

Mehrfarbenphotometrie der Supernova SN 2012aw in M 95 Multicolor photometry of supernova SN 2012aw in M 95

Norbert Reichmann

Abstract: *This report informs about radioactive decay of ^{56}Ni and ^{56}Co Isotope and how it can be seen in the multicolour photometric lightcurves. Using two methods it's possible to show in sections of linear decline of V and B lightcurves the radioactive decay of ^{56}Ni and ^{56}Co Isotope. First method is the surface flux – colour index correlation, second method is the logarithmic relationship of the magnitude scale. Three lightcurves for B, V, Rc and two colour index curves for (B-V) and (V-R) of the Supernova SN2012aw are presented. All measurements are based on CCD observations made with CCD camera Apogee Alta U16M and TMB Apo 130/1200. This multicolour photometry, during a timespan over 88days between 22.03.2012 and 17.06.2012, started at 6th days after discovery, were taken from my backyard astronomy site in Köstenberg, mountain Ossiacher Tauern, at an altitude of 890m. 94 observations were collected. The lightcurves in Johnson/Cousins filter B, V and Rc shows very different behavior.*

Die Messungen der Helligkeitsentwicklung der Supernova SN 2012aw erfolgten durch einen LZOS TMB Apo 130/1200 mit einer Apogee Alta U16M CCD Kamera. Innerhalb 13 Nächten über eine Zeitspanne von 88 Tagen im Zeitraum vom 22.03.2012 bis zum 17.06.2012 konnten in den Johnson/Cousins Filtern Rc, V und B insgesamt 94 Beobachtungen erfasst werden. In den Filtern Rc/V/B je 32/32/30 Messungen. Die Aufnahmen durch die photometrischen Filter der ersten 3 Nächte wurden auch für ein pretty-picture der Galaxie M 95, in welcher die SN aufleuchtete, verwendet.

Abb. 1 zeigt eine Aufnahme von M 95 mit folgenden Aufnahmedaten: jeweils 14 x 600sec durch die Filter Rc, V, B und 20 x 900sec Luminanz-Filter. Die darauf folgenden Messungen durch Rc, V und B erfolgten mit einer Belichtungszeit von 400 sec. Die Auswertung der Messergebnisse wurde mit dem Programm MPO Canopus [1] mit Hilfe der Differentiellen Photometrie durchgeführt. Im Filter Rc resultierte eine Standardabweichung SD von 0.01mag, im Filter V 0.015mag und im Filter B 0.013mag. Die Standardabweichung wurde aus dem *Target minus Comparison-Average* ermittelt.

Folgende Vergleichssterne wurden gewählt:

Für die Rc-Messung:	Comp1: 10442706 +1134173	13,036mag	VR0,399
	Comp2: 10433139 +1137158	13,188mag	VR0,543
Für die V-Messung:	Comp1: 10442706 +1134173	13,435mag	BV0,708
	Comp2: 10440468 +1151166	13,346mag	BV0,658
Für die B-Messung:	Comp1: 10442319 +1142447	13,188mag	BV0,549
	Comp2: 10442715 +1134188	14,143mag	BV0,708

SN 2012aw wurde unabhängig voneinander am 16. März 2012 in der Galaxie M 95 (NGC3351) von den Astronomen Paolo *Fagotti* (Italian Supernovae Search Project, Bastia Umbra, Italy), Alessandro *Dimai* (Cortina d'Ampezzo, Italy) und Jure *Skvarc*

(Crni Vrh Observatory, Slovenia) entdeckt. Die Supernova SN 2012aw wurde als eine Sternexplosion vom Typ IIP klassifiziert und befindet sich in der 33 Millionen Lichtjahre entfernten Balkenspiralgalaxie M 95. Die Koordinaten von SN 2012aw sind RA = 10h43m53s.72, DEK = +11°40'14".7 (J2000).



Abb. 1: SN2012aw in der Galaxie M 95

Kurzer Abriss der Vorgänge nach der Explosion:

Die Helligkeitsentwicklung der SN 2012aw zeigt große Unterschiede in den einzelnen Farbkanälen (siehe Abb.3). Die aus den Messungen ermittelten (B-V)- und (V-R)-Farbindexkurven (Abb. 2, Abb. 4) zeigen den Farbverlauf dieser SN. Um diese zu verfolgen, ist es hilfreich, zuvor ein paar Erläuterungen zu den physikalischen Vorgängen knapp nach der Explosion zu vermitteln.

