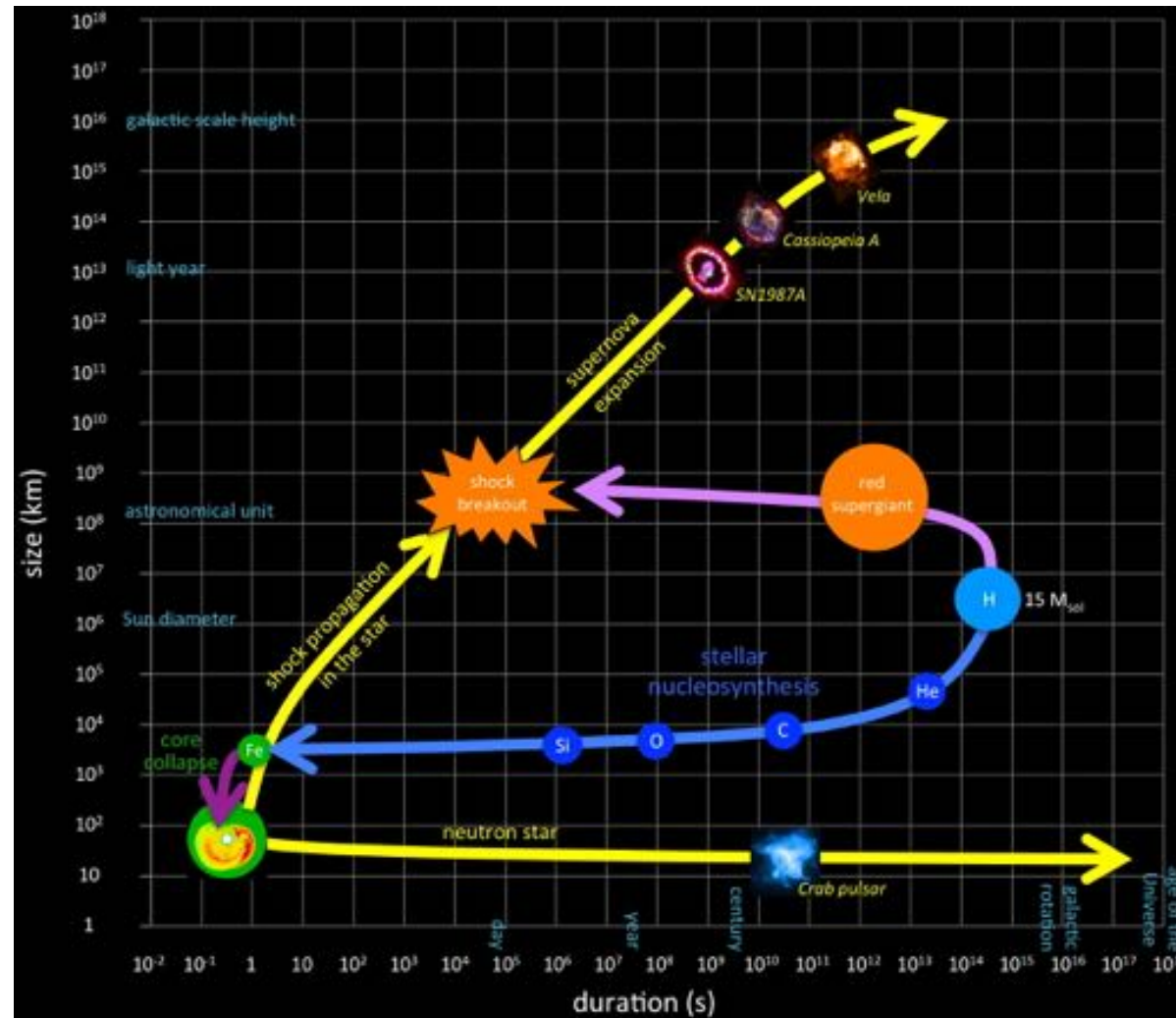
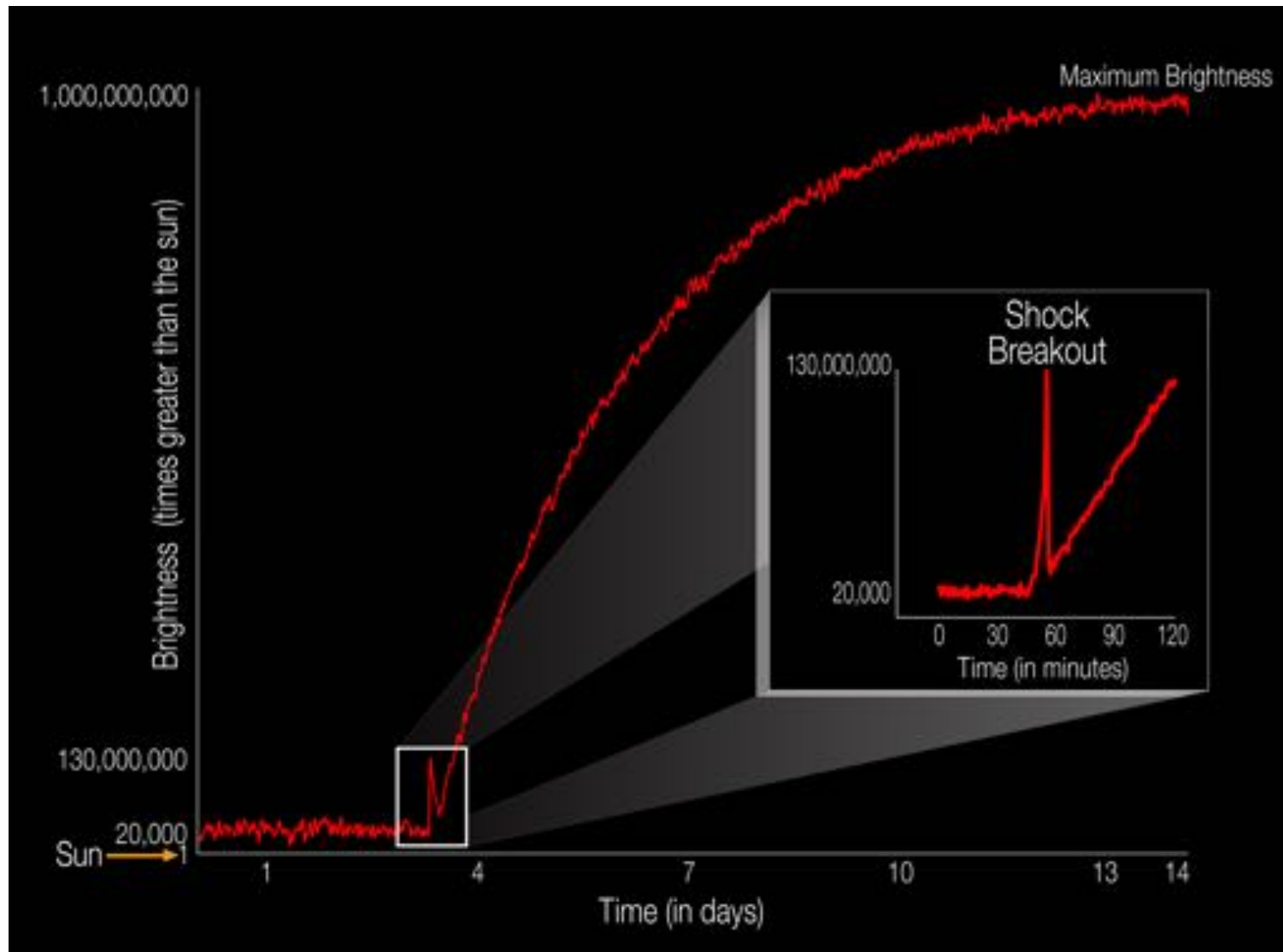




Thierry Foglizzo
CEA Saclay

Latest news: émergence du choc d'une supernova observée par Kepler

Garnavich+16



KSN 2011d

SNII-P

supergéante rouge $490R_{\text{sol}}$
 2×10^{51} erg

credit: NASA Ames/W. Stenzel

Phénomènes explosifs

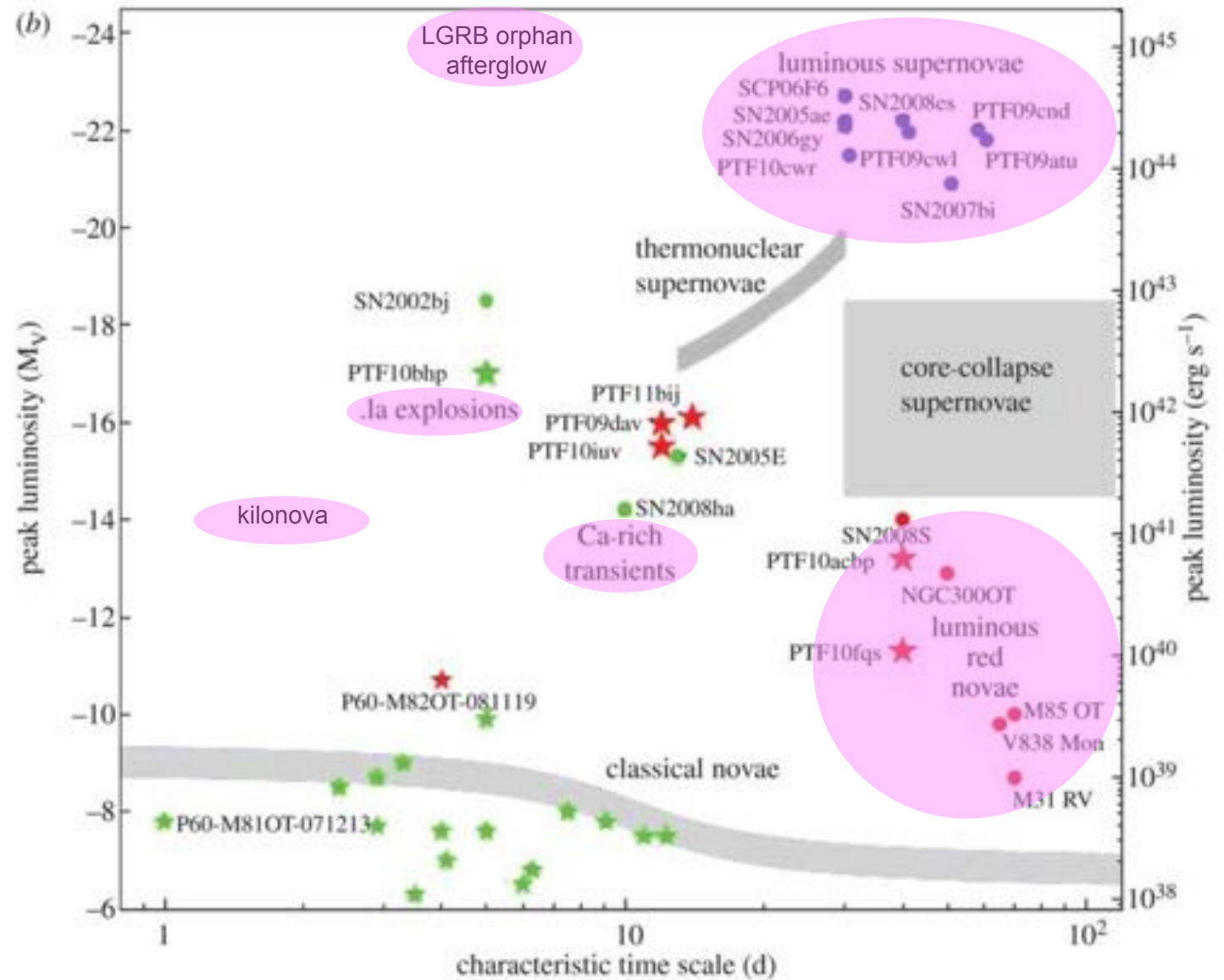
Zoologie en expansion:

