

Die Supernova 1987A in der Grossen Magellanschen Wolke (I)

Autor(en): **Wild, Paul**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Orion : Zeitschrift der Schweizerischen Astronomischen Gesellschaft**

Band (Jahr): **46 (1988)**

Heft 224

PDF erstellt am: **21.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-899072>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern. Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Die Supernova 1987A in der Grossen Magellanschen Wolke (I)

Prof. Dr. PAUL WILD

Keinem andern Stern, ausser vielleicht der Sonne, ist je so viel konzentrierte Aufmerksamkeit der ganzen Astronomenschaft zuteil geworden wie 1987A, der ersten Supernova des vergangenen Jahres. Sie wird auf Jahrzehnte hinaus sowohl Beobachter als auch Theoretiker beschäftigen und faszinieren, und die von ihr ausgelöste Literaturflut könnte schon fast überborden.

Die Supernova ist zur passendsten Zeit am denkbar günstigsten Ort aufgeleuchtet. An der Vielfalt ihrer Aspekte liesse sich wohl ein fast vollständiger Lehrgang der Astrophysik aufziehen. Einiges daraus möchte ich mit einer Reihe von kürzeren Artikeln im «Orion» mehr oder weniger verständlich darzustellen versuchen. Schon dabei muss man freilich die Kenntnis einiger Grundbegriffe voraussetzen; aber ich ermuntere alle Leser ausdrücklich, mich auf unverständlich Gebliebenes aufmerksam zu machen und schriftlich Fragen zu stellen, auf die ich in den Fortsetzungen eingehen könnte. Ich muss noch erwähnen, dass unser Institut nicht an irgendwelchen Beobachtungen dieser Supernova beteiligt ist, im Gegensatz etwa zu unseren Genfer Kollegen, die auf La Silla in Chile unermüdlich zur exakten Photometrie beitragen. Ich stütze mich auf Veröffentlichungen von so vielen Astronomen aus aller Welt, dass ich sie unmöglich alle mit Namen erwähnen kann. Eine Hauptquelle der Information war die Vortragstagung, die Anfang Juli von der ESO in Garching bei München organisiert wurde, und der dicke Band, in welchem 76 dort präsentierte Arbeiten publiziert sind.

Entdeckung

Am Morgen des 23. Februar 1987 trafen auf der Erde die ersten Signale von einer Sternexplosion ein, die sich vor 155 000 Jahren in der Grossen Magellanschen Wolke, der nächsten Nachbargalaxie unserer Milchstrasse, ereignet hatte. Die Distanz dürfte auf etwa $\pm 10\%$ genau sein; der Entfernungsmodul ist $m - M = 18.4 \pm 0.2$. Die Grosse Magellansche Wolke tief am Südhimmel und damit (leider) von Europa aus nicht zu sehen - wurde früher als «unregelmässiges» Sternsystem bezeichnet, heute dagegen betrachten wir sie als eine leicht asymmetrische Balkenspirale. Man kann sich diese Form gut vorstellen z.B. anhand der hervorragenden Abbildungen in «Orion» Nr. 219 & 221; dort sieht man auch, dass die Supernova 1987A wahrscheinlich in die Randzone der ausgedehnten Massen von leuchtendem Gas um den berühmten «Tarantelnebel» 30 Doradus gehört. Der Stern, der explodieren sollte - die sog. Prae-Supernova -, war ein blauer Überriese (B3Ia) mit Sanduleaks Katalog-Bezeichnung -69°202; seine Helligkeit scheint durchaus konstant gewesen zu sein: visuell $V = 12.3$, bzw. 11.7 nach Korrektur für die interstellare Absorption. Für diesen Stern war, zusammen mit etlichen andern desselben

