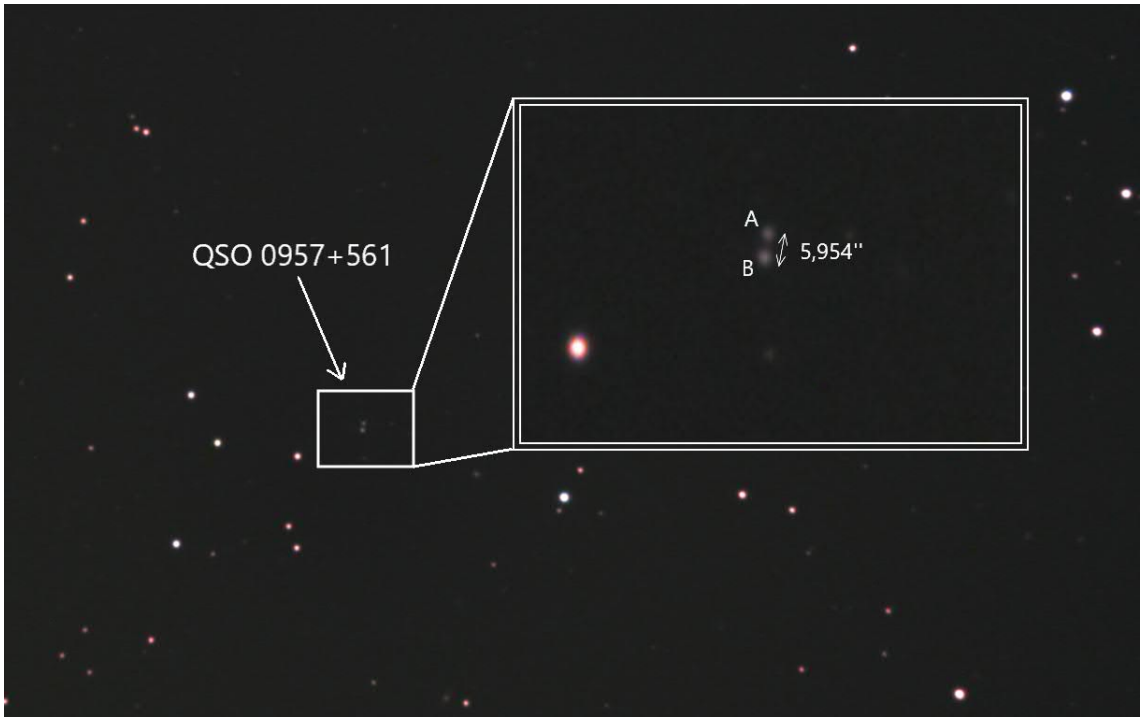
Licht auf Krummen Wegen - Der Doppelquasar QSO 0957+561 im Sternbild Ursa Major

Aufnahme, Aufarbeitung und Auswertung von QSO 0957+561



Noah Fischer

Projektarbeit im Rahmen des Projektkurses Astronomie 2021/22

Kursleitung: Dipl.-Phys. Bernd Koch

Jahrgangstufe Q1

18-05-2022

Carl-Fuhlrott Gymnasium

Wuppertal

Einleitung

Motivation

Bereits als kleines Kind zeigte ich Interesse an Naturwissenschaften. Insbesondere auch die Astronomie hatte es mir angetan und für eine lange Zeit bestand bei mir der Wunsch, ein Astronaut zu werden. Mich faszinierten die scheinbar endlosen Weiten des Universums und ich wollte unbedingt verstehen, was sich dort draußen befindet. Das Besuchen des FIT-in-Astro Kurses in der 8. Klasse steigerte erneut mein Interesse und mir war klar, dass ich auch in der Q1 den Astronomie-Projektkurs wählen werde. Besonders das Anfertigen einer wissenschaftlichen Arbeit begeisterte mich, da dies eine gute Vorbereitung auf das von mir angestrebte Physik-Studium darstellt.

Zielsetzung

Als Forschungsobjekt für meine Projektarbeit habe ich mir den Zwillingsquasar QSO 0957+561 ausgesucht. Er liegt ca. 9 Milliarden Lichtjahre entfernt im Sternbild Ursa Major. Zielsetzung der Arbeit war die Aufnahme und die Aufarbeitung des Quasars, sowie eine Massenabschätzung der als Gravitationslinse fungierenden Galaxie YGKOW G1. Diese liegt zwischen dem Quasar und der Erde in einer Entfernung von ca. 4 Milliarden Lichtjahren.

Inhaltsverzeichnis

1 Sternentwicklung **4**
1.1 Von der Gaswolke bis zum Protostern 4
1.2 Hauptreihenstadium - Stellare Kernfusion 5
1.3 Entwicklung im (Nach-) Hauptreihenstadium 6
1.4 Sternkollaps - Entstehung eines Schwarzen Lochs 8

2 Das Wesen der Schwarzen Löcher **9**
2.1 Klassifizierung von Schwarzen Löchern 9
2.2 Die allgemeine Relativitätstheorie 10
2.2.1 Schwarzschild-Metrik 10
2.2.2 Kerr-Metrik 11

3 Was ist ein Quasar? **12**
3.1 Entdeckung und Entstehung 12
3.2 Identifizierung 13

4 Der Gravitationslinseneffekt **14**
4.1 Einstein-Ring 14

5 Aufnahme und Aufarbeitung von QSO 0957+561 **15**
5.1 Technisches Equipment 15
5.1.1 Teleskop 15
5.1.2 Kamera und Filterrad 16
5.2 Beobachtungsprotokoll 17
5.3 Bildbearbeitung 18
5.3.1 Luminanz-Summenbild 19
5.3.2 LRGB-Summenbild 20

6 Auswertungen **27**
6.1 Abstandsbestimmung der gelinsten Abbildungen 28
6.1.1 Berechnung des Ablenkungswinkels (Θ) 31
6.2 Bestimmung des Abstands zwischen Abbildung B des Quasars und YGKOW G1 32
6.2.1 Berechnung des Versetzungswinkels zwischen YGKOW G1 und QSO 0957+561 (β) 34
6.3 Massenberechnung von YGKOW G1 bei Annahme eines Einstein-Rings 35
6.4 Massenberechnung unter Annahme einer asymmetrischen Anordnung 40

Abbildungsverzeichnis **42**

Literaturverzeichnis **44**

1 Sternentwicklung

1.1 Von der Gaswolke bis zum Protostern

Um in einem späteren Schritt die Entstehung und die Natur eines Schwarzen Loches zu erläutern, muss zunächst die Entstehung und die Entwicklung eines Sterns geklärt werden. Bei Sternentstehungsgebieten handelt es sich um große, dichte und kalte Gaswolken, welche zu großen Teilen aus molekularem Wasserstoff bestehen. Diese werden auch als Dunkelwolken bezeichnet, da sie die hinter ihnen liegenden Sterne verdecken oder abdunkeln. Durch die Eigengravitation der Wasserstoffmoleküle kollabiert die Wolke. Dies tritt ein, wenn die thermische Energie, also die temperaturbedingte Eigenbewegung der Wasserstoffmoleküle, der Gravitation nicht mehr entgegenwirken kann, also wenn kein hydrostatisches Gleichgewicht hergestellt werden kann. Als Folge entsteht ein prästellarer Kern, welcher nun beginnt, die sich in seiner Umgebung befindende Materie anzuziehen. Durch diesen Vorgang, der auch als Akkretion bezeichnet wird, gewinnt der Kern an Masse und beginnt zu leuchten. Gleichzeitig erhöht sich durch zunehmende Dichte die Temperatur des Kerns. Die weiterschreitende Aufheizung führt schließlich zu der Erzeugung des hydrostatischen Gleichgewichts, welches die erste Phase des Kollaps verlangsamt und schließlich anhält. Wird eine bestimmte Kerntemperatur erreicht, werden die H-Moleküle in ihre einzelnen Atome gespalten. Die dabei entstehende Energie führt zu einem zweiten Kollaps, welcher andauert, bis erneut ein hydrostatisches Gleichgewicht ausgebildet wird. Der mittlerweile entstandene Protostern nimmt weiterhin an Masse zu und erhitzt sich weiter, bis in seinem Inneren die Wasserstofffusion einsetzt. Die Temperatur im Kern des Protosterns beträgt zu diesem Zeitpunkt ca. $10^7 K$. Durch die Rotationsbewegung des Protosterns bildet die weiter auf den Stern fallende Materie eine sogenannte Akkretionsscheibe.

Abb. 1: Sternentstehungsgebiet Lupus 3, C: ESO/F. Comeron

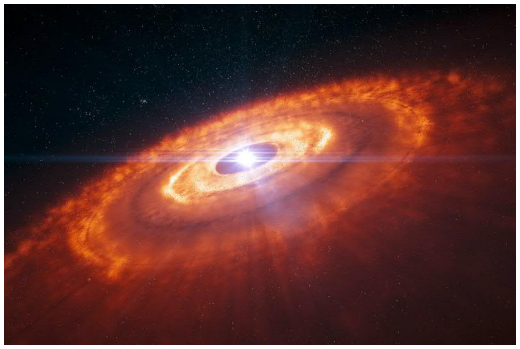


Abb. 2: Darstellung einer Akkretionsscheibe C: ESO/L. Calçada

1.2 Hauptreihenstadium - Stellare Kernfusion

Nachdem die Kernfusion innerhalb des Protosterns gezündet hat, gilt dieser als Stern und befindet sich im sogenannten Hauptreihenstadium. Während dieses Stadiums, welches ca. 90% der Lebenszeit des Sterns ausmacht, befindet sich der Stern in einer stabilen Phase des Wasserstoffbrennens. Der Stern kann seine Leuchtkraft ausschließlich durch die in ihm ablaufende Kernfusion aufrechterhalten. Der durch die Kernfusion entstehende, nach außen gerichtete Strahlungsdruck wirkt außerdem der Gravitation entgegen und bildet so erneut ein hydrostatisches Gleichgewicht. Bei dem beim Eintritt in das Hauptreihenstadium beginnenden Wasserstoffbrennen wird im Inneren des Sterns Wasserstoff in Helium umgewandelt. Die Fusion kann funktionieren, da die Atome aufgrund der hohen Temperatur vollkommen ionisiert sind und die elektrostatische Abstoßung überwunden werden kann. Die Reaktion, welche für ca. 83% der Wasserstoff in Helium-Umwandlung verantwortlich ist, ist die sogenannte Proton-Proton-Reaktion. Diese läuft wie folgt ab: Zwei Wasserstoffkerne, welche jeweils ausschließlich aus einem positiv geladenen Proton bestehen, stoßen zusammen und erzeugen so einen Deuteriumkern, welcher aus einem Proton und einem Neutron besteht. Das neutral geladene Neutron entsteht durch die Abgabe eines Positrons durch eines der Protonen. In einem weiteren Schritt fusioniert der Deuteriumkern mit einem weiteren positiv geladenen Wasserstoffkern zu dem Heliumisotop ^{3}He, welches aus zwei Protonen und einem Neutron besteht. Das nun entstandene ^{3}He-Isotop reagiert mit einem zweiten ^{3}He-Isotop, unter der Abgabe von zwei Protonen, zu Helium ^{4}He, welches aus zwei Protonen und zwei Neutronen besteht. Da das entstandene Helium-Atom eine um ca. $0,7\%$ geringere Masse als die vier für die Reaktion benötigten Wasserstoffteilchen hat, entsteht aus dem Massenunterschied gemäß der von Albert Einstein aufgestellten Formel $E = mc^2$, eine Freisetzung der Differenz als Energie. Abgesehen von der Fusion der zwei ^{3}He-Isotope zu einem Helium-Atom wird ebenfalls bei jedem Reaktionsschritt Energie freigesetzt. Insgesamt wird bei der Proton-Proton-Reaktion Energie von ca. $26MeV$[1]erzeugt, was umgerechnet ca. $4,2 \cdot 10^{-12}$ Joule entspricht. Da die Wahrscheinlichkeit, dass zwei Protonen innerhalb eines Sterns aufeinandertreffen, äußerst gering ist, dauert die gesamte Proton-Proton-Reaktion über $1,4 \cdot 10^{10}$ Jahre. Doch befindet sich im Kern eines Sterns eine derart hohe Anzahl an Protonen, dass in jeder Sekunde unzählige dieser Zusammenstöße ablaufen. Neben der hier dargestellten Proton-Proton-I-Reaktion gibt noch zwei weitere Reaktionen, bei denen ^{4}He erzeugt werden. Dabei handelt es sich um die Proton-Proton-II-Reaktion und um die Proton-Proton-III-Reaktion. Da für diese Reaktionen jedoch höhere Temperaturen benötigt werden, treten diese Reaktionen seltener auf.

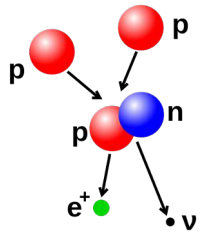


Abb. 3: Schritt 1

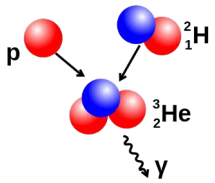


Abb. 4: Schritt 2

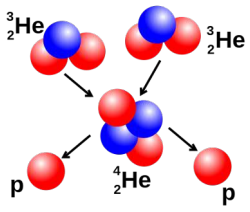


Abb. 5: Schritt 3

[1]Maßeinheit für Energie: $Megaelektronenvolt = 10^6 Elektronenvolt; 1eV \approx 1,6 \cdot 10^{-19} Joule$

1.3 Entwicklung im (Nach-) Hauptreihenstadium

Nachdem der Wasserstoffvorrat des Hauptreihensterns weitgehend aufgebraucht wurde, verlässt dieser die Hauptreihe des Hertzsprung-Russel-Diagramms. Die weitere Entwicklung des Sterns hängt stark von der Masse des Sterns ab. Das Hertzsprung-Russel-Diagramm dient dazu, die Verteilung der Sterne über ihre verschiedenen Entwicklungsstadien darzustellen.

Massearme Sterne zwischen 0,08 $M_\odot$ und 0,4 $M_\odot$

Sterne mit einer Masse von 0,08 bis 0,4 Sonnenmassen werden als Rote Zwerge bezeichnet. Ihre geringe Masse führt dazu, dass sie, verglichen mit anderen Hauptreihensternen, eine niedrigere Kerntemperatur aufweisen. Aufgrund dessen sind in Roten Zwergen nur Reaktionen des Proton-Proton-Zyklus möglich. Sie erreichen demnach, anders als andere Sterne der Hauptreihe, nie das Stadium des Heliumbrennens. Rote Zwerge unterscheiden sich außerdem dadurch, dass das in ihnen erzeugte Helium nicht im Zentrum des Sterns zirkuliert, sondern an die Oberfläche befördert wird. Gleichzeitig dringt kälteres und dichteres Wasserstoffgas aus den Randgebieten des Sterns ins Zentrum und wird dort zu Helium umgewandelt. Dieser Prozess dauert an, bis der gesamte Wasserstoff zu Helium fusioniert wurde. Wurde die gesamte Masse umgewandelt, erlischt die Kernfusion, da der Druck nicht mehr ausreicht, um die Phase des Heliumbrennens zu erreichen. Der Stern strahlt nun die während des Wasserstoffbrennens gewonnene Wärme ab, während sich seine Positionen im Hertzsprung-Russel-Diagramm nach rechts verschiebt. Da dieser Vorgang äußerst langsam voranschreitet, wurde noch kein Roter Zwerg beobachtet, welcher das Hauptreihenstadium verlassen hat.

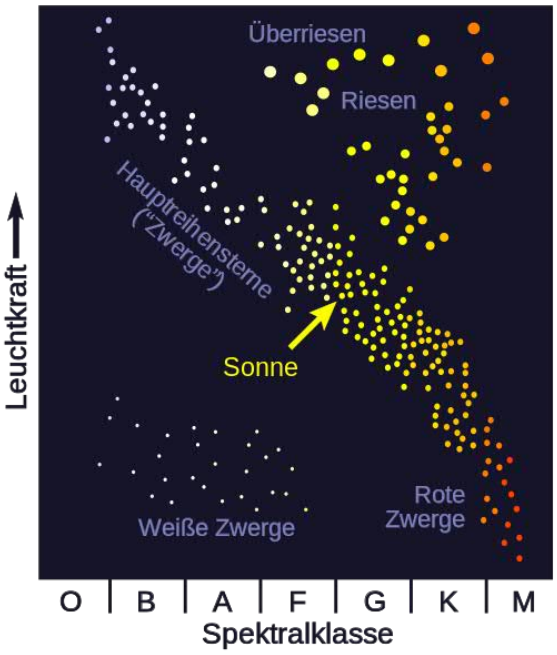


Abb. 6: Hertzsprung-Russel-Diagramm

Sterne mit mittlerer Masse zwischen 0,4 $M_\odot$ und 0,9 $M_\odot$

Hauptreihensterne mit einer Masse zwischen 0,4 und 0,9 Sonnenmassen verhalten sich ähnlich wie Rote Zwerge, jedoch findet bei diesen kein konvektionsbedingter Heliumtransport statt. Dies führt dazu, dass, wenn der Wasserstoff aufgebraucht wurde, die Kernfusion aussetzt und der Stern als Weißer Zwerg verglüht. Bei Weißen Zwergen handelt es sich also um alte und kompakte Sterne, welche trotz ihrer hohen Temperatur nur über eine geringe Leuchtkraft verfügen.

Massereiche Sterne zwischen 0,9 $M_\odot$ und 4,0 $M_\odot$

Hat ein Stern mit einer Masse von 0,9 bis 4 Sonnenmassen seine Wasserstoffvorräte aufgebraucht, führt der abnehmende Strahlungsdruck zu einer nachhaltigen Störung des hydrostatischen Gleichgewichts. Als Folge kollabiert der Stern, wodurch sich die Dichte in seinem Kern erhöht. Die dadurch steigenden Temperaturen bewirken nun, dass die nächste Fusion ablaufen kann. In diesem Schritt, welcher auch Heliumbrennen genannt wird, wird Helium in Kohlenstoff umgewandelt. Der nun vom Kern ausgehende Strahlungsdruck ist derartig groß, dass er die Hülle des Sterns nach außen treibt. Er wird zu einem Roten Riesen. Da die Hülle nur noch schwach durch die Gravitation an den Stern gebundenen ist, erfährt dieser einen drastischen Massenverlust. Nachdem die Hülle als planetarer Nebel in den interstellaren Raum abgedriftet ist, verglüht der Kern als Weißer Zwerg.

Massereiche Sterne zwischen 4,0 $M_\odot$ 8 $M_\odot$

Sterne zwischen 4 und 8 Sonnenmassen durchlaufen in Prinzip den identischen Zyklus wie Sterne mit 0,9 bis 4 Sonnenmassen. Sie unterscheiden sich jedoch dadurch, dass nach dem Heliumbrennen noch ausreichend Masse vorhanden ist, sodass durch einen erneuten Kollaps und der daraus resultierenden Temperaturzunahme das Kohlenstoffbrennen gezündet werden kann. Während dieses Ablaufes reichert sich der Kern des Sterns mit den Reaktionsprodukten Neon, Magnesium und Sauerstoff an. Am Ende dieses Zyklus verglüht der Stern wieder als Weißer Zwerg.

Massereiche Sterne über 8 $M_\odot$

Sehr massereiche Sterne mit einer Masse von über 8 Sonnenmassen unterscheiden sich dahingehend, dass nach dem Kohlenstoffbrennen weiterhin so viel Masse vorhanden ist, dass weitere Fusionsreaktion gezündet werden können. Dabei entstehen durch die Neonfusion Sauerstoff und Magnesiumatome. Die Sauerstoffatome werden in einer weiteren Reaktion dem Sauerstoffbrennen in Silizium umgewandelt, welches wiederum durch das Siliziumbrennen zu Eisen fusioniert wird. Zu diesem Zeitpunkt herrschen im Inneren des Sterns Kerntemperaturen von Werten zwischen $2,7 \cdot 10^9 Kelvin$ und $3,5 \cdot 10^9 Kelvin$, während sich der benötigte Druck auf mindestens $3 \cdot 10^{10} kg/m^3$ beläuft. Da die Temperatur auch in den äußeren Schichten des Sterns zunimmt, können in diesen ebenfalls Fusionsreaktion stattfinden, wobei die erforderlichen Temperaturen für die jeweiligen Reaktionen nach außen hin abnehmen. Aufgrund der Tatsache, dass nach der Umwandlung von Silizium keine weiteren Reaktionsstufen ohne die Hinzugabe von Energie möglich sind, bricht die Fusionskette ab.