supernovae
SNIa, **SNIax**, **SNIa**
SNIb, SNIc, SNIIP, SNIIL, SNIIL

supernova superlumineuse
hypernova
kilonova
sursaut gamma court/long
orphan afterglow
Ca-rich transients
Fast Radio Burst
luminous red nova
(X ray burst, recurrent nova)

Diagnostics multi- λ :

courbe de lumière
spectre
nucleosynthèse
neutrinos
ondes gravitationnelles
rayons cosmiques



Progéniteurs

Cœur d'étoile massive isolée ou résultant d'une **interaction binaire**

9-10M _{sol}	O-Ne-Mg → NS	<i>e-capture SN</i>
10-50M _{sol}	Fe → NS/ magnetar /BH	<i>SNII, SNIbc, SLSN, GRB long</i>
>140M _{sol}	O → ejecta	<i>PISN, SLSN</i>

Etoile compacte en système binaire:

WD + étoile/WD	→ étoile/ WD /ejecta	<i>SN Ia, SNIax, SN Ia</i>
WD + NS	→ NS/BH	<i>Ca rich transient</i>
NS + NS/BH	→ magnetar /BH	<i>GRB court, kilonova</i>
BH + BH	→ BH	<i>GW</i>

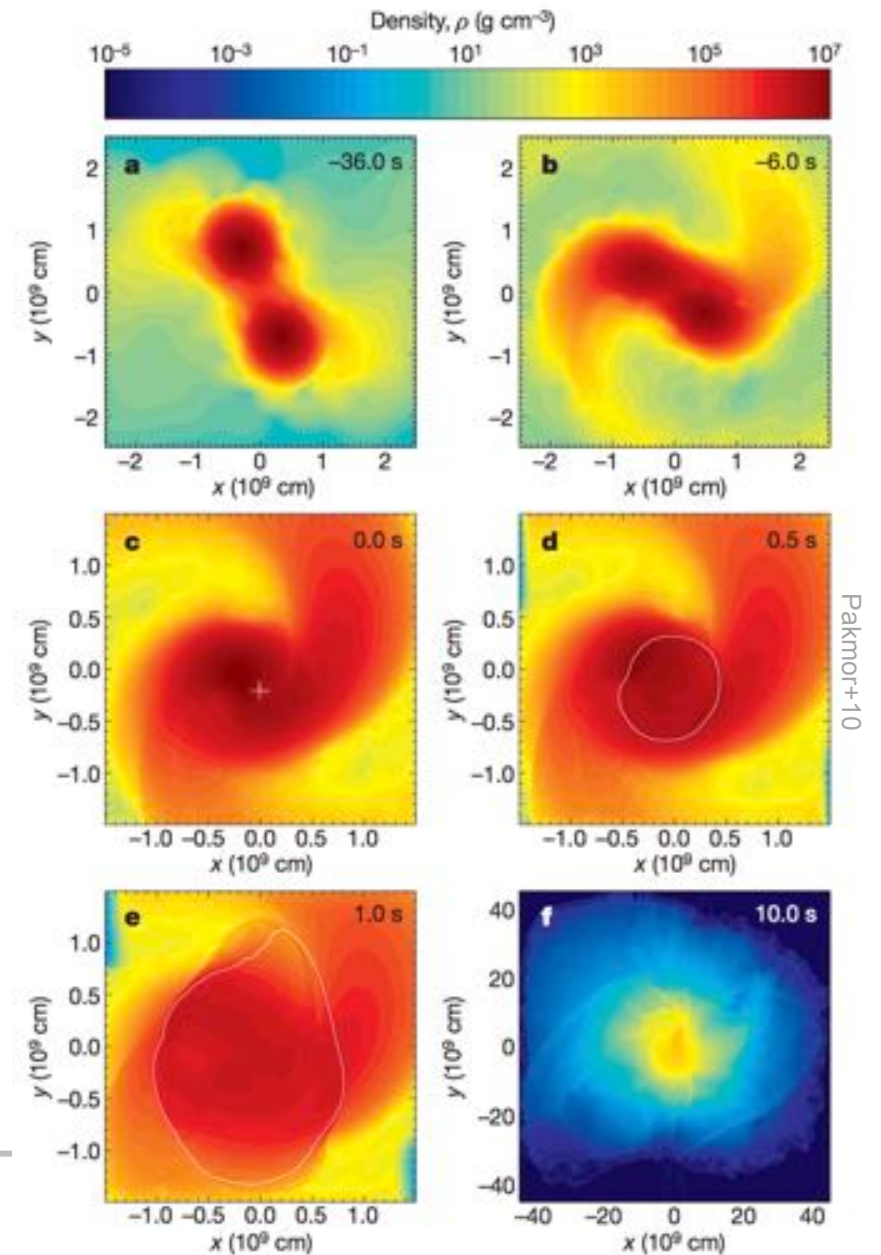
Supernovae thermonucléaires SNIa

Faiblesses du scénario SD (WD+compagnon)

- absence de détection du compagnon
- synthèse de population inférieure au taux observé

-SNIa sous lumineuse par coalescence de 2 naines blanches

$0.9M_{\text{sol}} + 0.9M_{\text{sol}}$ (Pakmor+10)



Supernovae thermonucléaires SNIa

Faiblesses du scénario SD (WD+compagnon)

- absence de détection du compagnon
- synthèse de population inférieure au taux observé

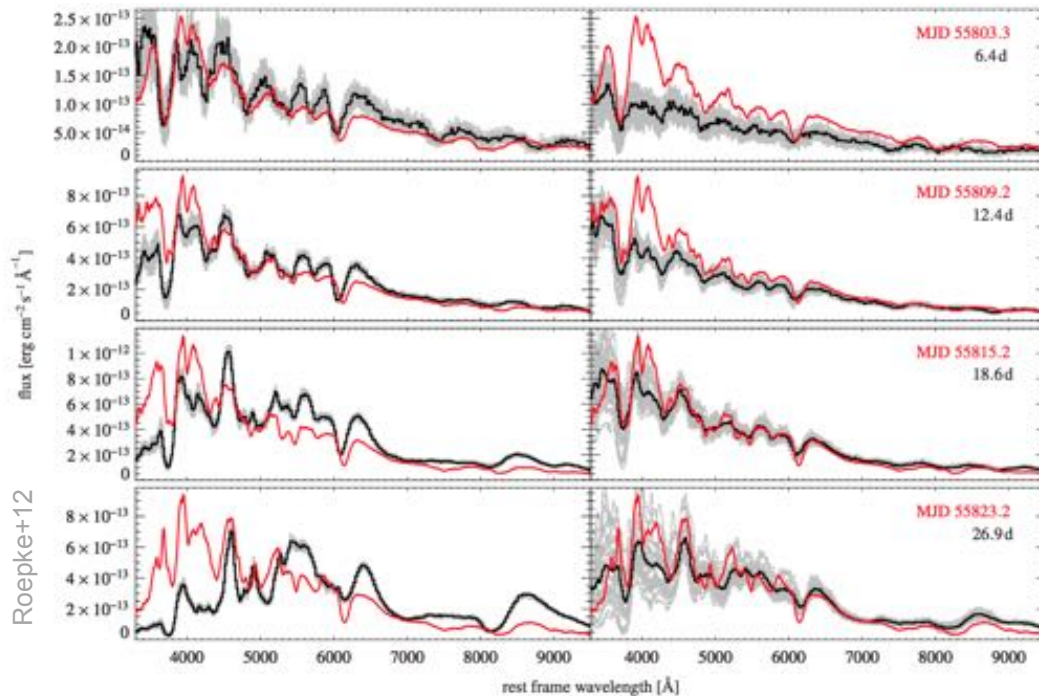
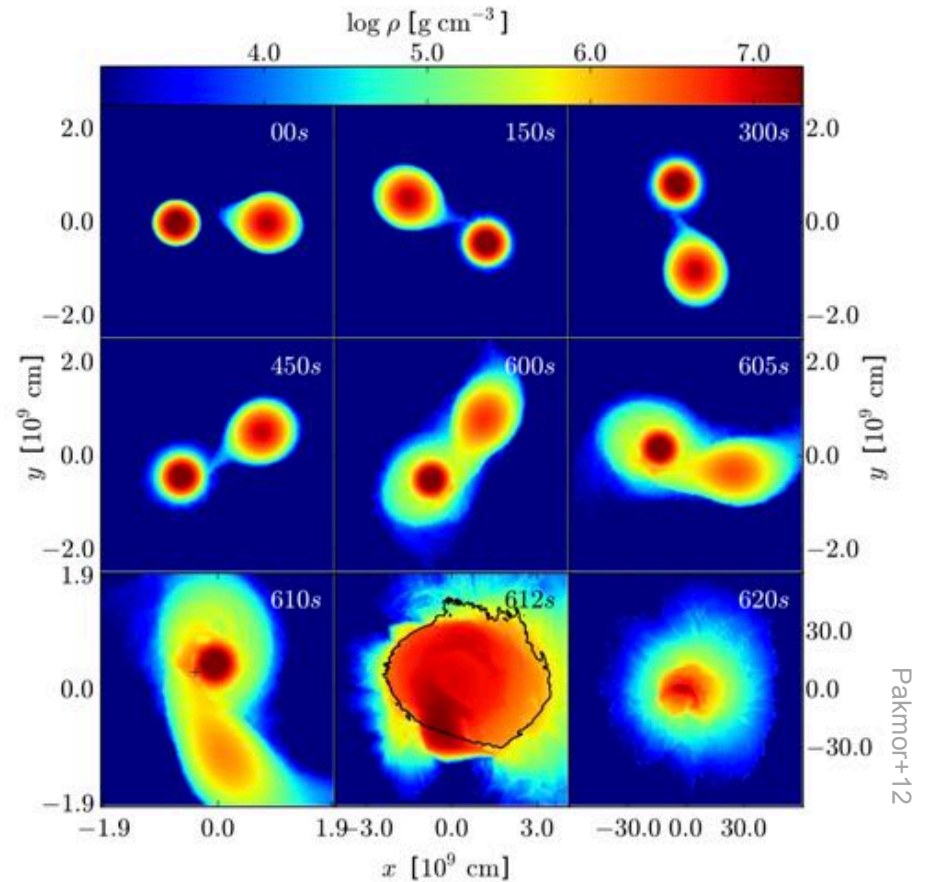
-SNIa sous-lumineuse par coalescence de 2 naines blanches