Typs, eine sehr präzise Spektroskopie vorgesehen, doch wurde er nicht allzu lange vor seiner Explosion aus der Liste gestrichen, wegen einer Kürzung des Beobachtungsprogrammes; so sehr fehlte selbst das geringste Anzeichen der bevorstehenden Katastrophe! - Die letzte nachträglich gefundene Photographie mit der unveränderten Prae-Supernova stammt vom 23. Februar um 2^h morgens Weltzeit, die erste mit der explodierenden Supernova von 10^h vormittags, mit Helligkeit $V = 6.1$ (d.i. 300 mal die ursprüngliche Leuchtkraft). Entdeckt wurde das Ereignis aber erst am 24., um 6^h Weltzeit von SHELTON im Las Campanas-Observatorium in Chile, um 9^h von JONES in Neuseeland; und noch gleichentags wuchs der Stern zur ersten von blossen Auge gut sichtbaren Supernova seit KEPLERS Zeit (seit der sehr hellen galaktischen Supernova von 1604 im Ophiuchus). (S Andromedae, im Jahre 1885, erreichte zwar $5^{1/2} - 6^m$, blieb aber vom blossen Auge unauffällig, weil zu nahe dem Zentrum des Andromedanebels.) Man rechnete natürlich sogleich mit der glänzenden Möglichkeit, dass 1987A den hellsten Sternen des Himmels gleichkäme. Eine Supernova vom Typ I in der Grossen Magellanschen Wolke könnte auf eine maximale Helligkeit von -1^m gelangen, eine solche vom Typ II günstigstenfalls auf 0^m (wie Wega). 1987A verhielt sich nun anders; bevor ich das schildere, möchte ich aber noch eine knappe Beschreibung der Klassifikation der Supernovae geben.

Typen von Supernovae

Gemeinsam ist allen Supernovae, dass nahe dem Sternzentrum plötzlich enorm viel Energie frei wird, die den Stern gewaltig aufbläht, ja zum grössten Teil explodieren und dabei meistens auf einige Zeit hell aufleuchten lässt. In einer «thermonuklearen» oder «Detonations» -Supernova ist Atomkernenergie freigesetzt worden, während in einer «Gravitations» - oder «Implosions» -Supernova das Zentralgebiet (der «ausgebrannte» Atomofen) unter der Schwerkraft des Sterns bis zu phantastischer Dichte zusammenkracht und damit gewaltig viel potentielle Gravitationsenergie umgewandelt wird. Von der Beobachtung her ist jedoch eine andere Einteilung üblich: Supernovae, deren Spektren kräftige Emissionslinien des Wasserstoffs aufweisen, heissen «Typ II», solche ohne helle Wasserstofflinien «Typ I». — Es ist höchst bemerkenswert, dass die Helligkeit fast aller Typ-I-Supernovae einen ganz charakteristischen zeitlichen Verlauf nimmt (Fig. 1); ihre Lichtkurven lassen sich durch blosses Verschieben der Helligkeitsskala - entsprechend den unterschiedlichen Entfernungen - fast mit einer Standardkurve zur Deckung bringen. (Das exponentielle Ausklingen erfolgt allerdings nicht immer mit derselben Halbwertszeit). Das macht die Supernovae I geeignet als Indikatoren der ganz grossen kosmischen Entfernungen, besonders auch da sie in allen morphologischen Typen von Galaxien vorkommen. Die Gleichheit der maximalen Leuchtkräfte deutet wohl auch an, dass die meisten Supernovae I im Prinzip die gleiche physikalische Ursache haben, mit bescheidenen Variationen. Vermutlich sind sie explodierende Weisse Zwer-

