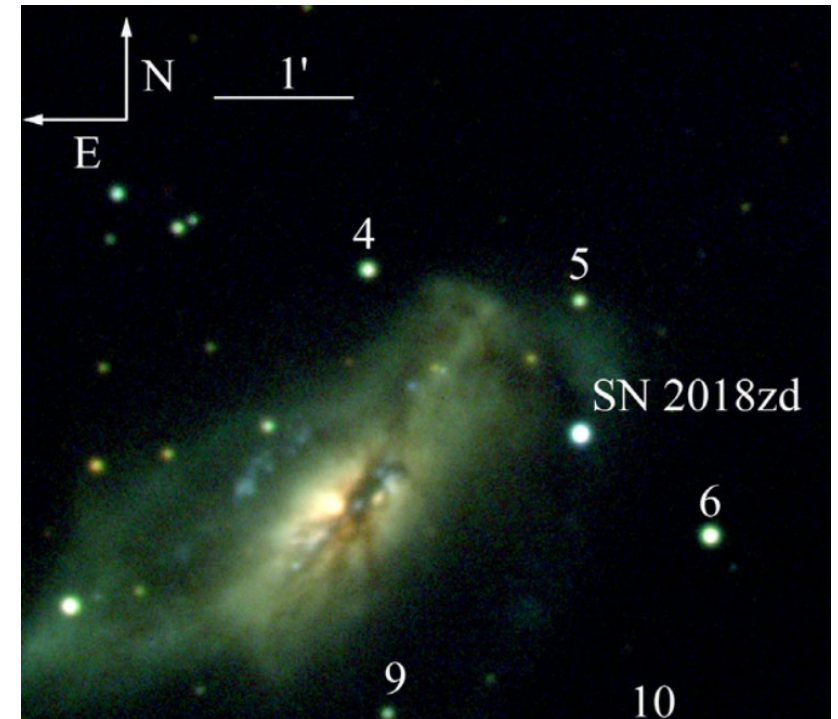
La capture d'électrons sur Ne et Mg déclenche l'effondrement du cœur

→ Explosion de faible énergie, et nucléosynthèse riche en neutrons



Forte chute après le plateau, indiquant une faible  $^{56}\text{Ni}$

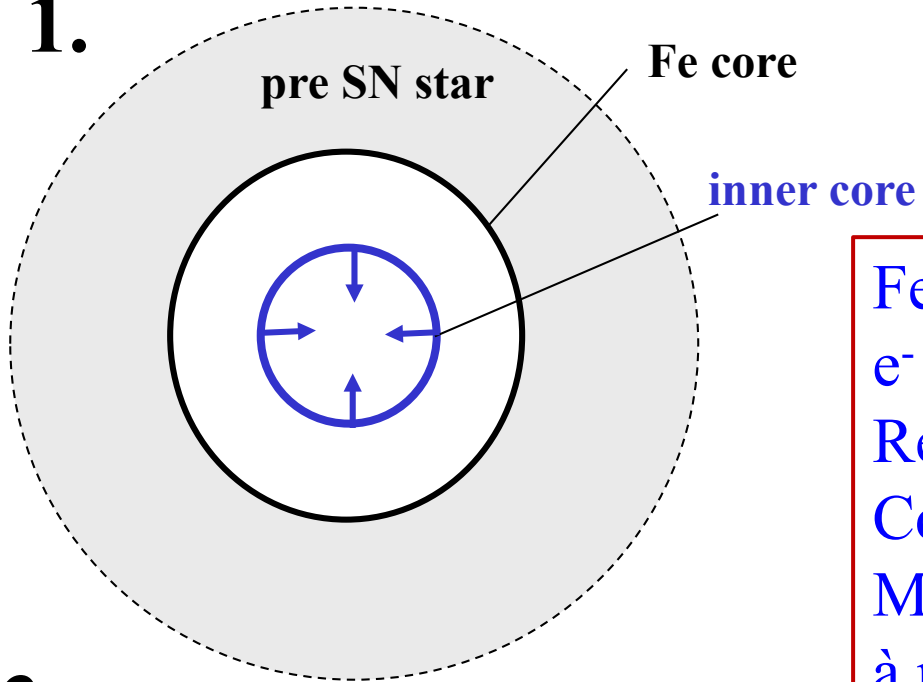
NGC2146



*Hiramatsu et al 2021*

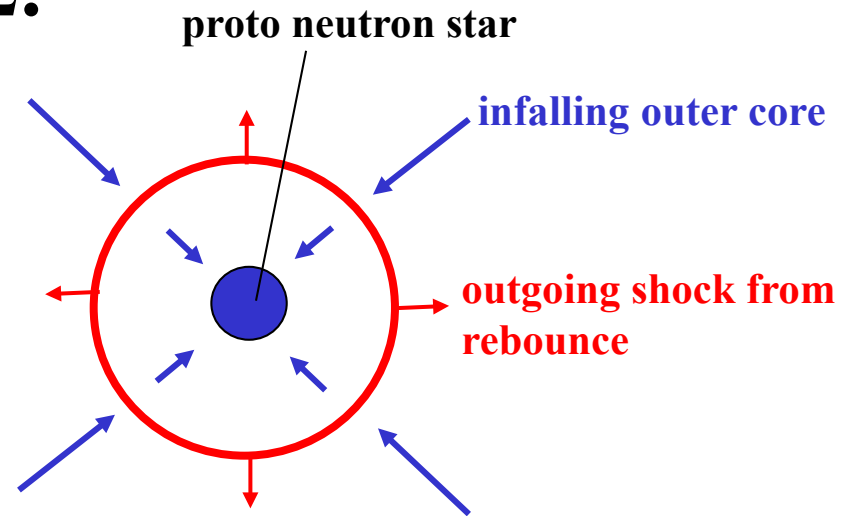
# Par effondrement du cœur de fer 10-70 M<sub>⊙</sub>

1.

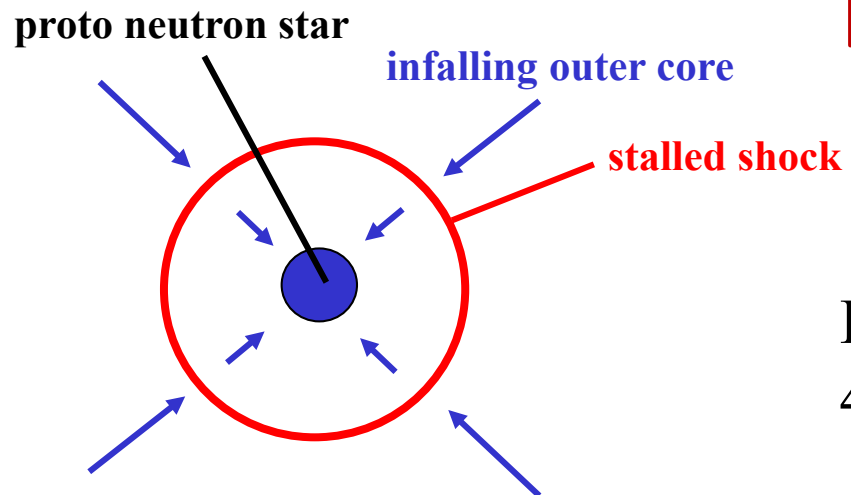


Fer inerte,  
e<sup>-</sup> relativistes  
Rebond du choc  
Cœur dégénéré  
M < 1.5 M<sub>⊙</sub> étoile  
à neutrons  
Sinon trou noir

2.

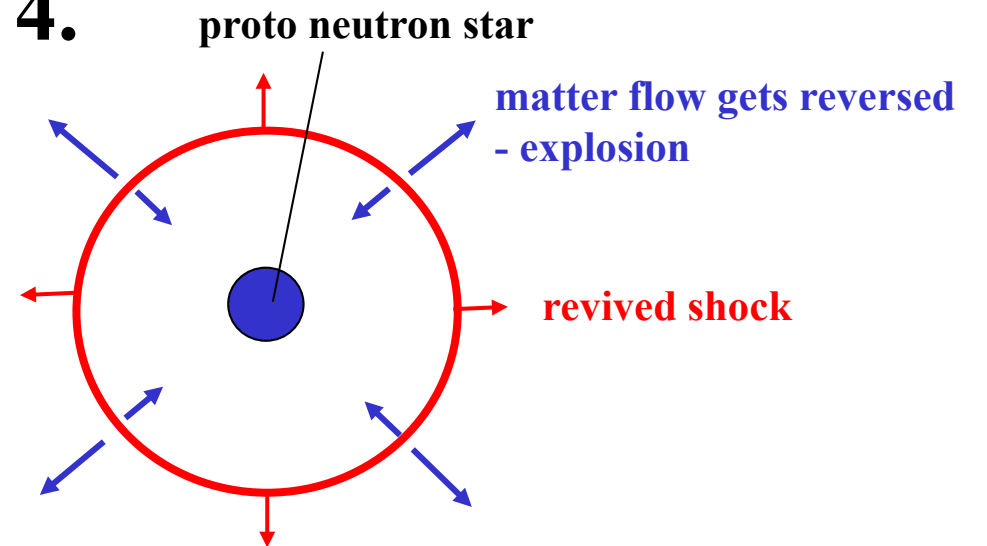


3.



$$E_{\text{grav}} \sim 3-6 E_{\text{nuc}}$$
$$4\%mc^2 \quad (0.7\%mc^2)$$

4.



# Bilan d'énergie

Energie totale  $10^{51}$  ergs,

Luminosité  $10^9$ - $10^{10}L_{\odot}$  domine sa galaxie pour qqs semaines

- Grande partie d'énergie dans les neutrinos: 99%!
- énergie des ondes de chocs, accélération de rayons cosmiques
- radioactivité des éléments  $^{56}\text{Ni}$ ,  $^{56}\text{Co}$ ,  $^{57}\text{Co}$ ,  $^{44}\text{Ti}$

Produisent des rayons  $\gamma$

- refroidissement dû à l'expansion
- recombinaison du plasma en H, He

## Spectres

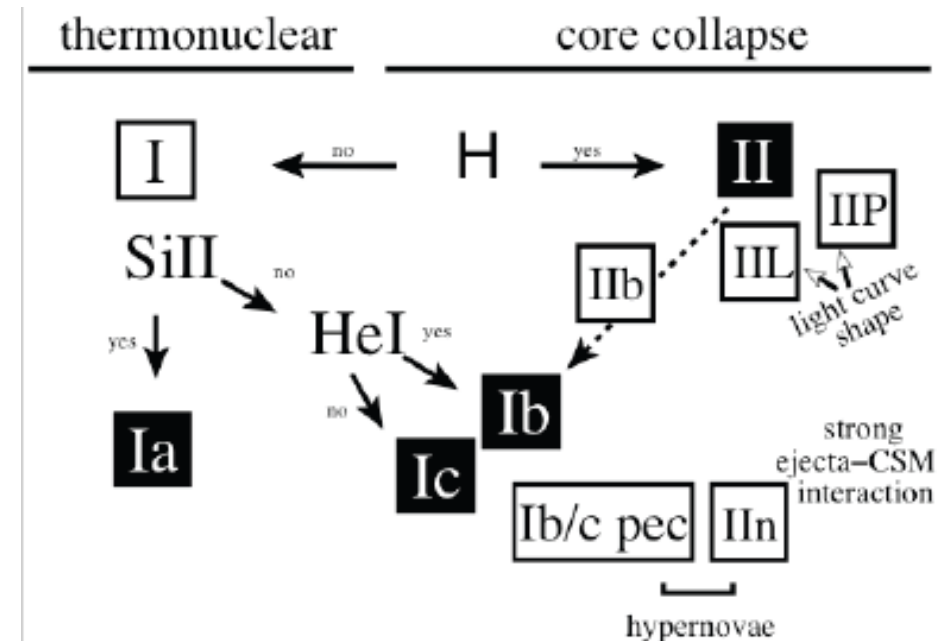
Type II: avec H

Type I: sans H

Ia avec Si

Ib He dominant

Ic He

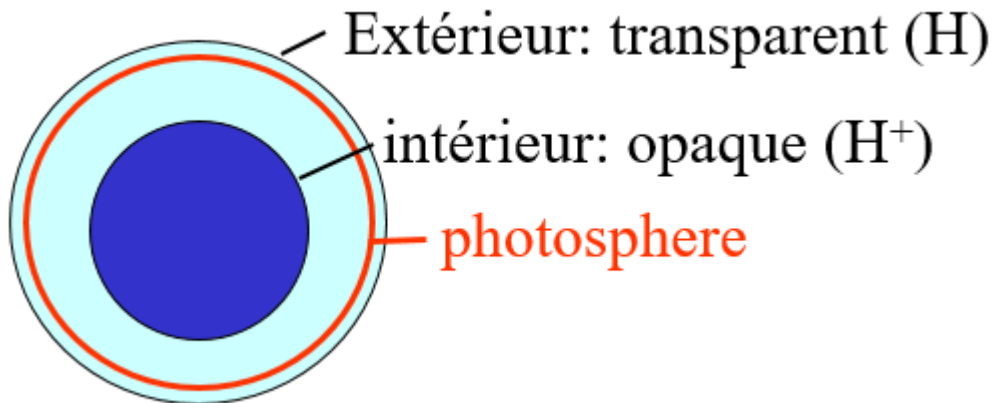


# Courbes de lumière caractéristiques

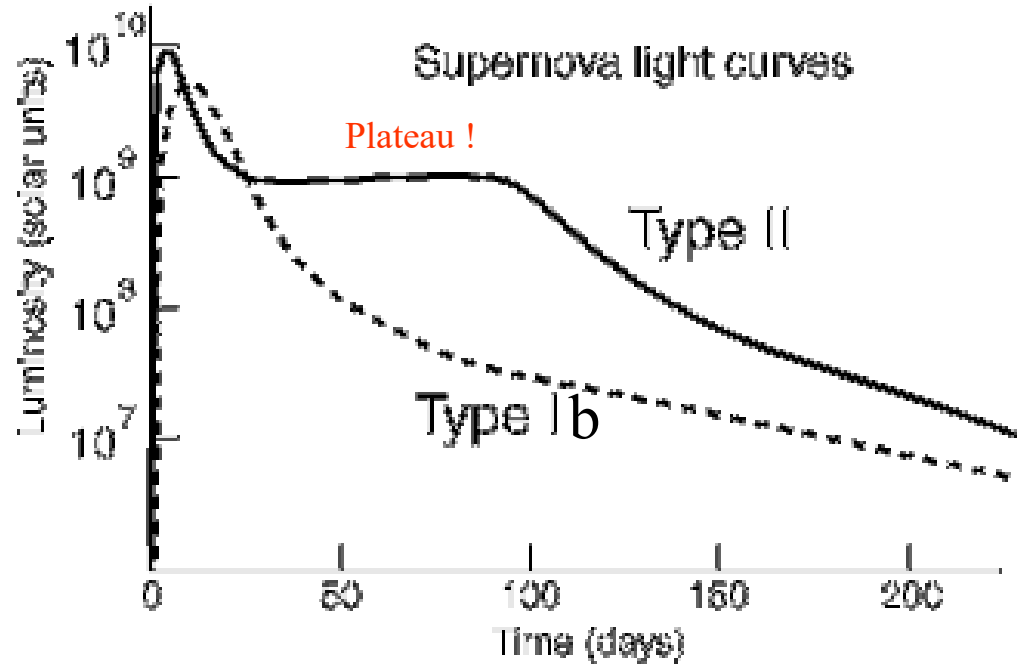
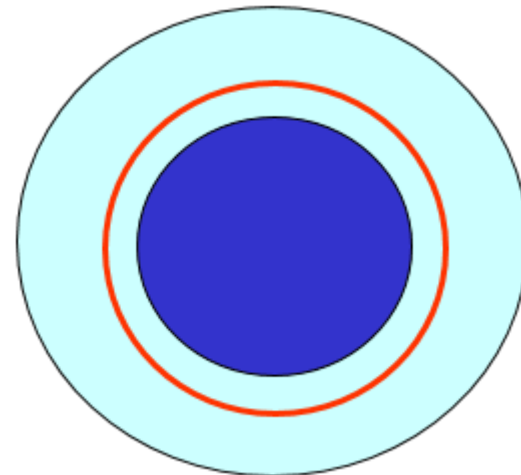
Origine du plateau:

Au début

Enveloppe H



Plus tard



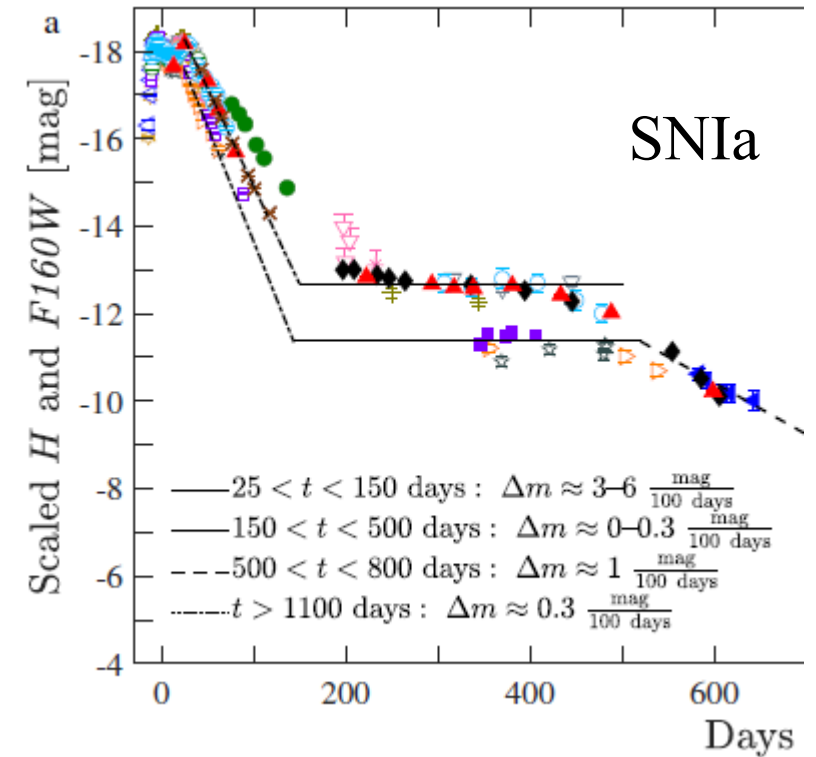
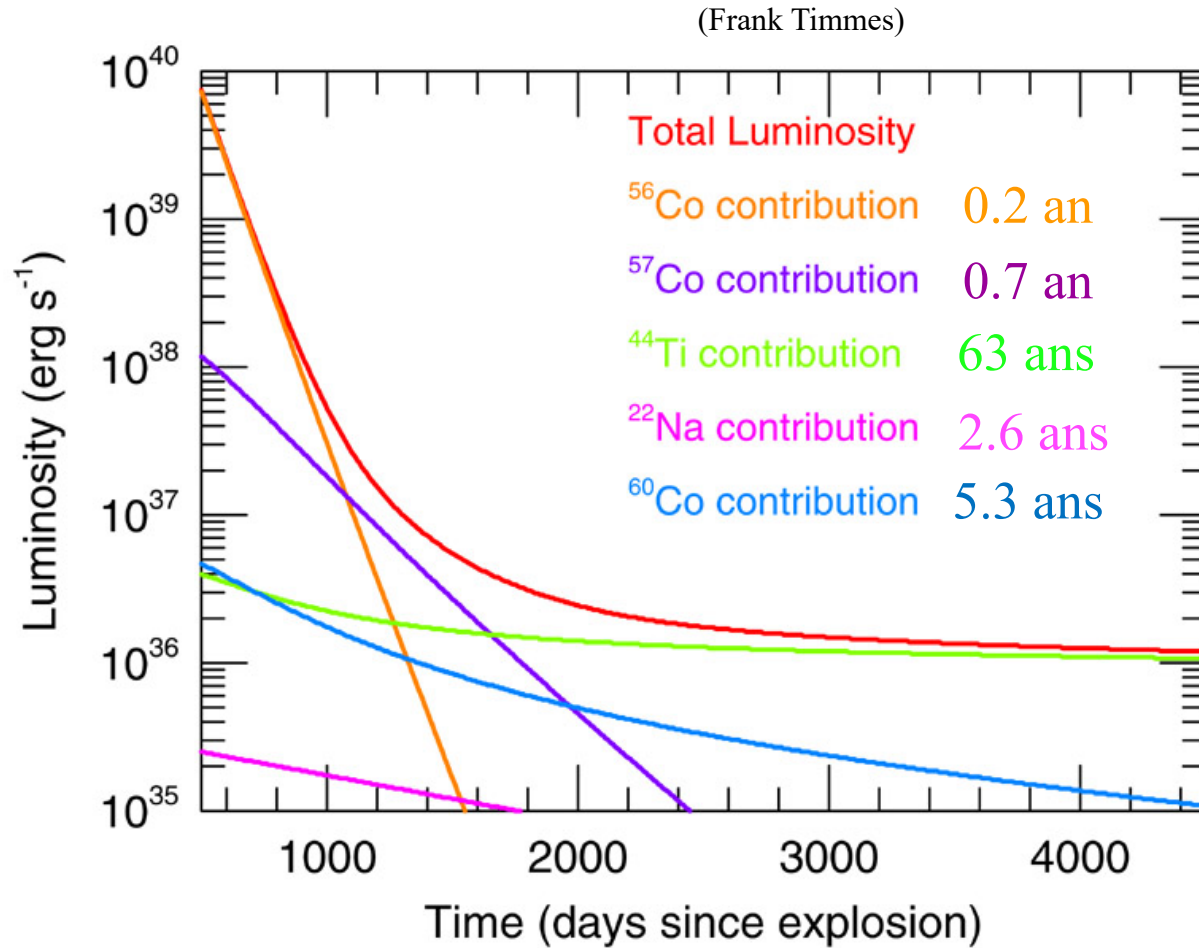
plateau  
50-100j

Adapted from Chaisson & McMillan

A mesure que l'étoile se dilate, la photosphère se déplace vers l'intérieur, contour  $T=5000K$  (recombinaison H)  $T, R$  restent fixes = Luminosité constante (tant que la photosphère reste dans l'enveloppe H)

# Radioactivité

Autre facteur qui prolonge la luminosité de l'étoile



Les isotopes radioactifs sont produits durant l'explosion  
→ On l'appelle nucléosynthèse explosive

Les SNIa ont souvent  
un plateau 150-500j  
*Graur et al 2020*



# Paramètres physiques d'une SN II

La forme de la courbe de lumière et l'évolution de la vitesse

→ énergie totale de l'explosion, de la masse et du rayon (E, M, R)

## Valeurs typiques

$\Delta t \approx 70$  jours  $v_{ph} \approx 7000$  km/s  $L \approx 10^{10} L_{\odot}$

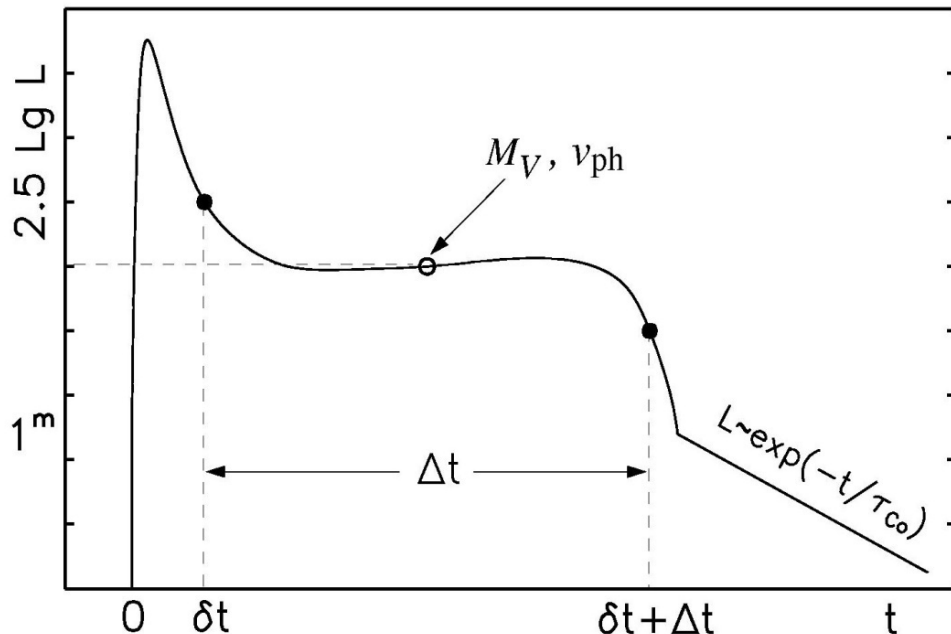
→  $E \approx 1.8 \cdot 10^{51}$  erg  $M \approx 6.7 M_{\odot}$

$R \approx 400 R_{\odot}$  typique d'une supergéante rouge

Observables:

- longueur du plateau: phase  $\Delta t$
- luminosité du plateau  $M_V$
- Vitesse des ejecta  $v_{ph}$

- $E \propto \Delta t^4 v_{ph}^5 L^{-1}$
- $M \propto \Delta t^4 v_{ph}^3 L^{-1}$
- $R \propto \Delta t^{-2} v_{ph}^{-4} L^2$

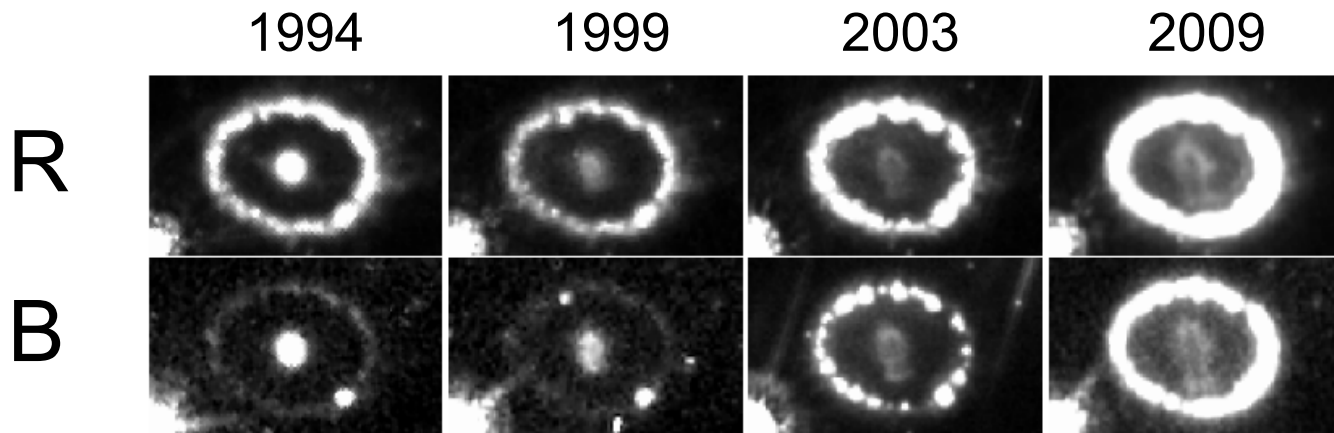


La dernière phase renseigne sur la quantité de  $^{56}\text{Ni}$  (6 jours) et de la poussière formée; (NS ou BH?)