$0.9M_{\text{sol}} + 0.9M_{\text{sol}}$ (Pakmor+10)

-SNIa “normale” par coalescence de 2 naines blanches

$0.9M_{\text{sol}} + 1.1 M_{\text{sol}}$ (Pakmor+12)

-Comparaison au modèle de détonation retardée (Roepke+12)



Supernovae thermonucléaires SNIa

Faiblesses du scénario SD (WD+compagnon)

- absence de détection du compagnon
- synthèse de population inférieure au taux observé

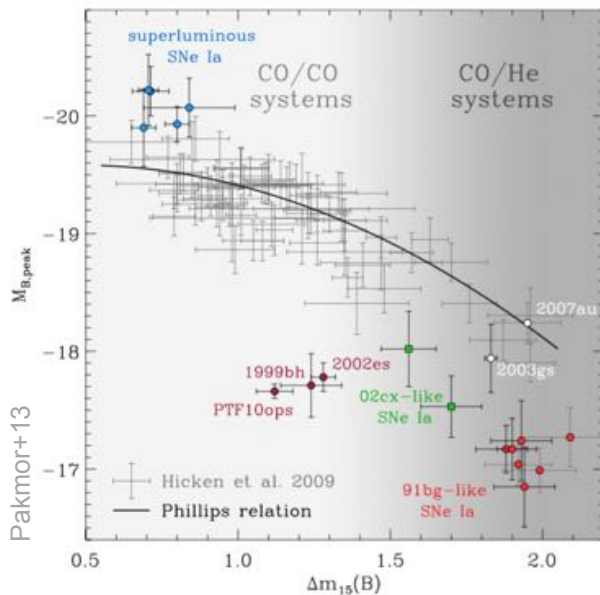
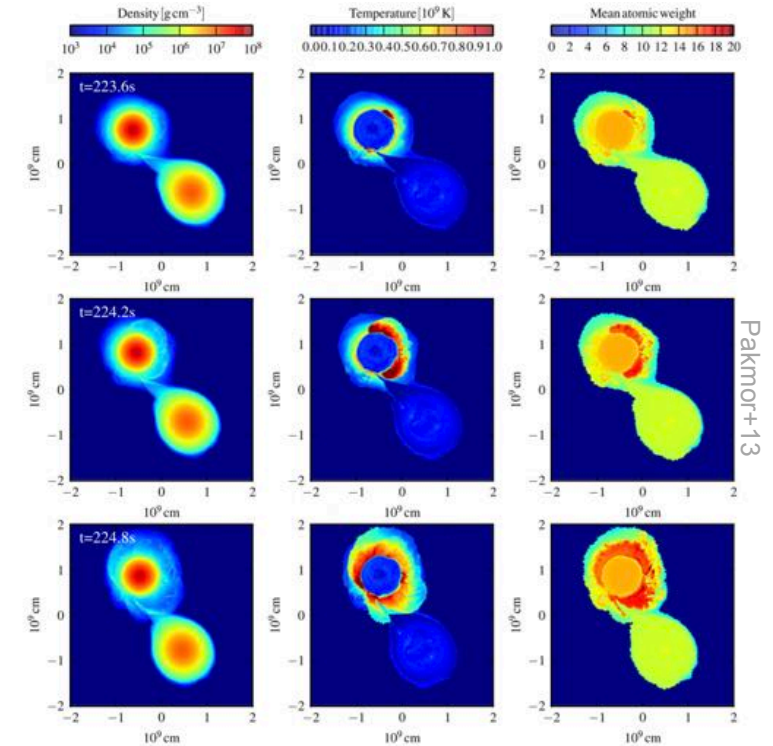
-SNIa sous-lumineuse par coalescence de 2 naines blanches

$$0.9M_{\text{sol}} + 0.9M_{\text{sol}} \text{ (Pakmor+10)}$$

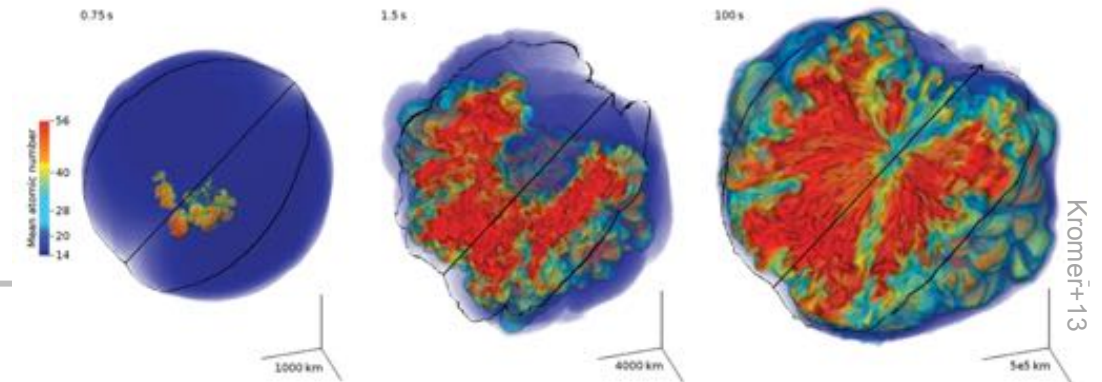
-SNIa “normale” par coalescence de 2 naines blanches

$$0.9M_{\text{sol}} + 1.1M_{\text{sol}} \text{ (Pakmor+12)}$$

-Diversité des SNIa par coalescence de 2 naines blanches
CO/CO ou CO/He avec double detonation d’une fine couche
d’helium (Pakmor+13, Dessart & Hillier 2015)



-déflagration pure dans 5% des cas ? (Kromer+13, Fink+14)



Supernovae thermonucléaires SNIa

Faiblesses du scénario SD (WD+compagnon)

- absence de détection du compagnon
- synthèse de population inférieure au taux observé

-SNIa sous-lumineuse par coalescence de 2 naines blanches
 $0.9M_{\text{sol}} + 0.9M_{\text{sol}}$ (Pakmor+10)

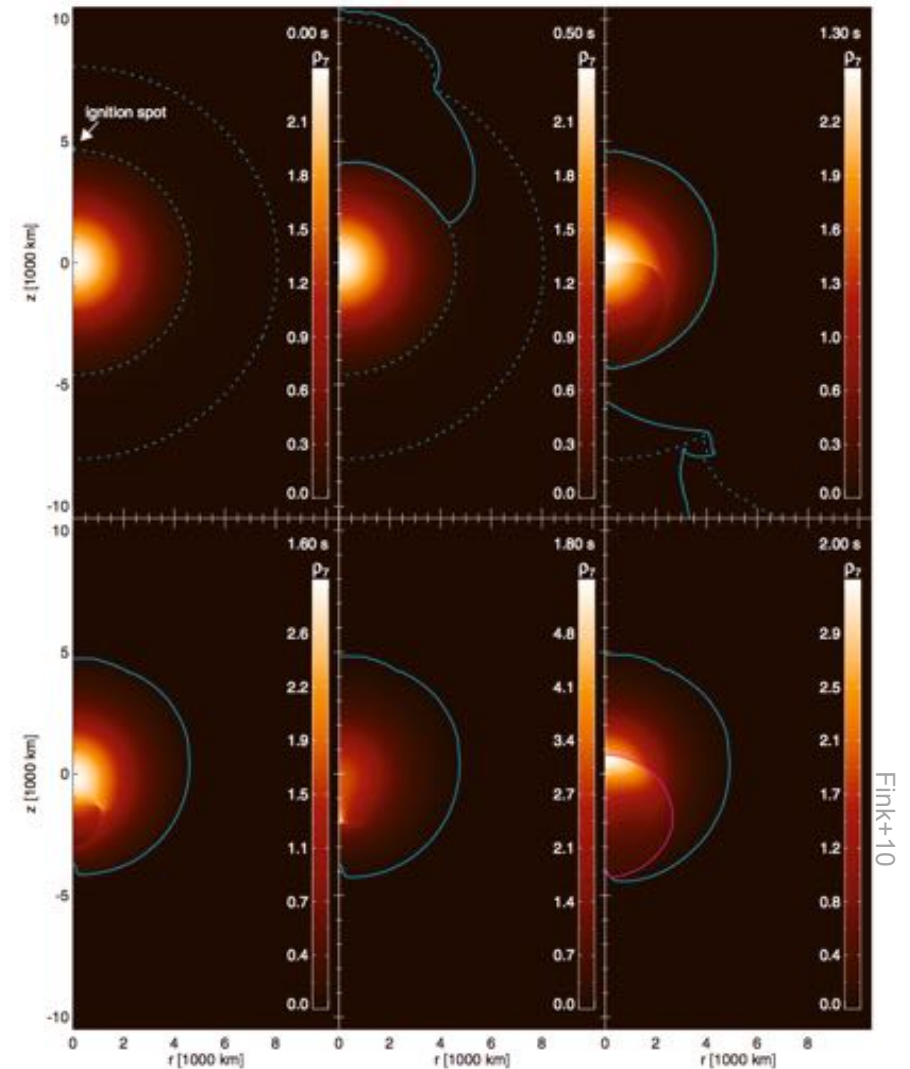
-SNIa “normale” par coalescence de 2 naines blanches
 $0.9M_{\text{sol}} + 1.1 M_{\text{sol}}$ (Pakmor+12)

