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

Artikel: Die Supernova 1987A in der grossen Magellanschen Wolke (II)
Autor: Wild, P.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-899021

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: 12.07.2025

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

Die Supernova 1987A in der grossen Magellanschen Wolke (II)

Prof. Dr. P. Wild

Der erste Teil dieser Uebersicht erschien in «Orion» Nr. 224 (Februar 1988) ; er handelte hauptsächlich von der zeitlichen Entwicklung von Helligkeit, Temperatur und Radius der Supernova. Der vorliegende zweite Teil befasst sich mit weiteren Beobachtungen.
In einigem Abstand soll ein dritter Teil Nachträge vermitteln und die aus 1987A gewonnenen neuen astrophysikalischen Erkenntnisse zusammenfassen.

1987A: Spektrallinien

Von den ersten Tagen oder gar Stunden an war das Spektrum der Supernova angenähert ein Schwarzkörper-Kontinuum, allerdings von wechselnder Temperatur und daher Farbe (s. Teil I). Ueberlagert waren ihm verschiedene Arten von Linien:

a) Einige prominente Emissionslinien, vorab von Wasserstoff (daher Supernova vom Typ II !) die α-Linien der Serien Balmer (6562Å), Paschen (1.875 μ) und Brackett (4.05 μ), aber auch Emissionen z. B. von neutralem und von einfach ionisiertem Ca. Emissionslinien haben ihren Ursprung im heissen, aber optisch nicht dichten Gas über der Photosphäre. Da nun bei einem explodierenden Stern diese Hülle sich ausdehnt, sind die Emissionslinien vom Doppler-Effekt verbreitert, denn die Expansionsgeschwindigkeiten in der dem Beobachter zugekehrten Hälfte haben Komponenten auf den Beobachter zu (Violettverschiebung), diejenigen in der abgewandten Hälfte dagegen Komponenten vom Beobachter weg (Rotverschiebung). Das Gebiet mit der grössten Geschwindigkeit auf den Beobachter zu wird aber direkt vor der (heisseren) Photosphäre gesehen; daher erscheint der «blaue» (d.h. kurzwellige) Rand der ganzen Spektrallinie in Absorption statt in Emission. Insgesamt ergibt sich das charakteristische sog. P Cygni-Profil; siehe Fig. 7. (P Cyg ist ein Ueberriese mit einer expandierenden Atmosphäre, der seit dem Jahr 1600 als sog. «permanente Nova» leuchtet). Die Violettverschiebung $-v_H$ der tiefsten Absorption zeigt an, wie schnell die Hauptmasse der Hülle sich ausdehnt; die stärkste Verschiebung $-v_h$ dagegen gibt die Geschwindigkeit der äussersten, schnellsten Schichten wieder, ist aber schwierig zu bestimmen, da die Linien nicht scharf genug begrenzt sind. Die besser zu messenden v_H der Supernova 1987A lagen in den ersten Spektren, am zweiten Tag nach dem Ausbruch, bei etwa 18'000 km/sec; dann nahmen sie innert einem Monat bis auf etwa 6000 km/sec ab. Man hat abgeschätzt, dass am Tag der Ausbruchs selber (23. Februar 1987) vermutlich rund 30'000 km/sec (1/10 der Lichtgeschwindigkeit) gemessen worden wären. Die drastische Abnahme bedeutet aber nicht eine wirkliche Bremsung der Hülle (die Entweichgeschwindigkeit war ja - wie wir schon sahen - um ein Viel-

