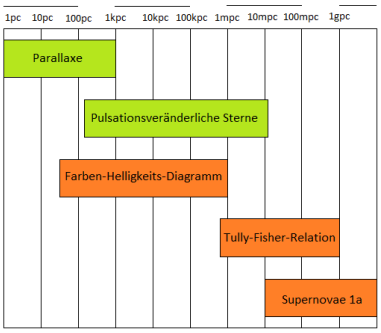
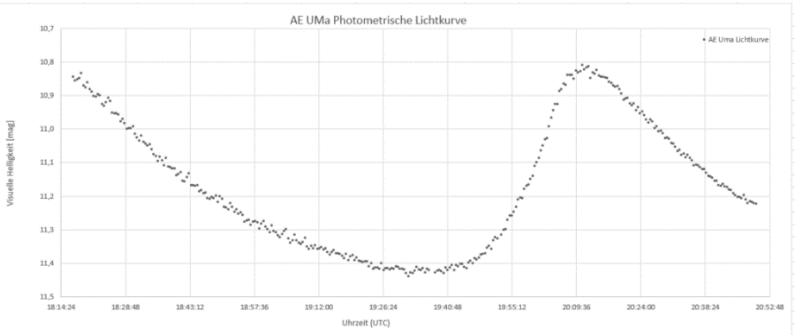
Die astronomische Entfernungsleiter

Methoden zur Bestimmung der Entfernungen von Sternen

Diese Arbeit stellt einige der Methoden zur Bestimmung der Entfernung von Sternen und Galaxien dar und vertieft die Entfernungsbestimmung an pulsationsveränderlichen Sternen.





Henri Wagner

Altenberger Str. 6

42119 Wuppertal

w.henri@gmx.de

Hendrik Tackenberg

Oberdahl 39

42349 Wuppertal

Hendrik.tackenberg@arcor.de

Carl-Fuhlrott-Gymnasium

Jahrgangsstufe Q1

Projektarbeit im Projektkurs Astronomie 2017/2018

Kursleiter: Bernd Koch

Abgabe: 30.05.2018

Inhaltsverzeichnis

A. Vorwort ... 2

I. Entfernungsbestimmungen ... 3

B. Irdische Entfernungen ... 3

1. Bestimmung des Erdumfangs ... 5

C. Triangulation & Laufzeitmessung (Entfernung Erde-Mond) ... 7

D. Bedeutung für die Astronomie ... 9

E. Maße im Universum ... 10

1. Das Lichtjahr (Lj) ... 10

2. Die astronomische Einheit (AE) ... 12

3. Das Parsec (pc) ... 14

F. Trigonometrische Parallaxe ... 15

1. Jährliche Parallaxe ... 15

2. Tägliche Parallaxe ... 16

3. Säkulare Parallaxe ... 16

G. Hertzsprung-Russell-Diagramm ... 17

H. Pulsationsveränderliche Sterne ... 19

1. Kappa-Mechanismus ... 19

2. Henrietta Leavitt ... 22

I. Farben-Helligkeits-Diagramm ... 26

J. Tully-Fisher-Beziehung (& Faber-Jackson-Beziehung) ... 27

K. Supernovae Typ 1a ... 29

L. Hubble und der Ursprung des Universums ... 30

1. Kosmologische Rotverschiebung ... 30

2. Edwin Powell Hubble und H_0 ... 30

II. Eigene Entfernungsbestimmung an AE UMa ... 32

1. Equipment der Schülersternwarte am Carl-Fuhlrott-Gymnasium ... 32

2. AE UMa ... 34

3. Photometrie des Sterns AE UMa und Erstellung einer Lichtkurve ... 35

3. Vorgehen ... 35

4. Kalibrierung der Aufnahmen ... 35

5. Auswerten der Lichtkurve ... 39

6. Auswertung ... 41

7. Diskussion ... 44

M. Schlusswort ... 45

N. Unser Fazit ... 45

O. Eigenständigkeitserklärung ... 45

P. Abbildungsverzeichnis ... 46

A. Vorwort

Eine der schwierigsten Aufgaben dieser Projektarbeit war zu Anfang ein Thema aus dem riesigen Spektrum, welches die Astronomie zu bieten hat, zu wählen. Als unser Projektleiter Herr Koch schließlich die Idee hatte, wir könnten doch über Entfernungsbestimmungen im Universum insbesondere über eine eigene Bestimmung an einem pulsationsveränderlichen Stern schreiben, war die Begeisterung doch eher mäßig. Uns schien, dass Entfernungsbestimmungen im Allgemeinen eine recht belanglose und für die Theoretiker reservierte Disziplin der Astronomie seien.

Ein großer Irrtum...

Wie sich später herausstellte, ist die Entfernungsbestimmung der Himmelsobjekte mitunter eine der grundlegendsten und wichtigsten (wie auch spannendsten) Disziplinen. Nachdem wir ein bisschen geforscht und auch verstanden hatten, stellte sich heraus, dass in fast allem, was der Mensch über das Universum weiß, die jeweilige Entfernung eine große Rolle spielt.

In der folgenden Arbeit wollen wir Ihnen das oberflächliche Wissen über diverse Methoden etc., wie auch das etwas spezifischere Wissen unserer eigenen Messung an dem pulsationsveränderlichen Stern AE UMa näherbringen.

I. Entfernungsbestimmungen

B. Irdische Entfernungen

Die Menschen haben schon seit Anbeginn der Zeit versucht, verschiedene Gegenstände in Relation zu setzen, um sie besser einordnen oder vergleichen zu können. Diese Vergleiche beruhten meist auf direktem Vergleich, wofür natürlich beide Objekte benötigt wurden. Um dieses Problem zu umgehen, wurde später mit relativen Maßen am menschlichen Körper gearbeitet (Bspw. „Elle“ oder „Fuß“), da man seinen Fuß in der Regel immer dabeihat. Diese Größen waren jedoch an die relative Regelmäßigkeit der Größen des menschlichen Körpers gebunden und durch die dadurch entstehende Ungenauigkeit nicht für präzise Anliegen zu gebrauchen. Der französische Nationalkonvent setzte 1793 den Meter als neues Längenmaß fest, um ein rundum gültiges und unveränderliches System für die Messung von Längen/Strecken festzulegen. Dabei sollte dieser so lang sein, dass der Erdquadrant, also die Strecke der Erdoberfläche vom Nordpol bis zum Äquator auf dem Längengrad von Paris, 10 000 000 Meter beträgt. Im Jahr 1795 wurde dann der erste Ur-Meter aus Messing gegossen und sollte als Vorlage dienen.

„Unveränderlich“ war jedoch ein Trugschluss. Die fehlende Genauigkeit bei der Bemessung des Erdquadranten und die Veränderung des Messingstocks bei anderer Temperatur etc. stellte sich als größeres Problem als angenommen dar. Bei einer immer fortschrittlicher und genauer werdenden Wissenschaft durfte sich der Meter nicht auf einmal verändern.

Zuerst wurde festgestellt, dass der ursprüngliche Ur-Meter 0,13mm zu lang war. Daher ließ man die Wissenschaftler Delambre und Méchain die Länge des Meridianbogens zwischen Dünkirchen und Barcelona erneut genauer bestimmen, und anhand dieser Resultate wurde ein „endgültiger“ Meter aus Platin gegossen. Dieser war, wie man später herausfand, 0,2mm zu kurz, was jedoch erst herauskam, als man im 19. Jahrhundert den Meridianbogen genauer messen konnte. Den Ur-Meter hat man jedoch beibehalten, was dazu führt, dass der Meridianbogen ca. 10.001,996 km lang ist. Zudem stellte man fest, dass die Erde kein exaktes Rotationsellipsoid[1] ist, somit war der Meter konkret die Länge eines Gegenstandes, nämlich des Ur-Meters und später seit 1889 dann des Internationalen Meterprototyps (siehe Abbildung 1).

[1] Durch die Drehung der Erde um ihre eigene Achse entsteht aufgrund des Effektes der Fliehkraft eine Ausdehnung am Äquator und eine Stauchung an den Polen, somit ist die Erde keine perfekte Kugel.

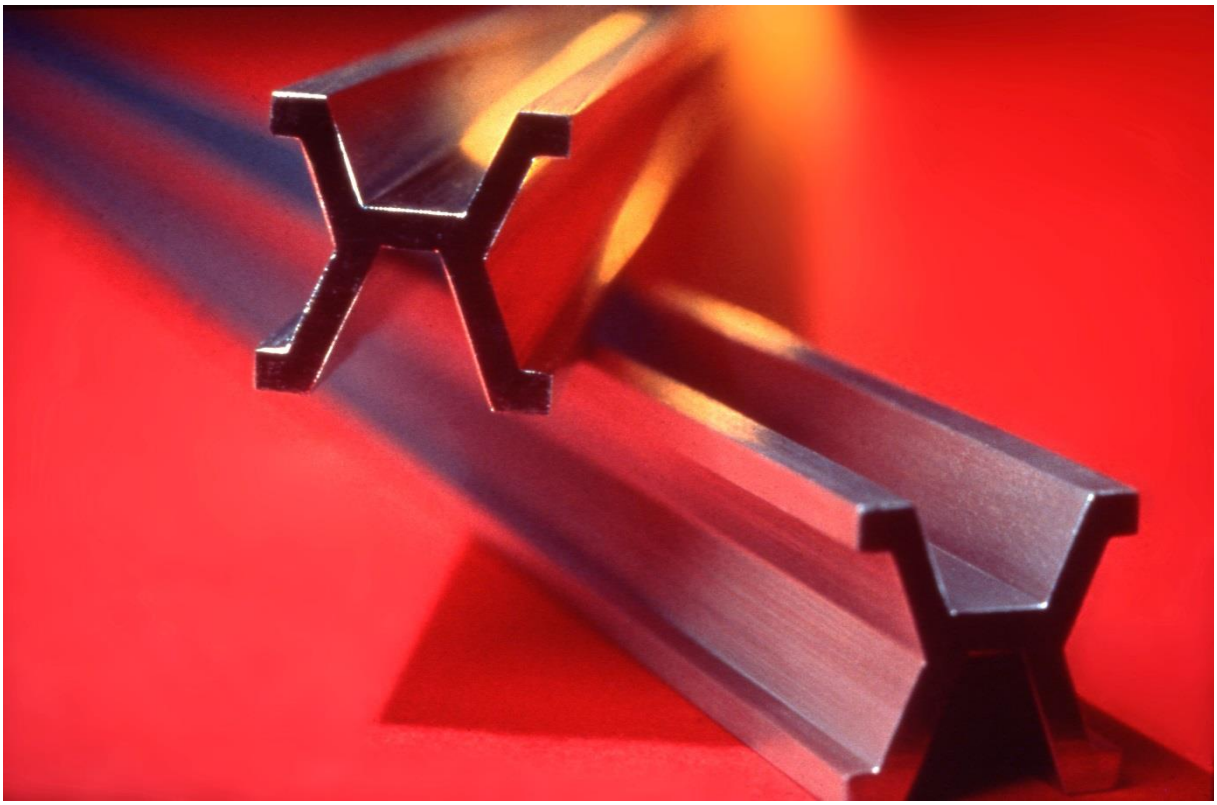


Abbildung 1, 1989 wurde der Internationale Meterprototyp von dem Internationalen Büro für Maß und Gewicht (BIPM) als Prototyp für die Einheit Meter festgelegt. Er besteht aus einer Platin-Iridium-Legierung im Verhältnis 90:10.

Das Problem blieb jedoch: Auch die später entstandene Platin-Iridium Variante des Ur-Meters ist nicht unveränderlich und eine Veränderung hätte dramatische Folgen. Um dieses Problem zu umgehen, versuchte man den Meter über einen Gegenstand hinaus zu definieren. Man einigte sich auf die Definition des Meters mithilfe der Wellenlänge einer Atomschwingung. Dabei sollte der Meter "das 1.650.763,73-fache der Wellenlänge der von Atomen des Nuklids 86Kr beim Übergang vom Zustand 5d5 zum Zustand 2p10 ausgesandten, sich im Vakuum ausbreitenden Strahlung sein" *(https://de.wikipedia.org/wiki/Meter#Wellenlänge)*. Die Definition basiert auf Forschungen von Ernst Engelhard und setzt Kenntnisse im Fach Atomphysik heraus.

Um die Genauigkeit weiter zu verbessern, wurde der Meter zuletzt 1973 auf der 15. Generalkonferenz für Maße und Gewichte (kurz CGPM) durch die Naturkonstante *c* (Lichtgeschwindigkeit) definiert. Dort sagte man, ein Meter sei die Strecke, die das Licht im Vakuum, innerhalb von 1/299 792 458 Sekunden erreicht[2]. Diese Definition ist jedoch zugleich auch von der Definition der Sekunde abhängig, welche seit 1967 auch mit Hilfe der Periodendauer einer Strahlung definiert wird.[3] [4]

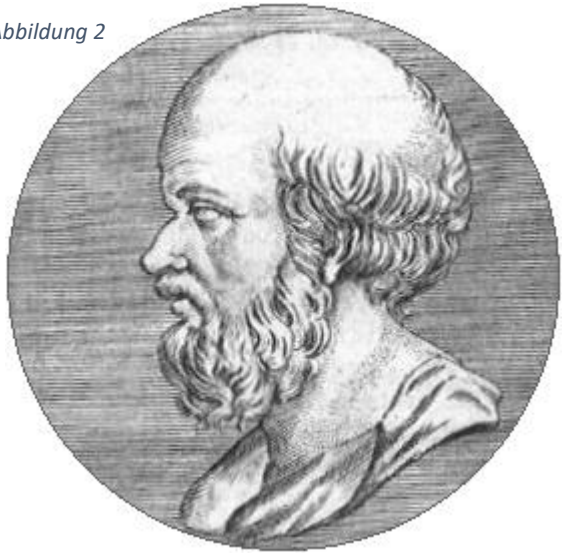
[2] Für die Messung der Lichtgeschwindigkeit, siehe "Lichtjahr"
[3] https://de.wikipedia.org/wiki/Meter
[4] http://www.calculino.com/de/umrechnungen/laengenmasse-und-laengen-umrechnen_information.html

1. Bestimmung des Erdumfangs

Bereits Thales von Milet und Anaximander, zwei antike Naturphilosophen, vermuteten 600 v. Chr. eine kugelförmige Erde. Die ersten astronomischen Beweise für diese These wurden von Aristoteles erbracht: Er beobachtete den Schatten der verschiedenen Mondphasen und entdeckte stets einen Kreisbogen. Da der Schatten durch die Erde entstehen musste und eine Kugel der einzige Körper ist, der in jeder Position einen Kreisbogen aufweist, gelang Aristoteles so bereits im 4. Jahrhundert v. Chr. der Beweis, dass die Erde (annähernd) eine Kugel ist.

Die erste Messung des Erdumfangs ging von Eratosthenes (276-195 v.Chr.) aus, einem der größten Wissenschaftler seiner Zeit. Dafür lieferte er vorerst revolutionäre Fakten, die eine flache Erde widerlegten. Er sagte, an einem 21. Juni könnte man das Spiegelbild der Sonne zur Mittagszeit in einem tiefen Brunnen in Syene (heute Assuan, eine ägyptische Stadt) sehen. Somit müsste die Sonne gerade senkrecht auf diesen Brunnen scheinen. In Alexandria jedoch, also einer Stadt ungefähr auf demselben Längengrad, warf ein Obelisk zur gleichen Zeit einen langen Schatten. Das bedeutet, die Sonnenstrahlen kamen dort nicht senkrecht auf die Erde. Wenn man diese Beobachtung, unter der Annahme interpretiert, dass die Erde sei eine Scheibe, so ergibt sich folgendes Bild:

Abbildung 2



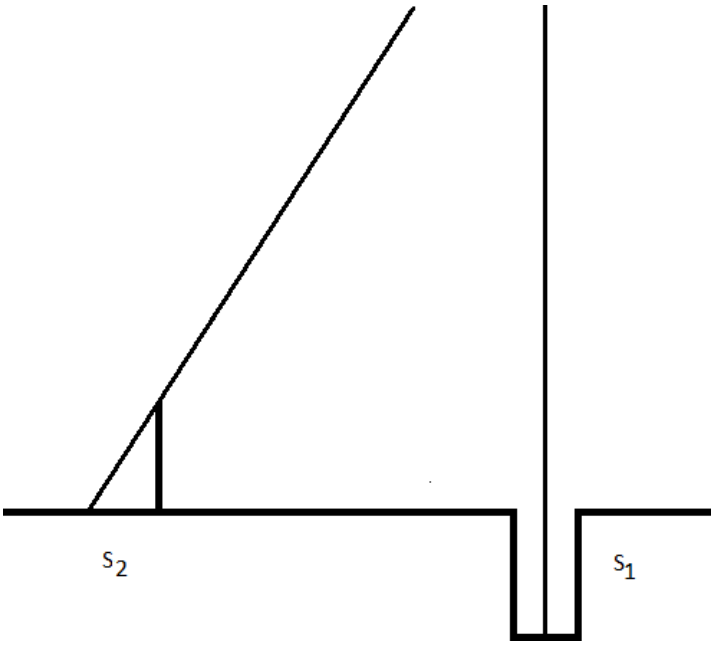


Figure 1

Das setzt jedoch dann voraus, dass die bereits bekannte Tatsache, dass die Sonnenstrahlen nahezu parallel auf die Erde treffen, falsch ist. Also entsteht ein Widerspruch und muss einen Fehler haben. Sollte man jedoch davon ausgehen, die Erde sei eine Kugel, erklärt sich die

Einfallswinkelveränderung und die Parallelität der Sonnenstrahlen. Folglich entsteht folgende Situation:

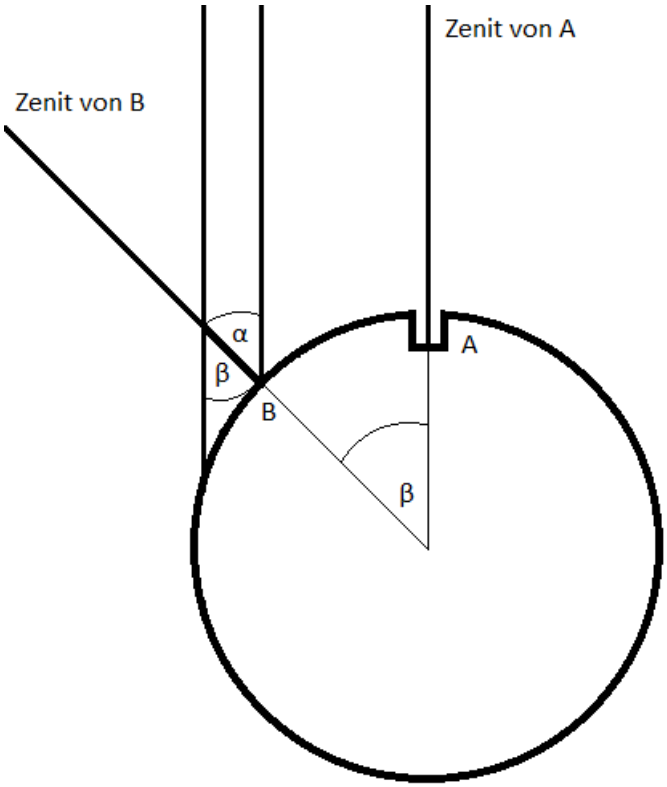


Figure 2

Nachdem er seine Beobachtungen soweit theoretisch nachvollzogen hatte, musste er nur noch den Winkel β bestimmen. Dies stellte mit den einfachen Winkelregeln bei parallelen Geraden kein großes Problem dar, da $\measuredangle\alpha = \measuredangle\beta$. Seine Berechnung ergab einen Winkel β von ca. 7,2° und somit einen Erdradius von ca. 6645 km, welcher dem heutigen Wert von 6371 km sehr nahekommt.[5] [6] Im Laufe der Zeit wurde die Methodik und die Genauigkeit der Ergebnisse weiter verbessert. Dank moderner Technik erhofft man sich Abweichungen im Millimeterbereich auszumachen.[7]

[5] http://www.cgg-online.de/wissenschaft/WissenschaftBibel/KugelgestaltErde.htm
[6] https://de.wikipedia.org/wiki/Erdradius
[7] https://www.bipm.org/en/measurement-units/history-si/evolution-metre.html

C. Triangulation & Laufzeitmessung (Entfernung Erde-Mond)

Die Laufzeitmessung ist im Gegensatz zu fast allen anderen Methoden letztendlich in der Praxis nicht auf hohe Mathematik angewiesen, sondern auf Möglichkeiten, die dem Menschen noch nicht allzu lange bereitstehen. Somit wurde zum Beispiel die Entfernung der Erde zum Mond damals durch Triangulation berechnet. Das bedeutet: Von zwei verschiedenen Orten mit bekannter Entfernung wurde der Winkel zum Mond gemessen und mit Hilfe der Regeln der ebenen Trigonometrie dann der gesuchte Abstand gemessen.

