

Die Lichtkurve der Supernova 2011dh in M 51

David Walker

Einleitung

Im Juni leuchtete in der Whirlpool-Galaxie M 51 eine Supernova auf, die für uns leider nicht optimal zu beobachten war. Das lag nicht nur an dem hellen Sommerhimmel und dem schlechten Wetter, sondern auch daran, daß die unsere Sternwarte umgebenden Bäume inzwischen so weit in den Himmel gewachsen sind, daß M 51, von der Kuppel aus gesehen, nicht mehr zirkumpolar ist, sondern irgendwann hinter diesen Bäumen verschwindet. Mir selbst gelang eine Beobachtung gemeinsam mit Andreas Goerigk an unserem 20"-Teleskop.

Er konnte mit der neuen CCD-Kamera zwei Photographien im Abstand von 24 Tagen gewinnen, von denen die erste ziemlich genau den Zeitpunkt des Maximums traf. Leider sind sie photometrisch nicht auswertbar, weil wir (noch) nicht die entsprechenden Filter besitzen, um die B-, V- oder R-Helligkeiten in ihren genau festgelegten Wellenlängenbereichen messen zu können. Nur so aber könnten wir unsere Werte mit denen anderer Beobachter vergleichen.

So verwendete ich für die Lichtkurve Helligkeitsmessungen, die von der AAVSO veröffentlicht worden sind. Michael Möller aus Niendorf bei Timmendorferstrand ließ mir diese Dateien freundlicherweise zukommen.

In den Helligkeitstabellen der AAVSO fand ich vor allem visuelle Helligkeiten V, aber auch jeweils genügend viele Resultate im blauen B- und roten R-Bereich, um für diese drei Farben je eine Lichtkurve zeichnen zu können.

Was die Lichtkurve zeigt

Aufgetragen ist in Abb. 1 der zeitliche Verlauf der Helligkeiten jeweils im Roten (R), Visuellen (V) und Blauen (B). Die Zeitangabe erfolgt vermittelt des Julianischen Datums (JD), bei dem die Tage fortlaufend gezählt werden. Die Gregorianischen Daten 2011 Jul. 00 und Aug. 00 sind markiert, um die Orientierung zu erleichtern. Auf der y-Achse ist die Helligkeit aufgetragen.

Schauen wir uns die Lichtkurven selbst an, so stellen wir fest, daß die R-Kurve (fast) überall über der V-Kurve liegt, welche wiederum oberhalb der B-Kurve verläuft. Das heißt, die Farbenindices B - V und V - R sind beide überall positiv: die Supernova war von Anfang an rötlich. An dem Auseinanderlaufen der drei Lichtkurven zwischen dem Maximum und etwa dem Zeitpunkt JD 2'455'748 erkennt man, daß sie in diesem Zeitraum immer röter wurde. B - V wuchs von ca. 1 mag am Maximum auf 1.5 mag kurz vor dem „Buckel“ in der B-Kurve, um dann auf etwa 1.25 mag wieder abzunehmen. In dem gleichen Zeitraum wuchs V - R von ca. 0.25 mag auf 0.75 mag, um dann wieder etwas zurückzugehen. Die Supernova wurde also ab etwa JD 2'455'748 wieder etwas gelblicher.

Zum Vergleich: Der (B - V)-Index der Supernova entsprach anfangs dem eines frühen K-Sternes (ca. 1 mag), dann, als sie röter wurde, dem eines späten K-Riesen oder, im Vergleich mit Hauptreihensternen, sogar dem eines M-Zwerges, um sich schließlich wieder in das Gebiet der K-Sterne zurück zu entwickeln. Der (V - R)-Farbenindex

dagegen machte eine größere Wanderung: anfänglich entsprach er dem eines F-Sternes, schließlich ebenfalls dem eines K-Sternes.