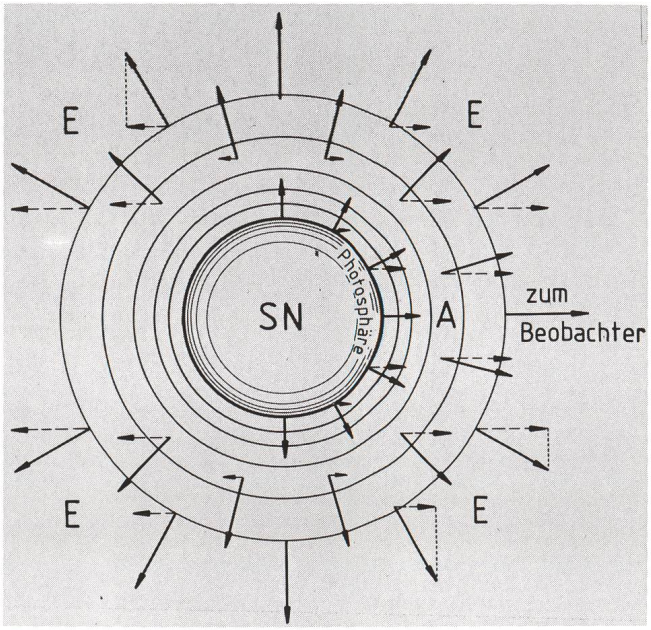
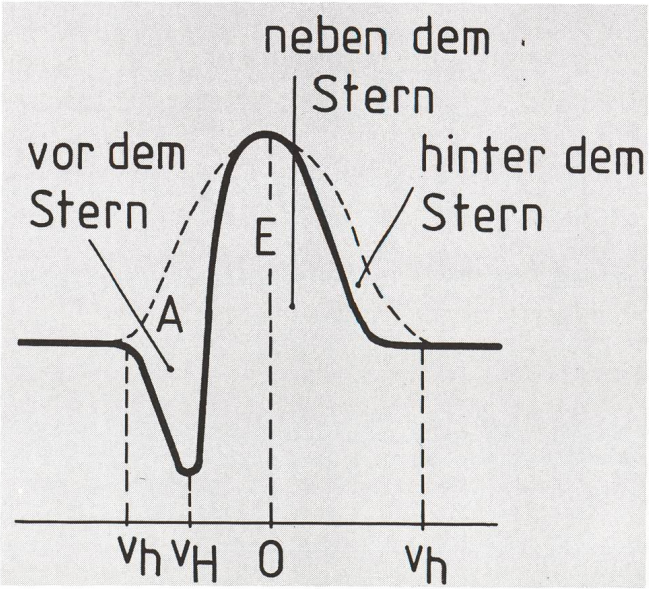


Fig. 7: PCygni-Profil

a) expandierende, heisse Sternhülle
SN Supernova-Inneres, undurchsichtig
A Absorptionslinien-Bereich (vom Beobachter vor der Photosphäre gesehen
E Emissionslinien-Bereiche (vom Beobachter gegen den Himmelshintergrund gesehen)



b) resultierendes Linienprofil (PCyg-Profil)

faches überschritten); sie ist vielmehr vorgetäuscht dadurch, dass die Photosphäre und über ihr auch die Hauptmasse des absorbierenden Zylinders A rasch von der Oberfläche in tiefere,langsamere Schichten absinkt. (Die äussersten, schnellsten Schichten werden fortzu dünner, durchsichtiger).

b) Zahlreiche Absorptionslinien von Metallen wie Fe, Ti, Cr, Mg, aus den äusseren Gebieten der Prae-Supernova. Sie waren verbreitert von der differentiellen Expansion der Hülle, in der sich ja Schichten von sehr verschiedenen Ausdehnungsgeschwindigkeiten überlagern. Die relativen Häufigkeiten dieser schweren Elemente liessen sich trotzdem gut bestimmen und wurden als «normal», d. h. sonnenähnlich befunden; das ist ein weiterer Hinweis darauf, dass die Prae-Supernova nicht etwa schon ein Weisser Zwerg war.

c) Schmale und fast unverschobene Emissionslinien, zuerst von He II (einfach ionisiertem Helium) und von ionisiertem StickstoffN III-V (im UV), später auch z.B. von Ca II (im Rot). Sie stammen sicher nicht aus der expandierenden Supernova-Hülle, sondern höchst wahrscheinlich aus einer ziemlich massiven Kugel oder Scheibe von zirkumstellarer Materie, die früher einmal als Sternwind von der Prae-Supernova abgestossen wurde und heute fast ruht. Diese Materie wurde jetzt vom kräftigen Strahlungspuls der Supernova angeregt und zum Leuchten gebracht. Ihr innerer Rand steht offenbar etwa 1/4 Lichtjahr vom Stern ab; dieser Satz von Linien erschien nämlich erst ein Vierteljahr nach dem Ausbruch der Supernova. In ein paar Jahren werden die schnellsten Teile der Supernova-Hülle auf die zirkumstellare Materie stossen, was vermutlich zu weiteren Anregungen und damit Emissionen führen wird. Sehr interessant ist, dass - im Gegensatz zu den Metallen (siehe unter b) - diese leichteren Elemente offenbar nicht ihre ursprünglichen «kosmischen» (ungefähr solaren) relativen Häufigkeiten zeigen, sondern dass z.B. N stark «angereichert» ist gegenüber C und O. Genau das ist theoretisch zu erwarten, wenn diese zirkumstellare Materie schon den C-N-O-Zyklus, aber noch nicht die späteren Brennstufen durchlaufen hatte. Sie muss also aus den äusseren Schalen des Atomofens ausgeworfen worden sein; und die Prae-Supernova muss damals ziemlich viel Masse verloren haben. Es ist nicht leicht zu verstehen, warum beim Supernova-Ausbruch trotzdem noch relativ viel Wasserstoff vorhanden war.