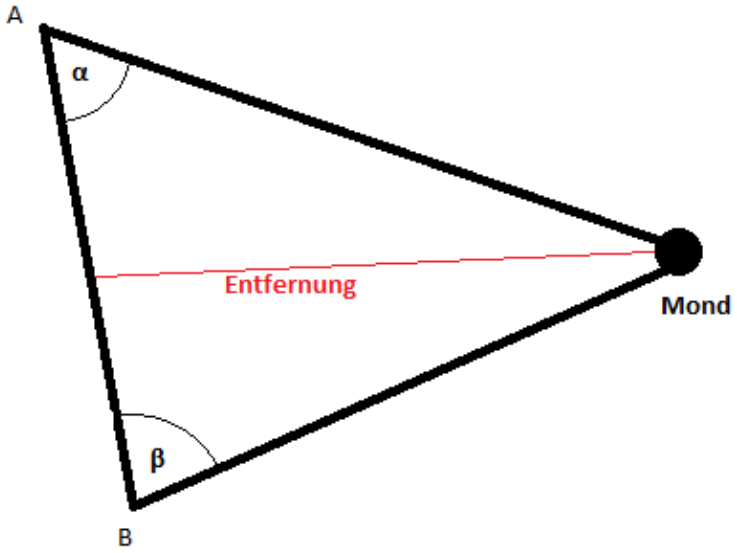


Figure 3, hier sind also A und B die Messorte, und die rote Strecke ist die gesuchte Entfernung

Mittlerweile ist die Entfernung von der Erde zum Mond jedoch bis auf den Millimeterbereich genau bestimmt. Selbst wenn die Triangulation gute Ergebnisse erzielen kann, so lange die Strecke $\overline{AB}$ im Verhältnis zur Entfernung nicht vollständig untergeht, ist ein derartig genaues Ergebnis damit beim besten Willen nicht zu erreichen.[8]

Hier kommt die Laufzeitmessung ins Spiel. Laufzeitmessung heißt erstmal nichts anderes, als dass ein Signal mit bekannter Geschwindigkeit zu einem Objekt ausgesendet wird und die Zeit gemessen wird bis das Signal, vom Objekt reflektiert, wieder beim Ausgangspunkt ankommt. Diese Methode hat einen sehr kleinen Wirkungsbereich. Doch bei unseren direkten Nachbarn im Sonnensystem ist dies die genaueste Methode von allen. Im Zuge der Apollo-11 Mission im Juli 1969 wurde ein Laser-Retroreflektor[9] auf dem Mond installiert, mit dem es darauffolgend möglich war, die Entfernung so genau zu bestimmen.[10]

---

[8] https://www.leifiphysik.de/astronomie/sternbeobachtung/ausblick/mondentfernung-durch-triangulation
[9] Ein Reflektor mit bestimmter Oberfläche, die bewirkt, dass einfallende Wellen weitgehend in dieselbe Richtung reflektiert werden aus welcher sie gekommen sind, unabhängig vom Einfallswinkel.
[10] https://de.wikipedia.org/wiki/Lunar_Laser_Ranging

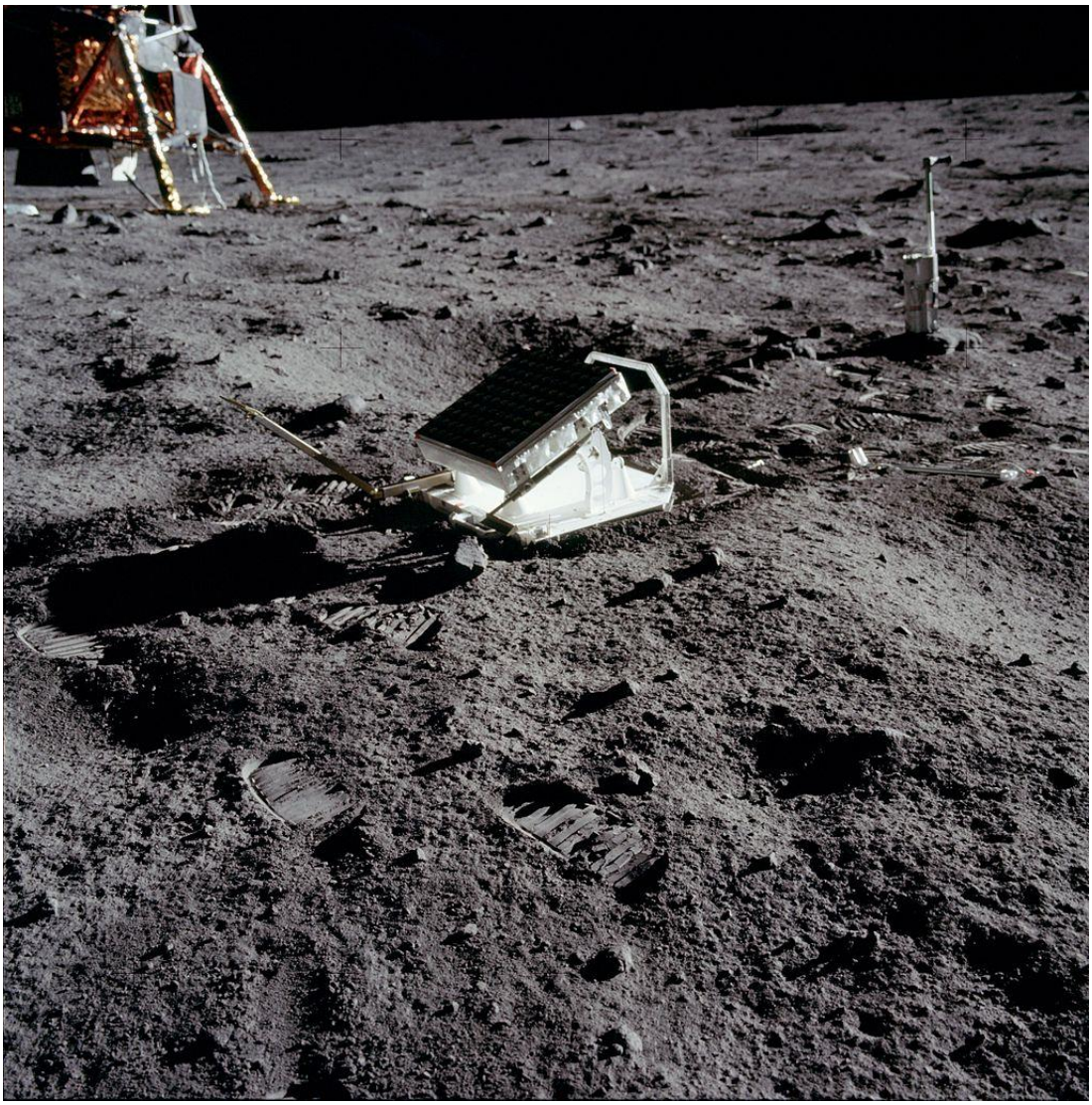


Abbildung 3, "Lunar Laser Ranging"-Reflektor auf dem Mond, aufgestellt während der Apollo 11-Mission

Diese Genauigkeit lässt auch neue Erkenntnisse in der Gravitationsphysik zu: Es ließ sich beweisen, dass der Mond sich langsam von der Erde entfernt. Zu der Zeit, in welcher dieser Text verfasst wurde, also ca. am 20. April 2018 um 16:41, ist der Punkt des Mondes, der der Erde am nächsten ist, $368\,714\ km$ von der Erde entfernt.[11]

Außerhalb des Mondes kann die Methode noch bei nahen Planeten sowie Asteroiden mit Hilfe von Radiowellen genutzt werden. Bei weiter entfernten Objekten wird das Signal dann endgültig zu schwach.[12]

[11] Wert von https://www.timeanddate.de/astronomie/mond/entfernung
[12] https://lp.uni-goettingen.de/get/text/7249

D. Bedeutung für die Astronomie

Um den Anfang des Universums, das Universum selber und die Materie im Universum besser verstehen zu können, müssen die Entfernungen der Himmelsobjekte bestimmt werden. Vom allgemeinen Verständnis des Nachthimmels bis hin zur möglichst genauen Bestimmung des Ursprungs des Universums ist alles abhängig von einer möglichst exakten Bestimmung der Entfernungen. Denn auch die Sterne haben definierte Positionen im Raum, und auch die Entfernungen sind nicht als unerreichbar definiert.

Um dieses Problem anzugehen, haben sich diverse geniale Menschen verschiedene Methoden ausgedacht. Die wahrscheinlich wichtigsten und populärsten werden wir mal mehr, mal weniger detailreich darlegen. Doch hier gilt: Wir haben die Methoden genommen, die am populärsten sind und die uns im Gesamtbild am wichtigsten vorkamen. Das heißt jedoch nicht, dass es nicht noch andere, wahrscheinlich sogar sehr wichtige Methoden gibt.

Für die Astronomische Entfernungsleiter ist es natürlich essentiell, dass die Methoden sich teilweise überlappen, sodass die Methoden an der nächst kleineren Methode geeicht und verifiziert werden können. Dies ist auch der Grund für die Metapher der *Leiter,* die einzelnen Sprossen (Methoden) folgen aufeinander und ermöglichen so, dass jede Entfernung bestimmt werden kann.

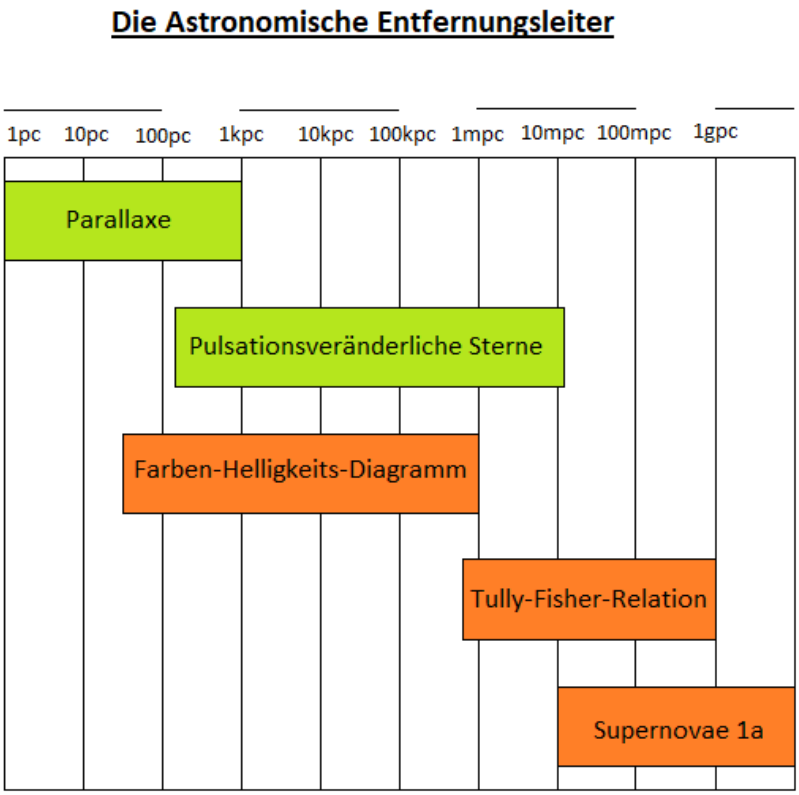


Figure 4, Grüne Methoden sind primäre Methoden, rote Methoden sind sekundäre Methoden.

E. Maße im Universum

Wenn man nämlich die Entfernungen der Himmelsobjekte benennen möchte, kommt man mit Meter und auch mit Kilometern dermaßen schnell auf so große Zahlen, dass der Mensch sich andere, tauglichere Entfernungsmaße ausdenken musste. Durchsetzen konnte sich vor allem die astronomische Einheit (AE), das Lichtjahr (Lj) und das Parsec (pc).

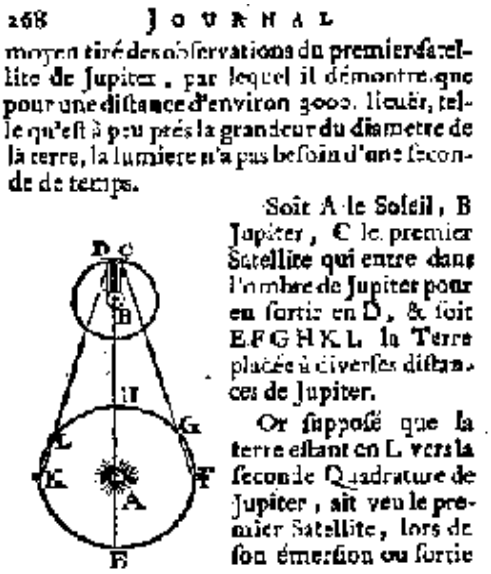
1. Das Lichtjahr (Lj)

$$9{,}461 * 10^{15} \text{ Meter}$$

„Die Strecke, die eine elektromagnetische Welle wie das Licht in einem julianischen Jahr im Vakuum zurücklegt, nennt man Lichtjahr“ *(Wikipedia)*. Da die Dauer eines Jahres je nach Definition bis um die $0{,}005\%$ schwankt, haben sich die Experten bei der Lichtjahres-Bestimmung auf das so genannte julianische Jahr geeinigt. Dieses hat eine Dauer von exakt 365,25 Tagen.

Seit Albert Einstein die Lichtgeschwindigkeit als Naturkonstante vorrausgesetzt hatte, wurde versucht, diese so genau wie möglich zu bestimmen. Dazu wurden diverse Verfahren entwickelt, mit denen man zu dem jetzigen Ergebnis gekommen ist. Die Genauigkeit der Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit ist proportional zu der Genauigkeit der Bestimmung eines Lichtjahres. Das bedeutet, dass eine möglichst genaue Bestimmung des Lichtjahres abhängig von der Bestimmung der Konstante *c* ist. Nach derzeitigem Forschungsstand beträgt die Lichtgeschwindigkeit 299.792.458 m/s.[13]

Doch bis es zu dieser Genauigkeit kam, war es ein weiter Weg. Schon Galileo Galilei (1564 - 1642) versuchte um 1600 dem Rätsel der Lichtgeschwindigkeit auf den Grund zu gehen, was jedoch mangels technischer Mittel fast unmöglich war. Jedoch gelang es einem dänischen Astronom namens Ole Christensen Rømer (1644 - 1710) knapp 100 Jahre später anhand eines Jupitermondes, bei welchem er im Verlauf eines Jahres beobachten konnte, wie das sichtbare Signal desselben bis zu 22 Minuten verzögert hinter dem Jupiter auftauchte, die ersten Informationen über die Lichtgeschwindigkeit zu finden. Der mit diesem Ergebnis berechnete Wert der Lichtgeschwindigkeit weicht zwar um ca. 29% von dem heute angenommenem Wert ab. Er ließ jedoch zwei durchaus weitreichende Thesen zu: Zuerst einmal war damit bewiesen, dass die Lichtgeschwindigkeit endlich ist, was eine ganz neue Vorstellung des Bildes des Lichtes zuließ. Außerdem war der Wert so genau, dass wir aus heutiger Sicht immerhin sagen können, dass die Potenz von 10^5 km/s in die richtige Richtung ging. Insgesamt war dieses Ergebnis der Beginn eines


268 JOURNAL

moyen tiré des observations du premier satellite de Jupiter, par lequel il démontre que pour une distance d'environ 3000. lieuës, telle qu'est à peu prés la grandeur du diametre de la terre, la lumiere n'a pas besoin d'une seconde de temps.

Soit A le Soleil, B Jupiter, C le premier Satellite qui entre dans l'ombre de Jupiter pour en sortir en D, & soit E F G H K L la Terre placée à diverses distances de Jupiter.

Or supposé que la terre estant en L vers la seconde Quadrature de Jupiter, sit veu le premier Satellite, lors de son émersion ou sortie

Abbildung 4, Originalauszug der Arbeit von RØMER zur ersten Messung der Lichtgeschwindigkeit.

[13] https://de.wikipedia.org/wiki/Lichtjahr

Wettlaufes, indem es darum ging, eine immer genauere Bestimmung der von Albert Einstein geprägten Konstante *c* zu erreichen.[14]

Die letzte und zur heutigen Zeit als endgültige bekannte Messung führte eine Gruppe von Physikern durch, die im Auftrag des National Bureau of Standards[15] unter der Leitung von Ken Evenson als Projektleiter die genaueste Messung der Lichtgeschwindigkeit durchführte (ca. 1960). Sie nannten sich die Boulder-Gruppe. Diese Forschungsgruppe entwarf einen Helium-Neon-Laser, dessen Frequenz und Wellenlänge so genau bestimmt werden konnte, dass die Multiplikation dieser Werte einen um einen Faktor 100 genaueren Wert für die Lichtgeschwindigkeit ergab als den vorherigen.[16]

Fig. 1. Winners of the Gold Medal from the Department of Commerce for their measurement of the speed-of-light. Shown left to right in front are Ken Evenson (project leader), Bruce Danielson and Gordon Day and in back left to right are Dick Barger, John Hall, Russ Petersen, and Joe Wells.

Abbildung 5, Die Boulder-Group.

Dieser Wert wurde in Folge dessen von diversen internationalen Laboratorien bestätigt und als einheitlich festgelegt. Auf dieser Basis wurde dann auch der Meter neu definiert.

[14] https://www.leifiphysik.de/
[15] Heute: National Institute of Standards and Technology, Bundesbehörde der USA
[16] A Century of Excellence in Measurements, Standards, and Technology (Buch S.191 ff)

2. Die astronomische Einheit (AE)

$$149\ 597\ 870\ 700\ Meter$$

Die astronomische Einheit ist die mittlere Entfernung zwischen der Erde und der Sonne. Diese wird berechnet, indem man das geometrische Mittel zwischen dem Entfernungsmaximum und dem Entfernungsminimum nimmt. Also beträgt die mittlere Entfernung:

$$\frac{Aphel^{17} + Perihel^{18}}{2}$$

Dies entspricht der großen Halbachse[19] der ellipsenförmigen Erdumlaufbahn.

