

Die Supernova 2021aefx oder wie weit ist die *Spanische Tänzerin* wirklich entfernt?

Matthias Kolb

Abstract: *The difference to the galaxy NGC 1566 (“The Spanish Dancer”) in Doradus has been estimated over the last decades with high scatter: Data range from 5.5 to 21.3 Mpc (17.9-69.5 Mly). Most recent data from 2020 show 14.9 +/-1 Mpc using the TRGB method. The bright supernova Ia which appeared November 2021 offers fortunately an opportunity for an independent estimation. Based on photometric measurements using a remote telescope in Namibia with green RGB filter (no V filter was available) I estimated the difference to be 16.5 Mpc with an estimated error of 2.3 Mpc.*

Die Galaxie NGC 1566

Die schöne Spiralgalaxie NGC 1566 im südlichen Sternbild Doradus wird manchmal auch die *Spanische Tänzerin* genannt. Es handelt sich um eine Balken-Spiralgalaxie vom Typ SAB(s)bc mit einer ungefähren Masse von 14 Milliarden Sonnen. Im Zentrum sitzt ein riesiges Schwarzes Loch mit einer geschätzten Masse von 13 Millionen Sonnenmassen (Quelle: Wikipedia), die Galaxie gehört damit zu den Seyfert-Galaxien mit einem aktiven galaktischen Kern (AGN). NGC 1566 ist eine der hellsten Seyfert-Galaxien überhaupt. Aber wie weit entfernt ist sie denn von uns?

Interessant ist, dass die bisherigen Entfernungsbestimmungen einen deutlichen Spielraum aufweisen: Zumeist mit Hilfe der Tully-Fisher-Relation, die einen Zusammenhang zwischen der absoluten Flächenhelligkeit und der Geschwindigkeitsdispersion von Galaxien darstellt, wurden Entfernungen zwischen 17.9 und 69.5 Millionen Lichtjahren bestimmt, teilweise mit großen Unsicherheiten.

Abbildung 1 zeigt die Daten aus der NASA/IPAC EXTRAGALACTIC DATABASE sowie den dort noch nicht enthaltenen Wert von Tikhonov (2020), der bei 14.88 Mpc, also 48.53 Mly mit einem Fehler von +/- 1Mpc liegt und mit der photometrischen TRGB-Methode ermittelt wurde (schwarzer Punkt im Jahr 2020).

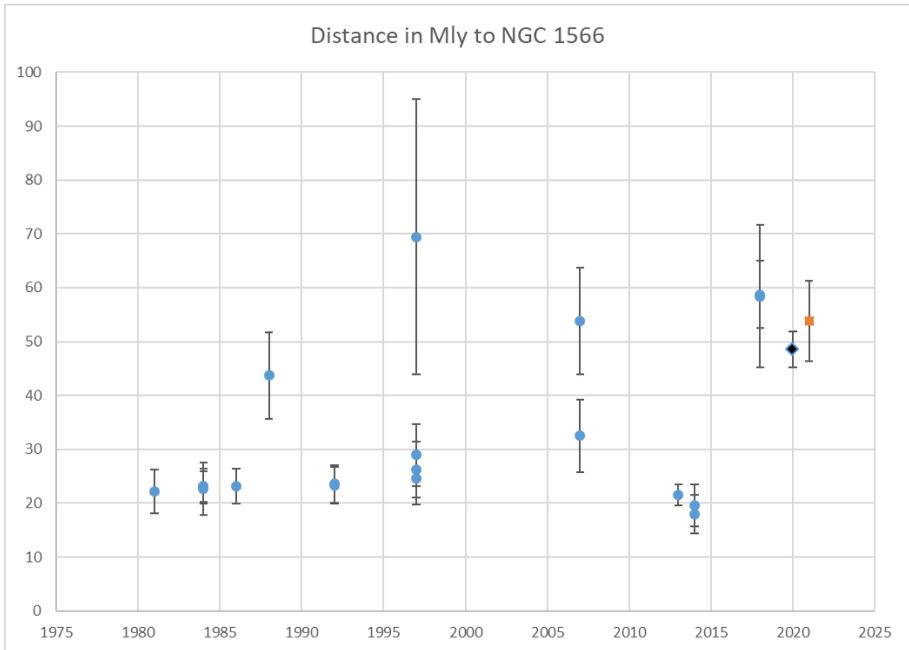


Abbildung 1: Abstandsmessungen der Galaxie NGC 1566. Quelle: NASA/IPAC (blau), Thikonov (2020, schwarz), diese Arbeit (rot)