Ein Blick auf die Helligkeitsmaxima zeigt, daß sie in verschiedenen Farben zu verschiedenen Zeiten auftraten: zuerst im Blauen, dann, etwa 2 Tage später, im Visuellen und schließlich, nach ungefähr zwei weiteren Tagen, im Roten. Real scheint auch jeweils die „Delle“ zu sein, die sich in der jeweiligen Lichtkurve kurz vor ihrem Maximum zeigt. Das gleiche gilt für den „Buckel“, der in der B-Lichtkurve um das Julianische Datum 2'455'756 herum, d. h. in der ersten Juli-Hälfte, auftrat.

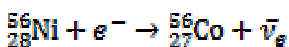
Die R-Kurve endet Anfang August: ab hier gab es keine photometrischen Daten mehr bei der AAVSO für diese Farbe. Nur eine einzelne Messung fand ich noch: das ist der Klecks kurz vor JD 2'455'796.

Die in der Abbildung 1 wiedergegebenen Kurven dokumentieren den Helligkeitsverlauf der Supernova über einen Zeitraum von etwa 80 Tagen. Die Energiequelle für dieses lange Leuchten ist nicht die Wärmestrahlung der bei der Sternexplosion erhitzten und fortgeschleuderten Gasmassen. Durch ihre rasche Ausdehnung kühlen die sich viel zu schnell ab, um über längere Zeit hinweg hell zu leuchten. Diese Energiequelle besteht vielmehr in zwei radioaktiven Zerfällen. Der erste ist der von Nickel-56, bei dem Cobalt-56 entsteht.

Nickel ist schwerer als Eisen, und wir wissen, daß ein massereicher Stern durch Kernfusionen nur dann Energie gewinnen kann, wenn der dabei entstehende Atomkern leichter ist als Eisen oder eben ein Eisenkern ist. Woher kommt das Nickel?

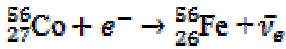
Durch die mit der Supernovaexplosion verbundenen hohen Temperaturen ($\sim 10^{10}$ K) werden alle Atomkerne in den Außenbereichen des Sternes (außer Helium) zerlegt. Dabei handelt es sich um eine Photodesintegration der Kerne, die durch die bei solchen Temperaturen auftretende harte thermische γ -Strahlung bewirkt wird. Diese Atomkerne enthalten in ihrer Mehrheit genauso viele Neutronen wie Protonen, daher lassen sie sich nahezu komplett zu He-4-Kernen aufbrechen. Das Helium selbst ist zu fest gebunden, um durch die γ -Strahlung zerstört zu werden. Nach der Explosion sinkt die Temperatur, und immer mehr Helium-Kerne können sich wiederum zu schwereren Kernen zusammenfügen, ohne sofort wieder zerstört zu werden. Es stellt sich ein thermisches Gleichgewicht ein zwischen Helium-Kernen einerseits und schwereren Kernen andererseits. Je weiter die Temperatur nach der Explosion sinkt, um so stärker verschiebt sich das Gleichgewicht zu den schweren Kernen. Derjenige von ihnen mit der höchsten Bindungsenergie bei gleicher Protonen- und Neutronenzahl ist Nickel-56, nicht Eisen-56, und dieses ist folglich das Endprodukt.

Nickel-56 ist radioaktiv und zerfällt. Dieser Zerfall ist allein schon für sich erwähnenswert, weil nämlich in diesem Nickel-Kern ein Proton durch den Einfang eines Elektrons in ein Neutron verwandelt wird:



Neben dem Cobalt-56-Kern entsteht ein Elektron-Neutrino. Bei diesem Zerfall werden darüber hinaus γ -Strahlen ausgesandt, die ihre Energie an die Explosionswolke abgeben und sie zum Leuchten bringen.

Cobalt-56 ist nicht stabil, sondern zerfällt ebenfalls durch einen Elektroneneinfang. Das ist der zweite Zerfall, der die Supernova in der oben geschilderten Weise mit Energie versorgt:



Das hierbei entstehende Eisen-56 ist stabil. Es handelt sich um den Atomkern mit der höchsten Bindungsenergie pro Nukleon überhaupt.