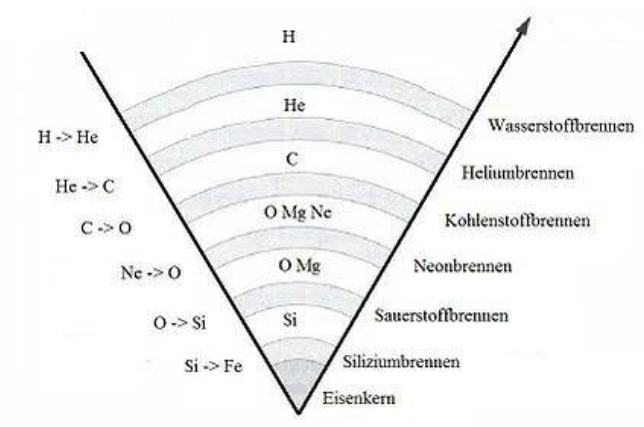


Abb. 7: Schichten der Fusionsprozesse („Zwiebelschalenstruktur“)

1.4 Sternkollaps - Entstehung eines Schwarzen Lochs

Nachdem die Fusion von Silizium zu Eisen vollendet wurde, hat der Stern seinen gesamten nuklearen Brennstoff verbraucht. Da nun kein Strahlungsdruck mehr durch die Kernfusion aufgebaut werden kann, kann er seiner Eigengravitation nicht weiterhin entgegenwirken. Als Folge bricht der Kern innerhalb Zehntelsekunden zusammen und kollabiert. Die dabei freigesetzte Energie sprengt die äußeren Schichten des Sterns ab und schleudert diese ins All. Dieses Phänomen wird als Supernova bezeichnet. Der zurückgebliebene Kern wird von seiner Eigengravitation derartig stark komprimiert, dass die in ihm enthaltenen Atome in Protonen und Elektronen gespalten werden. Durch die hohe Dichte des Kerns verschmelzen die nun frei vorliegenden Protonen und Elektronen zu Neutronen, bis zu einem Zeitpunkt, an dem nun ausschließlich Neutronen vorhanden sind. Es ist ein Neutronenstern entstanden. Ein Neutronenstern besitzt in der Regel einen Radius zwischen $10km$ und $12km$, wobei die bislang entdeckten Neutronensterne Massen zwischen $1,2$ und $2,0$ Sonnenmassen aufweisen. Ihr im Vergleich zur Größe hohes Gewicht lässt sich durch ihre extreme Dichte erklären. Diese kann im Kern des Neutronensterns bis zu $8 \cdot 10^{17} kg/m3$ betragen, womit Neutronensterne die dichtesten bekannten Objekte im beobachtbaren Universum sind. Das Endstadium als Neutronenstern erreicht ein Stern, wenn der Kern, der nach der Supernova zurückbleibt, eine Masse von ca. $1,5$ bis $3,2$ Sonnenmassen hat. Dies ist gegeben, wenn der Hauptreihenstern eine Masse von ca. 8 bis 25 Sonnenmassen hatte. Hatte der Hauptreihenstern jedoch eine Masse von ca. 40 Sonnenmassen, so bleibt ein Kern zurück, welcher eine Masse von über $3,2$ Sonnenmassen hat. Die in ihm wirkende Gravitationskraft ist so groß, dass die Neutronen weiter verdichtet werden. Es entsteht ein Objekt mit unendlich hoher Dichte, dessen Fluchtgeschwindigkeit der Lichtgeschwindigkeit, also $299.792.458$ m/s entspricht. Es handelt sich also um ein Objekt, welches eine derart große Gravitationskraft besitzt, dass nicht einmal Licht diesem entkommen kann. Es ist ein Schwarzes Loch entstanden, welches nur durch seinen Einfluss auf umgebende Materie beobachtet werden kann.

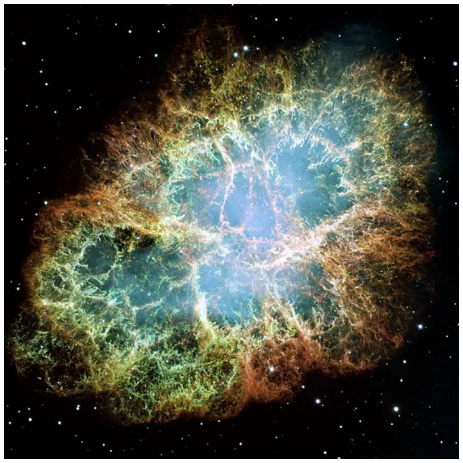


Abb. 8: Krebsnebel M1 - Überrest einer Supernova

Abb. 9: Schwarzes Loch im Zentrum der Galaxie M87 C: Event Horizon Telescope collaboration et al.

2 Das Wesen der Schwarzen Löcher

2.1 Klassifizierung von Schwarzen Löchern

Schwarze Löcher werden anhand ihrer Entstehung und der ihnen inhärenten Masse auf verschiedene Weise klassifiziert:

Stellare Schwarze Löcher

Bei stellaren Schwarzen Löchern handelt es sich um diejenigen, deren Entstehung bereits beschrieben wurde. Sie stellen also das Endstadium von massereichen Sternen da, nachdem diese ihren nuklearen Brennstoff aufgebraucht und ihre Hülle von sich gestoßen haben. Angestellte Berechnungen legen nahe, dass sich deren Anzahl im beobachtbaren Universum auf ca. $4 \cdot 10^{19}$ beläuft. Bezogen auf ihre Masse weisen stellare Schwarze Löcher in der Regel Werte zwischen 3 und 100 Sonnenmassen auf.

Supermassereiche Schwarze Löcher

Wie supermassereiche Schwarze Löcher mit Massen zwischen ca. 10^6 und 10^{10} Sonnenmassen entstanden, ist nach aktueller Forschung noch nicht hinreichend dargelegt. Jedoch ist es wahrscheinlich, dass diese bereits im frühen Universum entstanden. Viele Theorien, die ihre Entstehung zu erklären versuchen, besagen, dass die Kollision von frühen Galaxien, sogenannten Protogalaxien, eine bedeutende Rolle gespielt haben. Dabei könnten im Zentrum der verschmelzenden Galaxien große und instabile Gasansammlungen entstanden sein. Das Gas wäre in der Lage, durch Strömungen in das Zentrum der Gasscheibe transportiert zu werden, wo es durch die hohe Dichte der Gaswolke zu massereichen Sternen von mehreren 10^4 Sonnenmassen hätte kollabieren können. Haben diese massereichen Sterne ihren Brennstoff aufgebraucht oder kollidieren zwei massereiche Sterne miteinander, so würden massereiche Schwarze Löcher entstehen. Es besteht außerdem die Möglichkeit, dass zwei massereiche Schwarze Löcher zusammenstoßen und so ein Schwarzes Loch mit über 10^5 Sonnenmassen entsteht, welches durch die Aufnahme von umgebender Materie zu einem supermassereichen Schwarzen Loch anwachsen kann.

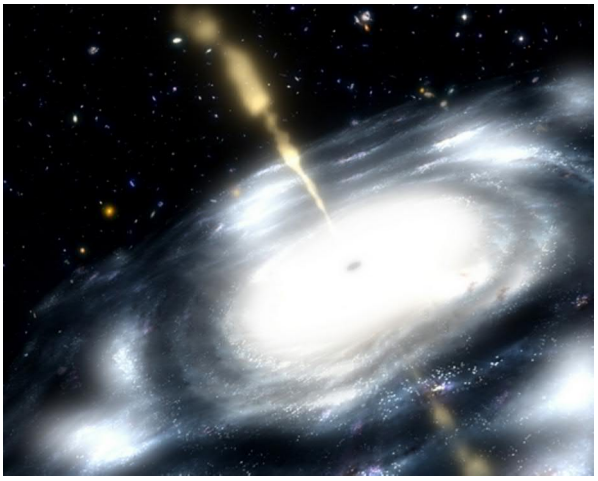


Abb. 10: Supermassives Schwarzes Loch (Künstlerische Darstellung) C: Nasa/JPL/Caltech

2.2 Die allgemeine Relativitätstheorie

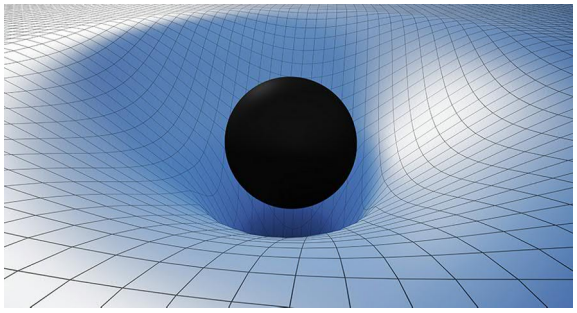


Abb. 11: Veranschaulichung der Raumkrümmung

Wie bereits beschrieben, handelt es sich bei einem Schwarzen Loch um ein Objekt mit einer so großen Gravitation, dass nicht einmal ein sich mit Lichtgeschwindigkeit fortbewegendes Teilchen diesem entkommen kann. Dieses Phänomen ist die logische Konsequenz der in der allgemeinen Relativitätstheorie (im Folgendem als ART bezeichnet) vorkommenden Gleichungen. Die ART, welche im Jahr 1916 von Albert Einstein veröffentlicht wurde, beschreibt die Wechselwirkungen zwischen Materie und Raumzeit. Um dies zu bewerkstelligen, interpretiert sie Gravitation als eine geometrische Eigenschaft der vierdimensionalen Raumzeit, auch Raum-Zeit-Kontinuum genannt. Dabei handelt es sich um die gemeinsame Darstellung der eindimensionalen Zeit und dem dreidimensionalen Raum. Die Theorie sagt voraus, dass massereiche Objekte eine Krümmung der Raumzeit verursachen. Je mehr Masse ein Objekt aufweist, desto größer ist seine Auswirkung.

2.2.1 Schwarzschild-Metrik

Eine Lösung der Gleichungen der ART, welche noch im Erscheinungsjahr von Karl Schwarzschild veröffentlicht wurde und als Schwarzschild-Lösung bezeichnet wird, beschreibt Schwarze Löcher als eine Punktsingularität, also als einen Punkt, an dem sich die gesamte Masse befindet und eine unendliche Krümmung des Raumes bewirkt. Daraus resultiert, dass Licht, welches in das Schwarze Loch eintritt, dieses nicht mehr verlassen kann. Das Licht wird sozusagen in das Innere des Schwarzen Loches "gebogen". Die Punktsingularität liegt innerhalb des sogenannten Schwarzschildradius, auch Ereignishorizont genannt, da jenseits dieses Radius keine visuellen Beobachtungen mehr möglich sind. Der Schwarzschildradius lässt sich mit der Formel $r_s = 2GM/c^2$ (G = Gravitationskonstante; M = Masse des Schwarzen Loches; c = Lichtgeschwindigkeit) berechnen, welche gleichzeitig den Grenzwert angibt, ab dessen Unterschreitung ein Schwarzes Loch entstehen kann. Anzumerken ist, dass diese Metrik nur bei Schwarzen Löchern, die keiner Rotation unterliegen und ungeladen sind, Anwendung findet.

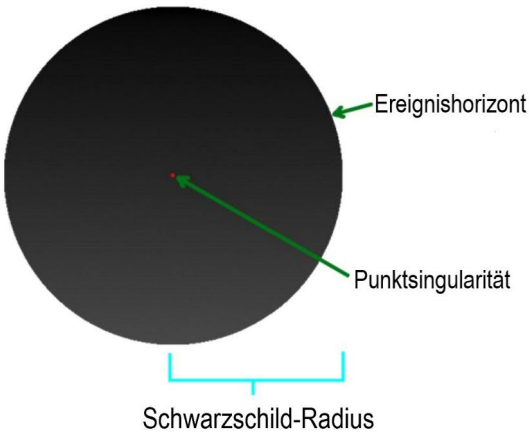


Abb. 12: Schwarzschild-Metrik

2.2.2 Kerr-Metrik

Rotierende und ungeladene Schwarze Löcher können durch eine weitere Lösung der Einstein'schen Feldgleichungen dargestellt werden, der sogenannten Kerr-Lösung, welche im Jahr 1964 von Roy Kerr veröffentlicht wurde. Rotierende Schwarze Löcher unterscheiden sich im Vergleich zu statischen Löchern dahingehend, dass sie einen Drehimpuls besitzen, sich also um eine Rotationsachse drehen. Wie bei der von Schwarzschild aufgestellten Metrik besitzen Schwarze Löcher auch bei der Kerr-Metrik eine Singularität, jedoch resultiert aus ihrem Drehimpuls, dass sich im Zentrum eines Kerr-Lochs eine sogenannte Ringsingularität bildet. Identisch zur Schwarzschild-Lösung existiert ebenfalls ein Ereignishorizont, welcher den Radius festlegt, ab dem keine Beobachtungen mehr durchgeführt werden können. Außerhalb des Ereignishorizonts befindet sich die Ergosphäre. In dieser Zone rotiert die Raumzeit derartig stark, dass jegliche Art von Materie oder Strahlung, die in diese Region eintritt, auf eine Rotationsbahn um das Schwarze Loch gezwungen wird. Das hier auftretende Phänomen wird als Frame-Dragging oder auch Lense-Thirring-Effekt bezeichnet.

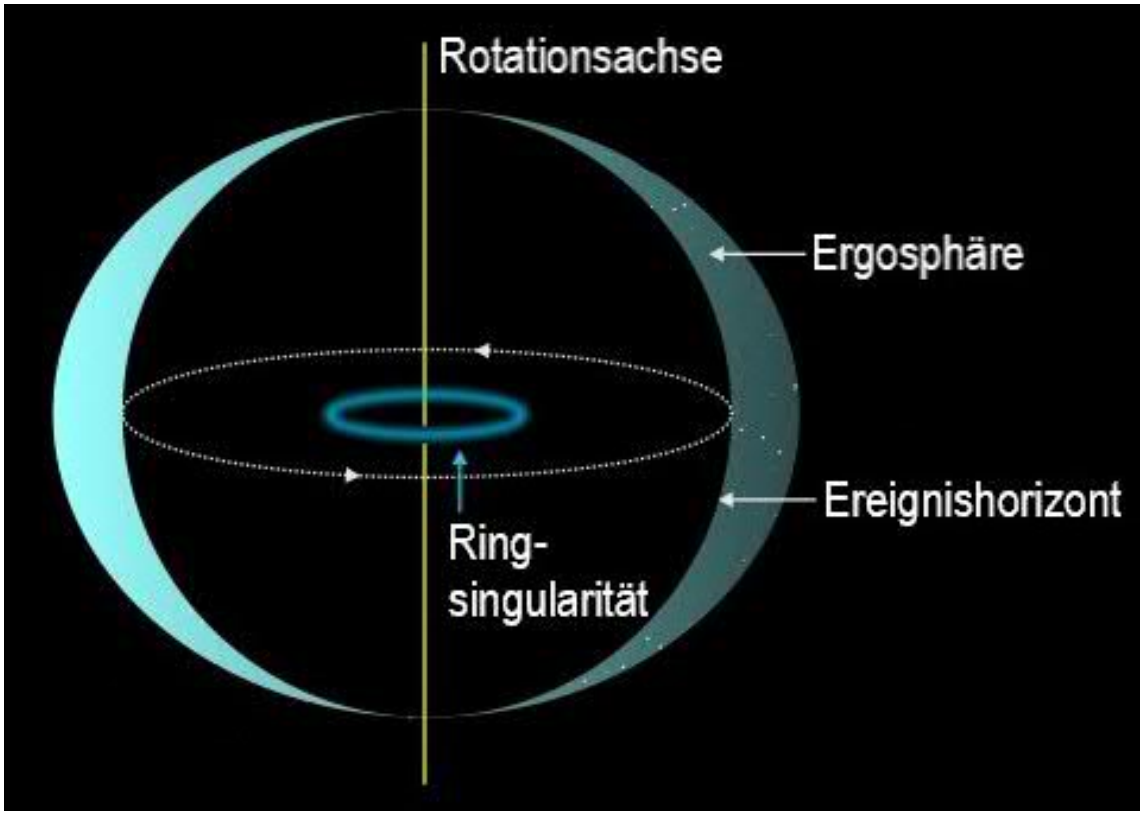


Abb. 13: Darstellung eines rotierenden Schwarzen Lochs (Kerr-Metrik)

3 Was ist ein Quasar?

3.1 Entdeckung und Entstehung

Der Begriff Quasar bedeutet so viel wie ”Quasi Stern”, da er bei einer rein visuellen Betrachtung des Nachthimmels nicht von einem Stern unterschieden werden kann. Aus diesem Grund konnten Quasare bis zum Jahr 1963 aufgrund unzureichender Technik nicht als jene identifiziert werden. Erst im Jahr 1963 erkannte Maarten Schmidt, dass es sich bei diesen Objekten in Wirklichkeit nicht um Sterne, sondern nur um visuell ähnlich wirkende Objekte handelt. Er entdeckte, dass sich Quasare bezogen auf ihre spektralen Eigenschaften von Sternen unterscheiden. Die Tatsache, dass es sich bei Quasaren um die aktiven Kerne von Galaxien handelt, wurde jedoch erst zu einem späteren Zeitpunkt festgestellt. Quasare entstanden, genau wie die supermassereichen Schwarzen Löcher, bereits im frühen Universum. Nachdem ein supermassereiches Schwarzes Loch entstanden ist, beginnt dieses die durch die Supernova frei gewordene oder anderweitig in seiner Umgebung befindliche Materie anzuziehen und es entsteht eine Akkretionsscheibe. Diese unterliegt einer Rotation, welche bei Annäherung an das Zentrum zunimmt. Durch die hohe Rotationsgeschwindigkeit und der daraus resultierenden Reibung entsteht ein heißes Plasma, welches eine sehr große Leuchtkraft besitzt. Aufgrund ihrer enormen Leuchtkraft und der Tatsache, dass sie bereits im frühen Universum entstanden sind, bieten Quasare einen Einblick in die Anfangszeit des Kosmos.

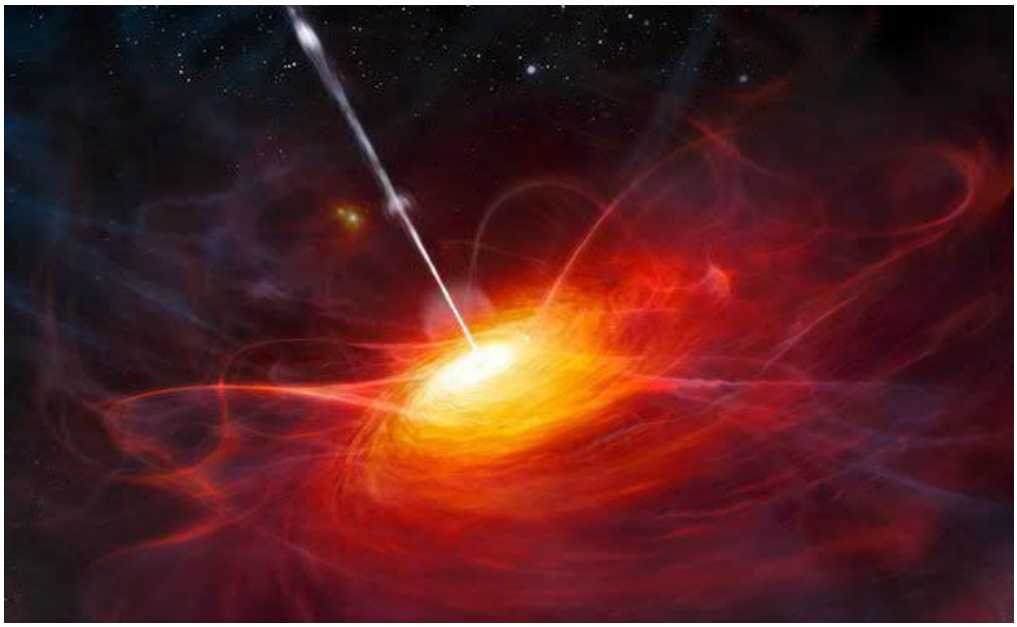


Abb. 14: Künstlerische Darstellung eines Quasars C: ESO/M. Kornmesser

3.2 Identifizierung

Wie bereits beschrieben, können Quasare durch die Durchführung einer Spektralanalyse und der Betrachtung des ihnen inhärenten Spektrums identifiziert werden. Charakteristisch für die Spektren von Quasaren ist eine Verschiebung des Lichtes in den langwelligen Bereich des Spektrums, ergo in den rötlichen Bereich. Dieses Phänomen ist bekannt unter dem Begriff der „Kosmologischen Rotverschiebung“. Bei der Ursache dieser ausgeprägten Rotverschiebung handelt es sich um die Ausdehnung des zwischen der Erde und dem Quasar liegenden Raumes. Diese Ausdehnung ist eine Folge des expandierenden Universums. Erklären lässt sich die Rotverschiebung des Lichtes durch den sogenannten Dopplereffekt. Dieser beschreibt die wahrnehmbare Veränderung der Frequenz einer Welle, die sich auf einen Beobachter zu beziehungsweise fortbewegt. Bekannt ist dieser Effekt hauptsächlich bei Audiowellen, jedoch verhält sich dieser identisch bei Lichtwellen. Bewegt sich eine Lichtwelle auf einen Beobachter zu, wird die Lichtwelle „gestaucht“ und es findet eine Blauverschiebung statt. Bewegt sich eine Lichtwelle von einem Beobachter weg, wird die Welle „gedehnt“ und es findet eine Rotverschiebung statt. Da Quasare im frühen Universum entstanden sind und ihr Licht demnach einen weiten Weg zurücklegen muss, weisen diese eine besonders hohe Rotverschiebung auf.