Die nach außen dringende Schockwelle der Explosion traf zuerst auf eine umgebende Schicht aus Silizium, in welcher dann große Mengen vom Isotop ^{56}Ni und weiter ^{56}Co , sowie andere Isotope erzeugt wurden. Dabei entstand am häufigsten das ^{56}Ni -Isotop, aufgrund der Stabilität des Kernes, weil die potentielle Energie pro Kernteilchen gegen die Atommasse aufgetragen ein Minimum darstellt. Die genannte Kombination von Nukleonen erfolgte durch die beim Sternkollaps auftretende enorme Hitze, dem Druck und den hohen Dichten der fortschreitenden Schockwelle. Nur unter solch enormen

Temperaturen, Druck und Dichteschwankungen finden diese Kernfusions-Reaktionen statt.

Bei der Bildung der Isotope wird Gammastrahlung frei, welche ebenso nach außen dringt und die den Stern verlassenden Hüllen durchdringt bzw. diese mit ihrer Energie anregt und aufheizt. In den ersten Phasen der Explosion durchdringt diese bei der Bildung des ^{56}Ni -Isotops freiwerdende Gammastrahlung eine noch sehr dichte Sternhülle, welche noch nicht weit genug expandierte und für die Gammastrahlung noch nicht transparent wurde. Diese Gammastrahlung verwandelt sich in Wärme die dann zuerst in Form von Licht- und Infrarotstrahlung frei wird (siehe rapides Ansteigen der R-Kurve in Abb.3)

Aufgrund dieser Vorgänge ist die (B-V)-Kurve sowie auch der unterschiedliche Helligkeitsverlauf in den einzelnen Farbkanälen zu deuten.

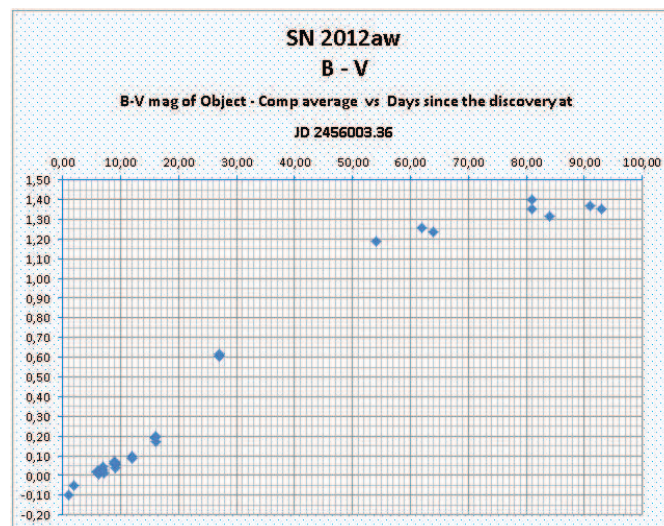


Abb.2: (B-V)-Farbindex der SN2012aw

Farbindex Kurven (B-V) und (V-R)

Am(B-V)-Farbindex-Diagramm (Abb. 2) entspricht die SN in den ersten Tagen nach der Entdeckung einem heißen A0 Stern. Die größte Intensität im kontinuierlichen Spektrum liegt zu Beginn im UV und im Blauen. Bis zum 12. Tag steigt der Farbindex auf 0.1 und die Temperatur der SN sinkt im Zuge der Ausdehnung, sie entspricht somit einem späten F-Stern. Die photometrische Helligkeit im Blauen steigt bis zum 6. Tag nach der Entdeckung (3.Tag im Diagramm) rapide an und erreicht hier ihr Maximum, um dann bis zum 12. Tag (im Diagramm) langsamer abzusinken. Direkt nach der Explosion sieht man die heiße noch nicht stark expandierte Oberfläche. Die Farbindexentwicklung bis zum 12.Tag von -0.1 bis 0.1 entspricht einem heißen A0 Stern bis zu einem bereits deutlich kühleren späten F Stern. Danach, vom 12. bis 20. Tag entwickelt sich die SN mit stärkerer Intensität vom Bläulichen zum Weißen (d.h. sie wird rapide weniger Blau). Mit monoton verminderter Intensität ab dem 20. Tag

entwickelt sie sich immer mehr vom Gelben bis zum Roten mit einem Farbindex im Max. von 1.4 ab dem 80.Tag. Dies entspricht einem späten M-Stern.