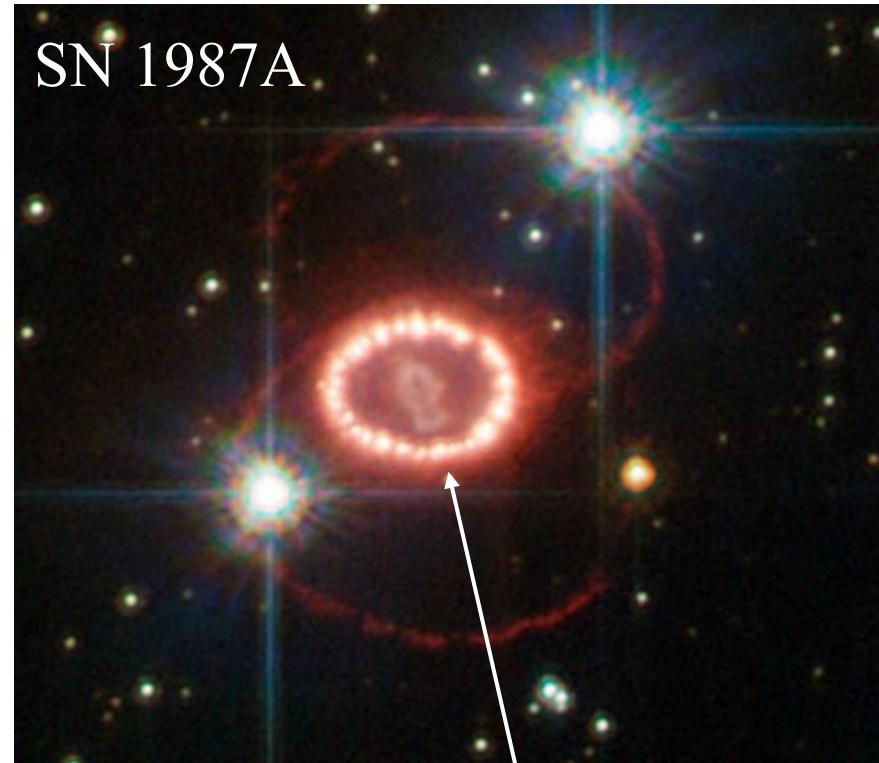
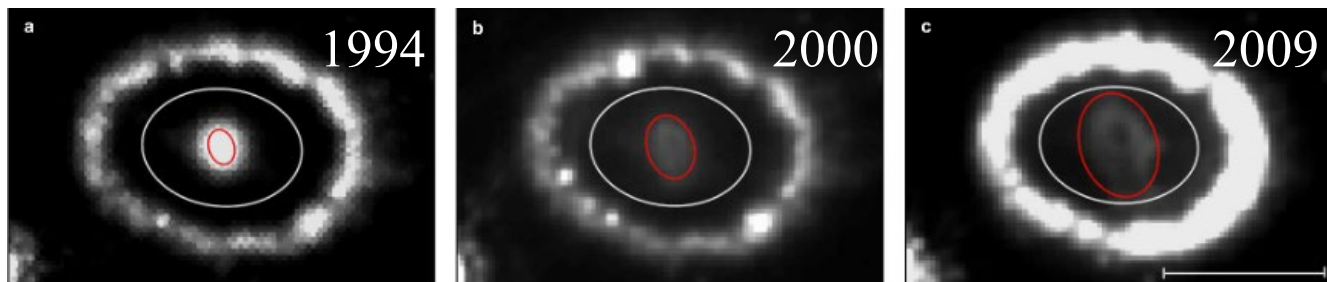
# La surprise, 20 ans après

Collision ejecta-anneau  $\rightarrow$  Rayons X

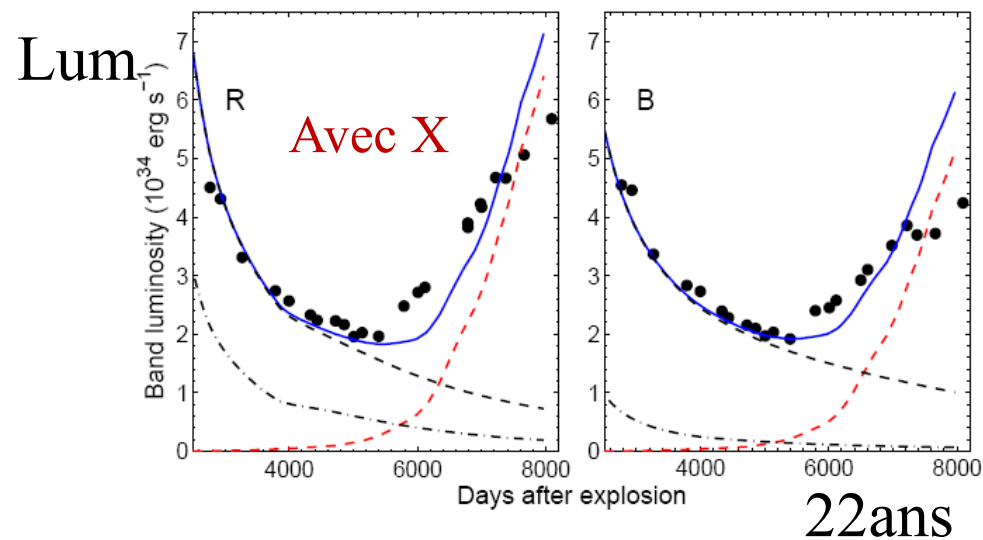
*Larsson et al. 2011*



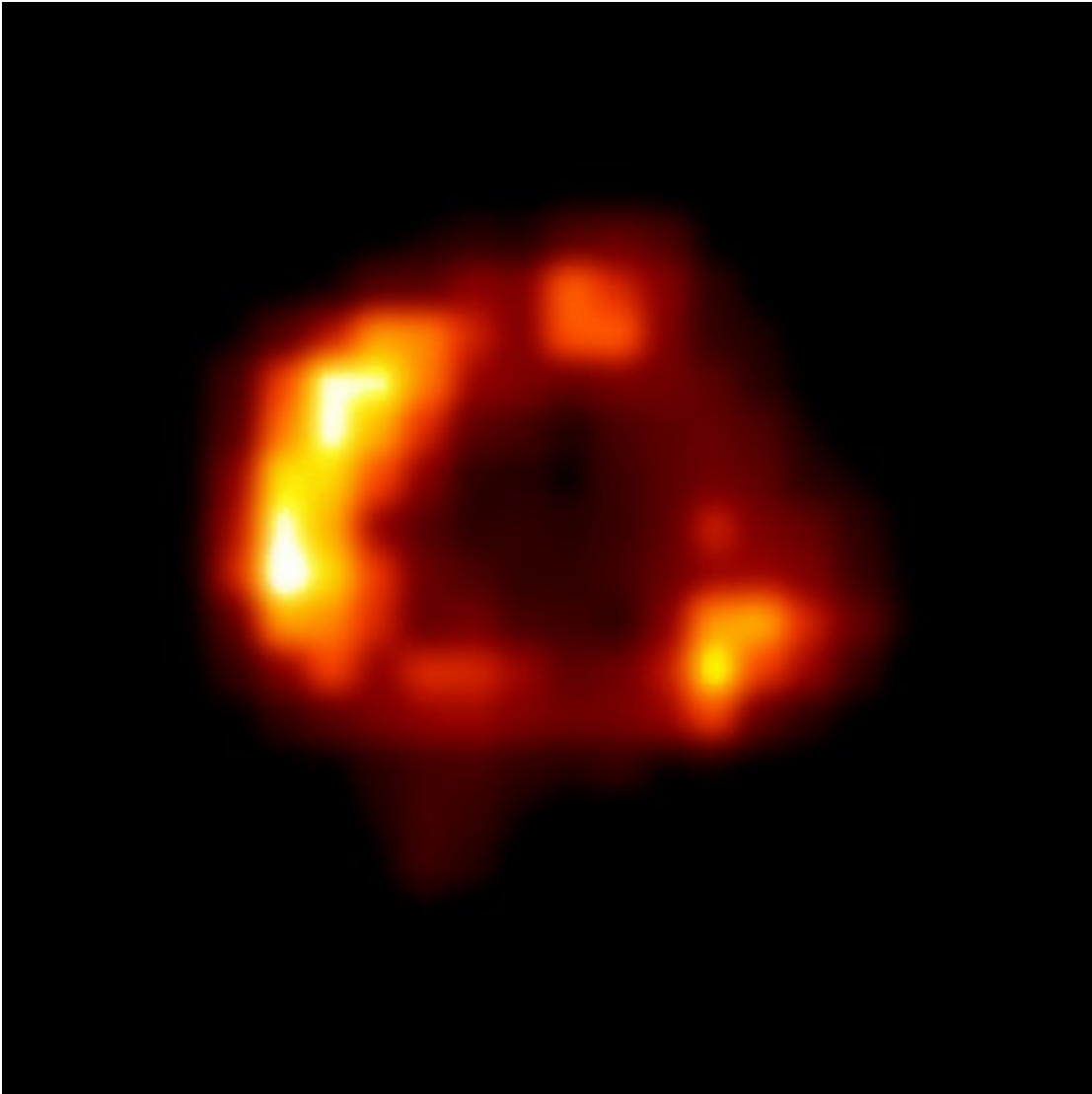
- flux des ejecta internes remonte à nouveau à partir de 13.5 ans
- signe d'une énergie rajoutée



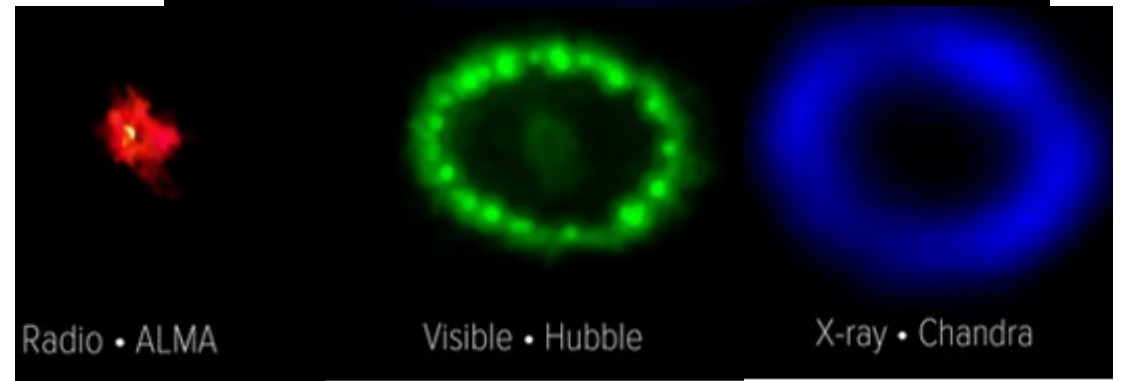
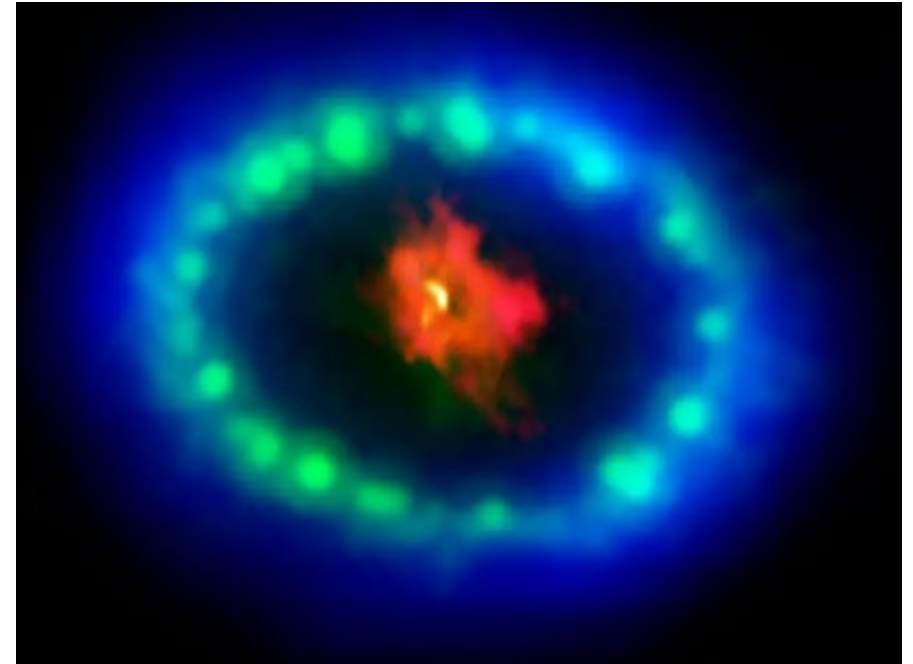
Anneau éjecté 20 000 ans avant SN



# Supernova 1987A par Chandra en 2010, ALMA en 2014

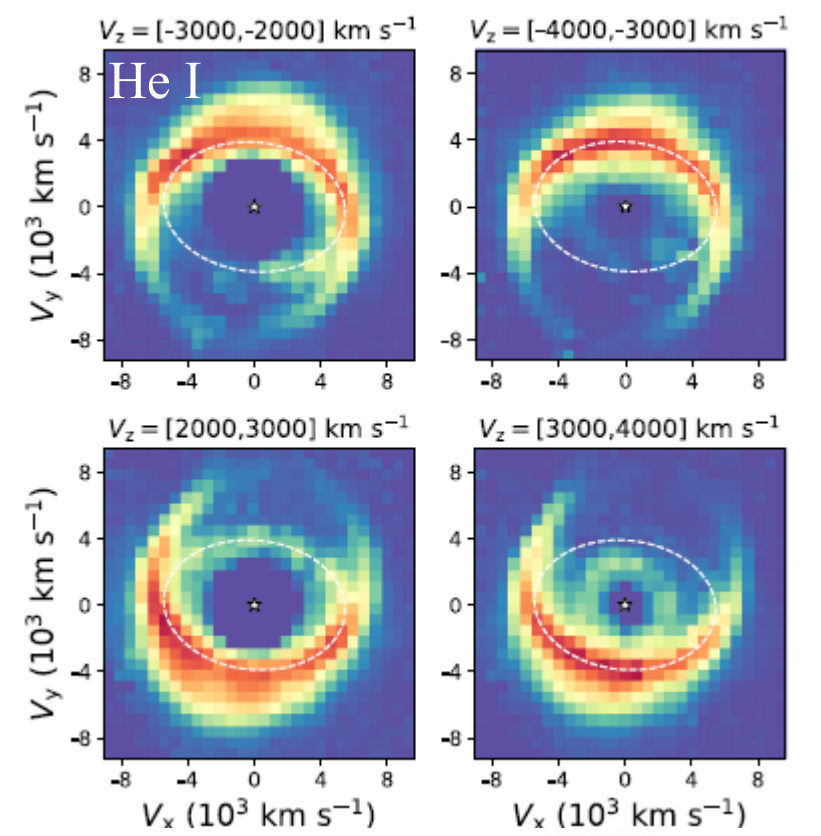
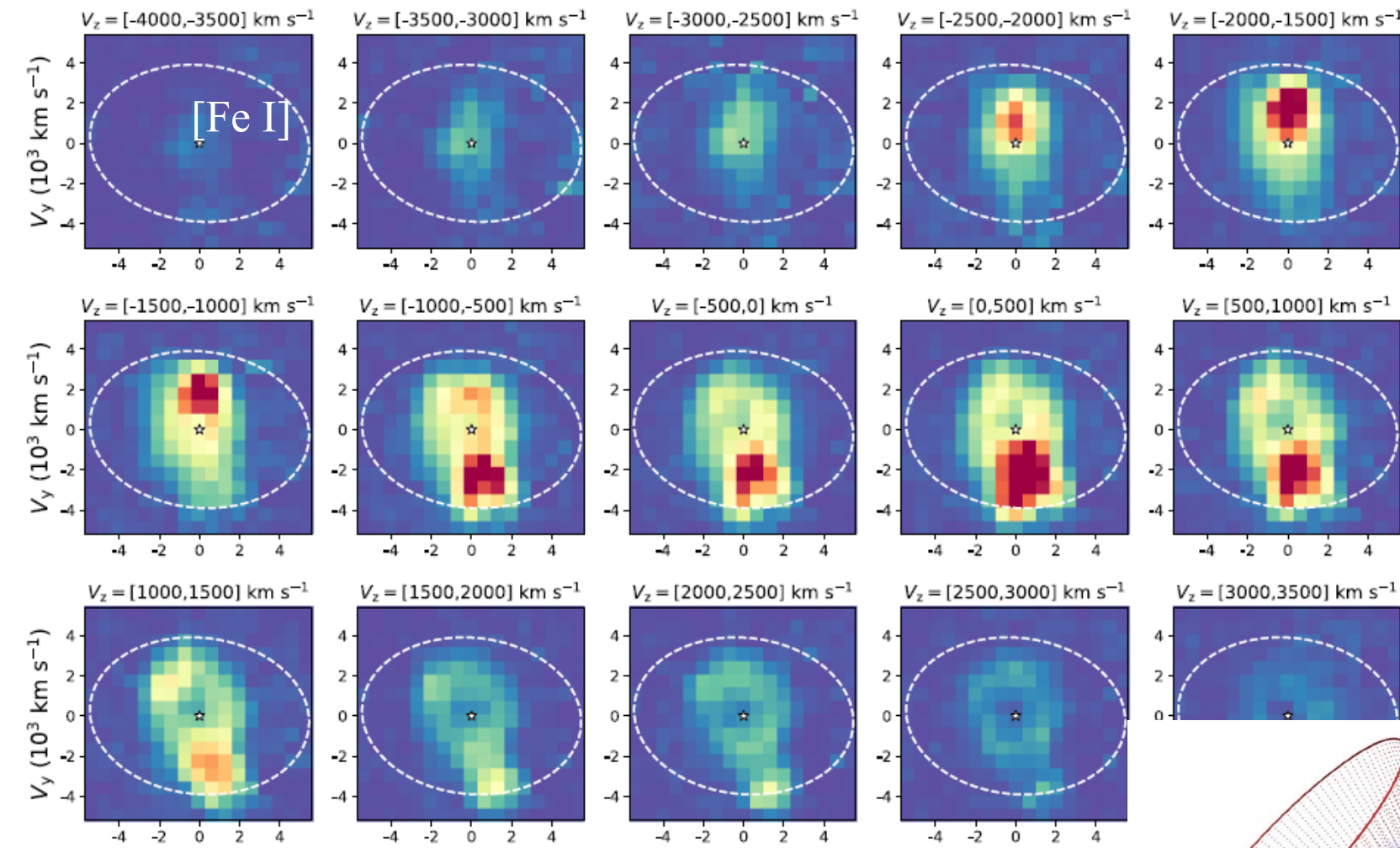


poussière  
CO, SiO  
HCO+  
SO



*Indebetouw et al 2014*

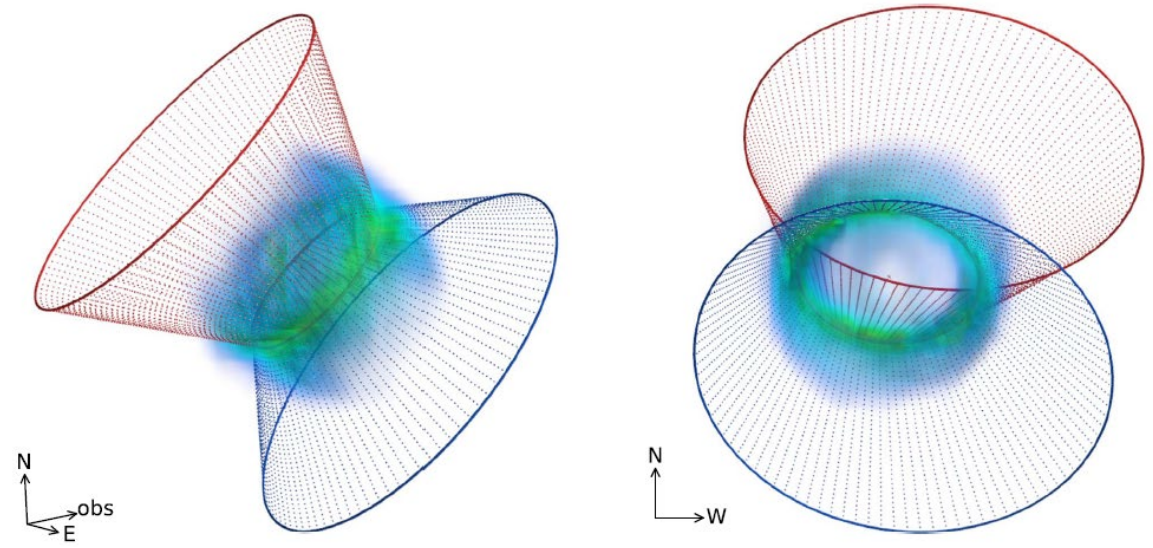
Les ejecta /ondes de choc rencontrent l'anneau et produisent un rayonnement X intense<sup>11</sup>



Ejecta à  $\pm 4000 \text{ km/s}$ , raie du [Fe I]

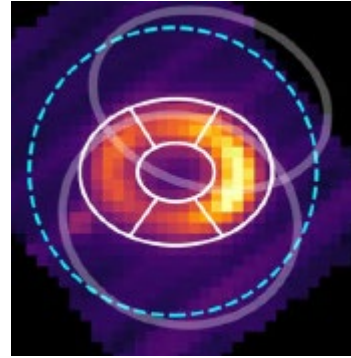
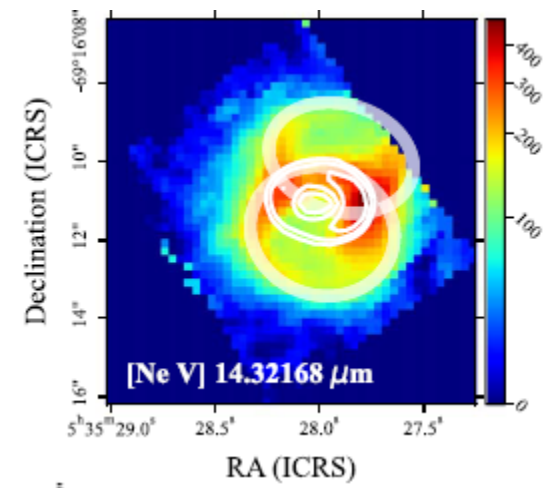
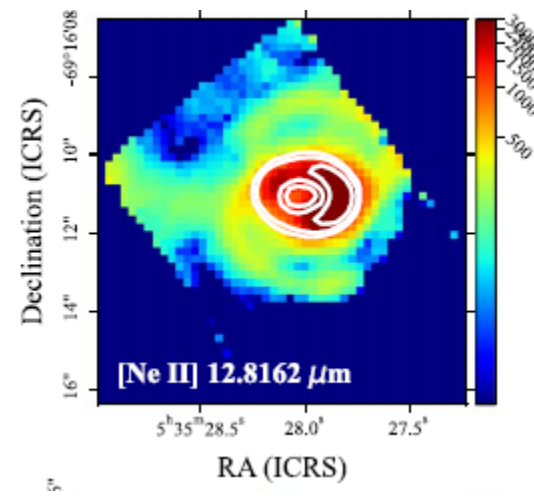
Choc en retour, dans la raie He I  
en forme de bulle, angle  $45^\circ$

*Larsson et al 2023*



# SN1987A en Infrarouge avec JWST

- Emission IR clairement différente
    - [Si I]+[Fe II] concentrées
    - Optique (H $\alpha$ ) dans une ‘coquille’
    - NeII, NeV dans les anneaux externes
  - Différentes sources d’énergie
  - [FeII] T=qqq 100K dans le centre
- chauffé par  $^{44}\text{Ti}$  radioactif
- [NeII] ejecta par les X et les chocs (2300km/s), H2 excité par UV

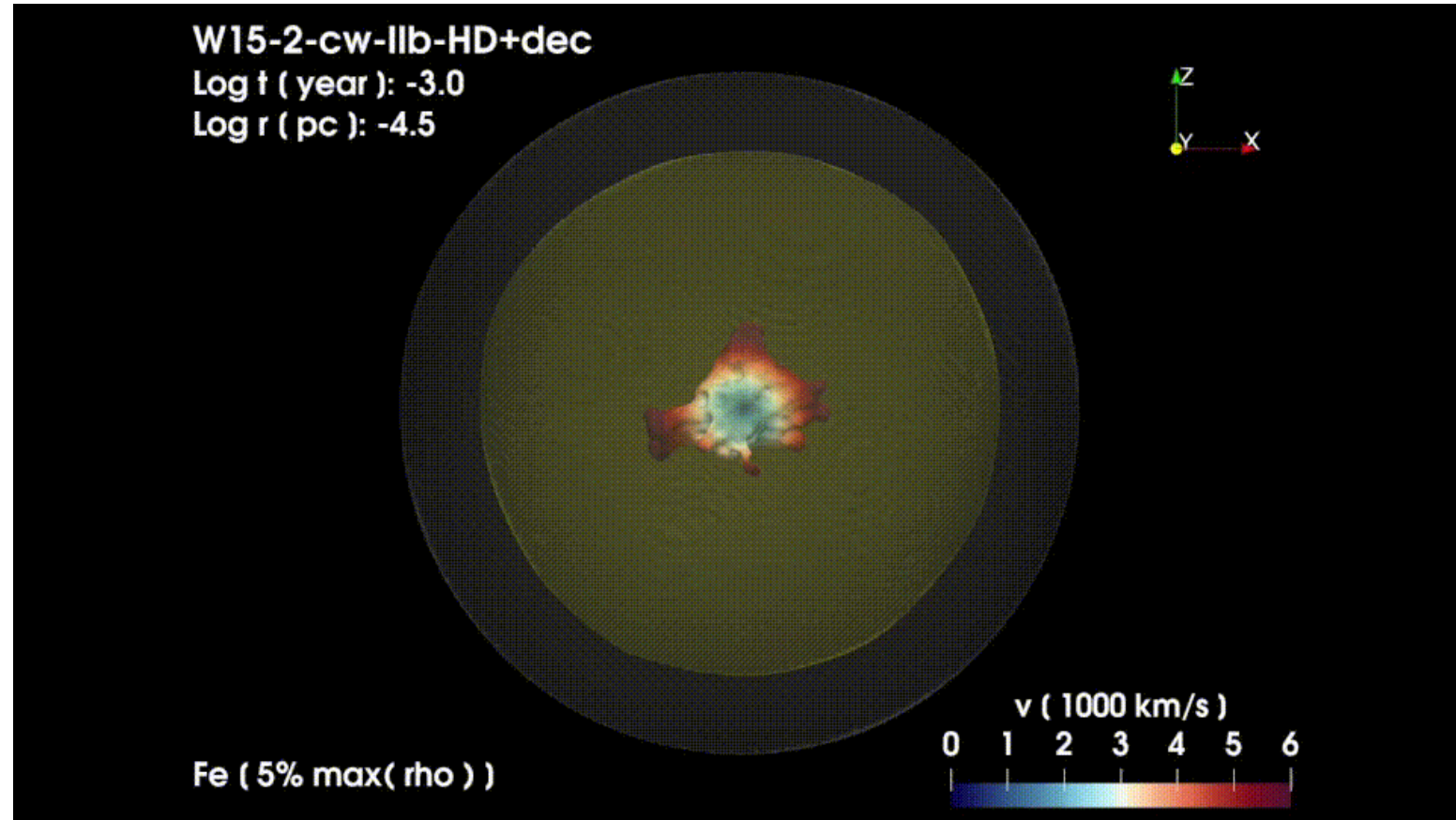
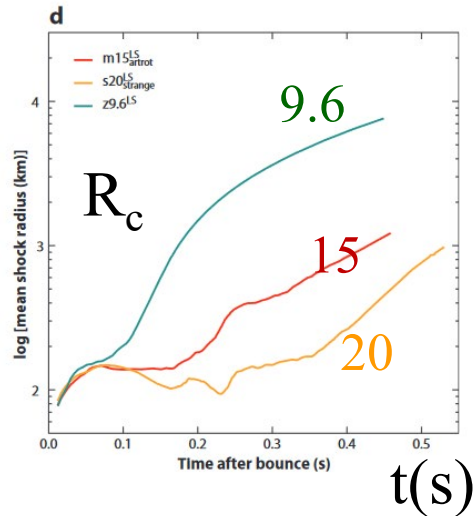
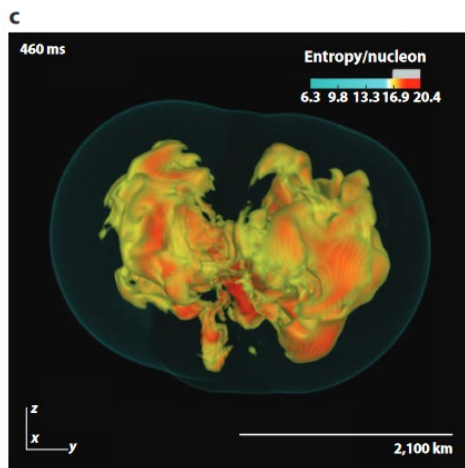
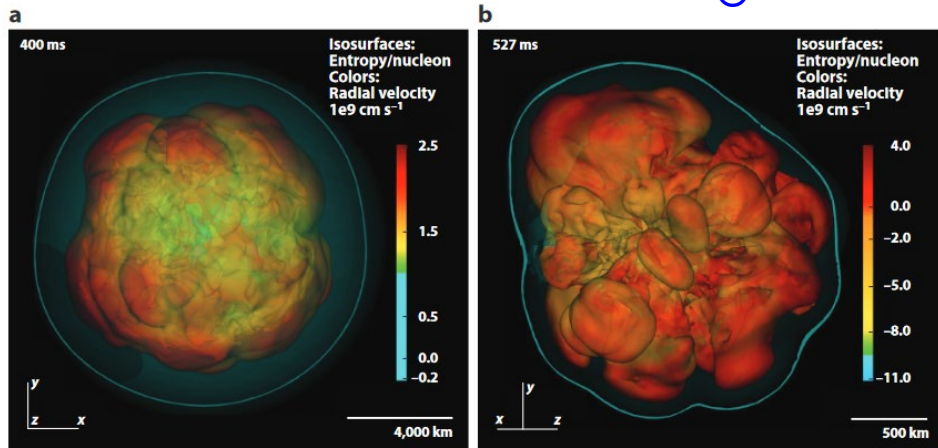


# Simulations 3D de l'explosion

Turbulence 3D permet de transférer E  
Grandes  $\rightarrow$  petites échelles (pas 2D)

9.6M $\odot$

20M $\odot$

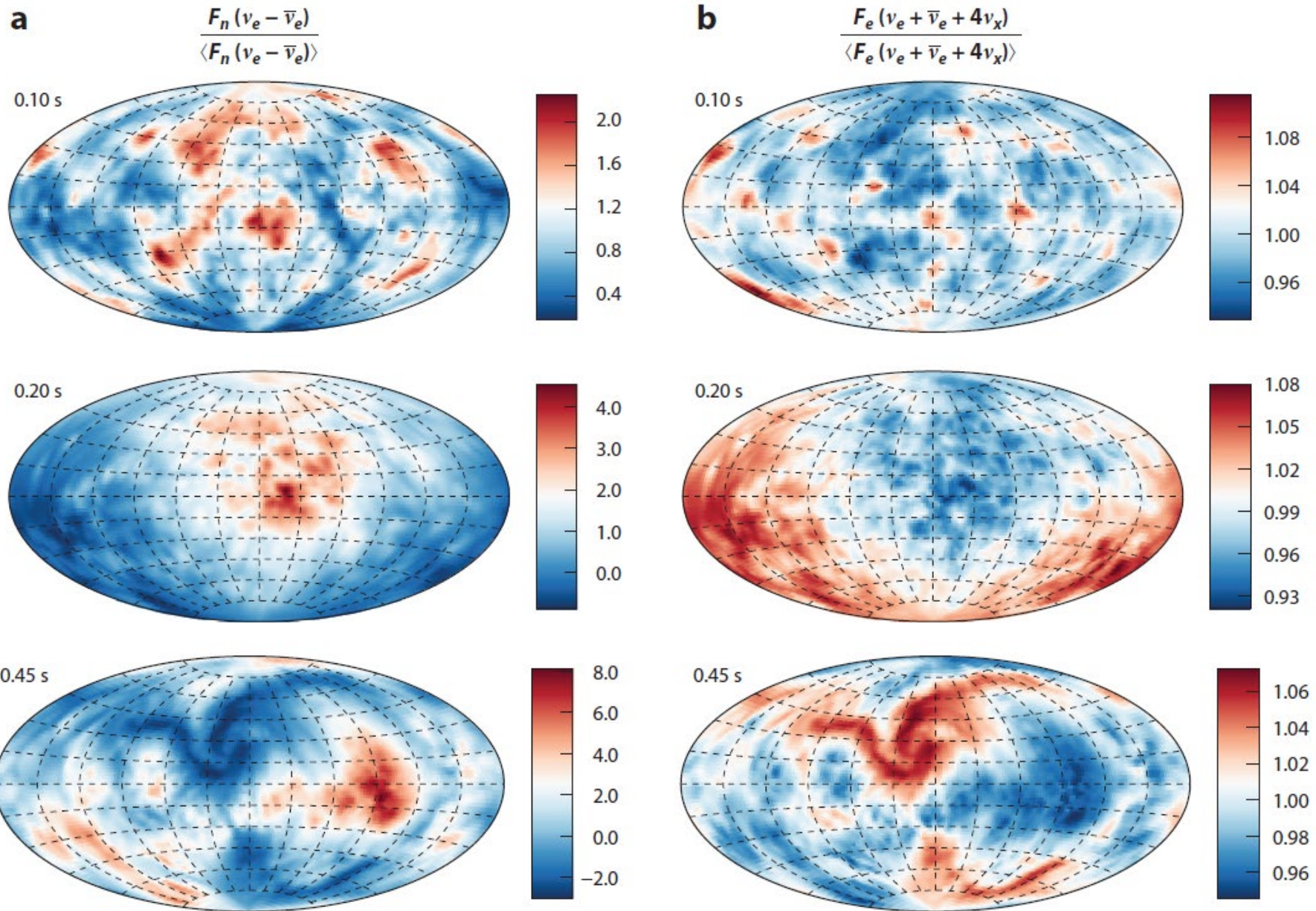


Cassiopeia A SN II (340 ans, SN1680?)

