

SPRACHEN- UND REALGYMNASIUM NIKOLAUS CUSANUS
BRUNNECK

FACHARBEIT

AUS PHYSIK

Die Supernova 2014J

Verfasser: Julian DURNWALDER *Betreuende Lehrperson:* Prof. Ulrich MARCHER

Schuljahr 2014/2015

Inhaltsverzeichnis

Einleitung	5
1 Wissenschaftliche Hintergründe	7
1.1 Historisches	7
1.2 Vorläufer einer Typ Ia Supernova	9
1.3 Typ Ia Supernovae als Standardkerzen	10
1.4 Die Entdeckung der dunklen Energie	11
2 Datengewinnung	13
2.1 iTelescope	13
2.2 Optik und Montierung	13
2.3 Die CCD-Kamera	14
2.4 Durchführung der Beobachtung	16
2.5 Johnson Filter-System	17
3 Datenreduktion	19
3.1 Allgemeines	19
3.2 Dark	19
3.3 Flat	21
3.4 Datenreduktion mit Pixinsight	22
3.5 Photometrie	23
4 Ergebnisse	25
4.1 Messwerte	25
4.2 Berechnung der Distanz	27
4.3 Die Phillips-Beziehung	29
4.4 Abschließende Bemerkungen	30
Abbildungsverzeichnis	34
Literaturverzeichnis	37

Einleitung

Supernovae gehören zu den hellsten Ereignissen im Universum, es handelt sich dabei um die Explosion eines Sterns. Die Geschichte der Supernova-Beobachtung reicht weit zurück. Die ersten Aufzeichnungen sind rund 2000 Jahre alt. Auch in der modernen Astronomie sind Supernovae von Bedeutung, vor allem im Bereich der Kosmologie. Heute wissen wir, dass Leben, so wie wir es kennen, ohne Supernovae nicht hätte entstehen können. Der Großteil der Elemente, aus denen die Erde besteht, sind aus Supernovae entstanden, oder wurden als Folge der Explosion im Universum verteilt. Supernovae sind auch zuverlässige Werkzeuge zur Entfernungsmessung. Es gibt zwar eine Reihe von Methoden zur Entfernungsmessung, aber keine erlaubt es, die Distanz zu so weit entfernten Objekten zu bestimmen. Allerdings ist das nur mit einer bestimmten Art von Supernovae möglich, den Typ Ia Supernovae. In den 1990er Jahren veränderten die Entfernungsmessungen mithilfe von Typ Ia Supernovae unser Bild vom Kosmos. Man entdeckte, dass sich das Universum beschleunigt ausdehnt, hierfür gab es 2011 den Physik-Nobelpreis. Auch ich habe im Zuge meiner Arbeit eine Typ Ia Supernova beobachtet. Mein Ziel ist es, die Entfernung zur Galaxie, in der die Supernova stattgefunden hat, zu berechnen. Die Supernova die ich beobachtet habe, trägt den Namen 2014J, sie wurde Anfang 2014 in der Galaxie Messier 82 entdeckt. Ich habe kurz nach deren Entdeckung mit meiner Beobachtung begonnen.

Kapitel 1

Wissenschaftliche Hintergründe

1.1 Historisches

Für lange Zeit galt der Fixsternhimmel als unveränderlich. Tatsächlich ist das Universum alles andere als unveränderlich, nur die Zeitskalen, in denen Veränderungen auftreten, sind meist viel zu groß, als dass wir etwas davon merken. Supernovae gehören zu den wenigen Ereignissen, auf die dies nicht zutrifft. Findet eine Supernova in unserer Galaxie statt, so erscheint plötzlich ein „neuer Stern“, der so hell werden kann, dass er für mehrere Monate am Tageshimmel sichtbar ist. Allerdings sind solche Ereignisse recht selten, sie gerieten auch oft in Vergessenheit. In den letzten 2000 Jahren wurden etwa ein Dutzend Supernovae dokumentiert. Eine der bedeutendsten Beobachtungen war die des dänischen Astronomen Tycho Brahe im Jahre 1572. Sie gilt als Geburtsstunde der modernen Astronomie. Bis dahin glaubte man auch in Europa an die Unveränderlichkeit des Fixsternhimmels[WH05]. Nur wenige Jahrzehnte später, im Jahre 1604, fand eine weitere Supernova statt, die von Johannes Kepler beobachtet wurde. Seit dem 17. Jahrhundert gab es keine Supernova mehr in unserer Milchstraße[WH05], trotzdem konnte man Supernovae ausgiebig studieren. Durch die Entwicklung immer leistungsfähigerer Teleskope konnte man viele Supernovae in anderen Galaxien beobachten. Den Begriff Supernova prägte der Schweizer Physiker Fritz Zwicky. Im Jahre 1934 veröffentlichte er zusammen mit Walter Baade einen Artikel, in dem sie erstmals den Begriff Supernova verwendeten[BZ34]. Sie vermuteten, dass es sich bei einer Supernova um die Entstehung eines Neutronensterns handelt. Damit waren sie die Ersten, die erkannten, dass diese Ereignisse eine andere Ursache haben müssen als die klassischen Novae. In den darauffolgenden Jahren beobachtete Fritz Zwicky über hundert Supernovae. Im Jahre 1941 entdeckte der Astrophysiker Rudolph Minkowski, dass es mindestens zwei

verschiedene Arten von Supernovae gibt. Er beobachtete das Spektrum von 14 Supernovae, dabei ordnete er 9 dem Typ I und 5 dem Typ II zu[Min41]. Im Spektrum der Typ I Supernovae finden sich im Gegensatz zu dem der



Abbildung 1.1: Fritz Zwicky diente Friedrich Dürrenmatt als Vorbild für die Figur des Johann Wilhelm Möbius im Drama “Die Physiker“ [MPF12]. (Foto: [Sal])

Typ II Supernovae keine Absorptionslinien des Elements Wasserstoff. Weiters zeigte sich, dass die Typ II Supernovae große individuelle Unterschiede aufweisen, wogegen Typ I Supernovae kaum individuelle Unterschiede aufweisen. Es blieb aber nicht bei dieser Unterteilung, sehr bald wurde eine genauere Unterteilung vorgenommen. Grundlage für diese Unterteilung war wiederum die Analyse des Spektrums. So werden Typ I Supernovae unterteilt in Ia, Ib und Ic. Weist das Spektrum einer Typ I Supernova Silizium auf so handelt es sich um eine Typ Ia Supernova. Eine Typ Ib Supernova liegt vor, wenn das Spektrum das Element Helium aufweist. Andernfalls handelt es sich um eine Typ Ic Supernova. Die Einteilung der Typ II Supernovae ist noch weitaus komplizierter, da hier neben dem Spektrum auch die Form der Lichtkurve betrachtet werden muss. Ich werde hier aber nur die Typ Ia Supernovae genauer betrachten.

Auch wenn die Unterteilung hauptsächlich mittels Spektroskopie vorgenommen wird, weisen aber doch auch die Lichtkurven charakteristische Eigenschaften auf. Dies werde ich im Abschnitt Auswertung behandeln.

1.2 Vorläufer einer Typ Ia Supernova

Wie es zu einer Typ Ia Supernova kommt ist noch nicht vollständig geklärt. Als Vorläufersterne kommen aber nur weiße Zwerge, bestehend aus Kohlenstoff und Sauerstoff in Frage[CT01]. Bei einem weißen Zerg handelt es sich um den Überrest eines massearmen Sterns. Im Verlauf der Entwicklung eines Sterns, werden immer schwerere Elemente in seinem Kern fusioniert. Ist der Stern allerdings nicht massereich genug, um den nötigen Druck und die nötige Temperatur aufzubauen, stoppt die Kernfusion. Zusätzlich stößt der Stern seine äußeren Hälften ab, übrig bleibt nur mehr ein dichter Kern aus Kohlenstoff und Sauerstoff. Das Abstoßen der äußeren Hälften würde das Nichtvorhandensein von Wasserstoff und Helium im Spektrum einer Typ Ia Supernova erklären. Die abgestoßenen Hälften eines solchen Sterns sind die Ursache für einen planetarischen Nebel. Ein Beispiel dafür ist der Helix-Nebel im Sternbild Wassermann. Im Zentrum dieses Nebels befindet sich ein weißer Zerg[SCR⁺07]. Allerdings ist man sich noch nicht sicher,



Abbildung 1.2: Diese Aufnahme zeigt den Helixnebel mit dem weißen Zerg im Zentrum. Aufgenommen habe ich dieses Bild mit einem 27"CDK von iTelescope.