d) Im Licht des phantastisch hellen Scheinwerfers 1987A machte sich natürlich auch viel in dieser Richtung liegende interstellare Materie (sowohl aus der Grossen Magellanschen Wolke als auch aus unserer Milchstrasse) durch Absorptionslinien bemerkbar. Es wurden zahlreiche Linien von C, Na, Mg, Al, Si, S, K, Ca, Cr, Fe, Ni, Zn (die meisten in verschiedenen Ionisationsstufen) registriert, viele im UV gelegen (mit dem IUE-Satelliten registriert), viele im sichtbaren Licht (mit hoher spektraler Auflösung an den grossen Teleskopen beobachtet). Einige dieser interstellaren Linien kommen mehrfach vor (bis zu 25-fach!), mit ganz verschiedenen Doppler-Verschiebungen, entsprechend verschiedenen Radialgeschwindigkeiten am Ursprungsort, von 0 (in unserer Nähe) bis + 280 km/sec (in der Grossen Magellanschen Wolke) (Fig. 8). Diese Daten lehren uns Wesentliches von

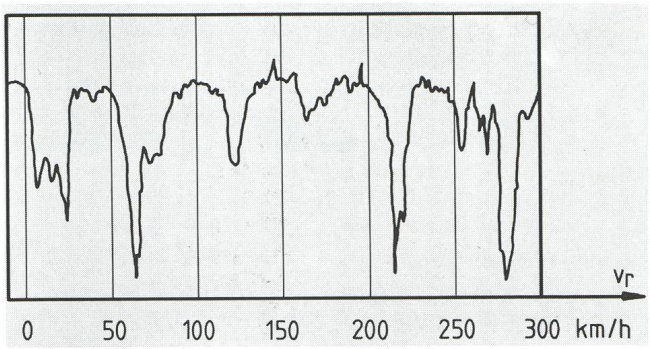


Fig. 8:
Die interstellare K-Linie (von Ca II) im Spektrum der SN 1987 A, am 25. Februar 1987: zahlreiche Komponenten mit verschiedenen Ursprungsorten und daher auch verschiedenen Radialgeschwindigkeiten v_r (relativ zur Sonne). Von P. Andreani & A. Vidal-Madjar am CAT-Teleskop der ESO registriert mit hoher spektraler Auflösung (300 km/sec bewirken eine Doppler-Verschiebung von nur 4 Å!).
(Aus: SN 1987 A, ESO Workshop, Garching, Juli 1987).

den Bewegungen der Aussengebiete der Milchstrasse und von den physikalischen Verhältnissen in der weiteren Umgebung der Supernova. Beides ist aber nicht sehr einfach. Um aus den radialen Geschwindigkeitskomponenten der betreffenden interstellaren Wolken auf ihre räumliche Geschwindigkeit und Lage zu schliessen, muss man ein ungefähres, notgedrungenerweise idealisiertes kinematisches Modell zu Grunde legen; und da bieten sich namentlich im Mittelfeld (für die Wolken mit v_r um 120 bis 220 km/sec) verschiedene mögliche Varianten an. Die Materie zwischen der Milchstrasse und der Grossen Magellanschen Wolke ist vielleicht stark von den Gezeitenkräften bei der Begegnung der beiden Sternsysteme beeinflusst, vielleicht auch von häufigen Supernova-Explosionen in der Magellanschen Wolke. Diese ist reich an anscheinend noch jungen Supernova-Resten, und 1987A ist am Rande des offenbar aktiven Sternentstehungsgebietes um 30 Dor («Tarantelnebel») explodiert. Mit Hilfe der Lichtechos und künftiger weiterer Supernovae wird sich der ganze Komplex allmählich physikalisch und chemisch untersuchen lassen.