Rotating 15M $\odot$

*Janka et al 2016*

# Emission de lepton



Asymétrie dans le Flux=  $\nu_e - \bar{\nu}_e$

Convection turbulente engendrée par les  $\nu$

Nombre leptonique varie de facteur 4-8

Energie totale qqes %

Nombre leptonique

Energie totale

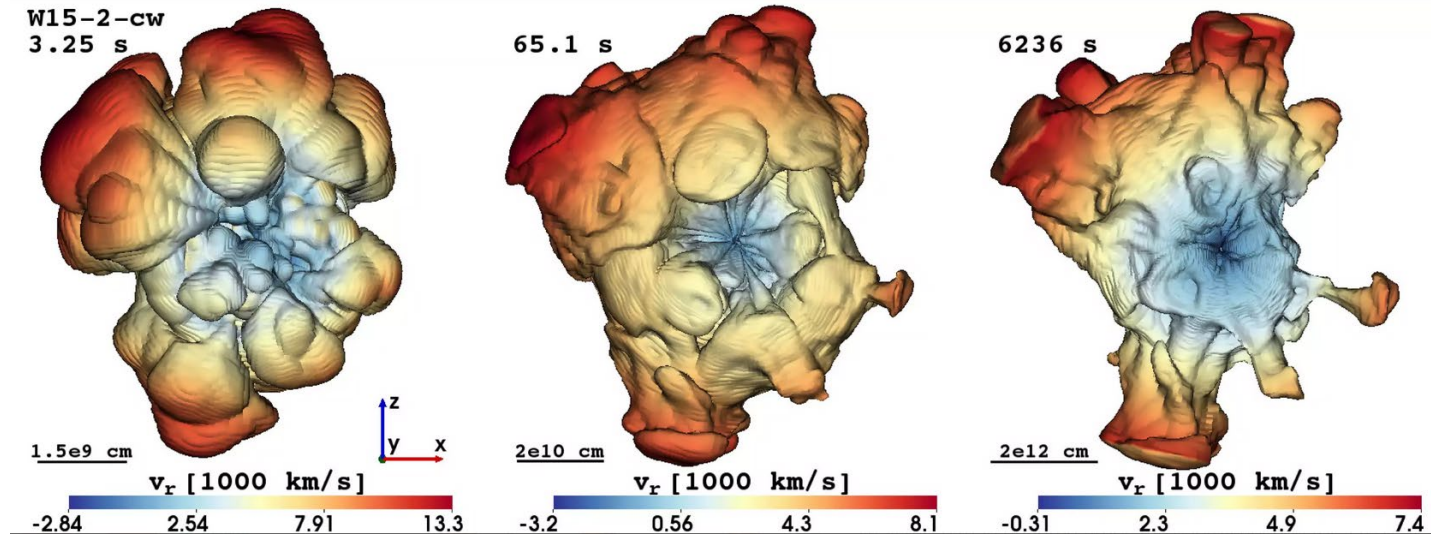
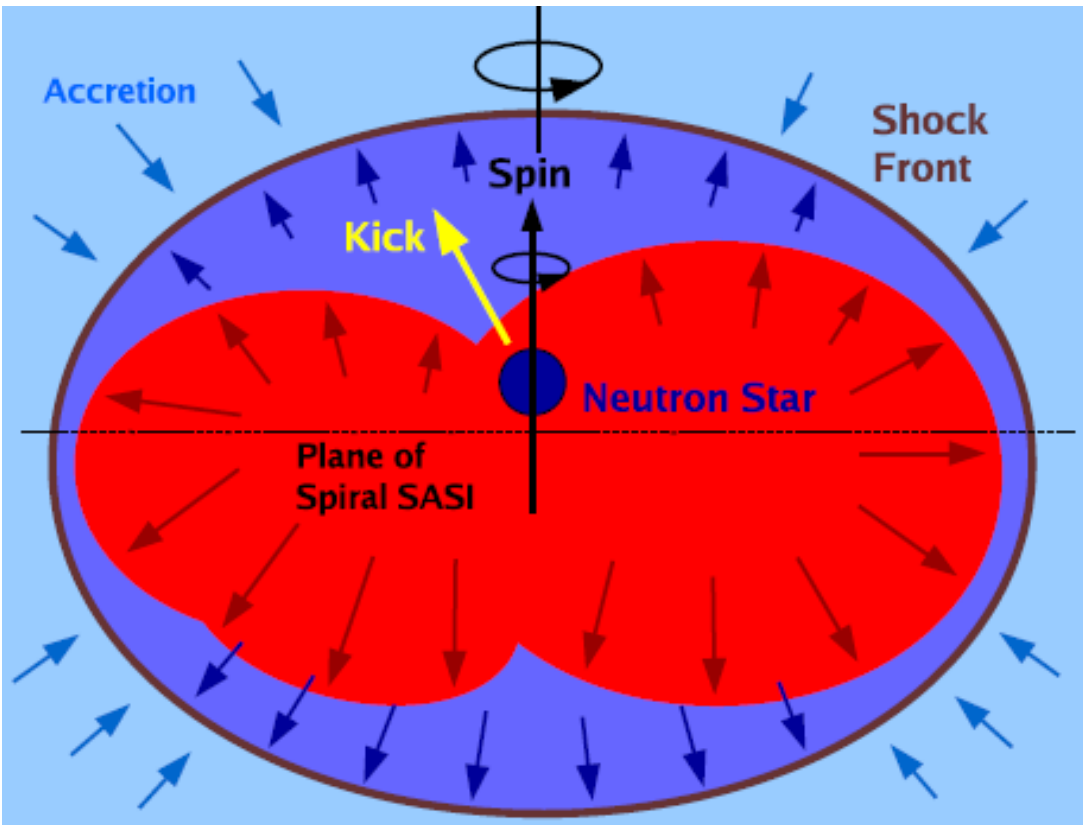
Projection Mollweide

*Janka et al 2016*

# Explosion asymétrique, et impulsion sur les objets compacts

SASI: standing accretion shock instability

→  $V \sim 1000 \text{ km/s}$



Evolution du  $^{56}\text{Ni}$  radioactif, après l'explosion enclenchée par les neutrinos 3.35s → 6236s  
99% de l'énergie dans les  $\nu$   
Formation de  $^{56}\text{Ni}$ ,  $^{44}\text{Ti}$

Les neutrinos en ébullition

→ asymétrie

Couleurs = vitesses

*Janka 2017*



# Cassiopeia

Asymétries des ejecta et  
vitesse par rapport au milieu

Bleu  $^{44}\text{Ti}$

Orange Fe

$^{56}\text{Ni} \rightarrow ^{56}\text{Co} \rightarrow ^{56}\text{Fe}$

$Z=28, 27, 26$

Désintégrations  $\beta^+$



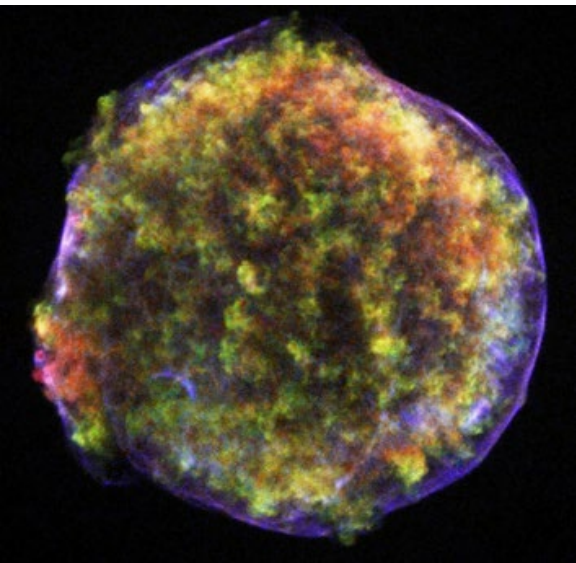
Direction de la vitesse  
de l'étoile à neutrons

# Fréquence des supernovae

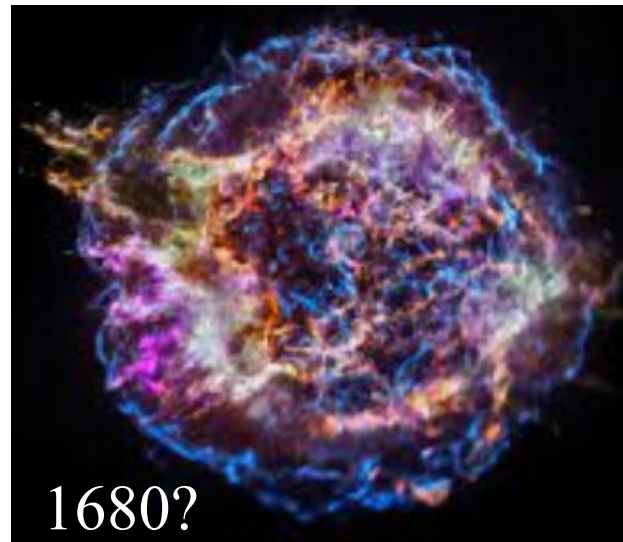
1-2 par siècle dans la Voie lactée:  
la dernière celle de Kepler SN 1604

Type SN Ia

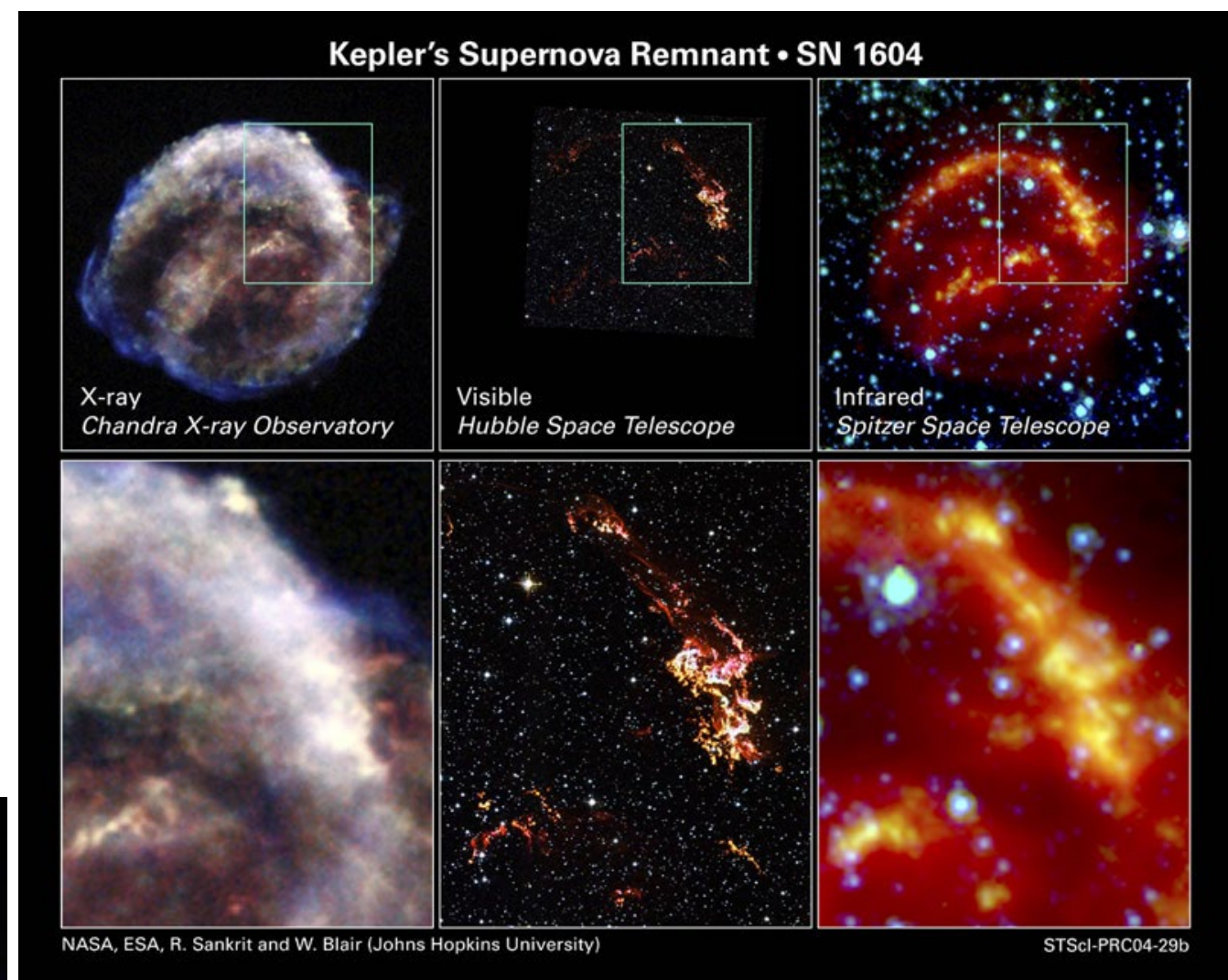
SN1572 Tycho, SN Ia



CAS-A SN II



1680?



Seulement 5 observées dans l'histoire  
SN1006 (Ia), SN1181 (Ia), **Crabe**, Tycho, Kepler

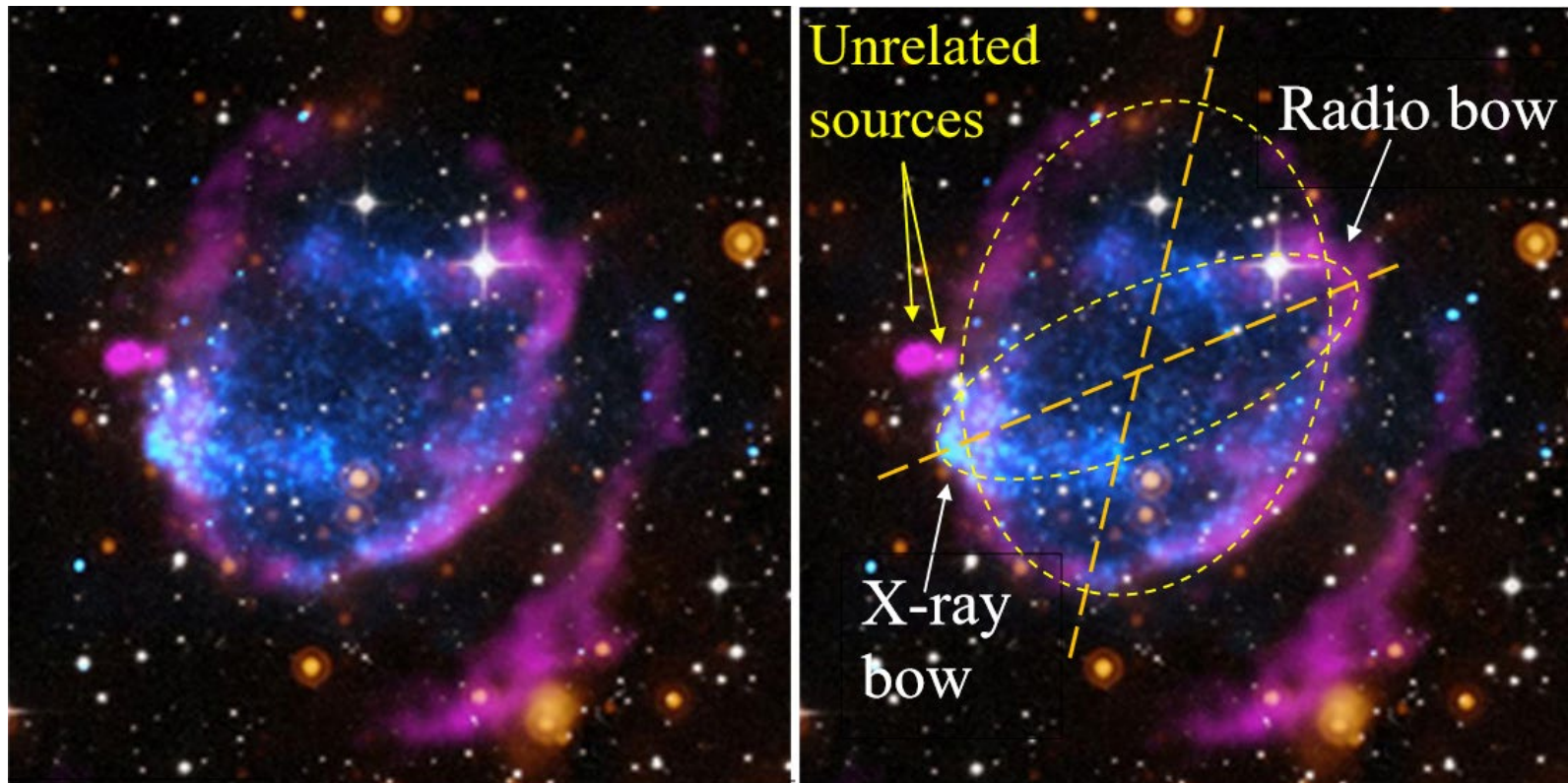
# SN Ia à l'intérieur d'une nébuleuse planétaire

SNIP: Supernova Inside Planetary nebula: SNR G352.7-0.1

Fusion d'une naine blanche avec le coeur de l'étoile compagne → étoile à neutron

Peut apparaître comme SN-Iip (H dans l'enveloppe)

$M = 5-6 M_{\odot}$ , et  $M = 4-5 M_{\odot}$



Peut-être une 3eme étoile pour justifier de l'asymétrie?

Bleu: rayons X

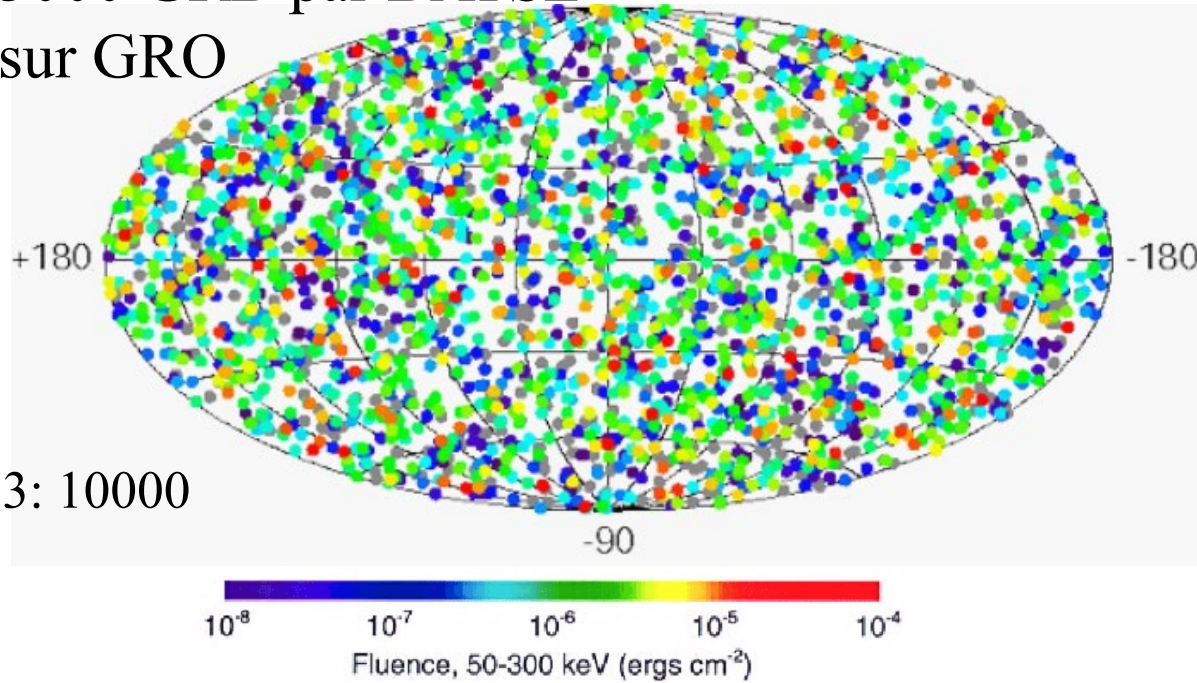
Rose radio

→ Trou noir final

*Soker 2024*

# GRB: Gamma-ray Bursts

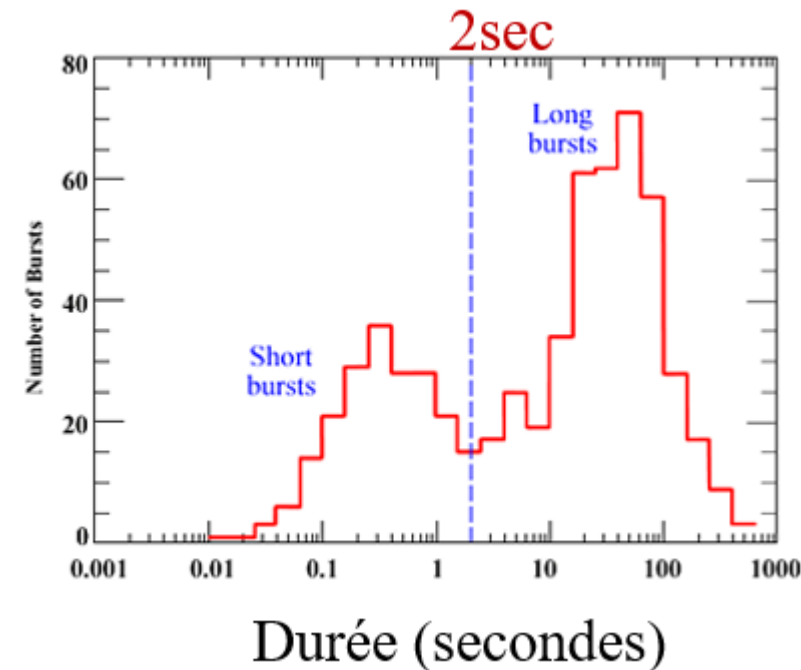
3000 GRB par BATSE  
sur GRO



2023: 10000

Les GRB sont les explosions les plus puissantes du ciel (Dec 1967 → compris 30 ans)  
La luminosité des « afterglows » dépasse celle des supernovae → hypernovae  
100-1000 fois plus de SN que de GRB

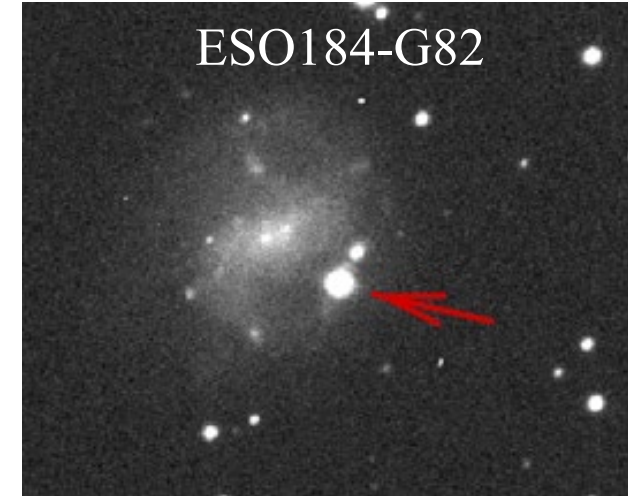
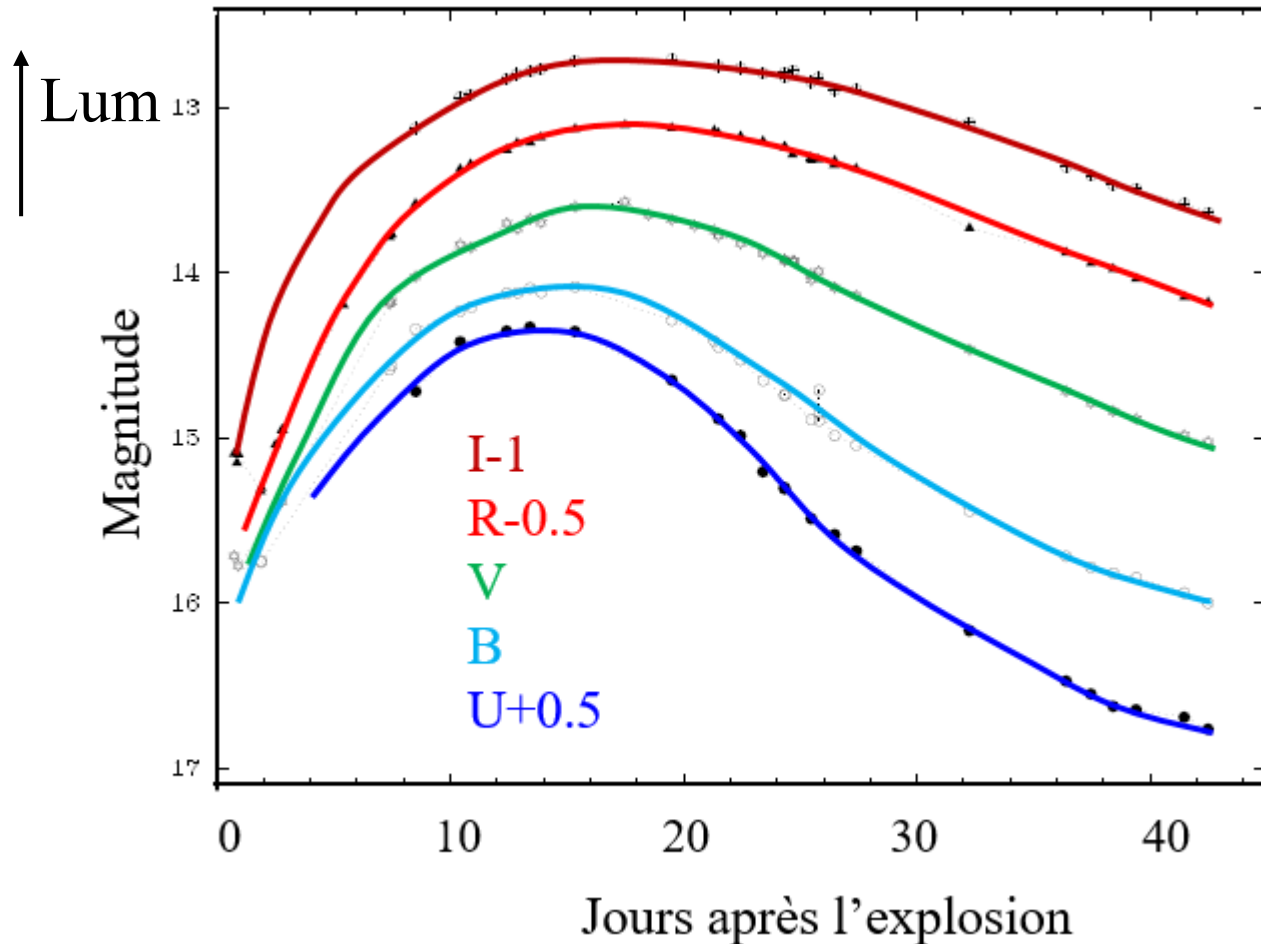
- **GRB longs:** effondrement d'une étoile géante  
→ formation d'un trou noir ou d'une étoile à neutrons
- **GRB courts:** fusion de deux étoiles à neutrons binaires



# Identification avec SN1998bw

ESO184-G82, redshift  $z = 0.00856$

Galaxie proche  $V=2550$  km/s



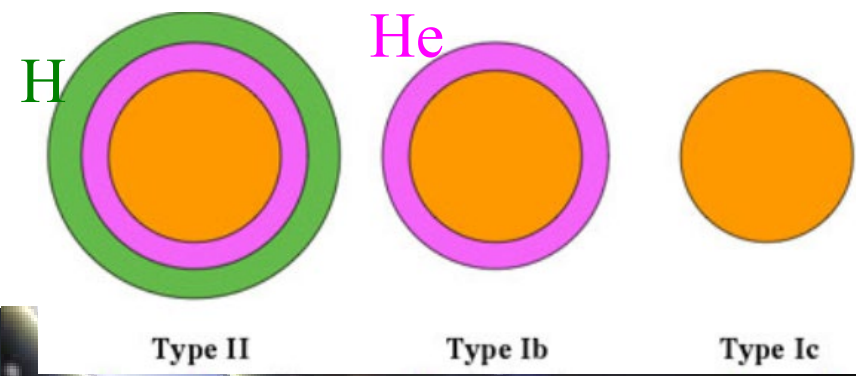
Première coïncidence  
Preuve qu'un GRB long  
peut-être dû à une SN  
Radio: électrons relativistes

Détection par BeppoSAX

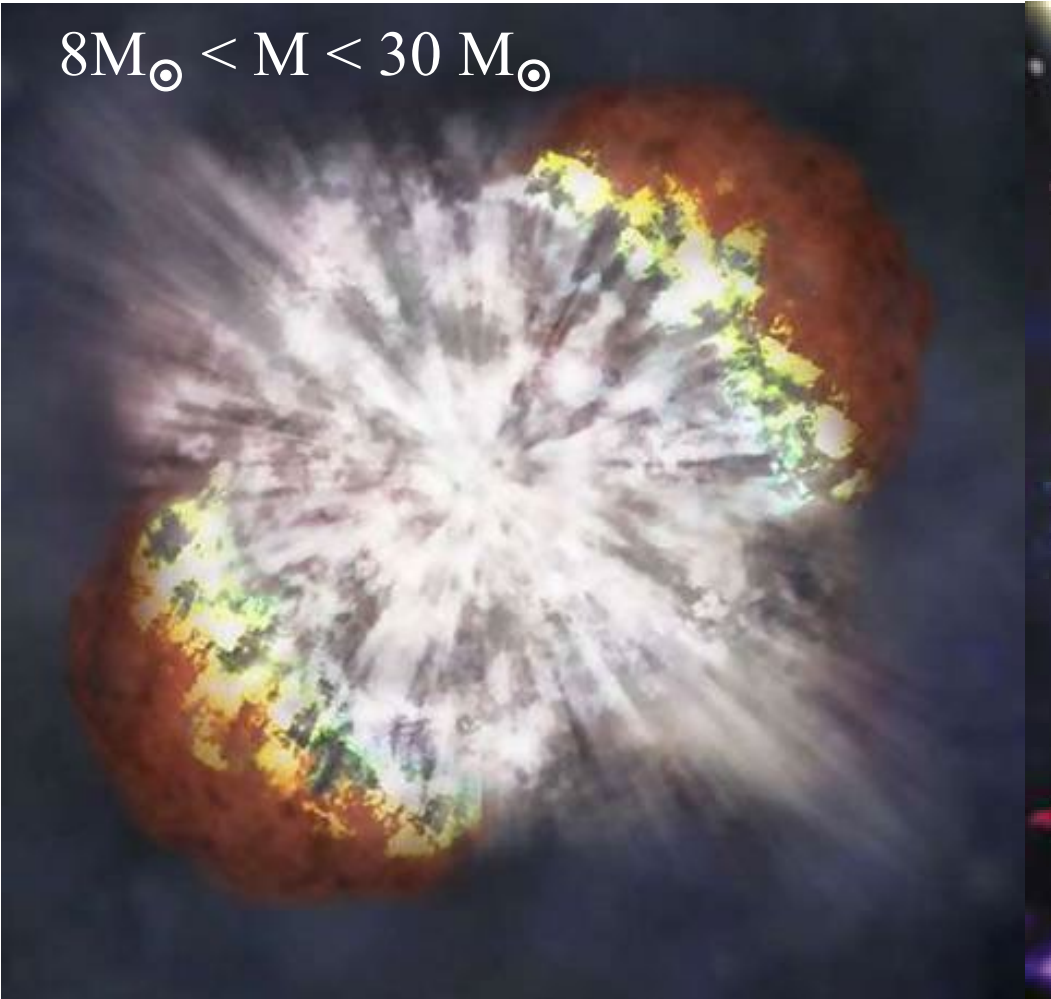
*Galama et al. 1998*

Collapsars: SNII (Crabe),  
mais aussi SNIb, SNIc

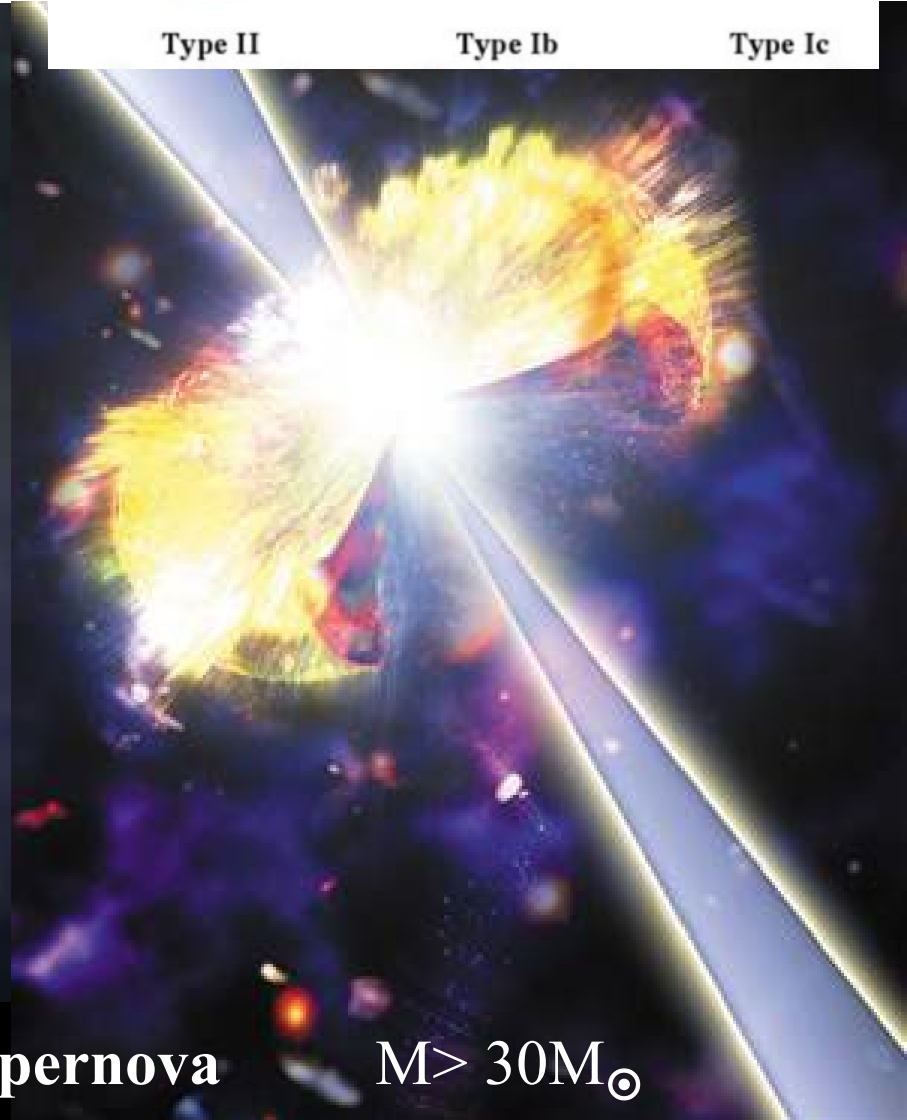
## Selon la masse



$8M_{\odot} < M < 30 M_{\odot}$



**Supernova**



**Hypernova**

$M > 30M_{\odot}$

PISN  
 $M > 70M_{\odot}$

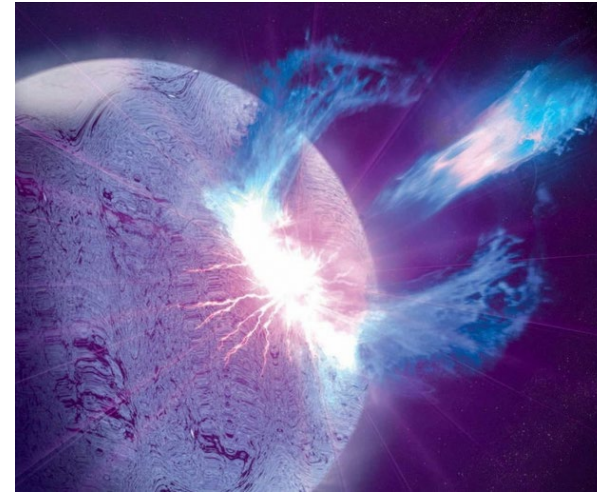
# Quelques GRB répéteurs

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

Les magnétars ont des sursauts géants (MGF Magnetar Giant Flare)