wie es zur Explosion eines weißen Zwergs kommt. Man nimmt an, dass sich

der weiße Zwerg in einem engen Doppelsternsystem befindet. Dabei strömt Masse vom Begleiter auf den weißen Zwerg, bis dieser die kritische Masse von 1,44 Sonnenmassen erreicht. Diese Masse wird als Chandrasekhar-Masse bezeichnet[MRBH07]. Um einen Überströmen von Gas zu ermöglichen, muss es sich um ein sehr enges Doppelsternsystem handeln. Der Begleiter muss hierfür das Roche Volumen erreichen [IT99]. Kombiniert man diese Voraussetzungen mit dem was wir über die Entwicklung von Sternen wissen, wäre folgendes Szenario möglich: Es liegt ein Doppelsternsystem vor, wobei einer der beiden Sterne massereicher ist als der Andere. Beide Sterne sind anfangs Hauptreihensterne, wobei der massereichere im Laufe der Zeit zum roten Riesen wird, bis er seine äußeren Hälften abstoßt und zum weißen Zwerg wird. Der zweite Stern ist dabei aufgrund seiner geringeren Masse immer noch ein Hauptreihenstern. Im Laufe der Zeit wird aber auch dieser zu einem roten Riesen. Seine Volumen nimmt dabei so zu, dass er das Roche Volumen überschreitet. Dies bedeutet, dass sich der Lagrange-Punkt L_1 innerhalb des Sterns befindet. Nun entsteht eine Akkretionsscheibe um den weißen Zwerg. Durch Reibungskräfte in der Akkretionsscheibe fällt Material auf den weißen Zwerg. Wird schließlich die Chandrasekhar-Masse überschritten, kommt es zur Supernova. Die Prozesse, die im Moment der Zündung der thermonuklearen Reaktion ablaufen, wurden bereits mit Supercomputern simuliert. Mit diesen Simulationen konnte man in den letzten Jahren große Erfolge erzielen[WH05]. Auch die Tatsache, dass es sich bei Typ Ia Supernovae um Standardkerzen(siehe 1.3) handelt kann mit diesem Modell erklärt werden. Da die Explosion immer genau dann stattfindet wenn die Chandrasekhar-Masse erreicht ist, wird bei der Supernova auch immer gleich viel Energie frei.

1.3 Typ Ia Supernovae als Standardkerzen

Bereits 1941 beschrieb Astrophysiker Rudolph Minkowski, der zusammen mit Fritz Zwicky und Walter Bade am Mount Wilson Observatorium forschte, die Supernovae vom Typ I als sehr homogene Gruppe. Sie weisen kaum individuelle Unterschiede auf [Min41]. Vermutlich handelte es sich bei den von ihm beobachteten Typ I Supernovae vor allem um Typ Ia Supernovae. Somit stand bereits damals die Frage im Raum, ob sich diese Supernovae als Standardkerzen eignen. Bei einer Standardkerze handelt es sich um Objekte deren absolute Helligkeit¹ bekannt ist. Somit kann man durch Messen der scheinbaren Helligkeit die Entfernung bestimmen. Es dauerte aber bis in die 1990er Jahre bis man mit der Verwendung von Typ Ia Supernovae als

¹Leuchtkraft

Standardkerzen Erfolge aufweisen konnte. Dies hatte mehrere Gründe. Zum einen müssen Typ Ia Supernovae erstmal entdeckt werden. Dies ist schwierig, da sie selten sind und da man sie nur für kurze Zeit sehen kann. Man muss systematisch große Teile des Himmels beobachten und diese Daten schnell auswerten, um die entdeckten Supernovae anschließend mit einem dazu geeigneten Teleskop zu beobachten. Dies wurde erst durch die Entwicklung großer CCD-Chips(siehe 2.3) möglich. Zum anderen entdeckte man erst Anfang der 1990er Jahre, dass es sich bei Typ Ia Supernovae doch nicht um perfekte Standardkerzen handelt. Die individuellen Helligkeitsunterschiede sind zwar deutlich kleiner als bei anderen Supernova-Typen, es gibt sie aber. Die Typ Ia Supernovae sind damit aber nicht unbrauchbar zur Entfernungsbestimmung, da man entdeckt hat, dass ein Zusammenhang zwischen Helligkeitsabfall, Farbe und Maximalhelligkeit besteht. Typ Ia Supernovae sind also genau genommen keine Standardkerzen, sondern standardisierbare Kerzen.

1.4 Die Entdeckung der dunklen Energie

Im Jahre 1929 [Hub29] bestimmte Edwin Hubble die Radialgeschwindigkeit verschiedener Galaxien, in dem er ihre Rotverschiebung maß. Dabei stellte er fest, dass die Rotverschiebung proportional zur Entfernung einer Galaxie ist. Je weiter eine Galaxie entfernt ist, desto größer ist ihre Radialgeschwindigkeit. Daraus folgerte er, dass sich das Universum ausdehnt. In den 1990er Jahren wollten zwei Forscher-Teams, das High-Z Supernova Search Team[RFC⁺98] und das Supernova Cosmology Project[PAG⁺99], diese Ausdehnung genauer untersuchen. Sie wollten zeigen, wie sich die Ausdehnung des Universums verlangsamt. Sie nahmen nämlich an, dass die Gravitation aller Ausdehnung entgegenwirkt. Für die Entfernungsbestimmung verwendeten sie Typ Ia Supernovae. In den Jahren 1998 und 1999 präsentierte beide Teams ihre Ergebnisse. Unabhängig voneinander zeigten sie, dass weit entfernten Supernovae weniger hell sind, als ihre Rotverschiebung es erwarten lässt. Dies würde aber bedeuten, dass die Ausdehnungsgeschwindigkeit des Universums zunimmt. Anfangs wurde das Ergebnis mit großer Skepsis betrachtet. Mittlerweile ist das Vorhandensein einer Energie, die diese beschleunigte Ausdehnung verursacht, gut bestätigt. Beispielsweise durch die Ergebnisse der Plank-Mission[PAA⁺15]. Für diese Entdeckung erhielten drei Forscher 2011 den Physik Nobelpreis, Saul Perlmutter vom Supernova Cosmology Project sowie Brian Schmidt und Adam Riess vom High-Z Supernova Search Team. An dieser Erkenntnis zeigt sich wie wichtig Typ Ia Supernovae als Werkzeuge zur Entfernungsmessung sind.

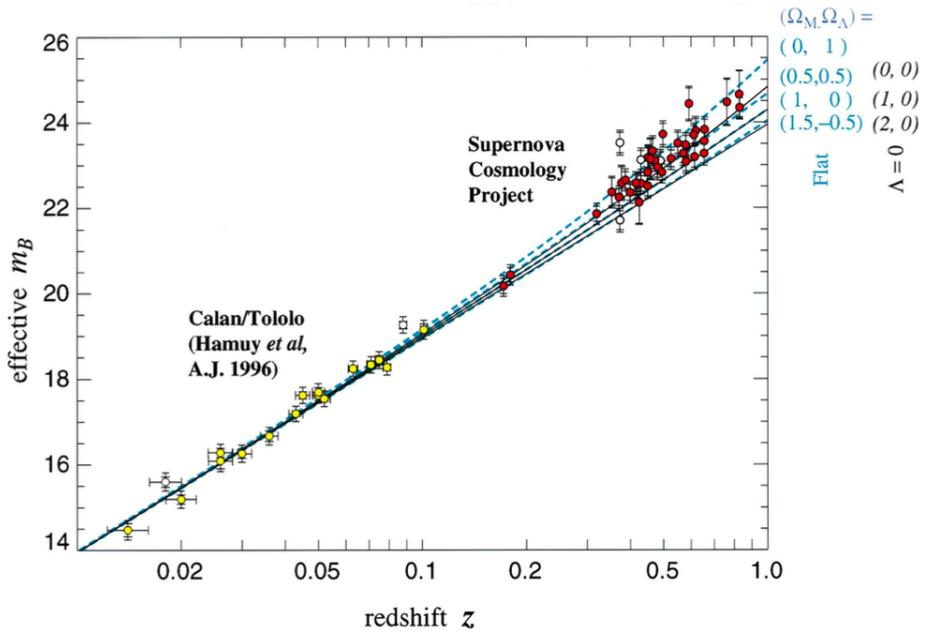


Abbildung 1.3: Dieses Diagramm zeigt die Ergebnisse vom Supernova Cosmology Project[PAG⁹⁹]. Auf der y-Achse ist die korrigierte scheinbare Magnitude im B-Band aufgetragen. Dies ist bei einer Standardkerze auch gleichzeitig ein Maß für die Entfernung. Auf der x-Achse ist "z" , ein Maß für die Rotverschiebung angegeben.

Kapitel 2

Datengewinnung

2.1 iTelescope

Um eine Entfernungsmessung mit Hilfe einer Typ Ia Supernovae durchzuführen, muss eine Lichtkurve erstellt werden. Hierbei wird die Helligkeit der Supernova in regelmäßigen Zeitabständen gemessen. Man benötigt dafür ein leistungsfähiges Teleskop mit CCD-Kamera an einem geeigneten Standort. Letzteres ist für diese Art von Beobachtungen besonders wichtig, da man über einen Zeitraum von mehreren Wochen gute Wetterverhältnisse haben muss. Aus diesem Grund wäre ein Standort in Mitteleuropa für dieses Projekt ungeeignet gewesen. Ich habe deshalb ein Teleskop von iTelescope verwendet. iTelescope ist eine Organisation, die es dem Nutzer erlaubt, Teleskope über das Internet zu nutzen. Zur Auswahl stehen Teleskope in den USA, Australien und Spanien. Ich habe mich für das Teleskop T21 entschieden. Dieses befindet sich in Mayhill, im US-Bundesstaat New Mexiko. Von dort aus ist die Galaxie Messier 82 relativ gut sichtbar und längere Schlechtwetterphasen sind sehr selten. Das Teleskop gehört zu den leistungsfähigsten Teleskopen die angeboten werden. Besonders die große Auswahl an Filtern und die für Photometrie gut geeignete CCD-Kamera waren für meine Arbeit wichtig.