Die Supernova SN 2021aefx

Am 11. November 2021 ist in dieser Galaxie eine Supernova aufgeleuchtet, die spektroskopisch rasch als Typ Ia klassifiziert wurde. Solche Supernovae zeigen keine Wasserstofflinien und entstehen durch die komplette Zerstörung eines Weißen Zwerges im Rahmen einer thermonuklearen Kettenreaktion (Thermo Nuclear Runaway). Der überwiegend aus Kohlenstoff und Sauerstoff bestehende Weiße Zwerg wird durch Massenzufuhr von einem Begleitstern oder Verschmelzung mit einem anderen Weißen Zwerg schwerer als die Chandrasekhar-Grenze instabil und beginnt zu kollabieren. Durch die Dichte- und Temperaturerhöhung verschmelzen die C- und O-Kerne und die freiwerdende Energie zerfetzt den Sternrest. Es bilden sich große Mengen an radioaktivem Nickel 56, das mit einer Halbwertszeit (HWZ) von 6,1 Tagen zu Cobalt 56 und dieses wiederum mit einer HWZ von 77,3 Tagen zu Eisen 56 zerfällt. Diese Zerfallsprozesse setzen wiederum harte Gammastrahlung frei, die aber die explodierende Wolke nicht durchdringen kann und thermalisiert, also durch Streuvorgänge an den Kernen und Elektronen in ihre Energie pro Lichtteilchen verringert wird. Daher werden solche Supernovae besonders im sichtbaren Lichtbereich sehr hell und können über große Entfernungen beobachtet werden.

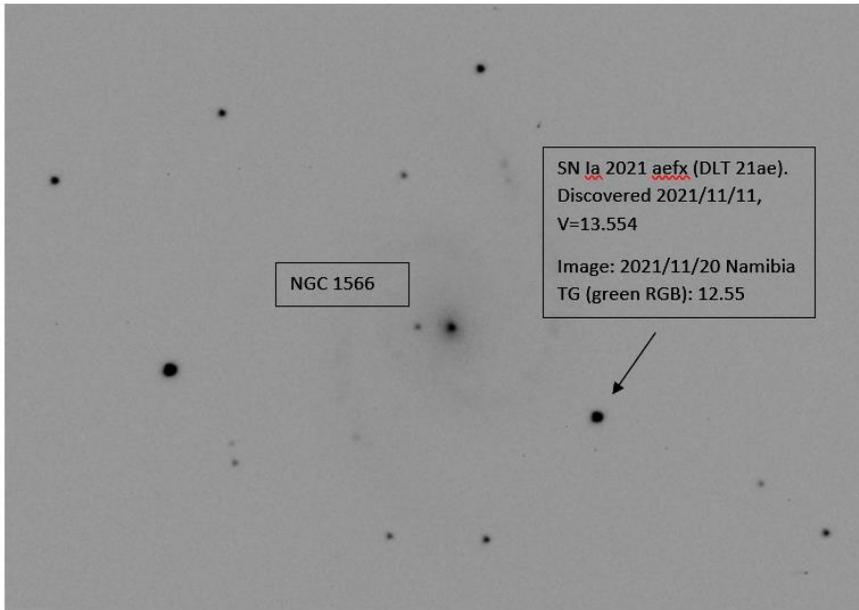


Abbildung 2: Supernova 2021aefx in der Galaxie NGC 1566. Aufgenommen mit 20" /3420 mm, Namibia. Nur 3 x 15 Sekunden belichtet, um keine Sättigung zu erreichen.