-Diversité des SNIa par coalescence de 2 naines blanches
CO/CO ou CO/He avec double detonation d’une fine couche
d’helium (Pakmor+13, Dessart & Hillier 2015)

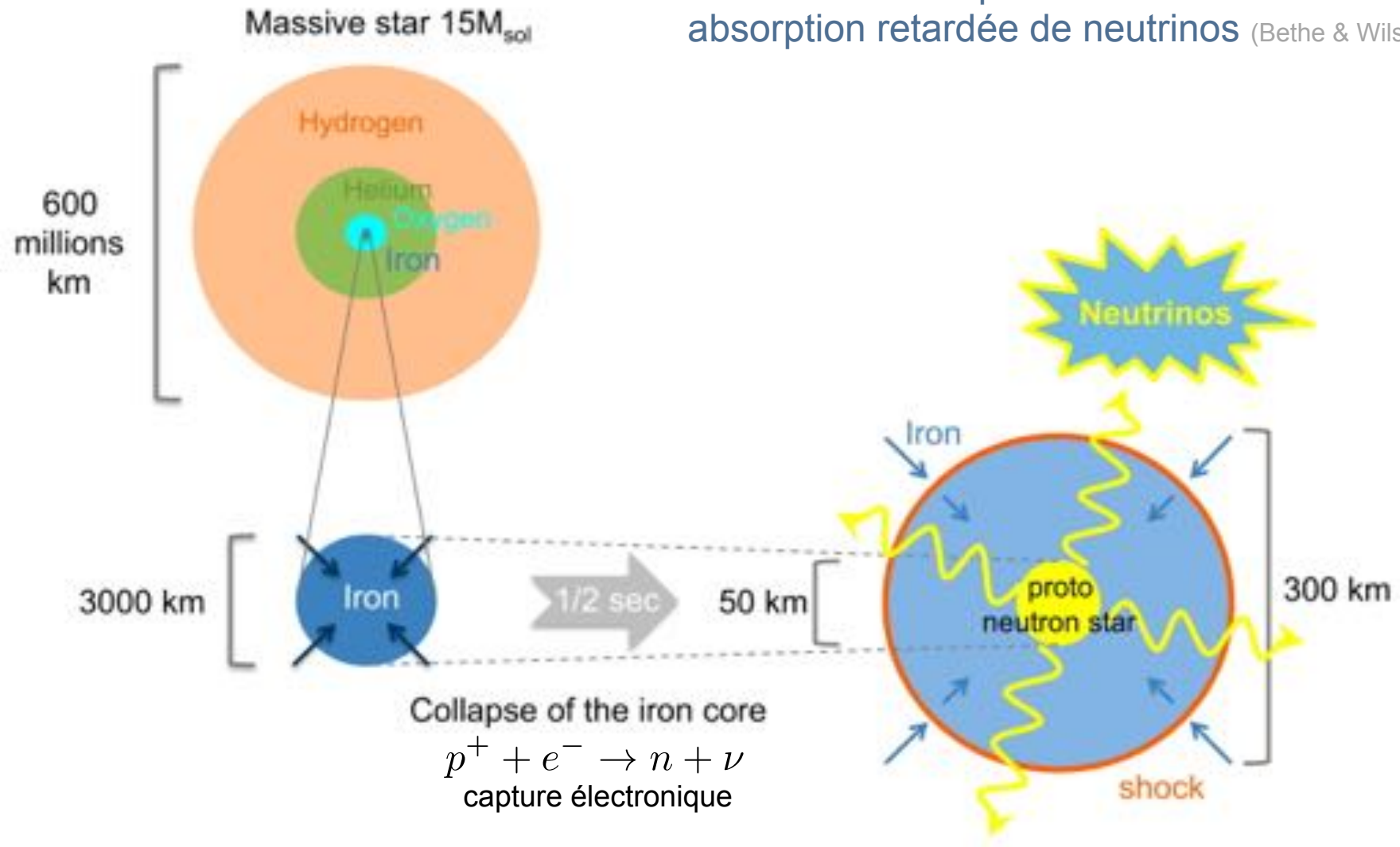
-Detonation retardée (Roepke+12, Seitenzahl+13)

-Déflagration pure (Kromer+13, Fink+14)

-SNIa par double detonation sub-Chandrasekhar
($0.8M_{\text{sol}}\text{C/O}+0.1M_{\text{sol}}\text{He}$) à ($1.28M_{\text{sol}}\text{C/O}+0.01M_{\text{sol}}\text{He}$)
(Fink+07, +10)



Mécanisme d'explosion des étoiles massives absorption retardée de neutrinos (Bethe & Wilson 85)



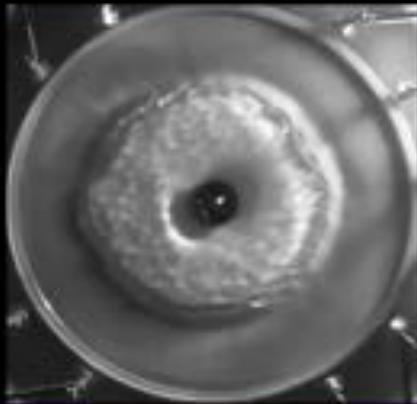
$$\frac{GM_{\text{ns}}^2}{R_{\text{ns}}} \sim 2 \times 10^{53} \text{erg} \left(\frac{30 \text{km}}{R_{\text{ns}}} \right) \left(\frac{M_{\text{ns}}}{1.5M_{\text{sol}}} \right)^2$$

Energie cinétique différentielle:

$$E_{\text{diff}} < E_{\text{rot}} \sim 2.4 \times 10^{50} \text{erg} \left(\frac{M_{\text{ns}}}{1.5M_{\text{sol}}} \right) \left(\frac{R_{\text{ns}}}{10 \text{km}} \right)^2 \left(\frac{10 \text{ms}}{P_{\text{ns}}} \right)^2$$

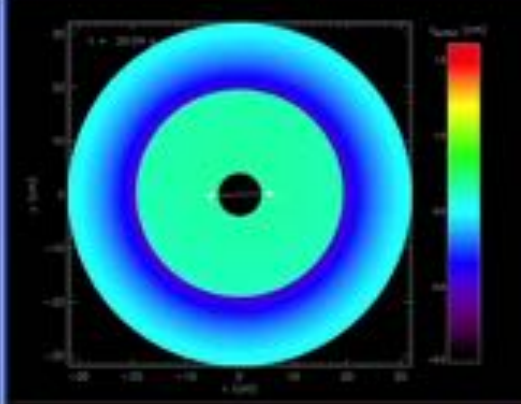
Analogue expérimental de la dynamique du choc (Foglizzo+12)

Dynamics of water
in the fountain

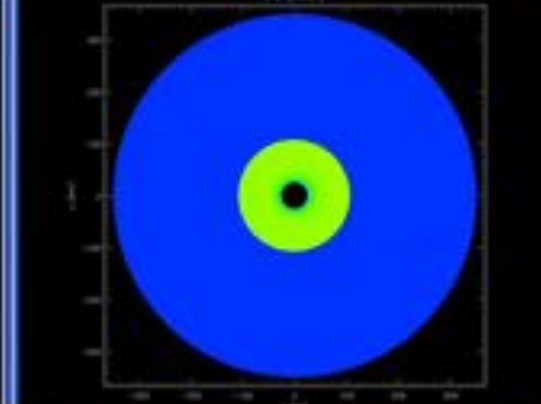


Expérience hydraulique

Dynamics of the gas
in the supernova core



Simulation numérique de l'expérience hydraulique



*Simulation numérique de l'onde de choc
dans le cœur de la supernova*

diameter 40cm
3s/oscillation

1 000 000 x bigger
100 x faster

diameter 400km
0.03s/oscillation

SN₂NS

Supernovae explosions, from stellar core-collapse
to neutron stars and black holes