2.2 Optik und Montierung

Das Herzstück eines jeden Teleskopes ist die Optik, in diesem Fall handelt es sich um das Modell 17"CDK des Herstellers "Planewave". Der Durchmesser des Primärspiegels beträgt 431mm, die Brennweite beträgt 1940mm. Zusätzlich ist das Teleskop mit einer Brennweitenreduzierung ausgestattet. In Kombination mit der CCD-Kamera hat das Teleskop dadurch ein Blickfeld von etwa 30 x 50 Bogenminuten. Für meine Arbeit wäre auch ein kleineres



Abbildung 2.1: Das von mir verwendete Teleskop „T21“ (vorne, rechts) befindet sich in einer Rolldachhütte mit etwa einem Dutzend weiterer Teleskope. (Bild:[Jan])

Blickfeld von etwa 15x15 Bogenminuten ausreichend gewesen, ich habe so aber den Vorteil, dass ich mehr Vergleichssterne habe. Die Montierung des Teleskops ist eine “Ascension 200HR“ des Hersteller “Planewave“ . Die Besonderheit daran ist, dass die Montierung ohne “Guiding“ auskommt. Das bedeutet, dass das Teleskop, auch ohne zusätzliche Korrektur, ein Objekt ausreichend präzise nachführen kann. Die Sterne waren auf den Aufnahmen immer perfekt punktförmig. Das ist für die von mir verwendete Technik, der Apertur-Photometrie, besonders wichtig. Das Teleskop hat auch einen Satz von photometrischen Filtern, die ich für meine Beobachtungen verwendet habe.

2.3 Die CCD-Kamera

Besonders wichtig für die Photometrie ist die CCD-Kamera. Es handelt sich dabei um ein Instrument, welches auftreffende Photonen detektiert. Das Prinzip basiert auf dem inneren photolektrischen Effekt: Jedes Pixel besteht aus einem p-n-Übergang und einem „Gate“ [Pie] . Beim „Gate“ handelt es sich um ein Bauteil aus Aluminium, welches positiv geladen ist. Trifft ein Photon auf die Grenzschicht des p-n-Übergangs, wird ein rekombiniertes Elektron

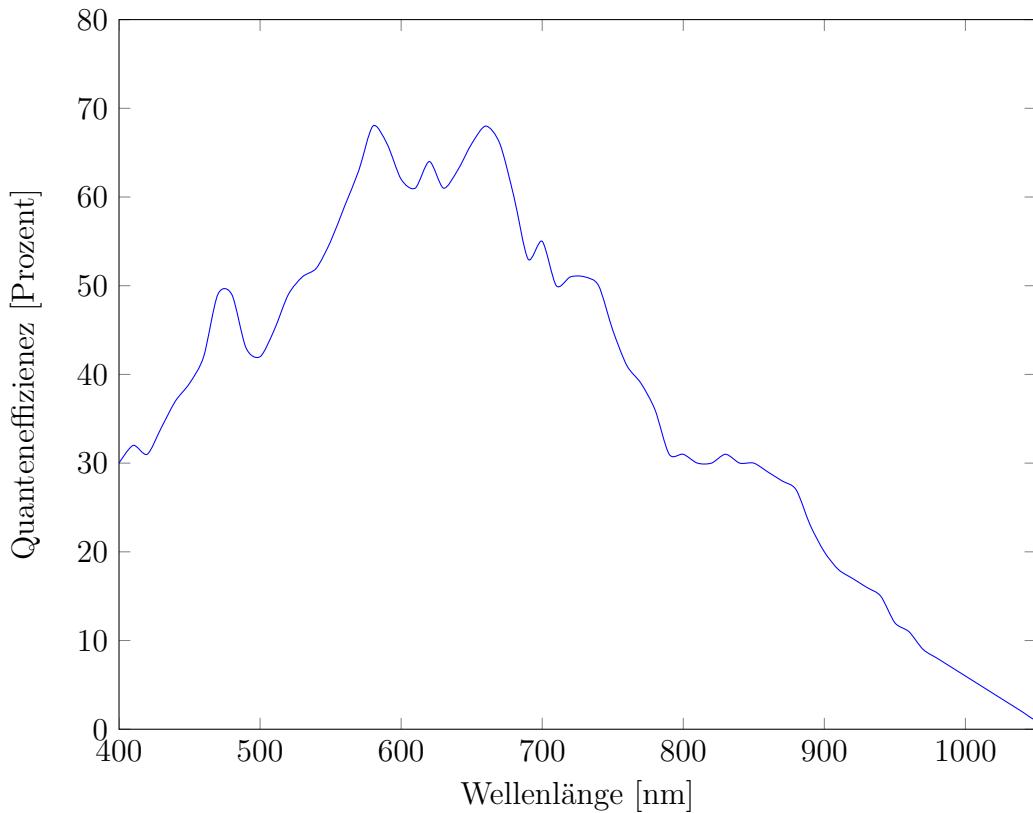


Abbildung 2.2: Die obenstehendes Abbildung zeigt die Quanteneffizienz in Abhängigkeit der Wellenlänge, der von mir verwendeten CCD-Kamera.

aus dem p-dotierten Halbleiter herausgeschlagen. Das Elektron wandert zum positiv geladenen Gate und wird dort „gespeichert“, bis das Pixel ausgelesen wird. Auch wenn das Grundprinzip jeder CCD-Kamera gleich ist, gibt es eine Reihe von Eigenschaften in denen sie sich die Modelle der verschiedenen Hersteller stark unterscheiden können. Ich habe für meine Arbeit eine „PL6303E“ des Hersteller „Finger Lakes Instrumentation“ verwendet. Dieser CCD Chip hat 3072×2048 Pixel und eine Pixelgröße von $9 \mu\text{m}$, die daraus resultierende Größe des Chips beträgt $27.6 \times 18.4 \text{ mm}$. Ein wichtiges Charakteristikum eines CCD-Chips ist die Quanteneffizienz. Dies ist ein Maß für die Empfindlichkeit. Wichtig dabei ist, dass die Quanteneffizienz von der Wellenlänge des auffallenden Lichts abhängig ist. Für die Photometrie ist noch eine weitere Eigenschaft des CCD-Chips von Wichtigkeit, nämlich ob sie einen „Anti-Blooming-Gate“ besitzt. Als „Blooming“ bezeichnet man vertikale Linien, die entstehen, wenn ein Pixel in Sättigung ist, d.h. wenn mehr Licht auf ein Pixel gefallen ist, als es im Stande ist aufzunehmen. Ein „Anti-Blooming-Gate“ kann das verhindern, was für „Pretty Pictures“ vor-

teilhaft ist. Für Photometrie ist ein solcher CCD-Chip nicht mehr geeignet. Zum einen ist die Quanteneffizienz geringer. Zum anderen ist der lineare Bereich viel kleiner [WH06]. Ein Pixel ist dann linear, wenn die Anzahl der ausgelassenen Elektronen proportional zur Anzahl der eingefallenen Photonen ist. Liegen die Pixelwerte nicht mehr im linearen Bereich, kann keine Photometrie mehr betrieben werden. Aus diesem Grund habe ich mich für ein Teleskop mit CCD-Kamera ohne „Anti-Blooming-Gate“ entschieden.

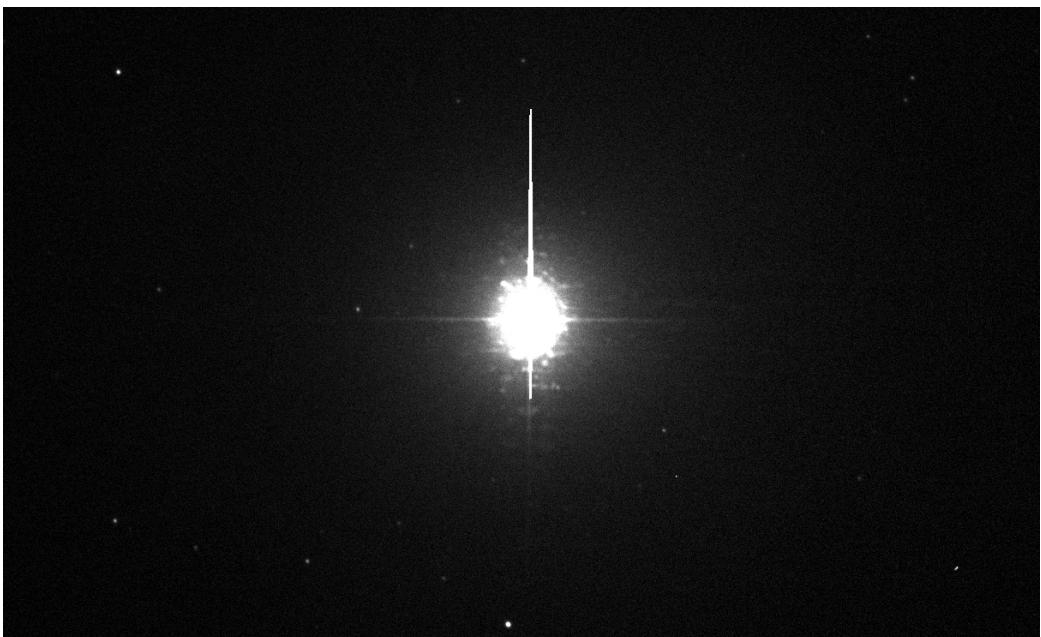


Abbildung 2.3: Diese Aufnahme entstand nachdem die Montierung ein falsches Objekt ansteuerte. 30 Sekunden Belichtungszeit wären für diesen Stern zu lang. Die Aufnahme zeigt deutliches „Blooming“. Die waagrechte Linie ist eine Interferenzerscheinung an der Aufhängung des Sekundärspiegels.