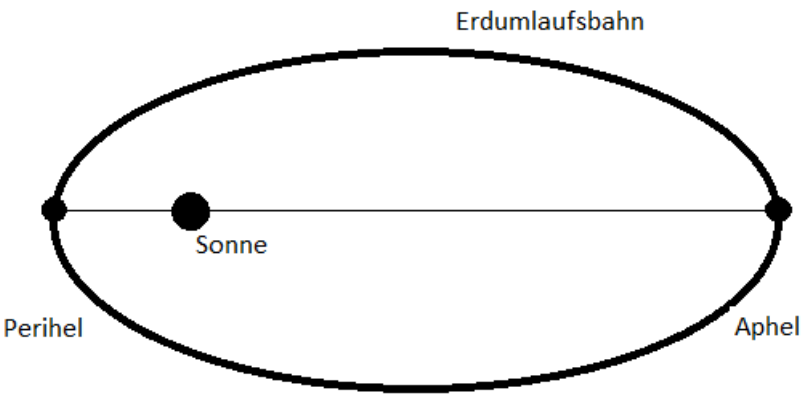


Figure 5, die elliptische Umlaufbahn der Erde um die Sonne.

Dabei sollte beachtet werden, dass der Abstand zwischen beiden Massenmittelpunkten gesucht ist. Bei der Erde handelt es sich hier um den Schwerpunkt des Erde-Mond-Systems. Seit der ersten Vermutung von Aristarchos von Samos[20] 265 v.Chr. über die Entfernung der Sonne zur Erde führte ein langer Weg zur heutigen genauesten Messung, mit dessen Ergebnis man die astronomische Einheit definierte.

Die Messung der astronomischen Einheit geht einher mit der Messung der Distanz von der Erde zur Sonne. Lange hat man diese sehr erfolgreich mit Hilfe eines Venustransits gemessen. Mit Venustransit wird der Übergang der Venus vor der Sonne, aus Sicht der Erde, bezeichnet. Edmond Halley hatte 1716 einen Weg gefunden die Parallaxe der vorübergehenden Venus mit neuen Erkenntnissen und mit Hilfe des 3. Keplerschen Gesetzes so zu benutzen, dass sich eine AE als:

$$1AE \approx \frac{150d}{\alpha}$$

[17] Punkt der Umlaufbahn, an dem die Entfernung der Erde zur Sonne am größten ist.
[18] Punkt der Umlaufbahn, an dem die Entfernung der Erde zur Sonne am kleinsten ist.
[19] Die Hälfte der Länge des längsten Durchmessers einer Ellipse.
[20] Griechischer Astronom und Mathematiker *um 310 v. Chr. auf Samos; †um 230 v. Chr. (https://de.wikipedia.org/wiki/Aristarchos_von_Samos)

darstellen lässt. Dabei ist d der Abstand zweier Beobachtungsorte auf der Erde zur gleichen Zeit und α der gedachte Winkel von der Mitte des Abstands der zwei Orte zum jeweiligen Punkt, an dem die Venus im Hinblick der Sonne steht.[21]

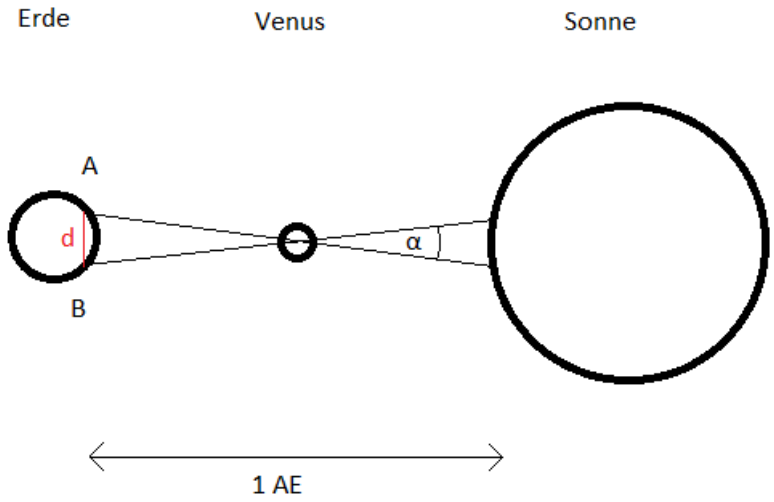


Figure 6, schematische Darstellung des Venustransits.

Die genaueste Messung wurde in den 90er Jahren des letzten Jahrhunderts getätigt, jedoch nicht mit Hilfe eines Venustransits, sondern durch Radarstrahlen, wie bei der Laufzeitmessung erklärt wird.[22]

Damals hatte die astronomische Einheit noch den Vorteil, durch unzureichende Messmöglichkeiten im Allgemeinen genauer zu sein als Bestimmungen mit dem Meter, denn es war einfacher, alles auf die Entfernung der Erde zur Sonne zu beziehen. So kam auch die Gaußsche-Gravitationskonstante zu Stande, indem Carl-Friedrich-Gauß[23] statt der gebräuchlichen S.I.-Einheiten die des Sonnensystems nutzte. Heute ist die astronomische Einheit jedoch so genau bestimmt und auch der Meter unveränderlich definiert, dass die astronomische Einheit keinen Vorteil mehr bringt. Sie wird lediglich noch in Rechnungen benutzt, um die Zahlen möglichst einfach zu halten. Sie ist nicht im S.I.-Einheitensystem[24]. Eine Länge von 10^6AE war früher auch als Siriometer bekannt[25] [26] [27]

[21] https://de.wikipedia.org/wiki/Venustransit#Bestimmung_der_Distanz_Erde-Sonne_(Astronomische_Einheit_AE)
[22] https://eclipse.astronomie.info/transit/venus/theorie/SonnendistanzEinfacheBerechnung.pdf
[23] Deutscher Mathematiker, Astronom, Geodät und Physiker *30. April 1777 in Braunschweig; †23. Februar 1855 in Göttingen (https://de.wikipedia.org/wiki/Carl_Friedrich_Gau%C3%9F)
[24] Das S.I. Einheitensystem ist ein Internationales Einheitensystem für physikalische Größen
[25] Buch: Astronomie in Theorie und Praxis (Erik Wischnewski)
[26] https://de.wikipedia.org/wiki/Astronomische_Einheit#GL1
[27] https://www.spektrum.de/lexikon/physik/astronomische-einheit/825

3. Das Parsec (pc)

$$\underline{3.09 * 10^{16}\ Meter}$$

$$\underline{=3{,}26\ Lichtjahre}$$

Das Parsec ist die längste der drei Einheiten. Der Name Parsec ist eine Abkürzung von Parallaxen Sekunde (**par**allax **sec**ond) und beschreibt die Entfernung, von der aus die Entfernung von der Erde zur Sonne als eine Bogensekunde[28] wahrgenommen werden würde.

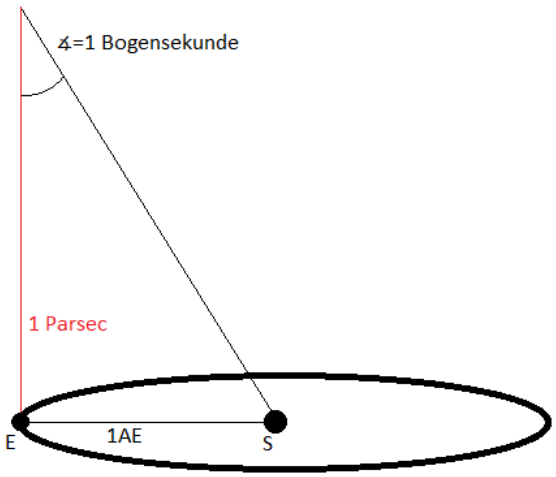


Figure 7, Definition des Parsecs.

Da wir den Winkel zu einem $1pc$ entfernten Objekt als 1" (Bogensekunde) kennen und somit auch die Gegenkathete als $1AE$ kennen, ergibt sich nach den Regeln der Berechnung rechtwinkliger Dreiecke:

$$\tan 1'' = \frac{1\ AE}{1\ pc}$$

und somit

$$1\ pc = \frac{1\ AE}{\tan 1''}$$

und somit mit dem Kehrwert

$$1\ pc = \frac{1}{\tan \frac{1}{3600}^{\circ}}\ AE = 206.264{,}608\ AE$$

Mit diesem Wert lässt sich problemlos in die anderen Einheiten umrechnen.[29] [30]

(Zum Vergleich: Eine Bogensekunde entspricht in etwa dem Winkel, unter dem man ein $5mm$ breites Objekt aus einem Kilometer Entfernung sehen könnte)[31]

---

[28] $\frac{1}{3600}$ eines Grades
[29] Buch Astronomie Theorie und Praxis S.316
[30] http://www.spektrum.de/lexikon/astronomie/parsec/327
[31] https://de.wikipedia.org/wiki/Winkelsekunde

F. Trigonometrische Parallaxe

Der Begriff der Parallaxe hat sich als ein genereller Begriff für Entfernungen in der Astronomie eingebürgert. Ursprünglich galt der Begriff jedoch ausschließlich der trigonometrischen Entfernungsbestimmung und beschreibt das Phänomen der scheinbaren Verschiebung eines Objektes, wenn der Beobachter seine Position verändert. (Bsp.: Einen Finger vor das Gesicht halten und abwechselnd das linke und rechte Auge öffnen und schließen. Die scheinbar veränderte Position des Fingers ist die Parallaxe.) Darauf basierend gibt es fundamental drei klassische Methoden, welche die Vermessung des Weltraums geprägt haben.

Der Name der Parallaxe ist auf das griechische Wort $parallaxis$ zurückzuführen. Dies heißt so viel wie Vertauschung und bedeutet, dass der Betrachter seine Betrachtungsposition vertauscht. Dies wird besonders in der ersten und zweiten Methode der Trigonometrie deutlich.

1. Jährliche Parallaxe

Die wichtigste dieser drei Methoden ist die jährliche Parallaxe. Sie beruht in etwa auf demselben Prinzip, mit welchem schon das Parsec definiert wurde. Hierbei wird die Positionsänderung der Sterne aufgrund der Erdbewegung um die Sonne gemessen. Da die Erde innerhalb eines Jahres einmal um die Sonne rotiert, beschreiben die Sterne im Laufe eines Jahres scheinbar eine kleine Ellipse, auch jährliche Parallaxe genannt. Der halbe Öffnungswinkel dieser Ellipse, also der Winkel vom Aphel bis zum Mittelpunkt der Ellipse, wird Parallaxenwinkel genannt. Im umgekehrten Sinn ist er auch der Winkel, unter dem aus Sicht des betrachteten Objektes die Entfernung von der Erde zur Sonne erscheint. Das ist der Grund, warum die Astronomen die Parallaxe als Entfernungseinheit verwenden. Aus dieser Methode wird auch, wie schon erklärt, das Parsec abgeleitet.[32]

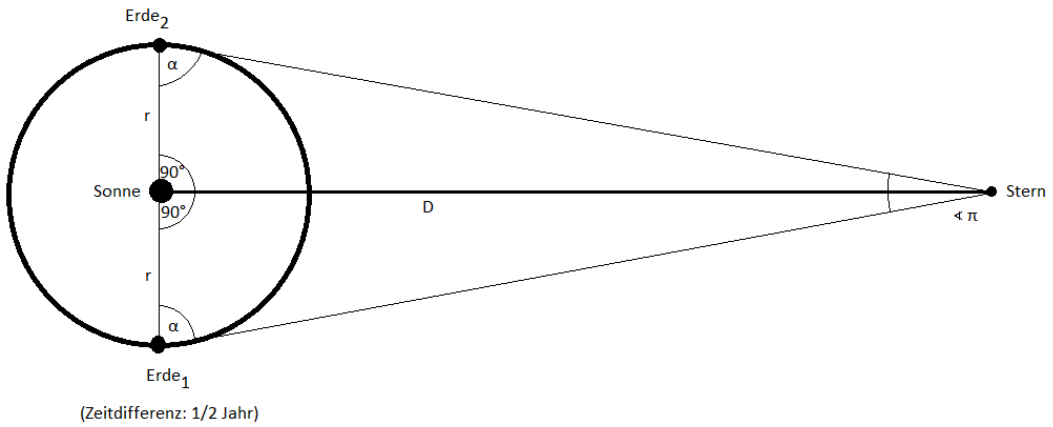


Figure 8, schematische Darstellung der trigonometrischen Parallaxe

Diese Methode hat die älteste Geschichte von allen hier aufgezählten, welche über das Sonnensystem hinausgehen. Schon 1838 bestimmte Friedrich Wilhelm Bessel erstmalig die Entfernung zu einem, besser gesagt zu zwei Sternen, nämlich zu dem Doppelsternsystem $61\ Cygni$.

Friedrich Wilhelm Bessel (* 22. Juli 1784 in Minden, Minden-Ravensberg; † 17. März 1846 in Königsberg i. Pr.) war neben der Physik und der Geodäsie ein wichtiger deutscher Astronom und Mathematiker. Er beschäftigte sich unter anderem mit der Frage, ob als Folge des heliozentrischen Systems nicht eine Parallaxe zu den nahegelegenen Sternen auftreten müsste. Ein großes Problem der Wissenschaft

[32] Buch Astronomie in Theorie und Praxis

bestand darin, einen nahen Stern überhaupt gegen weiter entfernte auszumachen. Bessel fand nach langem Beobachten ein Doppelsternsystem, welches, wie sich später herausstellte, die größte sichtbare Eigenbewegung aller gemessenen Sterne hatte. Dies ließ auf einen nahen Stern schließen.[33]

Abbildung 6, Portrait Friedrich Wilhelm Bessel

„Ich hielt also den, durch die *stärkste* eigene Bewegung ausgezeichneten Doppelstern 61 Cygni Fl. […] für vorzüglich geeignet zu einer Untersuchung über die jährliche Parallaxe.“[34] Bessel ermittelte eine jährliche Parallaxe von 0,3136“[35]. Dies entspricht einer Entfernung von ca. 3,19 pc. Die Ergebnisse aktuellerer Messungen ergeben eine jährliche Parallaxe von 0,29“ und daraus resultiert eine Entfernung von 3,5 pc. Bessels Abweichung von diesem Wert ist sehr wahrscheinlich durch die hohe Eigenbewegung zu erklären[36].

Bei dieser Methode bewegt man sich ungefähr im Raum bis 100pc.[37]

2. Tägliche Parallaxe

Die tägliche Parallaxe unterliegt demselben Prinzip, nur dass wir als Beobachter anstatt der jährlichen Rotation um die Sonne die tägliche Erdrotation für den Perspektivenwechsel nutzen. Diese Methode hat zwar im Vergleich zur jährlichen Parallaxe keinen so weiten Anwendungsbereich, hat jedoch den Vorteil, dass die Messung schon nach knapp einem halben Tag fertig ist. Sollte es beispielsweise in Berlin und in Kapstadt jeweils eine Beobachtungsstation geben, die in ständiger Kommunikation stehen, ist es möglich, die Bilder sofort auszuwerten und Ergebnisse zu erzielen. Die tägliche Parallaxe hat eine Reichweite von 500-1000AE, und ist damit für Berechnungen innerhalb des Sonnensystems gut geeignet.

3. Säkulare Parallaxe

Eine etwas unbekanntere Methode, um die trigonometrische Parallaxe zu nutzen, basiert auf der Rotation der Sonne um das Zentrum der Milchstraße. Hier liegen die Grenzen der Reichweite in der Genauigkeit der Positionsbestimmung. Man sagt, eine erdgebundene Messung hat bestenfalls einen Fehler von $0{,}01"$. Damit kann man im Idealfall bis zu $100pc$ Entfernung berechnen. Die neuesten Satelliten gestützten Messungen erreichen eine Abweichung von höchsten $0{,}0007"$ was schon eine bis zu zehnfache Reichweite, also bis zu $1kpc$, zulässt.[38] [39]

---

[33] https://de.wikipedia.org/wiki/Friedrich_Wilhelm_Bessel#Kosmische_Entfernungen
[34] http://adsabs.harvard.edu/full/1838AN.....16...65B, Seite 71
[35] http://adsabs.harvard.edu/full/1838AN.....16...65B, Seite 93
[36] https://de.wikipedia.org/wiki/61_Cygni
[37] https://de.wikipedia.org/wiki/61_Cygni#cite_note-1
[38] http://www.sternwarte-eberfing.de/Fuehrung/Objekbeschreibung/Entfernungsbestimmung.html
[39] http://www.awb1.ch/dat/p/parallaxe.php

G. Hertzsprung-Russell-Diagramm

Bevor wir zu den Sternen an sich kommen, schauen wir uns erst etwas Fundamentales zum Verständnis an, nämlich das wohl wichtigste Diagramm der Astronomie-Geschichte. Genauer gesagt legte Ejnar Hertzsprung mit seinen Arbeiten das Fundament, auf dem Henry Norris Russell später um 1913 dann das Hertzsprung-Russell-Diagramm (HRD) Diagramm entwarf. Dieses ist primär keine Entfernungsbestimmung, ist aber von fundamentaler Bedeutung für diverses Verständnis jener.

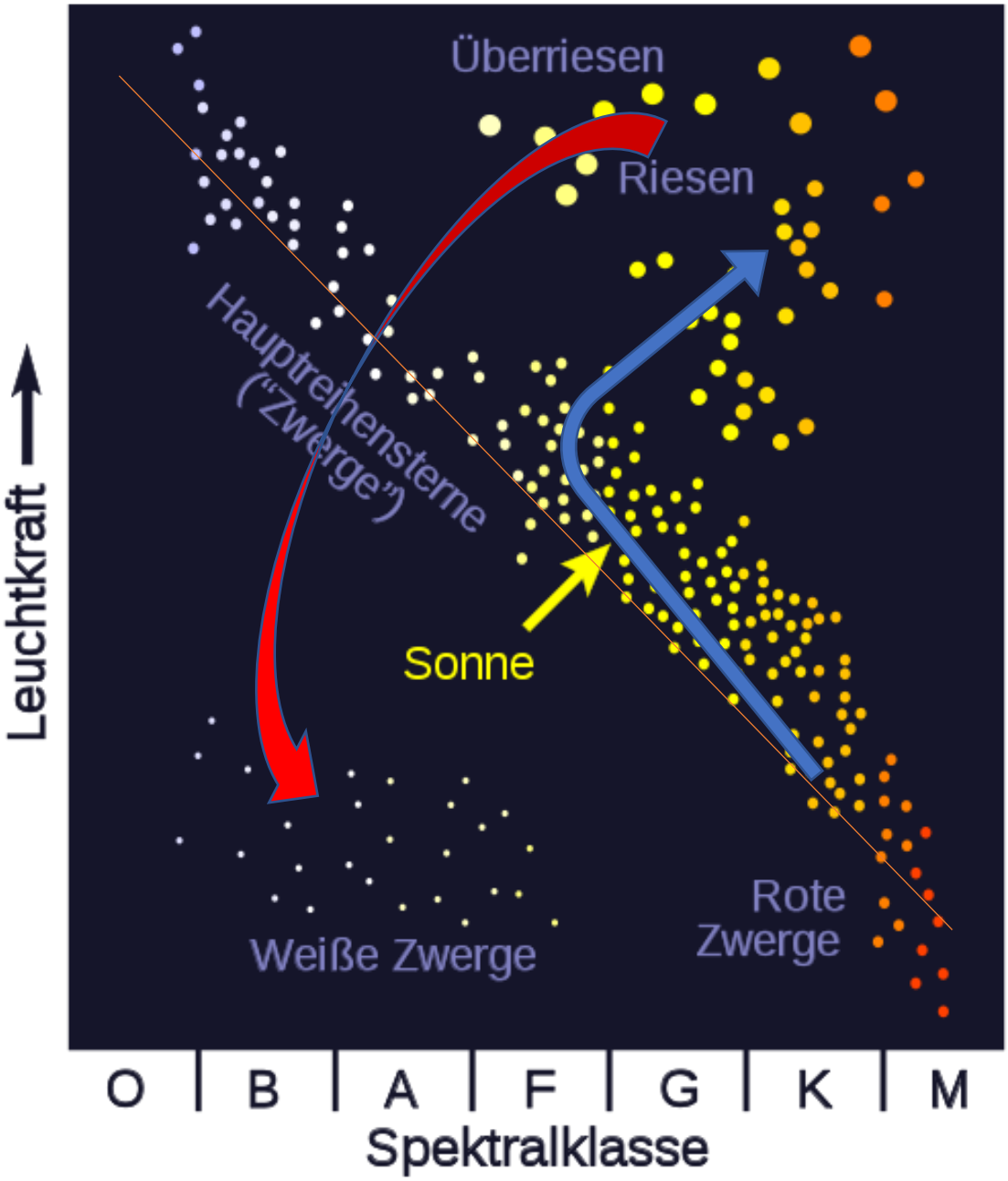


Figure 9, Hertzsprung-Russel-Diagramm

Auf der Y-Achse wird die Helligkeit eines Sterns als Leuchtkraft oder als absolute Helligkeit angegeben. Auf der X-Achse liegen die verschiedenen Spektralklassen der Sterne. Dabei geht es links ins Blaue und

rechts ins Rote. Man kann sogar sagen, dass es von links warm zu rechts kalt verläuft, da es eine Korrelation der Farbe zur Temperatur des Objektes gibt.[40]

Man trägt beispielsweise alle Sterne eines Sternhaufens nach absoluter Helligkeit und Spektralklasse in dieses Diagramm ein, wobei hier die absolute Helligkeit nicht ganz so von Belang ist, da in diesem Fall jeder Stern dieselbe Distanz zur Erde hat. In dem Diagramm werden sich nun die meisten Sterne in der Hauptreihe wiederfinden (orange Linie). Diese Verteilung liegt an der Entwicklung eines Sterns, da ein Stern die meiste Zeit mit der Fusion von Wasserstoff zu Helium zubringt und sich dabei langsam erhitzt und heller wird. Daher entsteht der Verlauf nach links-oben, wie in Abb. 7 zu sehen ist. Wenn der Vorrat verbraucht ist, wird der Stern größer und kühler, also ein roter Riese. Er kann durch die Gravitation seine äußeren Schichten nicht mehr halten und gibt diese Schicht für Schicht ab. Diese Schichten sind dann als planetarische Nebel zu sehen. Dieser Vorgang ist im Diagramm als nach rechts-oben ausweichende Linie zu sehen (blauer Pfeil). Übrig bleibt ein extrem heißer Kern aus Sauerstoff und Kohlenstoff, der langsam auskühlt und als weißer Zwerg bekannt ist. Das ist der Verlauf von oben-rechts nach links und dann gen links-unten (roter Pfeil). Wenn man dieses Diagramm für z.B. einen Sternenhaufen ausfüllt, so kann man anhand der Sternenverteilung in etwa sehen, wie alt der Sternenhaufen ist, da ein junger Sternenhaufen z.B. keine roten Riesen aufzeigt.[41][42]

Dies als kleiner Exkurs zum Leben eines Sterns mit Hilfe des Hertzsprung-Russell-Diagramms.

