Zeitschrift: Orion : Zeitschrift der Schweizerischen Astronomischen Gesellschaft
Herausgeber: Schweizerische Astronomische Gesellschaft
Band: 47 (1989)
Heft: 230

Artikel: La supernova 1987 A
Autor: Maeder, André
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-899022

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 15.12.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

La Supernova 1987 A

ANDRÉ MAEDER

Mis à part le «Big-Bang», les supernovae sont les événements les plus violents dans l'univers. Une supernova (SN) est l'explosion d'une étoile qui peut atteindre l'éclat de 10^{10}soleils. Le 24 février 1987, une nouvelle supernova nommée SN 1987 A fut découverte à l'oeil nu par un jeune astronome canadien, I. Shelton, à l'observatoire de Las Campanas au Chili. Elle était située dans le Grand Nuage de Magellan (GNM), une galaxie satellite de la nôtre à 170000 AL du soleil. On reconnut immédiatement l'importance astrophysique exceptionelle de cet événement: c'était la première SN visible sans l'aide d'un instrument depuis 1604. Elle nous offrit une occasion extraordinaire de vérifier et d'améliorer nos connaissances sur la nucléosynthèse stellaire et sur la naissance d'une étoile à neutrons.

Dès qu'ils eurent connaissance de l'événement, les astronomes et les physiciens des particules se précipitèrent vers leurs détecteurs. Heureusement, l'émission de neutrinos de SN 1987 A avait été enregistrée par des détecteurs souterrains. Des observations de cette supernova ont été faites à partir du sol dans les longueurs d'onde radio et visibles. Dans l'espace, des observations UV ont été obtenues par le satellite IUE, dans l'IR par le Kuiper Airborne Observatory, en rayons X par le satellite japonais Ginga, en rayons X et γ par la station spatiale soviétique Mir. Les rayons γ ont aussi été observés par le satellite SMM et par des détecteurs transportés par ballon.
L'intérêt de la communauté scientifique était si grand que le 26 février commença une seconde explosion: celle des articles astronomiques consacrés à SN 1987 A!

Supernovae historiques et échantillonnages galactiques

L'étude des chroniques historiques a montré (1) que huit événements parmi les «étoiles nouvelles» signalées durant les 2000 dernières années peuvent valablement être considérés comme ayant été des supernovae (voir Table 1). Dans chacun des cas, l'observation radio du résidu de supernova a confirmé cette identification. La plus brillante des supernovae galactiques observées fut celle de 1006; c'est aussi celle qui resta visible le plus longtemps. Un astronome égyptien de l'époque donna des indications précises sur sa position et son éclat: «Un peu plus que le quart de la pleine Lune». Les annales de l'abbaye de Saint-Gall rapportent qu'en 1006 une étoile causant beaucoup d'alarme fut visible, à l'extrême limite de l'horizon sud, «in intimis finibus austri», avec une scintillation extraordinaire. Le reste de la SN de l'an 1054 est le plus étudié car il a donné naissance à la Nébuleuse du Crabe avec son pulsar central. La dernière SN observée à l'oeil nu remonte à l'année 1604; Kepler en a donné une description détaillée.

Nos meilleures connaissances concernant les statistiques des SN proviennent d'observations extragalactiques qui montrent qu'une moyenne de 2.2. SN/siècle est attendue pour une galaxie spirale semblable à la nôtre. Le désaccord entre les huit cas observés et les quelque 40-50 événements attendus sur les deux derniers millénaires est principalement dû à la très forte absorption interstellaire dans le plan galactique, où se produisent la majorité des SN.