2.4 Durchführung der Beobachtung

Die Durchführung der Beobachtungen gestaltet sich relativ einfach. Nachdem man sich auf der Website von iTelescope angemeldet hat, gelangt man auf das „Launchpad“. Dort sind die wichtigsten Informationen gebündelt. Es gibt Informationen zu den Preisen und zum Status der verschiedenen Teleskope. Die Observatorien sind mit verschiedenen Sensoren und Kameras ausgestattet, die es erlauben, einen guten Eindruck von den Bedingungen vor Ort zu bekommen. Es gibt Sensoren für Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Wolkenbedeckung, Wind und Seeing. Für die Beobachtungen, die ich durchgeführt

habe, sind die genauen Wetterdaten weniger wichtig, solange es wolkenlos ist. Weitaus wichtiger sind Informationen über die Position des Objekts und die Position des Mondes. Dabei sollte der Mond nicht zu nahe am zu beobachtenden Objekt sein. Um den optimalen Beobachtungszeitpunkt zu ermitteln, habe ich die freie Software Stellarium¹ verwendet. Gibt man dort den Standort des Observatoriums an, wird der Himmel vor Ort angezeigt. Der optimale Beobachtungszeitpunkt lag immer gegen 8 Uhr MEZ, dies entspricht Mitternacht in New Mexico. Man kann das Teleskop in Echtzeit steuern, oder die Steuerungsbefehle im voraus definieren. Die ersten Beobachtungen habe ich in Echtzeit durchgeführt, dann habe ich jeden Tag eine Reservierung gemacht und den unten angeführten Beobachtungsplan automatisch ablaufen lassen.

```

1 #count 3,3,3,3,3
2 #interval 30,30,30,30,30
3 #binning 1,1,1,1,1
4 #filter V,B,R,I,U
5 m82 9.9317 69.683

```

Listing 2.1: Der von mir verwendete Beobachtungsplan.

“Count“ beschreibt die Anzahl der Aufnahmen. Es sollen fünf Serien zu je drei Bildern gemacht werden.“Interval“ gibt die Dauer der Aufnahmen an, hier habe ich mich für 30 Sekunden je Aufnahme entschieden. Das “binning“ ermöglicht es mehrere Pixel zu einem Pixel zusammenzufassen, um mehr Signal zu erhalten. Ich habe mich aber dagegen entschieden und deshalb “1“ gewählt. “Filter“ gibt die zu verwendenden Filter an, hier habe ich die Filter V,B,R,I und U gewählt(siehe 2.5). Leider waren die Daten, die ich mit dem U-Filter angefertigt habe, nicht brauchbar(siehe 4.1). In der letzten Zeile ist schließlich noch der Name und die Position des Objekts angegeben. Diesen Plan habe ich jeden dritten Tag ablaufen lassen. In den Tagen dazwischen habe ich eine reduzierte Version mit nur einer Aufnahmeserie durch den V-Filter verwendet. Somit sammelte ich dabei am meisten Messpunkte.

2.5 Johnson Filter-System

Die von mir verwendeten Filter B, V, R und I sind Teil des Johnson Filter-Systems. Dieses Filter-System ist heute weit verbreitet, es wurde vom amerikanischen Astronomen Harold L. Johnson entwickelt. Durch das Verwenden eines Filter-Systems kann man eine Aussage über die Verteilung des Lichts über das optische Spektrum treffen und mehrere Lichtkurven erstellen. Das Verwenden von Filtern ist aus mehreren Gründen notwendig. Zum einen

¹<http://www.stellarium.org>

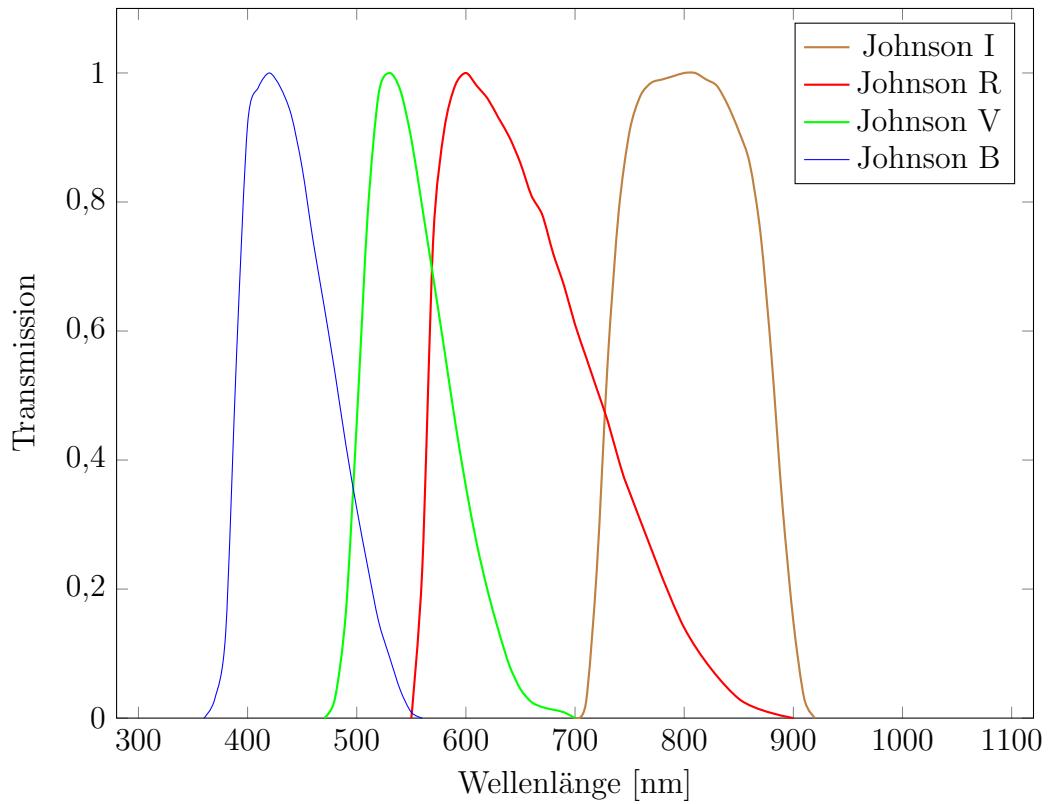


Abbildung 2.4: Die Transmission in Abhängigkeit der Wellenlänge für die verwendeten Filter

muss die Messung mit anderen Messungen vergleichbar sein. Würde ich die Helligkeit der Supernova ohne Filter bestimmen, würde das Ergebnis davon abhängen, in welchem Bereich des Spektrums die CCD-Kamera empfindlich ist. Diese Empfindlichkeit ist von Modell zu Modell unterschiedlich. Das Verwenden von mehreren Filtern ist notwendig um die Extinktion (siehe 4.1) zu berechnen.

Kapitel 3

Datenreduktion

3.1 Allgemeines

Bei einer Photometrie können eine Reihe von systematischen Messfehlern auftreten, bedingt durch die Eigenschaften der CCD-Kamera und der Optik. Um ein wissenschaftlich aussagekräftiges Ergebnis zu erhalten, sollte man eine Datenreduktion durchführen. Man fertigt hierfür Kalibrationsaufnahmen an. Im folgenden Kapitel werde ich auf die verschiedenen Kalibrationsaufnahmen im Detail behandeln. Ich werde auch auf die Software und die verschiedenen Arbeitsschritte eingehen. Leider hat man wenig Kontrolle über die Gewinnung dieser Daten, da man nicht selbst Hand anlegen kann. Auch die Datenmenge ist hier verhältnismäßig groß, weil es bei einem Projekt, das über mehrere Wochen geht, nicht ausreicht diese Kalibrationsaufnahmen einmal anzufertigen.