Lorsque le champ B intense perce la croûte

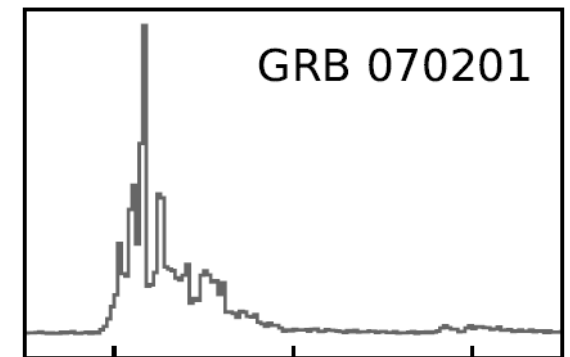
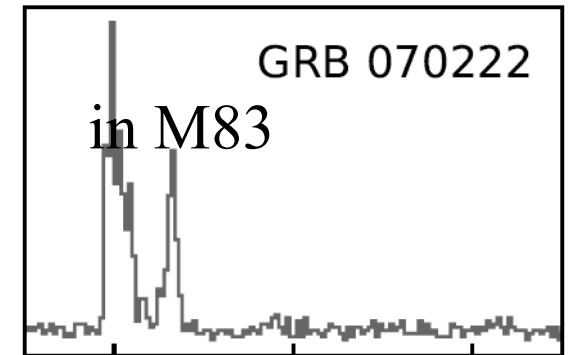
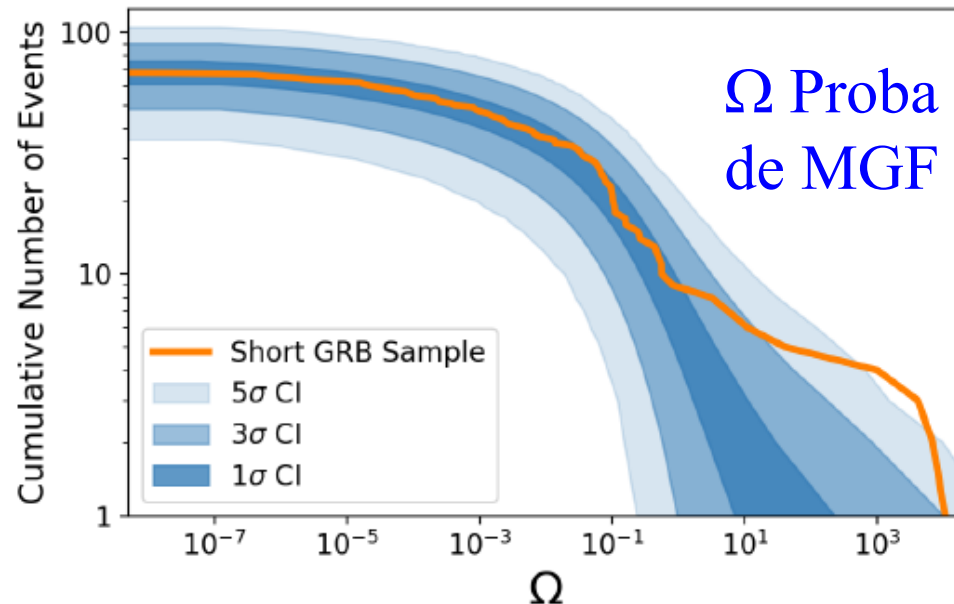
GRB070222 prototype + 4 locaux (<5 Mpc)



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

→ les plus abondants!

Des GRB qui ne sont  
Ni des collapsars  
Ni des mergers de NS



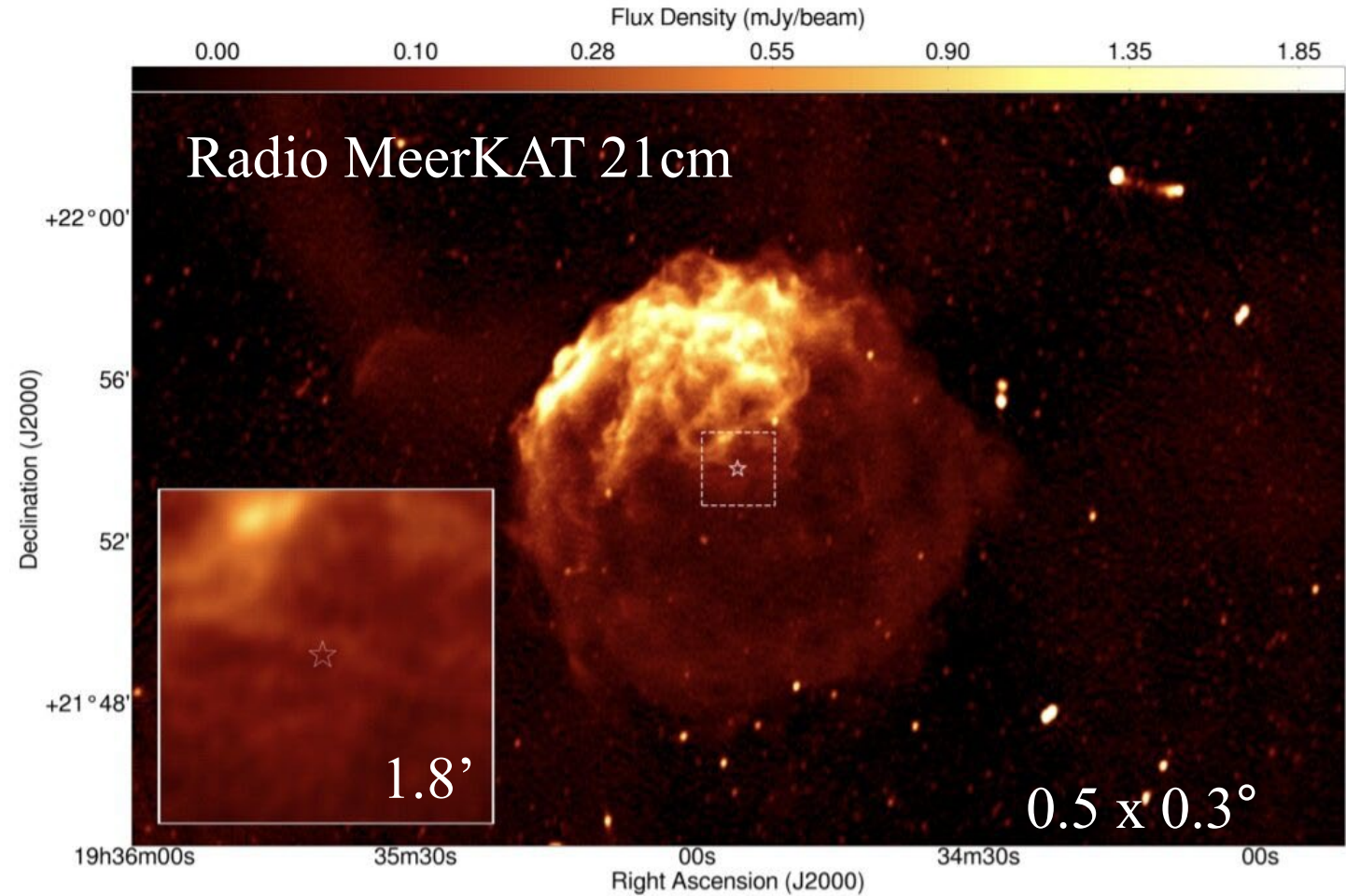
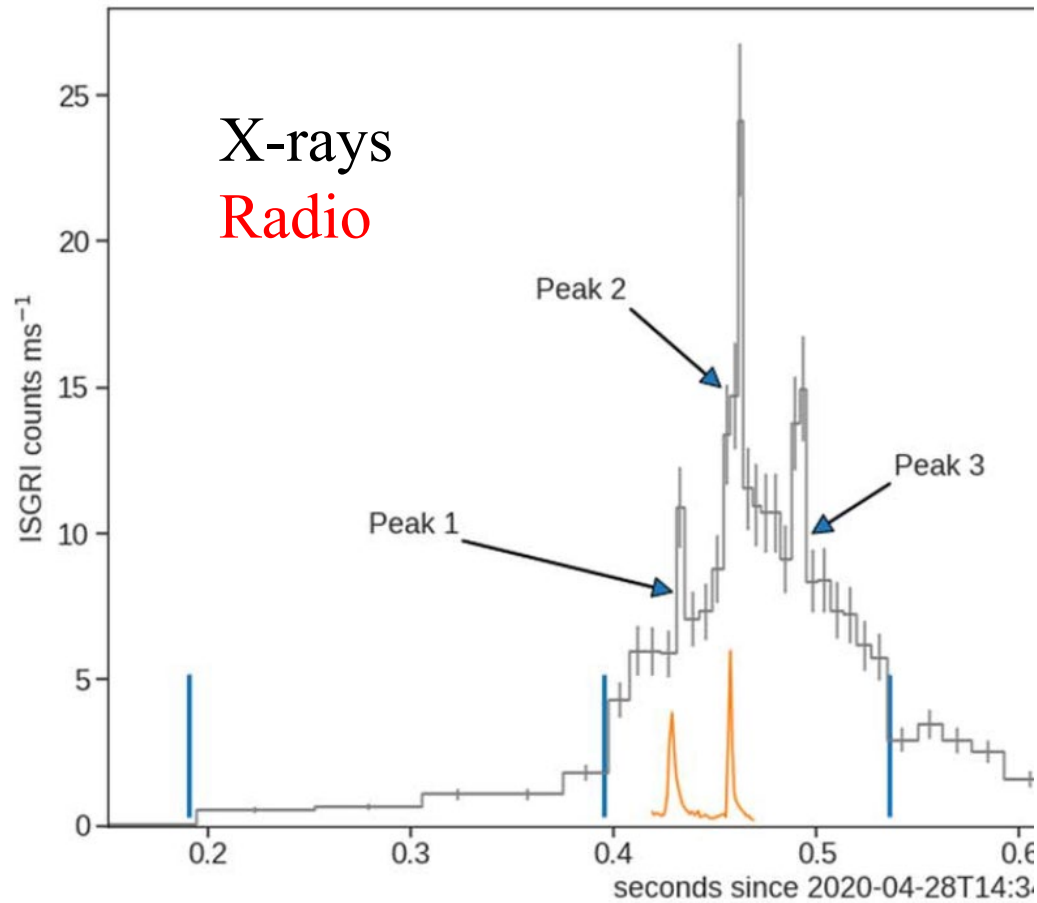
Temps (sec)

Burns et al 2021

# SGR1935+2154 = SNR G57.2+00.8

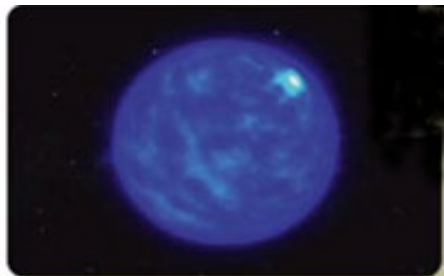
Répéteur GRB dans notre Galaxie  
De plus sursaut Radio (FRB),  $D=12.5\text{kpc}$

Magnétar (pulsar 3.2s) au centre d'une nébuleuse  
de supernovae, âge 3600 ans,  $B=2.2 \cdot 10^{14} \text{ G}$

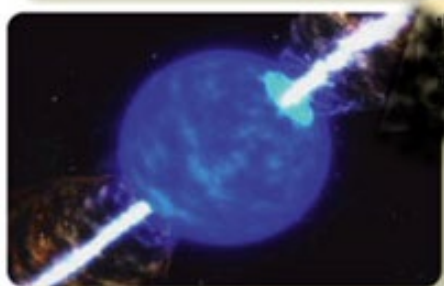




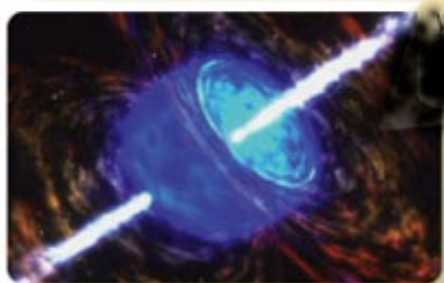
# GRB et explosion d'hypernova



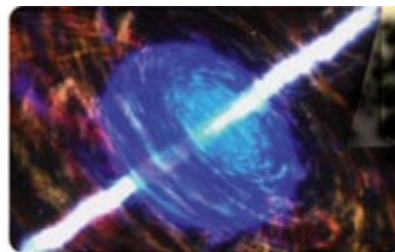
1-L'effondrement du coeur d'une étoile massive, conduit l'énergie le long de l'axe de rotation



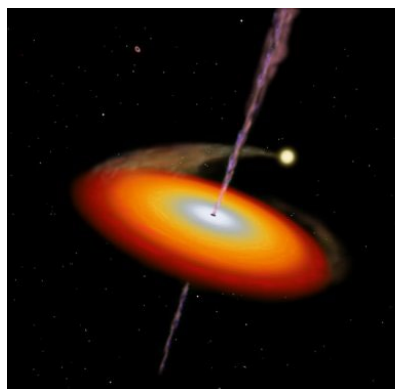
2-La rotation ralentit l'effondrement dans l'autre direction, notamment l'équateur



3-En quelques secondes, le reste de l'étoile s'effondre



4-Les jets de gaz et le rayonnement entrent en collision avec le gaz environnant,  
→ faisceaux de  $\gamma$



5-Le GRB s'éteint en qq secondes, reste un disque d'accrétion, autour d'un trou noir

# PISN: Pair-Instability SN

Masses entre 70 et 140  $M_{\odot}$ , selon le degré de rotation, ou la perte de masse

→ PISN avec pulsations, de période qqes semaines PPISN ou bien plus, énergie de  $10^{41}$ - $10^{44}$  erg/s →  $10^{11}L_{\odot}$

Il peut exister des explosions de magnétar de  $5 \cdot 10^{51}$  erg

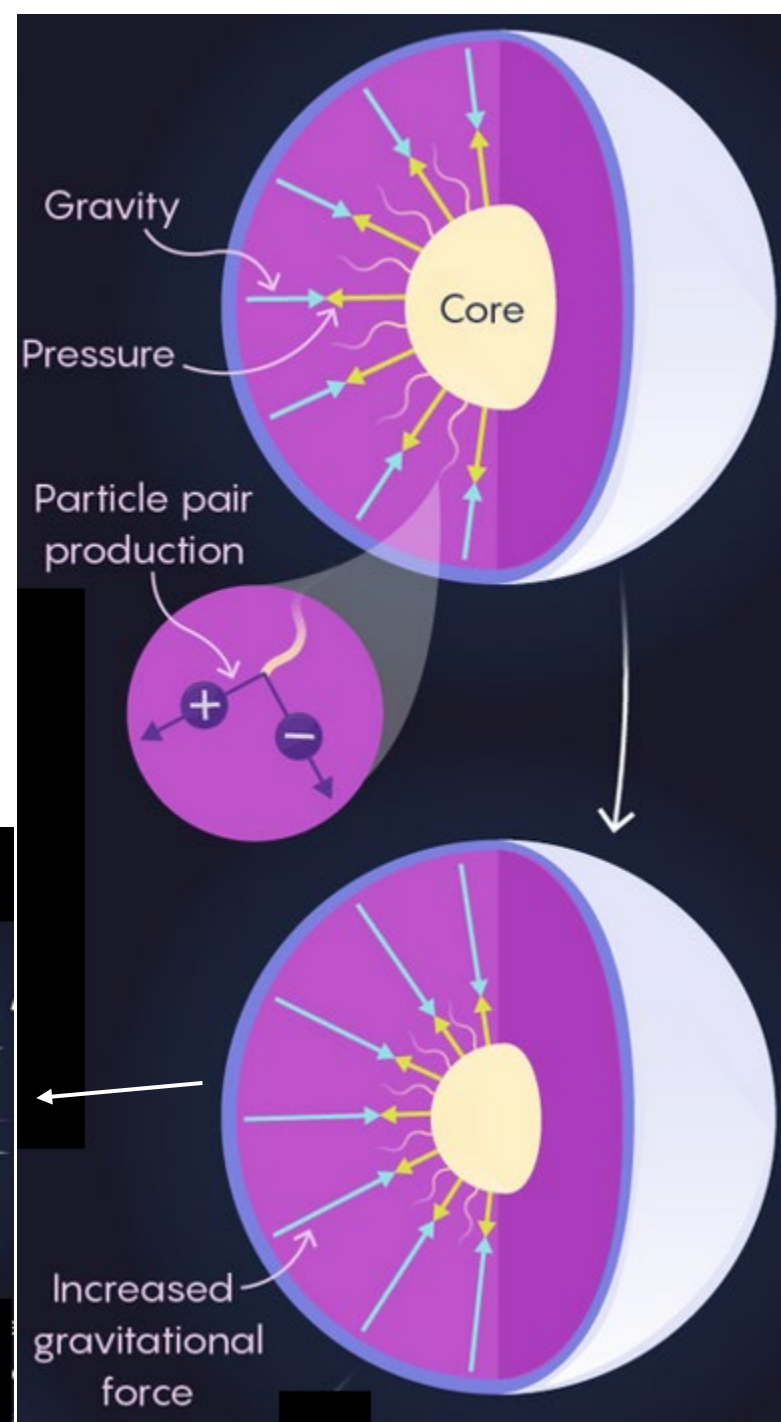
La création de paires  $e^+ - e^-$  prend de l'énergie, qui ne se trouve plus sous la forme de pression

Le cœur se contracte, brûle O, crée plus de paires, et tout s'emballe

→ Explosion de PISN

→ Pas de trous noirs entre 52 et 133  $M_{\odot}$

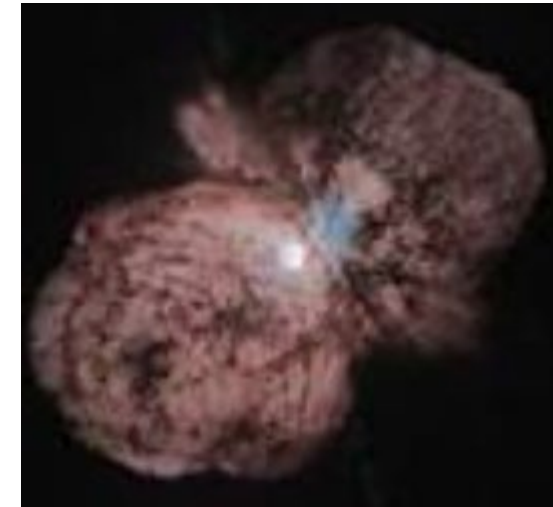
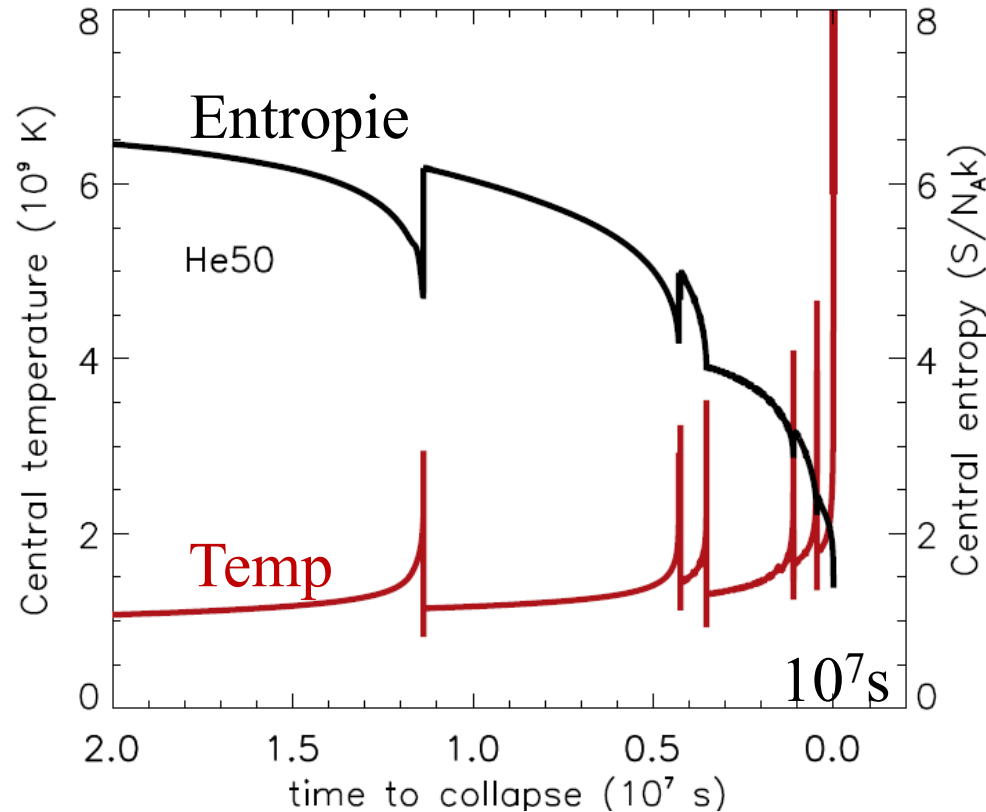
Woosley 2017



# Pulsations des étoiles très massives

Ces instabilités PPI peuvent donner lieu à des pulsations de qq heures à 10 000 ans selon la masse 30-130  $M_{\odot}$ , et le coeur d'He, C, O. A chaque cycle, l'étoile perd de l'énergie en rayonnement et neutrinos, et pourrait finir en SN avec cœur de fer, ou trou noir. La perte de masse dépend de la métallicité

L'entropie décroît (éjection de neutrinos), ce qui stabilise l'étoile



Eta Carinae  
Supergéante bleue  
120  $M_{\odot}$  → PISN?

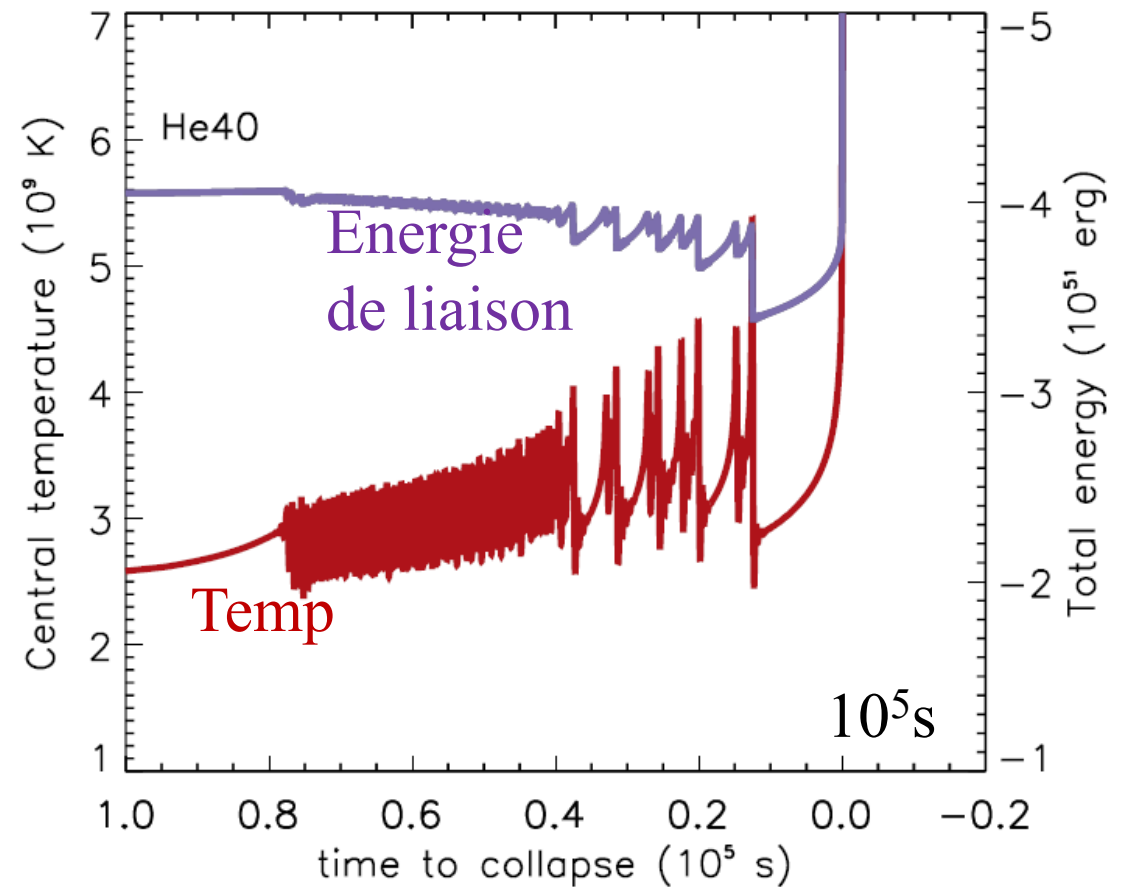
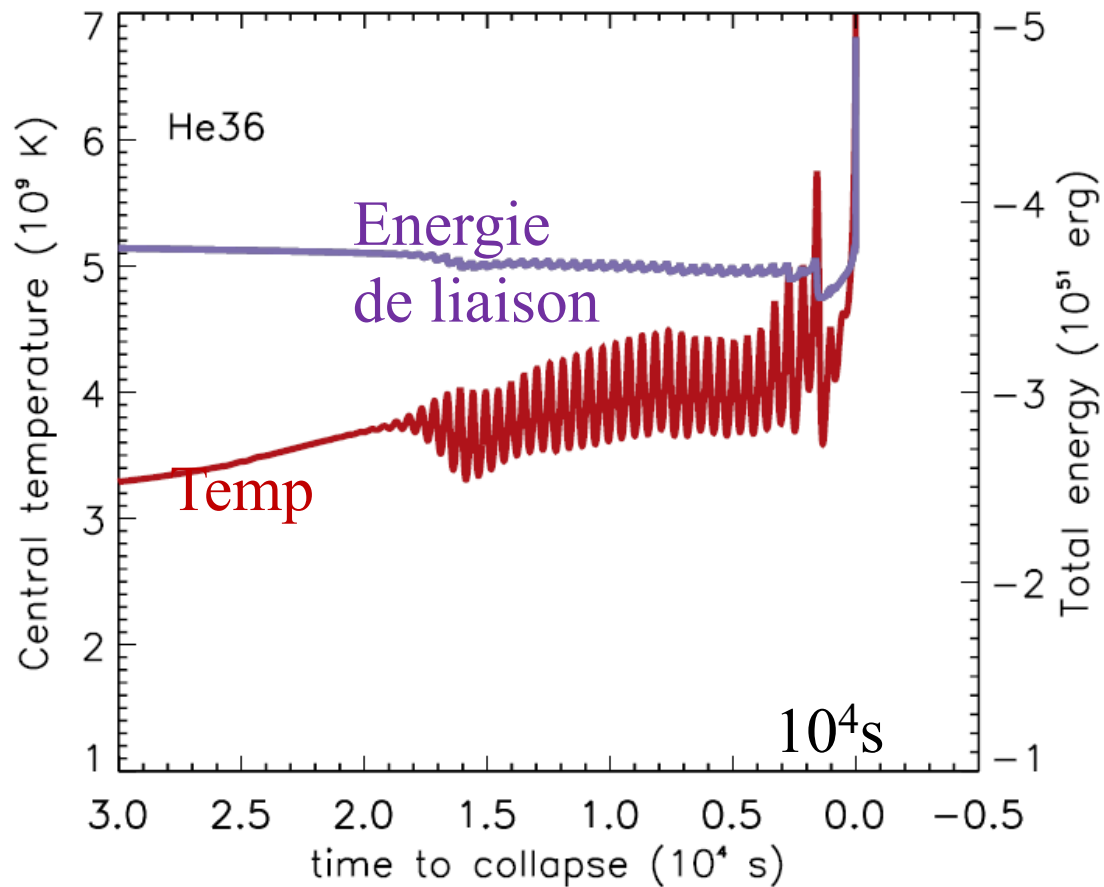
# Courtes oscillations PPI

Périodes courtes pour des coeurs d'hélium de masses plus faibles

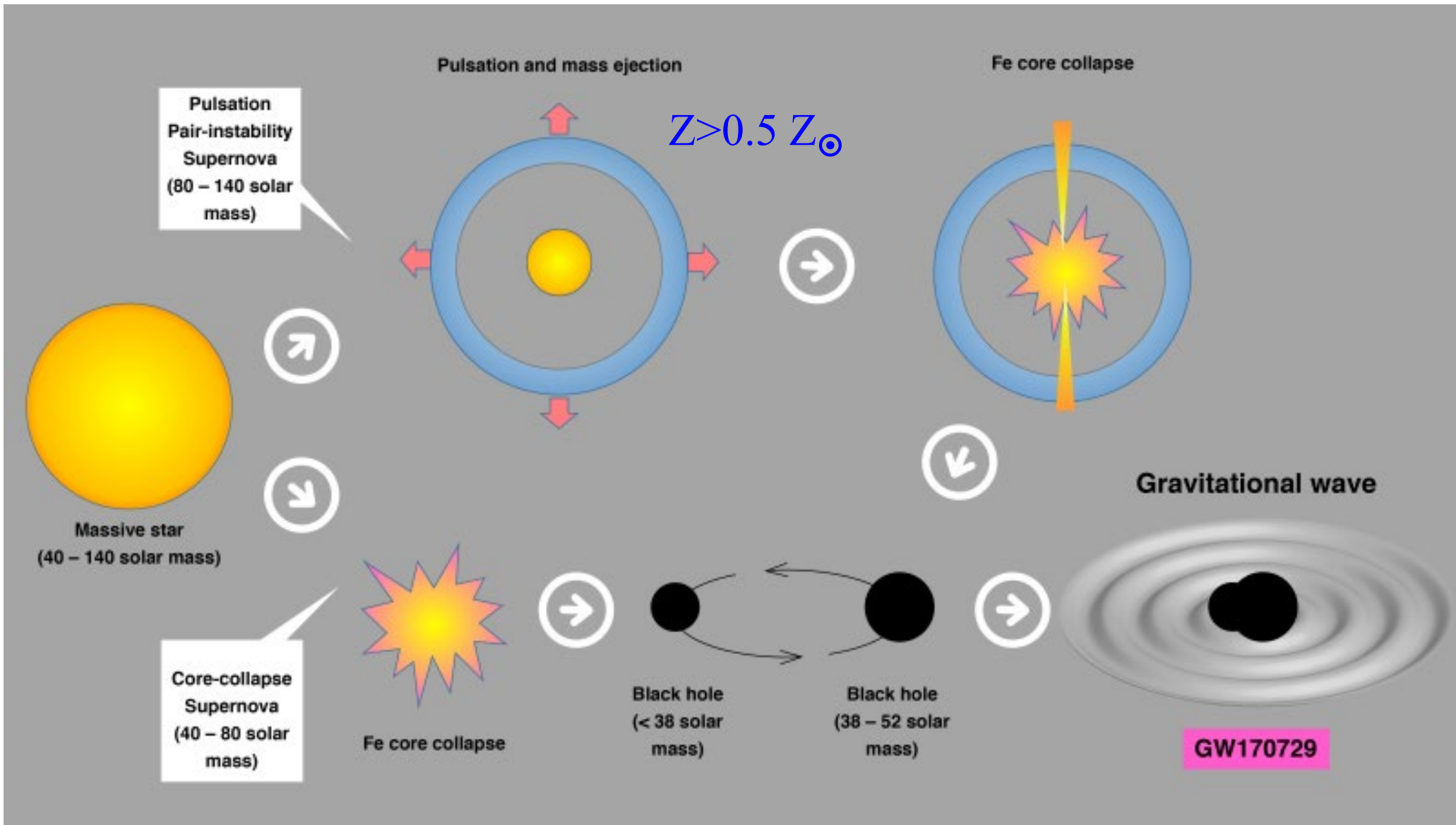
36 et 30  $M_{\odot}$   $\rightarrow$  permet d'expliquer des événements transitoires (ZTF, LSST)

GW 150914 2 trous noirs 36 et 29  $M_{\odot}$  (avec rotation?)

