

L'Univers dans ma poche



Les supernovae : ces étoiles qui explosent



Robert Mochkovitch
Institut d'Astrophysique
de Paris



Le reste de la supernova de 1054 : la nébuleuse du Crabe. Découverte par Charles Messier en 1755, elle porte le numéro 1 dans son catalogue de nébuleuses et galaxies.



Distansima vero huius stellae a fixis aliquibus in hac Cassiopeiae constellatione, exquisito instrumento, et oculorum miculatorum capaci, aliquoties observata. Inveni autem eam distare ab ea, quae est in pectore, Schemate appellata B, 7. partibus et 55. minutis : a superiori vero

Les supernovae historiques

Les supernovae sont des étoiles qui explosent. Quand une étoile explose en supernova, elle devient si brillante que, même lointaine, elle peut devenir visible à l'œil nu. Ce fut le cas six fois au cours du dernier millénaire en 1006, 1054, 1181, 1572, 1604 et 1987.

La supernova de 1054 dans la constellation du Taureau fut visible en plein jour pendant deux ans ! Aujourd'hui on peut observer le reste de cette explosion, la fameuse nébuleuse du Crabe (voir tuimp 10).

A la Renaissance, deux supernovae furent découvertes en 1572 et 1604 par les astronomes Tycho Brahé et Johannes Kepler.

Ce n'est qu'en 1987 qu'apparut à nouveau une supernova visible à l'œil nu (image de couverture). Celle-ci a explosé dans le Grand Nuage de Magellan, une petite galaxie satellite de la Voie Lactée alors que les cinq premières se sont produites dans la Voie Lactée. 3



Le télescope du Mont Wilson.

Mis en service en 1917, il était alors le plus grand du monde avec son miroir de 2,50 m de diamètre.

Novae et supernovae

En 1885 une « étoile nouvelle », ou « **nova** », apparaît dans la nébuleuse d'Andromède. Elle est juste sous la limite de visibilité à l'œil nu.

A partir du milieu des années 1920 on prend peu à peu conscience que certaines « nébuleuses » sont en fait des galaxies, extérieures à notre Voie Lactée (voir tuimp 15). La **nébuleuse** d'Andromède devient ainsi la **galaxie** d'Andromède, située à plus de deux millions d'années-lumière. Du coup, la luminosité de la nova de 1885 doit être réévaluée à près d'un milliard de fois celle du Soleil ! Les astronomes Fritz Zwicky et Walter Baade forgent alors le terme de « **supernova** » pour qualifier ces objets extraordinaires. Grâce au télescope du Mont Wilson, ils observent rapidement de nouvelles supernovae.

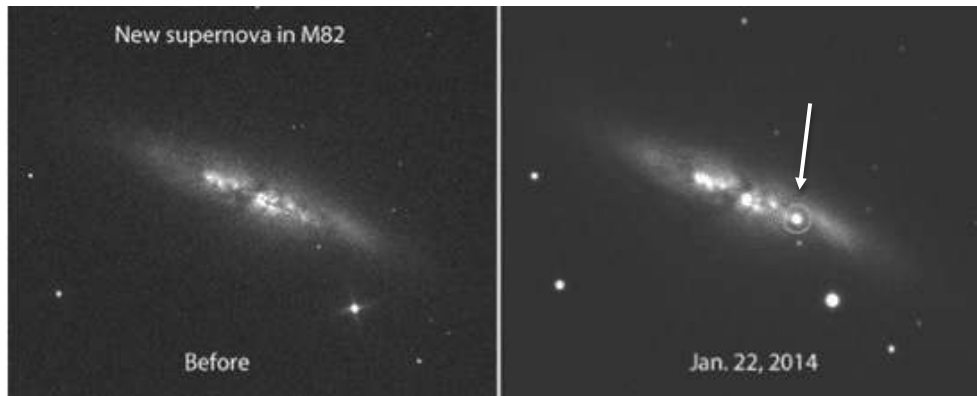
Aujourd'hui on découvre chaque année plusieurs centaines de supernovae, jusqu'à des distances dépassant un milliard d'années-lumière ! 5