Der Clou an der Sache ist, dass man die absolute Magnitude M , ein Maß für die Leuchtkraft eines Sterns oder eben der Supernova, aus den Lichtkurven abschätzen kann. 1993 veröffentlichte M.M. Phillips eine erste, lineare Gleichung, die einen Zusammenhang zwischen dem Abfall der Helligkeit der Lichtkurve 15 Tage nach dem Maximum (Δm_{15}) im blauen Band (Johnson Blue) und der absoluten Magnitude M in den verschiedenen Filterbändern herstellt. Für die verwendeten Abkürzungen siehe das kleine Glossar am Ende.

Dabei zeigte sich: Je größer die Leuchtkraft der Supernova Ia, desto langsamer klingt die Lichtkurve in den ersten 15 Tagen ab.

Aber wie immer steckt der Teufel im Detail: Detailliertere Studien haben dazu geführt, dass Phillips die Linearität dieser Beziehung aufgeben musste. Die Gruppe um Adam Riess (2007) hat noch weitere Galaxien analysiert und 2009 die sog. MLCS2K2-Formel vorgestellt. Weitere Untersuchungen mit anderen Galaxiengruppen folgten. Dabei werden komplexe Modellierungen verwendet, die die Lichtkurven in allen Bändern auswerten. Die Bedeutung dieser Arbeiten liegt in der Möglichkeit, aus der Bestimmung der absoluten Helligkeit einer Supernova den Abstand zu sehr fernen Galaxien zu berechnen und mit der zusätzlichen Bestimmung der Geschwindigkeit, mit der sich diese Galaxien von uns entfernen (Dopplerverschiebung), die Hubble-Konstante zu ermitteln.

Gemeinsam ist den verschiedenen Ansätzen immer:

- Je höher die Leuchtkraft, desto langsamer der Abfall der gemessenen Helligkeit (Lichtkurven) nach dem Maximum.
- Der Abfall der Lichtkurven ist im blauen Band stärker als im V Band, d.h. der B-V Wert steigt nach dem Maximum mit der Zeit an, bevor er etwa 30 Tage später wieder abfällt.
- Für kleine $\Delta m_{15 (b)}$ flachen die M gegen $\Delta m_{15 (B)}$ -Kurven deutlich ab.
- Die Kurven werden generell flacher, wenn man vom blauen in Richtung der IR Bänder geht. Dort sind sie nahezu horizontal, die absolute Leuchtkraft ist dort also für alle Supernova Ia fast gleich.

Man sieht das alles sehr schön in den Abbildungen des Review Artikels von Jha (2019), insbesondere Abbildung 3, die ich hier leider ohne Copyright nicht abdrucken kann. Es gibt allerdings auch Supernovae Ia, die sich nicht in diese Relationen einfügen. Diese können durch Analyse der Spektren identifiziert werden.

Misst man nun die scheinbare Helligkeit des Maximums m_V und schätzt die absolute Helligkeit M_V mittels der „Phillips-Relationen“, kann man aus beiden Werten das Entfernungsmodul

$$(1) \quad DM = m - M$$

ermitteln. Mit dem Entfernungsmodul berechnet man dann die Entfernung D nach der bekannten Gleichung:

$$(2) \quad D = 10^{(DM-A)/5+1} \text{ in parsec (pc)}$$

Dabei berücksichtigt der zusätzliche Parameter A die Absorption der Strahlung durch interstellaren Staub in der Milchstraße in Richtung zur Galaxie oder intergalaktischen Staub. Für die Milchstraße sind Werte z.B. aus der Datenbank der NASA/IPAC zu ermitteln, die aus spektroskopischen Untersuchungen stammen.

Auswertung der Lichtkurve und Abschätzung der Entfernung

Abbildung 3 zeigt die Lichtkurve im grünen Filter, aufgenommen zwischen dem 20.11.2021 und dem 16.12.2021 mittels eines Remote-Teleskopes in Namibia. Leider verfügte das Teleskop über keinen V-Band-Filter, aber die Kurve im grünen RGB-Filterband sollte nicht dramatisch davon abweichen. Das sieht man z.B. daran, dass ein Referenzstern vermessen wurde, dessen Helligkeiten sich vom Literaturwert des V-Bandes um weniger als 0,1 Magnituden unterscheiden.