Trou noir



# Trous noirs binaires massifs $M < 50 M_{\odot}$

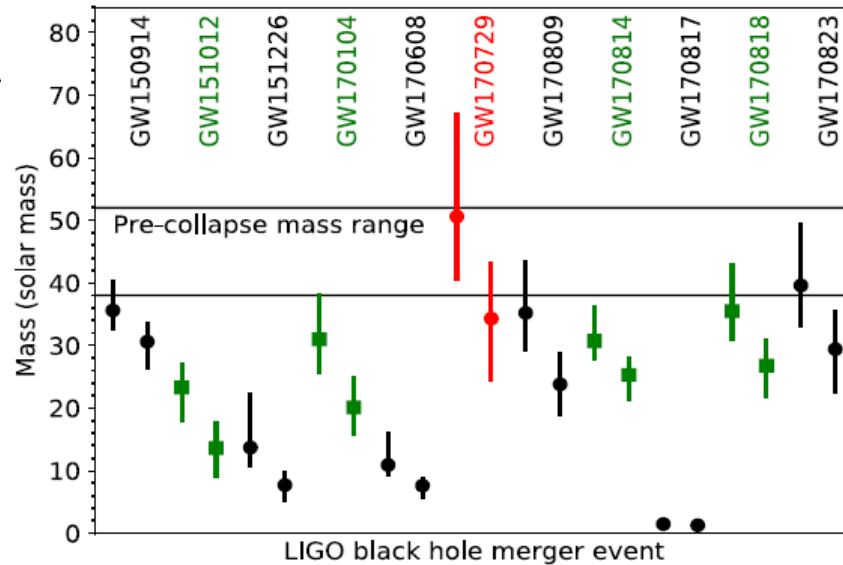
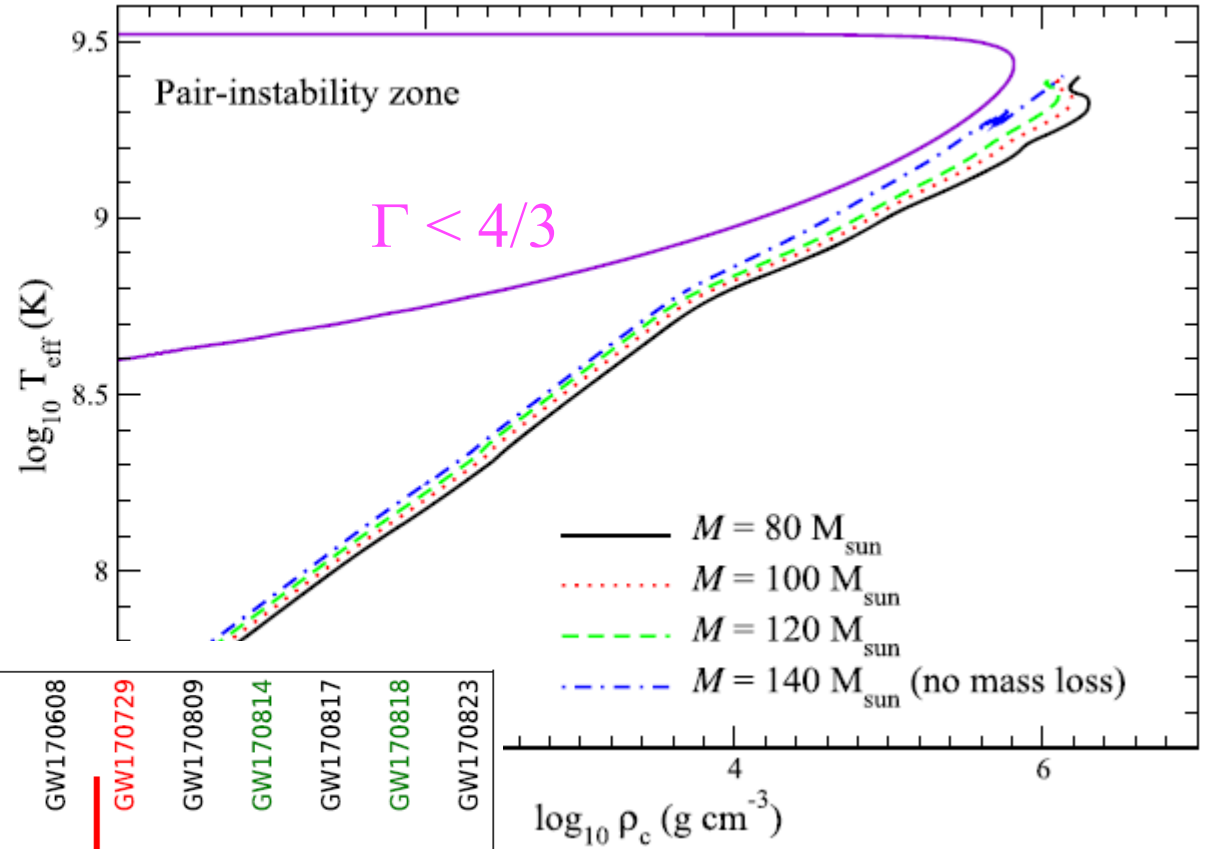
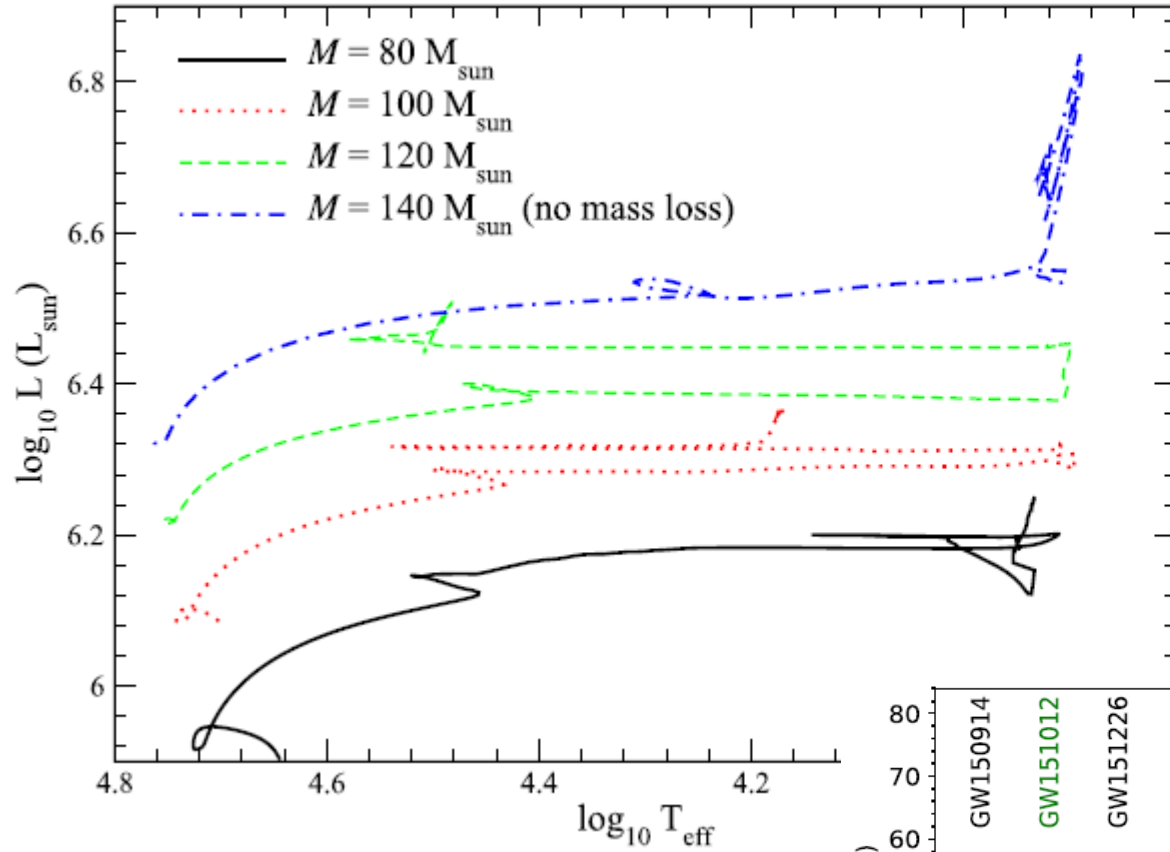


PPI dès  $40M_{\odot}$   
de coeur He

Les PISN  
massives  
requièrent  
 $Z < 0.5 Z_{\odot}$

*Leung et al 2019*

# Positions dans le diagramme HR, et $\rho$ -T

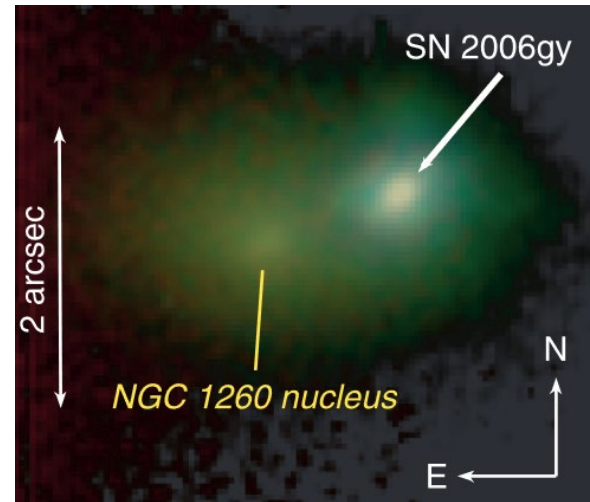
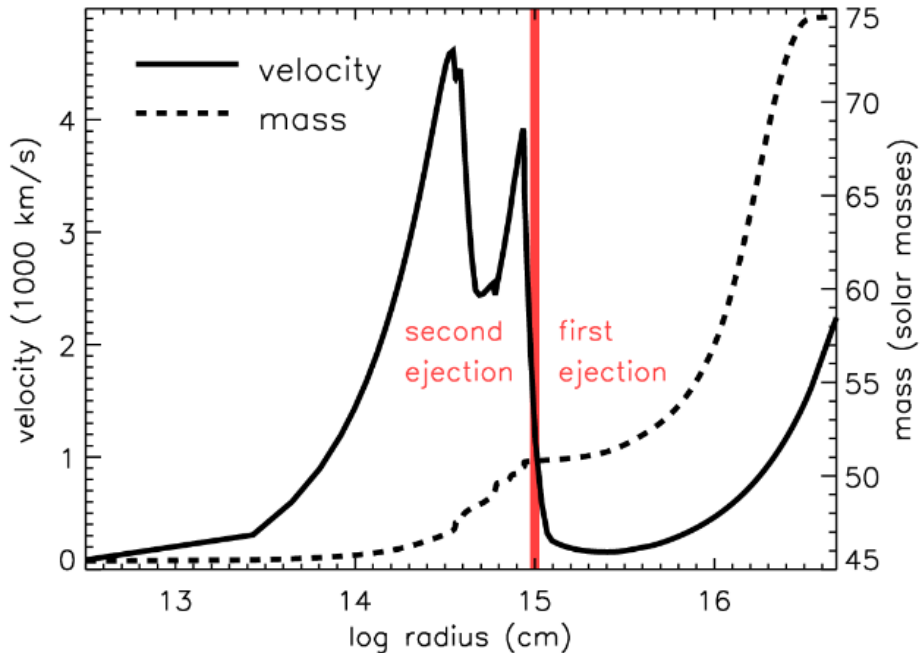


# SN2006gy la plus lumineuse

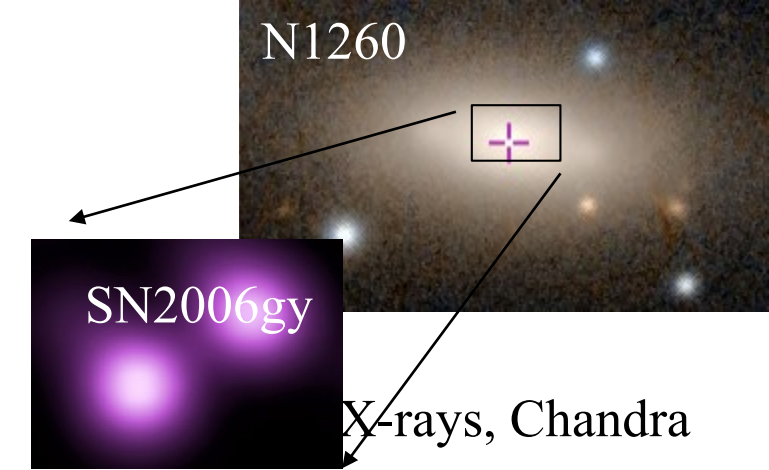
Etoile très massive  $> 100 M_{\odot}$  ? Mais pas de H, or c'est une SN-II  
 → Due à des collisions entre étoiles dans un amas nucléaire?

(Portegies Zwart 2007)

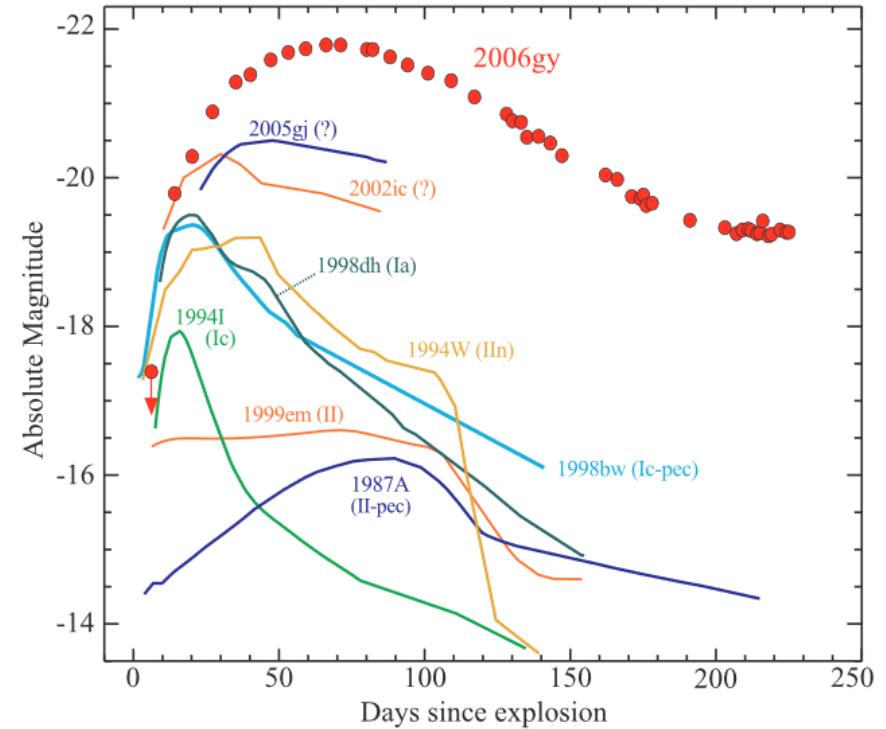
Alternativement, elle correspond à des pulsations de PPI, ou des enveloppes de gaz sont successivement éjectées, et s'entrechoquent (Woosley et al 2007)



1<sup>er</sup> candidat PISN?  
 PopIII? Faible Z



X-rays, Chandra

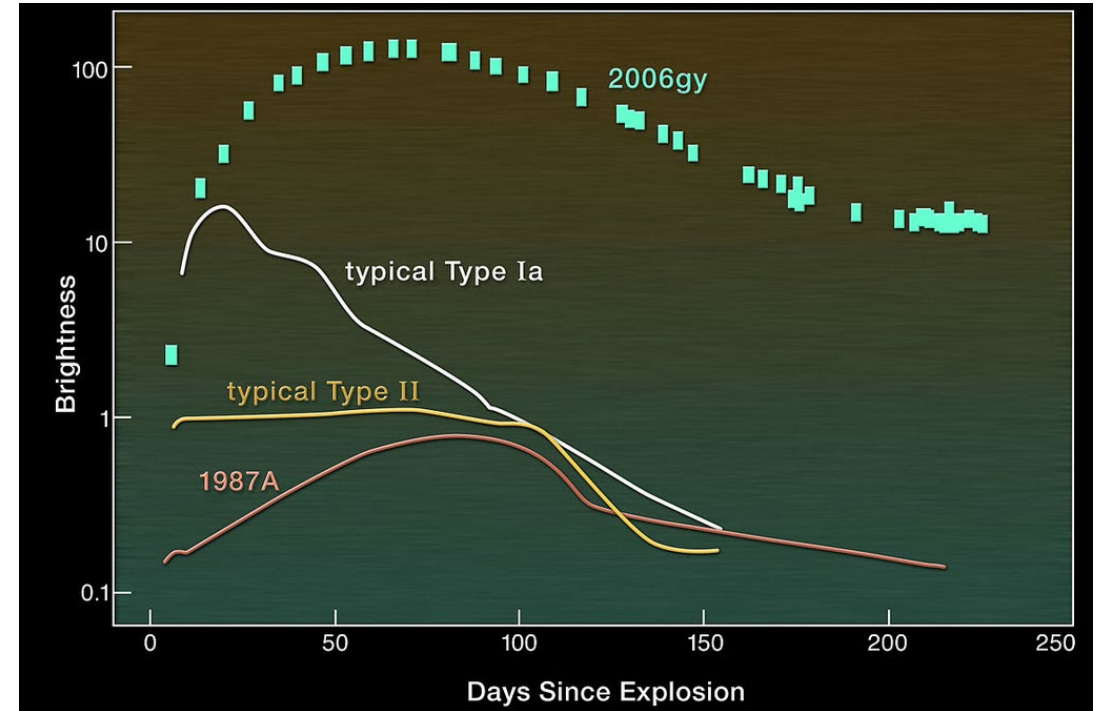
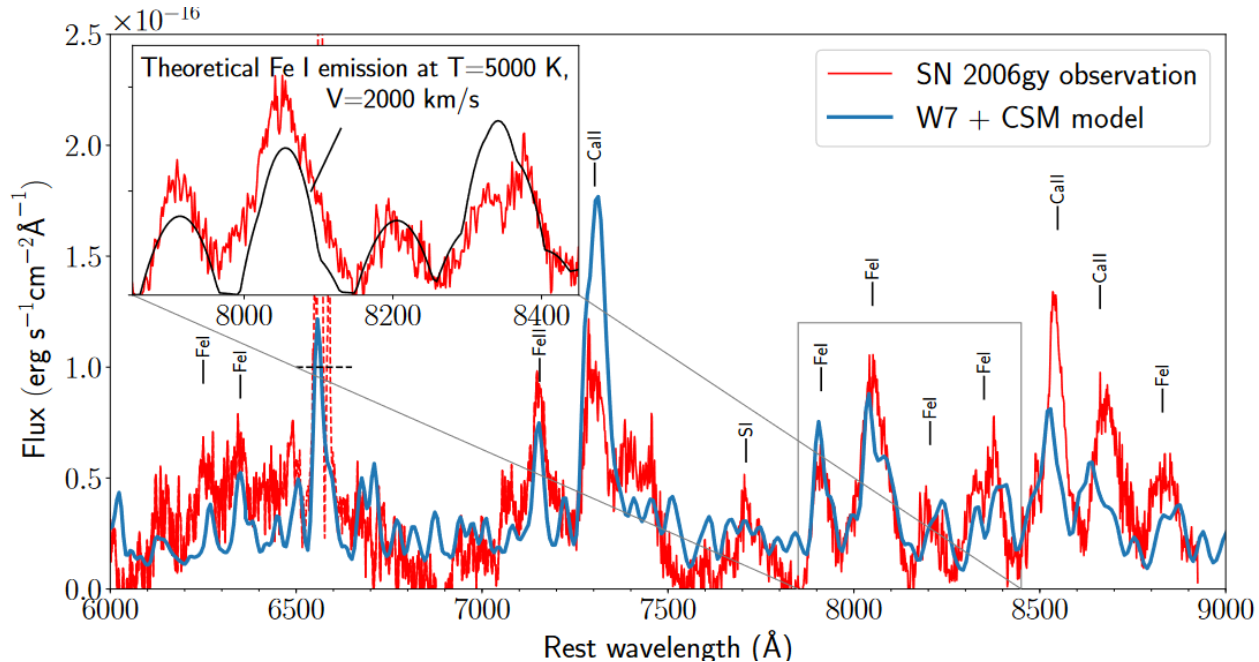


Smith et al 2007

# SN2006gy une SN Ia?

SN2006gy est 100 fois plus  
brillante qu'une SNI  
Cela pourrait être une SN Ia?  
Son profil arbore un plateau, aussi Fe

Ou alors une étoile à quarks étranges



Problème de H dans le spectre ?  
Enveloppe commune de H de la binaire  
Noyau de Fe  $> 0.3 M_{\odot}$  éjecté à 1500km/s

*Jerkstrand et al 2020*





# Trous noirs: Disque d'accrétion et Binaires X

Horizon du trou noir  $R_s = 2 GM/c^2$        $V_{ech}^2 = 2 GM/R$

Pour typiquement  $5 M_{\odot}$  **Horizon de 15km**

Vitesse képlérienne =  $c (R_s/2R)^{1/2} = 0.27 c$  à 100km

Période de rotation = **7.7 ms**

➔ Variabilité attendue

1ère binaire Cygnus X-1  
1965, TN~21M<sub>⊙</sub> **a=0.99**  
Etoile OB -40 M<sub>⊙</sub>

**Pour un trou noir avec rotation (Kerr)      a=c J/GM<sup>2</sup>**

a=1 maximum

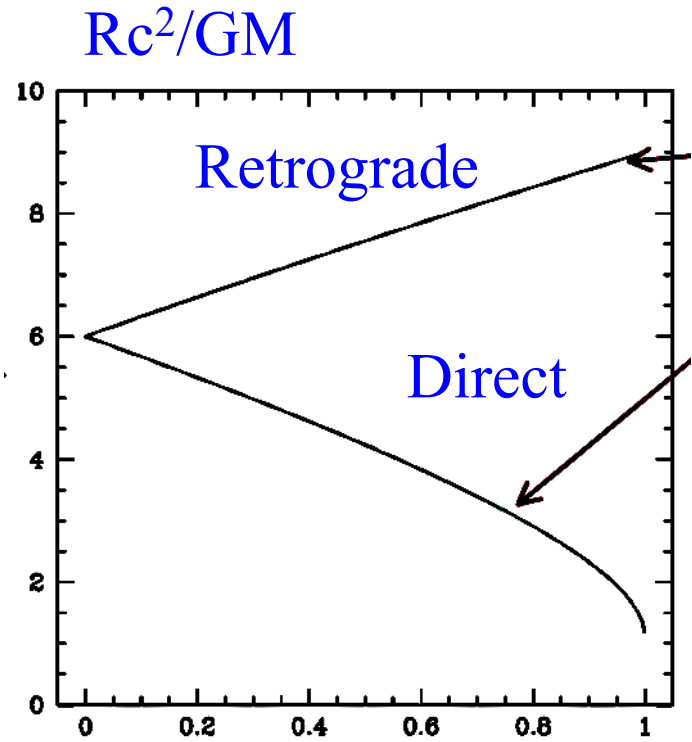
Dernière orbite stable  $3 R_s = 6 GM/c^2 \rightarrow GM/c^2$  (a=1)

Typiquement 45km pour **M=5 M<sub>⊙</sub>**

Dernière orbite circulaire stable, plus profonde que pour a=0

**Si tourne dans le sens direct**

➔ Variabilité < ms



# Signal variable à l'échelle milli-seconde

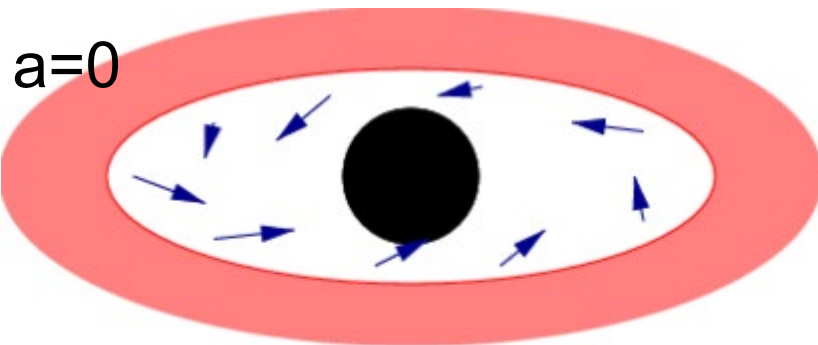
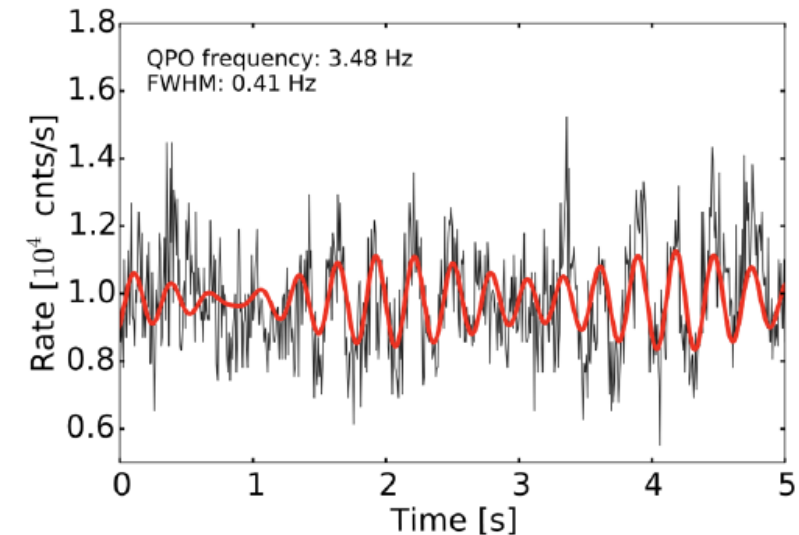
Oscillations avec la fréquence kHz, ou plus basse (M)