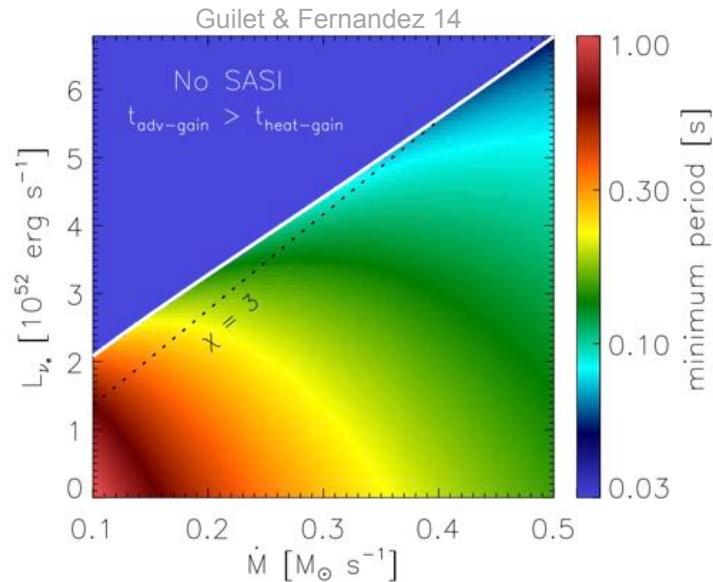
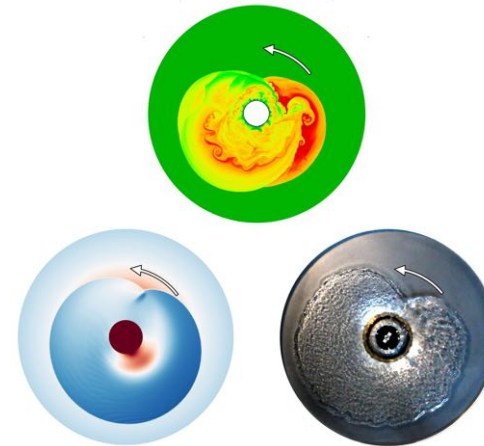
La fontaine aux supernovae au Palais de la Découverte, Paris

17 décembre 2013-16 février 2014

12 chercheurs

138 présentations

2059 visiteurs



-développement du code d'effondrement gravitationnel CoCoNuT: relativité générale, équation d'état avec hyperons (Peres+13)

-base publique d'équations d'état CompOSE.obspm.fr (Typel, Oertl, Klähn 2015)

-incidence de l'instabilité de choc SASI sur le spin des pulsars à la naissance (Guilet & Fernandez 14, Kazeroni+16)

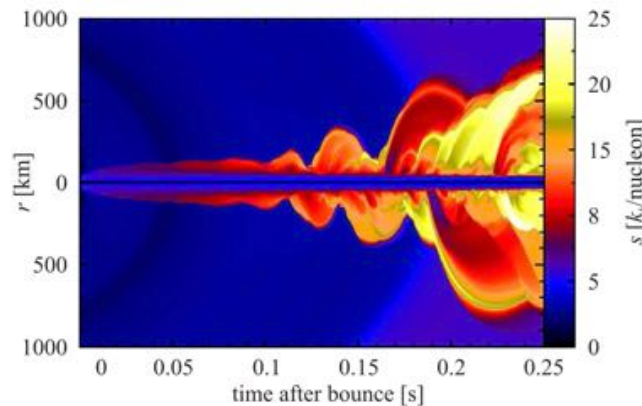
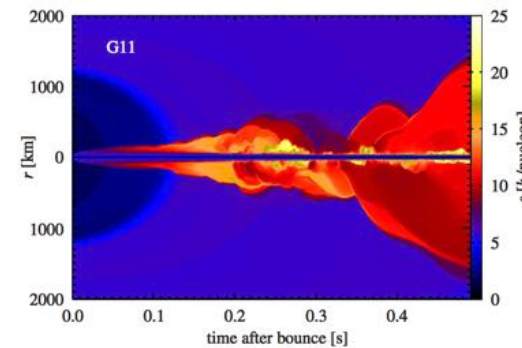
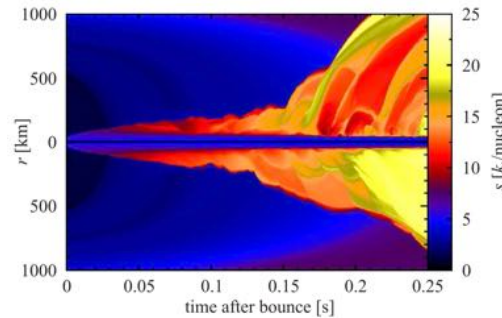
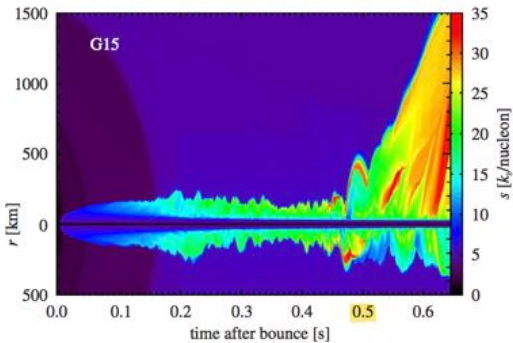
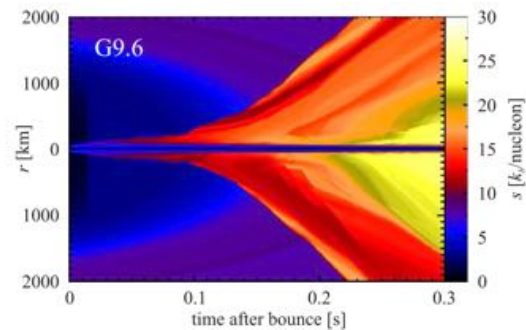
Progrès des explosions ab initio de supernovae : diversités de scénarios

-explosions ab initio 2D axisymétrique

8.1, 9.6 ,11.2, 15, 27M_{sol} (MPA)

12, 15, 20, 25 M_{sol} (ORNL)

(Müller+12a,b,+13, Bruenn+13)



-selon le progéniteur, évolution dynamique dominée par la poussée d'Archimède induite par l'absorption de neutrinos (11.2M_{sol}) ou par SASI (27M_{sol}) ou les deux (15M_{sol})

-compétition entre les échelles de temps advective et Brunt-Vaisala (Foglizzo+06, Fernandez+13)

$$\chi \equiv \int_{\text{sh}}^{\text{gain}} \omega_{\text{BV}} \frac{dr}{v_r} < 3$$

-faible énergie d'explosion < 10⁵¹ erg

-manque de convergence numérique (Bruenn+13)

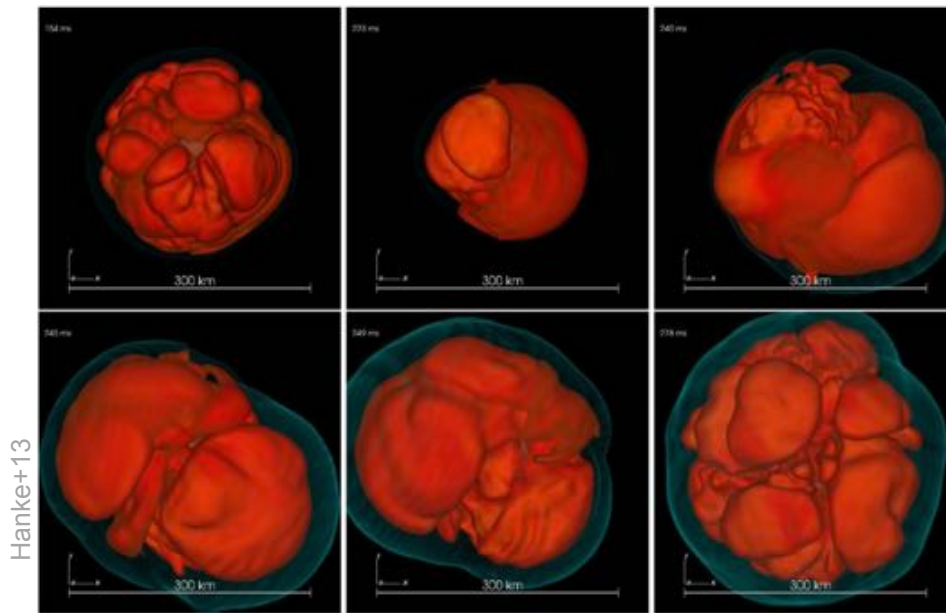
-transport de neutrinos approximatif (Dolence+14)

Les débuts des simulations 3D ab initio (MPA Garching)

-L'explosion n'est pas plus facile à obtenir à 3D qu'à 2D (Hanke+12, Couch & O'Connor 13)

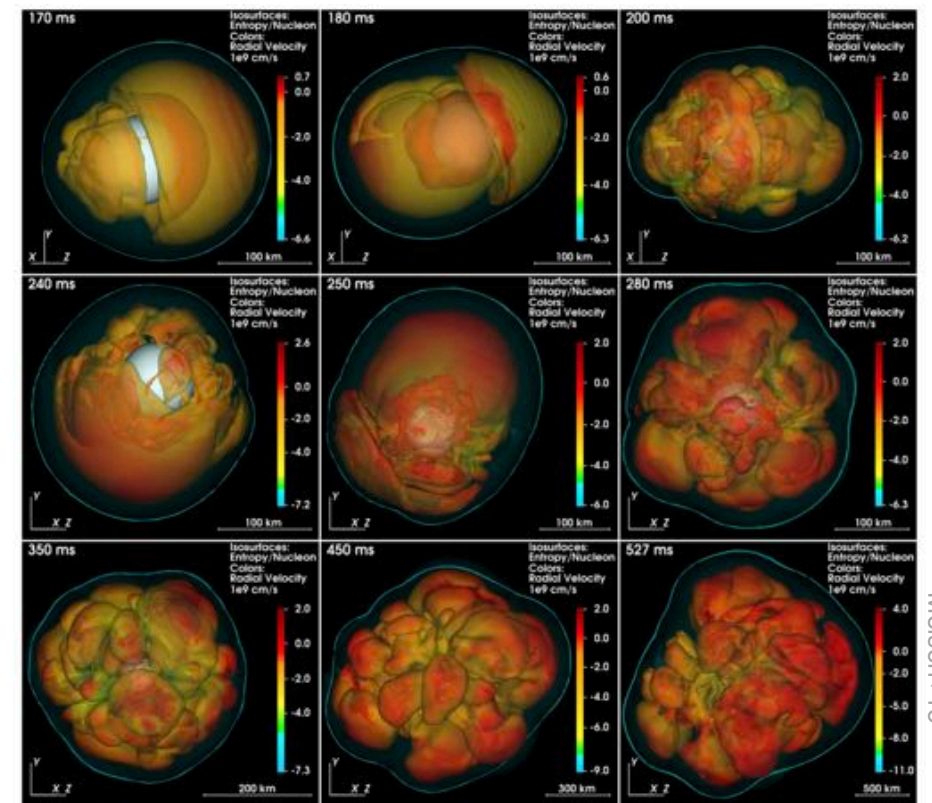
-La première simulation 3D n'a pas explosé après 380ms (Hanke+13)