Les observations extragalactiques montrent aussi que les supernovae sont essentiellement de deux types appelés SNI et SNII.
Les SNI, pour ne citer que quelques unes de leurs propriétés, atteignent environ 10^{10}fois la luminosité solaire ($L_\odot$), ne présentent pas de raies d'hydrogène dans leur spectre et apparaissent dans tous les types de galaxies. Elles sont modélisées de manière convaincante (2,3) par des naines blanches qui capturent de la matière dans un système double, et qui subissent un effondrement gravitationnel à la suite du transfert de masse. Les SNII montrent plus de dispersion dans leur comportement et atteignent environ $3.10^8 L_\odot$, leurs spectres présentent

LES SUPERNOVAE HISTORIQUES

Année	Durée d'observation	m_v	Degré de certitude	α (1950)	δ (1950)	Remarques
185	20 mois	- 8	probable	14h39.0	-62°17	
386	3 mois	+1.5	possible	18h08.5	-19°26	pas de restes optiques observés
393	8 mois	0	possible	17h11.2	-38°26	pas de restes optiques observés
1006	plusieurs années	- 9.5	certain	14h59.5	-41°45	
1045	22 mois	- 4	certain	05h31.5	21°59	Nébuleuse du Crabe
1181	185 jours	0	probable	02h01.9	64°35	
1572	16 mois	- 4	certain	00h22.6	63°52	observée par Tycho Brahé
1604	12 mois	- 3	certain	17h27.7	-21°26	observée par Kepler
(1660)	---	---	certain	23h21.2	58°33	Cas A (source radio la plus intense du ciel après le Soleil)

Remarques: - Les restes de toutes ces supernovae sont observés en onde radio.
- La supernova de 1660 n'a pas de mention historique. C'est l'étude des vitesses d'expansion des restes observés qui nous renseigne sur la date de l'explosion.

des raies de l'hydrogène et elles n'apparaisent que dans les galaxies spirales. Elles sont interpretées comme étant le résultats de l'explosion d'une étoile massive ayant atteint le stade de supergéante rouge.

Le surprenant précurseur bleu

SN 1987 A a été classée sans ambiguité comme une SNI I à cause des raies de l'hydrogène visibles dans son spectre, mais lors de son apparition, elle présenta de nombreuses propriétés particulières. Le précurseur fut formellement indentifié après un mois de débats animés comme étant l'étoile SK-69°202 dans le GNM.
Bizarrement, au lieu d'être une supergéante rouge avec un rayon de l'ordre de 800 $R_\odot$, Sk-69°202 avait été une supergéante bleue de rayon environ 40 $R_\odot$ et de masse initiale estimée à quelque 20 $M_\odot$.
Les propriétés optiques et spectroscopiques de la SN 1987 A étaient aussi peu communes: premièrement, son éclat n'était «que» 5.10^7 $L_\odot$. Les vitesses d'éjection estimées à partir des raies d'absorption décalées vers le bleu étaient anormalement grandes: jusqu'à 30'000 km/s au lieu de 5000 à 10'000 km/s d'une SNII standard. Les observations du satellite IUE montrèrent aussi que la luminosité UV de SN 1987 A diminua d'un facteur 10^3 au cours de la première semaine.

Ces diverses particularités sont à mettre en rapport avec le plus petit rayon initial du progéniteur. En effet, les couches extérieures d'une étoile plus petite sont plus denses, ce qui ralentit la diffusion des photons à travers l'enveloppe en expansion et produit ainsi une plus faible luminosité. L'onde de choc émerge après avoir parcouru une distance plus courte dans l'étoile, d'où les vitesses d'éjection plus élevées. Comme l'explosion initiale se déroule plus rapidement, le refroidissement est aussi plus rapide, ce qui explique la très forte décroissance du flux UV initial.