---

[40] http://www.sternwarte-eberfing.de/Fuehrung/Objekbeschreibung/Entfernungsbestimmung.html#FHD
[41] https://www.youtube.com/watch?v=pLjg3hFZZHY
[42] Astronomie in Theorie und Praxis - Erik Wischnewski

H. Pulsationsveränderliche Sterne

Abbildung 7, Foto der kleinen Magellanschen Wolke, in der Henrietta Leavitt die pulsationsveränderlichen Sterne entdeckte.

Um pulsationsveränderliche Sterne zu verstehen, muss man erstmal generell verstehen, was in einem Stern passiert.

Wenn man die Sterne am Himmel betrachtet, sieht man eine Vielzahl verschieden heller Sterne, die alle in ihrer Helligkeit stagnieren. Doch dies ist keinesfalls so. Alle Sterne sind im ständigen Wandel, und in vielen Fällen lässt sich eine Pulsation beobachten. Das bedeutet, dass die Sterne in einem gewissen, meist regelmäßigen Zeitabstand (Periode) heller und wieder dunkler werden. Jene, bei denen dies sehr deutlich zu sehen ist, werden pulsationsveränderliche Sterne genannt. Die hellsten unter diesen wurden schon vor knapp 100 Jahren von Henrietta Leavitt mit bloßem Auge entdeckt.

1. Kappa-Mechanismus

Dieser Pulsations-Effekt resultiert aus dem Kappa-Mechanismus, dazu jedoch zuerst mal Grundlegendes über einen Stern.

In Sternen wird aus der Kernfusion, also der Fusion von Wasserstoff und Helium, Strahlungsenergie in Form von Gammastrahlung. Durch die Reaktion entsteht ein Massendefekt. Das bedeutet, dass die Ausgangsstoffe massereicher als die Reaktionsprodukte sind. Diese Masse wird nach Einsteins Gleichung zur Beziehung zwischen Energie und Masse $E = m * c^2$ in Energie umgewandelt. Weil die Energie hier die Masse mal die Lichtgeschwindigkeit im Quadrat ist, kann man sehen, dass schon eine sehr kleine Masse eine sehr hohe Energie bedeutet. Ein Gramm Materie hat somit die gleiche Energie wie jene, die bei einer Atombombe freigesetzt wird.

Die Massendifferenz und die Wahrscheinlichkeit einer Fusion ist zwar sehr gering, aber dadurch, dass die Sonne so groß ist, finden mehrere Milliarden Kernverschmelzungen in einer Sekunde im inneren der Sonne statt. Insgesamt resultiert daraus eine Gesamtenergie von $3{,}8 * 10^{26}$ W und ein Massenverlust von 4,2 Milliarden Tonnen pro Sekunde.

Die im Kern der Sonne entstandene Strahlungsenergie kann aufgrund der enormen Dichte, die im Sterninneren herrscht, nicht direkt absorbiert werden. Diesen Effekt nennt man Opazität, es beschreibt das Durchlassungsvermögen des Plasmas für Strahlung. Diese Opazität ist größtenteils von der Menge

freier Elektronen abhängig. Dies steht wiederum mit der Temperatur und dem Material in Verbindung. Die Temperatur hingegen ist unter anderem ein Ergebnis des gegebenen Drucks.

Der Druck im Zentrum des Sterns lässt sich durch folgende Formel bestimmen:

$$p_z = k * \frac{N}{V} * T$$

K ist die Boltzmann-Konstante, N die Teilchenanzahl, sowie V das Volumen und T die Temperatur. Da nun während der Kernfusion aus vier Protonen ein Teilchen entsteht und somit die Teilchenanzahl N verringert wird, lässt der zentrale Druck P_z etwas nach. Daraus resultiert, dass das Volumen V durch den konstanten äußeren, gravitativen Druck kleiner wird. Durch diese Komprimierung erhöht sich jedoch leicht die Temperatur (Virialsatz[32]). Dies ist jedoch keine sich selbst verstärkende Reaktion. Wir brauchen also keine Angst zu haben, dass die Sonne uns bald um die Ohren fliegt, denn die erhöhte Temperatur sorgt wiederum dafür, dass der zentrale Druck steigt und somit den „Deckel" etwas anhebt. Das Volumen wird größer, der zentrale Druck verringert sich eher wieder und die Temperatur sinkt. Dies pendelt sich nach und nach ein und ist somit quasi eine Lebensversicherung, ein Thermostat der Sterne.

Veranschaulichen kann man sich dieses Beispiel anhand eines Kochtopfes, in dem Wasser gekocht wird. Das Wasser wird solange erwärmt, bis es anfängt zu kochen. Dadurch staut sich unter dem Deckel der Wasserdampf. Erst wenn der Druck im Inneren des Topfes groß genug ist, kann der von der Gravitation auf den Topf gedrückte Deckel angehoben werden und der Wasserdampf entweichen, auch wenn sich beim Stern ein Gleichgewicht einstellt und sich nicht immer so stark entlädt.

Welche Leistungsdichte hat ein Stern wie die Sonne im Zentrum, also welche Leistung drückt gegen den äußeren Teil?

Die Sonne hat eine Gesamtleistung von etwa $3{,}9 * 10^{26}\ W$. Diese Leistung verteilt sich nun auf die gesamte Sonne. Man sagt jedoch, etwa die Hälfte der Gesamtleistung befindet sich in den innersten 10% des Radius, also dem innersten Tausendstel des Volumens. Der Einfachheit halber rechnen wir vorerst mit der gesamten Leistung. Der Radius der Sonne liegt in etwa bei $700\ 000\ km$, 10% sind also $70\ 000\ km$, also $7 * 10^7 m$. Mit der Formel zur Volumenberechnung einer Kugel lautet die Formel dann:

$$\frac{3.9 * 10^{26} W}{\frac{4}{3}\pi(7 * 10^7 m)^3}$$

Da uns ein grobes Richtergebnis hier reicht, lässt sich die 3,9 mit der 4, und die 3 mit Pi wegkürzen. Nach dem Auflösen der Klammer bleibt:

$$\frac{10^{26} W}{3.43 * 10^{23}\ m^3}$$

Das ergibt etwa 290, und mit dem Faktor ½, den wir nicht vergessen dürfen, sind wir ca. bei $145 W/m^3$. Das klingt erstmal nach sehr wenig (zum Vergleich: Ein erwachsener Mensch gibt ungefähr $100\ Watt$ an Energie an die Umwelt ab). Jedoch ist der springende Punkt hier ein anderer: Und zwar im Fall der Sonne das riesige Volumen. Zwar ist die Leistungsdichte im Kern auf einem Kubikmeter nur knapp $150\ Watt$. Doch dadurch, dass alleine der innerste Teil, also die 10% des Radius', schon ca. 1305-mal dem Volumen der Erde entsprechen, summiert sich das zu jener gigantischen Energie, die bei der Fusion freigesetzt wird. Doch was passiert mit dieser Energie?

Die im Kern der Sonne entstandene Strahlungsenergie kann entweder durch das Plasma entweichen oder zurückgestaut werden. Doch worauf kommt es an? Wie viel Reibung und Interaktion hält das Plasma des Sterns für die Strahlung bereit? Oder anders gefragt, was ist seine Opazität?

Im Allgemeinen ist dies von der Menge der freien Elektronen in der Masse abhängig, da die Strahlung am ehesten mit Elektronen interagiert. Hierbei ist die Wahrscheinlichkeit einer Wechselwirkung zwischen der Strahlung und der Masse entscheidend. Hier hilft der Thompson-Wirkungsquerschnitt, der angibt, wie wahrscheinlich eine Wechselwirkung zwischen einem Elektron und einer Masse ist.

Die Formel dafür ist folgende:

$$\sigma Th = \frac{1}{6\pi\varepsilon_0^2} * \frac{e^4}{m^2c^4}$$

Der erste Teil der Formel ist eine Konstante und der zweite Faktor, der hier wichtige, variable Teil.

Wichtig ist nun, dass es um Elektronen (e) geht, und dass der Wechselwirkungsquerschnitt offensichtlich steigt, wenn die Masse kleiner wird, und sich erhöht, falls die Masse größer wird. Nimmt man nun das Verhältnis von der Masse von Protonen zu der von Elektronen, welches als weitgehend konstant bestimmt wurde, erhält man:

$$\frac{m_p}{m_e} = 1836$$

Somit liegt der Unterschied von einem Elektron zum Proton bei einem Faktor von 1836 im Quadrat. Weil dadurch der Effekt mit Protonen über 3 Mio. mal schwächer ist, sind sie irrelevant. Somit bleibt die Abhängigkeit darin, wie viele Elektronen im Plasma frei, also ionisiert sind.

Auf dieser Grundlage lässt sich der Kappa-Mechanismus erklären:

Die Gravitation drückt stetig in Richtung Zentralbereich. Dadurch erhitzt sich der Kern etwas. Diese Wärme sorgt dafür, dass sich mehr Elektronen abspalten und der Ionisationsgrad sich folglich steigert. Dies sorgt für eine höhere Fähigkeit des Plasmas die Strahlung des Kerns zurückzuhalten. Die im Zentralbereich freigesetzte Energie wird durch die hohe Reibung des Plasmas zurückgestaut. Sie drückt die Schale nach außen. Daraus resultiert eine Ausdehnung des Sterns. Die erhöhte Oberfläche des Sterns strahlt jedoch wieder deutlich mehr Energie ab, was wie eine natürliche Kühlung wirkt. Je kälter der Stern, desto weniger Interaktion mit der Strahlung, welche entweichen kann, bis sich der Stern daraus resultierend erneut komprimiert und sich aufheizt. Nun staut sich die freigesetzte Energie wieder im Plasma an, bis es zu einer erneuten Ausdehnung kommt. Dieser Zyklus wiederholt sich stetig. So pulsiert der Stern.[43]

Der Grund dafür, dass aus gesagten Gründen nicht alle Sterne derartig pulsieren, liegt darin, dass es nicht in jedem Stern zur Fusion von Heliumatomen kommt, also zum kontinuierlichem Heliumbrennen, und somit nicht jeder Stern zu der Hitze kommt, die es braucht, um freie Elektronen zu bilden, was wiederum, wie bereits geschrieben, für den Kappa-Mechanismus nötig ist. Die Sterne, bei denen dies der Fall ist, liegen in der Regel im Hertzsprung-Russell-Gap im Hertzsprung-Russell-Diagramm, quasi auf dem Übergang von der Hauptreihe zu den Riesen. Dieser Bereich wird „gap“ genannt, zu Deutsch „Lücke“, weil dieses Stadium ein sehr kurzes ist, da vieles verbrennt, und die Sterne dort eine hohe Energieabgabe haben, und damit seltener welche zu finden sind, die dort einzuordnen sind.

[43] https://www.youtube.com/watch?v=3XW7SxjC-K , Josef M. Gaßner

2. Henrietta Leavitt

Im Jahre 1895 arbeitete Henrietta Swan Leavitt freiwillig, ohne Bezahlung, am Observatorium der Harvard Universität daran, veränderliche Sterne anhand von Fotoplatten zu erkennen und diese zu katalogisieren.

Eigentlich strebte Leavitt eine Karriere als Konzertpianistin an. Dies konnte sie jedoch aufgrund einer Krankheit, durch welche sie taub wurde, vergessen. Sie erinnerte sich, dass sie während ihres Studiums als Nebenfach Astronomie belegt hatte und daran Gefallen gefunden hatte. Sie entschied sich dieses Interesse zu ihrem Job zu machen. *Ein wahrer Glücksfall für die Astronomie*.

Abbildung 8, Henrietta Leavitt

Zunächst arbeitete Leavitt in siebenjähriger Freiwilligenarbeit als eine der „Havard Computers“ Frauen, die am Havard College Observatorium eingestellt wurden, um Datensätze auszuwerten und mathematische Berechnungen anzustellen. Im Jahre 1902 bekam Leavitt eine Festanstellung. Für diese Zeit war die Beschäftigung von Frauen in der Astronomie, aber auch in den Naturwissenschaften allgemein, sehr ungewöhnlich. Angeblich hat der damalige Direktor *Edward Charles Pickering* seinen männlichen Mitarbeitern aufgrund der Enttäuschung über deren Arbeit gedroht, dass selbst seine Haushälterin Williamina Flemming bessere Arbeit abliefern würde. Diese Drohung machte er, fragwürdig ob auf Grundlage dieser Geschichte, tatsächlich wahr und Flemming arbeitete mit 14 weiteren Frauen als „Computer“. Die Frauen lieferten gute Arbeit und wurden, wenn überhaupt, nur sehr gering entlohnt. Dies war damit ökonomisch effizient für Pickering[44].

Die Aufgabe von Henrietta Leavitt bestand darin, Fotoplatten zu untersuchen und die Sterne auf diesen Platten anhand ihrer Helligkeit zu katalogisieren.[45]

---

[44] http://scienceblogs.de/astrodicticum-simplex/2015/05/26/henrietta-swan-leavitt-und-der-schluessel-zur-vermessung-des-universums/2/

[45] https://de.wikipedia.org/wiki/Henrietta_Swan_Leavitt

Abbildung 9, Beispiel einer Fotoplatte aus Glas, wie sie bis zur Mitte des letzten Jahrtausends noch in der Astronomie gebräuchlich war. Das Motiv ist Komet West 1976. Foto: Bernd Koch

Von diesen Fotoplatten wurden insgesamt 500 000 in Harvard aufgenommen. Ein Teil davon landete auf Leavitts Schreibtisch. Trotz der sehr schlechten Qualität dieser Fotoplatten und der Vielzahl der Himmelsausschnitte, die Leavitt zu analysieren hatte, entdeckte sie erstaunlicherweise eine Veränderung der Helligkeit bei Sternen in der kleinen Magellanschen Wolke (SMC).[46] [47]

Die Zahl der von ihr entdeckten pulsationsveränderlichen Sterne stieg immer mehr. Insgesamt werden ihr die Entdeckungen von 2400 veränderlichen Sternen zugeschrieben. In ihrer Veröffentlichung „PERIODS OF 25 VARIABLE STARS IN THE SMALL MAGELANIC CLOUD", auf Deutsch „Perioden von 25 veränderlichen Sternen in der kleinen magellanschen Wolke", untersuchte sie die Perioden dieser 25 Sterne in Bezug auf ihre Leuchtkraft. Die Periodendauer reicht von 1,2 Tagen bis hin zu 127 Tagen. Da diese 25 Sterne mit einer Helligkeit von 16,4 bis maximal 12,1 Mag sehr leuchtschwach sind, braucht es eine sehr lange Belichtungszeit, um die Fotoplatten der Sterne aufzunehmen.

In der Tabelle sind die Sterne nach aufsteigender Periode sortiert. Die erste Spalte gibt die Bezeichnung des Sterns im Harvard-Katalog an. Danach folgen das Maximum und Minimum der Magnitude innerhalb einer Periode. Ebenfalls wird der Zeitabstand in Tagen von dem Julianischem Datum 2410000 (3.4.1886) angegeben, also das jeweilige Aufnahmedatum der Daten. In der 5. Spalte wird dann die Helligkeit in Tagen angegeben:

[46] https://en.wikipedia.org/wiki/Variable_star#Discovery
[47] http://adsabs.harvard.edu/full/1907AN....175...91P

Diese 25 Sterne wurden in ein Diagramm übertragen, auf der X-Achse die Dauer der Periode in Tagen und auf der Y-Achse die Helligkeit. Sowohl für das Minimum als auch für das Maximum wurde dann eine Ausgleichskurve errechnet. Diese Kurven sind „überraschend weich und von einer bemerkenswerten Form“:

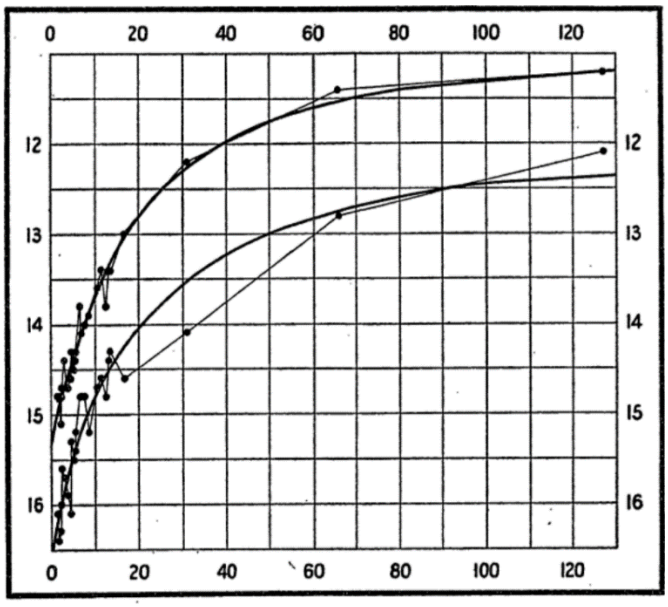


FIG. 1.