... mais une modification mineure (étrangeté du nucléon) a suffi à produire une explosion (Melson+15)



projet PRACE 150 millions d'heures
16.000 processeurs, 4,5 mois/modèle

durée d'évolution: 500ms
diamètre: 300km



Melson+15

L'espace des paramètres a diminué en physique nucléaire, augmenté en structure stellaire

-l'équation d'état est mieux contrainte

PSR J1614-2230: $M=1.97M_{\text{sol}}\pm0.04$ (Demorest+10)

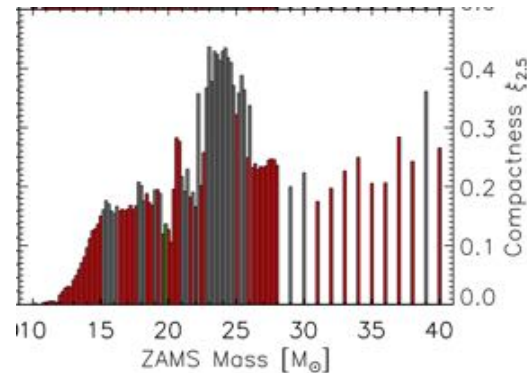
J0348+0432: $M=2.01M_{\text{sol}}\pm0.04$ (Antoniadis+13)

-l'explosion est sensible à la compacité ξ et aux asymétries du progéniteur

(O'Connor & Ott 11, Couch & Ott 13, Müller+15)

-la structure du cœur est une fonction complexe de la masse de l'étoile à sa naissance

(Uglio+12, Ertl+16)



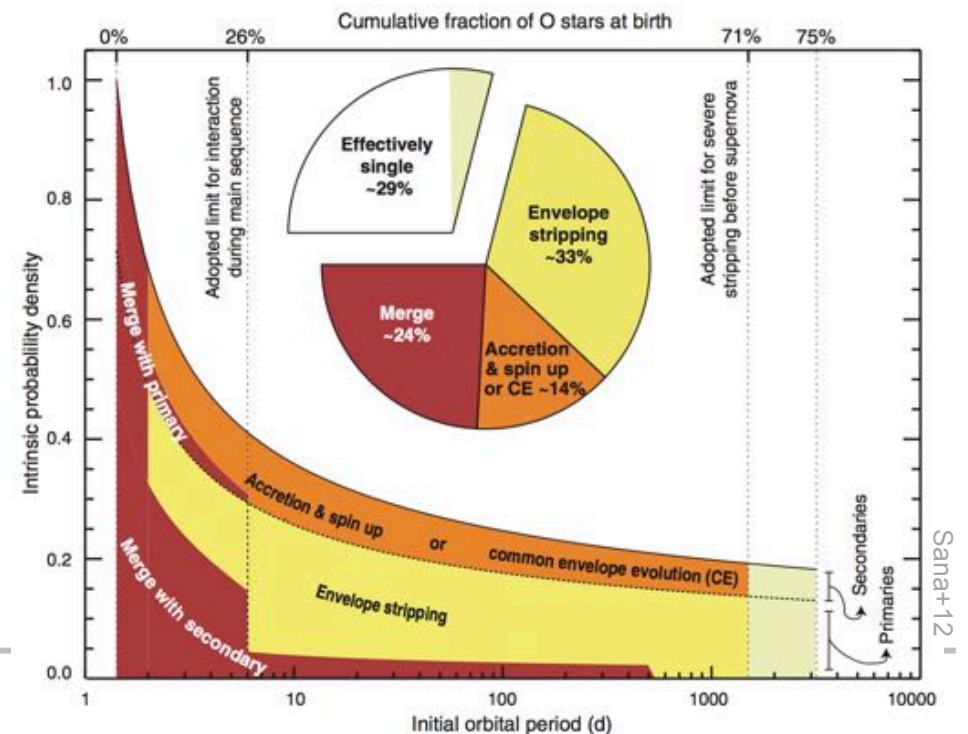
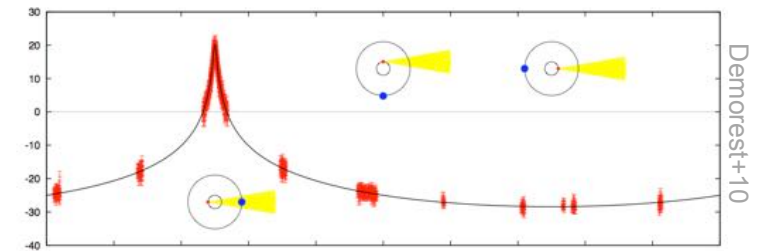
$$\xi_{2.5} \equiv \frac{M/M_{\text{sol}}}{R(M)/1000 \text{ km}}$$

-70% des étoiles massives ont eu une interaction binaire

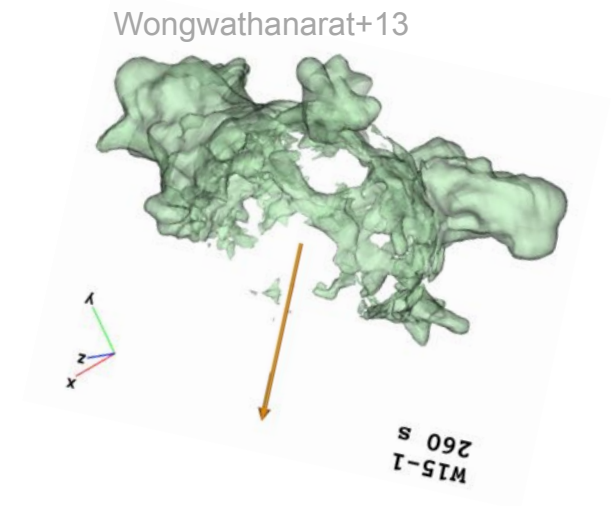
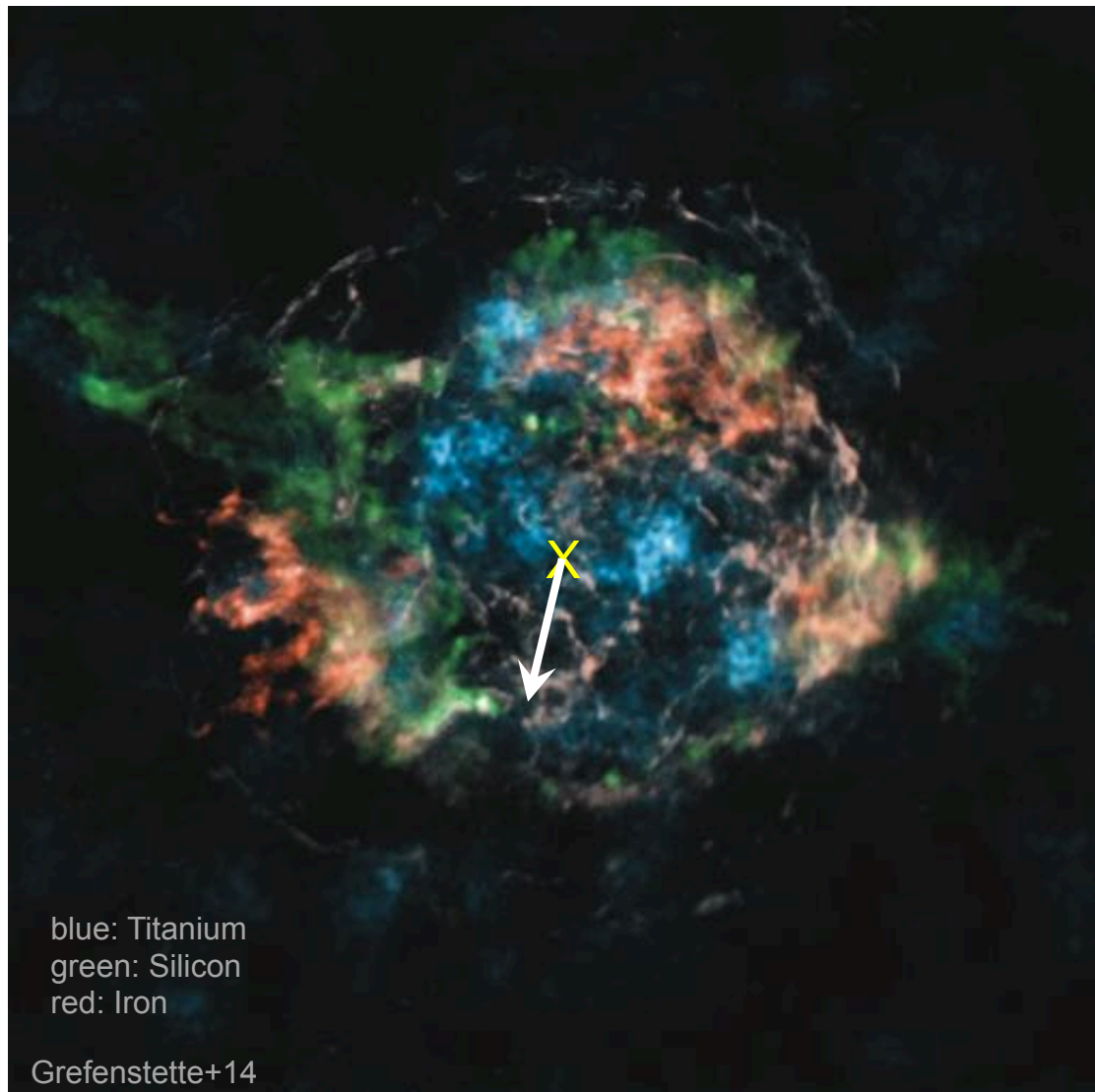
(Sana+12 Science)