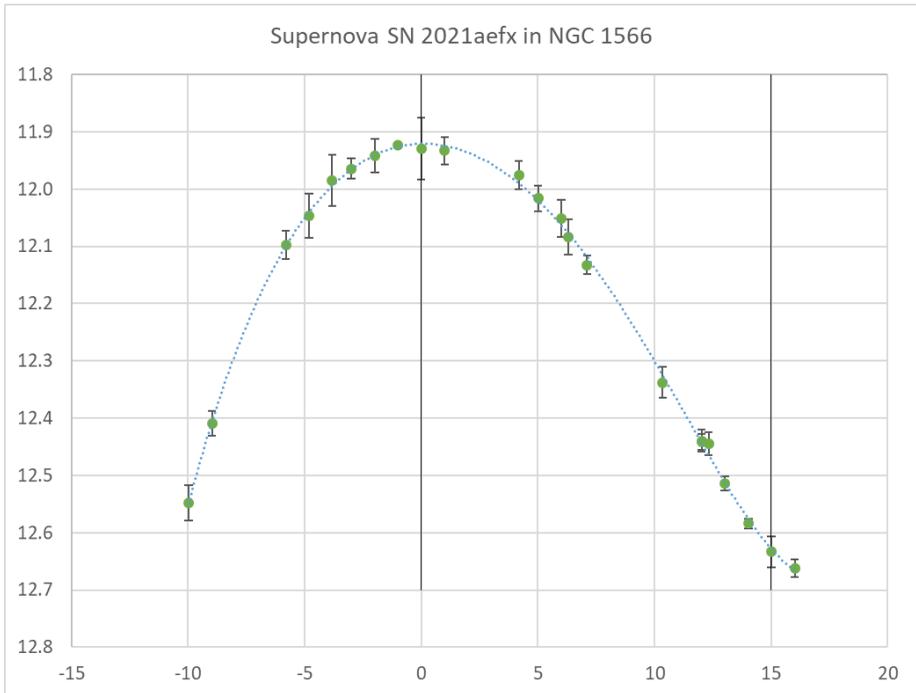


Abbildung 3: Lichtkurve der Supernova um das Maximum (Grünfilter). JD für $x=0$: 2459549.275

Eine Interpolation mittels eines Polynoms 4. Grades wurde genutzt, um das Maximum der scheinbaren Helligkeit sowie den Abfall in den ersten 15 Tagen zu ermitteln. Die Werte sind:

$$M = 11,91 \text{ mag}, \quad \Delta m_{15(G)} \sim 0,8 \text{ mag}$$

Nun kann man nicht einfach $\Delta m_{15(G)}$ in die Phillips-Relation statt $\Delta m_{15(B)}$ einsetzen. Leider habe ich um das Maximum keine durchgehende Lichtkurve mit Blaufilter aufgenommen. Abbildung 4 zeigt das instrumentelle B-G (als Näherung zum „richtigen“ B-V) über einen längeren Zeitraum. Wie oben gesagt, wachsen sind die B-G-Werte nach dem Maximum der Lichtkurve an: Der Wert um den 15. Tag nach Maximum liegt in meinen Messungen bei etwa 0,5-0,6 – einige Tage vor Maximum war er etwa 0,1. Der Anstieg setzt sich fort bis zu einem Maximum von etwa 1.3 etwa 30 Tage nach Maximum. Burns et. al (2013) haben eine Relation zwischen dem Zeitpunkt des B-V-Maximums gegen $\Delta m_{15(B)}$ ermittelt. Demnach entspricht ein Intervall von etwa 30 Tagen einem $\Delta m_{15(B)}$ von 1-1.1 mag.