Die Halbwertszeit des Nickel-Zerfalles beträgt 6.1 Tage, die des Cobalt-Zerfalles 77.3 Tage (siehe z. B. Unsöld-Baschek). Geht man davon aus, daß die Helligkeit einer Supernova mit der Häufigkeit der zerfallenden Nickel-56- bzw. Cobalt-56-Kerne abnimmt, denn diese liefern ja über ihre Zerfälle die Energie zum Leuchten, dann ergibt sich, daß die Lichtkurven parallel zu den beiden gestrichelten Linien, die mit „⁵⁶Ni“ und „⁵⁶Co“ beschriftet sind, verlaufen müßten. Diese beiden geraden Linien geben nur das erwartete Gefälle der Lichtkurven wieder, nicht die erwarteten Helligkeitswerte selbst.

Für den an der Physik interessierten Leser sei angeführt, daß der gerade Verlauf dieser gestrichelten Linien daher kommt, daß (1) die Häufigkeit der Radioisotope exponentiell mit der Zeit abnimmt und (2) das Größenklassensystem der Helligkeiten, bis auf Konstanten, den Logarithmus des Strahlungsstromes wiedergibt. So ergibt sich eine Gerade, deren Steigung umgekehrt proportional mit der Halbwertszeit ist, siehe im nächsten Abschnitt .

Sehr schön ist zu sehen, daß die B-Helligkeit während der ersten zwei Wochen nach dem Maximum genau so abfiel, wie man es für den Ni-56-Zerfall erwartet. Im Blauen dominierte also der Nickel-Zerfall die Leuchtkraft. Im Visuellen und Roten dagegen fiel die Helligkeit langsamer ab, als durch die gestrichelte Linie „⁵⁶Ni“ angedeutet ist.

Nach dem „Buckel“ in der B-Helligkeit, ab JD 2'455'760, also Mitte Juli, ging die B-Lichtkurve in eine Gerade über, die genau das Gefälle zeigte, das man erwartet, wenn die Energiequelle des Leuchtens der Zerfall von Cobalt-56 ist (gestrichelte Linie „⁵⁶Co“).

Etwa 10 Tage später zeigte dann auch die V-Helligkeit den gleichen Verlauf. Von diesem Zeitpunkt an dominierte also der Zerfall von Co-56, welches das Zerfallsprodukt von Ni-56 ist, die Leuchtkraft dieser Supernova im Visuellen und im Blauen.

Auch in der R-Helligkeit deutete sich ab JD 2'455'776 der gleiche Verlauf an, leider gingen mir 4 Tage später die R-Daten aus. Die Einzelmessung kurz vor JD 2'455'796 paßt nicht zu einem linearen Verlauf, aber welches Gewicht kommt einer Einzelmessung zu?

Der weitere Verlauf der Helligkeit

Unter der Annahme, der Helligkeitsverlauf werde in der Zukunft weiterhin von dem Cobalt-56-Zerfall dominiert, läßt sich die weitere Abnahme der Helligkeit vorausberechnen. Wenn $\Delta m = m_2 - m_1$ die Helligkeitsänderung bedeutet, also die Differenz der Helligkeiten m_2 zu einem zweiten und m_1 zu einem ersten Zeitpunkt, und $\pi_1 f_1$ sowie

$\pi_2 f_2$ die jeweils zugehörigen Strahlungsströme sind, dann gilt

$$\Delta m = m_2 - m_1 = -2.5 \lg \frac{\pi f_2}{\pi f_1} ,$$

gemäß der Pogson'schen Festlegung der Größenklassenskala.