Abbildung 10, Diagramm aus Leavitts Originalarbeit, das Zusammenhang zwischen Periodendauer und Helligkeit zeigt.

Leavitt erstellte noch ein zweites Diagramm, da sie erkannte, dass es einen logarithmischen Zusammenhang gab. So wählte sie im zweiten Diagramm den Logarithmus der Periode als Einheit der X-Achse. Aus diesem Diagramm ergab sich eine deutliche Beziehung zwischen der Periode und der Helligkeit eines pulsationsveränderlichen Sterns:

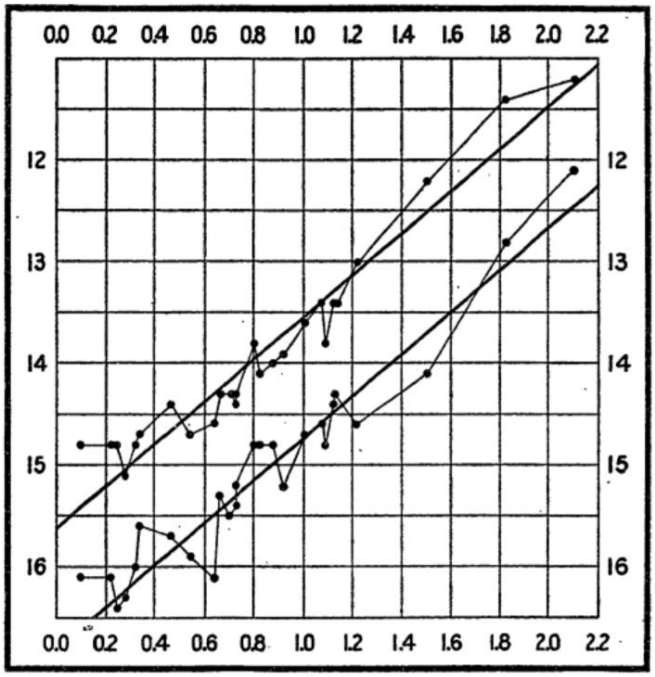


FIG. 2.

Abbildung 11, Diagramm aus Leavitts Originalarbeit, das Zusammenhang zwischen Logarithmus der Periodendauer und Helligkeit zeigt.

Um diese Beziehung eindeutig durch eine Formel zu beschreiben, wählte Leavitt den Ansatz eines konstanten Faktors, dem Logarithmus zur Basis 10 der Periode und einem absoluten Glied. Diese Werte passte sie mithilfe ihrer Beobachtungsdaten immer weiter an.

Anhand ihrer gesammelten Daten erkannte Leavitt, dass die Helligkeiten der Sterne in einem logarithmischen Zusammenhang mit der Periodendauer stehen. Daraus entwickelte sie die Formel zur Bestimmung der durchschnittlichen absoluten Helligkeit der Cepheiden für das V-Band, einen Bereich des sichtbaren Lichts (grün)[48]:

$$M_V = -2{,}78 * \log_{10}\left(\frac{P}{d}\right) - 1{,}32$$

Diese Methode wurde anhand des pulsationsveränderlichen Sterns Delta Cephei geeicht, dessen Entfernung anhand der Parallaxe bereits bestimmt war. Die Periodendauer in Tagen wird gemessen und eingesetzt, daraus folgt dann die absolute Helligkeit welche am Beispiel von Delta Cephei geeicht wurde.

Wenn die absolute Helligkeit gegeben ist, kann man anhand der scheinbaren Helligkeit, welche von der Erde aus gemessen wird, die Entfernung bestimmen. Diese Formel wird Entfernungsmodell genannt:

$$\frac{r}{10pc} = 10^{\frac{m-M}{5}}$$

Die absolute Helligkeit M beschreibt die Helligkeit eines Sterns aus einer Entfernung von *10 parsec*. Die scheinbare Helligkeit m wird in der gesuchten Entfernung r gemessen. Die Magnitudenskala ist eine logarithmische Skala.

$$m - M = 5\,mag * \log_{10}\left(\frac{r}{10pc}\right)$$

Mithilfe dieser Methodik lassen sich also die Entfernungen von pulsationsveränderlichen Sternen sehr genau bestimmen. Wichtig ist also, dass man die Dauer einer Periode kennt, die Art der Pulsation und die entsprechende Perioden-Leuchtkraft-Beziehung für den Spektralbereich, in dem die Daten gemessen werden. Aus diesen Daten muss dann die scheinbare Helligkeit entnommen werden. Über das Entfernungsmodell erhält man die Entfernung zum Objekt.[49]

Nicht alle Sterne sind pulsationsveränderlich, zu mindestens nicht so stark, dass dies von der Erde aus messbar ist. Dennoch ist diese Methode eine der bekanntesten und am weitesten verbreiteten Methoden. Die Berechnung der Entfernung beruht seit jeher auf den Entdeckungen, die Henrietta Leavitt machte. Einer Frau, die zu ihren Lebzeiten niemals rechtmäßigen Ruhm, oder auch nur einen Cent für diese großartige Entdeckung bekommen hat. Auch die Entfernung von ganzen Galaxien kann mithilfe dieser Methoden näherungsweise bestimmt werden.[50] [51]

---

[48] https://physik.cosmos-indirekt.de/Physik-Schule/Perioden-Leuchtkraft-Beziehung
[49] https://de.wikipedia.org/wiki/Perioden-Leuchtkraft-Beziehung
[50] http://scienceblogs.de/astrodicticum-simplex/2015/05/26/henrietta-swan-leavitt-und-der-schluessel-zur-vermessung-des-universums/
[51] http://articles.adsabs.harvard.edu/cgi-bin/nph-iarticle_query?1912HarCi.173....1L&data_type=PDF_HIGH&whole_paper=YES&type=PRINTER&filetype=.pdf

I. Farben-Helligkeits-Diagramm

Es gibt auch Möglichkeiten, die Entfernung mit Hilfe von Spektroskopie zu errechnen. Die Basis dazu legten zwei Forscher, die wohl das wichtigste Diagramm der Astronomie-Geschichte entwickelten.

Das HRD (Hertzsprung-Russell-Diagramm) hat erst einmal nichts mit Entfernungsbestimmung zu tun, es gibt jedoch die Möglichkeit, durch dieses Diagramm zu verschiedenen Sternen, durch ihre Spektralklasse, die wahre Magnitude zu messen. Diese Art der Entfernungsbestimmung ist jedoch nicht wirklich genau und sehr spekulativ. Viel bessere Ergebnisse erzielt man mit dem Farben-Helligkeits-Diagramm (FHD).

Das FHD ist eine leichte Abwandlung des HRD. Anstatt der absoluten Helligkeit wird auf der Y-Achse, zumindest zur Entfernungsbestimmung, die scheinbare Helligkeit angegeben (Dies ist allerdings nur bei Sternhaufen oder nahen Galaxien, bei denen die Sterne noch individuell zu sehen sind, möglich, da die Entfernung dann gleichbleibt). Statt der Spektralklasse wird auf der X-Achse der Farbindex eingetragen.[52] Man hat jetzt zum Beispiel zwei Sternhaufen, einen sonnennahen S_1, dessen Entfernung (also wahre Magnitude) man kennt, und einen weiteren (S_2), dessen Entfernung man errechnen möchte. Jetzt trägt man die Helligkeiten von S_2, eines Frequenzbandes, z.B. des visuellen Lichtes der jeweiligen Sterne in die Y-Achse ein, und dann beispielsweise die Differenz des visuellen Lichts zum blauen Licht in die X-Achse (Farbindex). Daraus folgt eine Kurve, welche wie in Abb.1 aussieht. Setzt man in das selbe Diagramm die $10pc$-Linie von S_1 ein, so kann man durch die Differenz der beiden Kurven, die sich ergibt, da die unbekannten Sterne meist weiter als 10pc Entfernung zu uns haben und damit viel dunkler sind, die Entfernung bestimmen. Wichtig ist hierbei nur, nicht die interstellare Extinktion, also den Lichtschwund durch interstellaren Sternenstaub etc., der die Messdaten verfälscht, zu vergessen. Diese muss zusätzlich herausgerechnet werden.[53] [54]

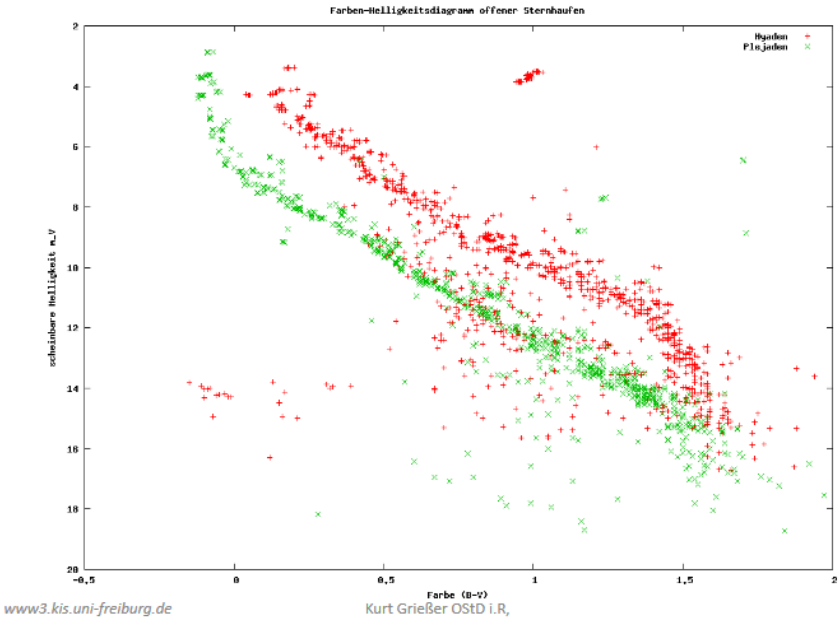


Abbildung 12, Kurt Grießer/Uni Freiburg, Scheinbare Helligkeiten der Plejaden (rot) und Hyaden (grün), aus der Differenz lässt sich die Entfernung bestimmen.

[52] https://www.youtube.com/watch?v=RDncl1u2Ujk , AstronomieTelevision, Folge 94 - Hertzsprung-Russell-Diagramm
[53] http://www.sternwarte-eberfing.de/Fuehrung/Objekbeschreibung/Entfernungsbestimmung.html#FHD
[54] https://de.wikipedia.org/wiki/Farben-Helligkeits-Diagramm#cite_note-1

J. Tully-Fisher-Beziehung (& Faber-Jackson-Beziehung)

Die 1977 veröffentlichte Tully-Fisher-Beziehung ist nach ihren Entdeckern Richard Brent Tully und Richard Fisher benannt. Sie beschreibt einen empirischen Zusammenhang zwischen der Rotationsgeschwindigkeit und der Leuchtkraft einer Spiralgalaxie.

Der bekannte Parameter ist in diesem Fall die Rotationsgeschwindigkeit, die auf die Gravitation als Zentripetalkraft schließen lässt und damit Aussagen über die Masse der Galaxie zulässt. Die Idee ist, daraus die wahre Leuchtkraft der Galaxie herleiten zu können.

Die Formel dazu ist folgende:

$$L \propto (Vmax)^{\beta}$$

Sie beschreibt die Proportionalität der Leuchtkraft L zur maximalen Rotationsgeschwindigkeit V_{max} potenziert mit einer Konstanten. Diese bewegt sich zwischen 3 und 4 und ist unter anderem abhängig von dem Spektralbereich indem beobachtet wurde, welche Frequenzen durch den Filter gelangten. Hierfür gilt:

β	Frequenzbereich[55]	λ
3,0	B-Band	400nm
3,2	I-Band	800nm
4,2	H-Band	1200nm

Für die Entfernungsbestimmung wird fast ausschließlich das I-Band genutzt, da jeder Stern in diesem Frequenzband sichtbar ist.

Die Rotationsgeschwindigkeit wird mit Hilfe des Dopplereffekts bestimmt (siehe Hubble-Konstante). Die Spiralarme der Galaxie, die sich auf uns zu bewegen, haben somit ein etwas ins Blau verschobenes Spektrum und jene auf der anderen Seite, die sich von uns wegbewegen, haben eine Rotverschiebung.[56] [57] [58]

---

[55] Mit Frequenzbändern oder Frequenzbereichen werden Abschnitte im elektromagnetischen Spektrum bezeichnet. https://de.wikipedia.org/wiki/Frequenzband#Optische_und_Infrarot-Astronomie
[56] https://en.wikipedia.org/wiki/Tully%E2%80%93Fisher_relation
[57] https://www.spektrum.de/lexikon/physik/geschwindigkeitsdispersion/5787
[58] http://www.scholarpedia.org/article/Tully-Fisher_relation

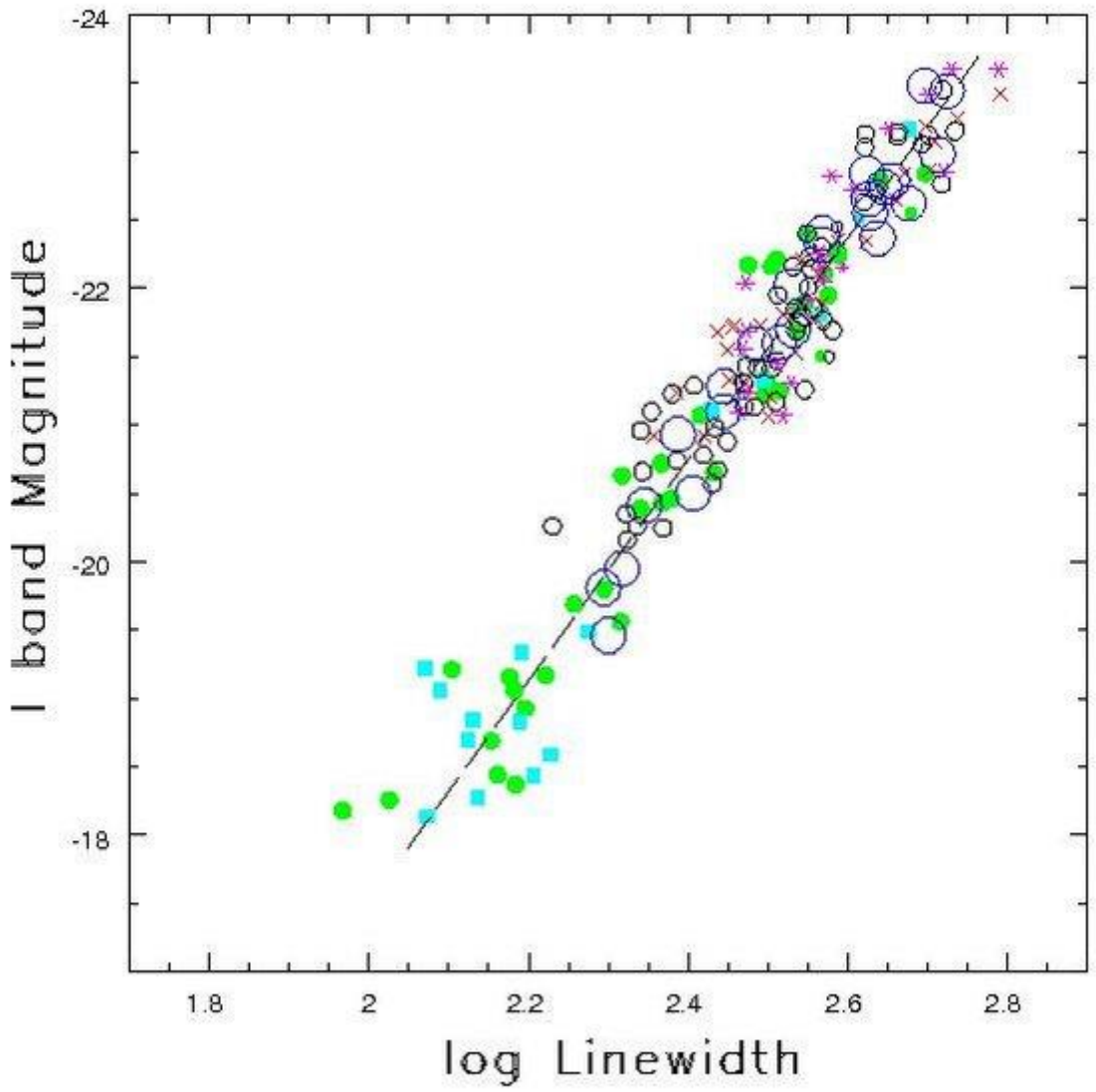


Abbildung 13, Die Tully-Fisher-Relation, auf der y-Achse die Magnitude im I-Band, auf der x-Achse der Logarithmische der Dopplerbreite der 21 cm Linie in Kilometern pro Sekunde.

Der Tully-Fisher-Beziehung sehr ähnlich ist die Faber-Jackson-Beziehung. Diese ist nach Sandra M. Faber und Robert Earl Jackson benannt, welche diese Beziehung 1976 veröffentlichten. Sie besagt, dass es einen Zusammenhang zwischen der Leuchtkraft einer Spiralgalaxie und der Geschwindigkeitsdispersion der Sterne gibt.

$$L \propto \sigma^{\gamma}$$

L ist hier wieder die Leuchtkraft und σ ist die Geschwindigkeitsdispersion. Der Exponent Γ ist wiederrum eine Konstante. Diese liegt der 4 sehr nah.[59]

[59] https://de.wikipedia.org/wiki/Faber-Jackson-Beziehung

K. Supernovae Typ 1a

Neben den δ Cephei Sternen, sind Supernovae vom Typ 1a die derzeitig beliebtesten Standardkerzen. Das liegt mitunter daran, dass eine Supernova im Maximum ihrer Energieabgabe ungefähr so hell wie eine gesamte Galaxie ist und damit bei bis zu 10Gpc Entfernung messbar ist.

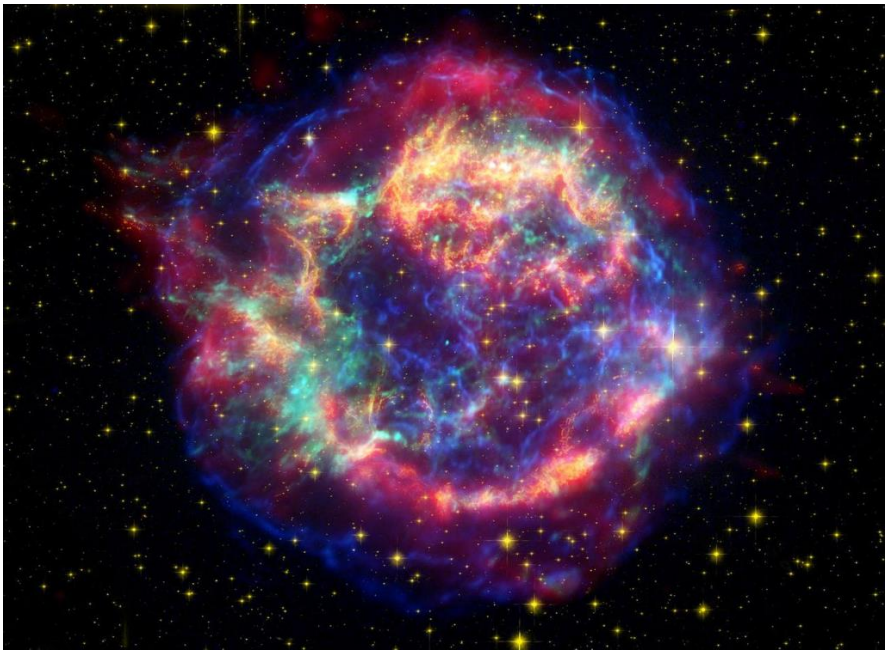


Abbildung 14, Supernova eines unbekannten Typs

Eine Supernova ist generell gefasst der Tod eines Sterns, der oberhalb einer bestimmten Massengrenze liegt. Hier unterscheidet man zwischen verschiedenen Typen. Typ II zum Beispiel entsteht bei dem Ende eines Sterns mit vielfacher Sonnenmasse, der seiner eigenen Gravitation nicht mehr genug entgegenwirken kann und in sich zusammenfällt (siehe *pulsationsveränderliche Sterne*). Dabei werden ungeheure Energien frei, die wir als Supernova beobachten. Typ Ia entsteht hingegen, wenn sich ein weißer Zwerg und ein roter Riese in einem engen Doppelsternsystem befinden, und der weiße Zwerg durch den so engen Rotationsradius neues Brennmaterial von dem roten Riesen eingefangen hat(Akkretion), also durch die eigene Gravitation aufnimmt. Der weiße Zwerg wird dadurch immer massereicher. Er erreicht schon bald die sogenannte *Chandrasekhar*-Grenze, eine obere Grenze für die Masse eines weißen Zwergs. Wird diese überschritten, ist der Stern instabil und kollabiert.[60]

Auch heute stehen noch viele Fragen über die innere Aktivität dieses Phänomens im Raum. Das Beobachtbare, die Lichtkurve, ist jedoch gut verstanden. Aus dem Verlauf der Lichtkurve lässt sich, ähnlich wie bei den veränderlichen Sternen, die absolute Helligkeit im Maximum berechnen.