Kurvenentwicklung in den photometrischen Bändern Rc, V und B

In den einzelnen Farbkanälen (Abb.3) zeigen sich große Unterschiede in der Helligkeitsentwicklung. Anfangs der Entwicklung sieht man noch die sehr frühe und heiße, durch die Energie der Neutrinos aufgeheizte äußere Hülle der SN. Sie strahlt im UV und Blauen. Im weiteren Verlauf mit zunehmender Ausdehnung der Expansionshülle kann das heiße blaue Licht aufgrund der aufgeheizten äußeren Schichten schwieriger durchscheinen. Ebenso durchdringt es nicht mehr die dichten aufgeheizten inneren Schichten. Hier erfolgen nun die vorher genannten Kernreaktionen. Was man aber sieht, ist die äußere expandierte Atmosphäre. Nicht mehr aber das heiße Innere, sondern nur die äußere expandierte Hülle. Diese wird von den inneren heißen Schichten ebenso aufgeheizt. Die Strahlung kommt durch eine aufgeheizte äußere Hülle schwieriger durch, im Blauen wird die SN rapide schwächer zwischen dem 15. und 35. Tag, im Roten hingegen steigt sie von Beginn unentwegt bis um den 35. Tag an. In den äußersten Schichten bildet sich Staub, in der aufgeheizten äußeren Hülle herrscht ein Emissionslinienspektrum vor sowie die Emission neuer höherer ionisierter Elemente erscheint. Die Erwärmung der äußeren Hülle und des Staubes lässt die SN im Farbindex zunehmend rot werden. Zwischen 20. und 50. Tag ist die äußerste Hülle am dichtesten und lässt kaum Strahlung aus dem Inneren durch (R-Kurve Abb.2). In der (B-V)-Kurve ist hier die stärkste Abnahme vom Blauen zu sehen. So ist die rote photometrische Helligkeitsentwicklung zu deuten. Mit weiterer Ausdehnung und Verdünnung der äußeren Hülle kann man wieder tiefer in die inneren Schichten blicken und im Blauen erfolgt eine schwächere Abnahme ab dem 70. Tag, wo hingegen im Roten hier eine rapide Abnahme einsetzt da wieder mehr Strahlung aus den heißeren tieferen Schichten entweichen kann. Die Helligkeitsentwicklung im Roten und Blauen verlaufen in gegenseitiger Abhängigkeit. Was aber in der B- und V-Kurve noch zu sehen ist, entspricht den physikalischen Vorgängen des Isotopen-Abbaus in den innersten Schichten der weggestoßenen Sternhülle. Ein linearer Kurvenverlauf einer logarithmischen Helligkeitsskala entspricht einem exponentiellen Vorgang im Strahlungsstrom. Die Magnituden-Skala ist historisch gewachsen und ist aus zwei Gründen logarithmisch: aufgrund ihres historischen Hintergrundes und dem (physiologisch bedingten) *Weber - Fechner'schen Grundgesetz* [6]. Eine Gerade in den Helligkeitskurven entspricht einer exponentiellen Zu- oder Abnahme des Strahlungsstromes.

Nachweis des ^{56}Ni - und ^{56}Co -Isotopenzerfall mit zwei Methoden

Folgende mathematische Beziehung zeigen diese Verhältnisse auf:

$${}_b \log(a) = c \Leftrightarrow b^c = a$$

Wie ja bekannt, ist die Umkehrfunktion des Logarithmus die Exponentialfunktion.