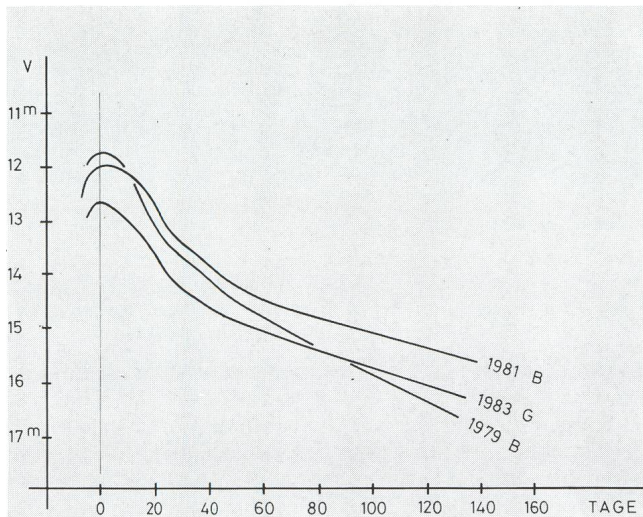


Fig. 1: Visuelle Lichtkurven einiger Supernovae I

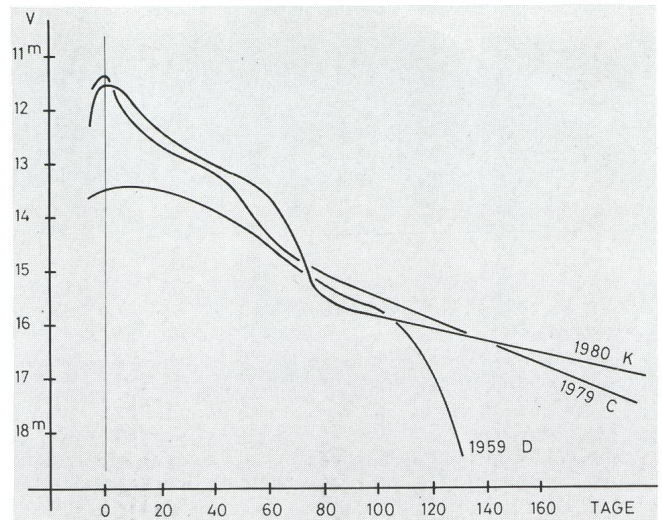


Fig. 2: Visuelle Lichtkurven einiger Supernovae II

ge. Ein solcher kann nur mit weniger als 1.4 Sonnenmassen stabil sein (die berühmte «CHANDRASEKHAR-Grenze»); eine nachträgliche Zufuhr von Masse (z.B. von einem nahen Begleiter her) muss ihn auf die eine oder andere Art (via nukleare Detonation oder via Gravitation-Kollaps) zur Explosion bringen. — Supernovae II scheinen weit weniger einheitlich; vor allem sind ihre Lichtkurven ziemlich individuell, wenn auch gewisse Muster häufiger vorkommen (Fig. 2). Die inneren Strukturen der Prae-Supernovae II und die Anlässe zur Explosion sind offenbar mannigfaltig. Eine wichtige Gemeinsamkeit ist jedoch, dass sie nur in jungen Sternpopulationen vorkommen, vor allem in Spiralarmen, oft sogar in HII-Regionen. Dies sowie der beträchtliche Wasserstoffgehalt deutet darauf hin, dass Prae-Supernovae II ziemlich massive Sterne sind, deren rasche innere Entwicklung ja so oder so katastrophal enden muss, es sei denn, sie verlören den grössten Teil ihrer Masse auf ruhige Art («Sternwind») im Stadium der Roten Überriesen.

1987A: Helligkeit, Temperatur, Radius

Und nun zurück zur Supernova 1987! Sie ist vom Typ II und hat sich mit dem sehr kurzen Anfangspuls von Neutrinos (wovon später die Rede sein soll) eindeutig als Kollaps-Supernova zu erkennen gegeben. Ihre Strahlung in allen Spektralbereichen wird auf den Sternwarten der Südhalbkugel sowie aus Satelliten fast ständig gemessen und analysiert. Während mehreren Monaten lag dem Spektrum ein helles Kontinuum von angenähert Planckscher («Schwarzkörper») Energieverteilung zu Grunde, wie von der Photosphäre eines normalen Sterns von wohldefinierter Temperatur. Unter diesen günstigen Umständen kann man sich relativ einfach mit Mehrfarben-Photometrie fortzu ein ungefähres Bild von den äusseren Zustandsgrössen des Sterns machen:

- a) Aus den Messungen der Helligkeit (Bestrahlungsstärke) in mehreren Wellenlängenbereichen vom extremen Ultraviolett bis ins ferne Infrarot erhält man durch sorgfältiges Ergänzen und Aufsummieren die sog. bolometrische Helligkeit und daraus mit Hilfe der bekannten Entfernung die bolometrische Leuchtkraft L_b (= gesamte Strahlungsleistung) des Sterns.
- b) Die Helligkeitsunterschiede zwischen den verschiedenen Spektralbereichen geben numerisch die Farbe des Sterns

an; aus ihnen rechnet man die sog. Farbtemperaturen. Im Falle eines Schwarzen Körpers sollten diese alle identisch sein mit der sog. effektiven Temperatur T_e , welche den integralen Strahlungsfluss pro Flächeneinheit bestimmt, = σT_e^4 (σ ist die STEFAN-BOLTZMANN-Konstante).