Damit ist die Bedingung für eine Standardkerze gegeben.[61] [62]

---

[60] https://de.wikipedia.org/wiki/Chandrasekhar-Grenze
[61] http://www.physik.uni-regensburg.de/forschung/gebhardt/gebhardt_files/skripten/Entfernungsbest.pdf
[62] https://lp.uni-goettingen.de/get/text/7249

L. Hubble und der Ursprung des Universums

Welch große Bedeutung Entfernungsbestimmungen für die Astronomie haben, wird besonders deutlich, wenn man sich die Forschungen von Edwin Hubble anschaut.

1. Kosmologische Rotverschiebung

Um Hubble nachvollziehen zu können, muss man jedoch erst einmal kennen, woran er sich in seinen Forschungen bediente. Vielleicht haben Sie schonmal wahrgenommen, dass sich ein Krankenwagen mit Sirene, in der Zeit, in der er zu Ihnen fährt, höher anhört als beim Entfernen. Das liegt an dem sogenannten Dopplereffekt. Der Dopplereffekt besagt, dass sich die Frequenz einer Welle verändert, wenn sich die Distanz von Sender und Empfänger verändert. Wird sie kleiner, wird die Frequenz höher, und anders herum. Sender und Empfänger sind hier der Krankenwagen und Sie.

Um 1915 beobachtete Vesto Slipher genau dies, jedoch nicht bei einer Schallwelle, sondern bei Licht. Er spektroskopierte mehrere Galaxien und beobachtete bei fast allen eine Verschiebung des Spektrums ins Rötliche. Das, was mit der Welle hier passiert, ist im Prinzip das Gleiche wie im genannten Beispiel, nur der Grund ist ein anderer. Anders gesagt ist der Dopplereffekt in diesem Zusammenhang so verschwindend gering, dass er nicht wirklich zu berücksichtigen ist. Viel eher ist die Rotverschiebung und die Flucht der Galaxien überhaupt, auf die Ausdehnung der Raumzeit zurückzuführen, welche Slipher damit zum ersten Mal bewies.[63]

2. Edwin Powell Hubble und H_0

"The history of astronomy is a history of receding horizons." -Edwin Powell Hubble

Edwin Powell Hubble war ein US-amerikanischer Astronom. Er ist besonders bekannt für seine Klassifizierung der Spiralgalaxien und das Entdecken der Expansion des Universums, also dem gegenseitigen Voneinander-Wegbewegen aller Systeme im Universum. Zudem fand er die nach ihm benannte Konstante der galaktischen Kosmologie und ist Namensgeber für das berühmte Hubble-Weltraumteleskop.[64]

Abbildung 15, Edwin Hubble

1929 verglich Hubble mehrere Galaxien miteinander, deren Entfernungen er mit Hilfe der Cepheiden oder den Supernovae Typ 1a abschätzen konnte, unter Berücksichtigung der Entfernungen und der von Sipher ausgemachten jeweiligen Rotverschiebung. Dabei erkannte er, dass sich die Rotverschiebung proportional zum Abstand erhöht. Die Proportionalitätskonstante in diesem Hubble'schen Gesetz nennt man die Hubble-Konstante (H_0).

[63] https://de.wikipedia.org/wiki/Rotverschiebung
[64] https://de.wikipedia.org/wiki/Edwin_Hubble

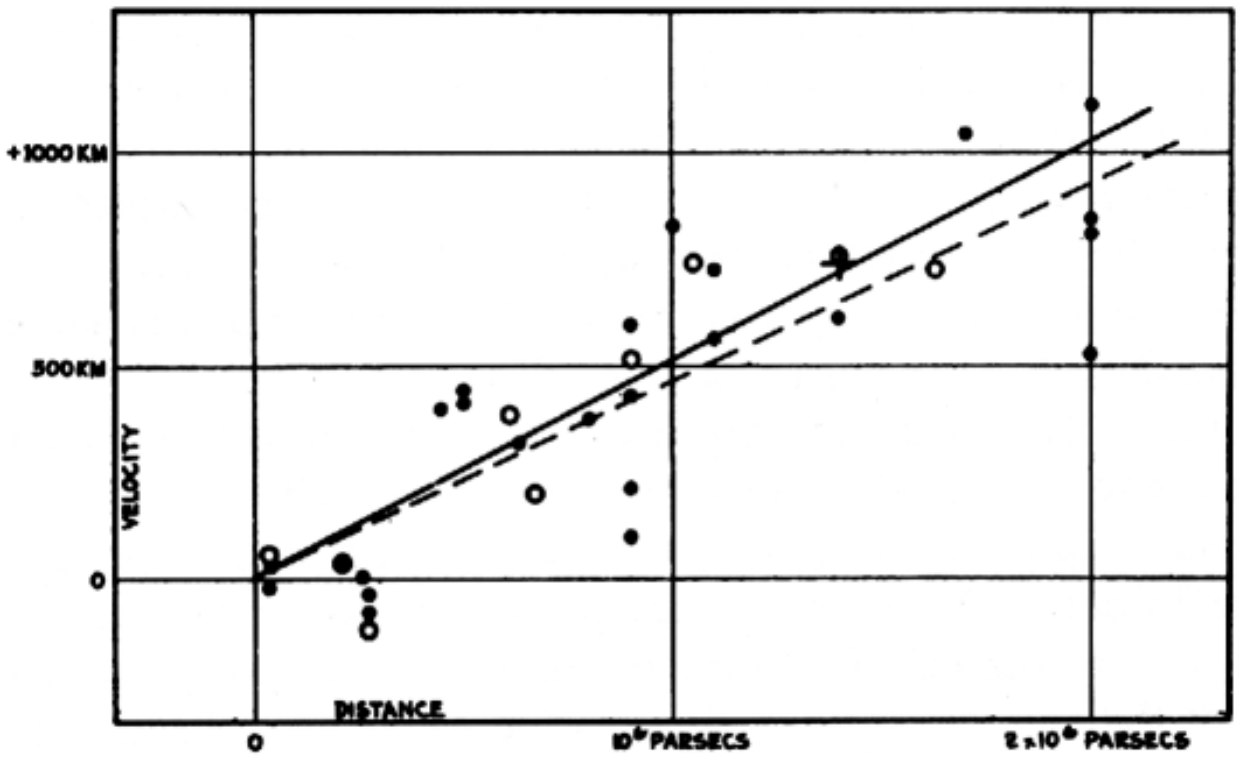


FIGURE 1

Velocity-Distance Relation among Extra-Galactic Nebulae.

Abbildung 16, Hubbles Originalarbeit, Steigung der Geraden ist H_0

Um den Wert dieser Konstante streiten sich die Wissenschaftler bis heute. Damals ließ sie sich auf einen Wert von 50-100 km/s pro Megaparsec eingrenzen, was wiederum durch technischen Fortschritt auf ca. 70-75 km/s pro Megaparsec verbessert werden konnte. Aus diesem Gesetz erhält man einen Zusammenhang der Geschwindigkeiten der Galaxien zu deren Entfernungen zu uns.[65] [66]

Eigentlich ist auch der Begriff der Hubble-*Konstanten* falsch, da diese eigentlich einen Wert zu einer bestimmten Zeit beschreibt und damit, abhängig von der Zeit, eine Variable ist. Die Zeit, von der gesprochen wird, nennt man die Hubble-Zeit. Sie liegt zum jetzigen Zeitpunkt, nach Messungen der Sonde **WMAP**, ungefähr bei 13,7 Milliarden Jahren, *dem Ursprung unseres Universums*.[67]

---

[65] http://www.sternwarte-eberfing.de/Fuehrung/Objekbeschreibung/Entfernungsbestimmung.html#Rotverschiebung
[66] https://astro.uni-bonn.de/~deboer/hubble/hubble.html
[67] https://www.spektrum.de/lexikon/astronomie/hubble-gesetz/187

II. Eigene Entfernungsbestimmung an AE UMa

1. Equipment der Schülersternwarte am Carl-Fuhlrott-Gymnasium

Unseren Datensatz von AE UMa haben wir an der schuleigenen Sternwarte auf dem Dach des Carl-Fuhlrott-Gymnasiums aufgenommen. Da es sich bei AE UMa um einen verhältnismäßig lichtschwachen Stern handelt, haben wir für die Aufnahme das Teleskop der Station 7 benutzt, weil dies die Beobachtung von lichtschwächeren Sternen erlaubt.

Das Teleskop Planewave CDK 20 befindet sich seit dem 29. September 2016 auf dem Dach des Carl-Fuhlrotts-Gymnasiums. Es ist auf der 10Micron GM4000HPS-Montierung angebracht. Dies ist eine zwei-achsige Montierung mit Absolut-Encoder. Dies ermöglicht eine sehr präzise Steuerung des Teleskops[68].

Abbildung 17, Teleskop Planewave CDK 20 der Station 7 (N 51° 13‘ 50,45‘‘ / E 07° 08‘ 29,00‘‘)

Das Planewave CDK 20-Teleskop hat eine 50,8 cm Öffnung. Die Brennweite beträgt 3454 mm, die Blende beträgt 508 mm. Das entspricht einem Öffnungsverhältnis von f/6.8. Die hohe Brennweite wird mithilfe von 2 Spiegeln innerhalb des Teleskops erreicht. Insgesamt wiegt das Teleskop 63,5 kg.

Um den Datensatz aufzunehmen, benutzten wir eine STX-16803 CCD Kamera mit 16 Megapixeln. Die Sensorgröße beträgt 36.8 mm*36.8 mm, das entspricht einer Auflösung von 4096*4096 Pixeln. Ein erheblicher Vorteil dieser Kamera ist die Kühlung des Chips. Diese erreicht eine Temperatur, die bis zu 50 Grad Celsius unter der Umgebungstemperatur liegt und minimiert das Bildrauschen drastisch (entscheidend in der Photometrie und Astrofotografie)[69].

Dank der Ethernet-Schnittstelle können sowohl die Kamera als auch das Teleskop aus der überdachten Beobachtungshütte der Sternwarte vom Computer aus bedient werden.

---

[68] https://www.baader-planetarium.com/de/blog/first-light-am-neuen-50cm-teleskop-planewave-cdk-20-des-cfg-wuppertal/

[69] http://www.sbig.de/stx.htm

Zuerst haben wir nun das Teleskop auf AE UMa ausgerichtet. Dies ist dank der Fernsteuerung am Computer sehr schnell zu bewältigen. Anschließend musste die Ausrichtung des Objektes manuell korrigiert werden und natürlich bestmöglich fokussiert werden. Dann haben wir dies Aufnahme des Datensatzes als Serienaufnahme gestartet. Die CCD-Kamera nimmt nur Schwarz-Weiß-Bilder auf. Dank des Grünfilters, mit dem der Datensatz aufgenommen wurde, wird jedoch nur der (annähernd) visuelle Wellenbereich des Lichts aufgenommen.

Nachdem die Serienaufnahme durchgelaufen ist, wurden ebenfalls Dark- und Flat-Bilder aufgenommen. Diese sind für die Bildkorrektur wichtig.

Die Dark-Bilder sind Bilder, die mit geschlossener Objektivklappe aufgenommen werden. So werden nur Informationen aufgenommen, die fälschlicherweise durch die Stromversorgung der Kamera entstehen.

Für Flat-Bilder wird gegen eine gleichmäßig beleuchtete Platte (siehe Abbildung) fotografiert, um optische Effekte wie Staub auf den Linsen oder die Vignette, also eine Verdunkelung in den Randbereichen zu erkennen und in der Nachbearbeitung zu korrigieren.

Abbildung 18, Teleskop mit aufliegender Flat-Platte

2. AE UMa

AE UMa ist ein pulsationsveränderlicher Stern im Sternbild Großer Bär (**U**rsae **Ma**joris).

Der Stern gehört zu den SX-Phoenicis-Sternen, einer Unterklasse der Delta-Scuti-Sterne. Die Pulsationseigenschaften zeichnen sich durch eine sehr kurze Periodendauer von 0,7 Stunden bis maximal 2 Stunden und dennoch einer Helligkeitsamplitude von bis zu 0,7 Magnituden aus. Ebenfalls haben SX-Phoenicis-Sterne im Vergleich zu ihrer Oberklasse, der Delta-Scuti-Sterne, eine sehr geringe Metallizität[70]. Dementsprechend ist AE UMa auch in die Spektralklasse A9 einzuordnen[71]. AE UMa befindet sich, da es sich um einen pulsierenden Stern handelt, in einer Instabilitätsphase. Das bedeutet, dass der Stern sich im Übergang von dem Heliumbrennen im Kern zum Wasserstoffbrennen in der Hülle befindet. Im Hertzsprung-Russell-Diagramm ist AE UMa somit im Bereich der sogenannten Hertzsprung-Lücke, einem Bereich oberhalb der Hauptreihe, einzuordnen, in der statistisch wenig Sterne liegen, da diese Phase verhältnismäßig schnell durchlaufen wird[72].

Aus der Spektralklasse geht weiterhin hervor, dass AE UMa ein relativ heißer Stern ist. Die Oberflächentemperatur beträgt ca. 9700-9750 Kelvin[73]. Eine weitere besondere Eigenschaft von AE UMa ist, dass der Stern 2 Perioden besitzt. Diese überlagern sich und führen zu Schwankungen in der Amplitude[74] [75] [76].

---

[70] https://de.wikipedia.org/wiki/Delta-Scuti-Stern
[71] http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/sim-basic?Ident=ae+uma&submit=SIMBAD+search
[72] https://en.wikipedia.org/wiki/Hertzsprung_gap
[73] https://de.wikipedia.org/wiki/Spektralklasse
[74] https://www.aavso.org/lcotw/ae-ursae-majoris
[75] http://adsabs.harvard.edu/full/1974IBVS..903....1S
[76] https://arxiv.org/abs/1304.3772

3. Photometrie des Sterns AE UMa und Erstellung einer Lichtkurve

Abbildung 19, AE UMa (09 36 53,155 +44 04 0,40) und TYC 2998-1249-1

3. Vorgehen

Um Faktoren wie die Lichtverschmutzung oder Dunst/Nebel nicht mit in die Lichtkurve aufzunehmen, wird die Differenz aus der Helligkeit des pulsationsveränderlichen Sterns und des Vergleichssterns gebildet, da diese Faktoren beide Sterne (gleichermaßen) beeinflussen. TYC 2998-1249-1 bietet sich an, da der Spektraltyp dem von AE UMa sehr ähnlich ist und somit ihre maximale Helligkeit beide annähernd im selben Spektralbereich ausstrahlen. Diese Information kann man aus dem Helligkeitsunterschied beider Sterne im Blauen Licht und im V-Band ableiten[77]. Mithilfe von den drei Check-Sternen wurde garantiert, dass es sich bei TYC 2998-1249-1 nicht selbst um einen Pulsationsveränderlichen handelt.

Insgesamt haben wir am 05.02.2018 von 19:15 bis 21:50 (UTC+1) über einen Zeitraum von ca. 2 ½ Stunden 328 einzelne Bilder mit einer Belichtungszeit von jeweils 20 Sekunden von AE UMa aufgenommen. Zusätzlich wurden 30 Darks, ebenfalls mit einer Belichtungszeit von 20 Sekunden, und 20 Flats mit einer Belichtungszeit von 4 Sekunden aufgenommen.

4. Kalibrierung der Aufnahmen

Aus den 30 Flats wurde ein Masterdark über den Median-Filter erstellt. Das gleiche gilt für die Flats. Auf dieses Flat wurde zusätzlich ein Auto-Dark berechnet. Nun wurde jedes Einzelbild anhand folgender Formel korrigiert:

$$\frac{Objektfoto \; - \; Masterdark}{Masterflat\ (inkl.\ Autodark)}$$

[77] http://aladin.u-strasbg.fr/AladinLite/

Damit MuniWin die Sterne für die Auswertung auf den einzelnen Bildern erkennt und wiederfindet, müssen diese erstmal ausgerichtet werden, um jeden Stern in jedem Einzelbild an derselben Stelle zu platzieren. Diese Ausrichtung erfolgt in MaxIm DL. Zur Sicherheit sollte der ursprüngliche Datensatz nicht überschrieben werden, um diese Schritte, falls ein Fehler auftrat, wiederholen zu können.

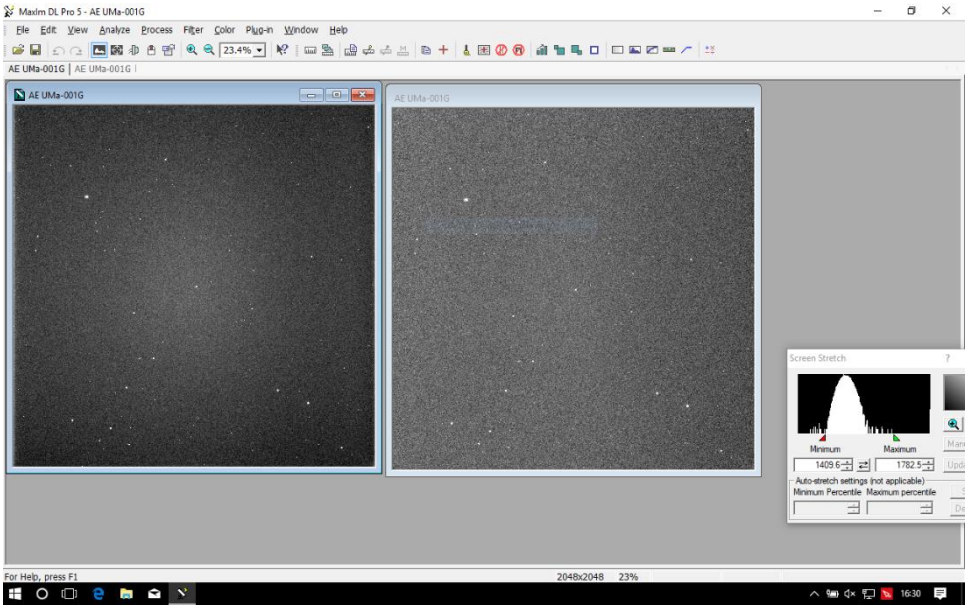


Abbildung 20, Vergleich zwischen Rohbild und bereinigtem Bild.