Quasi Périodiques → QPO

**Orbites stables plus proches du trou noir, si  $a$  est maximum**

Il devrait être possible de mesurer le spin du trou noir,

à partir de la variabilité observée, ou de la vitesse mesurée



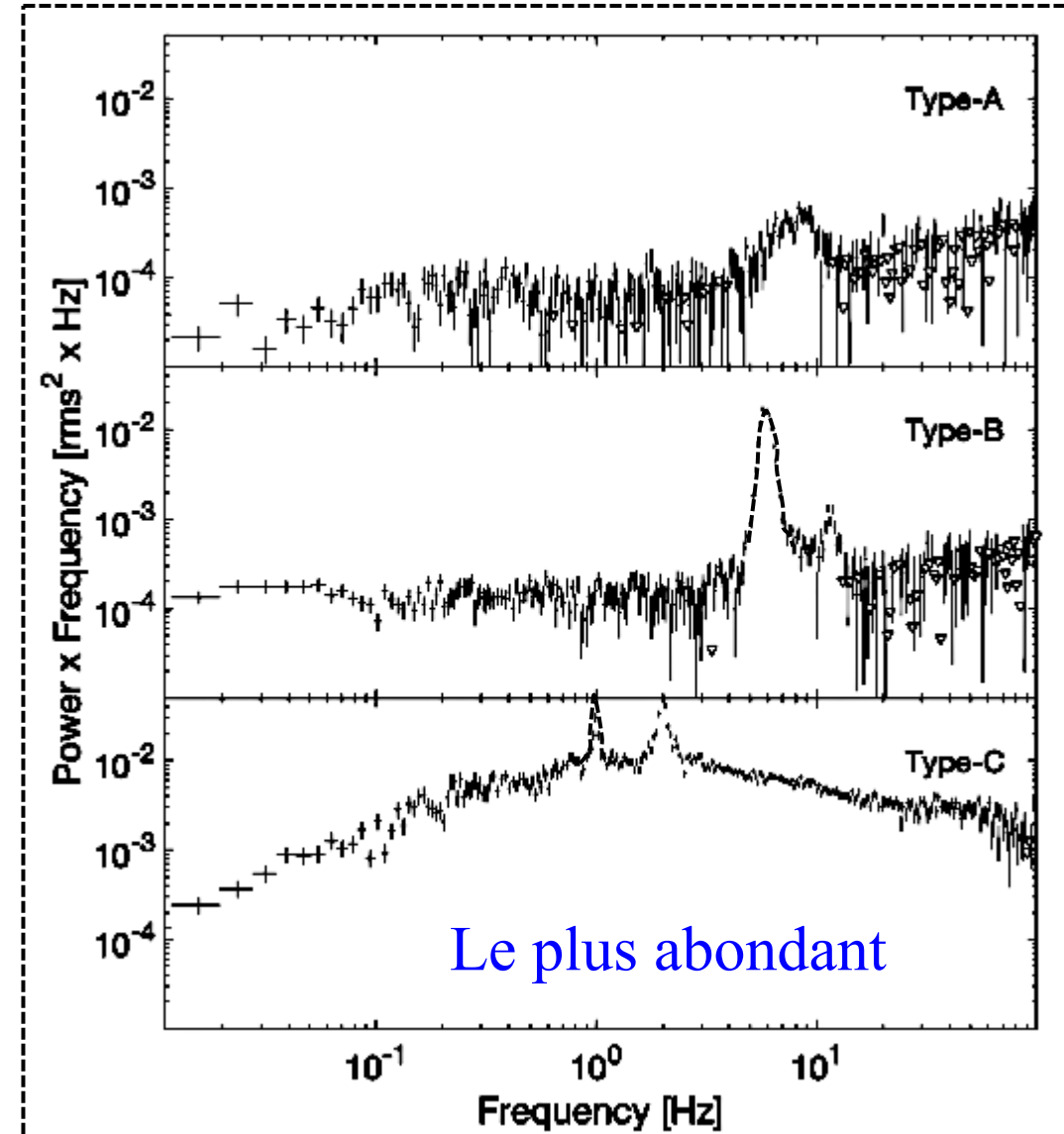
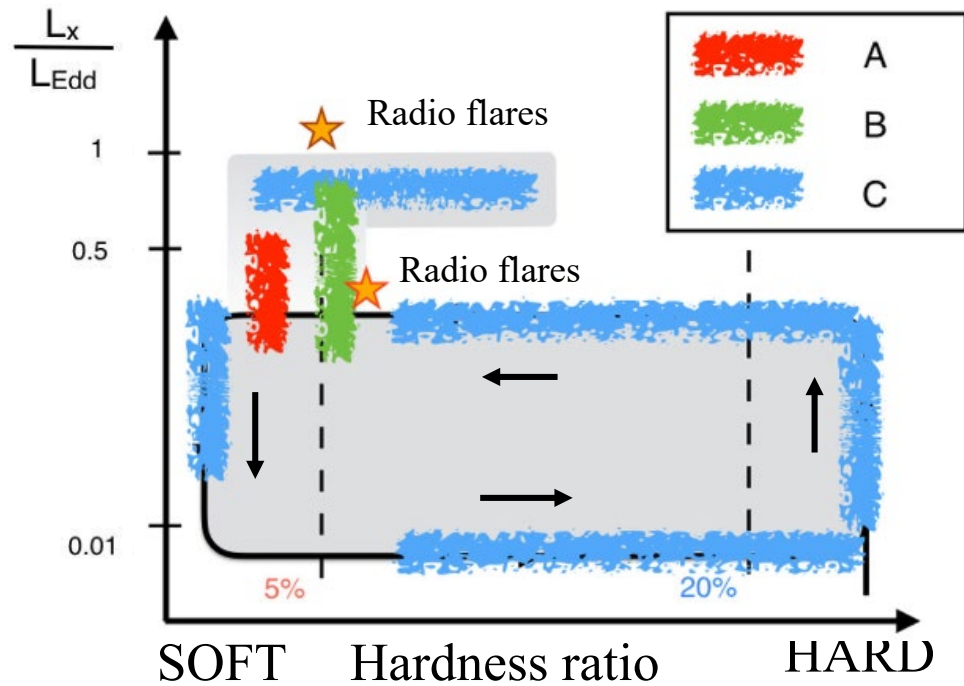
Des fréquences bien précises sont observées pour les binaires de faible masse (LMXB)  
 $M_{\text{compagnon}} \sim 1 M_{\odot}$

Pour les HMXB, la variabilité ressemble plus à du bruit  
*Belloni & Hasinger 1990*

# Binaires X : faible masse du compagnon (LMXB)

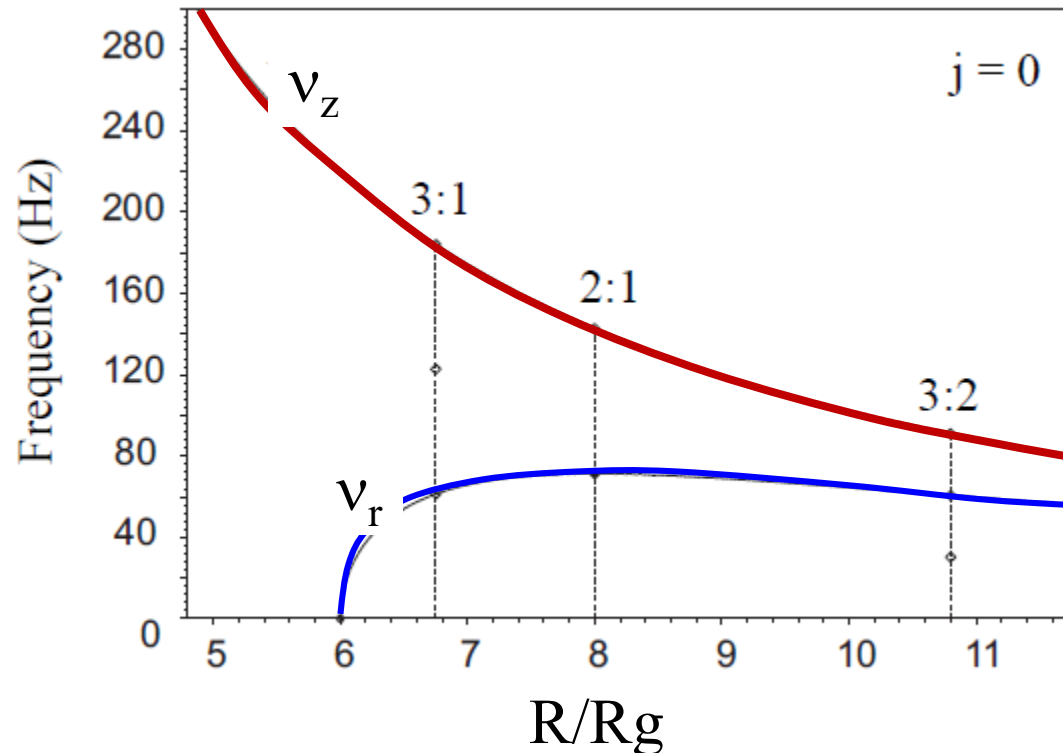
Oscillations quasi périodiques QPO très semblables avec celles des étoiles à neutron

La classification des TF donne les fréquences Types A, B, C  
Types A, B, C Hard: 6-10 keV, Soft: 4-6 eV



# Orbites et épicycles relativistes

Classique  $\nu_\phi = \Omega/2\pi = (GM/r^3)^{1/2}/2\pi = 1184\text{Hz} (r/15\text{km})^{-3/2}$   $M=1.4 M_\odot$  étoile à neutrons  
 $\nu \propto 1/M$   $= 184\text{Hz} (r/100\text{km})^{-3/2}$   $M=10 M_\odot$  trou noir  
 pour  $r \sim r_{\text{ISCO}} = 6 r_g$



En Relativité générale, les fréquences épicyclique, radiale, verticale, sont différentes de  $\nu_\phi$

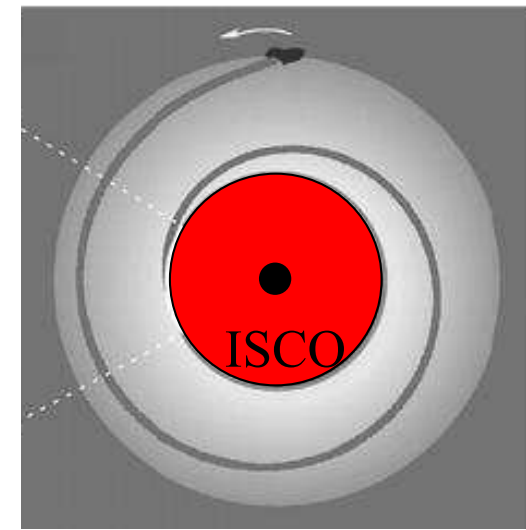
Résonances 3:2

$$2\nu_z = 3\nu_r$$

→ QPO 2 pics 3:2

Horizon  $R_s = 2 R_g$

# Orbites non closes



Quasi périodique, car orbite quasi-circulaire

Précession au péri-astre de  $\nu_{\text{péri}} = \nu_{\phi} - \nu_r$

Orbite tiltée en z, autour d'un trou noir en rotation

$$\nu_{\text{nodal}} = \nu_{\phi} - \nu_z$$

$\nu_{\text{péri}}$  et  $\nu_{\text{nodal}}$  toujours positives, → **précessions progrades**

Pour un trou noir de Kerr  $a = Jc/GM^2$ ,  $0 < a < 1$

Fréquence orbitale  $\nu_{\phi} = \nu_{\text{Kepler}} / (1 + a (r_g/r)^{3/2})$   $r_g = GM/c^2$

On peut définir une fréquence haute et basse, corresp. ISCO de  $a=1$  et  $-1$   $r_g$ , et  $9 r_g$

Existence de **2 pics QPO** → **résonances et détermination de M**

Parfois la fréquence de QPO n'a rien à voir avec les fréquences orbitales

# Précession de Lense-Thirring

$$\text{Précession } v_{LT} = v_{\text{nodal}} = v_{\phi} - v_z = a c / (\pi r_g r^3)$$

Précession différentielle avec  $r$ , le disque incliné va se gauchir  
L'effet est de forcer **le disque à tourner et s'aligner avec le spin du trou noir**

Forte viscosité, de coefficient  $\alpha$

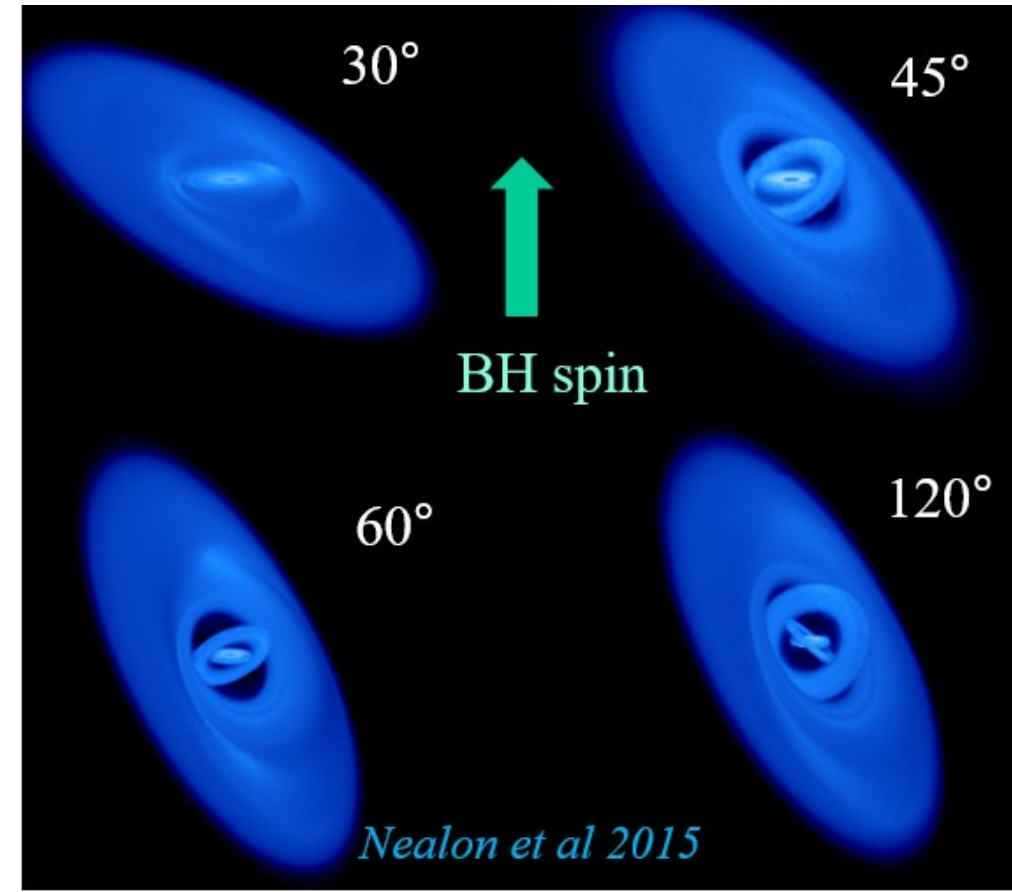
Diffusion  $\alpha > H/R$

Ou ondes de torsion  $\alpha < H/R$

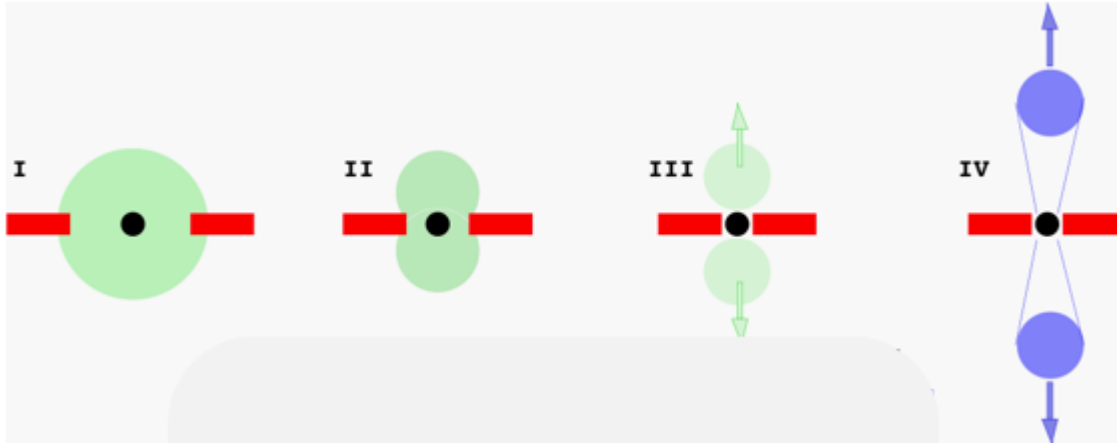
*Papaloizou & Pringle 83*

Effet Bardeen-Petterson (75)

Warp et alignement du gaz, qui arrive avec un moment cinétique différent du spin



# Fréquences orbitales et précession



Rayons-X: rouge

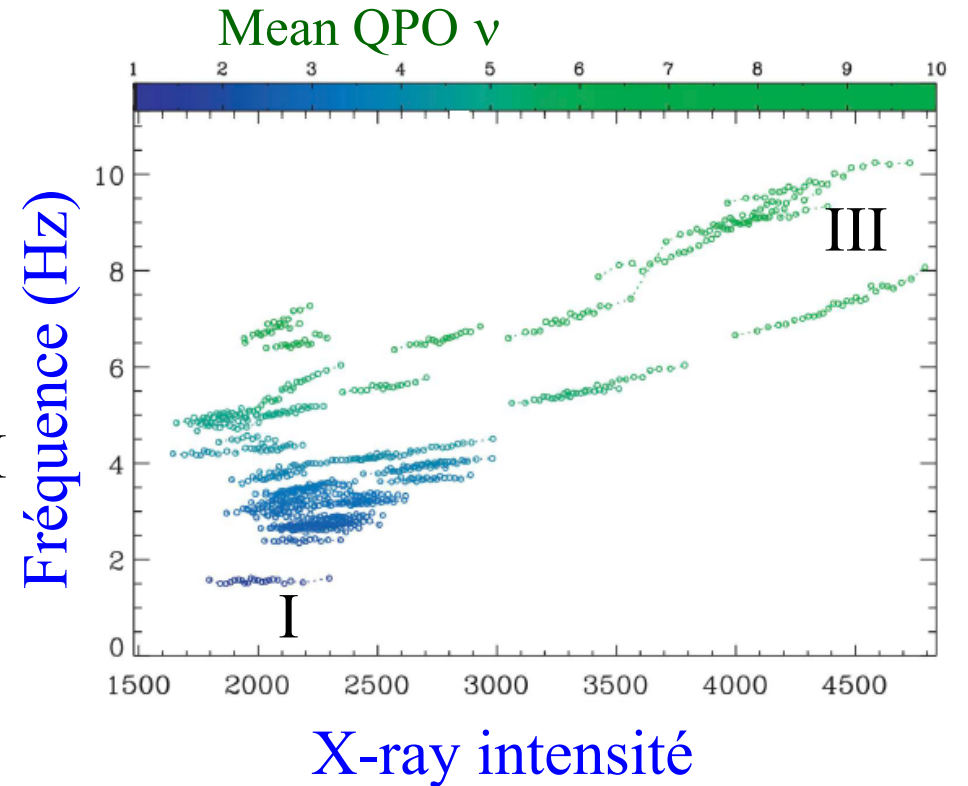
Rayons gamma: vert

Radio : bleu

Cycles d'éjection  
d'une heure environ

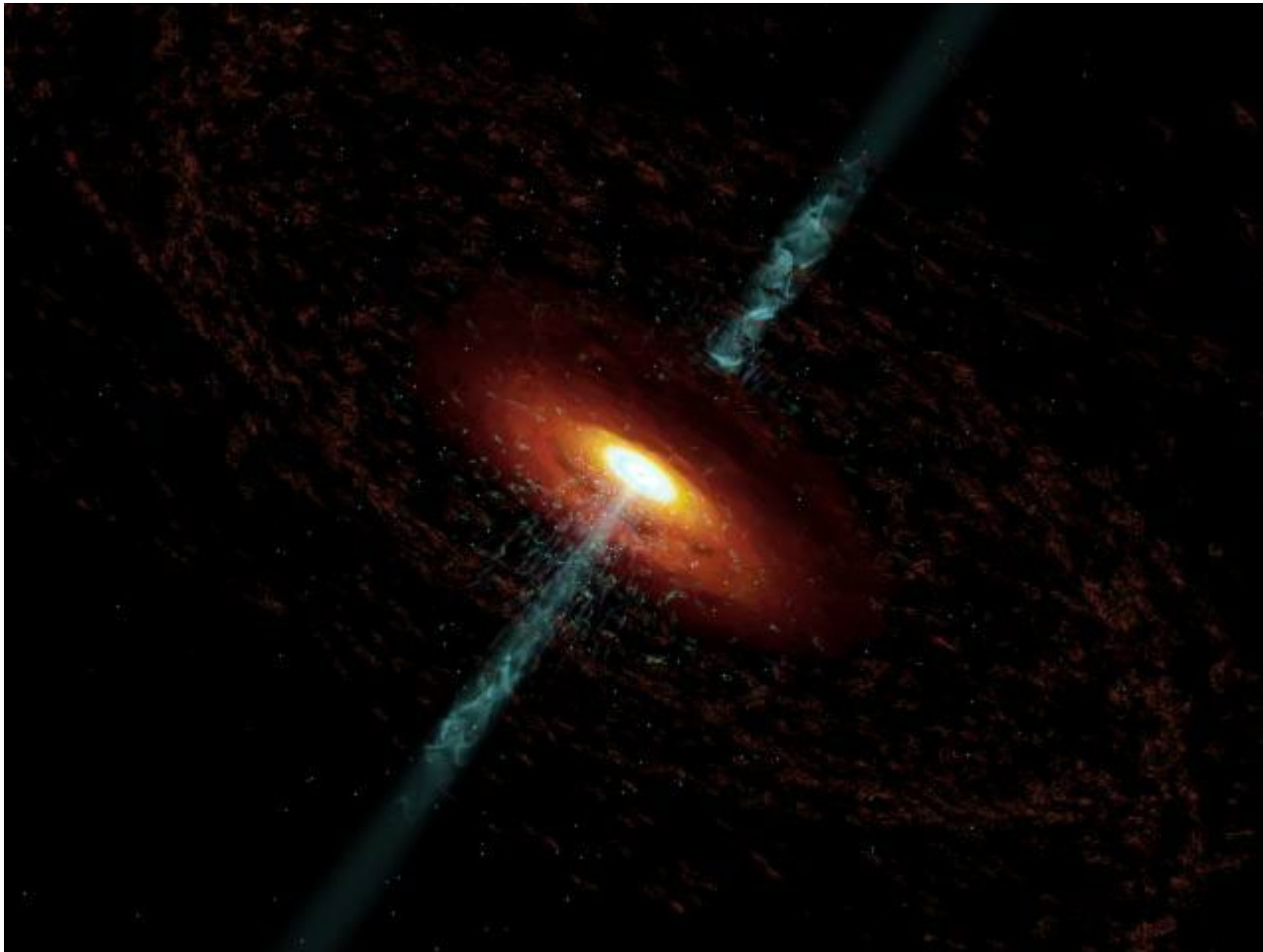
Dans la phase « **low-hard** » **I**  
le disque se rétrécit,  
rayon interne plus grand  
fréquence QPO plus faible

Dans la phase « **high-soft** » **III**  
disque à faible rayon  
fréquence QPO élevée



# Emission de jets radio

Les binaires X avec trou noir, éjectent des particules relativistes, perpendiculairement au disque d'accrétion



Les jets surviennent dans la phase **High-soft**, et disparaissent en **low-hard**

Ces flux bipolaires se forment de la même manière que pour les AGN  
Batterie cosmique Poynting-Robertson (PRCB), électrons diffusent les photons du côté opposé du disque, mais avec une forte aberration ( $v \sim c$ ), les protons  
Moins entraînés  $\rightarrow$  courant  $\rightarrow$  champ B

Flux bipolaire - moment cinétique  $\rightarrow$   
disque d'accrétion et  
processus magnétiques,  
Blandford-Znajek, avec  $a$  non nul



# Modèle de la binaire X SS 433 (micro-quasar)

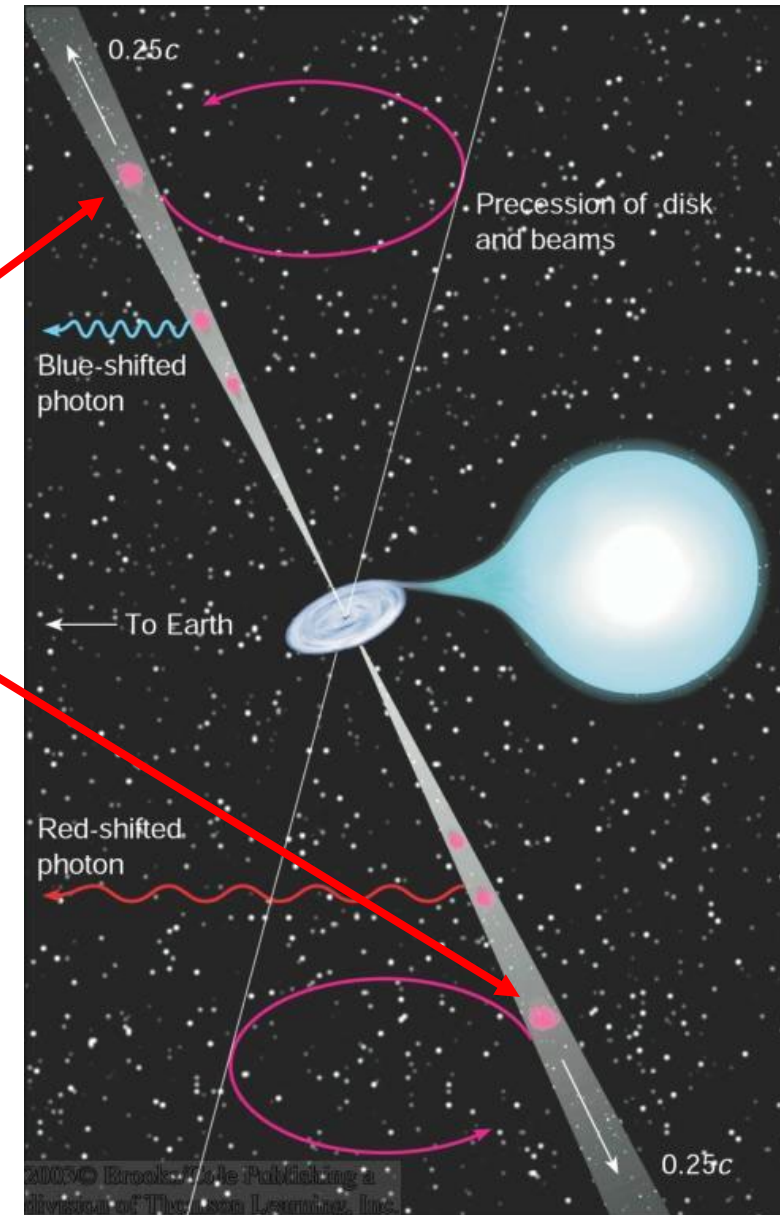
Periode orbitale 13 jours

Raies dans le spectre optique  
provenant du jet

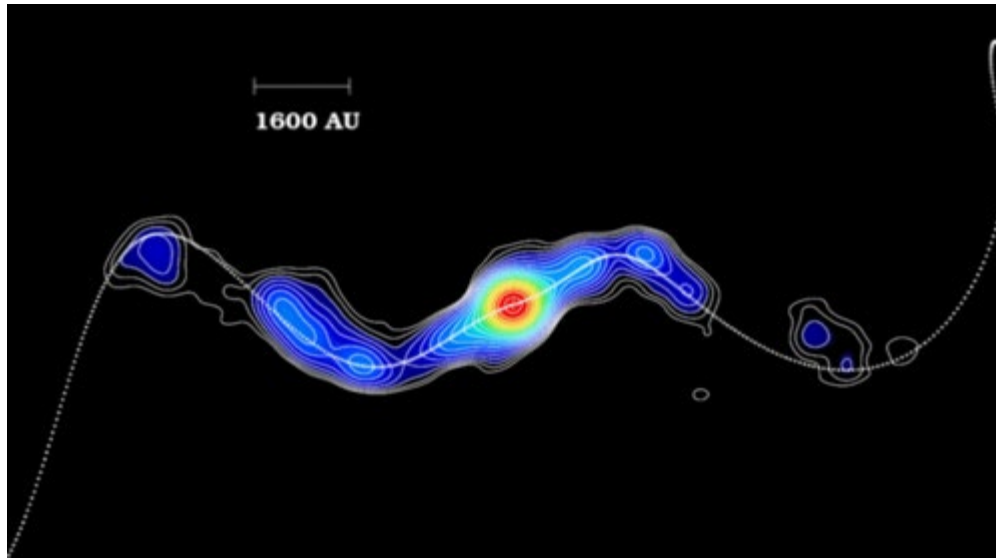
Deux series de raies, vers le bleu et  
vers le rouge, traçant le mouvement,  
à près de  $c/4$

Les raies vont et viennent et s'échangent tous les  
164 jours à cause de la précession du jet

SS 433 est un trou noir de **masse  $15 M_{\odot}$**   
avec compagnon  **$M=21 M_{\odot}$**  *Bowler 2018*



# SS433 binaire: TN $15M_{\odot}$ , étoile $21M_{\odot}$

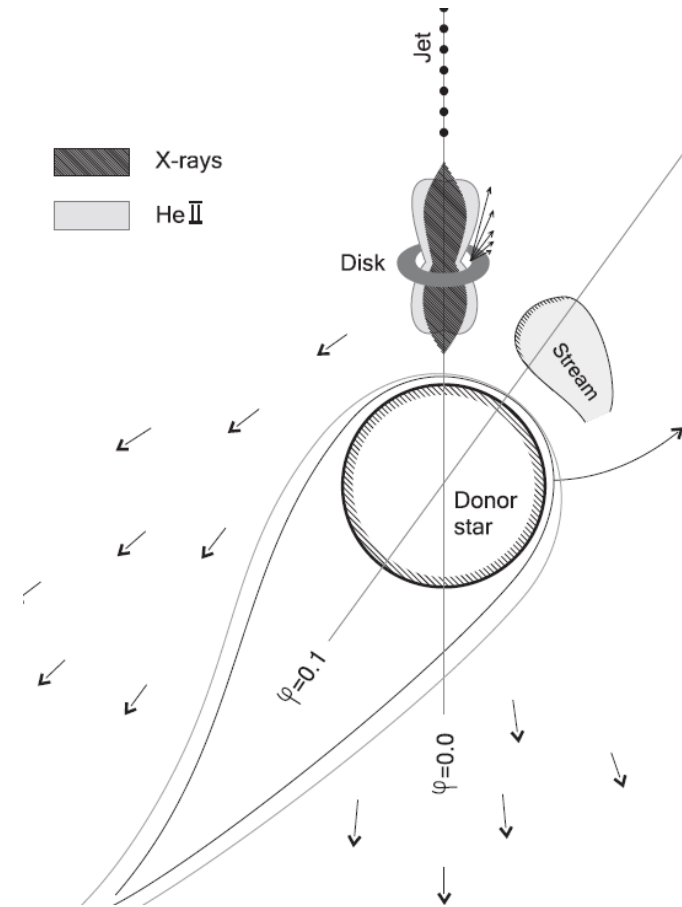


SS433 VLBA 15GHz,  
1mas= 3AU à D=5 kpc  
*Mioduszewski et al. 2006*

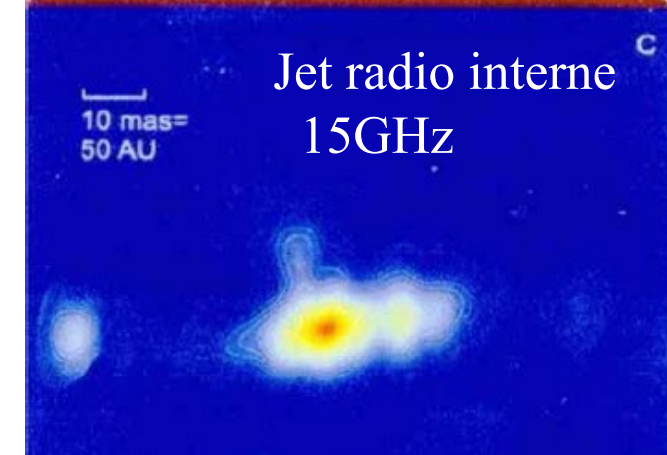
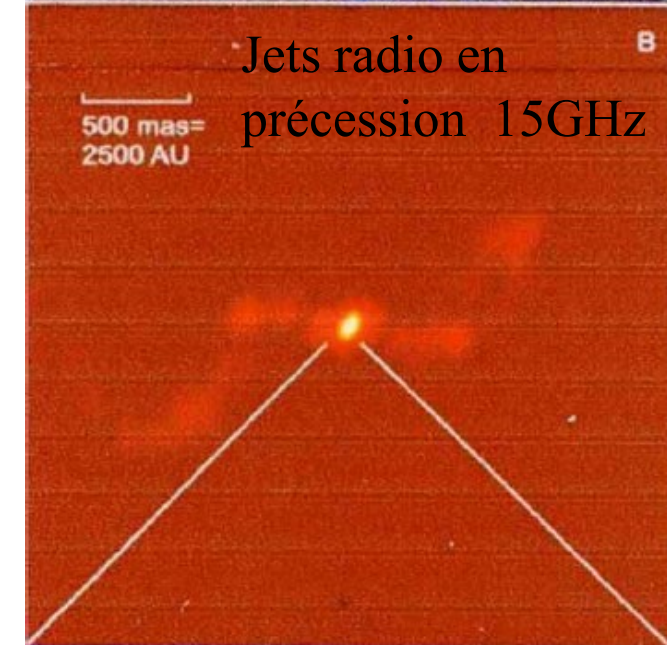
Jet interne 5mas