-le progéniteur d'une supernovae peut être le fruit de coalescences

-le profil de moment cinétique peut être modifié par l'interaction binaire



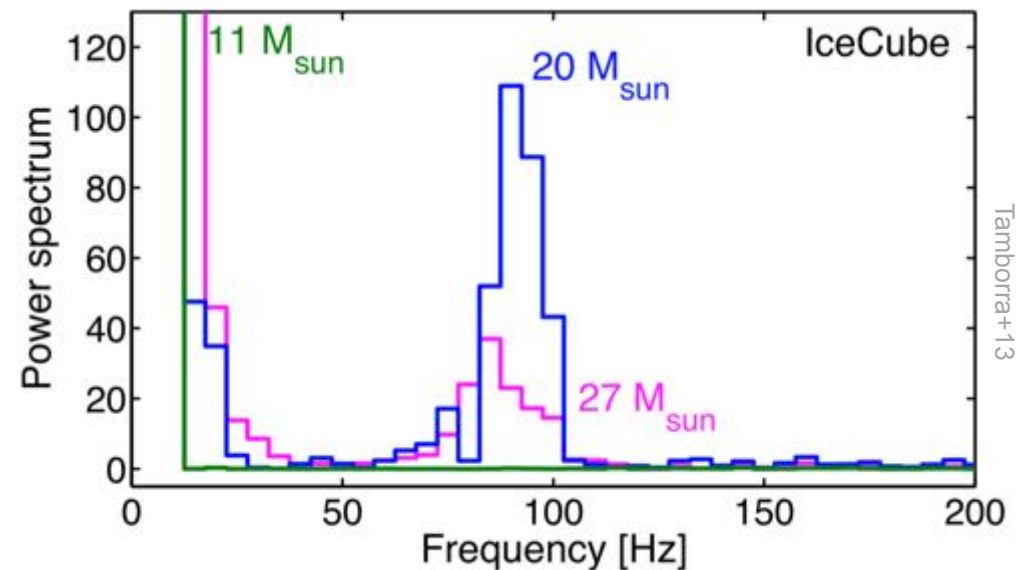
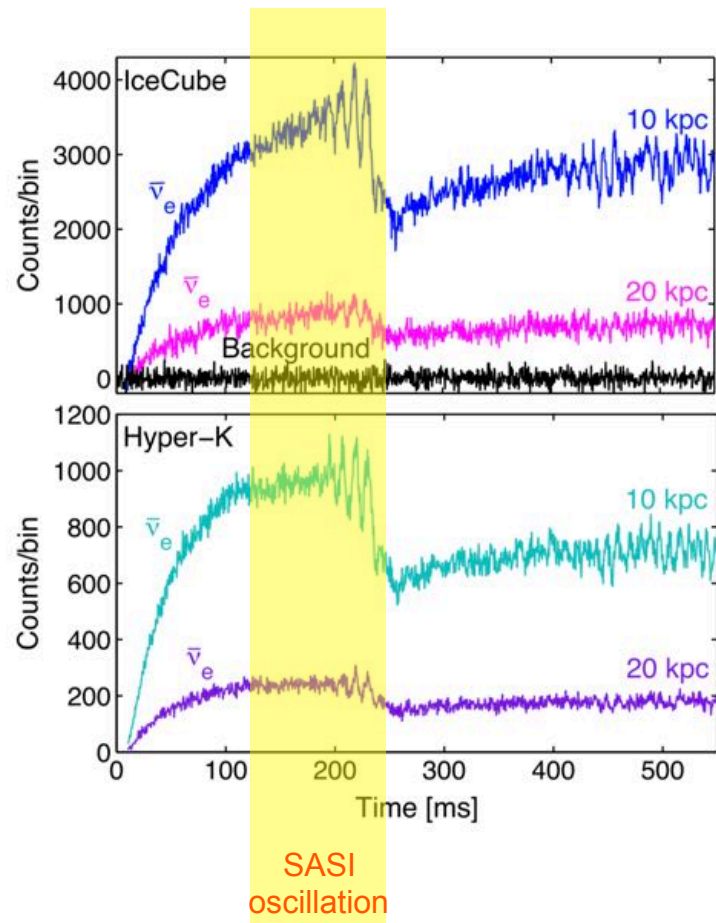
Hydrodynamique 3D asymétrique des supernovae gravitationnelles



Signature plus directe portée par les neutrinos (Tambora+13) et les ondes gravitationnelles (Kotake 2013)

Modulation attendue du flux de neutrinos d'une supernova galactique

IceCube & Hyper-Kamiokande peuvent détecter les oscillations induites par SASI (Tamborra+13,14):
signature directe du mécanisme d'explosion asymétrique



Supernovae superlumineuses

Luminosité 10-100 fois supérieure à une SNIa, et persistante
Observées jusqu'à des distances cosmologiques

$z=2.05$ et $z=3.9$ (Cooke+12 Nature)

-interaction avec une coquille circumstellaire ?

SN2010jl (Dessart+15)

-instabilité de création de paires ?

$260M_{\odot} > M > 140M_{\odot}$

cœur C-O $2\gamma \rightarrow e^+ + e^-$

SN2007bi (Gal-Yam+09 Nature, Dessart+13)

-énergie magnétique d'un magnétar ?

décélération rotationnelle d'un magnétar milliseconde

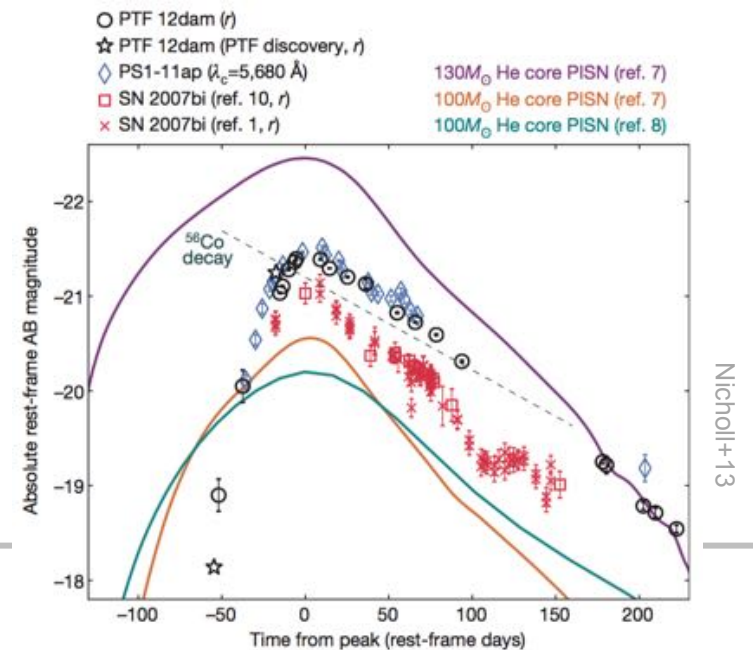
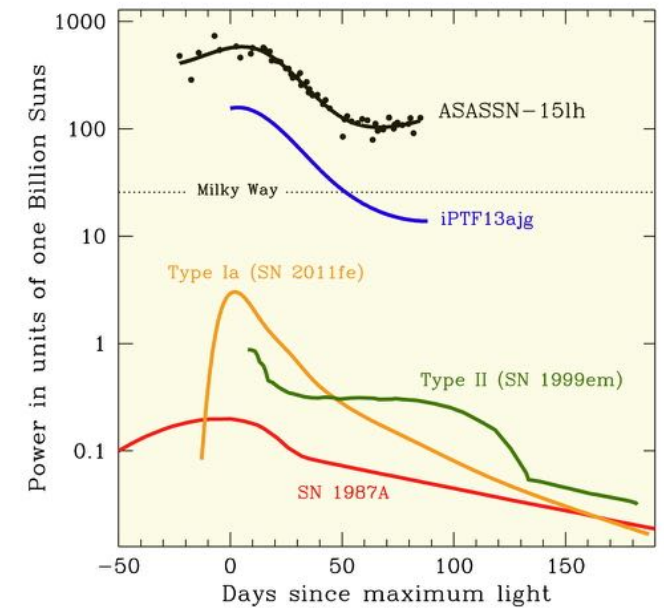
décroissance plus rapide que $Ni \rightarrow Co \rightarrow Fe$

croissance plus rapide qu'une PISN

PTF12dam (Nicholl+13 Nature)

SN2007bi, PTF09atu (Dessart+12)

ASSASN-15lh ? (Dong+16)



Sursauts gamma longs

- confirmation de l'association aux régions de formation d'étoiles massives

- sous-classes de sursauts longs:

- X-ray flashes, X-ray rich, underluminous, ultra-longs

- observation multi- λ détaillée d'un sursaut "proche":

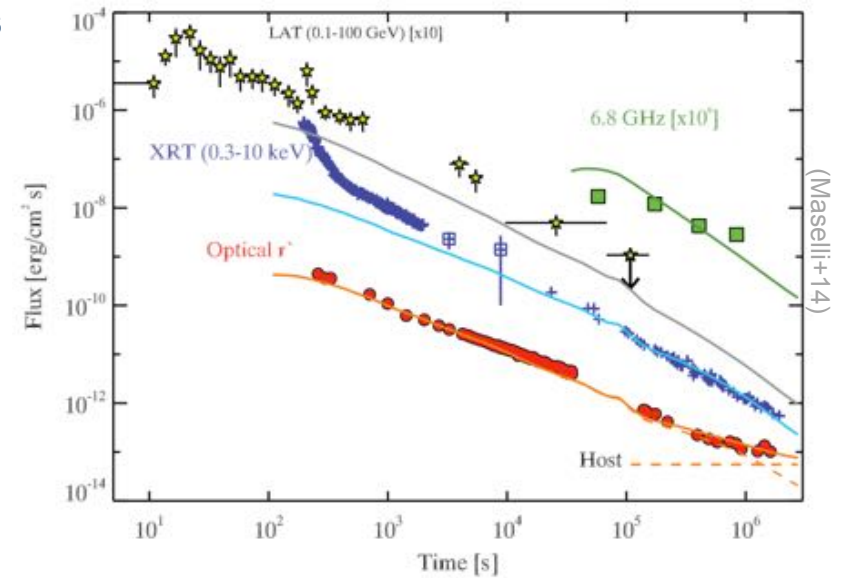
- GRB 130427A (Maselli+14)

- record de redshift photométrique: GRB 090429B $z=9.4$ (Cucchiara+11)

- SN2009bb: détection radio ("engine powered SNIbc") sans GRB, lorsque le jet n'est pas orienté vers la Terre (Soderberg+10)

- caractérisation du spectre de l'émission prompt >100 MeV (Fermi-LAT)

- possible détection d'une composante quasi-thermique faible <1 MeV (Fermi-GBM)



- Chauffage synchrotron par chocs internes ou par reconnection ?