- c) Die gesamte Strahlungsleistung muss = Oberfläche \times Strahlungsfluss pro Flächeneinheit sein: $L_b = 4\pi R^2 \cdot \sigma T_e^4$. Aus dieser Beziehung berechnet man nun schliesslich R, den sog. effektiven oder Strahlungs-Radius des Sterns.

Figur 3 gibt den ungefähren Verlauf der Helligkeit in den Bereichen U (nahes UV), B (blau), V (visuell = gelb), R (rot) und I (nahes IR) wieder; die Figuren 4-6 zeigen die daraus hergeleiteten Grössen L_b , T_e und R. Die vertikalen Balken geben ungefähre Unsicherheitsmargen an; man beachte ihr Wachsen mit der Zeit. Es lassen sich sehr deutlich mindestens drei Hauptphasen der Entwicklung unterscheiden:

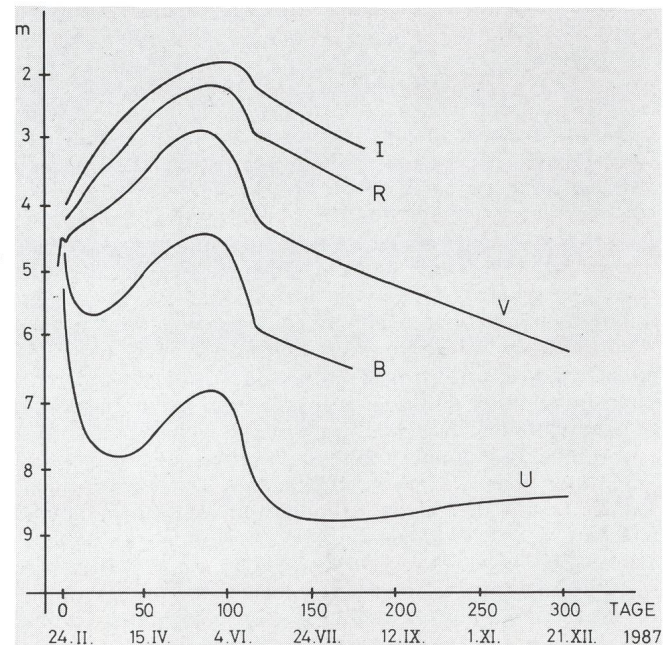


Fig. 3: Lichtkurven der Supernova 1987 A, adaptiert aus den «Proceedings, ESO Workshop on the SN 1987 A», S. 66; plus Beobachtungen des Observatoire de Genève, von La Silla aus.

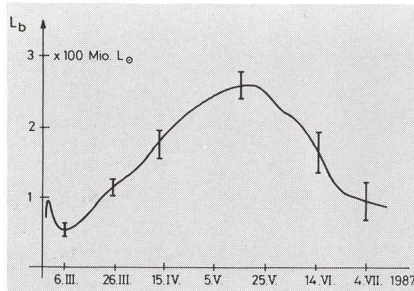


Fig. 4: Bolometrische Leuchtkraft der Supernova 1987 A

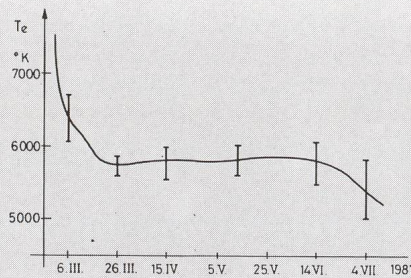


Fig. 5: Effektive Temperatur der Supernova 1987 A

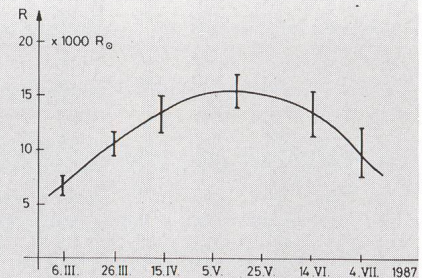


Fig. 6: Effektiver Radius (Photosphärenradius) der Supernova 1987 A

Fig. 4-6 adaptiert aus den "Proceedings, ESO Workshop on the SN 1987 A", S. 68 / 69 (S. Cristiani et al.)

