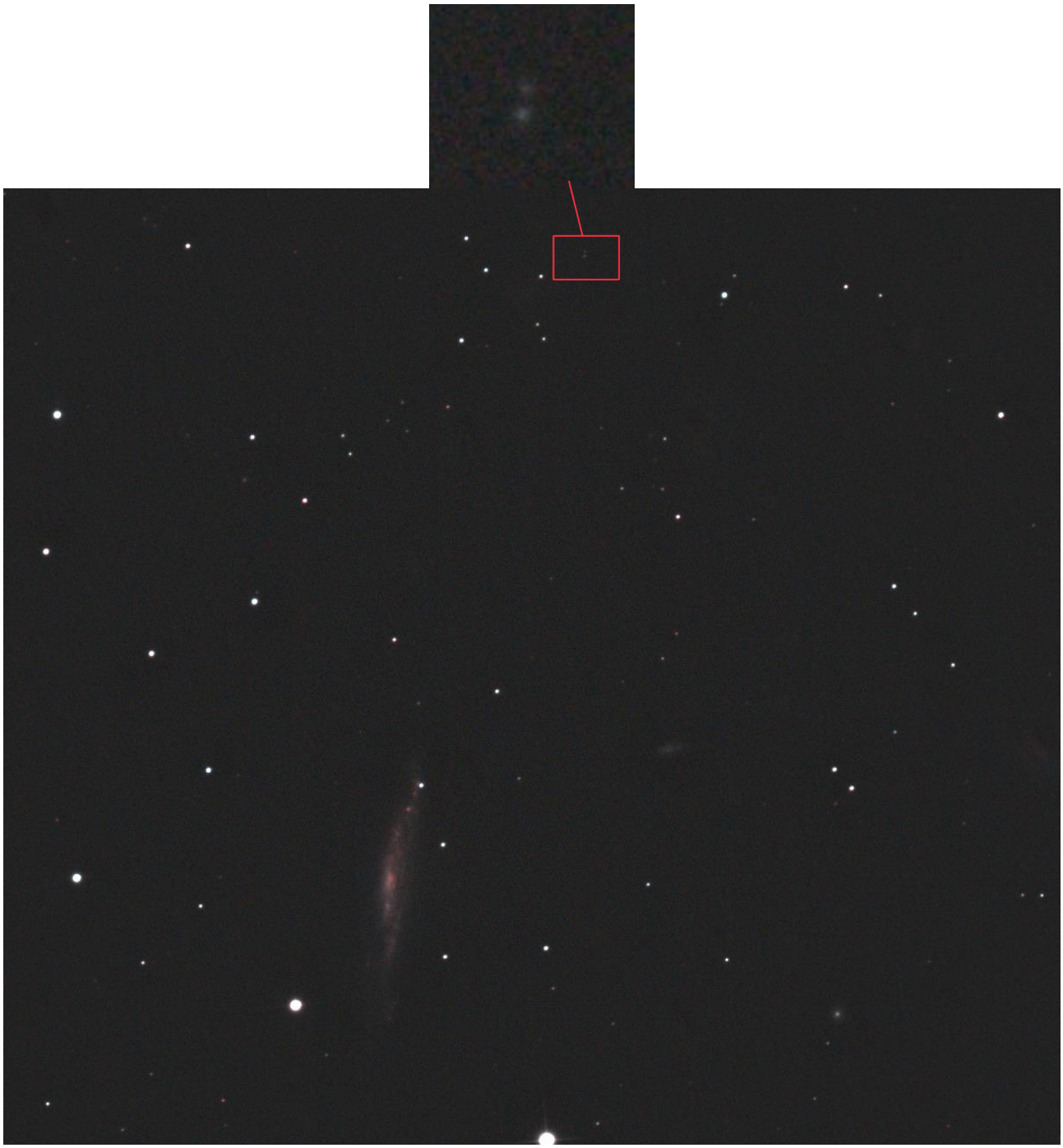
Quasare - aktive Kerne von Galaxien



Blanca Dewey (Q1)