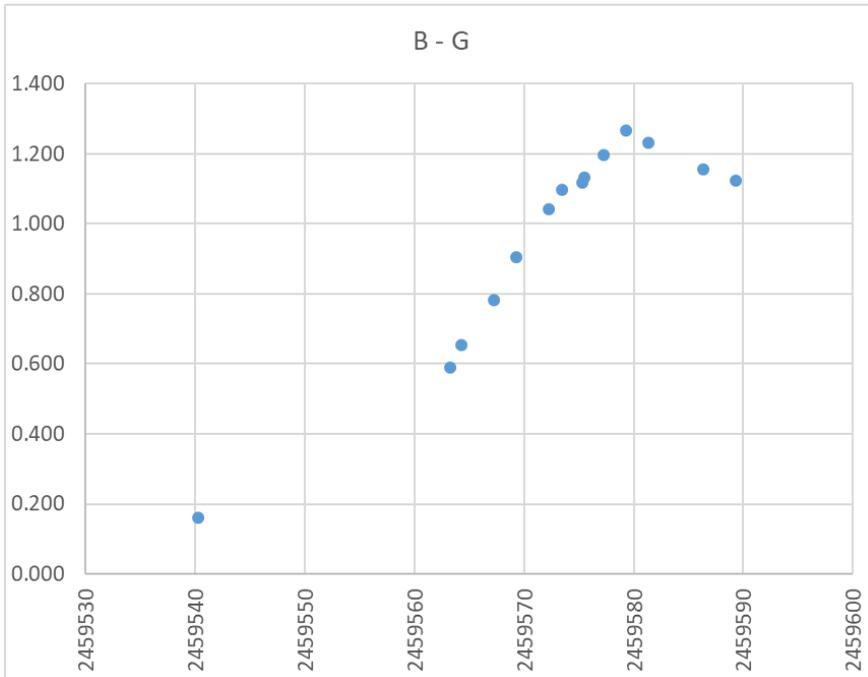


Abbildung 4: Verlauf B-V über die Zeit

Da auch die zeitliche Entwicklung B-G nicht identisch zum „echten „B-V“ sein muss, kann man das echte $\Delta m_{15(B)}$ nur abschätzen im Bereich von etwa 1,0-1,3 mag. Schaut man sich die Abbildung 3 in der Arbeit von Jha (2019) an, sieht man, dass in diesem Bereich die absoluten Magnituden der Supernovae zwischen -19,0 und -19,4 mag liegen, mit leicht abfallendem Trend. Ich habe für die Entfernungsbestimmung den Wert von

$$M_V = -19,2 \text{ mag} \pm 0,2 \text{ mag}$$

gewählt.

Damit ergibt sich für

$$DM = m_V - M_V = 31,1 \text{ mag.}$$

Als letzte Größe fehlt noch die Abschätzung der Absorption. Dazu kann man im Internet ebenfalls bei NASA/IPAC nachsehen und bekommt Werte für zwei Methoden, die sich aber nur unwesentlich unterscheiden: 0,0242 und 0,0281 mag. Die bereits zitierte Arbeit von Tikhonov gibt einen Wert von 0,014 mag an. Die Unterschiede sind allemal kleiner

als der Fehler hinsichtlich der Messung der scheinbaren Magnitude m (siehe unten) und können daher vernachlässigt werden. Ich nehme den Wert 0,0242 mag.

Es ergibt sich somit der folgende Wert für die Entfernung der Supernova:

$$D_{SN} = 10^{(31,134/5+1)} = 16,5 \text{ Mpc}$$

Jetzt muss man noch den Fehler abschätzen: Die Unsicherheit der Messung von m hat mehrere Komponenten, am wichtigsten sind:

- Die Verwendung eines grünen RGB- statt eines V-Band-Filters sowie die Wahl der Vergleichssterne verfälschen den Wert von m_V leicht.
- Der Fehler in der Abschätzung von M_V aus der Phillips-Relation oder anderen Verfahren.