- 1) Der erste, scharfe Ausbruch von kurzweiliger Strahlung, ausgesandt von der Sternoberfläche zu der Zeit, da die primäre Stosswelle aus dem Sternzentrum dort ankam, eine Temperatur von gegen 1 Mio. Grad erzeugend. Seit jenem Moment (leider nicht genau bekannt; wahrscheinlich weniger als 3 Std. nach dem Zusammenbruch des Zentralgebietes) fliegt die massive Hülle des Sterns sozusagen ungebremst auseinander. Der effektive Sternradius wuchs in den ersten 2 1/2 Tagen von 50 auf über 3000 Sonnenradien (und die Leuchtkraft von 110000 auf beinahe 100 Mio. Sonnenleuchtkräfte). Daraus berechnet sich eine minimale Expansionsgeschwindigkeit von 10000 km/sec. (Wir werden später sehen, dass direkt spektroskopisch noch wesentlich höhere Geschwindigkeiten in der explodierten Gashülle gemessen wurden, aber schon das ist rund 25fache Entweichgeschwindigkeit!) Die schnelle Expansion hatte auch eine rapide Abkühlung zur Folge, und dementsprechend fand sehr früh eine drastische Umlagerung der beobachteten Strahlung statt: die kurzweilige versiegt beinahe, während die längerweilige (etwa von der Mitte des optischen Bereiches an) stetig anstieg. Die Supernova wurde innert zweier Wochen von der blauen zur rötlichen je gesehenen! Vorübergehend dominierte die Abkühlung über die Vergrößerung der Oberfläche, sodass die bolometrische Leuchtkraft bis zum 4. März etwas nachliess.
- 2) Noch während des Ausklingsens der ersten Phase setzte die zweite ein: es begann aus offenbar etwas tieferen Schichten Energie durchzusickern, die vermutlich mehrere verschiedene Quellen hatte: vor allem wohl weitere, etwas tiefer deponierte Energie der direkten und der hin und her reflektierten Stosswelle, aber auch Radioaktivität (z.B. vom Zerfall von Ni^{56} in Co^{56} , mit 6 Tagen Halbwertszeit), und aus den obersten, kühleren Schichten etwas Energie der Rekombination von Ionen und Elektronen zu neutralen Atomen. - Zum Verständnis des weiteren Helligkeitsverlaufs sind einige Überlegungen nötig, zu denen ich etwas weiter ausholen muss: Im Inneren eines Sterns ist die freie Weglänge eines Photons (Strahlungsquants) sehr kurz; es wird unzählige Male absorbiert und (etwas verändert) re-emittiert. Dementsprechend können wir von aussen auch nicht weit in einen Stern hineinblicken. Die Schicht, die wir sehen, die sog. *Photosphäre*, ist diejenige, in der die letzten Umwandlungen stattgefunden haben, in der also die schliesslich den Stern verlassenden Photonen entstanden sind. (Ein Unbekannter hat das lustig formuliert: «Die Schicht, in der die Photonen zu spazieren aufhören und zu fliegen beginnen»). Physik und Chemie der Photosphäre prägen das Spektrum des Sterns; und sie hat die effektive