Fritz Zwicky



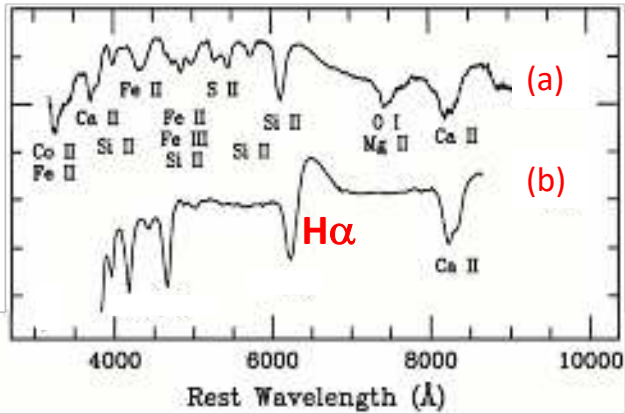
Walter Baade



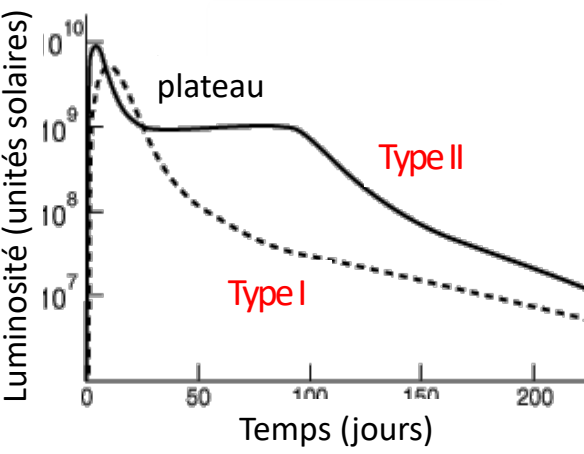
Une supernova apparue dans la galaxie M82.

Spectres :

(a) Type I :
aucune raie
d'hydrogène ;
raies du silicium,
du fer,
magnésium, du
calcium...



(b) Type II : raies
de l'hydrogène (en
particulier la raie
H α , vers 6500 Å)
et du calcium.



Figures adaptées de Chaisson
et McMillan.

Courbes de lumière
(luminosité en
fonction du temps):

Type I : très
semblables d'un
événement à l'autre
(ce qui est très utile
pour mesurer les
distances dans
l'Univers et étudier
son expansion).

Type II : grande
diversité (le plateau
n'est pas toujours
présent).

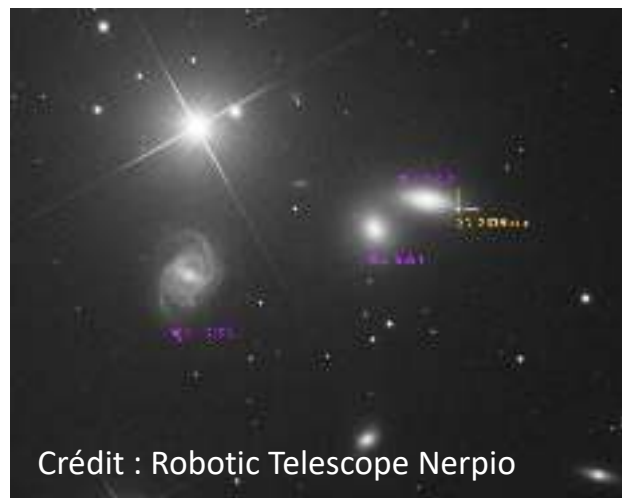
Deux types de supernovae

Par **spectroscopie** on distingue deux
types principaux de supernovae :

- Les supernovae de **type I (SNI)** dont le
spectre ne montre aucune raie de
l'hydrogène, ce qui est frappant car
l'hydrogène est l'élément le plus
abondant dans l'Univers. Les principales
raies présentes sont celles du silicium,
du calcium, de l'oxygène, du fer.
- Les supernovae de **type II (SN II)** dont le
spectre est au contraire dominé par les
raies de l'hydrogène.