Da der Zerfall von Co-56 die Energiequelle des Leuchtens sein soll, verhält sich der Strahlungsstrom an dem späteren Zeitpunkt t_2 zu demjenigen an dem früheren t_1 wie die beiden Anzahlen der jeweils vorhandenen Co-56-Kerne. Das Verhältnis der Letzteren ist durch das radioaktive Zerfallsgesetz gegeben. Damit ist

$$\frac{\pi f_2}{\pi f_1} = 2^{-\frac{t_2 - t_1}{T_{1/2}}} .$$

Der Leser beachte, daß die Halbwertszeit $T_{1/2}$ im Nenner des Exponenten steht, nicht die meist mit τ bezeichnete „Lebensdauer“. Daher tritt die Zahl 2 als Basis auf und nicht, wie üblich, die Eulersche Zahl e . Setzen wir die rechte Seite der letzten Gleichung für das Verhältnis der Strahlungsströme in die vorige ein, dann ergibt sich, wenn wir für $t_2 - t_1$ kurz Δt schreiben,

$$\Delta m = -2.5 \lg 2^{-\frac{\Delta t}{T_{1/2}}} = 2.5 \cdot \frac{\Delta t}{T_{1/2}} \cdot \lg 2 .$$

Setzt man nacheinander die Halbwertszeiten für Ni-56 und Co-56 in die letzte Gleichung ein, dann erhält man die beiden gestrichelten Linien „⁵⁶Ni“ und „⁵⁶Co“ in der Abbildung, wenn man Δm und Δt als die Kathetenlängen des jeweiligen Steigungsdreiecks auffaßt.

Für den Co-56-Zerfall mit $T_{1/2} = 77.3$ d ergibt sich der Zusammenhang

$$\Delta m = 0.009736 \cdot \frac{\Delta t}{1^d} \quad \text{bzw.} \quad \Delta t = 102.^d 71 \cdot \Delta m .$$

Die rechte Gleichung sagt ein langsames Abklingen der Helligkeit der Supernova voraus: alle 102.71 Tage wird sie um eine Größenklasse schwächer geworden sein. Diese Helligkeitsabnahme ist unabhängig von der Farbe, da die Lichtkurven parallel verlaufen (für die Helligkeitswerte selbst gilt dies natürlich nicht).

Mit der linken Gleichung können wir vorhersagen, wie hell die Supernova Mitte März dieses Jahres hätte sein müssen: 2011 Aug. 00 (JD 2'455'774) betrug die visuelle Helligkeit 14.3 mag. Am 2012 Mar. 16.1 (JD 2'456'002.6), also 228.6 Tage später, hätte sie um $\Delta m = 2.23$ mag auf V - 16.53 mag abgenommen haben müssen. Für diese Nacht liegt eine photometrische Beobachtung vor, die mir Erik Wischniewski aus Kaltenkirchen zukommen ließ. Auf der Basis von Aufnahmen, die Wolfgang Ries machte, fand er $R = 17.8$ mag, $V = 18.5$ mag und $B = 18.7$ mag. Diese Werte wurden in einer neuerlichen Beobachtung fünf Nächte später bestätigt. Die Supernova war

also um 2 mag schwächer als vorhergesagt. Bei einer früheren Beobachtung, am 31. Januar, konnte E. Wischnewski $V = 17.3$ mag als sichere untere Grenze der SN ermitteln. Gemäß der obigen Formel hätte sie aber noch 16.1 mag hell sein müssen, was sicher ausgeschlossen werden kann. Offensichtlich gab es vor diesem Datum einen steilen Helligkeitsabfall, wie er bei Supernovae vom Typ II wohl vorkommen kann.

Danksagung

Herzlich bedanken möchte ich mich bei Wolfgang Kriebel, Wolfgang Quester und Eberhard Splittgerber von der BAV für ihre Hinweise und die Übersendung von Umgebungskarten der Supernova sowie bei Dietmar Bannuscher (ebenfalls BAV), der diese Kontakte herstellte. Mein Dank gilt weiterhin Michael Möller und Erik Wischnewski für die Übersendung photometrischer Daten.

Abb. 1: Lichtkurve von SN 2011dh in M 51, zusammengestellt aus AAVSO-Daten