Temperatur und den effektiven Radius, mit denen wir oben rechneten. In einem sich ausdehnenden Stern nun wird die Hülle ständig durchsichtiger, und die Photosphäre kann daher i.a. nicht in einer bestimmten Materieschicht bleiben; sie dehnt sich - wenn überhaupt - langsamer aus als die Materie. Sie ist aber auch nicht einfach an eine bestimmte Massendichte gebunden, sondern eher an eine bestimmte Opazität (Undurchsichtigkeit). Deren Mass, der sog. Absorptionskoeffizient, ist meistens recht kompliziert von der lokalen Dichte, Temperatur und chemischen Zusammensetzung abhängig. In einer sehr ausgedehnten, verdünnten Atmosphäre ist Lichtstreuung an freien Elektronen die Hauptursache der Opazität. Die Zahl der freien Elektronen pro cm^3 (und damit die Dichte des erzeugten «Lichtschleiers») nimmt besonders stark zu zwischen 5500 und 6000° Temperatur (infolge der Ionisation des Wasserstoffs, aber auch des He und der Metalle). Deshalb blieb die Photosphäre so lange in jenem Temperaturbereich «stecken» (Fig. 5), aber nicht in einer bestimmten Massenschicht (die Materie strömt sehr schnell, sich abkühlend, durch die Photosphäre nach aussen!). Bei konstanter Photosphären-Temperatur muss die bolometrische Leuchtkraft einfach proportional zu R^2 sein; in dieser zweiten Phase gibt daher die Lichtkurve direkt das Wachsen und spätere Schrumpfen der Photosphären-Oberfläche wieder. Sie erreichte um Mitte Mai ihren grössten Radius, nämlich etwa 15000 Sonnenradien; das sind 70 Astronom. Einheiten, also fast die doppelte Ausdehnung unseres ganzen Planetensystems! (Die schnellsten «Trümmer» des Sterns waren zur selben Zeit aber schon 300000 Sonnenradien weit weg.) Die visuelle Helligkeit im Maximum (75 bis 90 Tage nach dem Ausbruch) war $V = 2.9$; bolometrisch strahlte die Supernova damals gut zwei Wochen lang etwa wie 250 Mio. Sonnen. Hernach schrumpfte die Photosphäre (wegen der immer grösseren Transparenz der äusseren Schichten, aber bei ungebremster Expansion des Gases) ziemlich rasch bis auf ihre Dimensionen von Anfang März. Ob es sinnvoll ist, in diesem gewaltig ausgedehnten Nebel weiterhin noch eine Photosphäre zu definieren, müsste aus der Zusammensetzung des Spektrums beurteilt werden; davon später.

- 3) Die zusätzliche Energie, die etwa noch aus der Wirkung der Stosswelle stammte, war um Mitte Juni erschöpft. In der dritten Phase dominiert nun seither (wie letztlich bei fast allen Supernovae) eindeutig Energie aus radioaktiven Zerfällen. Die visuelle Helligkeit ist im zweiten Halbjahr 1987 verblüffend regelmässig linear zur Zeit gesunken; das heisst, dass die visuelle Leuchtkraft streng exponentiell abnahm. Die Halbwertszeit (entsprechend Δt

= 0.075) war 83 Tage. Die wichtigste von der Theorie erwartete radioaktive Zerfallskette ist $Ni^{56} \rightarrow Co^{56} \rightarrow Fe^{56}$, mit Halbwertszeiten von 6 Tagen bzw. 78 Tagen. Es scheint so gut wie sicher, dass das gegenwärtige Licht der Supernova grösstenteils vom Zerfall des Kobalts zu Eisen stammt, allerdings in verwandelter, «thermalisierter» Form. Von der unmittelbar beim Zerfall entstehenden Gammastrahlung vermag erst sehr wenig direkt durch die expandierende Hülle zu dringen; der weitaus grösste Teil wird noch in kontinuierliche thermische Strahlung umgesetzt, doch bleibt das Abklinggesetz dabei natürlich erhalten. Man kann sich überschlagmässig ausrechnen, dass zu Beginn der dritten Phase die gemessene Bestrahlungsstärke etwa von 0.004 Sonnenmassen reinem Co^{56} stammen