Mouvement propre 7-10mas/jour

## Nébuleuse W50 1.4 GHz



*Fabrika 2004-2006*



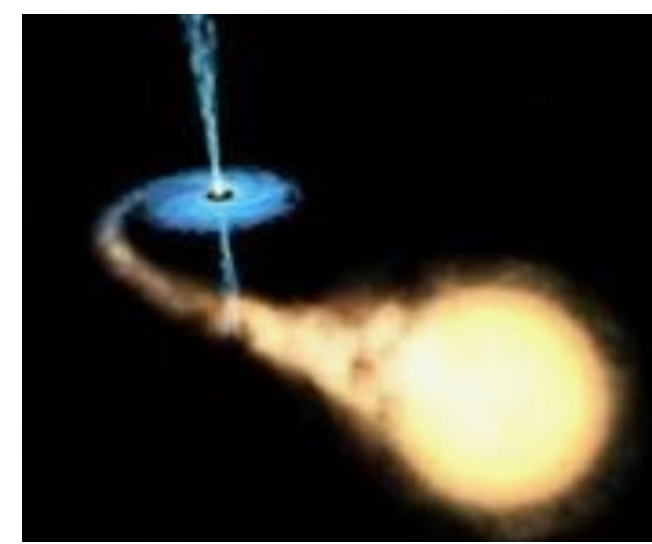
# Masses des trous noirs dans les HMXB

Environ 80 systèmes observés dans la Voie lactée, les plus massifs

Cyg X-1,  $M(\text{BH}) = 21.2 M_{\odot}$ , Compagnon,  $M = 40.6 M_{\odot}$

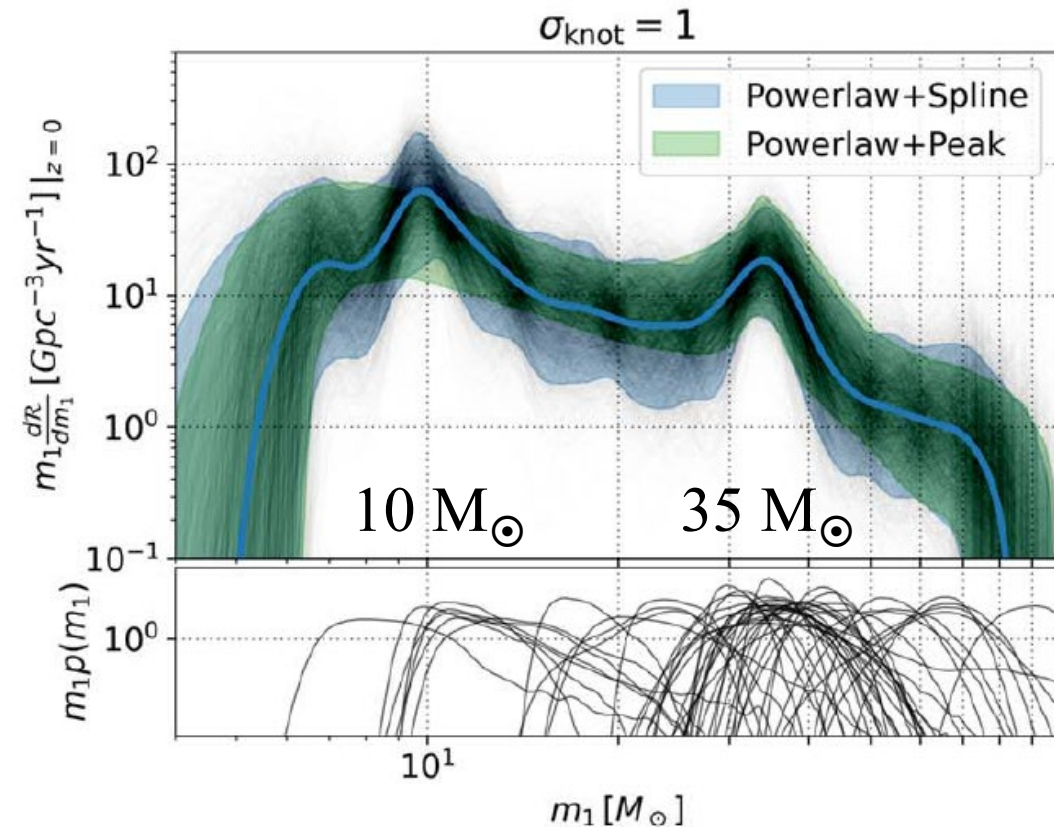
Galaxies proches (LMC, M33, etc..)

LMC X-1,  $M(\text{BH}) = 10.9 M_{\odot}$ , Compagnon,  $M = 31.8 M_{\odot}$



Dans les ondes gravitationnelles GW:  
Curieusement, deux pics à  $10 M_{\odot}$   
et  $35 M_{\odot}$  (un 3ème à  $7.5 M_{\odot}$ ?)

- ➔ Mécanismes de formation
- Effondrement de cœur de fer
- PISN



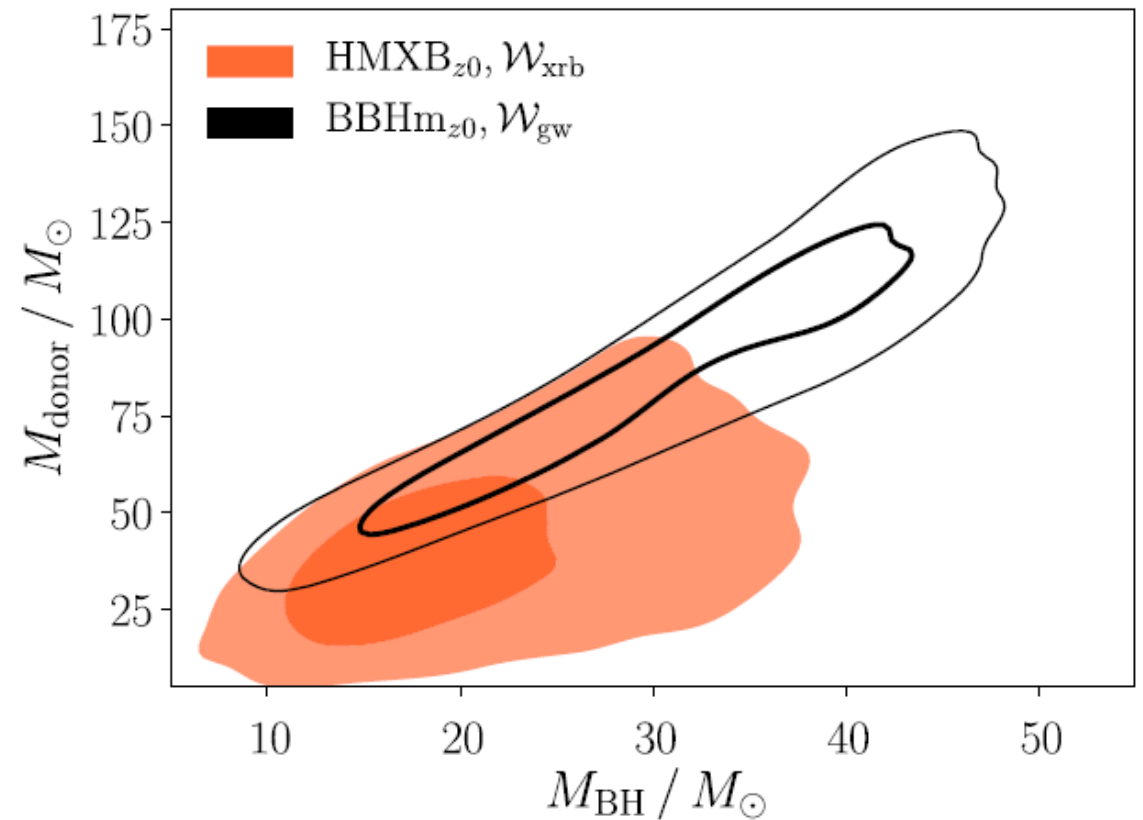
# Masses des trous noirs

Plus petites masses dans les binaires HMXB, déterminées de façon dynamique, localement, avec accrétion de matière (et forte métallicité)

Bien plus grandes masses dans les ondes gravitationnelles → biais de sélection

Aucune fusion de trous noirs ne peut être annoncée avec les binaires d'aujourd'hui

Les fusions GW proviennent de trous noirs à grand  $z$ , de faible métallicité



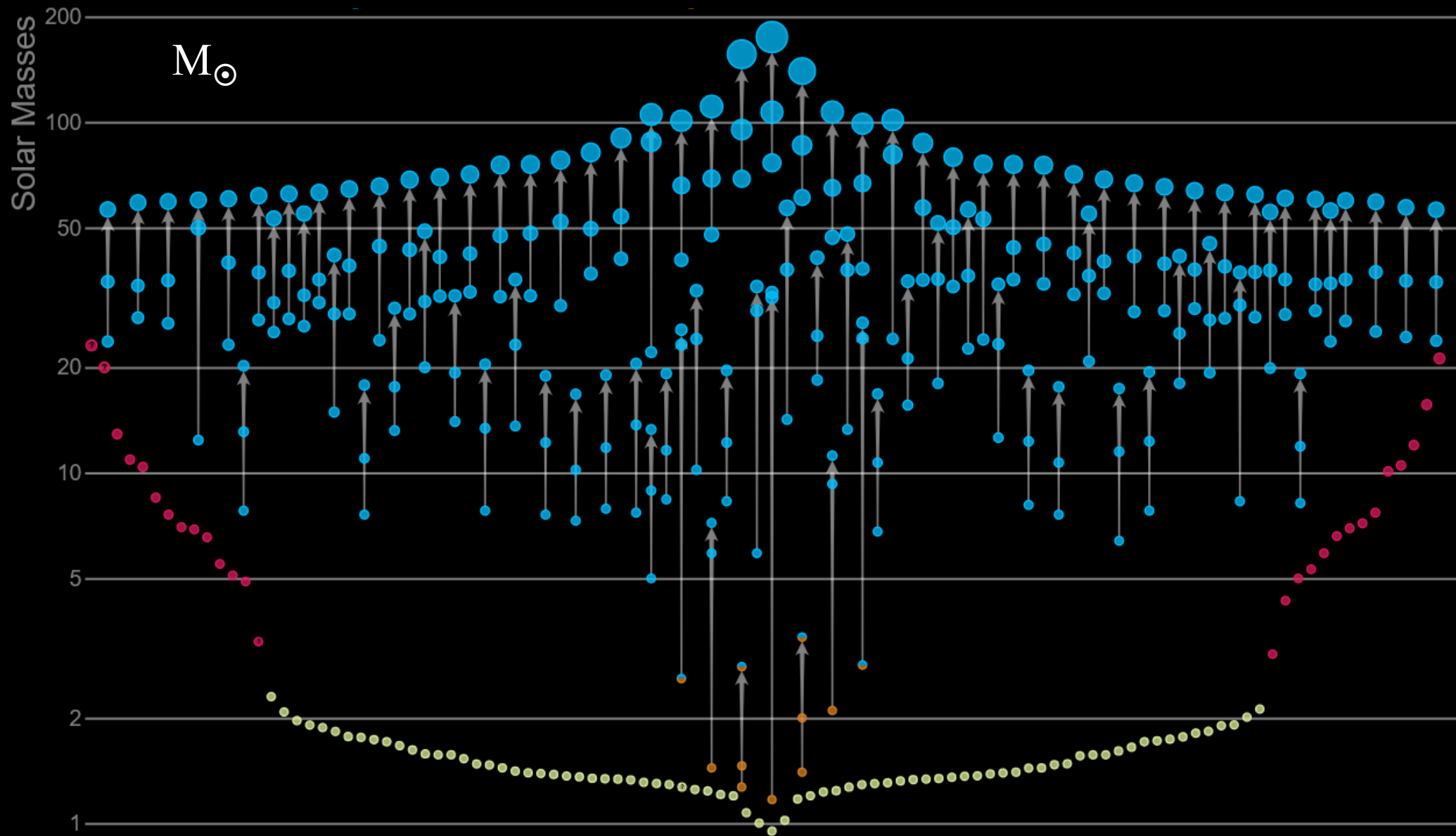
20% des GW  $M > 35 M_{\odot}$

Seulement < 3% pour les HMXB

Proba de fusionner pour les HMXB

0.6% dans un temps de Hubble

# Masses du cimetière des étoiles

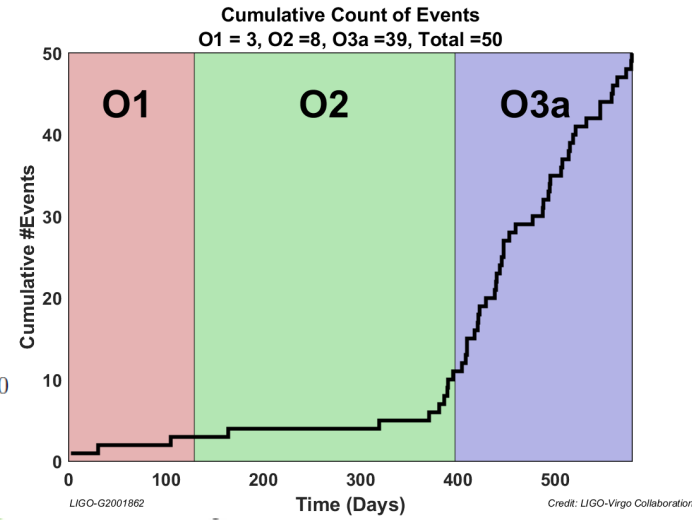
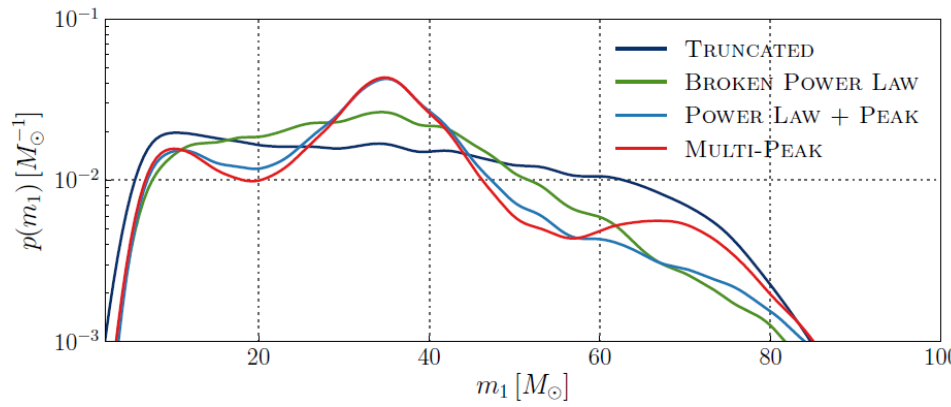
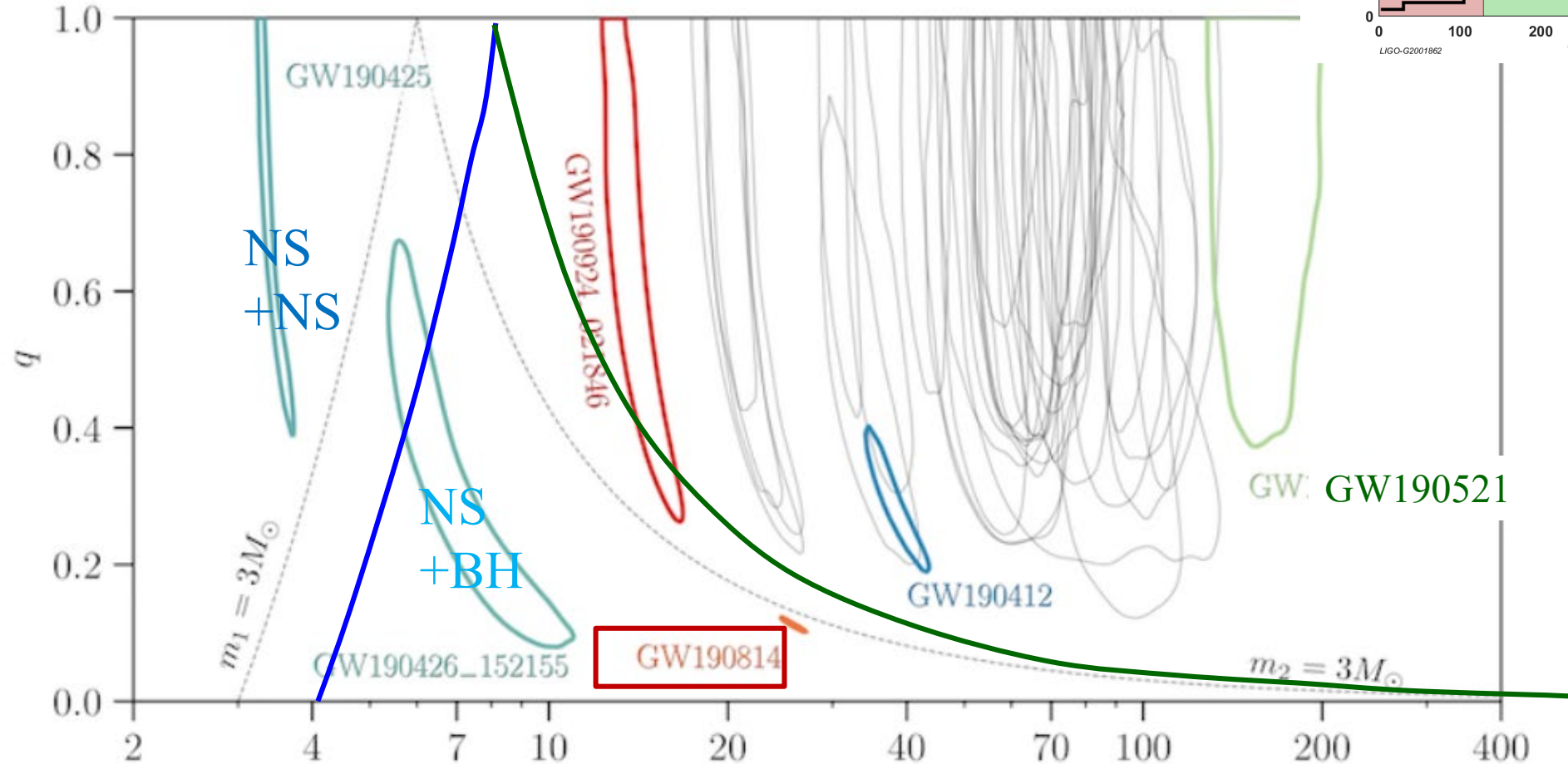


# 50 détections

GW190814 23.2 + 2.6 → 25.6

GW190924 8.8+5.3 → 13.3

$M_2/M_1$



Observing runs

Taux de BBH croît avec z

# La plus grande masse: GW190521

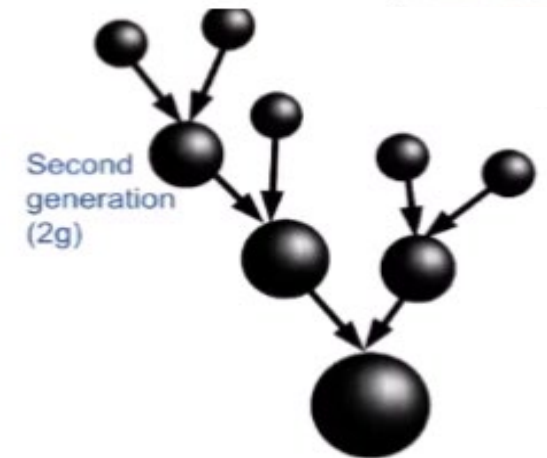
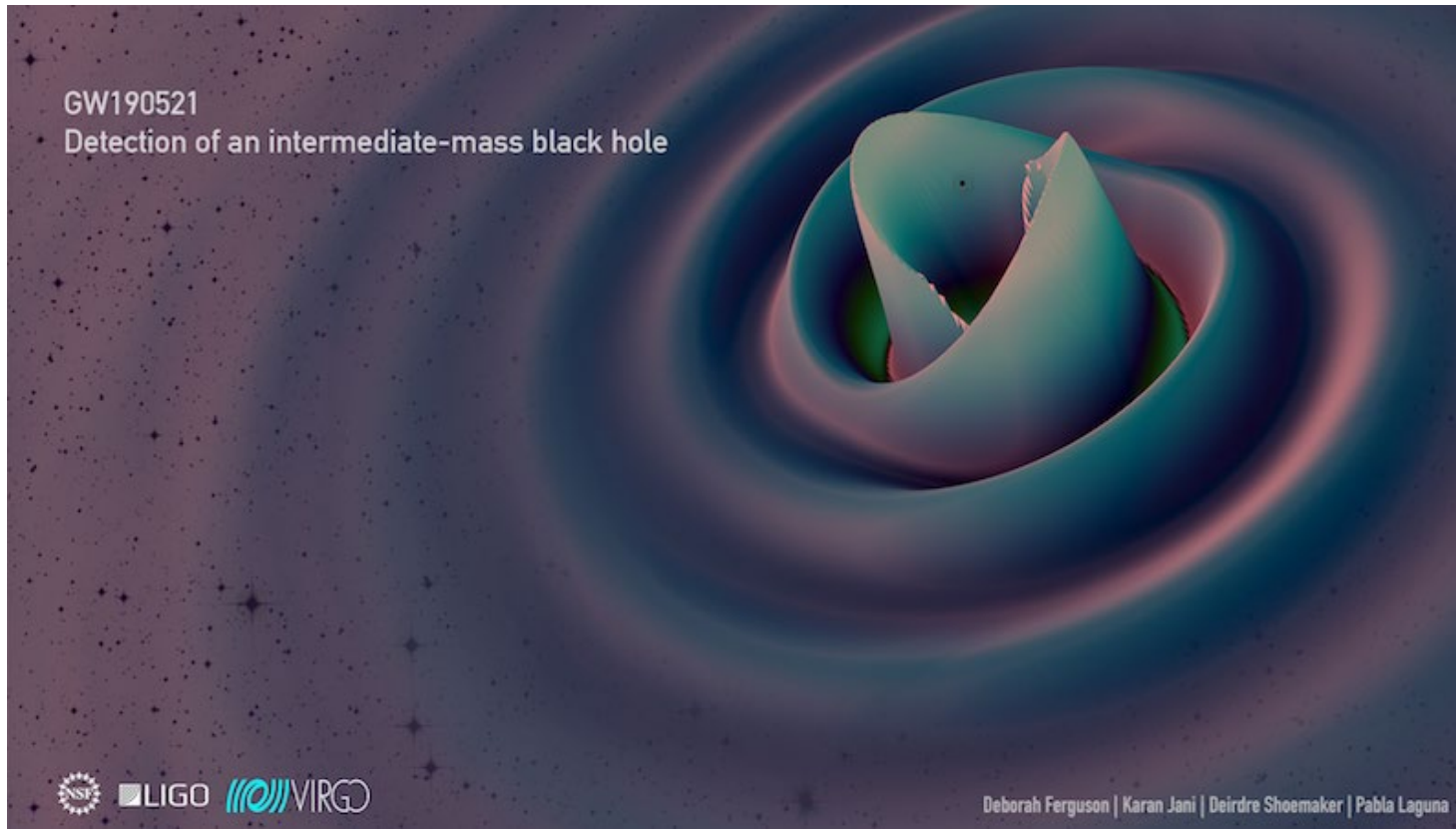
$$65 + 85 M_{\odot} \rightarrow 142 M_{\odot}$$

Instabilité de création de paires  $e^{-} e^{+}$

Entre 60 et 130  $M_{\odot}$

→ Trous noirs de **masse intermédiaire**

Amas globulaire



# TNMI: est-ce qu'ils existent?

**TNMI (IMBH)** Trous noirs de masse intermédiaire  $10^2$ - $10^5 M_{\odot}$   
Doivent exister, car impossible de former directement un trou de  $10^6 M_{\odot}$

Les TNMI prennent un temps très long à tomber  
au centre  $t_{\text{fric}} \propto 1/M_{\text{BH}}$

Amas globulaires (M15?, G1 dans M31)

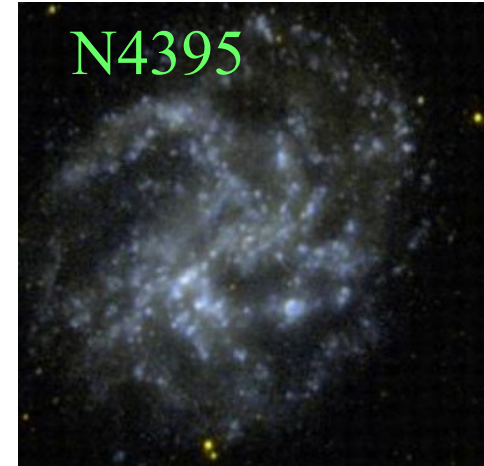
**AGN dans les galaxies naines: NGC 4395** (*Filippenko 03, Merritt 13*)

$M_{\text{BH}} \sim 3 \cdot 10^5 M_{\odot}$  (Seyf 1, pas de bulbe)

Faible ionisation,  $L_{\text{bol}}/L_{\text{E}} = 2 \cdot 10^{-2}$ -  $2 \cdot 10^{-3}$  rapport d'Eddington

pb des naines: ont des amas nucléaires de  $\sim 10^6 M_{\odot}$

Dans M33  $< 10^3 M_{\odot}$ , facteur 10 en-dessous de  $M$ - $\sigma$

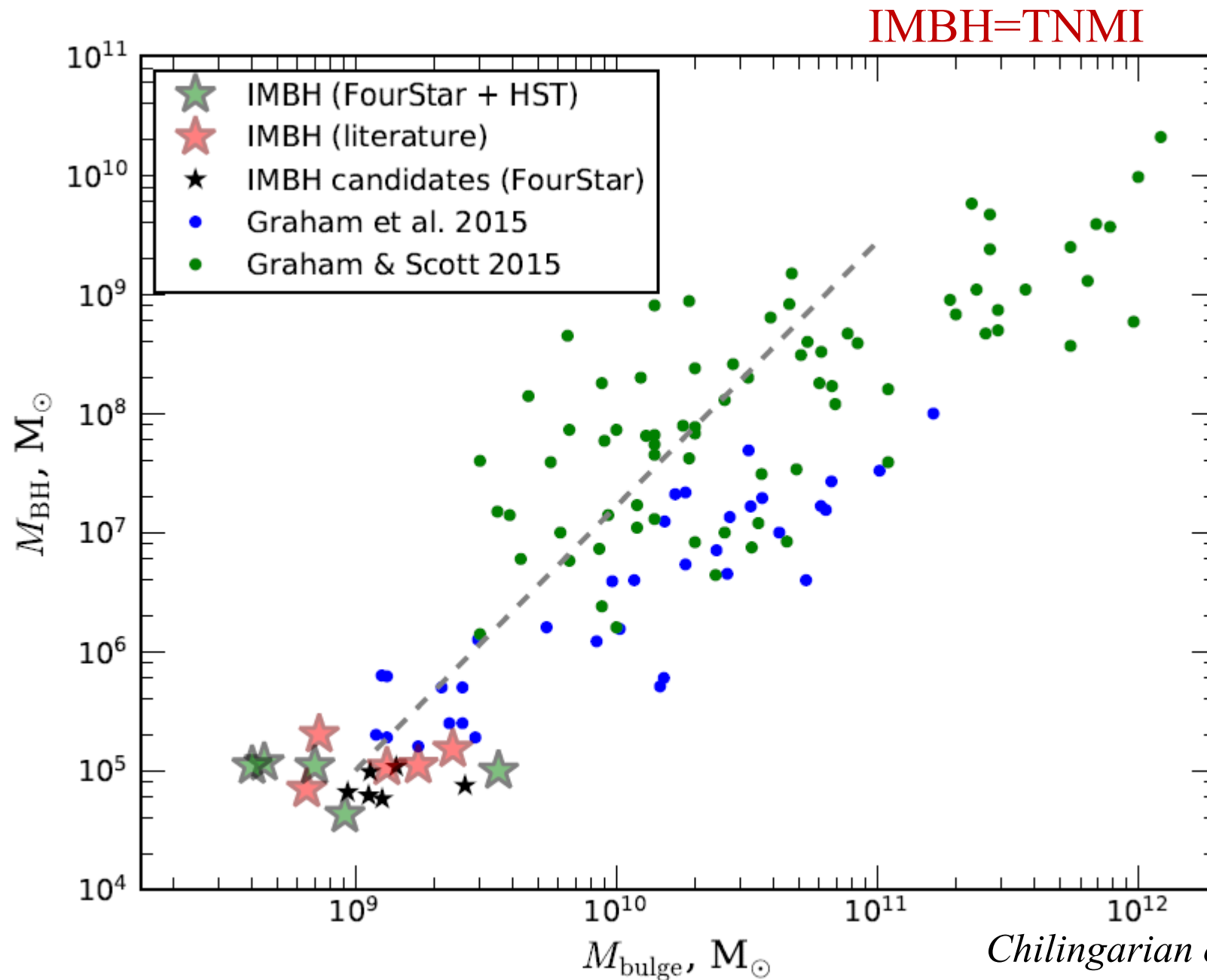




# Relation $M_{\text{BH}}-M_{\text{bulge}}$

Candidats  
à la limite de  
détection

Difficile de  
distinguer  
AGN de SFR



# ULX Sources X Ultra-lumineuses

Depuis les années 1980, on détecte des sources de rayons X de luminosité exceptionnelle  $L > 10^{39} \text{ erg/s} = L_{\text{Edd}} (M=10 M_{\odot})$