Les courbes de lumière des deux types
sont différentes:

- Les **SNI** sont caractérisées par une
grande uniformité des courbes de
lumière, qui se ressemblent beaucoup
d'un événement à l'autre.
- Au contraire les **SN II** présentent une
grande diversité, avec cependant
souvent un plateau suivant le déclin
initial.



Crédit : Robotic Telescope Nerpio



B.J. Fulton : Las Cumbres Obs.

Deux supernovae de **type I** : à gauche dans une galaxie elliptique ; à droite dans la galaxie spirale M101.



Crédit : David Mülheims



Crédit : David Mihalic.

Deux supernovae de **type II** dans des galaxies spirales proches : à gauche dans la galaxie des chiens de chasse M51 ; à droite à nouveau dans M101.

Dans M101 les deux supernovae ont été observées en 2011 pour la SN I et en 2023 pour la SN II. 8

Quelles sont les étoiles qui explosent ?

Un premier indice sur la nature des étoiles qui explosent en supernova provient du type des galaxies où on les observe.

Les **SN II** sont toujours vues dans des galaxies en train de former des étoiles (galaxies spirales ou irrégulières) mais jamais dans celles où la formation d'étoiles est terminée depuis des milliards d'années (galaxies elliptiques). Cela conduit à penser que les SN II correspondent à l'explosion d'étoiles **massives**, dont le temps de vie n'est que de quelques millions d'années.

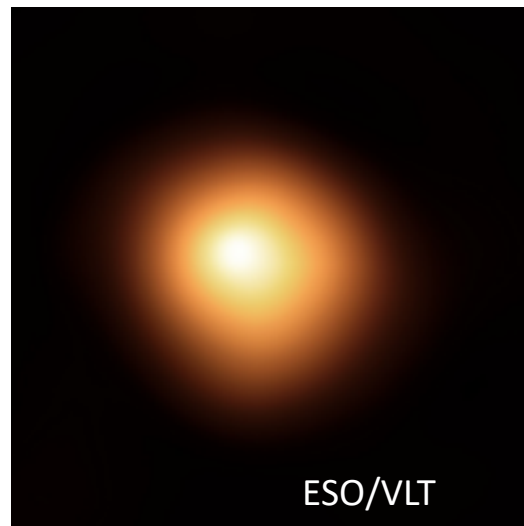
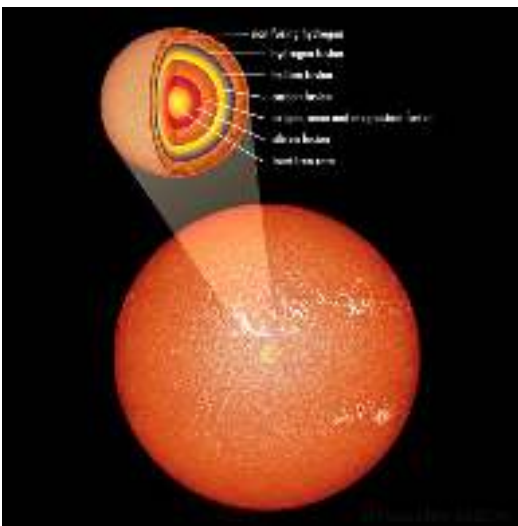
Les **SN I** au contraire sont observées dans tous les types de galaxies, y compris les elliptiques. Elles proviennent donc d'étoiles de **petite masse**, pouvant exploser des milliards d'années après avoir été formées.

Les mécanismes d'explosion des deux types de supernovae sont très différents. Très complexes, ils sont activement étudiés. 9

Comment explosent les SN II ?