3.2 Dark

Macht man eine Aufnahme mit geschlossenem Verschluss, so hat man immer noch Signal. Eine solche Aufnahme bezeichnet man als Dark. Dieses Signal wird durch die thermische Energie der Messinstrumente und der Umgebung verursacht. Dieses Phänomen bezeichnet man als Dunkelstrom. Dies tritt auf, weil die CCD-Kamera auch im Infrarot-Bereich empfindlich ist (siehe Abbildung 2.2). Ein Dark zeigt neben dem zufälligen Rauschen auch, dass manche Pixel überdurchschnittlich viel Signal haben. Derartige Pixel bezeichnet man als Hot-Pixel. Um diesen Dunkelstrom möglichst gering zu halten, werden CCD-Chips gekühlt. Meinen Chip habe ich auf -10° C gekühlt. Doch auch bei diesen Temperaturen ist der Dunkelstrom immer noch zu groß, deshalb sind Darks als Korrekturaufnahme notwendig. Die Dauer dieser Korrektur-

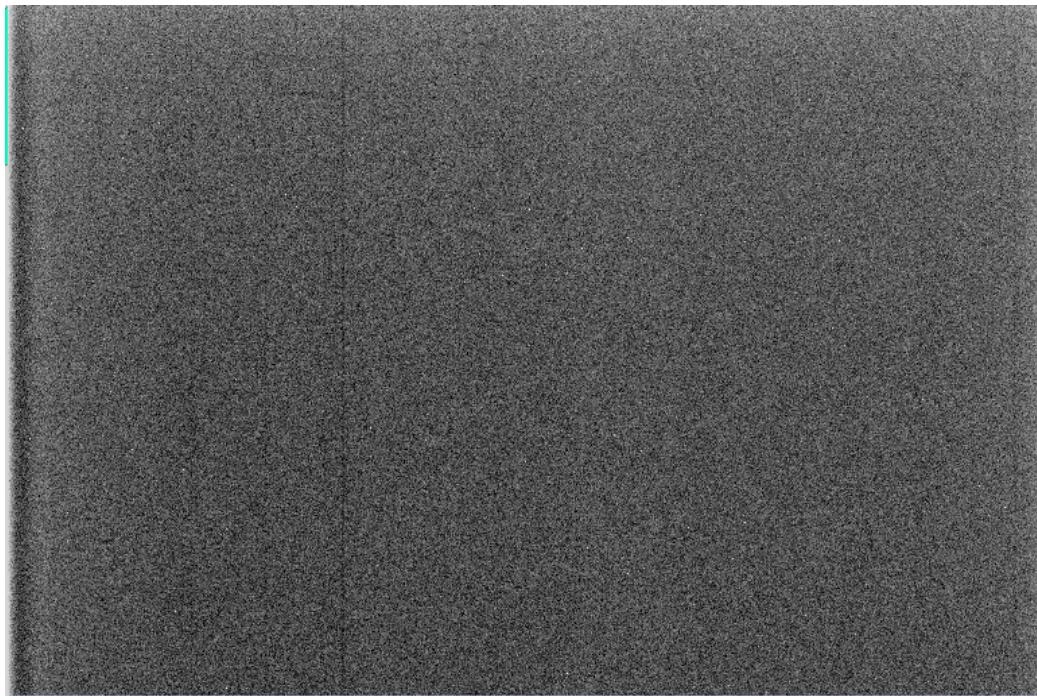


Abbildung 3.1: Eines der von mir verwendeten Masterdarks. Es zeigt einige Hotpixel und auch systematische Fehler des CCD-Chips.

aufnahme wählt man gleich wie die des Light¹. Diese Aufnahme subtrahiert man dann vom Light. Allerdings handelt man sich so neue Probleme ein, denn die Aufnahmen weisen selbst statistisches Rauschen auf, dies erhöht das Rauschen der korrigierten Aufnahme. Weiters können die Aufnahmen sogenannte Cosmics enthalten, das sind kosmische Teilchen die auch bei geschlossenen Verschluss den Chip erreichen und dort Signale verursachen. Um diese Probleme zu vermeiden, fertigt man nicht nur ein Dark, sondern mehrere an. Man bildet dann den Median aus den Pixelwerten dieser Darks, wodurch man das statistische Rauschen verringert und die Cosmics eliminiert. Die Aufnahme, die man durch bilden des Median der einzelnen Darks erhält, bezeichnet man als Masterdark. Der Median ist unempfindlich gegen Ausreißer, weshalb ein Cosmic, das nur auf einer Aufnahme vorhanden ist, das Ergebnis kaum beeinflusst, auch wenn der Pixelwert sehr groß ist. Ich habe von jeder meiner Aufnahmen das Masterdark subtrahiert. Das anfertigen dieser Darks lässt sich bei iTelescope nur tagsüber machen, weil dort die Teleskope ungenutzt sind. Dies ist nicht optimal, da sich die Temperaturen zwischen Aufnahmezeitpunkt und Tagesanbruch verändern können. Natürlich müssen Darks nach jeder Beobachtung angefertigt werden, da die

¹Die zu korrigierende Aufnahme

Temperaturen über mehrere Wochen stark schwanken können.

3.3 Flat

Neben dem Dark fertigt man auch ein Flat an. Mit dem Flat werden vor allem Verunreinigungen im Strahlengang und Fehler der Optik korrigiert. Für die Aufnahme eines Flats wird eine komplett gleichmäßig ausgeleuchtete Fläche fotografiert. Hierfür bietet sich ein wolkenloser Himmel, kurz nach Anbruch der Dämmerung oder eine gleichmäßig leuchtende Folie, an. Nun würde man erwarten, dass nach dem Abzug des Dunkelstroms keine systematischen Fehler mehr vorhanden sind. Allerdings fällt bei der Betrachtung

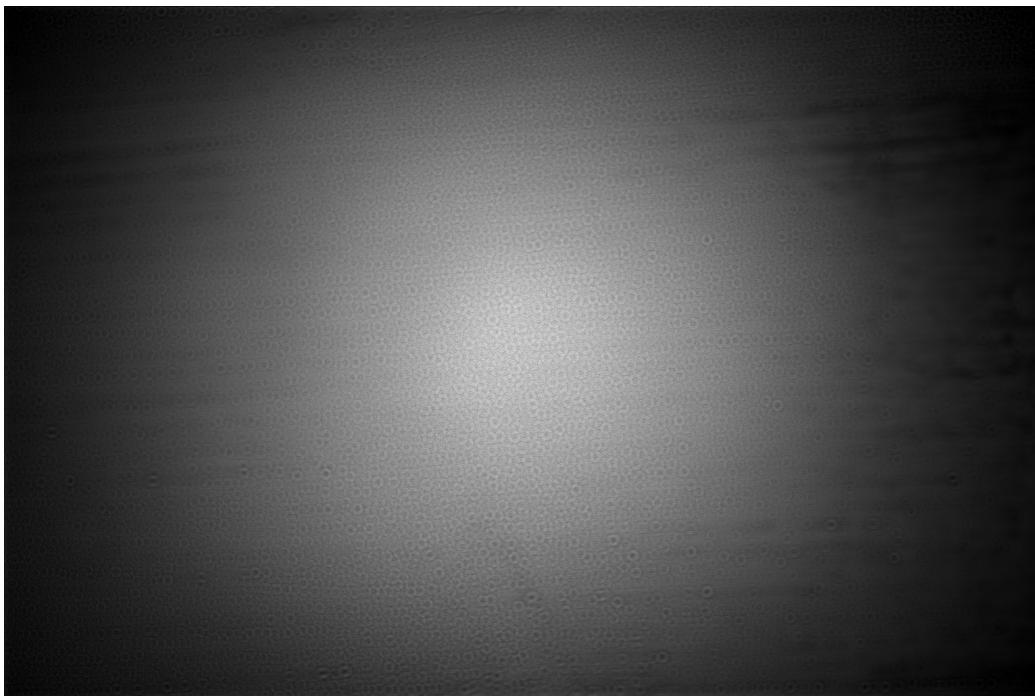


Abbildung 3.2: Ein Flat erstellt mit dem V-Filter.

eines solchen Flats eine deutliche Abdunklung zum Rand hin auf. Dies ist durch die Optik bedingt und bei diesem Teleskop deutlich stärker ausgeprägt als bei vielen anderen Teleskopen. Dieser Effekt wird als Vignettierung bezeichnet. Hier spielt neben der Bauart der Optik auch die Größe des Chips eine Rolle. Man hat hier einen verhältnismäßig großen Chip eingesetzt. Deshalb ist eine Korrektur dieses Effekts hier besonders wichtig. Misst man ohne Korrektur die Helligkeit eines Sterns am Bildrand so scheint er schwächer als in der Bildmitte. Neben der Abdunkelung zum Bildrand, sind auf der

Aufnahme unzählige kleine Ringe zu sehen. Sie werden in der Fachsprache als Dust-Dounuts bezeichnet. Befinden sich winzige Staubkörner im Strahlengang des Teleskops, so schwächen diese das Licht ab. Diese Staubkörner werden unscharf auf dem Chip abgebildet. Die Form der Abbildungen hängt von der Form der Eintrittsöffnung ab. Durch den Sekundärspiegel, der sich im Zentrum der Eintrittsöffnung befindet, entsteht diese Dounut-Form. Um die Korrektur anzuwenden, dividiert man die Sternenaufnahmen durch das Flat. Hier ist eine Division notwendig, da der Abschwächungsfaktor umgekehrt proportional zum Wert eines Pixels ist. Über die Aufnahme der Flats hat man bei iTelescope leider keine Kontrolle. Die Flats sollten auch möglichst zeitnah zur Beobachtung angefertigt werden, da sich Staubkörner verschieben können. Sie müssen im Unterschied zu Darks für jeden Filter einzeln angefertigt werden. Die Aufnahmedauer eines Flats ist unabhängig von der zu korrigierenden Aufnahme.



Abbildung 3.3: Dieses ist eine Aufnahme mit dem R-Filter, beim hellen Stern in der Galaxie handelt es sich um die Supernova.