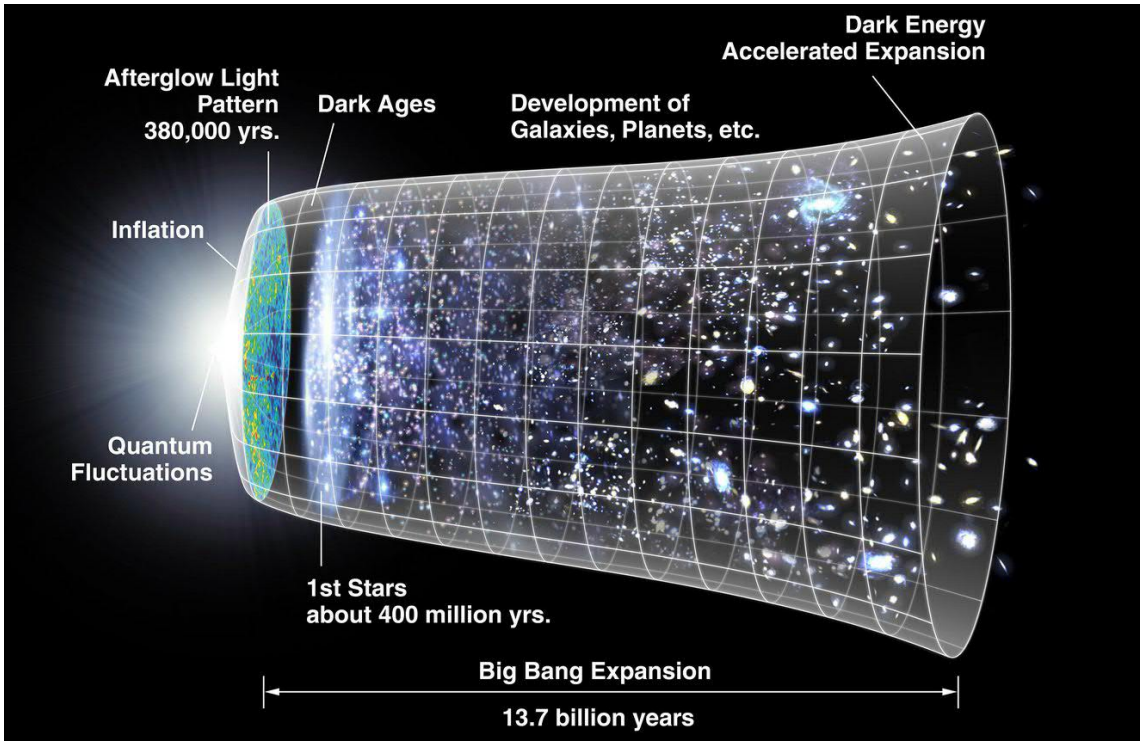


Abb. 15: Veranschaulichung der Expansion des Universums

4 Der Gravitationslinseneffekt

Der sogenannte Gravitationslinseneffekt beschreibt den Vorgang, bei dem Licht durch ein Objekt mit großer Masse abgelenkt wird. In der Astronomie kann dieser Effekt dazu führen, dass ein Betrachter zur gleichen Zeit zwei Abbildungen desselben Objektes wahrnehmen kann, welche die exakt identischen spektralen Eigenschaften besitzen. Die wesentliche Grundlage zur Beschreibung des Effekts liefert die ART, welche wie bereits erklärt, die Wechselwirkungen zwischen Materie und Raumzeit beschreibt.

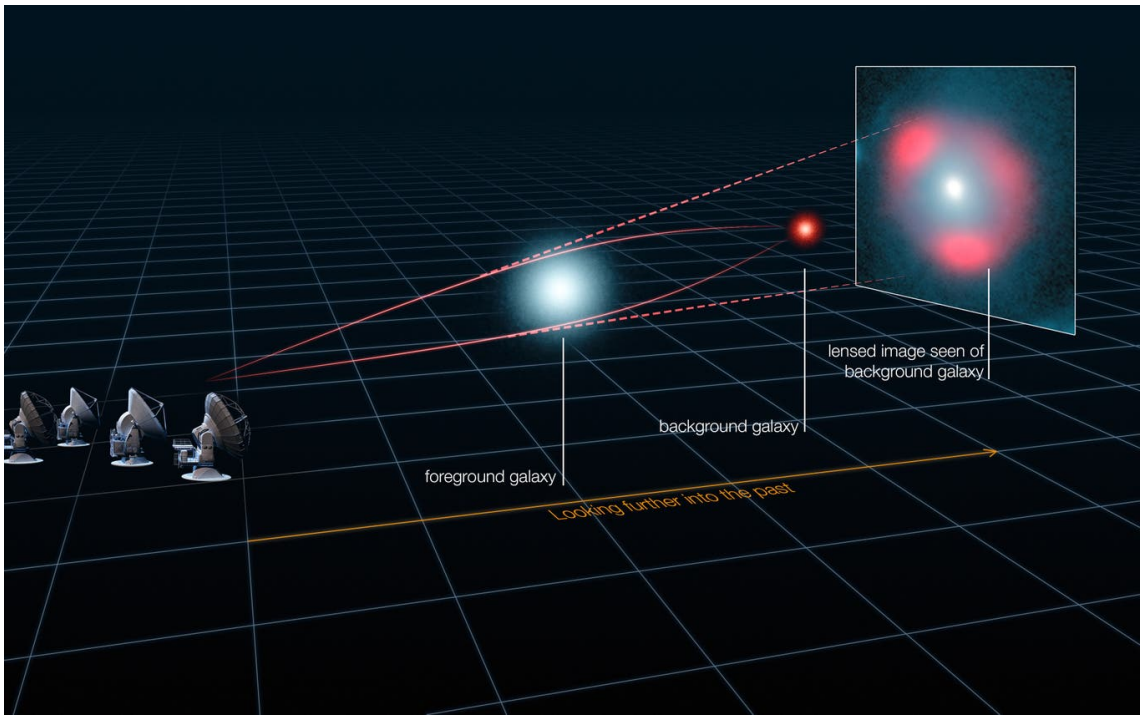


Abb. 16: Veranschaulichung des Gravitationslinseneffekts C: ESO, ESA/Hubble, Nasa

4.1 Einstein-Ring

Für die spätere Berechnung der Masse der als Gravitationslinse fungierenden Galaxie YGKOW G1, wird als Prämisse angenommen, dass die Existenz eines sogenannten Einstein-Rings gegeben ist. Dabei handelt es sich um ein kreisförmiges Phänomen, welches auftritt, wenn die Linse und die Hintergrundquelle in einem symmetrischen Verhältnis zueinanderstehen (siehe Abb. 16). Bezogen auf QSO 0957+561 wird also das vom Quasar ausgesendete Licht gleichmäßig um die auf einer Linie zur Erde liegende Galaxie YGKOW G1 gelenkt.

5 Aufnahme und Aufarbeitung von QSO 0957+561

5.1 Technisches Equipment

5.1.1 Teleskop

Zur Aufnahme des Doppelquasars QSO 0957+561 wurde als Aufnahmeteleskop das C14 Edge HD verwendet, welches über eine Öffnung von 14 Zoll und eine Brennweite von 2700 mm verfügt. Es besitzt demnach ein Öffnungsverhältnis von f/7,6. Montiert ist dieses auf einer GM 2000 HPS Montierung aus dem Hause 10Micron.

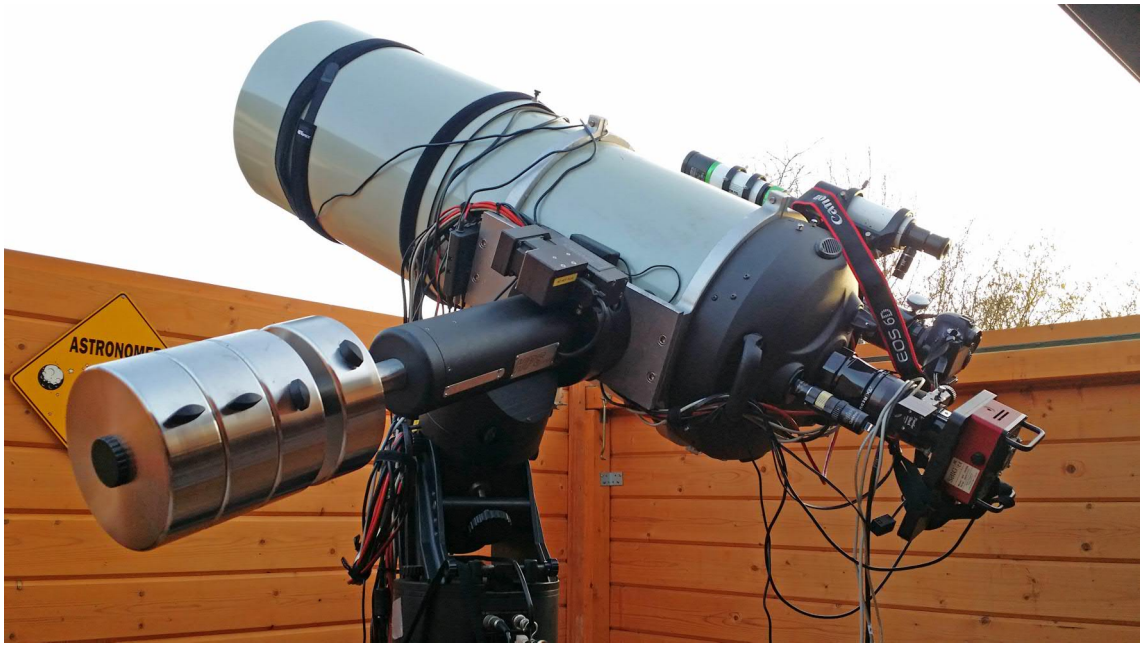


Abb. 17: Aufnahmeteleskop C14 Edge HD Foto: Bernd Koch

Bauart	**Schmidt-Cassegrain**
Öffnung (mm)	**355.6mm**
Brennweite	**3910mm**
Öffnungsverhältnis	**f/11**
Tubusgewicht	**21kg**

Abb. 18: Datenblatt zum Teleskop (C14 Edge HD)

5.1.2 Kamera und Filterrad

Als Aufnahmekamera diente die SBIG STT 8300M. Dabei handelt es sich, wie es sich auch am Namen erkennen lässt (M), um eine Monochrom-Kamera. Bedeutet also, dass mit ihr nur Bilder in Schwarz-Weiß aufgenommen werden können. Damit dennoch Farben dargestellt werden können, ist an die Kamera ein Filterrad angeschlossen. In diesem Fall handelt es sich um das SBIG FW8-8300.

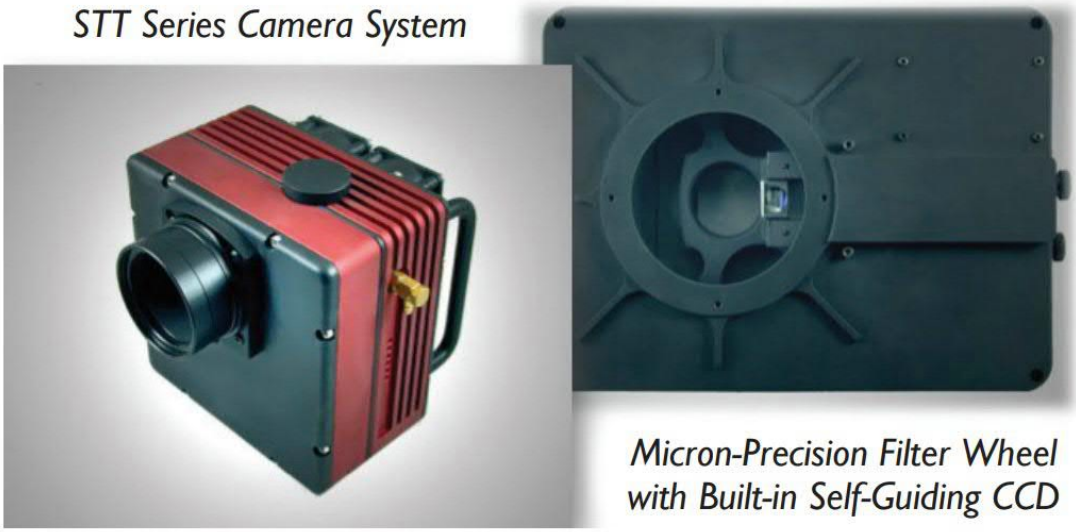


Abb. 19: Aufnahmekamera STT 8300M und Filterrad FW8-8300

CCD-Sensor	**Kodak KAF-8300**
Pixelanzahl	**3.326 x 2504 Pixel (8.3 M)**
CCD-Größe	**17.96 x 13.52 mm**
Pixelgröße	**5.4 my x 5.4 my**
Maximale Kühlung	**-55 °C**
Gewicht	**1.2kg**
Binning	**1 x 1, 2 x 2, 3 x 3, 9 x 9**

Abb. 20: Datenblatt zur Kamera (STT 8300M)

Filterkapazität	**Bis zu 8 Filter**
Filtergröße	**36mm**
Abmessungen	**160mm x 210 mm**
Optischer Weg	**20mm**

Abb. 21: Datenblatt zum Filterrad (FW8-8300)

5.2 Beobachtungsprotokoll

Die Beobachtung des Quasars erfolgte am 30-01-2022 zwischen 18:55 und 21:45. Dafür stellte Bernd Koch mithilfe der Software *AnyDesk* das Teleskop seiner Privatsternwarte in Altenkirchen (Westerwald) zum Aufnehmen der Daten zur Verfügung. Als Aufnahmesoftware diente das Programm *MaxIm DL Pro 6*, während das Teleskop mit *Stellarium* per Remote Control gesteuert wurde.

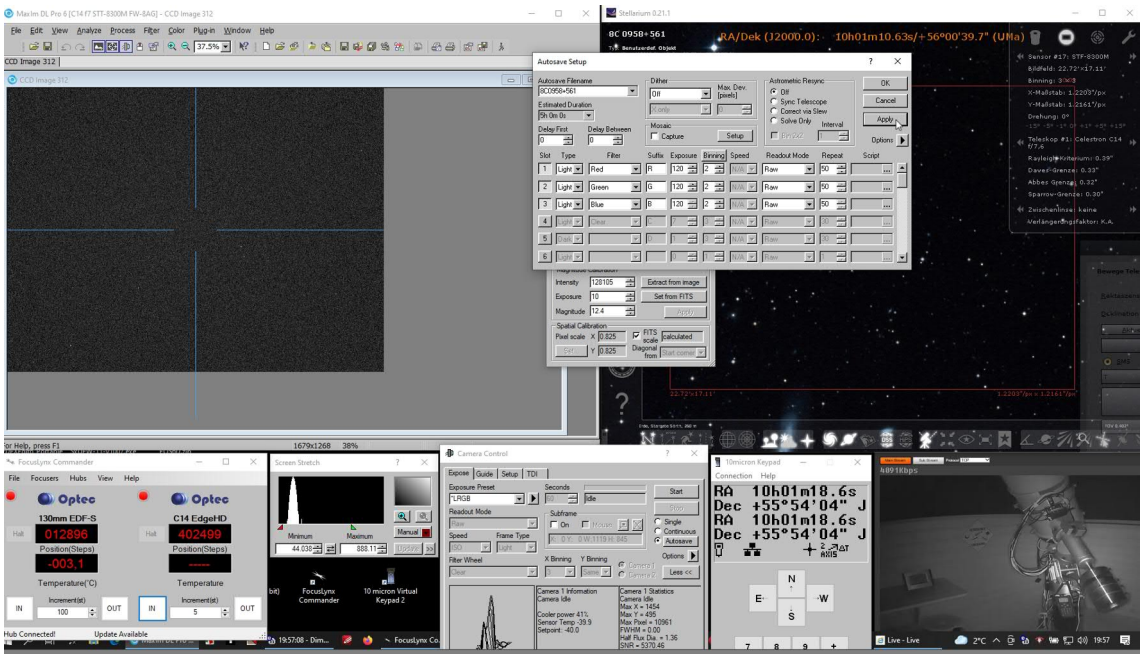


Abb. 22: Aufnahme per *AnyDesk*

Die Gesamtbelichtung der LRGB-Daten beläuft sich auf 64 Minuten, wobei sich die Belichtungszeit aus den einzelnen Komponenten wie folgt zusammensetzt: Luminanz = 17x120s, Red = 5x120s, Green = 5x120s und Blue = 5x120s. Zusätzlich wurden Darks und Flats für die Bildreduktion aufgenommen.

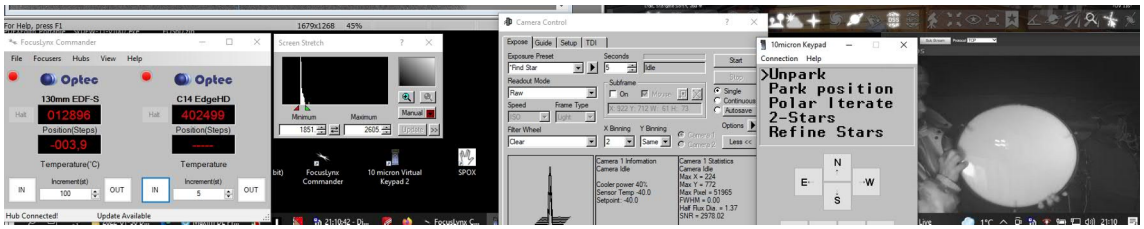


Abb. 23: Vorbereitung für die Flat-Aufnahmen

Der Kamerasensor wurde während der gesamten Aufnahmen auf -40℃ abgekühlt, um das Bildrauschen zu verringern.