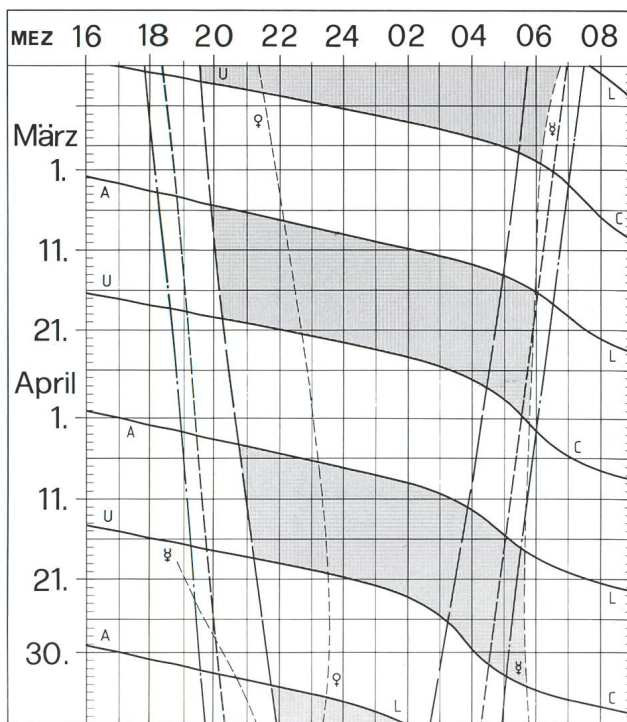
musste. Das ist aber wohl nur der vielleicht kleine Bruchteil alles Kobalts, der im Laufe der Explosion bis in die äusseren Schichten hinauf gewirbelt wurde. Die Tatsache, dass die beobachtete Strahlung etwas langsamer abnimmt als strikte theoretisch erwartet, bedeutet vielleicht eben gerade, dass wir fortzu ein bisschen tiefer in die vom Kobalt aufgeheizte Materie hineinsehen. Interessant ist, dass während der ganzen dritten Phase die Strahlung im nahen UV zugenommen hat, zwar langsam, aber stetig. Dazu hilft wohl eben die zunehmende Durchsichtigkeit der Hülle.

Adresse des Autors:

Prof. Dr. PAUL WILD, Astronom. Institut der Universität Bern, Sidlerstr. 5, CH-3012 Bern

Sonne, Mond und innere Planeten

Soleil, Lune et planètes intérieures



Aus dieser Grafik können Auf- und Untergangszeiten von Sonne, Mond, Merkur und Venus abgelesen werden.

Die Daten am linken Rand gelten für die Zeiten vor Mitternacht. Auf derselben waagrechten Linie ist nach 00 Uhr der Beginn des nächsten Tages aufgezeichnet. Die Zeiten (MEZ) gelten für 47° nördl. Breite und 8°30' östl. Länge.

Bei Beginn der bürgerlichen Dämmerung am Abend sind erst die hellsten Sterne — bestenfalls bis etwa 2. Grösse — von blossen Auge sichtbar. Nur zwischen Ende und Beginn der astronomischen Dämmerung wird der Himmel von der Sonne nicht mehr aufgehellt.

Les heures du lever et du coucher du soleil, de la lune, de Mercure et de Vénus peuvent être lues directement du graphique.

Les dates indiquées au bord gauche sont valables pour les heures avant minuit. Sur la même ligne horizontale est indiqué, après minuit, le début du prochain jour. Les heures indiquées (HEC) sont valables pour 47° de latitude nord et 8°30' de longitude est.

Au début du crépuscule civil, le soir, les premières étoiles claires — dans le meilleur des cas jusqu'à la magnitude 2 — sont visibles à l'oeil nu. C'est seulement entre le début et la fin du crépuscule astronomique que le ciel n'est plus éclairé par le soleil.

- — — — — Sonnenaufgang und Sonnenuntergang
Lever et coucher du soleil
- - - - - Bürgerliche Dämmerung (Sonnenhöhe -6°)
Crépuscule civil (hauteur du soleil -6°)
- — — — — Astronomische Dämmerung (Sonnenhöhe -18°)
Crépuscule astronomique (hauteur du soleil -18°)
- A — L Mondaufgang / Lever de la lune
- U — C Monduntergang / Coucher de la lune
- Kein Mondschein, Himmel vollständig dunkel
Pas de clair de lune, ciel totalement sombre