Il en existe en moyenne une par galaxie:  $10^{39} < L < 10^{41} \text{ erg/s}$

**Autres possibilités:** --une binaire X avec un émission concentrée dans un faisceau vers l'observateur

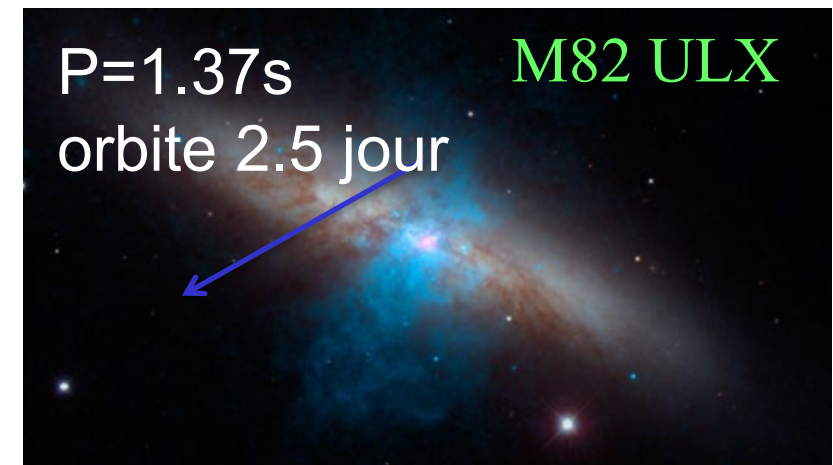
*Bachetti et al 2014:* pulsar dans M82

--Luminosité supérieure à  $L_{\text{Edd}}$

La plupart observées avec des pulsations

→ pulsars, étoiles à neutron

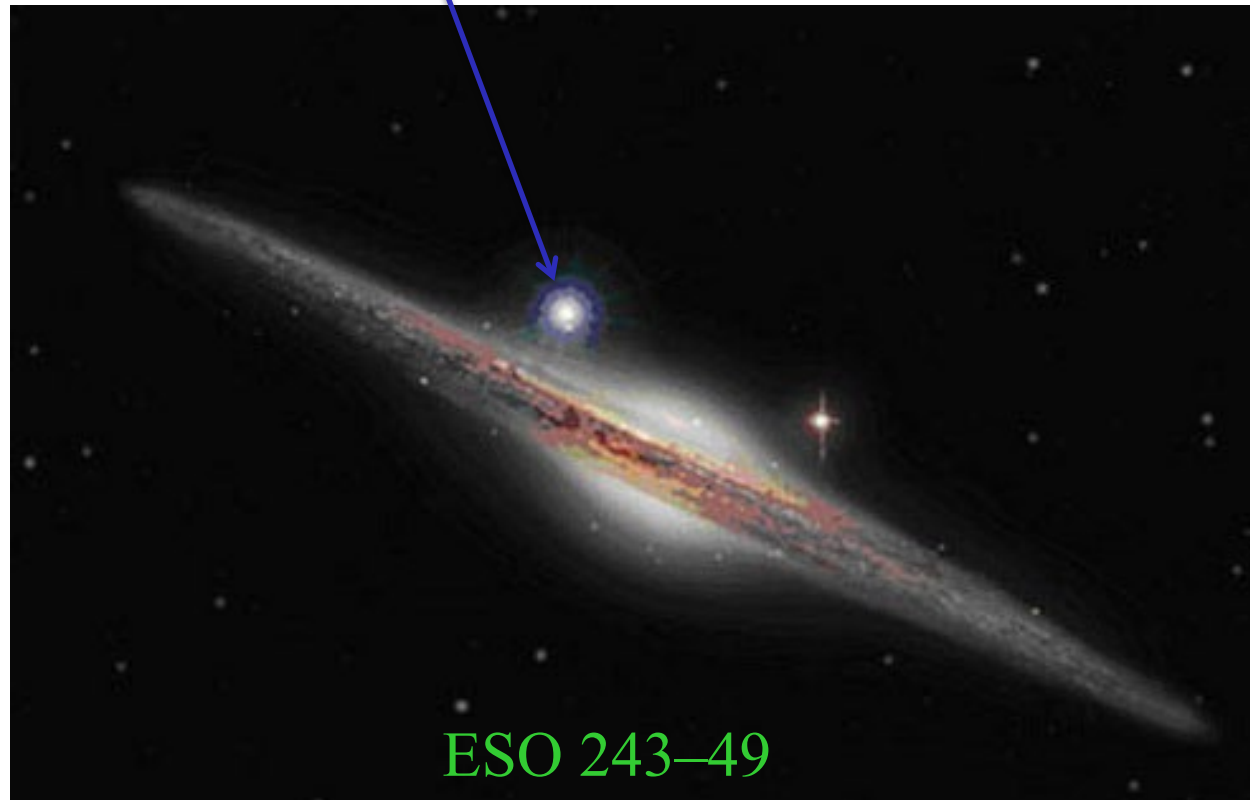
rayonnant à  $100 L_{\text{Edd}}$



# HLX-1: le premier TNMI?

ULX dans ESO 243–49,  $D=95$  Mpc,  $10^{42}$  ergs/s,  $10^2$ - $10^5 M_{\odot}$  BH  
*Farell et al 2009, Webb et al 2010, Godet et al 2009*

Soria et al 2013:  $H\alpha$  même redshift, associée à ESO243-49



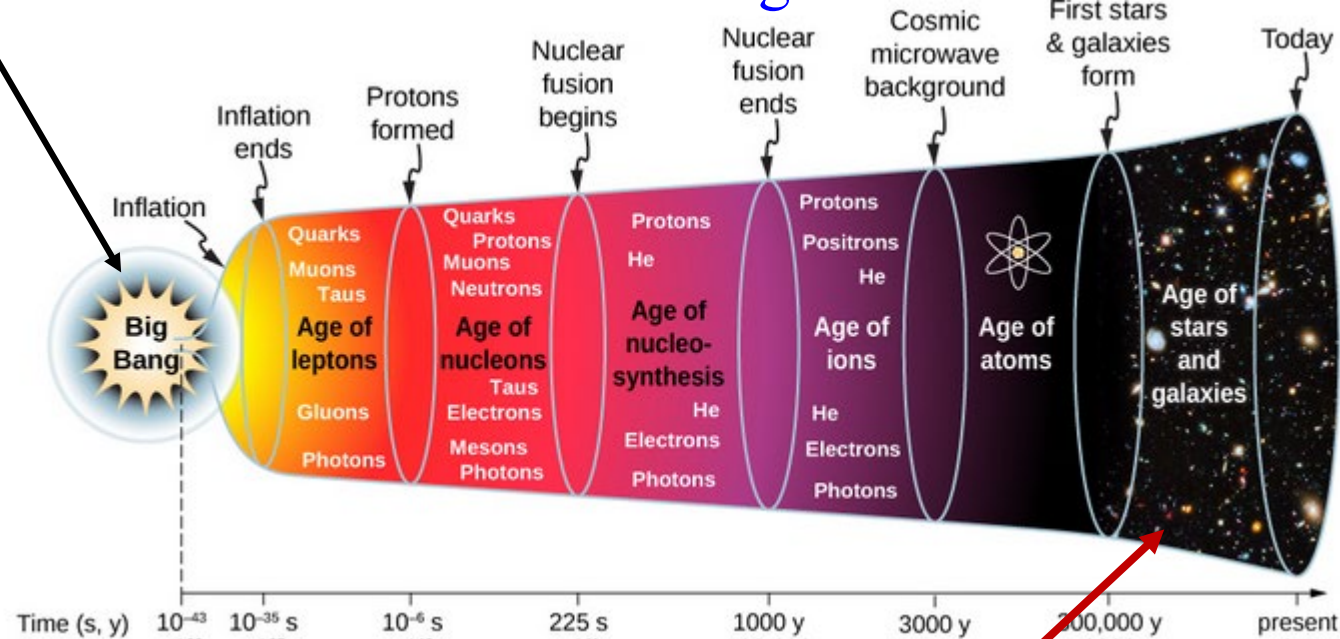
Sursauts X  
Peut-être dûs à  
une étoile en orbite  
autour du TNMI  
*Godet et al 2014*

ESO 243–49

# Les mécanismes de formation des TNMI

→ Trous noirs primordiaux? Très peu probables

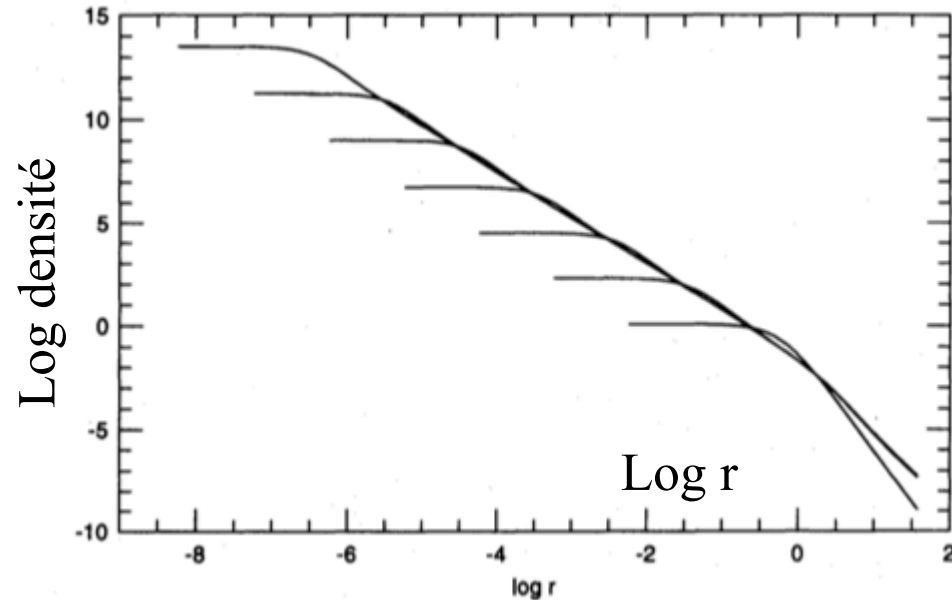
→ Amas dense d'étoiles: amas globulaires



→ Etoiles supermassives de Pop III

→ Accrétion de gaz, d'étoiles, comme les supermassifs

# Effondrement du cœur d'un amas globulaire



Relaxation à deux corps

$$t_{relax} = 0.34 \frac{\sigma^3}{G^2 m \rho \ln \Lambda}$$

Le transfert d'énergie du centre vers le bord produit l'effondrement du cœur, en  $10 t_{relax}$

$$t_{relax} \approx \frac{0.8 \text{Gyr}}{\ln(0.1N)}$$

Au centre, les collisions entre étoiles produisent un emballement, et la formation d'un trou noir → **Effondrement du cœur**

# Amas d'étoiles

**Evolution dynamique** → collapse du cœur,  
capacité négative

Mais, les binaires réchauffent, et empêchent le collapse

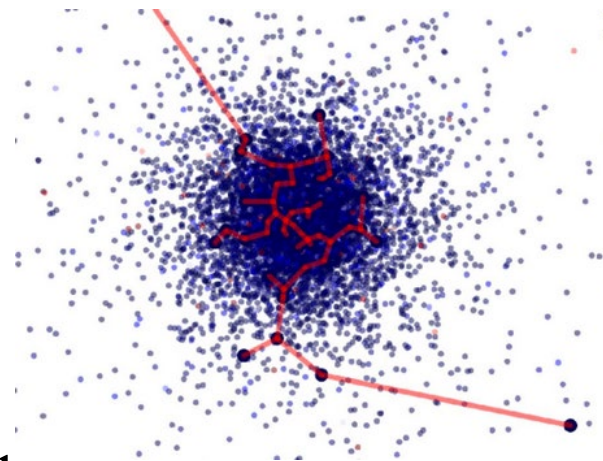
Simulations: plus d'équipartition,  
les objets massifs tombent au centre  
→ effondrement du coeur

Il faut que  $T_{\text{relax}} < 100$  Myr, boule de neige

Amas globulaires: sources possibles de TNMI: GW190521

Mais **certains amas N6397**: aucune évidence

Uniquement des objets compacts invisibles de masse stellaire  
(naines blanches, trous noirs stellaires) *Vitral et al 2021, 2023*

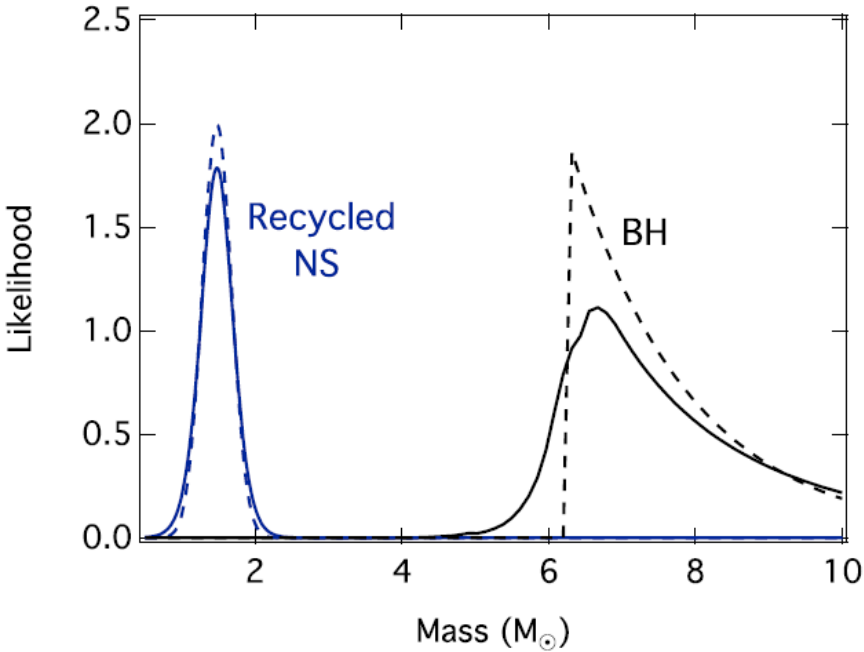


# Fossé entre trou noir et étoile à neutrons

**GW190814:** Un trou noir de  $23 M_{\odot}$  et un objet compact de  $2.6 M_{\odot}$  D=241 Mpc, z=0.053  
Quelle est la nature du compagnon?

Le plus grand rapport de masse ( $\sim 9$ )

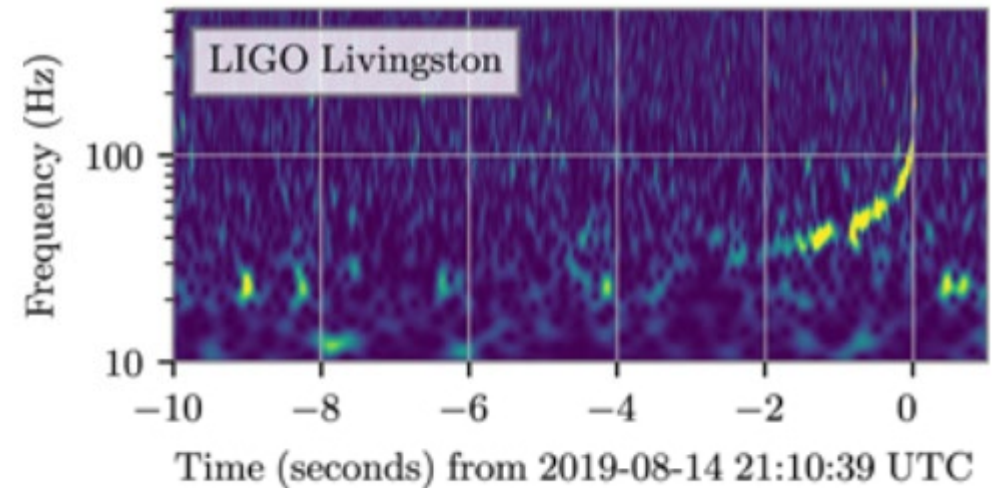
Le plus petit trou noir, ou la plus grosse étoile à neutrons?

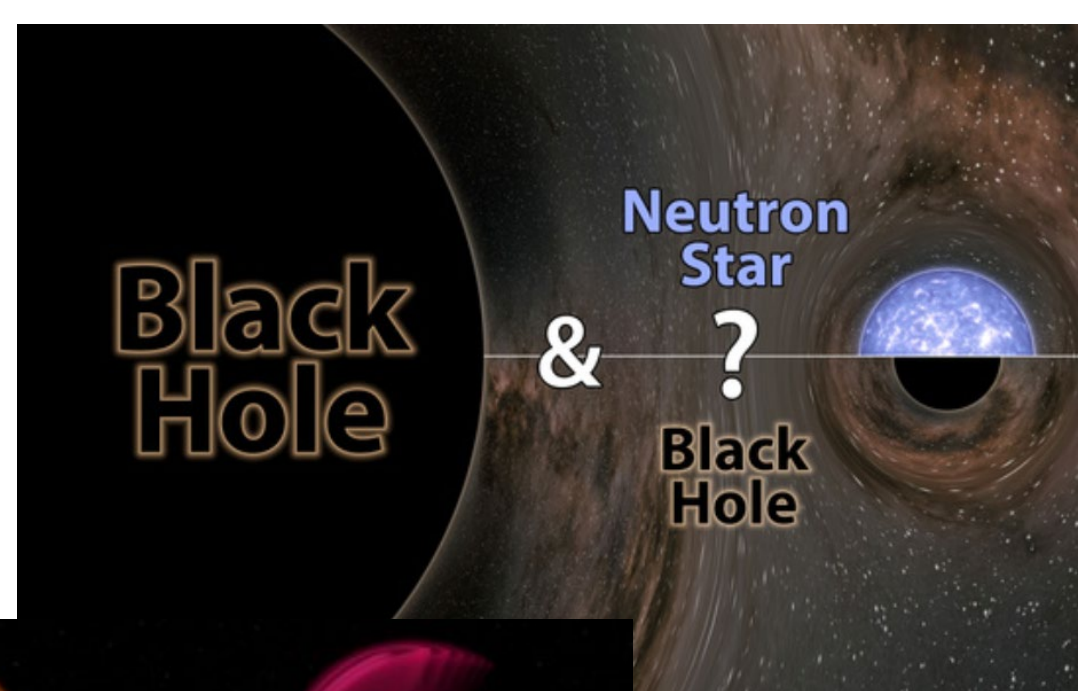
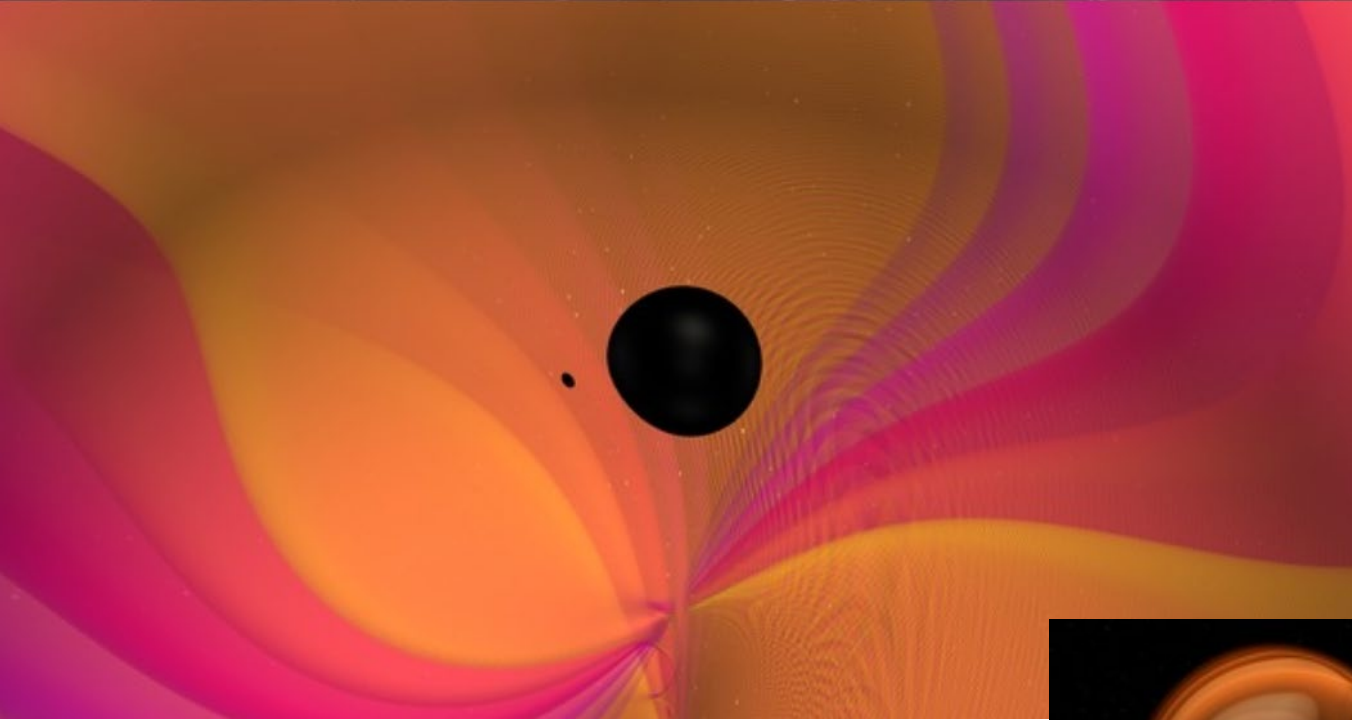


Aucun signal optique, radio, X, neutrinos

$M_{\text{avant}} 25.8 M_{\odot}$ , après  $25.6 M_{\odot}$

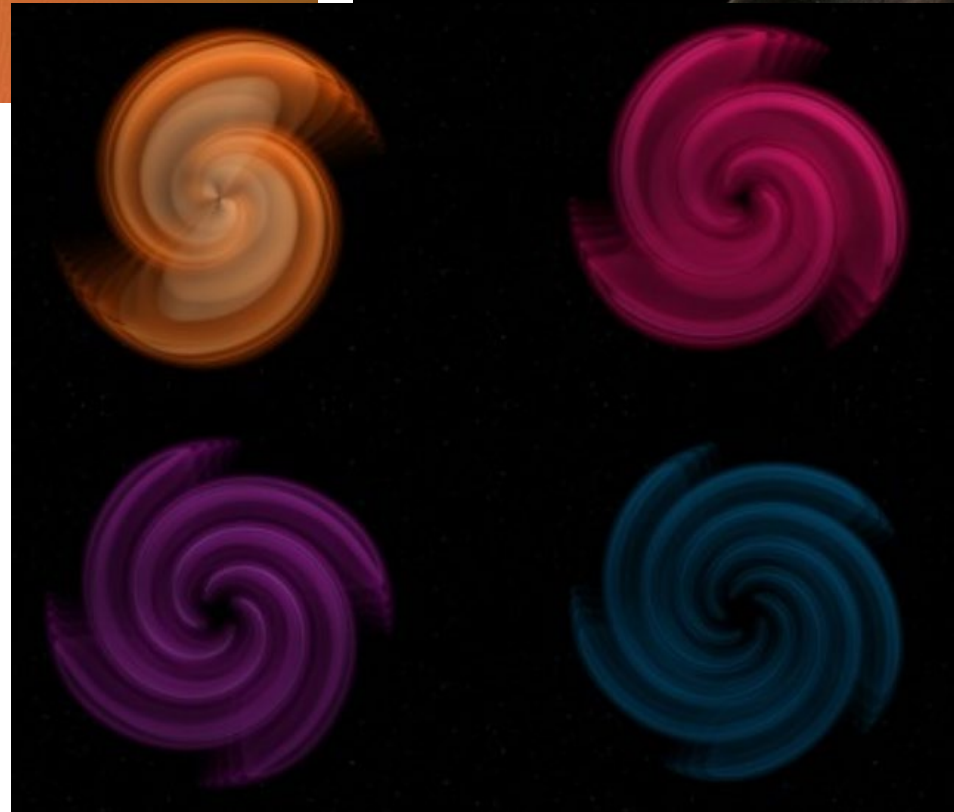
Spin du TN très faible, et spin orbital faible,  
Problème pour rendre compte du spin de l'étoile à neutrons? Ou alors quarks étranges?





## GW190814:

Le grand rapport de masse amplifie les harmoniques, multipoles



→ Nouveau test de GR



# Trou noir – étoile à neutrons



2 événements publiés en 2021

GW200105 8.9 et 1.9  $M_{\odot}$  D= 280 Mpc

et GW200115 5.7 et 1.5  $M_{\odot}$  D=300 Mpc

Très difficile de mesurer les spins

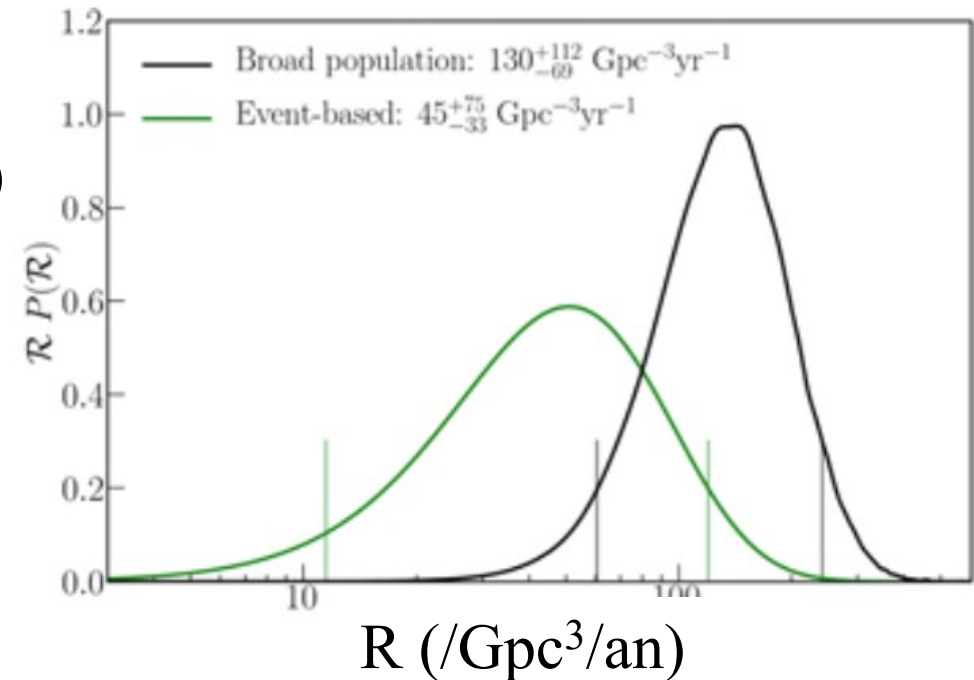
et les déformations de marée  $M_{\text{final}}$  10.4 et 7.8  $M_{\odot}$

Population et fréquence

45 /Gpc<sup>3</sup>/an

130 /Gpc<sup>3</sup> /an

Proba (R)



# Trou noir binaire et PopIII

Un grand nombre de binaires de trous noirs avec  $M > 30 M_{\odot}$

D'où viennent ces trous noirs?

Pop I/II ou bien PopIII, ou bien amas globulaires GC

Par une étude statistique → Pop I/II (86%) domine

**Pop III dans 11% des cas**, cf catalogue GW

Pourquoi le rapport de masse si proche de 1?

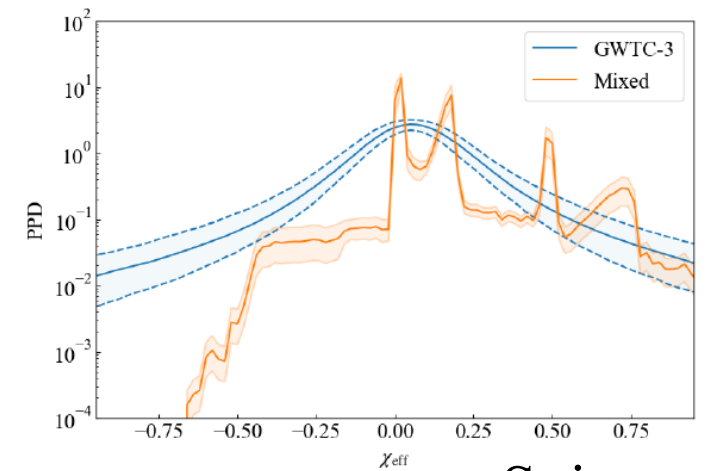
Effet d'échange de masse

“Chirp mass”

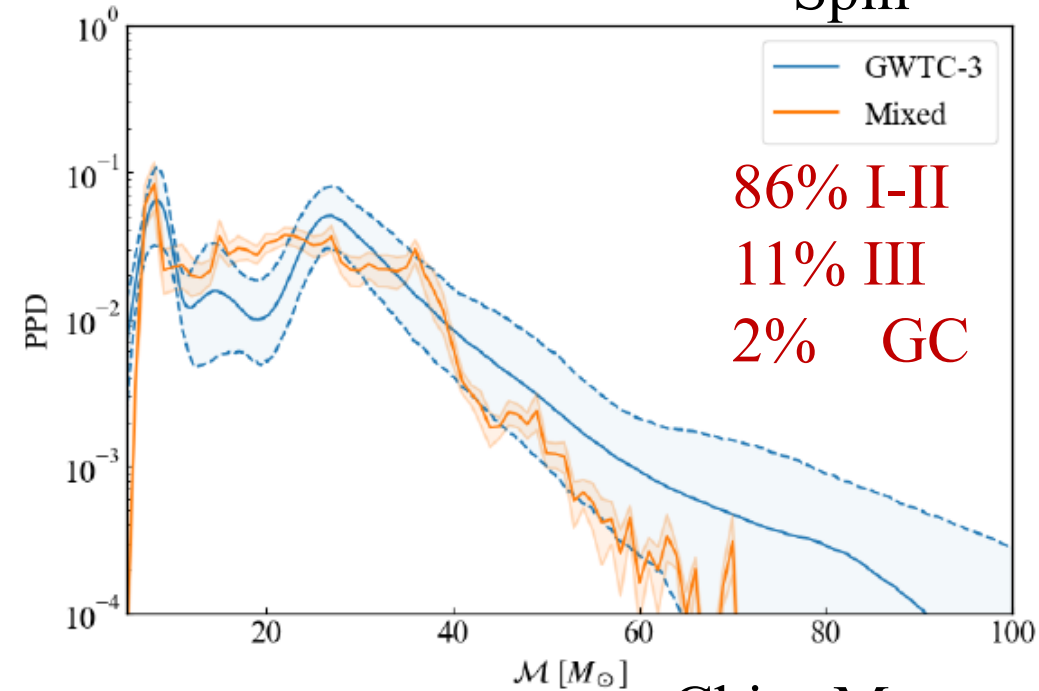
Détermine l'orbite

de la binaire et la fréquence des ondes

$$\mathcal{M} = \frac{(m_1 m_2)^{3/5}}{(m_1 + m_2)^{1/5}}$$



Spin



86% I-II

11% III

2% GC

Chirp Mass

# Résumé

## 1- Les supernovae

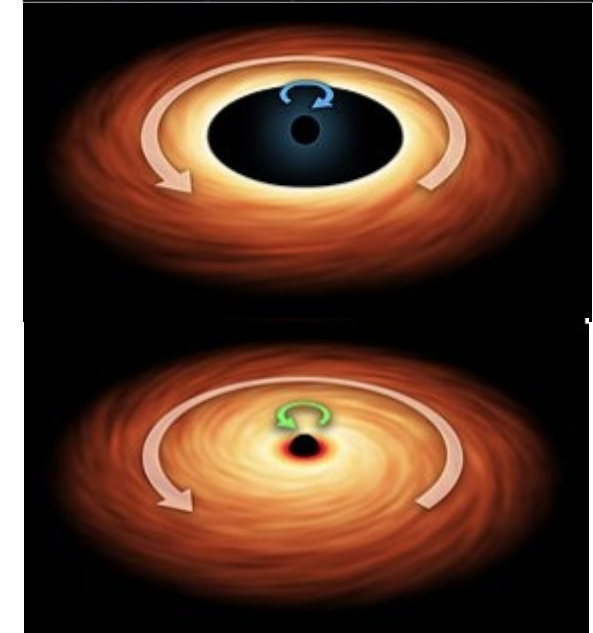
Explosion en ordinateur,  $v$  très asymétriques, éléments radioactifs aussi, + impulsion  $v \sim 1000 \text{ km/s}$

## 2- Les trous noirs

Binaires X, spins et accrétion  
Etat lumineux/soft, Faible/hard  
Trous noirs de masse intermédiaire?

## 3- Contraintes observationnelles

Sursauts X,  $\gamma$ , radio, GW



Retro

Direct