5.3 Bildbearbeitung

Bearbeitung der Aufnahmen mithilfe der Programme MaxIm DL und Photoshop:

Zu Beginn der Bildbearbeitung muss für jeden aufgenommenen Datensatz ein Durchschnittsbild erstellt werden. Dazu werden zuerst die Darks mit der Funktion *Set Calibration* hinzugefügt:

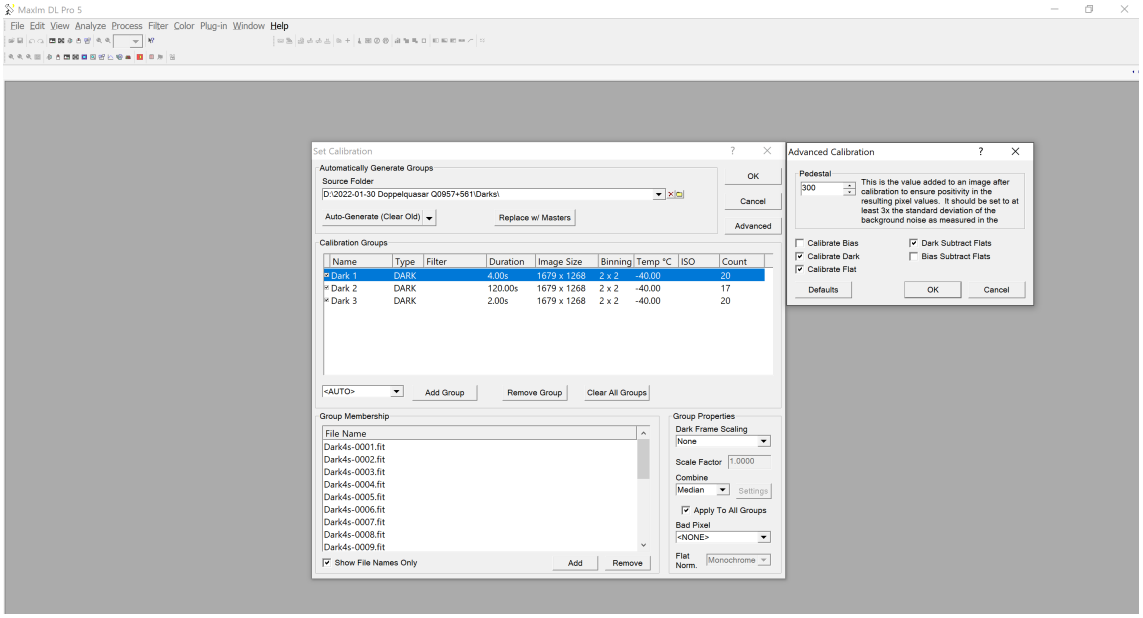


Abb. 24: Hinzufügen der Darks mit *Set Calibration*

Nachdem die Darks hinzugefügt wurden, werden außerdem die Flats beigefügt:

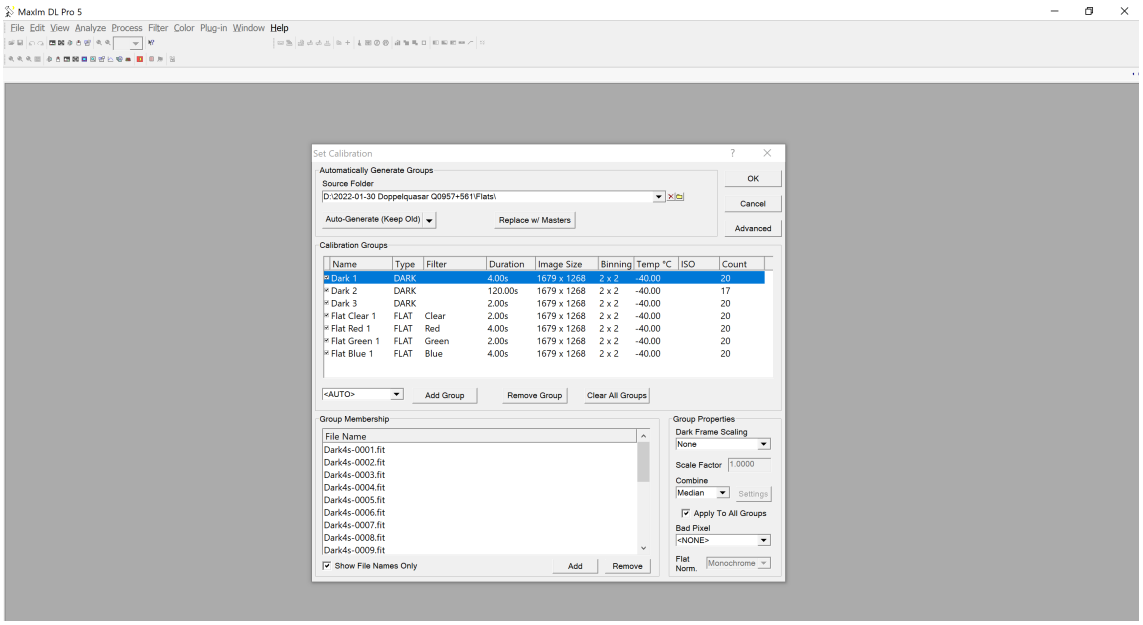


Abb. 25: Hinzufügen der Flats mit *Set Calibration*

Nun werden mit der Funktion *Replace w/ Masters* die Masterdateien, sprich die Durchschnittsbilder, erstellt.

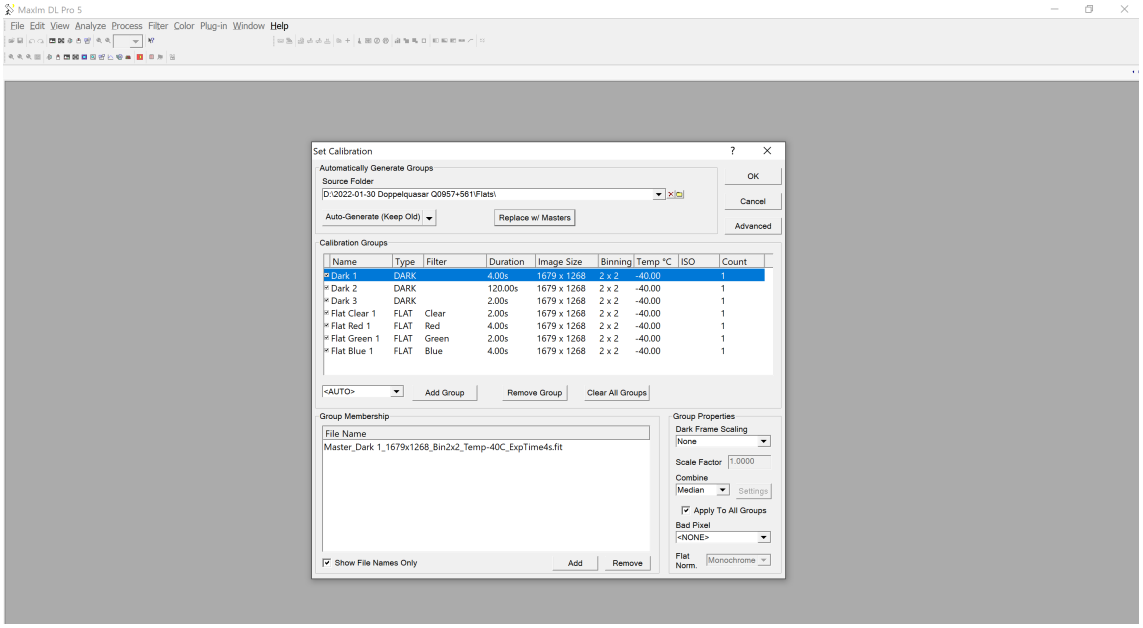


Abb. 26: Erstellung der Masters mit *Replace w/ Masters*

5.3.1 Luminanz-Summenbild

Für die spätere Vermessung der Positionen der Abbildungen des Quasars wird nun ein Luminanz-Summenbild erstellt. Dazu werden alle Clear-Dateien mit der Funktion *Stack* aufeinander addiert.

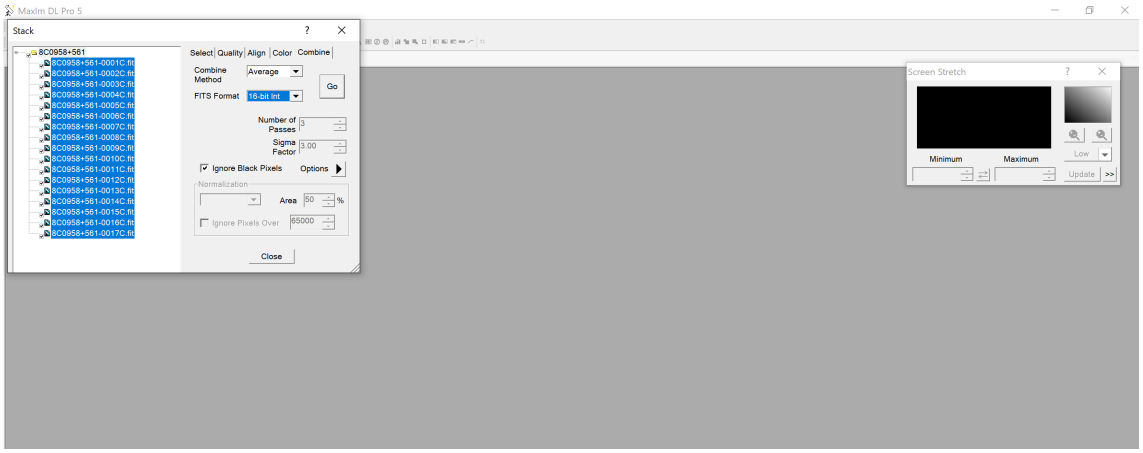


Abb. 27: Erzeugung eines Luminanz-Summenbilds mit der Funktion *Stack*

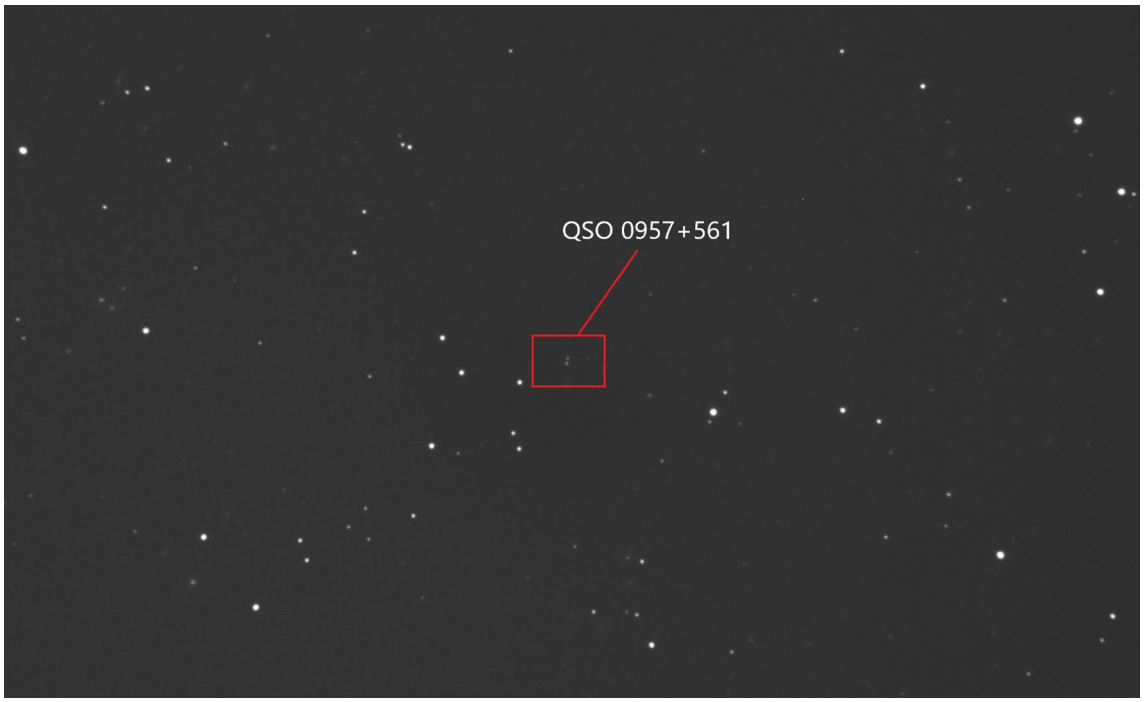


Abb. 28: Fertiges Luminanz-Summenbild von QSO 0957+561

5.3.2 LRGB-Summenbild

Zur Erzeugung eines LRGB-Summenbilds werden zunächst alle Clear und RGB Dateien geladen und mithilfe von *Align* ausgerichtet. Dazu wird der Align Modus *Auto - star matching* verwendet:

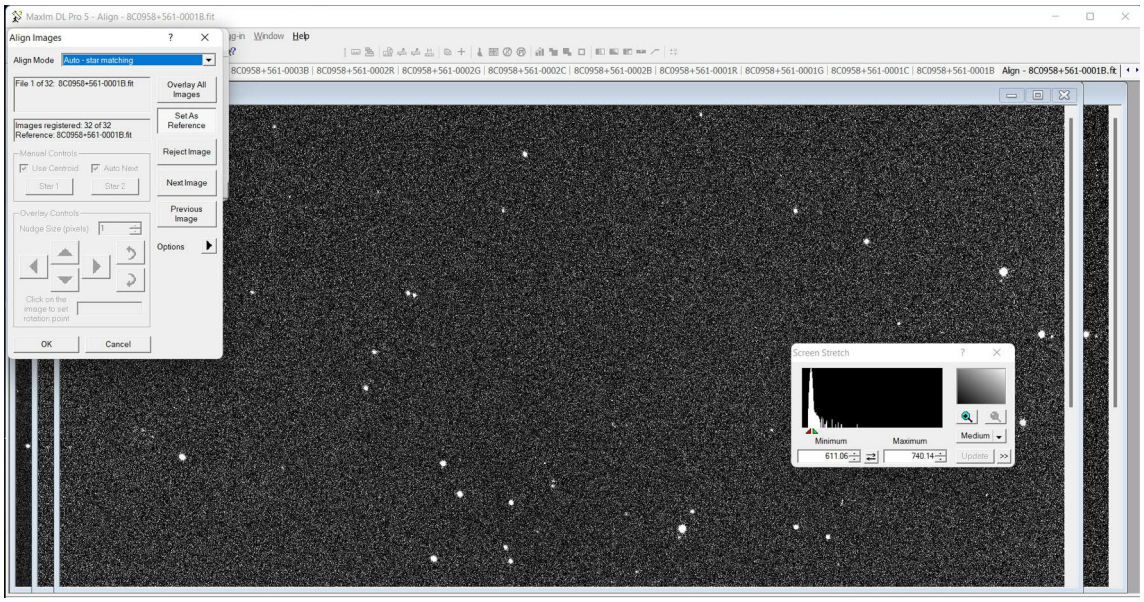


Abb. 29: Alignment der Luminanz und RGB-Bilder

Als Nächstes werden die ausgerichteten Bilder aufeinander addiert, also gestackt. Dies geschieht erneut durch die Funktion *Stack*.

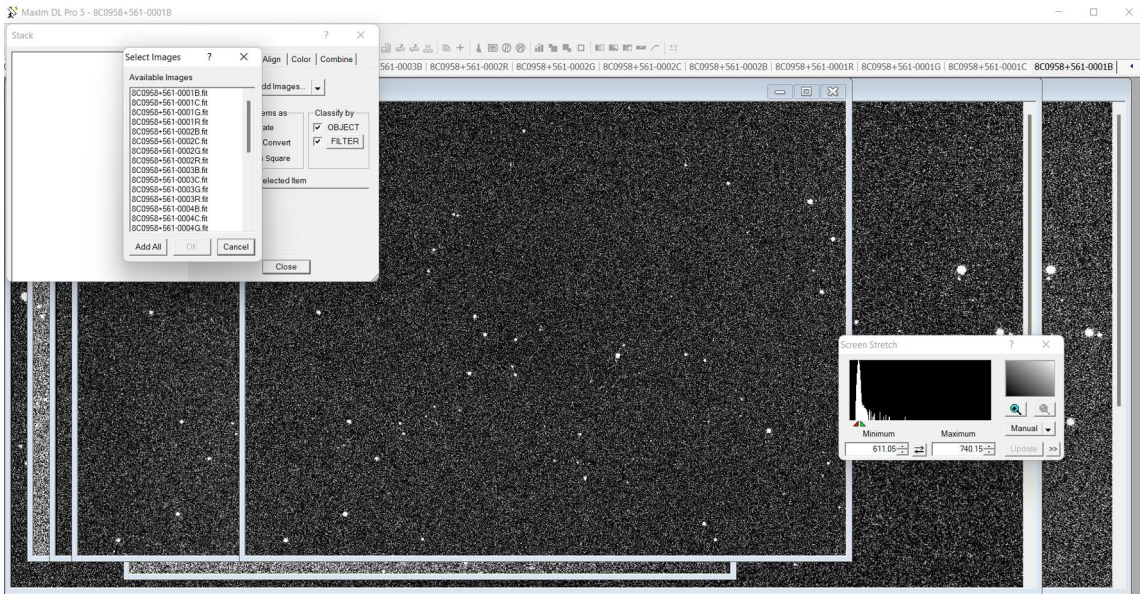


Abb. 30: Stacking der ausgerichteten Bilder

Als Ergebnis bringt das Stacking zwei Bilder hervor. Bei dem einen handelt es sich um ein Luminanz-Bild und bei dem anderen um ein RGB-Bild.

Abb. 31: Luminanz-Bild

Abb. 32: RGB-Bild

Mithilfe der Funktion *Split Tricolor* wird das RGB-Bild in seine einzelnen Farbkomponenten unterteilt. Es ergeben sich also die Bilder Group1-RGB-R, Group1-RGB-B und Group1-RGB-G.

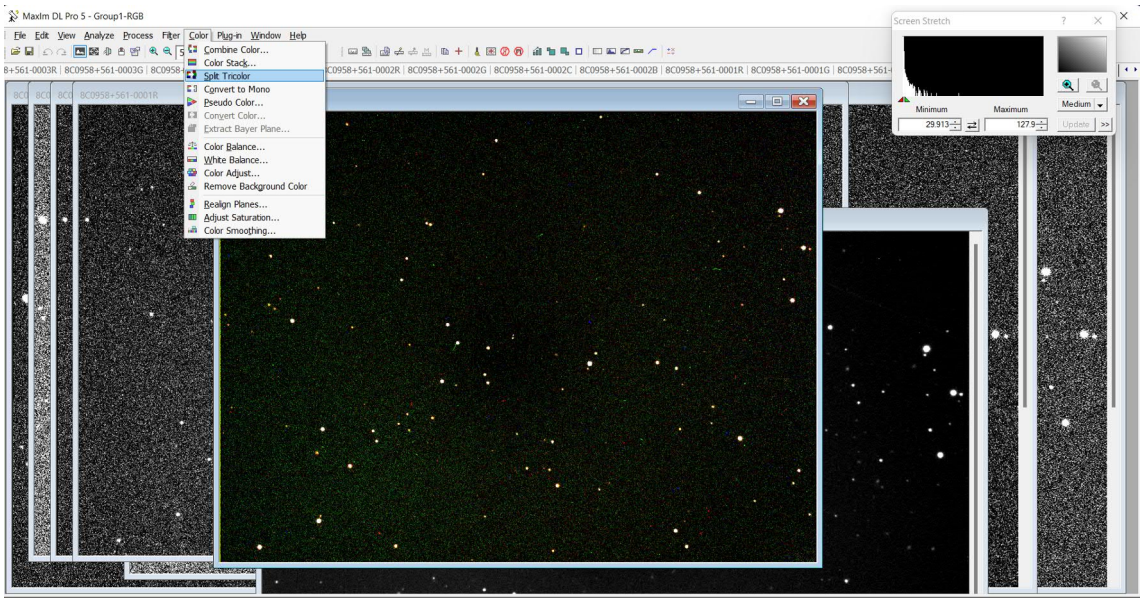


Abb. 33: Aufteilung des RGB-Bilds in Farbkomponenten

Mit *Kernel Filters* lässt sich ein großer Teil der vorhandenen heißen Pixel entfernen:

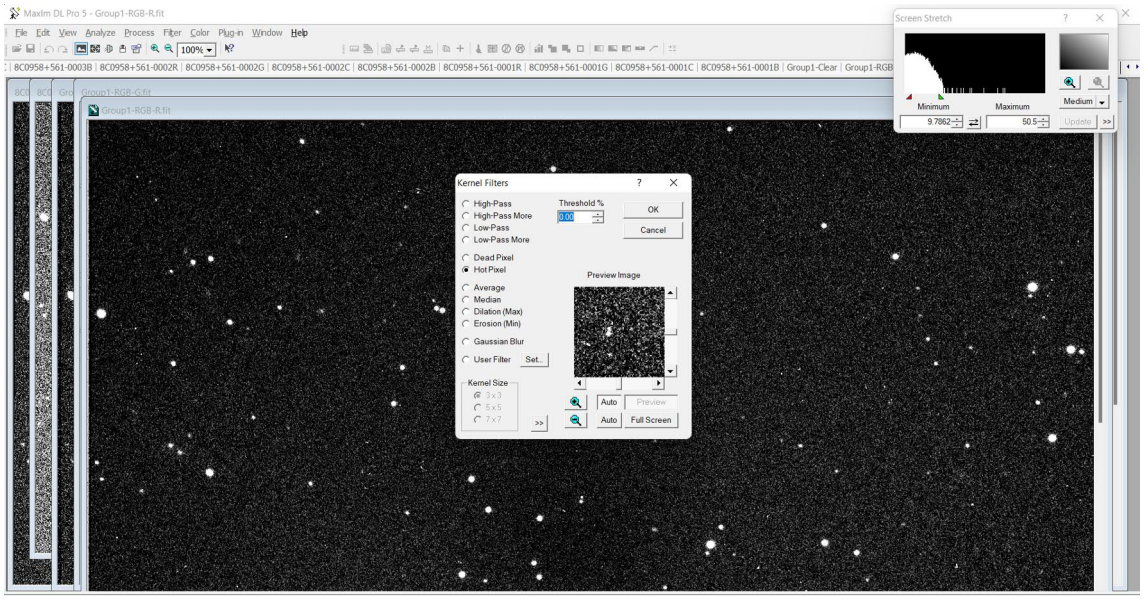


Abb. 34: Bearbeitung der heißen Pixel

Das Luminanzbild und die RGB-Komponenten lassen sich mit *Combine Color* zu einem LRGB-Bild zusammensetzen.