Au cours de sa vie une étoile de plus de dix fois la masse du Soleil réalise une série de combustions nucléaires formant des éléments de plus en plus lourds. Ainsi, quand elle explose elle est constituée d'un cœur de fer, entouré de couches de silicium, d'oxygène, de carbone et d'hélium, le tout plongé dans une grande enveloppe d'hydrogène. Le cœur de fer est si dense (mille tonnes par cm^3) qu'il obéit à des lois physiques particulières. Il ne peut dépasser une masse critique, proche de 1,4 fois la masse du Soleil. Or sa masse augmente car la combustion du silicium à sa périphérie produit justement du fer. Quand il excède la masse critique, il devient instable et s'effondre jusqu'à atteindre une densité de 100 millions de tonnes par cm^3 ! La matière refuse alors de se tasser plus avant et le cœur rebondit sur lui-même, donnant naissance à une onde de choc qui fait exploser l'étoile. Le cœur profond, ultra-dense deviendra une étoile à neutrons ou un trou noir.

11



ESO/VLT

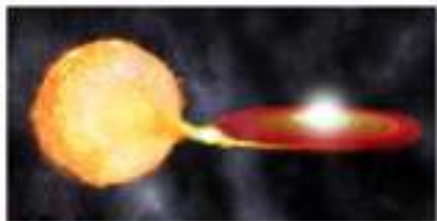
A gauche : schéma d'une étoile supergéante rouge s'apprêtant à exploser.

Attention ! Les échelles ne sont pas respectées : si on représente le cœur de fer par une tête d'épingle, les couches jusqu'à l'hélium sont comprises dans une sphère d'un mètre de diamètre alors que l'enveloppe d'hydrogène a un rayon pouvant dépasser cent mètres ! Crédit : Pablo Carlos Budass.

A droite : image de Bételgeuse (une supergéante rouge) obtenue grâce à l'instrument SPHERE installé sur le télescope européen VLT (8,20 m de diamètre). Avec une masse de 10 à 20 fois celle du Soleil et un rayon presque mille fois plus grand, Bételgeuse est entrée dans son dernier million d'années mais une date plus précise pour l'explosion est difficile à prévoir.

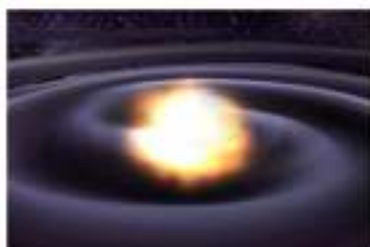
10

Deux scénarios menant à l'explosion d'une supernova de type I :



Crédit:
NASA/CXC/M.Weiss

Une naine blanche accumule de la matière à partir d'une étoile compagnon. Le transfert de masse se fait via un « disque d'accrétion ». L'explosion a lieu lorsque la naine blanche s'approche de la masse critique de 1,4 masses solaires. Elle explose alors en supernova.



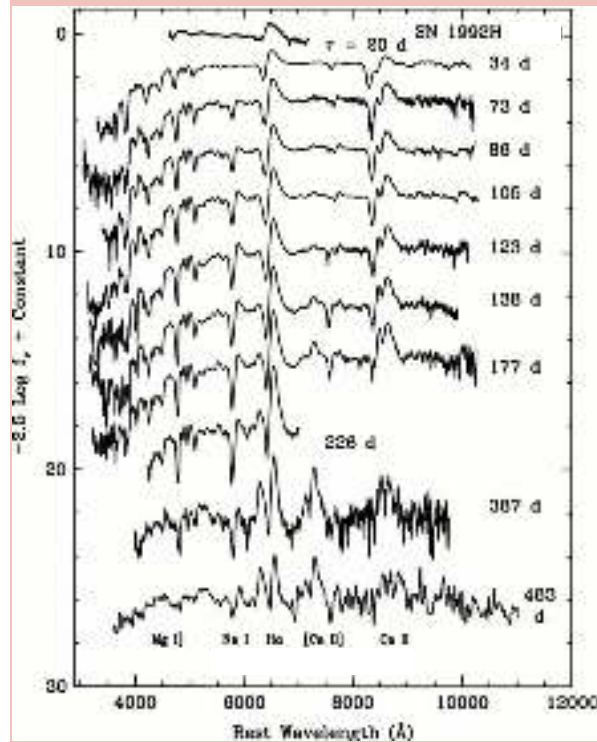
Crédit: GSFC/D.Berry

Comment explosent les SNI ?