Im V- und B-Diagramm (Abb.3) können wir Geraden im Bereich ab dem 10. und über den 20. Tag hinaus sowie zwischen 50. und 85. Tag abschätzen. Die genauen Grenzen der abgeschätzten Geraden sind nicht ersichtlich, da hier keine Messwerte vorliegen. Für die Ermittlung der Steigung der Geraden sind die genauen Grenzen

auch nicht erforderlich, vorteilhaft ist es aber, wenn mehrere Punkte innerhalb der Geraden ersichtlich sind. Letzteres trifft für die erste abgeschätzte Gerade in V und B (Bereich zwischen 10.- 20. Tag) nicht zu, jedoch für die zweite (Bereich 50.- 85. Tag). Weitere Punkte für die erste abzuschätzende Gerade dürften jeweils mit Streuung der Steigung um den Punkt des 20. Tages liegen.

Mit Hilfe der Geradenbeziehung

$$y = k \cdot x + d$$

$$k = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \quad (1)$$

ergeben sich, indem für Δy die unterschiedlichen Helligkeiten und Δx die entsprechenden Tage in den abgeschätzten Intervallen eingesetzt werden, folgende Geradensteigungen: Für V in den genannten Zeiträumen $k_{V1} \approx -0.036$ und $k_{V2} \approx -0.006$. Mit Index V1 ist die Gerade im Bereich 10. - 20. Tag gemeint, mit Index V2 die Gerade im Bereich 50. - 85. Tag. Da der Helligkeitsverlauf der SN in den ersten Wochen durch die Gammastrahlung der sich abbauenden Isotope ^{56}Ni und ^{56}Co verursacht wird, und der Isotopenzerfall nach einem exponentiellen Gesetz erfolgt, ist zu prüfen, ob in den angedeuteten linearen Geraden in V und B dieser exponentielle Isotopenzerfall nachzuweisen ist. Die Steigungen der Geraden müssten also proportional zur abnehmenden Menge des zerfallenden Isotops sein. Mit anderen Worten: Geraden in den V- und B-Kurven entsprechen einem exponentiellen Zerfall der Isotope, da die Farbhelligkeiten (Magnituden-Skala) logarithmischen Gesetzen folgen.

1.Methode: Nachweis mit Hilfe der Oberflächen Flux – Farbindex Korrelation

Mit Hilfe einer Oberflächen-Flux F'_V und Farbindex (V-R) - Korrelation [5]:

$$F'_V = a + b(V - R) \quad (8)$$

-0.17<(V-R)<0.00	a=3.977	b=-1.390
0.00<(V-R)<1.26	a=3.977	b=-0.429
1.26<(V-R)<4.20	a=3.837	b=-0.320

ergibt sich für die (V-R)-Kurve eine Flux F'_V im Bereich des 20. Tages von 3.869 und im Bereich des 26. Tages eine Flux F'_V von 3.741 (8). Setzen wir diese beiden Werte für S_1 und S_2 in die Pogson –Beziehung (6) ein, erhalten wir ein Δm von 0.0367. Dies entspricht nun sehr genau dem k -Wert k_{V1} (siehe unten: Steigung der Geraden in der V-Kurve zwischen 10. und 20. Tag, entspricht in der (V-R)-Kurve den 16. bis 26. Tag) gewonnen aus der einfachen Beziehung (1). Die Gerade, gewonnen aus der V-Kurve durch (1), entspricht der exponentiellen Abnahme des Strahlungsstromes,

Strahlungsströme zu zwei verschiedenen Zeitpunkten gewonnen aus der (V-R)-Kurve durch (8), und zeigt somit deutlich den Zerfall des ^{56}Ni -Isotops an! Auch für den ^{56}Co - Zerfall (50. – 80. Tag in V) zeigt sich eine Übereinstimmung der Werte im Tausendstel-Genauigkeitsbereich!