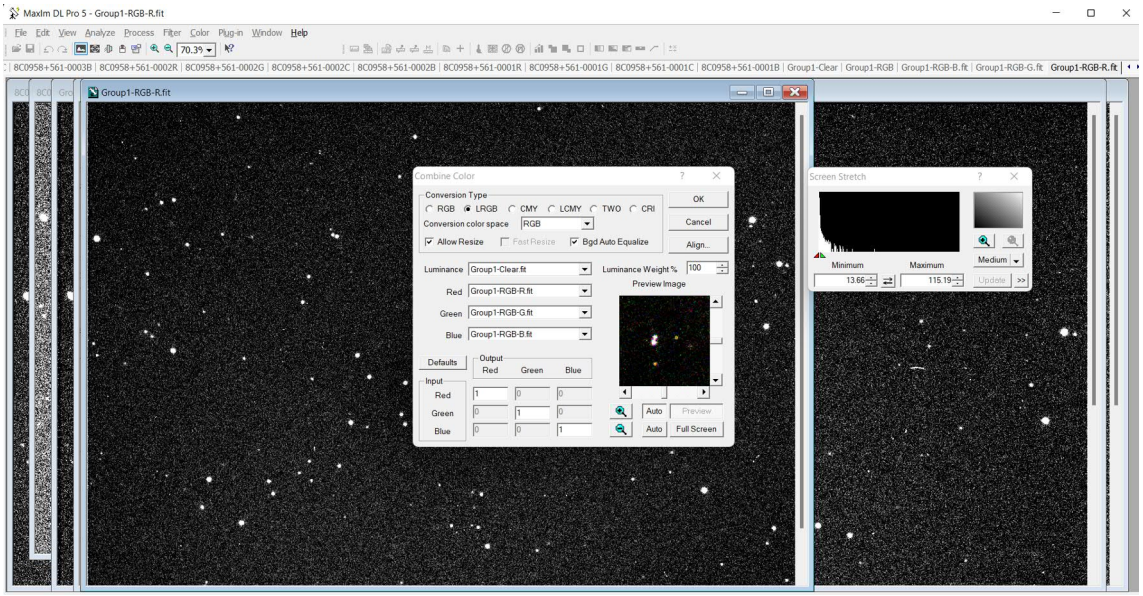


Abb. 35: Erzeugung eines LRGB-Bilds

Mit der Funktion *White Balance* lassen sich nun unrealistische Farbstiche beheben.

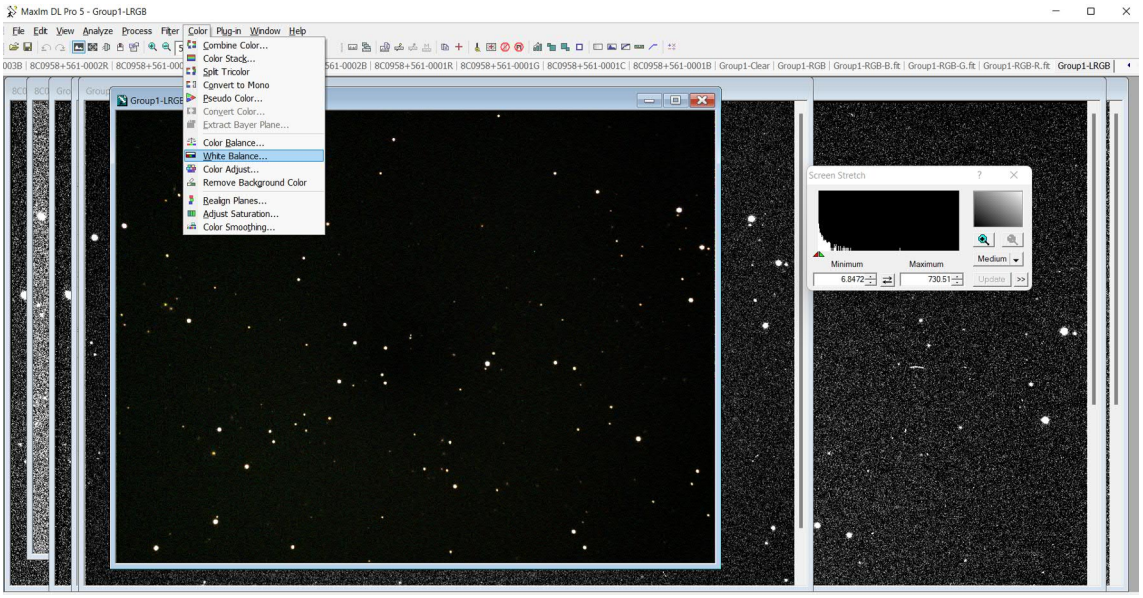


Abb. 36: Bearbeitung der Farbstiche

Die Bildbearbeitung mit MaxIm DL ist nun beendet. Es folgen jedoch noch zwei Arbeitsschritte in Photoshop. Zuerst erfolgt eine *Tonwertkorrektur*:

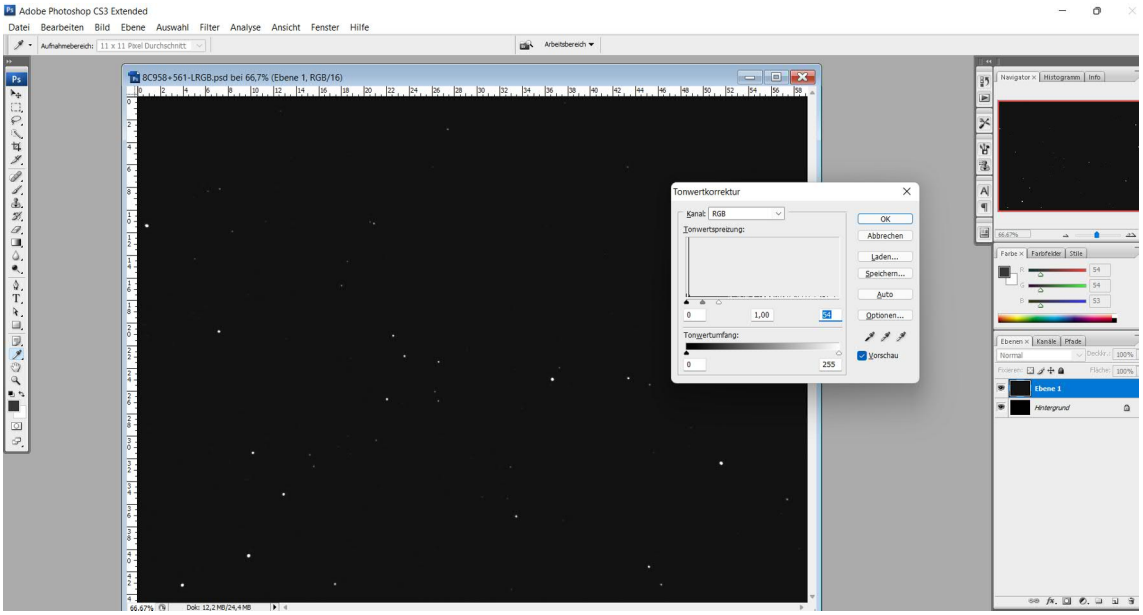


Abb. 37: Tonwertkorrektur in Photoshop

Im letzten Schritt werden die noch vorhandenen Fehlerpixel mithilfe der Kopierfunktion des Stempelwerkzeugs retuschiert.

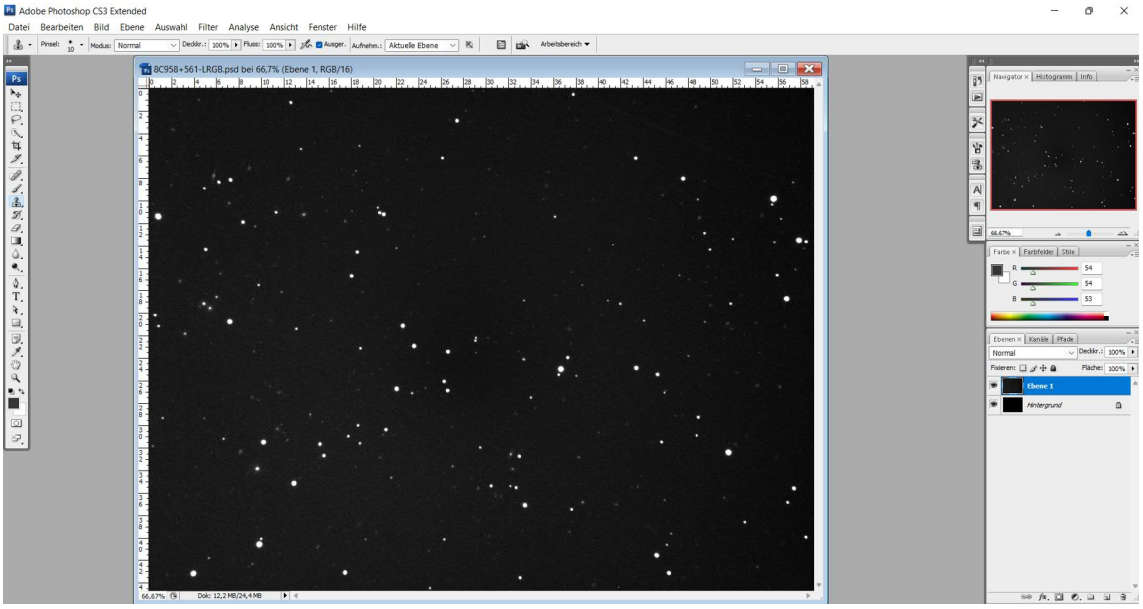


Abb. 38: Retusche der Fehlerpixel

Abb. 39: Fertiges LRGB-Summenbild von QSO 0957+561

Abb. 40: Vergrößerter Ausschnitt des LRGB-Summenbilds

Im direkten Vergleich mit einer Aufnahme von QSO 0957+561, getätigt vom Hubble Space Teleskop, fällt auf, dass die Galaxie YGKOW G1 auf den bearbeiteten Aufnahmen nicht sichtbar ist. Aus diesem Grund muss für die später folgende Bestimmung des Abstands von Abbildung B und YGKOW G1, die Aufnahme des Hubble Teleskops herbei gezogen werden.

Abb. 41: Aufnahme vom Hubble Teleskop C: ESA/Hubble & NASA

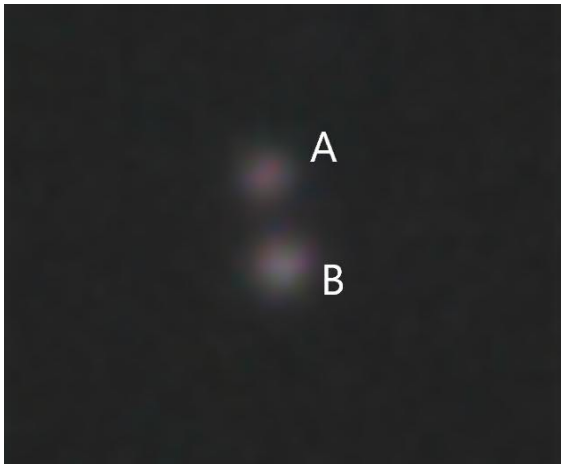


Abb. 42: Gespiegelter Ausschnitt des LRGB-Summenbilds

Ein weiterer Aspekt, welcher aus den bearbeiteten Aufnahmen leider ebenfalls nicht besonders hervor geht, ist die ungewöhnliche blaue Farbe des Quasars. Wie sich jedoch durch die Betrachtung eines Spektrums von QSO 0957+561 erkennen lässt, besitzt das Licht eine deutlich höhere Intensität im kurzwelligen Bereich des Lichts:

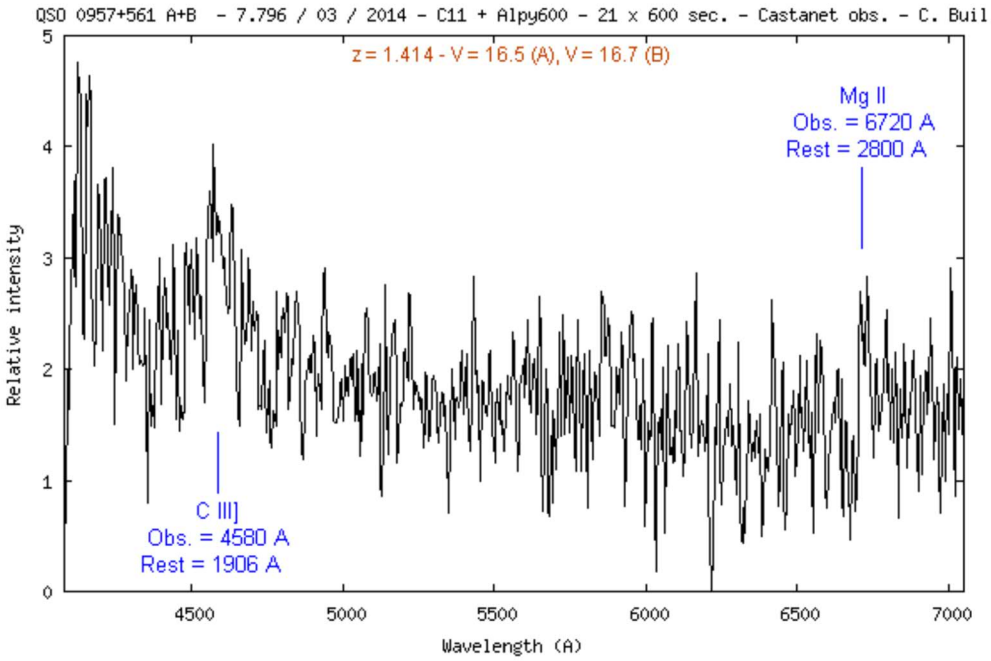


Abb. 43: Spektrum von QSO 0957+561(A+B) siehe: P.Young, Apj 241, 507-520,1980

6 Auswertungen

Für die spätere Berechnung der Masse der als Gravitationslinse fungierenden Galaxie YGKOW G1, müssen zunächst die dafür erforderlichen Größen ermittelt werden. Diese sind der Ablenkungswinkel Θ und der Versetzungswinkel β. Diese können durch die vorherige Berechnung des Abstands der Abbildungen des Quasars (Δ) und des Abstands von Abbildung B und YGKOW G1 (δ) bestimmt werden.

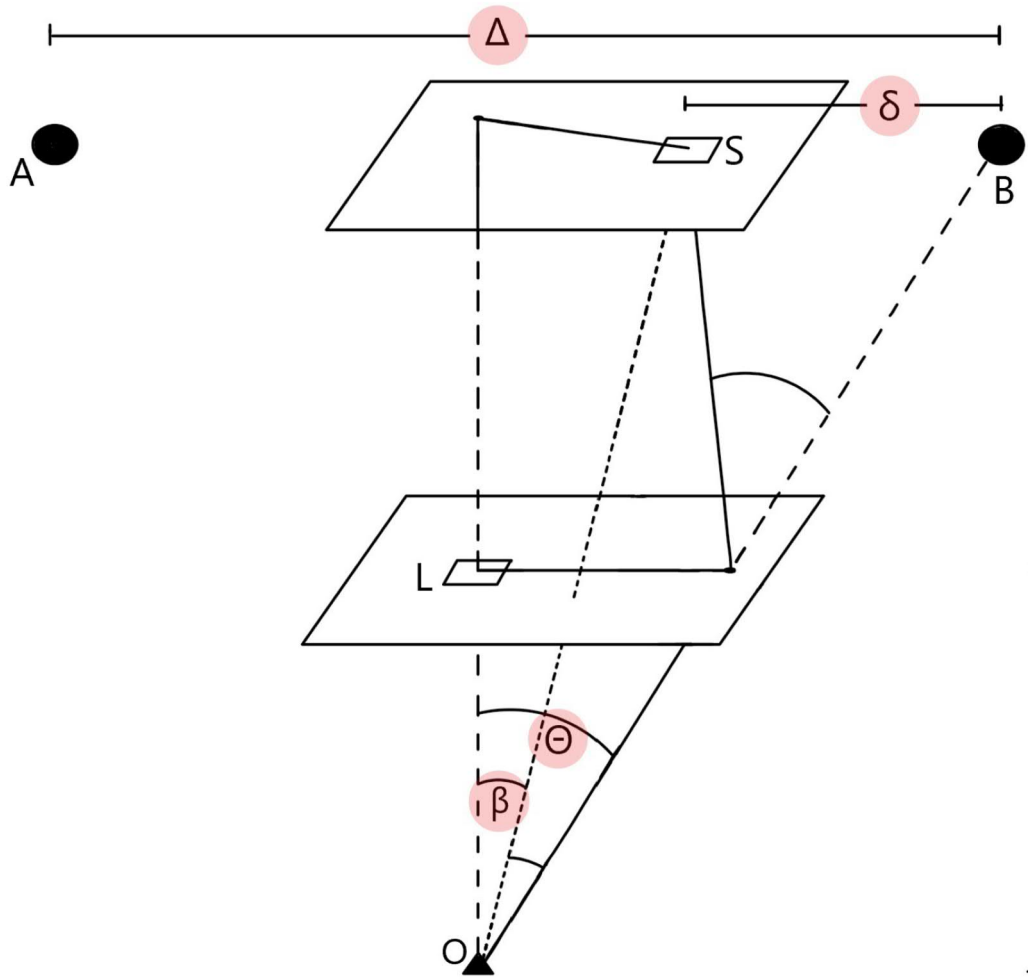


Abb. 44: Schaubild der Linsengeometrie

S = Quelle (QSO 0957+561), L = Gravitationslinse (YGKOW G1), A & B = Abbildungen des Quasars, O = Beobachter

6.1 Abstandsbestimmung der gelinsten Abbildungen

Bei der Bestimmung von Δ, dem Abstand zwischen Abbildung A und Abbildung B von QSO 0957+561, hilft die Betrachtung der folgenden Skizze:

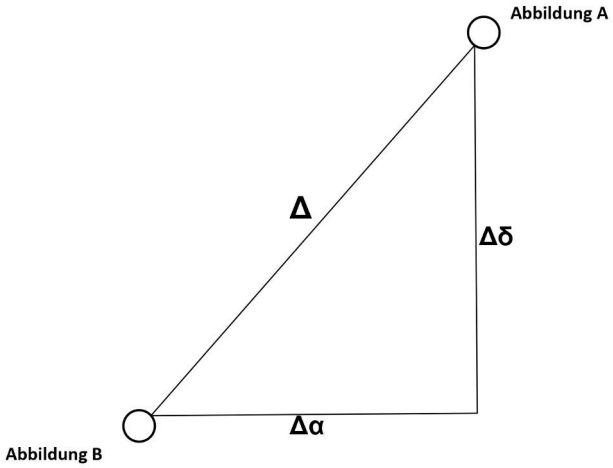


Abb. 45: Skizze zur Berechnung von Δ

Abb. 46: Aufnahme des Quasars

Neben dem zu bestimmenden Δ sind in der Skizze weiterhin die folgenden Parameter zu finden: $\Delta\alpha$ und $\Delta\delta$. Wobei gilt:

$\Rightarrow$ $\Delta\alpha =$ Differenz der Rektaszension beider Abbildungen

$\Rightarrow$ $\Delta\delta =$ Differenz der Deklination beider Abbildungen

Nach dem Satz des Pythagoras lässt sich aus der obigen Skizze folgende Beziehung ableiten:

$$\Delta^2 = \Delta\alpha^2 + \Delta\delta^2$$

$$\Rightarrow \qquad \Delta = \sqrt{\Delta\alpha^2 + \Delta\delta^2}$$

Zu beachten ist, dass der Quasar eine Eigenbewegung (auch “proper motion” oder “Pekuliarbewegung” genannt) besitzt. Darunter versteht man die scheinbare Winkelbewegung eines Objekts in der Himmelsebene. Es gilt:

Eigenbewegung in Rektaszension: $\Delta\alpha = \Delta\alpha \cdot \cos(\delta)$

Eigenbewegung in Deklination: $\Delta\delta = \Delta\delta$

Einsetzen in die Formel ergibt:

$$\Rightarrow \qquad \Delta = \sqrt{(\Delta\alpha \cdot \cos(\delta))^2 + \Delta\delta^2}$$