3.4 Datenreduktion mit Pixinsight

Um die, im vorhergehenden Abschnitt betrachtete, Datenreduktion durchzuführen, benötigt man eine passende Software. Hierfür wird von professio-

nellen Astronomen häufig IRAF¹ verwendet. Allerdings ist die Benutzung dieser Software sehr anspruchsvoll. Ich habe mich deshalb für Pixinsight² entschieden. Diese Software bietet im Gegensatz zu IRAF eine grafische Benutzeroberfläche. Pixinsight hat den Nachteil, dass es sich nicht um freie Software handelt. Ich war deshalb auf das verwenden einer Testversion angewiesen. Pixinsight ermöglicht es die Dark- und Flat-Korrektur in einem Bearbeitungsschritt anzuwenden. Nach der Korrektur der Aufnahmen habe ich noch eine Ausrichtung der Bilder vorgenommen, da die Bilder an verschiedenen Tagen aufgenommen wurden und das Pointing des Teleskops nicht immer exakt war.

3.5 Photometrie

Um die scheinbare Helligkeit der Supernova zu messen, habe ich die Software MuniWin³ verwendet. MuniWin erlaubt es eine Apertur-Photometrie durchzuführen. Nach der automatischen Sternerkennung vergleicht die Software die einzelnen Aufnahmen miteinander und richtet sie aufeinander aus. So kann man sicherstellen, dass es sich um die selben Sterne handelt. Nun kann man mindestens zwei Sterne auswählen. Den zu vermessenden Stern, in meinem Fall die Supernova und einen Vergleichsstern. Die Software berechnet nun die Magnitudendifferenz der beiden Sterne, die Formel hierfür lautet [Kar07]:

Δm ...Magnitudendifferenz

F ...Strahlungsfluss

$$\Delta m = -2.5 \cdot \log \frac{F_{\text{Supernova}}}{F_{\text{Vergleichsstern}}}$$

Die berechneten Helligkeiten zu den verschiedenen Zeitpunkten kann man als CSV-Datei exportieren und mit einem Tabellenkalkulationsprogramm öffnen. Da bei jeder Beobachtung je drei Aufnahmen erstellt wurden, gibt es auch je drei Helligkeitsmessungen. Ich habe mich dafür entschieden, das arithmetische Mittel aus den drei Messungen zu bilden. Um aus den berechneten Helligkeiten, relativ zum Vergleichsstern, die scheinbare Magnitude zu berechnen, muss man die scheinbare Magnitude eines Vergleichsterns kennen.

¹<http://iraf.noao.edu>

²<https://pixinsight.com>

³<http://c-munipack.sourceforge.net>

Der verwendete Vergleichsstern trägt die Bezeichnung TYC 4383-2050-1. Die scheinbare Magnitude dieses Sterns in den verschiedenen Spektralbändern beträgt [TMS⁺14]:

$$m_b = 10.62$$

$$m_v = 10.04$$

$$m_r = 9.70$$

$$m_i = 9.41$$

Die scheinbare Magnitude m lässt sich wie folgt berechnen:

$$m_{Supernova} = \Delta m + m_{Vergleichsstern}$$

Kapitel 4

Ergebnisse

4.1 Messwerte

Die Messwerte habe ich nun tabellarisch (siehe Tabelle 4.1) und grafisch (siehe Abbildung 4.1) dargestellt. Nicht aus jeder Aufnahme konnte ein Messwert gewonnen werden, da manchmal die Qualität der Aufnahme zu schlecht war. Wenn eine Aufnahme nicht photometriert werden konnte, habe ich mich dafür entschieden, auch die anderen zwei Aufnahmen dieser Serie zu verworfen. Leider gelang es beiden Aufnahmen des U-Filters nur bei einigen wenigen Aufnahmen die Photometrie durchzuführen. Grund dafür ist das schlechte Signal-zu-Rausch-Verhältnis. Der Software gelang es nicht, die Supernova zuverlässig zu erkennen. Dies liegt zum einen daran, dass die Abschwächung durch Gas und Staub in diesem Bereich am größten ist, zum anderen daran, dass die CCD-Kamera vor allem im Bereich zwischen 600 und 700 nm empfindlich ist (siehe Abbildung 2.2). Im nahen UV-Bereich ist die Empfindlichkeit geringer. Zur Ermittlung des Maximumszeitpunkts, der Maximalhelligkeit und dem Parameter Δm_{15} ¹ der übrigen Lichtkurven habe ich eine Splineinterpolation (dritten Grades) durchgeführt. Diese Art von Interpolation wird auch von [TMS⁺14] verwendet, um die Lichtkurve zu untersuchen. Da eine Splineinterpolation von gängigen Tabellenkalkulationsprogrammen wie Microsoft Excel nicht unterstützt wird, habe ich dies selbst mit C# programmiert. Für die Berechnung habe ich die Programmbibliothek Math.NET Numerics² benutzt, diese kann verschiedene Splineinterpolationen durchführen. Beim Betrachten der Lichtkurve sind sofort einige charakteristische Merkmale einer Typ Ia Supernova erkennbar (siehe Abbil-

¹Differenz zwischen der maximalen Helligkeit und der Helligkeit 15 Tage nach erreichen der Maximalhelligkeit

²<http://numerics.mathdotnet.com>

JD-2456000	B [Magnitude]	V [Magnitude]	R [Magnitude]	I [Magnitude]
683.863	12.192	10.937	-	9.924
685.87	-	10.743	-	-
686.869	11.934	10.674	10.143	9.818
687.601	-	10.651	-	-
689.972	11.855	10.575	10.071	-
693.609	11.946	10.566	10.081	9.927
696.886	12.114	10.634	10.205	10.055
698.964	-	10.723	-	-
700.767	-	10.838	-	-
702.908	12.599	10.970	10.608	10.426
707.605	13.168	11.230	10.776	10.432
708.778	-	11.274	-	-
710.949	-	11.326	-	-
711.983	13.578	11.363	10.799	10.298
718.022	14.067	11.609	10.900	10.196
722.011	-	11.795	-	-
724.647	14.555	11.960	11.286	10.458
728.648	14.760	12.155	11.527	10.752
729.748	-	12.196	-	-
733.771	-	12.304	11.728	10.990
736.64	-	12.433	11.851	11.164
740.687	15.098	12.492	11.979	11.354
745.605	15.109	12.607	12.143	11.523
747.875	-	-	12.265	11.616
760.852	-	12.945	12.616	12.085
768.89	-	13.118	12.841	12.337

Tabelle 4.1: Die Messwerte. Die Abkürzung JD steht für das julianische Datum.

dung 4.1). So ist der Helligkeitsabfall in den kurzen Wellenlängenbereichen deutlich stärker als in den langen Wellenlängenbereichen. Auch das zweite Maximum, das typischerweise etwa 20-30 Tage nach dem ersten Maximum im nahen Infrarotbereich auftritt[Kas06], ist deutlich erkennbar.

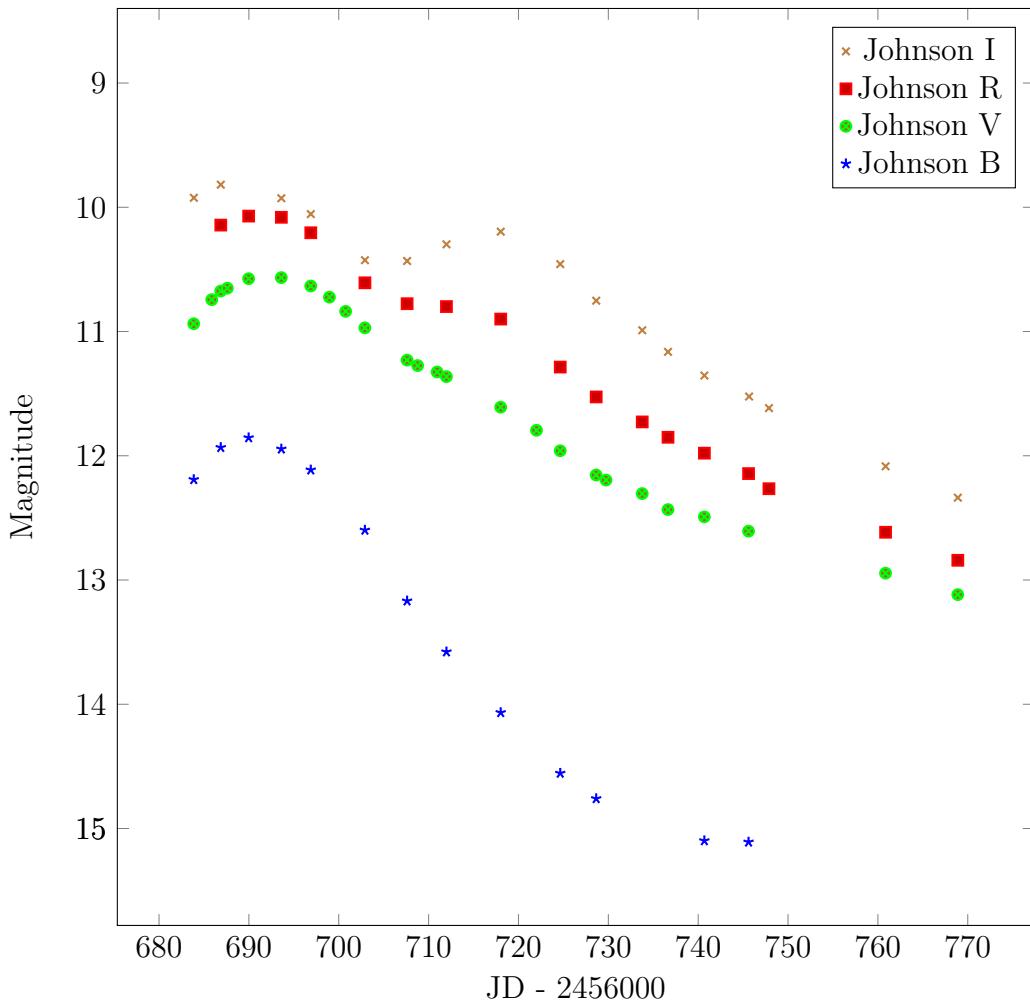


Abbildung 4.1: Grafische Darstellung der Messwerte. Die Abkürzung JD steht für das julianische Datum.