2021/2022

Humboldtgymnasium

Solingen

Projektkurs Astronomie

Kursleitung: Bernd Koch

am Carl-Fuhlrott Gymnasium

Wuppertal

Inhaltsverzeichnis

Motivationsschreiben 3

1.1 Einführung: Galaxien 4

1.2 Sternentstehung und Sternentwicklung 5

1.2.1 Kollapsphasen 6

1.2.2 Die Hauptreihe und das Hertzsprung-Russel-Diagramm 7

1.3 Endstadium 7

1.4 Schwarzes Loch in unserer Milchstraße photographier 8

2.1 Aktiver Galaktischer Kern (AGN) 8

2.2 Der Quasar 11

2.3 QSO 0957+561 A, B 13

3.1 YGKOW G1 (Gravitationslinse) 14

3.2 Einsteinring 14

3.3 Gravitationslinse (Die Linsengleichung) 15

4.1 Aufnahme 19

4.2 Hardware 19

4.3 Software 21

Danksagung 28

Quellenverzeichnis 29

Literatur 29

Bildquellen 29

Benutzte Hard- und Software 29

Unterstützungsleistung 30

Abschlusserklärung 31

Motivationsschreiben

Astronomie begleitet mich schon seit frühen Kindheitstagen. Wir sind jeden Dezember in der Sternwarte in Solingen gewesen, um uns den „Stern der Weisen“ anzuschauen. Diese Tradition würde ich als Grundstein für meine Begeisterung an der Astronomie bezeichnen. Mit weiteren Sternwartenbesuchen hat sich diese Begeisterung manifestiert und wurde ein Bestandteil meines Lebens. Für mich hat sich das Wort Astronomie komplett neu definiert, als ich den Umzug der Sternwarte Solingen in das neu entstandene Planetarium „Galileum“ aktiv verfolgt habe.

Als sich dann letztes Schuljahr die Möglichkeit bot, an einem Projektkurs über die Astronomie teilzunehmen, wusste ich, dass ich dies als Chance ansehen werde, um mir auch für meine Studien- und Berufswahl bewusst zu werden. Der Kurs bietet einen umfassenden Einblick in diesen Teil der Naturwissenschaften und meine Arbeit dort hat mir einen komplett neuen Horizont eröffnet.

Zunächst wurden wir in den wöchentlichen Unterrichtsstunden an die Astronomie allgemein herangeführt, bevor wir wortwörtlich tiefer in die Materie vorgedrungen sind. Auch die Abendbeobachtungen waren sehr inspirierend und zeigten uns die Schönheit der Himmelsobjekte. So wurden wir Zeugen von Sonnenwinden und haben in das „Auge“ des Jupiters geschaut. Während der Arbeitsphasen herrschte eine angenehme Atmosphäre und die Teilnehmenden waren sehr offen und hilfsbereit, wenn es um den Austausch von Erfahrungen und Kenntnissen ging.

Der Begriff „Quasar“ war mir bis zu meiner Auswahl des Themas nur oberflächlich bekannt. Ich habe eine TerraX-Folge gesehen, in der es auch um Quasare ging, nachdem ich mit meinen fachinteressierten Eltern über eine Themenauswahl gesprochen habe. Dies hatte von da an mein Interesse geweckt. Das ist mein Thema: Quasar, ein aktiver Kern einer Galaxie.

Abbildung 2: Projektkursteilnehmer 2021/2022

1.1 Einführung: Galaxien

Quasare sind in weit entfernten Galaxien zu finden. Eine Galaxie ist ein durch die Schwerkraft gebundenes System aus Sternen, Sternüberresten, Planetensystemen, interstellarer Materie, Gasnebel, Staubwolken und dunkler Materie. Das Wort leitet sich vom griechischen Wort *galaxias* ab, was wörtlich "milchig" bedeutet und sich auf unsere Heimatgalaxie, die Milchstraße bezieht, in der sich unser Sonnensystem mit unserem Heimatstern Sonne befindet.