Einheiten:

$$\Rightarrow \qquad '' = \sqrt{('' \cdot \cos(^\circ))^2 + ''^2}$$

Mithilfe der Software *Astrometrica* lassen sich Deklination und Rektaszension anhand des aufbereiteten Luminanz-Summenbildes von QSO 0957+561 ermitteln. Für die Referenzpositionen der Sterne wurde der Sternkatalog Gaia DR2 verwendet, welcher ca. 1,8 Milliarden von der Raumsonde Gaia kartierte Sternpositionen enthält:

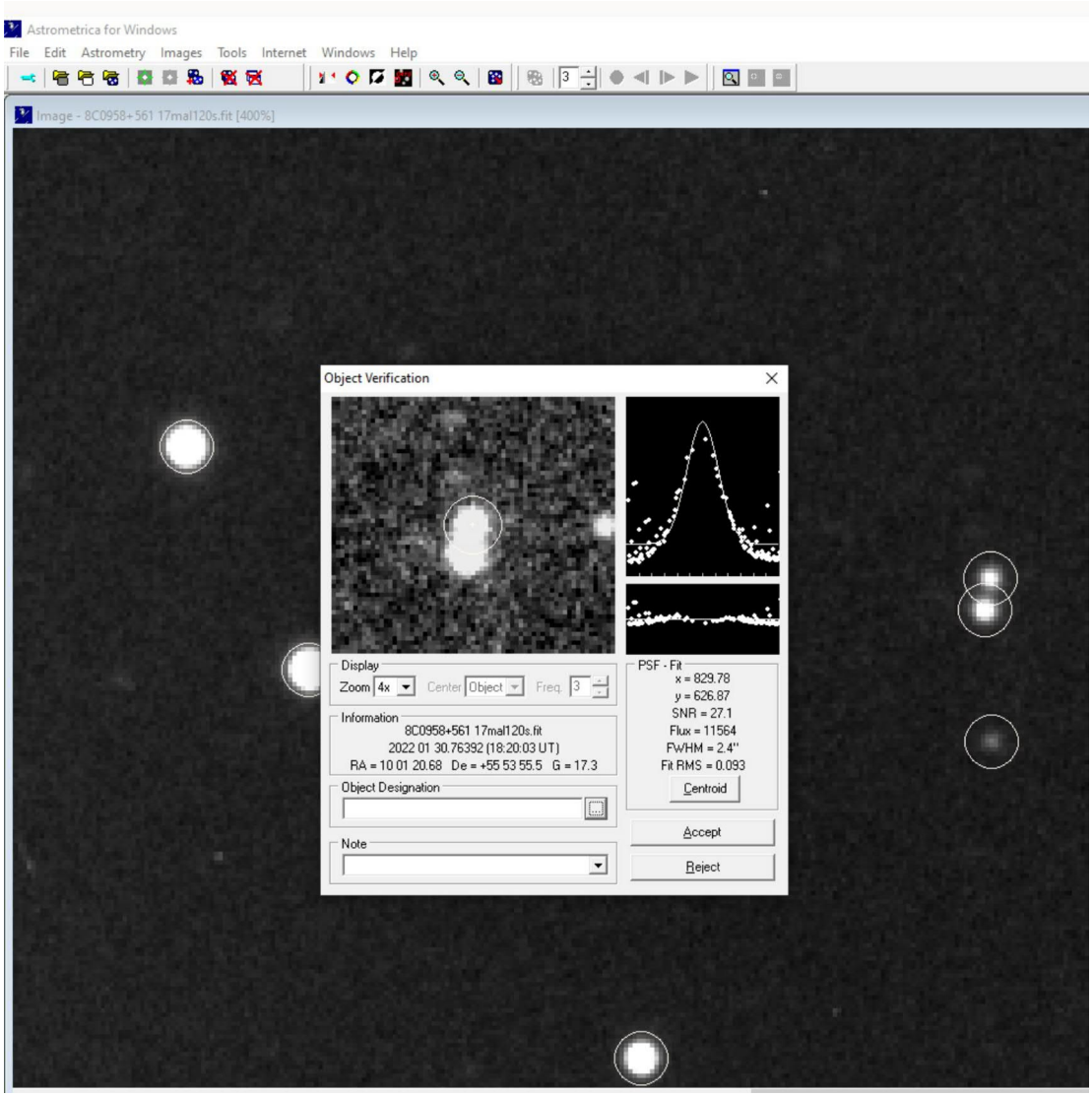


Abb. 47: Bestimmung von Deklination und Rektaszension von QSO 0957+561-A in *Astrometrica*

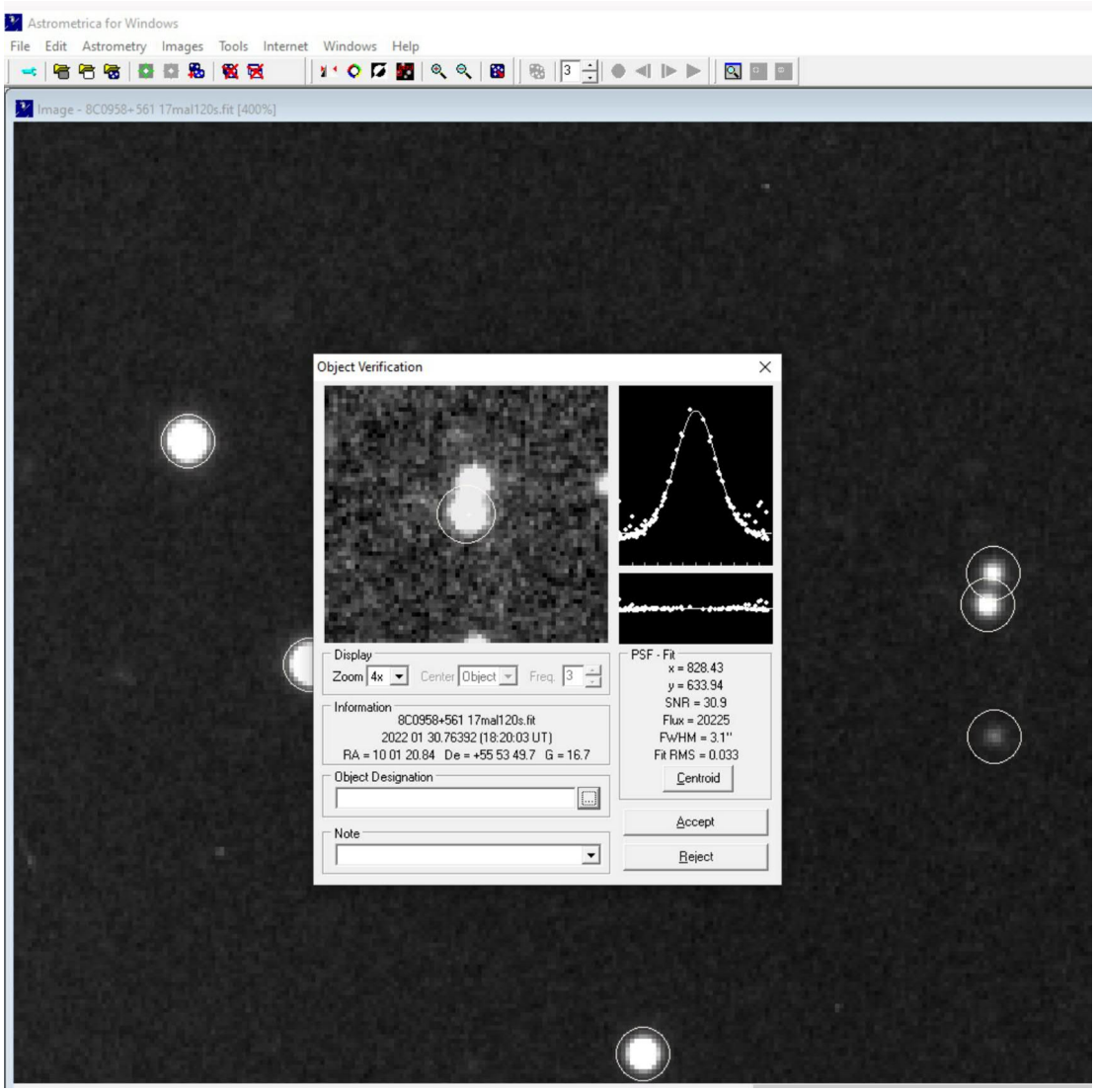


Abb. 48: Bestimmung von Deklination und Rektaszension von QSO 0957+561-B in *Astrometrica*

Es lassen sich die folgenden Ergebnisse ablesen:

$$A: \quad Rektaszension: 10^{h}01^{m}20,68^{s}$$

$$Deklination: 55°53'55{,}5''$$

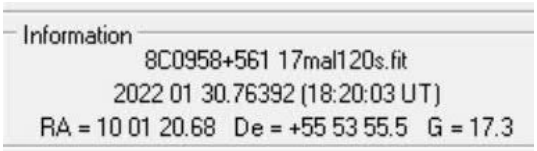


Abb. 49: Messergebnis - Abbildung A

$$B: \quad Rektaszension: 10^{h}01^{m}20,84^{s}$$

$$Deklination: 55°53'49{,}7''$$

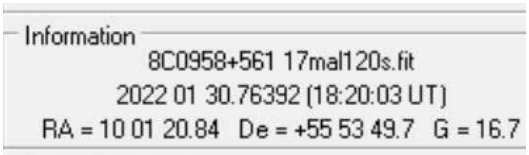


Abb. 50: Messergebnis - Abbildung B

Aus den Koordinaten können nun die einzelnen Parameter berechnet werden:

Berechnung von $\Delta\alpha$:

$$\Delta\alpha = \text{Rektaszension (B)} - \text{Rektaszension (A)}$$

$$\Rightarrow \qquad \Delta\alpha = 10^{\mathsf{h}}01^{\mathsf{m}}20,84^{\mathsf{s}} - 10^{\mathsf{h}}01^{\mathsf{m}}20,68^{\mathsf{s}}$$

$$\Rightarrow \qquad \Delta\alpha = 0,16s = 2{,}4''$$

Berechnung von $\Delta\delta$:

$$\Delta\delta = \text{Deklination (A)} - \text{Deklination (B)}$$

$$\Rightarrow \qquad \Delta\delta = 55°53'55{,}5'' - 55°53'49{,}7''$$

$$\Rightarrow \qquad \Delta\delta = 5{,}8''$$

Berechnung von δ:

$$\delta = \varnothing \text{ Deklination}$$

$$\Rightarrow \qquad \delta = \frac{55°53'55{,}5'' + 55°53'49{,}7''}{2}$$

$$\Rightarrow \qquad \delta = 55°53'52{,}6'' = 55{,}8979°$$

Einsetzen der berechneten Werte in die Ausgangsformel ergibt für Δ:

$$\Delta = \sqrt{(2{,}4'' \cdot \cos(55{,}8979°))^2 + (5{,}8'')^2}$$

$$\Delta \approx 5{,}954''$$

Der ermittelte Wert für den Abstand zwischen Abbildung A und Abbildung B entspricht den Literaturwerten, welche zwischen $5{,}7''$ und $6{,}1''$ liegen[2].

6.1.1 Berechnung des Ablenkungswinkels (Θ)

$$\Theta = \frac{\Delta}{2} \cdot \frac{\pi}{180 \cdot 3600} \; rad$$

$$\Rightarrow \qquad \Theta = \frac{5,954}{2} \cdot \frac{\pi}{180 \cdot 3600} \; rad$$

$$\Rightarrow \qquad \Theta \approx 1,44 \cdot 10^{-5} [rad]$$

[2] [87], [88], [89], [90]

6.2 Bestimmung des Abstands zwischen Abbildung B des Quasars und YGKOW G1

Für die ungefähre Bestimmung von δ ist es von Nutzen, dass das Verhältnis von δ und Δ, wobei Δ der Abstand zwischen Abbildung A und Abbildung B des Quasars und δ der Abstand zwischen Abbildung B und der Galaxie ist, angegeben in jeglicher Einheit stets gleich bleibt. Würde man die Abstände also in Pixel angeben, wäre das Verhältnis identisch zu dem Verhältnis der Abstände in Bogensekunden. Folglich ließe sich der Abstand δ wie folgt berechnen:

$$\frac{\Delta\,(Bogensekunden)}{\delta\,(Bogensekunden)} = \frac{\Delta(Pixel)}{\delta(Pixel)}$$

$$\Leftrightarrow \quad \frac{\delta\,(Bogensekunden)}{\Delta\,(Bogensekunden)} = \frac{\delta\,(Pixel)}{\Delta\,(Pixel)} \qquad | \cdot \Delta\,(Bogensekunden)$$

$$\Leftrightarrow \quad \delta\,(Bogensekunden) = \frac{\delta\,(Pixel)}{\Delta\,(Pixel)} \cdot \Delta\,(Bogensekunden)$$

Da $\Delta\,(Bogensekunden)$ bereits bestimmt wurde, verbleiben als noch zu ermittelnde Messgrößen nur noch die Abstände in Pixel. Diese lassen sich leicht in Photoshop mithilfe des Linealwerkzeugs messen:

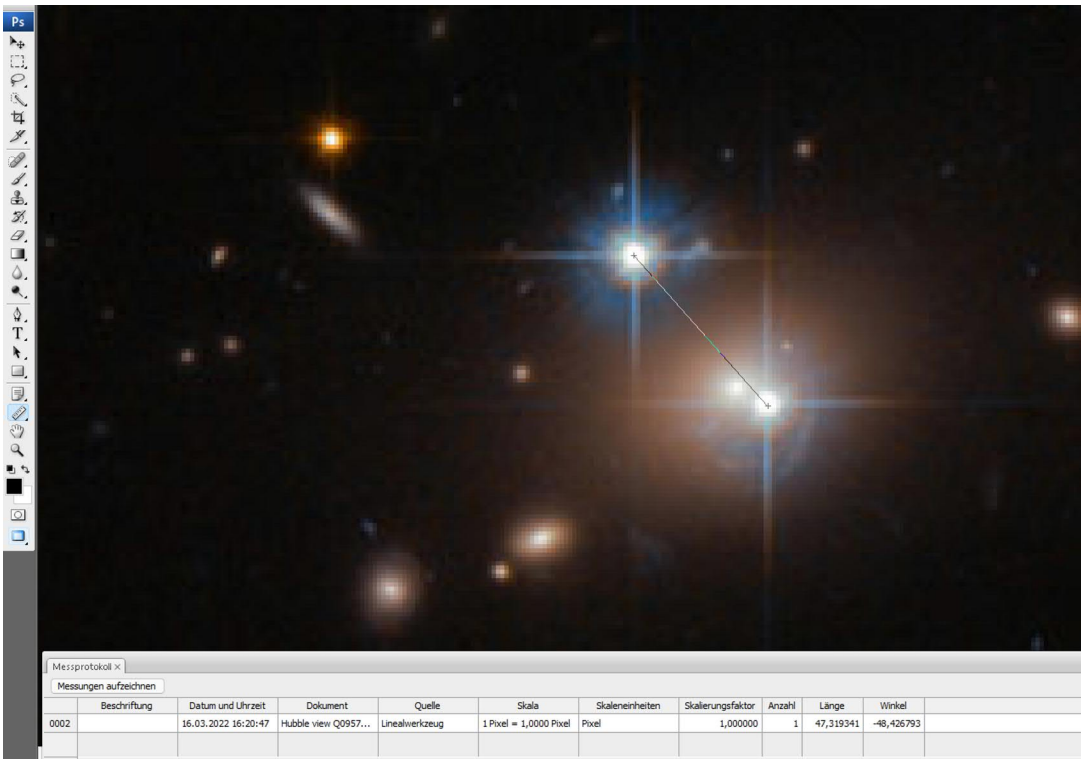


Abb. 51: Vermessung der Entfernung $\Delta\,(Pixel)$ in *Photoshop*

Abb. 52: Vermessung der Entfernung $\delta\,(Pixel)$ in *Photoshop*

Anhand des Messprotokolls lassen sich die Werte für $\Delta\,(Pixel)$ (Rot markiert) und $\delta\,(Pixel)$ (Blau markiert) ablesen:

Datum und Uhrzeit	Dokument	Quelle	Skala	Skaleneinheiten	Skalierungsfaktor	Anzahl	Länge	Winkel
16.03.2022 16:20:47	Hubble view Q0957...	Linealwerkzeug	1 Pixel = 1,0000 Pixel	Pixel	1,000000	1	47,319341	-48,426793
16.03.2022 16:23:36	Hubble view Q0957...	Linealwerkzeug	1 Pixel = 1,0000 Pixel	Pixel	1,000000	1	7,353911	-45,000000

Abb. 53: Messprotokoll

Es ergeben sich die folgenden Werte:

$$\Rightarrow \qquad \Delta\,(Pixel) = 47,319341 \;\; Pixel$$

$$\Rightarrow \qquad \delta\,(Pixel) = 7,353911 \;\; Pixel$$

Nun werden alle Werte in die Formel eingesetzt:

$$\delta = \frac{7,353911\,[Pixel]}{47,319341\,[Pixel]} \cdot 5{,}954''$$

$$\Rightarrow \qquad \delta = 0{,}925\,312\,676\,769\,87''$$

$$\Rightarrow \qquad \delta \approx 0{,}925''$$

6.2.1 Berechnung des Versetzungswinkels zwischen YGKOW G1 und QSO 0957+561 (β)

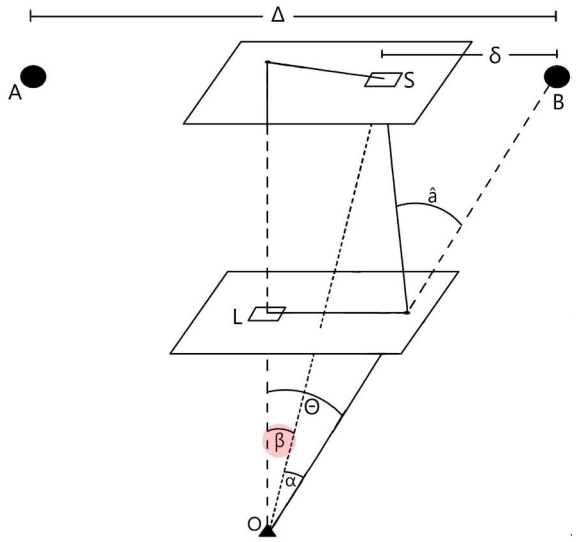


Abb. 54: Schaubild für β

Wie in der Skizze zu erkennen ist, kann β mit der Formel $\beta = \Theta - \alpha$ berechnet werden. Es liegen folgende Werte vor:

$$\Rightarrow \qquad \alpha = 0.925 \cdot \frac{\pi}{180 \cdot 3600}\ rad$$

$$\Rightarrow \qquad \Theta = \frac{5,954}{2} \cdot \frac{\pi}{180 \cdot 3600}\ rad$$

Einsetzen der Werte ergibt für β:

$$\beta = \frac{5,954}{2} \cdot \frac{\pi}{180 \cdot 3600}\ [rad] - 0.925 \cdot \frac{\pi}{180 \cdot 3600}\ [rad]$$

$$\beta \approx 9,95 \cdot 10^{-6}\ [rad]$$

6.3 Massenberechnung von YGKOW G1 bei Annahme eines Einstein-Rings

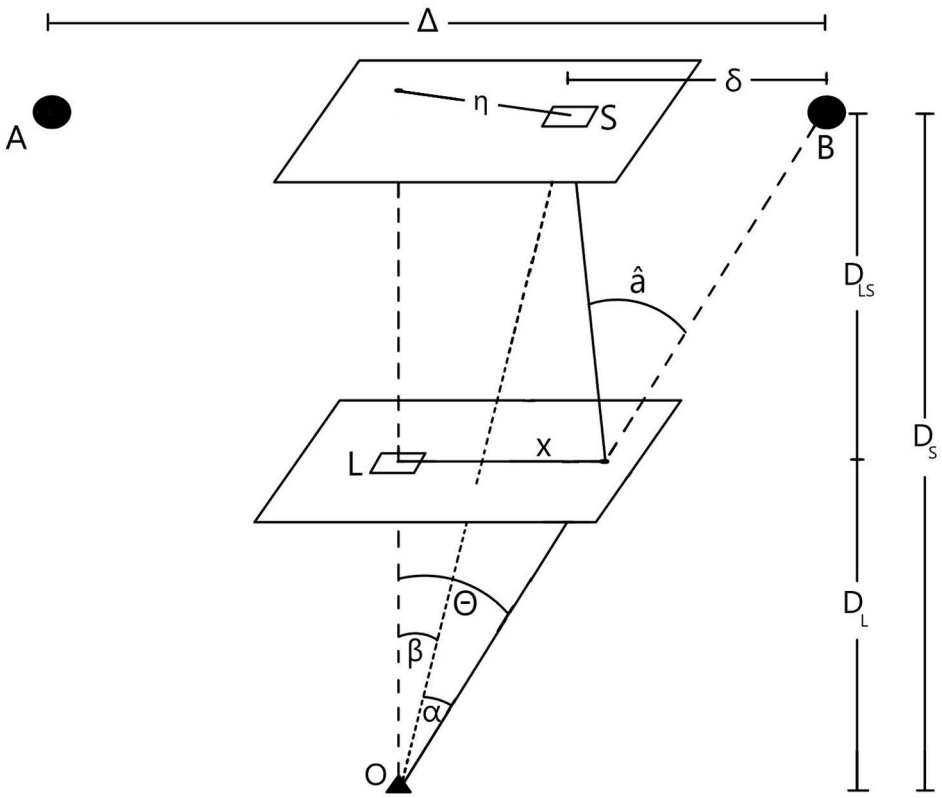


Abb. 55: Skizze des Gravitationslinsen-Systems
S = Quelle (QSO 0957+561), L = Gravitationslinse (YGKOW G1), A & B = Abbildungen des Quasars, O = Beobachter