2.Methode: Nachweis mit Hilfe der logarithmischen Helligkeitsbeziehung nach Pogson

Eine weitere Möglichkeit des Nachweises ergibt sich auch durch die Bezüge (1) und (6), wie sie auch Herr Walker sehr schön in seinem Bericht zur Lichtkurve der SN2011dh im BAV Rundbrief 2-2012 hergeleitet [2] hat.

$$n = n_{t=0} \cdot e^{\left(\frac{-t}{\tau}\right)} \quad (2)$$

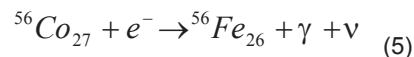
τ entspricht der mittleren Lebensdauer der radioaktiven Kerne. Ersetzt man τ durch die Zeit $t_{1/2}$, nach welcher eine Halbierung der Kerne eintritt, so kann auch folgende Beziehung gewählt werden:

$$n = n_{t=0} \cdot 2^{-\frac{t}{t_{1/2}}} \quad (3)$$

Physikalisch erfolgt der Zerfall durch Elektroneneinfang, also durch sogenannten Beta-Zerfall



Dieser Zerfall erfolgt bei ^{56}Ni mit einer Halbwertszeit von 6.1 Tagen. Ebenso durch Elektroneneinfang zerfallen die Kobaltkerne mit einer Halbwertszeit von 77.12 Tagen in Eisen:



Wenn Δm die Differenz der Helligkeiten der SN zu zwei verschiedenen Zeitpunkten ist, dann kann man in der Logarithmischen Helligkeitsskala nach Pogson die Strahlungsströme S_1 und S_2 durch die aus dem Zerfall des ^{56}Ni stammenden Energien zu zwei verschiedenen Zeitpunkten ersetzen. S_1 und S_2 wird also ersetzt durch die aus dem Zerfall generierten Energien zu den Zeitpunkten t_1 , t_2 . Wie Herr Walker [2] in seinem Bericht sehr schön aufzeigte, wird aus:

$$\Delta m = m_2 - m_1 = -2.5 \cdot \lg\left(\frac{S_2}{S_1}\right) = -2.5 \cdot \lg 2^{\left(\frac{t_2 - t_1}{t_{1/2}}\right)} \quad (6)$$

Die Steigung der linearen Geraden in den abgeschätzten Bereichen ergibt aufgrund
(1) $k_{V1} = -0.036$ sowie $k_{V2} = -0.006$. Im Besonderen entspricht aufgrund
(6) $k = \frac{\Delta m_{V2}}{\Delta t} = \frac{-0.24}{37d} = -0.0064$ (mit Hilfe der 1.Methode und **(6; 8)** beträgt
 $k_{V2} = -0.007$!) der aus der V-Kurve abgeschätzten Steigung der zweiten Geraden
im Bereich 50. – 85.Tag. Der ^{56}Co - Zerfall zeigt sich deutlich in der auslaufenden
Geraden k_{V2} der V-Kurve. Der Zerfall von ^{56}Ni ist aufgrund zu großer
Ungenauigkeiten in der Ermittlung der Steigung k_{V1} nicht deutlich zu zeigen. Dies
hängt damit zusammen, dass die erste Gerade (in V und B) um den Punkt des 20.
Tages nicht genau abgeschätzt werden kann. Für eine exakte Steigungsermittlung
liegen zu wenig Messpunkte in dem Bereich vor.

Die mittlere Lebensdauer τ der ^{56}Ni -Isotopenkerne ergibt sich mit 8.8Tagen, dies
passt

$$\tau = \frac{-t_{1/2}}{\ln(0.5)} \quad (7)$$

sehr gut in das Intervall des Gefälles des ^{56}Ni -Isotops um den Messpunkt des 20.
Tages. Nach 26 Tagen sind nur mehr 5% der zu Beginn der SN Explosion gebildeten
 ^{56}Ni -Kerne vorhanden. Auch dies zeigt sich in den B- und V-Lichtkurven im Bereich um
den 20. Tag, die Zerfallsgerade des ^{56}Ni -Isotopenabbau endet in dem Bereich. (Letzte
nicht detektierte Beobachtung der SN mit 20.7 mag am März 15.27, danach innerhalb
von 48h ein Anstieg um 6.6 mag bis zur nächsten Beobachtung des PTF am März
17.18 [3]; die Abschätzung um den 20. Tag ergibt sich also aus der Subtraktion von 6
Tagen, da meine Messungen am 6. Tag nach der Explosion begannen).