Le mécanisme est complètement différent de celui des SN II, même si la masse critique de 1,4 masses solaires joue à nouveau un rôle important. L'astre qui explose est une « naine blanche », résidu de l'évolution d'une étoile de quelques masses solaires. Elle est constituée de carbone et d'oxygène et est « dégénérée », comme le cœur de fer des étoiles massives, mais sa masse est inférieure à 1,4 masses solaires.

Cependant, dans un système binaire, la masse de la naine blanche peut augmenter par « accrétion » depuis un compagnon ou par coalescence avec une autre naine blanche. Elle se contracte alors et se réchauffe. De nouvelles réactions nucléaires peuvent ainsi s'allumer en son centre et embraser toute l'étoile. Un front de combustion se propage vers l'extérieur et transforme le carbone et l'oxygène d'abord en nickel, cobalt et fer, puis en silicium et magnésium. La naine blanche est détruite et sa matière dispersée.

QUIZ



1) Voici une série de spectres de la supernova 1992H à différentes époques après le maximum d'éclat.

Quel était son type?
I ou II ?

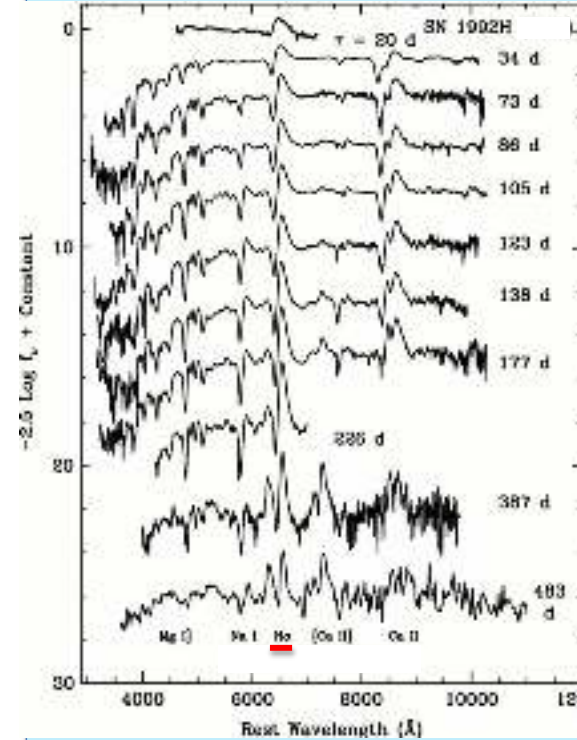


2) Voici trois supernovae observées simultanément (en Janvier 2022) dans la même galaxie spirale !

Y a-t-il vraiment eu trois explosions si rapprochées?

3) Quand se produira la prochaine supernova visible à l'œil nu dans notre galaxie, la Voie Lactée ?

REPONSES



1) On note la présence de la raie H α de l'hydrogène; c'est donc une supernova de type II

2) **NON!** Une galaxie est un très grand objet ! Selon leur position dans la galaxie, la distance

entre nous et ces supernovae peut différer de plusieurs milliers d'années-lumière. L'écart de temps de parcours a été ici juste compensé par la différence entre les temps d'explosion, ce qui est d'ailleurs un hasard remarquable.

3) On ne sait pas ! Dans 1, 10, 100 ou 300 ans (ou peut-être ce soir ?). On attend ça depuis 1604... (La supernova de 1987 a explosé dans le Grand Nuage de Magellan).

L'Univers dans ma poche N° 44

Ce mini-livre a été écrit en 2025 par Robert Mochkovitch de l'Institut d'Astrophysique de Paris (IAP) et revu par Grażyna Stasińska de l'Observatoire de Paris et Stan Kurtz (IRyA, Morelia, Mexique).

Image de couverture : A gauche, la Supernova 1987A juste après son explosion en février 1987 dans le Grand Nuage de Magellan, et à droite, une photo de la même zone prise avant l'explosion.
Credit: David Malin / Observatoire Astronomique Australien



Pour en savoir plus sur cette série et sur les thèmes abordés dans ce mini-livre, rendez-vous sur <http://www.tuimp.org>