Die Lichtkurve wurde nun mithilfe der Software *MuniWin*[78] erstellt. Das Programm ist sehr übersichtlich und einfach zu bedienen, da man Schritt für Schritt durch die Auswertung geführt wird.

1. Zuerst wird in Muniwin ein neues Projekt angelegt. Dazu sind der Projektname und der Dateipfad des Projekts anzugeben. Ebenfalls gibt es die Möglichkeit, aus vorgefertigten Profilen zu wählen. Hier ist das Profil "Light curve" zu wählen.
2. Anschließend werden die aufgenommen FITS-Dateien in das Programm importiert und in die Arbeitsfläche geladen.
3. Damit die Daten von dem Programm ausgelesen werden können, müssen diese FITS-Dateien jedoch noch in ein Software-eigenes Format umgewandelt werden. Aus den tabellarisch aufgelisteten Frames kann die Uhrzeit und die Belichtung direkt ausgelesen werden. Um die Bilder vergleichbar zu halten, sollten alle Frames mit der gleichen Belichtungszeit aufgenommen sein.
4. Ebenfalls gibt es die Möglichkeit, die Dark- und Flat-Bilder auch direkt in MuniWin zu verrechnen. Jedoch bevorzugen wir MaxIm DL, da es viel mehr Möglichkeiten bietet.
5. Als nächstes kann nun die Photometrie-Berechnung folgen. Für diese müssen in den meisten Fällen jedoch Anpassungen vorgenommen werden. In dem Einstellungsfeld "star detection" lassen sich die Parameter "Minimum Brightness", "Sharpness limit" und der Gauß-Filter einstellen. Die anderen Parameter sind schon in der Voreinstellung optimal. Die Parameter sollten solange justiert werden, bis auf jedem Bild ca. 150 bis 200 Sterne erkannt werden.

[78] Download: c-munipack.sourceforge.net/

6. Nun müssen die Sterne noch "gematcht" werden, das heißt, das Programm muss die Sterne auf den einzelnen Bildern wiedererkennen. Dafür muss bei der Sternen-Photometrie natürlich ein stationäres Objekt gewählt werden. Dann muss ein Referenzbild ausgewählt werden, am besten eins aus dem Datensatz. Hier ist es besser, ein Bild zu wählen, auf dem auch 200 Sterne erkannt wurden, da MuniWin bei den Bildern nicht immer eine 100%ige Übereinstimmung erkennt. Letztlich sind Matching-Werte von 70-80% schon zufriedenstellend.
7. Als letzter Schritt kann nun die Lichtkurve errechnet werden. Zuerst sollten unter "Light curve options" die ersten drei Auswahlkästchen gewählt werden. Danach müssen der Objektname und die Rektaszension und Deklination, also die Himmelskoordinaten, angegeben werden. Ebenfalls ist die Sternwarte mit ihren Koordinaten einzutragen. Durch Drücken auf "Apply" wird diese Auswahl übernommen. Es erscheint ein Chart des Himmelsausschnittes. Auf diesem wird durch Klicken auf den jeweiligen Stern der pulsationsveränderliche Stern als „Variable“ markiert. Außerdem wird ein zweiter Stern, der einer ähnlichen Spektralklasse entspricht und auf dem Chart dem Pulsationsveränderlichem nahe liegt, als „Comparison“, also Vergleichsstern, markiert. Zusätzlich sollten 3 bis 4 Check-Sterne markiert werden, um sicherzugehen, dass der Vergleichsstern nicht auch ein Veränderlicher ist, da so die Differenz eine Mischung aus beider Perioden wäre. Diese Auswahl wird nun bestätigt und im nächsten Schritt muss die niedrigste Blende („aperture“) im dem Diagramm gewählt werden. Im folgendem Schritt erhält man dann die Lichtkurve von „V-C“. Diese ist die Helligkeit des Variablen, von der die Helligkeit des Vergleichssterns abgezogen wurde. Wichtig ist hier, auch den Vergleichsstern mit Hilfe der Check-Sterne im Dropdown-Menu auszuwählen. In diesen Diagrammen kommt es meist vermehrt zu Streuungen. Diese sollten aber linear, also parallel zur X-Achse sein. Ist in einem dieser 3 Diagramme ebenfalls eine Periode oder ein möglicher Periodenausschnitt zu finden, dann handelt es sich bei diesem Check-Stern höchst wahrscheinlich ebenfalls um einen Veränderlichen. Es ist ratsam, dies in der Datenbank der AAVSO (American Association of Variable Star Observers) zu überprüfen. Finden sich jedoch in allen drei Diagrammen Perioden, so muss man einen anderen Vergleichsstern wählen, da dieser ebenfalls in seiner Helligkeit veränderlich ist. Ist all dies überprüft, kann man die Daten exportieren und mit Hilfe von Microsoft Excel visualisieren.

Die Lichtkurve, die uns aus dem Datensatz mit Hilfe von MuniWin errechnet wurde, hat uns aufgrund der geringen Streuung der Punkte und einer klar erkennbaren Kurve positiv überrascht. Um nun die Daten besser visualisieren und auch auswerten zu können, wurden die Daten als Textdokument exportiert und in Microsoft Excel eingefügt. Zuerst haben wir das Julianische Datum[79] in eine Uhrzeit umgewandelt (UTC). Um nun eine Lichtkurve darstellen zu können, wird die Differenz aus der Helligkeit des Variablen (pulsationsveränderlichen) Sterns und der Helligkeit des Vergleichssterns, hier TYC 2998-1249-1, ermittelt (Spalte C). Dieses Verfahren verhindert, dass Beeinträchtigungen wie stärkerer Dunst oder *Seeing*[80] die Werte verfälschen, da beide Werte hiervon betroffen sind. Nun haben wir die Helligkeit unseres Vergleichssterns im visuellen Bereich (V-Band) als Konstante, die wir der *Aladin*-Datenbank entnommen haben, wieder addiert und erhalten die Helligkeit unseres pulsationsveränderlichen Sterns (Spalte D).

[79] Fortlaufende Zeitrechnung in Ganztagen nach ab dem 1.Januar 4713 v. Chr.
[80] Mit Seeing wird das Phänomen der Unschärfe durch Luftunruhen in der Atmosphäre bezeichnet.

	A	B	C	D
1	JDHEL	Time	V-C	V-C+11,32
2		(UTC)		
3	2458155,261721	18:16:53	-0,47867	10,841
4	2458155,262045	18:17:21	-0,46786	10,852
5	2458155,262369	18:17:49	-0,47032	10,850
6	2458155,262693	18:18:17	-0,47541	10,845
7	2458155,263006	18:18:44	-0,48947	10,831
8	2458155,263330	18:19:12	-0,4525	10,868
9	2458155,263643	18:19:39	-0,44667	10,873
10	2458155,263967	18:20:07	-0,46181	10,858
11	2458155,264291	18:20:35	-0,44219	10,878
12	2458155,264615	18:21:03	-0,43348	10,887
13	2458155,264927	18:21:30	-0,42025	10,900
14	2458155,265251	18:21:58	-0,41892	10,901
15	2458155,265575	18:22:26	-0,42694	10,893
16	2458155,265899	18:22:54	-0,42341	10,897
17	2458155,266212	18:23:21	-0,39646	10,924
18	2458155,266536	18:23:49	-0,39082	10,929
19	2458155,266860	18:24:17	-0,40242	10,918
20	2458155,267184	18:24:45	-0,41576	10,904
21	2458155,267508	18:25:13	-0,40706	10,913
22	2458155,267832	18:25:41	-0,37086	10,949
23	2458155,268145	18:26:08	-0,36877	10,951
24	2458155,268469	18:26:36	-0,36996	10,950
25	2458155,268793	18:27:04	-0,36493	10,955
26	2458155,269117	18:27:32	-0,34628	10,974
27	2458155,269430	18:27:59	-0,35255	10,967
28	2458155,269754	18:28:27	-0,33989	10,980
29	2458155,270078	18:28:55	-0,32332	10,997
30	2458155,270402	18:29:23	-0,32594	10,994
31	2458155,270714	18:29:50	-0,32537	10,995
32	2458155,271038	18:30:18	-0,33156	10,988
33	2458155,271362	18:30:46	-0,30779	11,012
34	2458155,271675	18:31:13	-0,29821	11,022
35	2458155,271999	18:31:41	-0,28816	11,032
36	2458155,272323	18:32:09	-0,30331	11,017
37	2458155,272647	18:32:37	-0,28519	11,035
38	2458155,272960	18:33:04	-0,27882	11,041

AE Uma DATA Excel | Diagramme

Abbildung 21, Datensatz in Microsoft Excel

Aus der Zeit und der Helligkeit von AE UMa wurde nun in Excel ein Punktdiagramm erstellt. Wichtig ist hierbei, dass die Skalierung der Y-Achse umgekehrt wird: Ein hoher Wert in Mag bedeutet, dass der Stern dunkel ist, und ein sehr kleiner Wert bedeutet, dass der Stern heller ist.

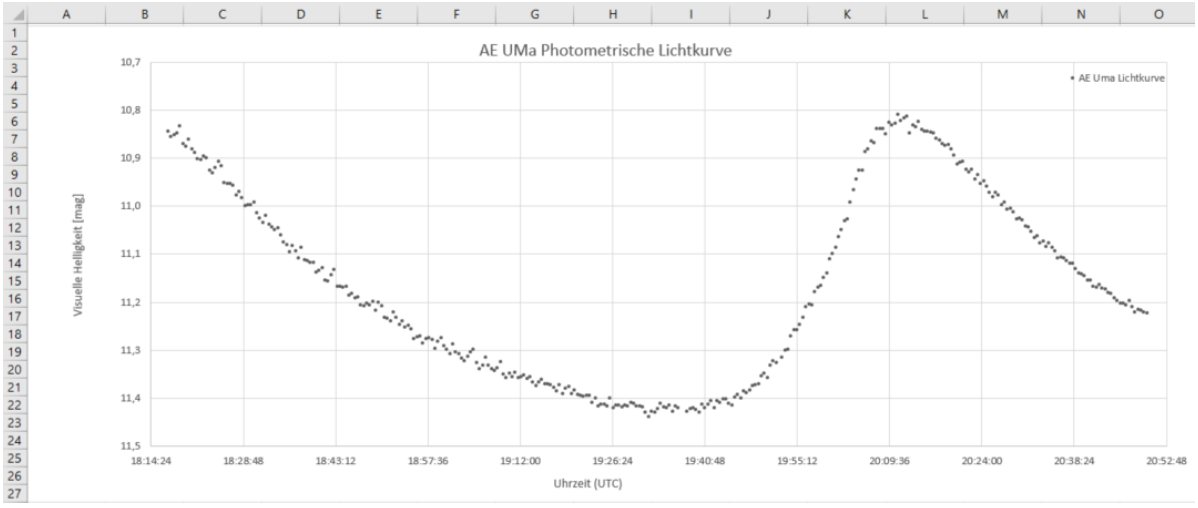


Tabelle 22, Unsere Lichtkurve nach Auswerten der Daten.

Diese Lichtkurve ist ein außerordentlich gutes Ergebnis. Man kann erkennen, dass bei einem Fehlerbereich von nur 0,2% alle Punkte auf der Kurve liegen und nur eine sehr geringe Streuung vorliegt.

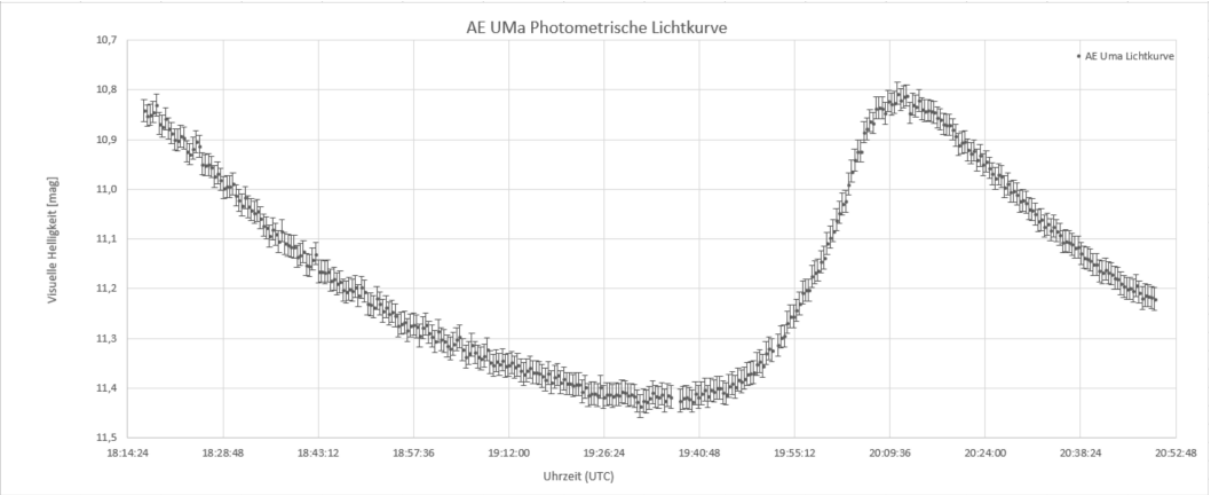


Abbildung 23, Lichtkurve mit einem Fehlerbereich von 0,2%.

5. Auswerten der Lichtkurve

Als nächstes gilt es, die Dauer der Periode, das Maximum und das Minimum der Lichtkurve zu bestimmen, um die Entfernungsbestimmung durchführen zu können.

Da es innerhalb unserer Aufnahmezeit leider nicht zu einem erneuten Maximum oder Minimum kam, zwischen denen man folglich die Dauer der Periode hätte bestimmen können, mussten wir uns einen Teil der Periode heraussuchen, der innerhalb der photometrischen Kurve doppelt vorhanden ist.

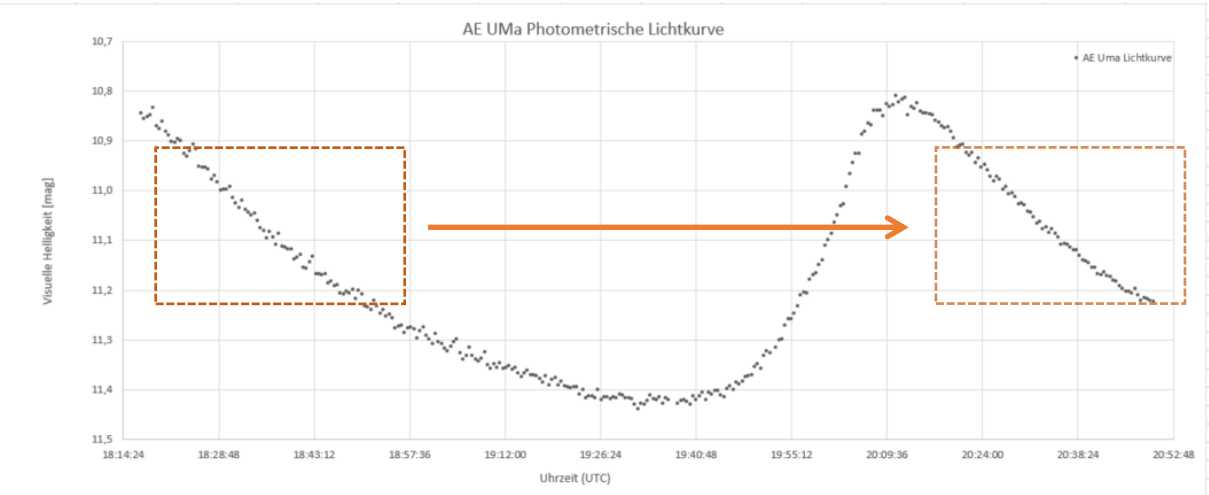


Abbildung 24, Verschiebung zur Bestimmung der Periode

Diese Werte wurden nun auf der Zeit-Achse (X-Achse) solange verschoben, bis sie möglichst deckungsgleich zu dem rechten Abschnitt der Periode sind. Auch hier war das Ergebnis, also die Ähnlichkeit beider Periodenausschnitte, welche wir übereinandergelegten, überraschend gut.

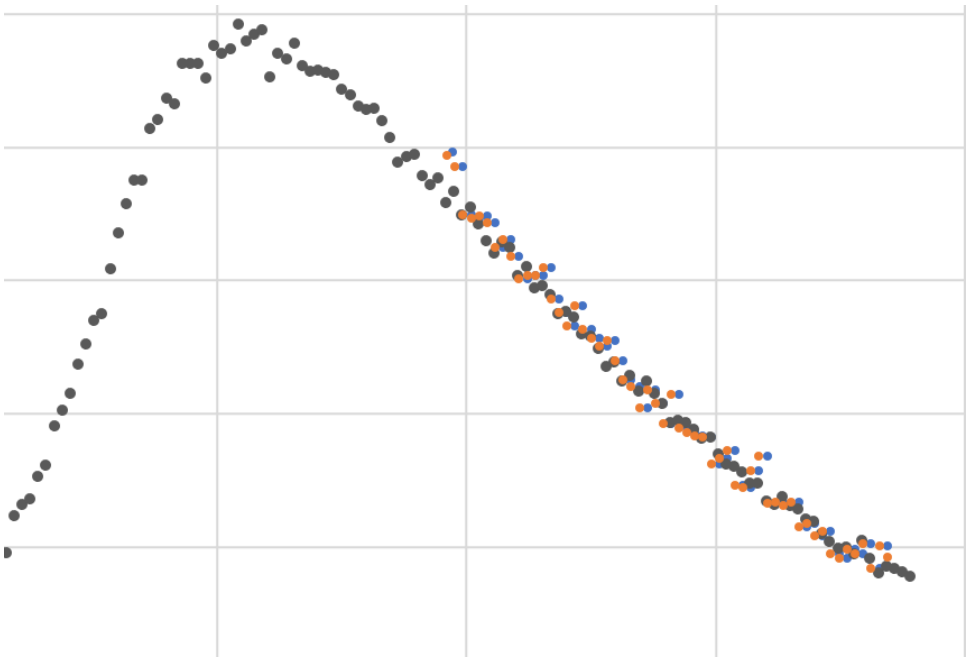


Abbildung 25, Zwischen der orangen und der blauen Datenreihe liegen 28 Sekunden, die orange ist im ersten Teil des Ausschnitts genauer, die blaue im unteren Ausschnitt.

Zwischen der orangen und der blauen Datenreihe liegen 28 Sekunden, die orange ist im ersten Teil des Ausschnitts genauer, die blaue im unteren Ausschnitt.

Aufgrund der Verzögerung von ca. 30 Sekunden zwischen den Zeitpunkten, für die bedingt durch die Belichtungszeit ein Helligkeitswert vorliegt, lässt sich diese Verschiebung nicht mit kompletter Sicherheit festlegen. Aus unserer Auswertung geht hervor, dass der Periodenabschnitt um ca. 1 Stunde und 58 Minuten verschoben werden muss, damit sich beide Abschnitte überdecken. Aufgrund der Messstreuung und des gegebenen Zeitintervalls bleibt eine Fehlergrenze von ca. 15 Sekunden, da die Werte nur in Schritten von 30s verschiebbar sind und keine hundertprozentige Deckung erfolgt.

Aus dieser Verschiebung des Ausschnitts auf der Zeit-Achse (X-Achse) geht die Periodendauer $p = 7093 \pm 15\,s$ hervor. Dies entspricht $p = 0{,}0820949074 \pm 0{,}00017361\,d$. Somit liegt der Fehlerbereich der Periode bei gerade einmal 0,2 Prozent.

Das Maximum ist aus den Tabellenwerten und dem Verlauf der Lichtkurve abzuschätzen. Wir kommen auf ein Maximum von ca. $10{,}818\,Mag$. Auch hier haben wir wieder eine gewisse Fehlergrenze, da der Verlauf der Lichtkurve, aufgrund der Streuung und des Zeitintervalls zwischen den einzelnen Messwerten nicht eindeutig ist. Dieser Fehlerbereich liegt bei $\pm 0{,}011\,Mag$.