Infrarot - und Radiostrahlung

Im kontinuierlichen Spektrum wurde schon früh ein leichter IR-Ueberschuss festgestellt, der von einem Schwarzen Körper von etwa 1250°K hätte stammen können, doch liess sich keine klare physikalische Deutung finden. Die zirkumstellare Materie schien zu weit weg für ein genügendes IR-Echo und die Hülle zu heiss für die Kondensation von merklich viel Staub. Es ist ja im Grunde auch kaum zu erwarten, dass ein physikalisch so kompliziertes System sich in lauter Einzelgebilde in thermodynamischem Gleichgewicht aufteilen lasse. Kurz nach dem optischen Ausbruch erschien auch Synchrotron-Radiostrahlung, die offenbar beim Durchgang der Stosswelle durch die Sternkorona entstand. Sie klang schon innert 2 Wochen ab, während sie in «klassischeren» Typ II-Supernovae wie 1979C und (von Zimmerwald) 1980K wesentlich länger anhielt (ausgedehntere Koronae?) und auch intensiver war.

Reflexe; Lichtechos

Während einigen Wochen im März und April 1987 war im gelben bis roten Farbbereich (inkl. Hα) (jedoch gar nicht z.B. im Blau und im IR) ein mysteriöser Begleiter der Supernova zu sehen, rund 3 Grössenklassen schwächer und in weniger als

0".1 Abstand. «Zu sehen» ist eigentlich zuviel gesagt; einzig die Technik der Speckle-Interferometrie (Fourier-Hin- und Rück-Transformation des Bildes) brachte ihn zum Vorschein. Für einen direkten Auswurf stand er der Supernova zu fern (mehr als 20 Lichttage, was etwa 0.4 x Lichtgeschwindigkeit erfordert hätte). Es könnte ein besonders nahes und dichtes Stück ruhender Materie angestrahlt worden sein. Seltsam ist aber, dass seine Ausstrahlung schon in einem Monat über 10% des ganzen anfänglichen UV-Pulses der Supernova betrug, obschon diese Kondensation ihrer geringen Ausdehnung wegen kaum mehr als 2 % der Supernova-Strahlung auffangen konnte. Es ist nicht klar, ob der rätselhafte temporäre «Begleiter» überhaupt reell war oder ein Kunstfehler der heiklen Speckle-Interferometrie. Die Lichtechos, die sich seither eindrücklich entwickelt haben, entstanden in weiter entfernten Staubschichten. Herr Noël Cramer vom Observatoire de Genève hat sie in «Orion» Nr. 225 und 226 schön illustriert vorgestellt und ihre Geometrie erklärt, wobei er zu Recht auch an die klassische Arbeit von P. COUDERC über die Echos der Nova Persei 1901 erinnerte.

Neutrinos

In den fortgeschrittenen Stadien der Sternentwicklung entstehen immer mehr von den berühmten kleinen Energiepäckchen von noch unbekannter, aber jedenfalls sehr geringer Masse, die Neutrinos genannt werden und den Stern praktisch direkt mit Lichtgeschwindigkeit verlassen. Bei Zentraltemperaturen über 100 Mio. Grad wächst die Zahl der nichtnuklearen schwachen Wechselwirkungen, die Neutrinos erzeugen, z.B. Elektronen-Paarvernichtung $e^+ + e^- \rightarrow \nu + \tilde{\nu}$ oder Photonenzerfall in einem Plasma $\gamma \rightarrow \nu + \tilde{\nu}$. [$\nu$ = Neutrino, $\tilde{\nu}$ = Antineutrino]. Und wenn schliesslich das Sternzentrum ganz aus den stabilsten Atomkernen besteht, nämlich aus Fe und seinen Nachbarelementen, können dort nur endotherme, d. h. Energie verschlingende Prozesse ablaufen. Das Zentralgebiet liefert diese Energie, da es sich ja bei nachlassendem thermischem Gasdruck unter seiner Schwerkraft zusammenziehen muss. Bei den entstehenden hohen Dichten werden Elektronen in Atomkerne hinein «gepresst», wo sie sich mit Protonen zu Neutronen vereinigen; dabei werden schnell noch viel mehr Neutrinos und Antineutrinos gebildet, die entweichen. Die Folge ist, dass der ausgebrannte Atomofen vollends zusammenstürzt, mindestens bis zu einem Neutronenstern von etwa 10 km Durchmesser. Innert einigen Millisekunden wird (aus 1.4 Sonnenmassen) potentielle Gravitationsenergie von etwa $5 \cdot 10^{46}$ Joule frei (das ist rund 1/5 der gesamten Ruhemassen-Energie). Theorie sieht vor, dass mehr als 99% davon in Form von Neutrinos entweichen (als Energiepäckchen von 10-20 MeV). Weniger als 1% wird in die Supernova-Explosion gesteckt, und im etwas speziellen Fall von 1987A wurde von diesen paar Promille der grösste Teil zu kinetischer Energie der explodierenden Gashülle. Für die Lichterscheinung der Supernova blieb nur ganz wenig übrig (aber selbst das war noch sehr eindrücklich). Der unsichtbare gewaltige Schwarm der Neutrinos dagegen nahm soviel Energie mit wie unsere ganze Milchstrasse in etwa 30 Jahren strahlt! Insgesamt wurden 10^{57}-10^{58} Neutrinos ausgesandt; das bedeutet, dass noch bei uns, in der beträchtlichen Entfernung von 155000 Lichtjahren, am Morgen des 23. Februar 1987 durch jeden Quadratmeter rund 10^{14} Neutrinos strömten! Man erhielt damit insgesamt gerade die gleiche Dosis Energie, wie wenn man sich eine Sekunde lang ins volle Sonnenlicht stellt. Selbst durch Materie von der Dichte des Erdkörpers fliegen Neutrinos fast ungehindert; aber einige wenige konnten doch abgefangen werden in besonders für solche Ereignisse angelegten grossen unterirdischen Tanks mit reinstem H_2O oder mit C_nH_{2n+2} (flüssigen gesättigten Kohlenwasserstoffen):