Mais pourquoi le progéniteur avait-il un rayon plus petit? Avec les neutrinos de l'expérience du Mont Blanc, cette question reste le problème le plus discuté au sujet de SN 1987 A. L'étoile a vraisemblablement parcouru les étapes évolutives normales d'une étoile de 20 ($M_\odot$) (4), avec une phase de combustion de l'hydrogène durant 8.8 millions d'années. Elle devint ensuite une supergéante rouge au cours de la phase de combustion de l'hélium central (1.2 millions d'années). A ce stade, on peut envisager deux possibilités pour qu'elle devienne une étoile de plus petit rayon. Premièrement, une importante perte de masse par vents stellaires, dont nous connaissons l'activité intense chez les supergéantes rouges, peut provoquer la perte de la majeure partie de l'enveloppe de la supergéante rouge, la transformant en une supergéante bleue de rayon beaucoup plus petit. La difficultés que rencontre cette interprétation est que la courbe de lumière de SN 1987 A durant les 120 premiers jours ne peut être modélisée que si l'étoile a retenu quelque 5 à 10 $M_\odot$ de son enveloppe initiale riche en hydrogène (5,6). La seconde solution est qu'en plus d'une perte de masse modérée, le précurseur de la SN ait subi un processus de mélange efficace ayant transporté de grandes quantités d'hélium vers les couches extérieures (5,6). L'enveloppe est alors moins opaque, ce qui produit un réchauffement de l'étoile qui devient alors une supergéante bleue. Bien que cette possibilité soit séduisante, le processus hydrodynamique pouvant produire un tel mélange reste encore inconnu. Des observations spectroscopiques de supergéantes bleues dans le GNM c'est-à-dire des étoiles soeurs de Sk-69°202, pourraient nous fournir des informations utiles dans l'avenir.

L'évolution vers l'effondrement central

Paradoxalement, la séquence des événements qui se produisent au centre de l'étoile au cours de son évolution est moins incertaine que ce qui se passe à sa surface. Les modèles montrent qu'une succession de réactions nucléaires (Table 2) se déroulent au coeur d'une étoile avec des températures T croissantes. Ces réactions donnent lieu au modèle dit en «pelure d'oignon»: les éléments synthétisés aux plus hautes températures sont proches du centre et dans des régions de densités très élevées atteignant 10^{10} kg/dm^3

Reaction	Temperature	Time
$H \rightarrow {}^4He$	$(2-6)\cdot 10^7 K$	$8.8\cdot 10^6 y$
${}^4He \rightarrow {}^{12}C, {}^{16}O$	$(1-4)\cdot 10^8$	$1.3\cdot 10^6 y$
${}^{12}C \rightarrow {}^{16}O, {}^{20}Ne, {}^{24}Mg$	$(5-8)\cdot 10^8$	$8\cdot 10^3 y$
${}^{16}O \rightarrow {}^{28}Si, {}^{31}P, {}^{32}S$	$1.5\cdot 10^9$	months
${}^{28}Si \rightarrow {}^{56}Fe$	$(2-4)\cdot 10^9$	days

Table 2:
Principales phases de combustion nucléaires au cours de l'évolution d'une étoile de 20 $M_\odot$.

Tel un bon coureur, l'étoile démarre lentement et accélère fortement à la fin. La table 2 montre que les durées de vie des diverses étapes nucléaires sont de plus en plus courtes. L'une des raisons est que de moins en moins d'énergie nucléaire reste disponible par unité de masse à chaque étape. Plus important encore est le fait que l'émission de neutrinos, principalement due à l'annihilation de paires e^+ e^-, devient énorme et emporte instantanément toute l'énergie produite au centre de l'étoile, ce qui accélère l'évolution. La luminosité neutrinique L_ν peut atteindre alors 10^5fois celle de la luminosité photonique.