Danach zeigt sich der Beginn des ^{56}Co -Zerfalles in der B- und V Lichtkurve. Die
mittlere Lebensdauer der ^{56}Co -Isotopenkerne ergibt sich mit 111.26 Tagen **(7)**. Der
Beginn dieses Zerfalles zeigt sich um JD 2456040 im Bereich um den 30. Tag der
Messungen. Eine Messung an JD 2456039.3914 des MEDUZA Projektes der *Variable
Star and Exoplanet Section of Czech Astronomical Society* [4] liegt mit 14.228 mag für
B und 13.39 mag für V vor. Bezüglich B-Helligkeit liegt das sehr gut in der besagten
Geraden des ^{56}Co -Zerfalles der obigen B-Kurve. Für V ist das Datum mit
entsprechendem Wert etwas zu früh angesetzt, dies bestätigt auch die Erwartung,
dass sich in V der ^{56}Co -Zerfall mit Verzögerung zeigt.

Nach dem 88. Tag meiner Messungen war es kaum mehr möglich, die SN in der
westlichen Dämmerung weiter zu verfolgen. Die dem ^{56}Co -Zerfall entsprechende
Gerade zieht sich aber deutlich weiter. Nach fast einem Jahr, 333 Tagen, sind nur
mehr 5% der ^{56}Co -Kerne vorhanden, also erst ein Jahr danach verlässt die
Helligkeitsentwicklung diese Gerade. In jeder Stufe der radioaktiven Zerfallskette von

^{56}Ni zu ^{56}Co (4) weiter zu ^{56}Fe (5) wird die Helligkeit der SN durch die dabei freiwerdende Gammastrahlung gespeist.

Danksagung: Bei Herrn Walker bedanke ich mich durch seinen aufschlussreichen Bericht für die Anregung, meine Lichtkurven genauer zu analysieren. Ebenso bedanke ich mich bei Herrn Bannuscher für die Ermutigung, diesen Bericht zu verfassen.

Literaturhinweise:

- [1] MPO Canopus/PhotoRed <http://www.MinorPlantObserver.com>;
- [2] Walker David: Die Lichtkurve der SN 2011dh in M51, BAV Rundbrief Nr.2, 61.Jahrgang,
- [3] PTF observations of SN2012aw (PTF12bvh) and explosion date constraints
- [4] <http://var2.astro.cz/EN/meduza/light-curves-ccd.php?star=SN2012aw%20Leo&shv=Leo>
- [5] Budding E, Demicran O: Introduction to Astronomical Photometry, S.63 – 65, Cambridge University Press, 2007
- [6] *Weber-Fechner'sches Grundgesetz*: additiv empfundene Reize (1x-, doppelt-, 3x so stark...) entsprechen einer multiplikativen Zunahme der objektiv physikalischen Reize. Das heißt: Die Empfindungen sind proportional zum Logarithmus des Reizes.