Der erste Fehler dürfte nicht mehr als 0,1 Magnituden betragen, das zeigt der Wert des Referenzsternes, aber auch der Vergleich meiner Daten mit einigen V-Band-Messungen anderer Beobachter sowie meine Erfahrungen mit anderen Sternen. Hinsichtlich des Fehlers bei der Abschätzung von M_V hatte ich ja mit +/- 0,2 mag angesetzt. Daraus ergibt sich dann ein Gesamtfehler des Entfernungsmoduls von etwa

$$\Delta DM = 0,3 \text{ mag}$$

Den resultierenden Fehler der Entfernung D zur Supernova kann man durch eine lineare Näherung abschätzen:

$$(3) \Delta D = 1/5 \cdot \ln(10) \cdot 10^{(DM-A)/5+1} \cdot \Delta DM = 0,461 \cdot D \cdot \Delta DM$$

Man sieht, dass der absolute Fehler der Entfernung nicht nur proportional dem Fehler in DM ist, sondern mit DM und damit der Entfernung selbst anwächst. Bei großer Entfernung wirkt sich also ein kleiner absoluter Fehler in ΔDM stärker aus. Damit ergibt sich für den Gesamtfehler der Abstandsmessung:

$$\Delta D_{SN} = +/- 2,3 \text{ Mpc}$$

Somit erhält man als grobe Abschätzung der Entfernung:

$$D = 16,5 +/- 2,3 \text{ Mpc} = 53,8 +/- 7,5 \text{ Millionen Lichtjahre.}$$

Der rote Punkt in Abbildung 1 zeigt die ermittelte Entfernung samt der Fehlerbalken, in ordentlicher Übereinstimmung mit den letzten publizierten Entfernungsbestimmungen. Abbildung 5 schließlich zeigt die Lichtkurven in R, G, B und Luminanz, soweit ich sie aufgenommen habe, bis zum 4. Januar 2022. Man sieht die beschriebenen Effekte aber

auch die Schulter im roten Filter (die im IR sogar ein zweites Maximum zeigen würde), hervorgerufen durch eine Änderung der Oxidationsstufen der Elemente der Eisengruppe, die zu einer Verschiebung der Emission in Richtung IR führt.