Bei den Mess-/Beobachtungsgrößen handelt es sich um:

$\Theta =$ Ablenkungswinkel zwischen Quasar und Abbildung B

$\beta =$ Versetzungswinkel von Grav.- Linse und Quasar

$D_{\mathrm{S}} =$ Abstand zwischen Beobachter und Quasar

$D_{\mathrm{L}} =$ Abstand zwischen Beobachter und Grav.- Linse

$D_{\mathrm{LS}} =$ Abstand zwischen Grav.- Linse und Quasar

Bei kosmologischen Entfernungen gilt im Allgemeinen:

$D_{\mathrm{LS}} \neq D_{\mathrm{S}} - D_{\mathrm{L}}$, (Expandierendes Universum)

Nach Einstein gilt für den Winkel, um welchen das Licht beim Passieren einer Linse der Masse M(x) im Abstand x vom Zentrum abgelenkt wird:

$$\hat{a} = \frac{4 \cdot G \cdot M(x)}{c^2 \cdot x} \qquad (1)$$

Nach Abbildung 55 gilt:

$$\beta = \Theta - \alpha$$

Wobei jedoch eine sphärische Form der Linse vorausgesetzt wird. Im Falle einer asymmetrischen Linse muss die vektorielle Schreibweise gewählt werden:

$$\vec{\beta} = \vec{\Theta} - \vec{\alpha}(\vec{\Theta})$$

Weiterhin folgt:

$$\tan(\alpha) = \tfrac{\delta}{D_\mathsf{S}}, \quad \tan(\hat{a}) = \tfrac{\delta}{D_\mathsf{LS}}$$

$$\Leftrightarrow \qquad \tfrac{\tan(\alpha)}{\tan(\hat{a})} = \tfrac{\delta}{D_\mathsf{S}} \cdot \tfrac{D_\mathsf{LS}}{\delta}$$

$$\Leftrightarrow \qquad \tfrac{\alpha}{\hat{a}} = \tfrac{D_\mathsf{LS}}{D_\mathsf{S}} \qquad |\cdot \hat{a}$$

$$\Rightarrow \qquad \alpha = \frac{D_\mathsf{LS}}{D_\mathsf{S}} \cdot \hat{a} \qquad (2)$$

Für kleine Winkel Θ im Bogenmaß folgt außerdem:

$$\tan(\Theta) = \Theta = \tfrac{x}{D_\mathsf{L}} \qquad |\cdot D_\mathsf{L}$$

$$\Rightarrow \qquad x = \Theta \cdot D_\mathsf{L} \qquad (3)$$

$$\beta = \Theta - \alpha \qquad |\text{ Einsetzen von (2)}$$

$$\Leftrightarrow \qquad \beta = \Theta - \frac{D_\mathsf{LS}}{D_\mathsf{S}} \cdot \hat{a} \qquad |\text{ Einsetzen von (1)}$$

$$\Leftrightarrow \qquad \beta = \Theta - \frac{D_\mathsf{LS}}{D_\mathsf{S}} \cdot \frac{4 \cdot G \cdot M(x)}{c^2 \cdot x} \qquad |\text{ Einsetzen von (3)}$$

$$\Rightarrow \qquad \beta = \Theta - \frac{D_\mathsf{LS}}{D_\mathsf{S}} \cdot \frac{4 \cdot G \cdot M(x)}{c^2 \cdot \Theta \cdot D_\mathsf{L}}$$

Wie bereits beschrieben postuliere ich nun für eine ungefähre Annäherung an die tatsächliche Masse der Gravitationslinse, eine symmetrische Anordnung zwischen dem Quasar und der Galaxie. Wie in Abbildung 55 zu erkennen ist, erhält der Winkel β im Falle einer symmetrischen Anordnung den Wert 0. In einem späteren Schritt wird der Versuch einer genaueren Berechnung unter der Betrachtung der tatsächlichen Gegebenheiten folgen. Für $\beta = 0$ ergibt sich:

$$0 = \Theta - \frac{D_{\mathsf{Ls}}}{D_{\mathsf{s}}} \cdot \frac{4 \cdot G \cdot M(x)}{c^2 \cdot \Theta \cdot \mathsf{D_L}}$$

Nach einer Umstellung der Gleichung nach Θ ergibt sich eine Formel für den ebenfalls bereits beschriebenen Einsteinradius:

$$0 = \Theta - \frac{D_{\mathsf{Ls}}}{D_{\mathsf{s}}} \cdot \frac{4 \cdot G \cdot M(x)}{c^2 \cdot \Theta \cdot \mathsf{D_L}} \qquad \Big| \cdot \Theta$$

$$\Leftrightarrow \qquad 0 = \Theta^2 - \frac{D_{\mathsf{Ls}}}{D_{\mathsf{s}}} \cdot \frac{4 \cdot G \cdot M(x)}{c^2 \cdot \mathsf{D_L}} \qquad \Big| + \Theta^2$$

$$\Leftrightarrow \qquad \Theta^2 = \frac{D_{\mathsf{Ls}}}{D_{\mathsf{s}}} \cdot \frac{4 \cdot G \cdot M(x)}{c^2 \cdot \mathsf{D_L}} \qquad \Big| \sqrt{}$$

$$\Leftrightarrow \qquad \Theta = \sqrt{\frac{D_{\mathsf{Ls}}}{D_{\mathsf{s}}} \cdot \frac{4 \cdot G \cdot M(x)}{c^2 \cdot \mathsf{D_L}}}$$

$$\Rightarrow \qquad \Theta_{\mathsf{E}} = \sqrt{\frac{4 \cdot G \cdot M(x)}{c^2 \cdot \mathsf{D_L}} \cdot \frac{D_{\mathsf{Ls}}}{D_{\mathsf{S}}}}$$

$\Theta_{\mathsf{E}} =$ Einstein-Radius einer ringförmig gelinsten Quelle

Wie sich erkennen lässt, ist der Radius des Einsteinrings abhängig von der Masse der Gravitationslinse. Je massereicher diese ist, desto größer ist der Radius des Einsteinrings. Er hängt außerdem von der Entfernung zwischen dem Beobachter, dem linsenden Objekt und der Hintergrundquelle ab.

In einem weiteren Schritt lässt sich durch erneutes Umformen eine Formel für die Masse der Galaxie aufstellen:

$$\Theta_{\mathsf{E}}{}^2 = \frac{4 \cdot G \cdot M(x)}{c^2 \cdot \mathsf{D_L}} \cdot \frac{D_{\mathsf{LS}}}{D_{\mathsf{S}}} \qquad \Big| \cdot (c^2 \cdot D_{\mathsf{L}})$$

$$\Leftrightarrow \qquad \mathsf{c}^2 \cdot \mathsf{D_L} \cdot \Theta_{\mathsf{E}}{}^2 = 4 \cdot G \cdot M(x) \cdot \frac{D_{\mathsf{LS}}}{D_{\mathsf{S}}} \qquad \Big| \cdot D_{\mathsf{S}}$$

$$\Leftrightarrow \qquad \mathsf{c}^2 \cdot D_{\mathsf{S}} \cdot \mathsf{D_L} \cdot \Theta_{\mathsf{E}}{}^2 = 4 \cdot G \cdot M(x) \cdot D_{\mathsf{LS}} \qquad \Big| \div (4 \cdot G \cdot D_{\mathsf{LS}})$$

$$\Leftrightarrow \qquad \frac{\mathsf{c}^2 \cdot D_{\mathsf{S}} \cdot \mathsf{D_L} \cdot \Theta_{\mathsf{E}}{}^2}{4 \cdot G \cdot D_{\mathsf{LS}}} = M(x)$$

$$\Rightarrow \qquad M(x) = \frac{\mathsf{c}^2 \cdot D_{\mathsf{S}} \cdot \mathsf{D_L} \cdot \Theta_{\mathsf{E}}{}^2}{4 \cdot G \cdot D_{\mathsf{LS}}}$$

Die Bestimmung des Wertes von Θ wurde bereits durchgeführt. Für die restlichen Parameter werden Literaturwerte aus Recherchen übernommen[3]:

$$\Rightarrow \qquad \Theta = \frac{5,954}{2} \cdot \frac{\pi}{180 \cdot 3600} \; rad$$

$$\Rightarrow \qquad G = 6,67430 \cdot 10^{-11} \; \frac{m^3}{kg \cdot s^2}$$

$$\Rightarrow \qquad c = 2,99792458 \cdot 10^{8} \; \frac{m}{s}$$

$$\Rightarrow \qquad D_{\mathsf{S}} = 8,7 \cdot 10^{9} \; Lj \;\; \Rightarrow \;\; 8,230836 \cdot 10^{25} \; m$$

$$\Rightarrow \qquad D_{\mathsf{L}} = 3,7 \cdot 10^{9} \; Lj \;\; \Rightarrow \;\; 3,50047 \cdot 10^{25} \; m$$

$$\Rightarrow \qquad D_{\mathsf{LS}} = 5 \cdot 10^{9} \; Lj \;\; \Rightarrow \;\; 4,730365 \cdot 10^{25} \; m$$

[3] D_L & D_S aus [91],[92],[93] ; c aus [94] ; G aus [95]

Einsetzen der Werte ergibt für die Masse von YGKOW G1 folgende Gleichung:

$$M = \frac{\left(2,99792458 \cdot 10^8\right)^2 \left[\frac{m^2}{s^2}\right] \cdot 8,230836 \cdot 10^{25}\,[m] \cdot 3,50047 \cdot 10^{25}\,[m] \cdot \left(\frac{5{,}954}{2} \cdot \frac{\pi}{180 \cdot 3600}\right)^2 [rad]}{4 \cdot 6,67430 \cdot 10^{-11} \left[\frac{m^3}{kg \cdot s^2}\right] \cdot 4,730365 \cdot 10^{25}\,[m]}$$

$$M \approx \; 4,27 \cdot 10^{42} \;\; kg$$

$$M \approx \; 2,15 \cdot 10^{12} \;\; M_\odot$$ [4]

Es ergibt sich nun eine ungefähre Masse für YGKOW G1 von $2,15 \cdot 10^{12}$ Sonnenmassen. Im Vergleich dazu beträgt die Masse der Milchstraße ungefähr $1,4 \cdot 10^{12} \;\; M_\odot$ bis $2 \cdot 10^{12} \;\; M_\odot$[5]. Aufgrund der großen Ähnlichkeit dieser Werte lässt sich sagen, dass der berechnete Wert im Bereich des Möglichen liegt. Es lassen sich außerdem Vermutungen anstellen, dass sich YGKOW G1 auch bezogen auf die Größe der Milchstraße ähneln könnte.

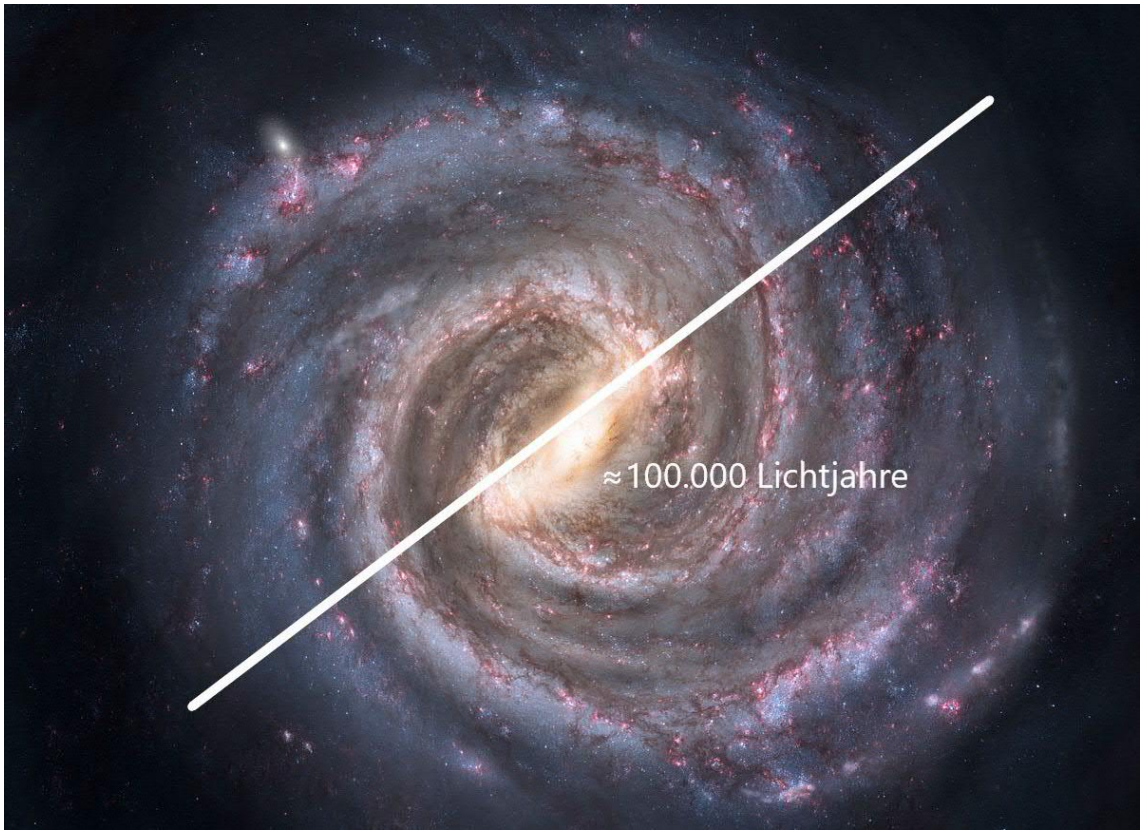


Abb. 56: Künstlerische Darstellung der Milchstraße

[4] Astronomische Maßeinheit, die als die Masse der Sonne definiert wird: $M_\odot \approx 1,989 \cdot 10^{30}$ kg
[5] [55]

6.4 Massenberechnung unter Annahme einer asymmetrischen Anordnung

Damit eine um den berechneten Wert für β erweiterte Berechnung der Masse durchgeführt werden kann, muss eine weitere Massenformel für $\beta \neq 0$ aufgestellt werden. Es wird also nicht mehr von einem Einstein-Ring, sondern von einer asymmetrischen Anordnung ausgegangen, was auch den tatsächlichen Gegebenheiten entspricht. Im Weiteren wird außerdem erläutert, warum dieser Wert ebenfalls, obgleich er eventuell genauer ist, nur eine Annäherung darstellen kann. Für $\beta \neq 0$ lässt sich die Massenformel der Galaxie wie folgt aufstellen:

$$\beta = \Theta - \frac{D_{\mathsf{Ls}}}{D_{\mathsf{s}}} \cdot \frac{4 \cdot G \cdot M(x)}{c^2 \cdot \Theta \cdot \mathsf{D_L}} \qquad | \cdot \Theta$$

$$\Leftrightarrow \qquad \beta \cdot \Theta = \Theta^2 - \frac{D_{\mathsf{Ls}}}{D_{\mathsf{s}}} \cdot \frac{4 \cdot G \cdot M(x)}{c^2 \cdot \mathsf{D_L}}$$

$$\Leftrightarrow \qquad \beta \cdot \Theta = \Theta^2 - \frac{D_{\mathsf{Ls}}}{D_{\mathsf{s}}} \cdot \frac{4 \cdot G}{c^2 \cdot \mathsf{D_L}} \cdot M(x) \qquad \left| \frac{D_{\mathsf{Ls}}}{D_{\mathsf{s}}} \cdot \frac{4 \cdot G}{c^2 \cdot \mathsf{D_L}} = const. = K \right.$$

$$\Leftrightarrow \qquad \beta \cdot \Theta = \Theta^2 - K \cdot M(x) \qquad | - \beta \cdot \Theta$$

$$\Leftrightarrow \qquad 0 = \Theta^2 - K \cdot M(x) - \beta \cdot \Theta \qquad | + K \cdot M(x)$$

$$\Leftrightarrow \qquad K \cdot M(x) = \Theta^2 - \beta \cdot \Theta \qquad | \div K$$

$$\Leftrightarrow \qquad M(x) = \frac{\Theta^2 - \beta \cdot \Theta}{K} \qquad \left| K = \frac{4 \cdot G \cdot D_{\mathsf{LS}}}{c^2 \cdot D_{\mathsf{S}} \cdot D_{\mathsf{L}}} \right.$$

$$\Leftrightarrow \qquad M(x) = \Theta^2 - \beta \cdot \Theta \cdot \frac{c^2 \cdot D_{\mathsf{S}} \cdot D_{\mathsf{L}}}{4 \cdot G \cdot D_{\mathsf{LS}}}$$

$$\Rightarrow \qquad M(x) = \frac{(\Theta^2 - \beta \cdot \Theta) \cdot c^2 \cdot D_{\mathsf{S}} \cdot D_{\mathsf{L}}}{4 \cdot G \cdot D_{\mathsf{LS}}}$$

Die Werte von β und Θ wurden bereits bestimmt. Für die restlichen Parameter werden erneut Literaturwerte übernommen:

$$\Rightarrow \qquad \beta = \frac{5,954}{2} \cdot \frac{\pi}{180 \cdot 3600} \ rad - 0.925 \cdot \frac{\pi}{180 \cdot 3600} \ rad$$

$$\Rightarrow \qquad \Theta = \frac{5,954}{2} \cdot \frac{\pi}{180 \cdot 3600} \ rad$$

$$\Rightarrow \qquad G = 6,67430 \cdot 10^{-11} \ \frac{m^3}{kg \cdot s^2}$$

$$\Rightarrow \qquad c = 2,99792458 \cdot 10^8 \ \frac{m}{s}$$

$$\Rightarrow \qquad D_S = 8,7 \cdot 10^9 \ Lj \ \Rightarrow \ 8,230836 \cdot 10^{25} \ m$$

$$\Rightarrow \qquad D_L = 3,7 \cdot 10^9 \ Lj \ \Rightarrow \ 3,50047 \cdot 10^{25} \ m$$

$$\Rightarrow \qquad D_{LS} = 5 \cdot 10^9 \ Lj \ \Rightarrow \ 4,730365 \cdot 10^{25} \ m$$

Einsetzen der Werte ergibt:

$$M = \frac{\left(\left(\frac{5,954}{2} \cdot \frac{\pi}{180 \cdot 3600}\right)^2 [rad] - \left(\frac{5,954}{2} \cdot \frac{\pi}{180 \cdot 3600} - 0.925 \cdot \frac{\pi}{180 \cdot 3600}\right) [rad] \cdot \frac{5,954}{2} \cdot \frac{\pi}{180 \cdot 3600} [rad]\right)}{4 \cdot 6,67430 \cdot 10^{-11} \left[\frac{m^3}{kg \cdot s^2}\right]}$$

$$\cdot \ \frac{\left(2,99792458 \cdot 10^8\right)^2 \left[\frac{m^2}{s^2}\right] \cdot 8,230836 \cdot 10^{25} [m] \cdot 3,50047 \cdot 10^{25} [m]}{4,730365 \cdot 10^{25} [m]}$$

$$M \approx \ 1,33 \cdot 10^{42} \ kg$$

$$M \approx \ 6,69 \cdot 10^{11} \ M_\odot$$

Der Grund, weshalb dieser Wert ebenfalls nicht als genauer Wert für die Masse von YGKOW G1 betrachtet werden darf, liegt darin, dass obwohl die asymmetrische Anordnung beachtet wurde, die tatsächliche Position des Quasars immer noch unbekannt bleibt. Es lässt sich jedoch festhalten, dass eine ungefähre Abschätzung der Masse der Galaxie durchgeführt werden konnte und dass beide berechneten Werte im Bereich des Möglichen liegen.