Perdant son énergie et disposant de peu de combustible nucléaire, le noyau de fer commence à s'effondrer. Lorsque $T \approx 10^{10}$ °K et $\rho \approx 10^{10}$ Kg/dm^3, deux autres effets interviennent et accélèrent violemment l'implosion centrale. Premièrement, l'énergie de Fermi des électrons dépasse la différence de masse entre neutrons et protons, permettant la réaction de neutronisation $p + e^- \rightarrow n + \nu$, qui produit des neutrons, mais supprime également des électrons dont la pression soutenait le noyau de l'étoile. Deuxièmement, les photons deviennent suffisamment énergétiques pour amorcer la photodésintégration des noyaux de fer, ce qui enlève d'énormes quantités d'énergie du centre de l'étoile. Le noyau central n'étant plus soutenu par la pression, s'effondre. Ce processus se déroule à la vitesse de chute libre: le noyau tombe en quelques centièmes de seconde d'environ 5000 km à environ 20 km, ce qui est proche de la dimension finale de l'étoile à neutrons résultante. Les vitesses atteignent 70'000 km/s. Les couches extérieures, qui demeurent suspendues dans le vide, n'apprendront ce qui s'est passé au centre que beaucoup plus tard, lorsqu'elles seront soumises à l'onde de choc de l'explosion SN, laquelle atteint la surface de l'étoile après environ trois heures.

La transformation de l'effondrement en explosion

Déjà en 1934, Baade et Zwicky avaient réalisé que l'énergie potentielle libérée par l'effondrement vers une étoile à neu-

trons était si grande (~ 10^{53} ergs), que 1% seulement de cette énergie suffirait à chasser l'enveloppe et à produire l'explosion de SN. Au cours de ces 20 dernières années, de nombreux débats ont eu lieu au sujet du mécanisme qui transforme l'implosion en une explosion. Des travaux récents faits par Arnett, Bethe, Burrows, Lattimer, Wilson et Woosley (voir réf.2) conduisent au scénario suivant.

Lorsque la densité du noyau, en train de s'effondrer, atteint environ trois fois la densité nucléaire, c'est-à-dire environ 8.10^{14}kg/dm^3, la matière devient très «dure» et un rebondissement a lieu sur la paroi de l'étoile à neutrons nouvellement formée au centre avec une masse d'environ 0.8. $M_\odot$. L'énergie du choc est typiquement de l'ordre 7.10^{51}ergs, ce qui suffit à produire l'explosion de SN. Lorsque ce mécanisme de rebondissement fonctionne, on le nomme «explosion prompte»; son échelle de temps dynamique est presque identique à celle de l'implosion. Cependant, l'onde de choc a de la difficulté à se frayer un chemin à travers le noyau. Elle perd beaucoup d'énergie par émission de neutrinos et par photodésintégration du fer ($1.5.10^{51}$ergs/0.1 $M_\odot$). Aussi, elle ne parvient à produire l'éjection des couches extérieures que si la masse du noyau est inférieure à environ 1.25 $M_\odot$, ce qui correspond à une étoile ayant eu une masse initiale d'environ 10 $M_\odot$.

La question est donc de savoir comment explosent les étoiles les plus massives. La réponse a été trouvée en 1982 par J. Wilson à l'aide de modèles sur ordinateur. Pratiquement toute l'énergie potentielle de 2 à 3.10^{53}ergs s'échappe sous la forme de neutrinos. A des densités inférieures à 10^{11}g/cm^3, c'est-à-dire à environ 20 km du centre, les neutrinos sortent presque librement de ce que l'on nomme la neutrinosphère. En quelques secondes, une énergie pouvant atteindre l'équivalent de 100 fois la luminosité du soleil durant 10 milliards d'années s'échappe sous forme de neutrinos. Environ un pourcent de cet énorme flux de neutrinos, dont l'énergie est entre 10 et 20 MeV, est capturé par des protons, neutrons et noyaux atomiques au niveau du choc qui stagne à 200 à 300 km du centre (voir fig. 1). Le transfert de quantité de mouvement suffit à inverser l'implosion et à produire l'explosion stellaire. Ainsi, ce sont les neutrinos, c.à.d. les particules les plus ténues, qui produisent l'événement le plus violent rencontré dans la nature.

Il est utile de mettre l'accent sur le fait que, de l'énorme luminosité neutrinique initiale (env. 10^{53}ergs), seul un pourcent est converti en énergie cinétique dont à son tour un pourcent environ est converti en énergie lumineuse (~ 10^{49} ergs). Ainsi, le phénomène de supernova qui apparaît dans le ciel n'est qu'un processus énergétique marginal lors de la naissance d'une étoile à neutrons.