Ebenso haben wir das Minimum der Lichtkurve bestimmt. Dies liegt bei ca. $11{,}422\,Mag$. Aufgrund der Periodenform und des lang anhaltenden Tiefs liegt für das Minimum ein Fehler von $\pm 0{,}014\,Mag$ vor.

Also halten wir fest:

$$Periode: p = \mathbf{0{,}0820949074} \pm 0{,}00017361\,d$$

$$Maximale\ Helligkeit: m_{max} = \mathbf{10{,}818} \pm 0{,}011\,Mag$$

$$Minimale\ Helligkeit: m_{min} = \mathbf{11{,}422} \pm 0{,}014\,Mag$$

6. Auswertung

Aus der Periodenleuchtkraft-Beziehung für SX-Phoenicis-Sterne lässt sich nun die tatsächliche Helligkeit, also die Helligkeit, die der Stern in $10pc$ Entfernung misst, bestimmen. Die Formel im Bereich des V-Bands für SX-Phoenix-Sterne lautet[81]:

$$M_V = -3{,}73 * \log_{10}(p) - 1{,}9$$

Diese Formel liefert einen Helligkeitswert, welcher auf $0{,}1\ Mag$ genau ist. Durch das Einsetzen der von uns gemessenen Periode erhalten wir:

$$M_V = -3{,}73 * \log_{10}(0{,}0820949074) - 1{,}9 = \mathbf{2{,}149600509}\ Mag$$

Folglich hat AE UMa aus einer Entfernung von $10pc$ eine Helligkeit im visuellen Licht von ca. $2{,}1496\ Mag$. Da wir nun die absolute Helligkeit kennen, können wir uns im nächsten Schritt das Entfernungsmodul zur Hilfe nehmen.

Licht, welches von einer Quelle ausgesandt wird, erfährt die sogenannte geometrische Verdünnung. Also nimmt die Intensität, die Strahlungsenergie pro Fläche (Strahlungsstrom), proportional zu dem Quadrat der Entfernung ab. Diese Abnahme ist auf die Oberflächenzunahme einer Kugel, welche ihren Radius verdoppelt, zurückzuführen.

Um nun die Entfernung bestimmen zu können, ermitteln wir den Strahlungsstrom für eine Entfernung von 10pc und der gesuchten Entfernung:

$$\frac{S(r_1)}{S(r_2)} = \frac{{r_2}^2}{{r_1}^2} = \frac{(10pc)^2}{{r_1}^2}$$

Nun können wir dieses Zwischenergebnis in das Entfernungsmodul einsetzen:

$$m - M = -2{,}5 * \log_{10} \frac{(10pc)^2}{{r_1}^2}$$

Jetzt können wir die Quadrate im Logarithmus umformen, sodass wir den Logarithmus-Ausdruck mit 2 multiplizieren(Potenzregel).

$$m - M = -5 * \log_{10} \frac{10pc}{r}$$

Um weiter rechnen zu können, setzen wir nun voraus, dass die Entfernung r in Parsec angegeben wird, damit sich die Einheiten rauskürzen. Nun wird der Bruch mit Hilfe des Divisionsgesetzes für den Logarithmus aufgelöst:

$$m - M = -5 * \log_{10} \frac{10pc}{r} = -5 * (\log_{10} 10 - \log_{10} r)$$

Der Logarithmus von 10 ist natürlich 1, daraus folgt:

$$m - M = -5 + 5 \log_{10} r$$

$$\Leftrightarrow \quad 10^{(m-M)} = 10^{-5} * 5r$$

[81] Der Stern CY Aquarii und die Lichtgeschwindigkeit, Werner Pfau (http://www.tls-tautenburg.de/TLS/fileadmin/institut/hist/pic/suw_2004_3_S60.pdf)

$$\Leftrightarrow \qquad r = 10^{\left(\frac{m-M+5}{5}\right)}$$

Jetzt haben wir einen Term zur Bestimmung der Entfernung r in Parsec abhängig von der scheinbaren Helligkeit m in Mag und der absoluten Helligkeit M in Mag[82]. Da es bei einem pulsationsveränderlichen Stern nicht nur eine konstante Helligkeit gibt, wird für die scheinbare Helligkeit das arithmetische Mittel aus der Helligkeit im Maximum und Minimum der Periode gebildet. Diese Methode ist jedoch nur eine Nachahmung aus einer anderen Arbeit.

Ebenfalls gibt es die Möglichkeit die scheinbare Helligkeit über folgenden Formel zu ermitteln[83]:

$$m = 2{,}5 * \log_{10} 2 - 2{,}5 * \log_{10} \left(10^{-\frac{2}{5}*m_{min}} + 10^{-\frac{2}{5}*m_{max}}\right)$$

Daraus folgt:

$$m = 2{,}5 * \log_{10} 2 - 2{,}5 * \log_{10}\left(10^{-\frac{2}{5}*10{,}818} + 10^{-\frac{2}{5}*11{,}422}\right) = 11{,}0785$$

Dieser Wert weicht nur minimal von der scheinbaren Helligkeit, die über das arithmetische Mittel berechnet wurde, ab, ist aber, da es im Exponent der Basis 10 steht, doch bedeutsam.

Nun können wir die Entfernung anhand unserer Ergebnisse berechnen:

$$r = 10^{\left(\frac{\frac{11{,}422+10{,}818}{2}-2{,}149600509+5}{5}\right)} = \mathbf{622{,}4}\ pc$$

Oder: $$r = 10^{\left(\frac{11{,}0785-2{,}149600509+5}{5}\right)} = \mathbf{610{,}6\ pc}$$

Man sieht, dass sich beide Ergebnisse im Verhältnis gesehen nur gering unterscheiden.

Dieses Ergebnis können wir nun anhand der Parallaxe, welche in der Simbad-Datenbank angegeben ist, überprüfen. Dort wird eine Parallaxe von 1,27 Millibogensekunden angegeben[84]. Mithilfe der Parallaxenformel können wir nun die Entfernung berechnen:

$$r_{Para} = \frac{1}{\tan\left(\frac{1{,}27}{3600 * 1000}\right)} = 162413233{,}3\ AE$$

Um die beiden Werte vergleichen zu können, rechnen wir die Entfernung, welche aufgrund der Parallaxe bestimmt wurden, nun in Parsec um:

$$1pc = 206\,264{,}608\ AE$$

$$\frac{162413233{,}3}{206264{,}608} = \mathbf{787{,}4}\ pc$$ [85]

Man sieht, dass diese Werte doch relativ nahe aneinander liegen. Trotzdem bleibt ein Fehler von ca. 21%. Eine größere Übereinstimmung lässt sich jedoch erzielen, in dem für die scheinbare Helligkeit nur die photometrische Helligkeit im Minimum eingesetzt wird.

Da wir mit diesem Wert noch nicht ganz zufrieden waren und uns sicher waren, dass wir die Entfernung genauer bestimmen konnten, haben wir weiter recherchiert und sind auf eine Veröffentlichung der

[82] RedScienceFrog, https://www.youtube.com/watch?v=QX5mAVDYwzk
[83] https://www.haus-der-astronomie.de/3440685/04Engelmann.pdf
[84] http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/sim-basic?Ident=ae+uma&submit=SIMBAD+search
[85] http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/sim-basic?Ident=ae+uma&submit=SIMBAD+search

Astronomical Society of the Pacific gestoßen. In dieser Arbeit wurde die Veränderung der Perioden behandelt. Diese werden über die Zeit kontinuierlich kürzer. Ebenfalls wird jedoch angemerkt, dass es sich bei AE UMa aufgrund der vergleichsweise hohen Metallizität nicht um einen metallarmen Stern handelt (-0,1 bis -0,4 [Fe/H])[86].

Dieser Wert widerspricht der Definition der SX-Phoenicis-Sterne, da diese eine niedrige Metallizität aufweisen müssen[87]. Aufgrund dieser Tatsache und der abnehmenden Periode schlägt die Publikation eine Einordnung des Sterns AE UMa in die Gruppe der Population I Zwerg-Cepheiden (Delta Scuti-Sterne) vor. Diese irrtümliche Einordnung als SX-Phoenicis-Stern wird durch die Eigenschaften der Lichtkurve erklärt[88].

Mithilfe der Perioden-Leuchtkraft-Beziehung für Delta-Scuti-Sterne errechnen wir nun erneut die absolute Helligkeit und setzen diese ins Entfernungsmodul ein:

$$M_V = -3{,}725 * \log_{10}(0{,}0820949074) - 1{,}969 = 2.07517209\ Mag$$

$$r = 10^{\left(\frac{\frac{11{,}422+10{,}818}{2} - 2{,}07517209 + 5}{5}\right)} = 644{,}11\text{pc}$$

Dieser Wert ist schon näher an der tatsächlichen Entfernung. Eine weitere Möglichkeit, eine größere Übereinstimmung zu erreichen, entsteht, wenn wir nicht das arithmetische Mittel des Minimums und Maximums bilden, sondern nur die Helligkeit des Minimums einsetzen. Somit erhalten wir:

$$r = 10^{\left(\frac{11{,}422 - 2{,}07517209 + 5}{5}\right)} = 740{,}2863pc$$

Dieser Wert ist schon sehr nahe am dem Wert, der auf der Parallaxenmessung des GAIA-Satteliten beruht. Die Abweichung beträgt hier gerade einmal ca. 5%, welche der Ungenauigkeit der Perioden-Leucht-Kraft-Beziehung für Delta-Scuti-Sterne zugrunde liegen kann[89]. Dieses Ergebnis ist überaus zufriedenstellend, nur fehlt die wissenschaftliche Legitimation, dass das Minimum der Lichtkurve der Wert der scheinbaren Helligkeit ist.

Die größte Übereinstimmung erhalten wir jedoch, wenn wir uns der Formel zur Bestimmung der tatsächlichen Helligkeit von Population I-Cepheiden bedienen:

$$M_V = -2{,}78 * \log_{10}(0{,}0820949074) - 1{,}32 = 1{,}698200916\ Mag$$

$$r = 10^{\left(\frac{\frac{11{,}422+10{,}818}{2} - 1{,}698200916 + 5}{5}\right)} = 766{,}23\text{pc}$$

Methode	**Absolute Helligkeit**	**Entfernung**
Trigonometrische Parallaxe		787,4 pc
Perioden-Leuchtkraft SX Phoenix	2,15 Mag	622,4 pc
Perioden-Leuchtkraft SX Phoenix, scheinbare Helligkeit über log-Funktion	2,15 Mag	610,6 pc
Perioden-Leuchtkraft Delta Scuti	2,08 Mag	644,1 pc
Nur Minimum in Entfernungsmodul	2,08 Mag	740,3 pc
Perioden-Leuchtkraft Cepheiden (Population 1)	1,70 Mag	766,23 pc

[86] https://de.wikipedia.org/wiki/Metallizität
[87] https://en.wikipedia.org/wiki/SX_Phoenicis_variable
[88] http://adsbit.harvard.edu//full/1997PASP..109.1073H/0001073.000.html
[89] https://de.wikipedia.org/wiki/Perioden-Leuchtkraft-Beziehung#Delta-Scuti-Sterne

7. Diskussion

Trotz der zufriedenstellenden Ergebnisse gibt es weitere potenzielle Möglichkeiten, diese und weitere Messungen besser und genauer durchzuführen.

Zuerst einmal ist es gerade bei multi-periodischen pulsationsveränderlichen Sternen hilfreich, wenn man den Stern über mehrere Nächte aufnimmt, um die Effekte der verschiedenen Perioden untersuchen zu können. Ebenfalls lässt sich durch die Vielzahl an Datenpunkten ein noch genauerer Wert für die Dauer der Periode, die Werte des Maximums und des Minimums bestimmen.

Zusätzlich sollte man bei den Quellen der jeweiligen Perioden-Leuchtkraft-Beziehung auch nach Hinweisen suchen, wie der Wert der scheinbaren Helligkeit zu bestimmen ist, und wie der Wert der absoluten Helligkeit zu deuten ist.

Ein weiterer Faktor, der zu einer Messungenauigkeit führt, ist der uns zur Verfügung stehende Grünfilter des Baader-Planetariums. Dessen Durchlasskurve deckt sich nicht genau mit der Durchlasskurve, durch die das V-Band definiert ist. Ein besser kalibrierter Filtersatz liegt im Bereich von ca. 200€.

Des Weiteren ist nicht klar, in wie fern die Extinktion, also die Abschwächung des Lichtes durch interstellare Materie (Staub, Gas) unsere Ergebnisse verfälscht.

Ebenfalls ist es förderlich, zusätzlich zu dem fotografischen Datensatz den Stern auch spektroskopisch zu betrachten, da man daraus auf weitere Information schließen kann, die wir in diesem Fall nur aus externen Quellen beziehen konnten.

Trotz alledem können wir mit unserem Ergebnis zufrieden sein, besonders, da es die erste Schülerforschungsarbeit in diesem Gebiet der Astronomie an der Sternwarte des Carl-Fuhlrott-Gymnasiums war.

M. Schlusswort

In erster Linie wollen wir uns bei Herrn Bernd Koch bedanken, ohne den wir nicht einmal auf das Thema gekommen wären und der uns zu jeder Zeit gute Ratschläge geben konnte und mit dessen Hilfe diese Projektarbeit Gestalt angenommen hat. Ein großes Dankeschön richtet sich auch an die Schule, besonders Herrn Winkhaus, der so etwas Geniales wie die Sternwarte mit viel Einsatz und Leidenschaft an unserer Schule überhaupt möglich gemacht hat. Diese Schülersternwarte, betreut von Herrn Koch, bietet Schülern die Möglichkeit sich weit über den Rahmen des normalen Unterrichts mit wissenschaftlichem Arbeiten und der Astronomie auseinander zu setzen, Interesse zu entwickeln und zu fördern.

N. Unser Fazit

Für uns war diese Arbeit in vielerlei Hinsicht wichtig. Wir konnten nicht nur eine Basis aus Wissen über diverse Entfernungsbestimmungen für uns schaffen, sondern haben auch mit der Eigenleistung das Gefühl eine Forschung vollbracht zu haben und im weiten Sinne die Astronomie ein Stück weitergebracht. Um dies zu verdeutlichen, haben wir zudem versucht einen Wikipedia-Artikel zum Thema AE UMa zu erstellen, was uns sehr gut gelungen ist.

O. Eigenständigkeitserklärung

Hiermit versichern wir, dass diese Projektarbeit nur von uns, Henri Wagner und Hendrik Tackenberg, mithilfe der angegebenen Text- und Bildquellen erstellt wurde. Ebenfalls sind direkte Zitate als solche gekennzeichnet.

Wir sind damit einverstanden, dass die Projektarbeit in der Schulbibliothek und für die Teilnehmer des Projektkurses Astronomie veröffentlicht wird, behalten uns aber die Rechte an der Arbeit und den eigenen Grafiken/Bildern vor.

Henri Wagner, 30.05.18 Hendrik Tackenberg, 30.05.18

P. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: *https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Platinum-Iridium_meter_bar.jpg als gemeinfreigekennzeichnet*

Abbildung 2: *https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Eratosthene.01.png als gemeinfrei gekennzeichnet*

Abbildung 3: *https://de.wikipedia.org/wiki/Lunar_Laser_Ranging#/media/File:Apollo_11_Lunar_Laser_Ranging_Experiment.jpg*

Abbildung 4: *Originalauszug der Arbeit von RØMER zur ersten Messung der Lichtgeschwindigkeit*

Abbildung 5: *Aus dem Buch "A Century of Excellence in Measurements, Standards, and Technology" von David R. Lide mit Original Fußzeile*

Abbildung 6: *https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bessel,_Friedrich_Wilhelm_1839.jpg als Gemeinfrei gekennzeichnet*

Abbildung 7: Bernd Koch, bernd.koch@astrofoto.de

Abbildung 8: Unknown (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Leavitt_aavso.jpg), „Leavitt aavso“, als gemeinfrei gekennzeichnet, Details auf Wikimedia Commons: https://commons.wikimedia.org/wiki/Template:PD-US

Abbildung 9: Bernd Koch, bernd.koch@astrofoto.de

Abbildung 10: Originalarbeit Henrietta Swan Leavitt http://articles.adsabs.harvard.edu/cgi-bin/nph-iarticle_query?1912HarCi.173....1L&data_type=PDF_HIGH&whole_paper=YES&type=PRINTER&filetype=.pdf

Abbildung 11: Originalarbeit Henrietta Swan Leavitt http://articles.adsabs.harvard.edu/cgi-bin/nph-iarticle_query?1912HarCi.173....1L&data_type=PDF_HIGH&whole_paper=YES&type=PRINTER&filetype=.pdf

Abbildung 12: Bild: Von Kurt Grießer/ Uni Freiburg, Scheinbare Helligkeiten der Plejaden (rot) und Hyaden (grün), aus der Differenz lässt sich die Entfernung bestimmen Quelle: http://www.astronomie-rw.de/inhalt/vortraege/Hertzsprung-Russell_20150613_KGriesser.pdf

Abbildung 13: http://www.scholarpedia.org/article/Tully-Fisher_relation

Abbildung 14: https://images-assets.nasa.gov/image/PIA03519/PIA03519~orig.jpg

Abbildung 15: *https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A4%D0%B0%D0%B9%D0%BB:Edwin-hubble.jpg gemeinfrei*

Abbildung 16: http://adsbit.harvard.edu//full/1931ApJ....74...43H/0000077.000.html

Abbildung 17: Hendrik Tackenberg

Abbildung 18: Hendrik Tackenberg

Abbildung 19: Aufnahme aus Datensatz, bearbeitet; Henri Wagner, Hendrik Tackenberg

Abbildung 20: Screenshot MaxIm DL; Henri Wagner, Hendrik Tackenberg

Abbildung 21: Screenshot Microsoft Excel; Henri Wagner, Hendrik Tackenberg

Abbildung 22: Screenshot Microsoft Excel; Henri Wagner, Hendrik Tackenberg

Abbildung 23: Screenshot Microsoft Excel; Henri Wagner, Hendrik Tackenberg

Abbildung 24: Screenshot Microsoft Excel; Henri Wagner, Hendrik Tackenberg

Abbildung 25: Screenshot Microsoft Excel; Henri Wagner, Hendrik Tackenberg

Figure 1: Henri Wagner, Hendrik Tackenberg; eigene Grafik

Figure 2: Henri Wagner, Hendrik Tackenberg; eigene Grafik

Figure 3: Henri Wagner, Hendrik Tackenberg; eigene Grafik

Figure 4: Henri Wagner, Hendrik Tackenberg; eigene Grafik

Figure 5: Henri Wagner, Hendrik Tackenberg; eigene Grafik

Figure 6: Henri Wagner, Hendrik Tackenberg; eigene Grafik

Figure 7: Henri Wagner, Hendrik Tackenberg; eigene Grafik

Figure 8: Henri Wagner, Hendrik Tackenberg; eigene Grafik

Figure 9: User:Sch (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:HR-sparse-de.svg), „HR-sparse-de“, blauer und roter Pfeil eingefügt von Henri W)

Zusätzliche Links:

Excel Datensatz: https://1drv.ms/x/s!Ao2ZCCM12rBeiFqPqqDqThBH5uJH

Wikipedia Artikel AE UMa: https://de.wikipedia.org/wiki/AE_Ursae_Majoris

“

Selbst ein Narr weiß, daß man Sterne nicht berühren kann. Dennoch hält es einen weisen Mann nicht davon ab, es zu versuchen!

”

-Harry Anderson (1906-1996)