4.2 Berechnung der Distanz

Nun bestimme ich die Entfernung zur Supernova. Dabei gehe ich von der folgenden Annahme aus [HN00]:

$$M_B \approx M_V \approx -19,3 + 5 \log(H_0/60)$$

Laut dieser Annahme ist die absolute Helligkeit M im B- und V-Band einer Supernova immer in etwa gleich, es handelt sich also um eine Standardkerze. Die Hubble Konstante H_0 hat laut aktuellen Messungen den Wert [FMS⁺12]:

$$H_0 \approx (74,3 \pm 2,1) \frac{kmB}{s \cdot Mpc}$$

Daraus ergibt sich für die absolute Magnitude folgender Wert:

$$M_B \approx M_V \approx -18,84 \text{ mag}$$

Daraus folgt, dass der von mir gemessene Helligkeitsunterschied zwischen m_V und m_B zum Maximumszeitpunkt alleine auf die Extinktion zurückzuführen ist. Die Extinktion ist ein Maß für die Abschwächung nach Durchqueren des interstellaren Mediums. Da das interstellare Medium mit Gas und Staub gefüllt ist kommt es zu einer Absorption und Streuung des Lichts. Die Streuung an Molekülen und Atomen ist stark Wellenlängen abhängig. Kurwelliges Licht wird stärker gestreut als langwelliges Licht. Diese Art von Streuung wird als Rayleigh-Streuung bezeichnet. Somit verursacht der Staub eine Rötung des Lichts. Die Selektive Extinktion E_{B-V} gibt an wie stark die Supernova gerötet ist: [Voi12]

$$E_{B-V} = m_B - m_V = 11,855 \text{ mag} - 10,554 \text{ mag} = 1,301 \text{ mag}$$

Aus der selektiven Extinktion E_{B-V} kann die totale Extinktion A_V berechnet werden, diese beiden Größen sind zueinander Proportional. Je stärker das Licht der Supernova gerötet ist, desto größer ist auch die gesamte Abschwächung des Lichts. Der Quotient aus totaler und selektiver Extinktion wird als R_V bezeichnet. R_V ist abhängig von der Größe der Teilchen im interstellaren Medium, ich verwende hier den Literaturwert [AGJ⁺14]:

$$R_V = 1,4 \pm 0,1$$

$$R_V = \frac{A_V}{E_{B-V}}$$

Die totale Extinktion A_V lässt sich wie folgt berechnen:

$$A_V = R_V \cdot E_{B-V} = 1,4 \cdot 1,301 \text{ mag} = 1,8214 \text{ mag}$$

Nun habe ich die Abschwächung berechnet die der Staub im V-Band verursacht. Daraus lässt sich eine korrigierte scheinbare magnitude $m_{V,0}$ berechnen:

$$m_{V,0} = m_V - A_V = 10,554 \text{ mag} - 1,8214 \text{ mag} = 8,7326 \text{ mag}$$

Bildet man die Differenz aus scheinbarer und absoluter Helligkeit erhält man

das Distanzmodul:

$$\mu = m_{V,0} - M_V = 8,7326 \text{ mag} + 18,84 \text{ mag} = 27,5684 \text{ mag}$$

Mithilfe des Entfernungsmoduls lässt sich die Distanz berechnen:

$$\mu = 5 \cdot \log(d) - 5$$

$$d = 10^{1+\frac{\mu}{5}} = 10^{1+\frac{27,56841218}{5}} = 3,2635 \text{ Mpc}$$

Die Distanz zur Supernova beträgt 3,26 Mpc.

4.3 Die Phillips-Beziehung

Bis zum Anfang der 1990er Jahre glaubte man, dass Typ Ia Supernovae immer gleich hell sind. Dies habe auch ich in der vorhergehenden Rechnung angenommen. Die kleinen Unterschiede, die man gemessen hatte, führte man auf Messfehler zurück. Im Jahre 1993 zeigte der amerikanische Astronom Mark M. Phillips, dass die Unterschiede nicht allein auf Messfehler zurückzuführen sind[Phi93]. Er stellte fest, dass zwischen der Helligkeit und der Lichtkurve einer Supernova, ein Zusammenhang besteht. Je langsamer das Licht einer Supernova abfällt, desto heller war sie zum Maximumszeitpunkt. Auch die Farbe einer Supernova hängt mit der Maximalhelligkeit zusammen. Je blauer eine Supernova ist, desto heller ist sie. Die Maximalhelligkeit lässt sich Phillips zu folge so berechnen[Phi93]:

$$M_B = -21,726 + 2,698 \cdot \Delta m_{15}$$

$$M_V = -20,883 + 1,949 \cdot \Delta m_{15}$$

$$M_I = -19,591 + 1,076 \cdot \Delta m_{15}$$

Als Maß für den Abfall der Helligkeit verwendete Phillips Δm_{15} , dies ist die Differenz zwischen der maximalen Helligkeit und der Helligkeit 15 Tage nach erreichen der Maximalhelligkeit im B-Band.

$$\Delta m_{15} = 12,819 \text{ mag} - 11,855 \text{ mag} = 0,964 \text{ mag}$$

Daraus ergeben sich folgende absolute Helligkeiten:

$$M_B = -21,726 + 2,698 \cdot (0,964) = -19,125 \text{ mag}$$

$$M_V = -20,883 + 1,949 \cdot (0,964) = -19,004 \text{ mag}$$

$$M_I = -19,591 + 1,076 \cdot (0,964) = -18,554 \text{ mag}$$

Nun muss die Extinktion neu berechnet werden, da ich unter Berücksichtigung der Phillips-Beziehung nicht mehr annehmen kann, dass die Maximalhelligkeit im B- und V-Band gleich sind:

$$E_{B-V} = (m_B - m_V) - (M_B - M_V)$$

$$E_{B-V} = 1,301 \text{ mag} + 0,121 \text{ mag} = 1,422 \text{ mag}$$

Die weiteren Schritte sind analog zu denen im vorhergehenden Abschnitt:

$$A_V = R_V \cdot E_{B-V} = 1,4 \cdot 1,422 \text{ mag} = 1,9908 \text{ mag}$$

$$m_{V,0} = m_V - A_V = 10,554 \text{ mag} - 1,9908 \text{ mag} = 8,5632 \text{ mag}$$

$$\mu = m_{V,0} - M_V = 8,5632 \text{ mag} + 19,004 \text{ mag} = 27,5672 \text{ mag}$$

$$d = 10^{1+\frac{\mu}{5}} = 10^{1+\frac{27,5672}{5}} = 3,2617 \text{ Mpc}$$

$$\text{Literaturwert [KK06]} : d = 3,53 \pm 0,26 \text{ Mpc}$$

4.4 Abschließende Bemerkungen

Mit 3,26 Mpc bzw. 10 Millionen Lichtjahren gehört die Galaxie M82 zu den Nachbargalaxien unserer Milchstraße. Dies erklärt die gute Qualität meiner Daten. Vergleicht man die berechnete Entfernung aber mit den Literaturwert, zeigt sich, dass die Galaxie M82 demnach 0,27 Mpc weiter entfernt ist. Diese Entfernung wurde mit dem Hubble-Weltraumteleskop ermittelt, auch dieser Wert ist aber mit einer großen Unsicherheit behaftet $\pm 0,26$ Mpc. Dies zeigt, wie schwierig Entfernungsmessungen in der Astronomie sind. Im Anbertracht dieser Tatsache kann ich mit dem von mir ermittelten Wert durchaus zufrieden sein. Weiters zeigt sich, dass es kaum einen Unterschied macht ob

ich die Phillips-Beziehung berücksichtige, oder ob ich einfach eine mittlere Helligkeitannehme. Dies zeigt, dass es sich bei der Supernova 2014J um eine durchschnittliche Typ Ia Supernova handelt.