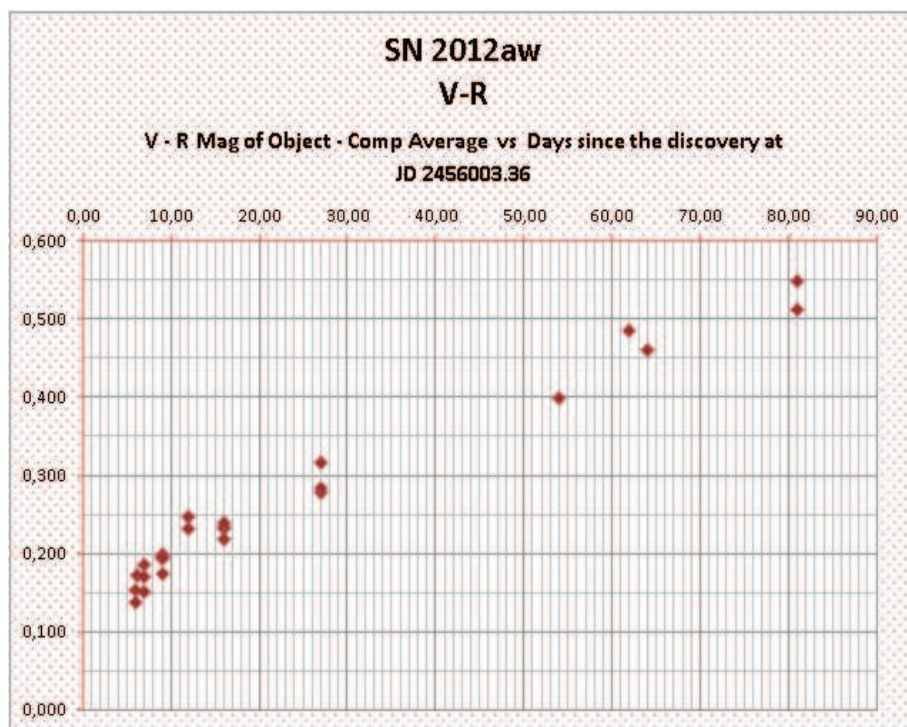


Abb.4: (V-R)-Farbindex der SN2012aw

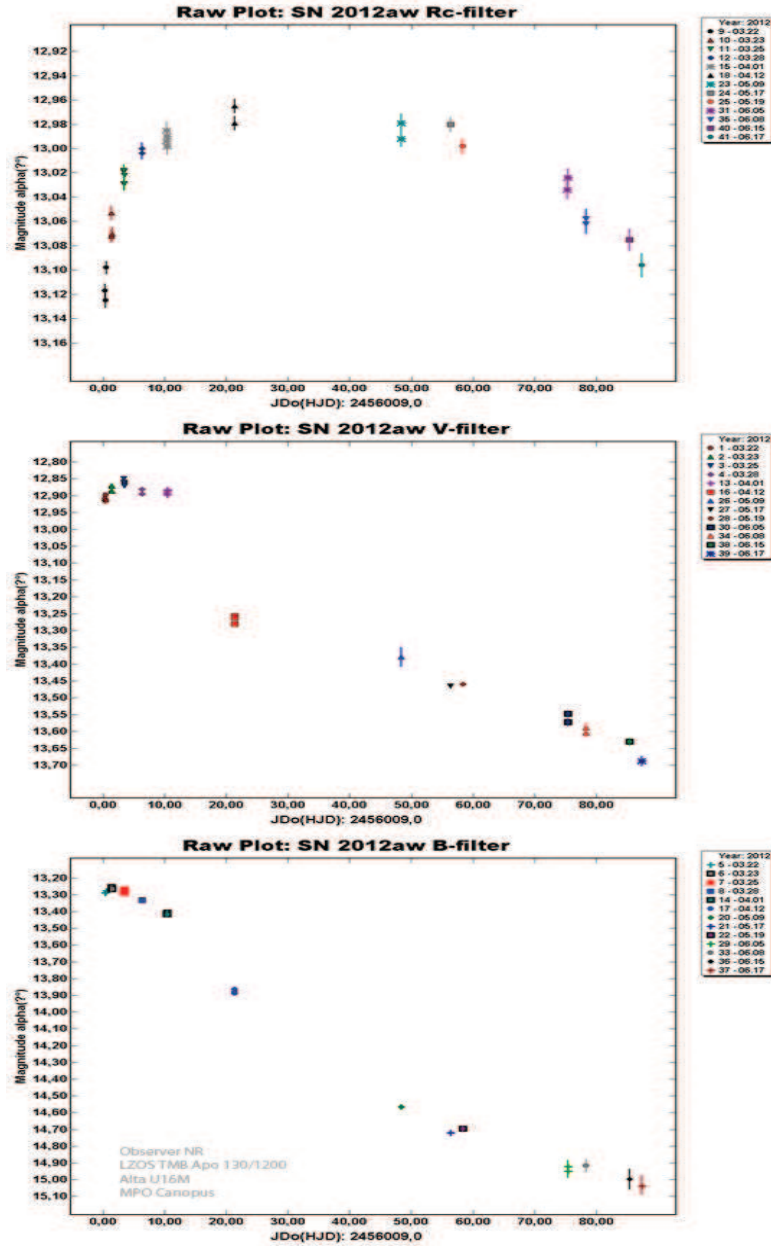


Abb.3: Die Helligkeitsentwicklung in den Farbkanälen Rc, V und B der SN2012aw