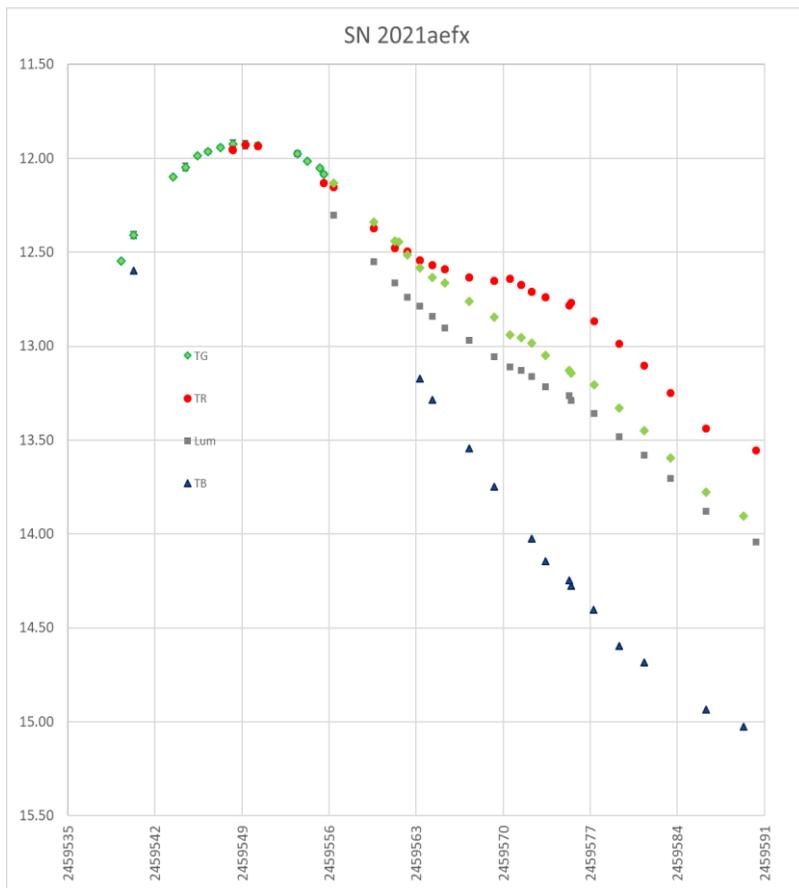


Abbildung 5: Lichtkurve in RGB und Luminanz vom 24.11.2021 bis 4.1.2022

Ich kann also die Ausgangsfrage auch nicht sicher beantworten. Aber bestimmt werden sich auch die Profiastronomen mit ihren ausgefuchstesten Methoden mit dieser Supernova beschäftigen. Mal sehen, welche Entfernung die *Spanische Tänzerin* dann wirklich hat.

Technische Details:

„Ich“ habe die Aufnahmen mit einem Remote-Teleskop auf der Hacos-Farm in Namibia gemacht: 20 Zoll AG Optical iDK, fokale Länge 3420 mm, Planewave L-500 mount.

Kamera FLI Proline 16803 CCD mit Rotator. Belichtungszeiten zwischen 12 und 18 Sekunden. Für G und B wurden zumeist drei Bilder gestackt, bei L und R Einzelaufnahmen.

Ich habe die Plattform Remonte Skygems Observatories genutzt: www.skygems-observatories.com.

Man kann dort verschiedene Teleskope in Namibia und Spanien benutzen. Bedingt durch die kurzen Belichtungszeiten fanden sich immer Zeitfenster für die Aufnahmen, außer natürlich bei Wolken, was in Namibia um diese Jahreszeit durchaus vorkommt. Die ganze Abarbeitung von der Eingabe der Anforderung bis zum Herunterladen der Fits-Dateien ist sehr einfach und übersichtlich.

Natürlich kosten Remote-Aufnahmen Geld, bei kurzen Belichtungszeiten hält sich das aber im Rahmen meines persönlichen Budgets. Man braucht bei Skygems kein Abo abzuschließen, sondern kauft sich im Voraus Punkte, die man dann beliebig nutzen kann. Die Anzahl Punkte / Belichtungszeit hängt vom Teleskop, aber auch vom Mondstand ab.

Natürlich gibt es auch andere Anbieter, die ich aber bisher nicht ausprobiert habe.

Literatur / Links:

Datenbank der Galaxien: <https://ned.ipac.caltech.edu/>

Datenbank für die Staubabsorptionswerte:

<https://irsa.ipac.caltech.edu/applications/DUST/>

N.A. Tikhonov, O.A. Galazutdinova, Astrophysical bulletin Vol **75**, Issue 4, 384 (2020) oder arXiv:2009.04090v2

M.M. Phillips, Astronomical Journal Letters, Band **413**, S L.105 (1993)

M.M. Phillips et. Al., The Astronomical Journal, **118**:1766-1776 (1999)

S. Jha, A. Riess, R. Kirsner, The Astrophysical Journal, Volume **659**, Number 1 (2007)

S. Jha, K. Maguire, M. Sullivan, arXiv:1908.02303V1 (2019) – insbesondere Abb. 3 dort heraus:

C.R. Burns et. al., Astrophys. J. **789**, 32 (2014)

C.R. Burns et. al., Astrophys. J. **859**, 56 (2018)

Glossar:

m_V = Gemessene Helligkeit im V-Band (oder einem anderen, dann g,b,B,... als Index)

M_V = Absolute Magnitude = Helligkeit, die an in 10pc Entfernung zur Lichtquelle messen würde

Δm_{15} = Abfall der gemessenen Helligkeit in den ersten 15 Tagen nach Maximum der Lichtkurve

A = Maß für Abschwächung der Helligkeit durch inter- und intra-galaktischen Staub

DM = Entfernungsmodul m-M

D = Entfernung zur Lichtquelle in Megaparsec (Mpc) oder Millionen Lichtjahre (Mly)

ΔD = Fehlerabschätzung für D, analog DM

Parsec = Maß für die Entfernung, Abk. pc. 1 pc = 3,26 Lichtjahre (ly)