Abbildungsverzeichnis

1.1	Fritz Zwicky diente Friedrich Dürrenmatt als Vorbild für die Figur des Johann Wilhelm Möbius im Drama “Die Physiker“ [MPF12]. (Foto: [Sal])	8
1.2	Diese Aufnahme zeigt den Helixnebel mit dem weißen Zwerg im Zentrum. Aufgenommen habe ich dieses Bild mit einem 27”CDK von iTelescope.	9
1.3	Dieses Diagramm zeigt die Ergebnisse vom Supernova Cosmology Project[PAG ⁺ 99]. Auf der y-Achse ist die korrigierte scheinbare Magnitude im B-Band aufgetragen. Dies ist bei einer Standardkerze auch gleichzeitig ein Maß für die Entfernung. Auf der x-Achse ist “z” , ein Maß für die Rotverschiebung angegeben.	12
2.1	Das von mir verwendete Teleskop „T21“ (vorne, rechts) befindet sich in einer Rolldachhütte mit etwa einem Dutzend weiterer Teleskope. (Bild:[Jan])	14
2.2	Die obenstehendes Abbildung zeigt die Quanteneffizienz in Abhängigkeit der Wellenlänge, der von mir verwendeten CCD-Kamera.	15
2.3	Diese Aufnahme entstand nachdem die Montierung ein falsches Objekt ansteuerte. 30 Sekunden Belichtungszeit wären für diesen Stern zu lang. Die Aufnahme zeigt deutliches „Blooming“. Die waagrechte Linie ist eine Interferenzerscheinung an der Aufhängung des Sekundärspiegels.	16
2.4	Die Transmission in Abhängigkeit der Wellenlänge für die verwendeten Filter	18
3.1	Eines der von mir verwendeten Masterdark. Es zeigt einige Hotpixel und auch systematische Fehler des CCD-Chips.	20
3.2	Ein Flat erstellt mit dem V-Filter.	21

Literaturverzeichnis

- [AGJ⁺14] AMANULLAH, Rahman ; GOOBAR, Ariel ; JOHANSSON, Joel ; BANERJEE, DPK ; VENKATARAMAN, V ; JOSHI, V ; ASHOK, NM ; CAO, Y ; KASLIWAL, MM ; KULKARNI, SR u. a.: The Peculiar Extinction Law of SN 2014J Measured with the Hubble Space Telescope. In: *The Astrophysical Journal Letters* 788 (2014), Nr. 2, S. 21
- [BZ34] BAADE, W. ; ZWICKY, F.: Cosmic Rays from Super-novae. In: *Proceedings of the National Academy of Science* 20 (1934), Mai, S. 259–263
- [CT01] CAPPELLARO, E. ; TURATTO, M.: Supernova Types and Rates. In: VANBEVEREN, D. (Hrsg.): *The Influence of Binaries on Stellar Population Studies* Bd. 264, 2001 (Astrophysics and Space Science Library), S. 199
- [FMS⁺12] FREEDMAN, Wendy L. ; MADORE, Barry F. ; SCOWCROFT, Victoria ; BURNS, Chris ; MONSON, Andy ; PERSSON, S E. ; SELBERT, Mark ; RIGBY, Jane: Carnegie Hubble Program: a mid-infrared calibration of the Hubble constant. In: *The Astrophysical Journal* 758 (2012), Nr. 1, S. 24
- [HN00] HILLEBRANDT, W. ; NIEMEYER, J. C.: Type IA Supernova Explosions Models. In: *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* 38 (2000), S. 191–230
- [Hub29] HUBBLE, E.: A Relation between Distance and Radial Velocity among Extra-Galactic Nebulae. In: *Proceedings of the National Academy of Science* 15 (1929), mar, S. 168–173
- [IT99] IBEN, I. Jr. ; TUTUKOV, A. V.: On the Evolution of Close Triple Stars That Produce Type IA Supernovae. In: *The Astrophysical Journal* 511 (1999), jan, S. 324–334

- [Jan] JANKOWSKI, Peter: *iTelescope - Equipment - T21.*
<http://www.peterjankowski.com/iTN-Equipment/>
 2012-04-20-iT21-A-853x1280.jpg, Abruf: 12.04.2015
- [Kar07] *Kapitel 4.* In: KARTTUNEN, H.: *Fundamental Astronomy*. Springer, 2007, S. 86
- [Kas06] KASEN, D.: Secondary Maximum in the Near-Infrared Light Curves of Type Ia Supernovae. In: *The Astrophysical Journal* 649 (2006), oct, S. 939–953
- [KK06] KARACHENTSEV, I. D. ; KASHIBADZE, O. G.: Masses of the local group and of the M81 group estimated from distortions in the local velocity field. In: *Astrophysics* 49 (2006), jan, S. 3–18
- [Min41] MINKOWSKI, R.: Spectra of Supernovae. In: *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* 53 (1941), aug, S. 224
- [MPF12] MPF: *MaxPlanckForschung*. Bd. 4. Max-Planck-Gesellschaft, 2012
- [MRBH07] MAZZALI, P. A. ; RÖPKE, F. K. ; BENETTI, S. ; HILLEBRANDT, W.: A Common Explosion Mechanism for Type Ia Supernovae. In: *Science* 315 (2007), feb, S. 825
- [PAA⁺15] PLANCK COLLABORATION ; ADAM, R. ; ADE, P. A. R. ; AGHANIM, N. ; AKRAMI, Y. ; ALVES, M. I. R. ; ARNAUD, M. ; ARROJA, F. ; AUMONT, J. ; BACCIGALUPI, C. ; AL. et: Planck 2015 results. I. Overview of products and scientific results. In: *ArXiv e-prints* (2015), feb
- [PAG⁺99] PERLMUTTER, S. ; ALDERING, G. ; GOLDHABER, G. ; KNOP, R. A. ; NUGENT, P. ; CASTRO, P. G. ; DEUSTUA, S. ; FABBRO, S. ; GOOBAR, A. ; GROOM, D. E. ; HOOK, I. M. ; KIM, A. G. ; KIM, M. Y. ; LEE, J. C. ; NUNES, N. J. ; PAIN, R. ; PENNYPACKER, C. R. ; QUIMBY, R. ; LIDMAN, C. ; ELLIS, R. S. ; IRWIN, M. ; McMAHON, R. G. ; RUIZ-LAPUENTE, P. ; WALTON, N. ; SCHAEFER, B. ; BOYLE, B. J. ; FILIPPENKO, A. V. ; MATHESON, T. ; FRUCHTER, A. S. ; PANAGIA, N. ; NEWBERG, H. J. M. ; COUCH, W. J. ; PROJECT, T. S. C.: Measurements of Ω and Λ from 42 High-Redshift Supernovae. In: *Astrophysics* 517 (1999), jun, S. 565–586

- [Phi93] PHILLIPS, M. M.: The absolute magnitudes of Type IA supernovae. In: *The Astrophysical Journal* 413 (1993), aug, S. 105–108
- [Pie] PIELENHOFER, Ramona: *Der Nachweis von Strahlung über den CCD-Detektor.* <http://daten.didaktikchemie.uni-bayreuth.de/umat/ccd/ccd-detektor.htm>, Abruf: 20.05.2015
- [RFC⁺98] RIESS, A. G. ; FILIPPENKO, A. V. ; CHALLIS, P. ; CLOCCHIATTI, A. ; DIERCKS, A. ; GARNAVICH, P. M. ; GILLILAND, R. L. ; HOGAN, C. J. ; JHA, S. ; KIRSHNER, R. P. ; LEIBUNDGUT, B. ; PHILLIPS, M. M. ; REISS, D. ; SCHMIDT, B. P. ; SCHOMMER, R. A. ; SMITH, R. C. ; SPYROMILIO, J. ; STUBBS, C. ; SUNTZEFF, N. B. ; TONRY, J.: Observational Evidence from Supernovae for an Accelerating Universe and a Cosmological Constant. In: *The Astronomical Journal* 116 (1998), sep, S. 1009–1038
- [Sal] SALZMANN, Niklaus: *Fritz Zwicky, Physiker und Raketenfachniker.* http://www.ethlife.ethz.ch/archive_articles/080915_zwicky_nsn/080915_zwicky_nsn_5_1? hires, Abruf: 15.04.2015
- [SCR⁺07] SU, K. Y. L. ; CHU, Y.-H. ; RIEKE, G. H. ; HUGGINS, P. J. ; GRUENDL, R. ; NAPIWOTZKI, R. ; RAUCH, T. ; LATTER, W. B. ; VOLK, K.: A Debris Disk around the Central Star of the Helix Nebula? In: *The Astrophysical Journal* 657 (2007), mar, S. 41–45
- [TMS⁺14] TSVETKOV, D. Y. ; METLOV, V. G. ; SHUGAROV, S. Y. ; TARASOVA, T. N. ; PAVLYUK, N. N.: Supernova 2014J at maximum light. In: *Contributions of the Astronomical Observatory Skalnate Pleso* 44 (2014), Oktober, S. 67–76
- [Voi12] Kapitel 11. In: VOIGT, H.: *Abriss der Astronomie*. Wiley-VCH, 2012, S. 713
- [WH05] WOLFGANG HILLEBRANDT, Friedrich R.: Supernovae vom Typ Ia. In: *Sterne und Weltraum* (2005), Mai, S. 22
- [WH06] Kapitel 7. In: WARNER, Brian D. ; HARRIS, Alan W.: *A practical guide to lightcurve photometry and analysis*. Springer, 2006, S. 90

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich diese Facharbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Die Stellen der Facharbeit, die anderen Quellen entnommen wurden, sind durch Angaben der Herkunft kenntlich gemacht. Dies gilt auch für bildliche Darstellungen sowie für Quellen aus dem Internet.

Bruneck, den 3. Juni 2015

Julian Durnwalder