Abbildungsverzeichnis

1 Sternentstehungsgebiet Lupus 3. Quelle: https://www.eso.org/public/germany/images/eso1303a/ 4
2 Darstellung einer Akkretionsscheibe. Quelle: https://www.eso.org/public/germany/images/eso1436f/ 4
3 Schritt 1 der Proton-Proton-Reaktion. Quelle: https://de.wikipedia.org/wiki/Proton-Proton-Reaktion 5
4 Schritt 2 der Proton-Proton-Reaktion. Quelle: https://de.wikipedia.org/wiki/Proton-Proton-Reaktion 5
5 Schritt 3 der Proton-Proton-Reaktion. Quelle: https://de.wikipedia.org/wiki/Proton-Proton-Reaktion 5
6 Das Hertzsprung-Russel-Diagramm. Quelle: https://sternentstehung.de/das-hertzsprung-russell-diagramm-erklaert 6
7 Die Schichten des Schalenbrennens. Quelle: https://de.wikipedia.org/wiki/Schalenbrennen 7
8 Abbildung des Krebsnebels. Quelle: https://de.wikipedia.org/wiki/Krebsnebel 8
9 Schwarzes Loch im Zentrum von M87. Quelle: https://www.nasa.gov/mission_pages/chandra/news/black-hole-image-makes-history 8
10 Künstlerische Darstellung eines Supermassiven Schwarzen Loches. Quelle: https://www.weltderphysik.de/gebiet/universum/nachrichten/2011/gasstroeme-lassen-sternhaufen-kollabieren/ 9
11 Gekrümmte Raumzeit. Quelle: https://www.sciencenews.org/article/strength-gravity-gravitational-constant-newton 10
12 Die Schwarzschild-Metrik. Quelle: https://www.seekpng.com/ipng/u2q8q8e6u2e6u2r5_240-240-pixels-diagram-the-structure-of/ 10
13 Darstellung der Kerr-Metrik. Quelle: https://sky-lights.org/2020/11/30/qa-how-black-holes-spin/ 11
14 Künstlerische Darstellung eines Quasars. Quelle: https://www.scinexx.de/news/kosmos/hellster-quasar-des-kosmos-entdeckt/ 12
15 Expansion des Universums. Quelle: https://www.jpl.nasa.gov/infographics/the-big-bang-and-expansion-of-the-universe 13
16 Veranschaulichung des Gravitationslinseneffekts. Quelle: https://www.nzz.ch/wissenschaft/einsteinring-bestaetigt-einstein-ld.1397240 14
17 Aufnahmeteleskop C14 Edge HD. Quelle: Privatsternwarte Bernd Koch 15
18 Datenblatt zum Teleskop (C14 Edge HD) 15
19 Kamera mit Filterrad. Quelle: http://www.sbig.de/sbig-history/stt-8300/STT8300_051612.pdf 16

20 Datenblatt zur Kamera (STT 8300M) 16
21 Datenblatt zum Filterrad (FW8-8300) 16
22 Aufnahme per *AnyDesk* 17
23 Vorbereitung für die Flat-Aufnahmen 17
24 Hinzufügen der Darks mit *Set Calibration* 18
25 Hinzufügen der Flats mit *Set Calibration* 18
26 Erstellung der Masters mit *Replace w/ Masters* 19
27 Erzeugung eines Luminanz-Summenbilds mit der Funktion *Stack* . . . 19
28 Fertiges Luminanz-Summenbild von QSO 0957+561 20
29 Alignment der Luminanz und RGB-Bilder 20
30 Stacking der ausgerichteten Bilder 21
31 Luminanz-Bild 21
32 RGB-Bild 21
33 Aufteilung des RGB-Bilds in Farbkomponenten 22
34 Bearbeitung der heißen Pixel 22
35 Erzeugung eines LRGB-Bilds 23
36 Bearbeitung der Farbstiche 23
37 Tonwertkorrektur in Photoshop 24
38 Retusche der Fehlerpixel 24
39 Fertiges LRGB-Summenbild von QSO 0957+561 25
40 Vergrößerter Ausschnitt des LRGB-Summenbilds 25
41 Hubble-Aufnahme von QSO 0957+561. Quelle: https://scitechdaily.com/hubble-views-double-quasar-qso-0957561/ 26
42 Gespiegelter Ausschnitt des LRGB-Summenbilds 26
43 Spektrum von QSO 0957+561(A+B). Quelle: http://www.astrosurf.com/buil/galaxies/data4/poster_twin_quasar.png 26

44 Schaubild der Linsengeometrie 27
45 Skizze zur Berechnung von Δ 28
46 Aufnahme des Quasars 28
47 Bestimmung von Deklination und Rektaszension von QSO 0957+561-A in *Astrometrica* 29
48 Bestimmung von Deklination und Rektaszension von QSO 0957+561-B in *Astrometrica* 30
49 Messergebnis - Abbildung A 30
50 Messergebnis - Abbildung B 30
51 Vermessung der Entfernung $\Delta\,(Pixel)$ in *Photoshop* 32
52 Vermessung der Entfernung $\delta\,(Pixel)$ in *Photoshop* 33
53 Messprotokoll 33
54 Schaubild für β 34
55 Skizze des Gravitationslinsen-Systems 35
56 Künstlerische Darstellung der Milchstraße. Quelle: https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Milky_Way_Galaxy.jpg 39

Literaturverzeichnis

[1] https://www.spektrum.de/lexikon/physik/quasare/11915. zuletzt geöffnet: 17-05-2022.

[2] https://www.spektrum.de/lexikon/astronomie/gravitationslinse/154. zuletzt geöffnet: 17-05-2022.

[3] http://www.der-kosmos.de/relativitaetstheorie.htm. zuletzt geöffnet: 17-05-2022.

[4] https://en.wikipedia.org/wiki/Twin_Quasar. zuletzt geöffnet: 17-05-2022.

[5] http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/sim-id?Ident=Q0957%2B561. zuletzt geöffnet: 17-05-2022.

[6] http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/sim-id?Ident=YGKOW+G1. zuletzt geöffnet: 17-05-2022.

[7] https://www.nzz.ch/wissenschaft/einsteinring-bestaetigt-einstein-ld.1397240. zuletzt geöffnet: 17-05-2022.

[8] https://universe-review.ca/F04-galactic-cluster04.htm. zuletzt geöffnet: 17-05-2022.

[9] https://www.jpan.wiki/wiki/en/YGKOW_G1. zuletzt geöffnet: 17-05-2022.

[10] https://www.spektrum.de/astrowissen/lexdt_q04.html. zuletzt geöffnet: 17-05-2022.

[11] https://kknews.cc/news/p4ql4ae.html. zuletzt geöffnet: 17-05-2022.

[12] https://infoscience.epfl.ch/record/232582. zuletzt geöffnet: 17-05-2022.

[13] https://astro.uni-bonn.de/~deboer/quasar/quasarJ1342-d.html. zuletzt geöffnet: 17-05-2022.

[14] https://docplayer.org/54221670-Das-hubble-gesetz-und-die-dritte-dimension-des-universums.html. zuletzt geöffnet: 17-05-2022.

[15] https://www.weltderphysik.de/gebiet/universum/nachrichten/2009/genau-gemessen-die-expansionsrate-des-kosmos. zuletzt geöffnet: 17-05-2022.

[16] https://de.wikipedia.org/wiki/Hubble-Konstante#Hubble-Diagramm. zuletzt geöffnet: 17-05-2022.

[17] https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/piuz.202270105. zuletzt geöffnet: 17-05-2022.

[18] https://www.einstein-online.info/explandict/sonnenmasse/. zuletzt geöffnet: 17-05-2022.

[19] https://www.astrofotoblog.de/2020/10/18/astronomische-koordinatensysteme-7-das-aequatoriale-system/. zuletzt geöffnet: 17-05-2022.

[20] https://research.ast.cam.ac.uk/lensedquasars/indiv/Q0957+561.html. zuletzt geöffnet: 17-05-2022.

[21] https://sternentstehung.de/stellare-kernfusion-das-wasserstoffbrennen#:~:text=Die%20Energiequelle%2C%20die%20einen%20Stern,seinem%20Inneren%20Atomkerne%20miteinander%20fusionieren.. zuletzt geöffnet: 17-05-2022.

[22] https://www.weltderphysik.de/gebiet/universum/nachrichten/2015/universelles-gesetz-fuer-kosmischen-materiezustrom/. zuletzt geöffnet: 17-05-2022.

[23] https://astro.uni-bonn.de/~deboer/praktikant/sternent.html. zuletzt geöffnet: 17-05-2022.

[24] ttps://www.lernhelfer.de/schuelerlexikon/chemie-abitur/artikel/die-entwicklung-der-sterne#. zuletzt geöffnet: 17-05-2022.

[25] https://www.volkssternwarte-bonn.de/wordpress/sternentstehung-zuendung-der-kernfusion/. zuletzt geöffnet: 17-05-2022.

[26] http://www.fornoff.homepage.t-online.de/Qastro/4Sterne/sternentwicklung-Hauptreihe.htm. zuletzt geöffnet: 17-05-2022.

[27] https://wissenstexte.de/physik/sterne.htm. zuletzt geöffnet: 17-05-2022.

[28] https://www.leifiphysik.de/astronomie/fixsterne/grundwissen/hauptreihenstadium. zuletzt geöffnet: 17-05-2022.

[29] https://de.wikipedia.org/wiki/Proton-Proton-Reaktion. zuletzt geöffnet: 17-05-2022.

[30] https://www.hzdr.de/db/Cms?pOid=10473&pNid=0. zuletzt geöffnet: 17-05-2022.

[31] https://www.mpifr-bonn.mpg.de/188614/finn_jaekel.pdf. zuletzt geöffnet: 17-05-2022.

[32] http://www.andromedagalaxie.de/html/sterne_hrd.htm. zuletzt geöffnet: 17-05-2022.

[33] https://scienceblogs.de/astrodicticum-simplex/2010/07/21/vom-leben-und-sterben-der-sterne-das-hertzsprungrusselldiagramm/. zuletzt geöffnet: 17-05-2022.

[34] https://sternentstehung.de/das-hertzsprung-russell-diagramm-erklaert. zuletzt geöffnet: 17-05-2022.

[35] https://physik.cosmos-indirekt.de/Physik-Schule/Kohlenstoffbrennen. zuletzt geöffnet: 17-05-2022.

[36] https://spiegato.com/de/was-ist-neonbrennen. zuletzt geöffnet: 17-05-2022.

[37] https://www.mpifr-bonn.mpg.de/forschung/fundamental/neutronensterne. zuletzt geöffnet: 17-05-2022.

[38] https://www.spektrum.de/lexikon/astronomie/schwarzschild-loesung/431. zuletzt geöffnet: 17-05-2022.

[39] https://www.spektrum.de/lexikon/astronomie/singularitaet/437. zuletzt geöffnet: 17-05-2022.

[40] https://studyflix.de/ingenieurwissenschaften/schwarze-locher-3871. zuletzt geöffnet: 17-05-2022.

[41] https://de.wikipedia.org/wiki/Ereignishorizont#:~:text=Ein%20Ereignishorizont%20ist%20in%20der,sich%20diesseits%20der%20Grenzfl%C3%A4che%20befinden.. zuletzt geöffnet: 17-05-2022.

[42] https://www.spektrum.de/astrowissen/astro_sl_schw.html#schw. zuletzt geöffnet: 17-05-2022.

[43] https://www.spektrum.de/lexikon/philosophie/raum-zeit-kontinuum/1727. zuletzt geöffnet: 17-05-2022.

[44] https://de.wikipedia.org/wiki/Allgemeine_Relativit%C3%A4tstheorie. zuletzt geöffnet: 17-05-2022.

[45] https://www.weltderphysik.de/gebiet/universum/schwarze-loecher/ereignishorizont/. zuletzt geöffnet: 17-05-2022.

[46] https://www.mpifr-bonn.mpg.de/607301/black-holes. zuletzt geöffnet: 17-05-2022.

[47] https://www.scinexx.de/news/kosmos/schwarzes-loch-torpediert-theorie/. zuletzt geöffnet: 17-05-2022.

[48] https://de.wikipedia.org/wiki/Schwarzes_Loch#18._Jahrhundert. zuletzt geöffnet: 17-05-2022.

[49] https://astro.uni-bonn.de/~deboer/quasar/quasarJ1342-d.html#:~:text=%C3%9Cber%20die%20Erzeugung%20eines%20Quasars,das%20Loch%20als%20%C3%9Cberrest%20zur%C3%BCckbleibt. zuletzt geöffnet: 17-05-2022.

[50] https://www.spektrum.de/lexikon/physik/schwarzschild-radius/12986. zuletzt geöffnet: 17-05-2022.

[51] https://www.spektrum.de/astrowissen/astro_sl_rel.html. zuletzt geöffnet: 17-05-2022.

[52] https://de.wikipedia.org/wiki/Schwarzes_Loch#Primordiale_Schwarze_L%C3%B6cher. zuletzt geöffnet: 17-05-2022.

[53] https://www.spektrum.de/lexikon/astronomie/stellare-schwarze-loecher/457#:~:text=Schwarze%20L%C3%B6cher%20treten%20auf%20sehr,drei%20und%20etwa%20hundert%20Sonnenmassen.. zuletzt geöffnet: 17-05-2022.

[54] https://www.spektrum.de/lexikon/astronomie/quasar/382. zuletzt geöffnet: 17-05-2022.

[55] https://www.mpg.de/388772/forschungsSchwerpunkt1#:~:text=Im%20Jahre%201999%20ermittelten%20Astronomen,2%C3%971012%20Sonnenmassen.. zuletzt geöffnet: 17-05-2022.

[56] https://www.fr.de/wissen/weltall-schwarzes-loch-wovon-sich-schwarze-loecher-fruehen-universum-ernaehrten-zr-13357069.html. zuletzt geöffnet: 17-05-2022.

[57] https://www.mpg.de/16477831/0222-astr-das-am-weitesten-entfernte-radio-leuchtfeuer-im-fruehen-universum-150980-x. zuletzt geöffnet: 17-05-2022.

[58] https://www.mpg.de/6929036/mpia_jb_20121. zuletzt geöffnet: 17-05-2022.

[59] https://www.deutschlandfunk.de/auch-schwarze-loecher-haben-mal-klein-angefangen-100.html. zuletzt geöffnet: 17-05-2022.

[60] https://scienceblogs.de/astrodicticum-simplex/2015/01/19/wieso-befindet-sich-im-zentrum-jeder-galaxie-ein-riesiges-schwarzes-loch/. zuletzt geöffnet: 17-05-2022.

[61] https://www.weltderphysik.de/gebiet/universum/nachrichten/2011/gasstroeme-lassen-sternhaufen-kollabieren/. zuletzt geöffnet: 17-05-2022.

[62] https://www.max-wissen.de/max-hefte/techmax-26-schwarzes-loch/. zuletzt geöffnet: 17-05-2022.

[63] https://www.mpg.de/13309037/interview-zensus-eht. zuletzt geöffnet: 17-05-2022.

[64] https://www.spektrum.de/lexikon/astronomie/ergosphaere/109. zuletzt geöffnet: 17-05-2022.

[65] https://www.spektrum.de/lexikon/astronomie/jet/210. zuletzt geöffnet: 17-05-2022.

[66] https://www.spektrum.de/lexikon/astronomie/kerr-loesung/219. zuletzt geöffnet: 17-05-2022.

[67] https://www.spektrum.de/lexikon/astronomie/photonenorbit/342. zuletzt geöffnet: 17-05-2022.

[68] https://www.meteorologiaenred.com/de/cuasar-caracteristicas-y-propiedades.html. zuletzt geöffnet: 17-05-2022.

[69] https://www.mpifr-bonn.mpg.de/473955/suw97. zuletzt geöffnet: 17-05-2022.

[70] http://www.sbig.de/sbig-archiv-2020/stt-8300/stt-8300.htm. zuletzt geöffnet: 17-05-2022.

[71] https://www.celestron.de/ce_de/edgehd-14-ota.html. zuletzt geöffnet: 17-05-2022.

[72] https://www.spektrum.de/astrowissen/downloads/Web-Artikel/SchwarzeLoecher_AMueller2007.pdf. zuletzt geöffnet: 17-05-2022.

[73] https://academic.oup.com/mnras/article/352/4/1390/1077457?login=true. zuletzt geöffnet: 17-05-2022.

[74] http://spiff.rit.edu/classes/phys240/lectures/grav_lens/grav_lens.html. zuletzt geöffnet: 17-05-2022.

[75] http://pages.astronomy.ua.edu/keel/agn/q0957.html. zuletzt geöffnet: 17-05-2022.

[76] http://spiff.rit.edu/classes/phys240/lectures/grav_lens/einstein_1a.jpg. zuletzt geöffnet: 17-05-2022.

[77] https://www.researchgate.net/publication/234392597_Microlensing_on_different_timescales_in_the_lightcurves_of_QSO_0957561_AB. zuletzt geöffnet: 17-05-2022.

[78] https://adsabs.harvard.edu/full/1980ApJ...241..507Y. zuletzt geöffnet: 17-05-2022.

[79] https://lweb.cfa.harvard.edu/~rschild/discovery.html. zuletzt geöffnet: 17-05-2022.

[80] https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0004-637X/711/1/246. zuletzt geöffnet: 17-05-2022.

[81] https://www.aanda.org/articles/aa/pdf/2021/10/aa39854-20.pdf. zuletzt geöffnet: 17-05-2022.

[82] https://www.researchgate.net/publication/222711934_The_Host_Galaxy_of_the_Lensed_Quasar_Q0957561. zuletzt geöffnet: 17-05-2022.

[83] http://webdoc.sub.gwdg.de/ebook/dissts/Potsdam/Gil2004.pdf. zuletzt geöffnet: 17-05-2022.

[84] https://aip.scitation.org/doi/pdf/10.1063/1.40415. zuletzt geöffnet: 17-05-2022.

[85] https://iopscience.iop.org/article/10.1086/309528/pdf. zuletzt geöffnet: 17-05-2022.

[86] https://2019.qmplus.qmul.ac.uk/mod/resource/view.php?id=307080. zuletzt geöffnet: 17-05-2022.

[87] https://www.deepskycorner.ch/qso0957+561/qso0957+561.en.php. zuletzt geöffnet: 18-05-2022.

[88] https://https://iopscience.iop.org/article/10.1086/310295/fulltext/5317.text.html. zuletzt geöffnet: 18-05-2022.

[89] https://https://arxiv.org/pdf/astro-ph/0502087.pdf. zuletzt geöffnet: 18-05-2022.

[90] https://de.wikipedia.org/wiki/Q0957%2B561. zuletzt geöffnet: 18-05-2022.

[91] https://universe-review.ca/F04-galactic-cluster04.htm. zuletzt geöffnet: 18-05-2022.

[92] https://en-academic.com/dic.nsf/enwiki/482879. zuletzt geöffnet: 18-05-2022.

[93] https://astronomical.fandom.com/wiki/Twin_Quasar. zuletzt geöffnet: 18-05-2022.

[94] https://de.wikipedia.org/wiki/Lichtgeschwindigkeit. zuletzt geöffnet: 18-05-2022.

[95] https://de.wikipedia.org/wiki/Gravitationskonstante. zuletzt geöffnet: 18-05-2022.

[96] Neil F. Comins. In: *Astronomie - Eine Entdeckungsreise zu Sternen, Galaxien und was sonst noch im Kosmos ist*. 2011, S. 328–399.

[97] Erik Wischnewski. In: *Astronomie in Theorie und Praxis*. 2013, S. 677–681.

Abschlusserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst und keine anderen Hilfsmittel und Quellen als die angegebenen verwendet habe. Insbesondere versichere ich, dass ich alle wörtlichen und sinngemäßen Übernahmen aus anderen Werken als solche kenntlich gemacht habe. Ich erkläre mich außerdem damit einverstanden, dass meine Projektarbeit für schulinterne Zwecke genutzt sowie auf der Schulhomepage des Carl-Fuhlrott-Gymnasiums veröffentlicht wird.

Noah Fischer, 18.05.2022