im Irvine-Michigan-Brookhaven-Detektor, in einer Salzmine in Ohio (6800 t H_2O):
8 Pulse um $7^h35^m41^s$-47^s WZ (sonst nur etwa 1 Puls alle 3 Tage!);

im Kamiokande II-Detektor, in einem japanischen Bergwerk (2140 t H_2O):
12 Pulse um $7^h35^m40^s$-53^sWZ ($\pm 50^s$);

im Detektor von Baksan, im Kaukasus (330 t C_nH_{2n+2}):
5 Pulse um $7^h36^m12^s$-21^s WZ;

im Detektor im Mt. Blanc-Tunnel (90 t C_nH_{2n+2}):
5 Pulse, aber um $2^h52^m37^s$-44^s WZ (sonst im Mittel etwa 1 Puls pro 80 sec).

Dass die Beobachtung im Mt. Blanc-Tunnel 4 1/2 Stunden vor den anderen erfolgte, hat viel zu reden gegeben. Man überlegte sich u.a. auch die Möglichkeit, ob SK-69°202 zuerst zum Neutronenstern und 4 1/2 Stunden später zum Schwarzen Loch geworden sei, doch schien das nicht gut mit allen Beobachtungen vereinbar. Gegenwärtig wird die Aufzeichnung aus dem Mt. Blanc als nicht reell oder allenfalls als etwas anderes betrachtet. - In den anderen drei Anlagen wurde von 6 vermutlich vorhandenen Neutrinoarten verständlicherweise nur das Elektronen-Antineutrino $\tilde{\nu}_e$ nachgewiesen, und zwar auf Grund der Reaktion $\tilde{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$, die den grössten Wirkungsquerschnitt hat. Das Positron e^+ strahlt Cerenkov-Licht aus, weil es schneller als Licht (im Wasser!) davonfliegt; und diese Cerenkov-Strahlung wird von ringsum montierten Photometern registriert. - Dieser erste experimentelle Nachweis von Neutrinos aus einem zusammenbrechenden Stern ist ein ganz grosser Erfolg sowohl für die Beobachtungstechnik als auch vor allem für die Theorie der Sternentwicklung. Einen wichtigen Diskussionspunkt bildete die Tatsache, dass die beobachteten Neutrinos über etwa 10 Sekunden verteilt ankamen, während ihr Hauptschub innert 1/100 Sekunde entstanden sein muss. Man hoffte zunächst, daraus auf unterschiedliche Geschwindigkeiten infolge unterschiedlicher Massen schliessen zu können; man konnte aber aus der Zeit ihrer Ankunft nur einen oberen Grenzwert für ihre Massen errechnen, der nicht tiefer ist als was schon aus irdischen Laborversuchen bekannt ist. Die zeitliche «Dehnung» des Schubes kam wohl eher davon her, dass in der unglaublich dichten Materie eines entstehenden Neutronensterns selbst die Neutrinos eine kurze Zeit «gefangen» bleiben, bis sie den Weg an die Oberfläche finden.

Prof. Dr. PAUL WILD
Astronomisches Institut der Universität Bern
Sidlerstrasse 5
CH-3012 Bern