- (Bosnjak & Daigne 2014)

Moteur des sursauts longs: magnetar vs collapsar ?

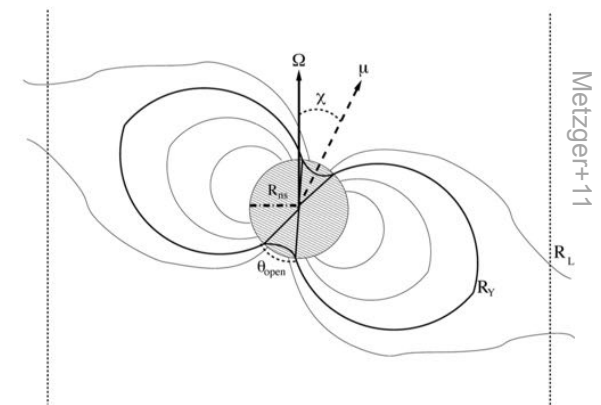
Modèle de magnétar (Metzger+11)

Modélisation ab initio d'un magnetar: projet ERC J. Guilet 2016 (MPA→AIM)

- simulations numériques de l'amplification du champ magnétique pendant

- l'effondrement (MRI, convection)

- simulations de la propagation et émergence du jet relativiste



Sursauts gamma courts et nucleosynthèse

observation HST d'une kilonova associée à un sursaut court
GRB130603B

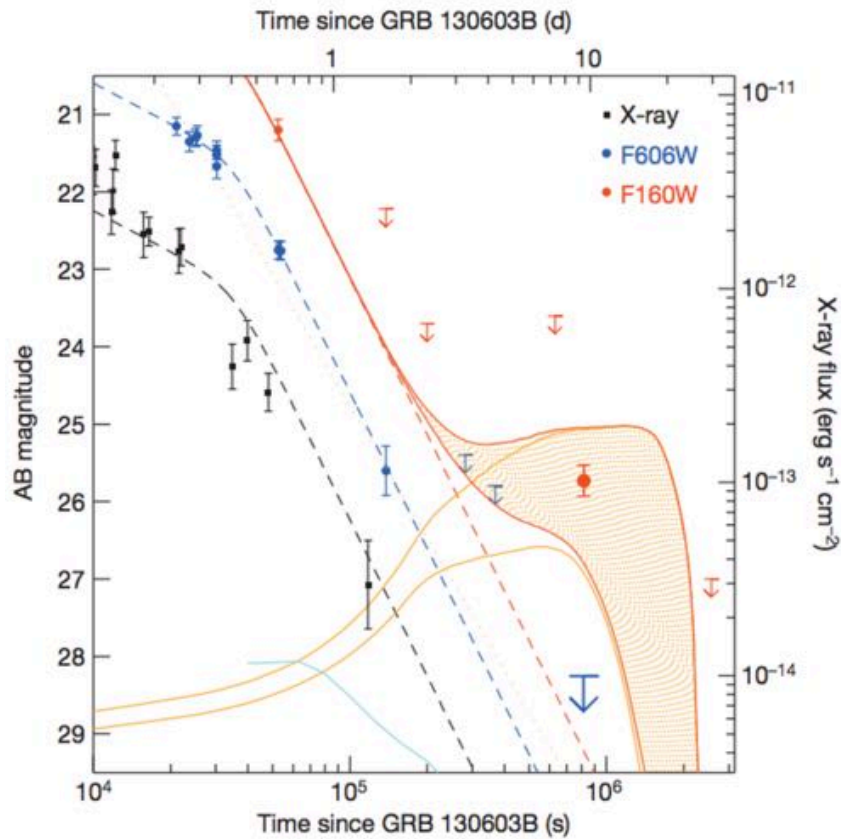
nucleosynthèse des éléments lourds "r-process"

Tanvir+13 Nature

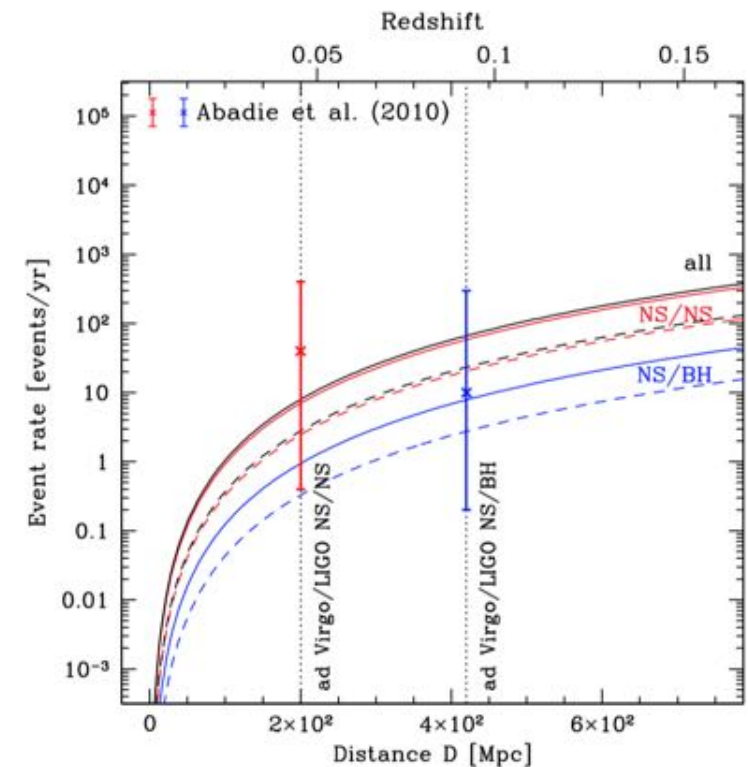
Berger+13

signature attendue des sursauts courts

en ondes gravitationnelles depuis la détection de GW150914



taux de coalescences NS-NS, NS-BH et kilonovae déduits
de l'abondance de l'euprium (Vangioni+16)



The background of the slide is a composite image. It features a satellite, identified as SVOM, in the foreground. The satellite is a complex, multi-colored (gold, silver, red, blue) structure with various instruments and a long solar panel extending from its side. It is positioned in the lower right quadrant, appearing to fly towards the left. In the background, there is a bright, glowing nebula or comet tail in shades of yellow, orange, and white, set against a deep blue space filled with stars. The curve of the Earth's horizon is visible in the bottom right corner.

SVOM
Lancement 2021

Prochains rendez-vous :

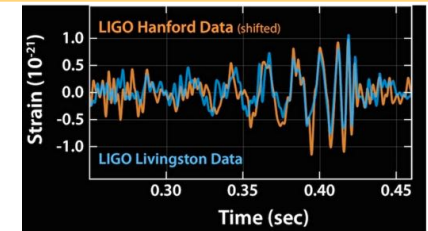
Atelier scientifique aux Houches : 10 -15 avril 2016

Revue de fin de phase B mission en Chine : 4-8 juillet 2016

Perspectives instrumentales

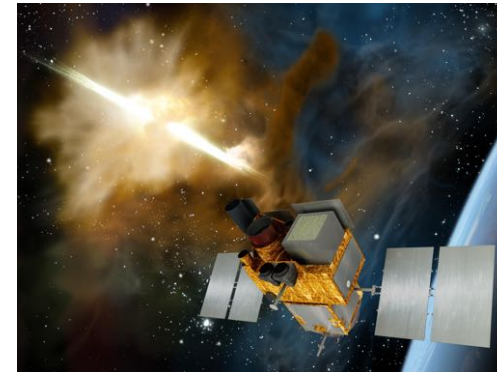
Advanced LIGO/VIRGO (2016):

- coalescence d'étoiles à neutrons (sursauts courts & kilonova) ?
- explosion asymétrique d'une supernova galactique (Kotake 2014) ??



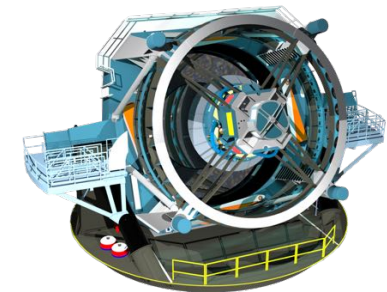
SVOM (2021)

- forte implication française IRFU, IRAP, APC, LAM
- continuité de l'observation des sursauts après SWIFT
- sursauts cosmologiques $z > 5$
- population locale de sursauts faibles ?
- alerte ($\Delta t = 5\text{mn}$, $\Delta \theta = 20\text{arcmin}$) pour grands télescopes, ondes gravitationnelles & neutrinos



LSST (2023)

- amélioration de la statistique des types d'explosions
- couverture totale du ciel du Chili en 3 jours
- 80 fois par an
- 30 To par nuit



SKA (2023/2030)

- amélioration de la statistique kick & spin des pulsars



ATHENA (2028)

- observation X des restes de supernovae à haute résolution angulaire (5 arcsec)



Conclusions

Vitalité des observations de l'univers transitoire, diversité des explosions

SN Ia:

- diversité des scénarios théoriques
- utilisation cosmologique: maîtrise de la dispersion des chandelles standards

SN gravitationnelles

- mécanisme neutrino 3D encourageant mais pas encore assez énergétique
- structure stellaire incertaine: interface PNHE-PNPS, synthèse de populations?
- diversité superlumineuse: SNIIn vs PISN vs magnetar

hypernovae, sursauts longs

- nécessité post-SWIFT d'un moteur persistant
- émergence du modèle à base de magnetar
- modélisation de l'émission prompte: chocs internes vs reconnection magnétique

sursauts courts

- observation des kilonovae: nucléosynthèse des éléments lourds
- vers l'observation des ondes gravitationnelles associées

Perspectives observationnelles: **SVOM**, **LSST**, ATHENA, SKA, LIGO/VIRGO