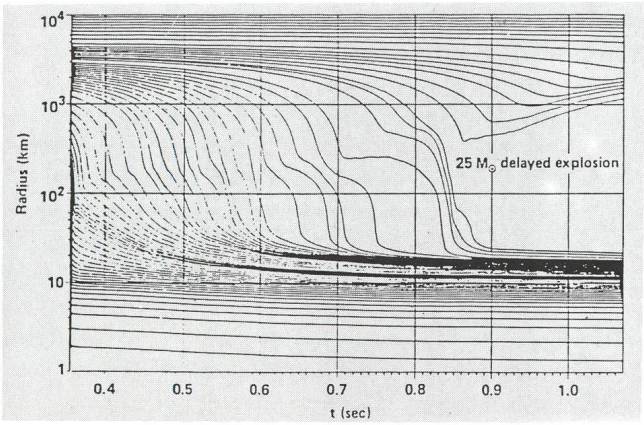

Fig. 1:
Le rayon en fonction du temps pour une explosion retardée de 25 $M_\odot$ d'après J.R. Wilson et al. [voir réf. 3].

Soulignons que le noyau qui s'effondre ne formera une étoile à neutrons que si sa masse est inférieure à une valeur critique, la masse limite de Oppenheimer-Volkoff dont la valeur est environ 2 $M_\odot$. Des noyaux plus massifs poursuivront leur effondrement vers le stade de trou noir. Nous verrons plus loin que la détection de neutrinos apporte des renseignements intéressants sur ce qui s'est passé dans SN 1987 A.

à suivre.

ANDRÉ MAEDER, Observatoire de Genève,
51, chemin des Maillettes, CH-1290 Sauverny

Weltneuheit

Binokulare Ferngläser mit Zenithbeobachtung

STEINER 15×80 Fr. 1015.—
mit Zenithbeob. 1350.—

WEGA 20×100 2100.—
mit Zenithbeob. 2475.—

KUHNY · OPTIK 3007 BERN

Wabernstr. 58 Tel. 031/45 33 11

Ferien-Sternwarte Calina
Osservatorio Calina
CH-6914 CARONA

Programm	**1989**
3. - 8. April	**Sonnenuhren** ihre Berechnung und Konstruktion, Einführungskurs Leitung: Erwin Greuter, Herisau
10. - 15. April	**Elementarer Einführungskurs** in die Astronomie, mit praktischen Übungen an den Instrumenten Sternwarte Leitung: Dr. M. Howald-Haller, Basel
27. - 28. Mai	**Kolloquium** Thema: Filme für die Astrophotographie, Theorie und Praxis
10. - 15. luglio a partire dalle 19.30	**Corso principianti (in lingua italiana)** Introduzione teorica e pratica all'astronomia Docente: Fumagalli Francesco, Varese
2. - 7. Oktober	**Elementarer Einführungskurs** in die Astronomie, mit praktischen Übungen an den Instrumenten der Sternwarte Leitung: Dr. M. Howald-Haller, Basel
9. - 14. Oktober	**Einführungskurs** Computer und Astronomie Leitung: Hans Bodmer, Greifensee

Besitzer/Proprietario:	Gemeinde Carona/Comune di Carona
Anmeldungen/Informazioni:	Feriensternwarte/Osservatorio Calina c.p. 8, CH-6914 Carona Tel. 091 68 83 46 oder 091 68 52 22 Hausverwalterin: Brigitte Nicoli
Technischer Berater:	Erwin Greuter, Postfach 41, CH-9100 Herisau 1
Unterkunft:	Im zur Sternwarte gehörenen Ferienhaus stehen Ein- und Mehrbettzimmer mit Küchenanteil oder eigener Küche zur Verfügung. Zimmerpreise auf Anfrage.