Die Größe der Galaxien reicht von Zwergen mit nur einigen hundert Millionen Sternen bis hin zu Riesen mit hundert Billionen Sternen, die jeweils das Massenzentrum ihrer jeweiligen Galaxie umkreisen. Von Astronomen wird allgemein angenommen, dass sich supermassereiche Schwarze Löcher in ihrem Zentrum befinden. Galaxien werden nach ihrer visuellen Morphologie als elliptisch, spiralförmig, linsenförmig oder irregulär kategorisiert. Dies erfolgt unter anderem nach der Hubble-Klassifikation, welche jedoch nichts über die Entwicklung der Galaxien aussagt.

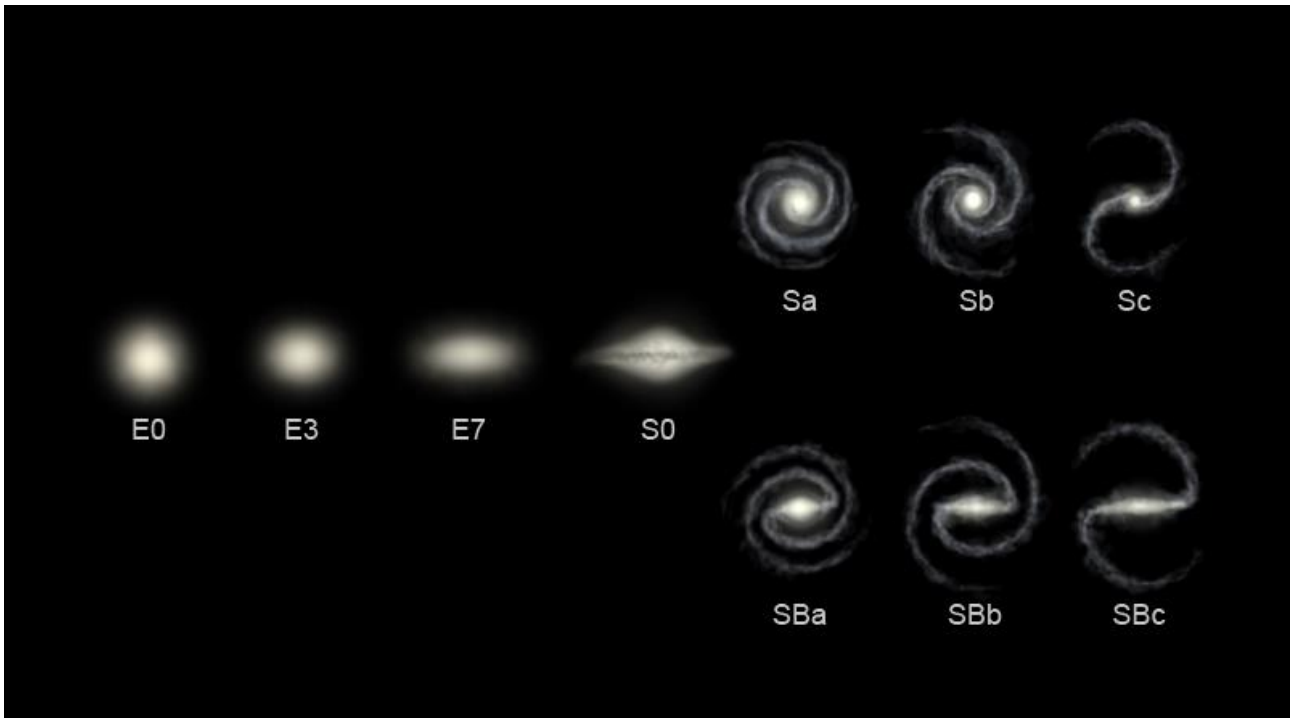


Abbildung 3: Hubble-Klassifizierung

Das Hubble-Klassifizierungssystem stuft elliptische Galaxien nach ihrer Elliptizität ein, die von E0 (fast kugelförmig) bis zu E7 (sehr länglich) reicht. Diese Galaxien haben ein ellipsoides Profil, das ihnen unabhängig vom Betrachtungswinkel ein elliptisches Aussehen verleiht. Ihr Erscheinungsbild zeigt wenig Struktur auf und sie haben typischerweise relativ wenig interstellare Materie. Folglich haben diese Galaxien auch einen geringen Anteil an offenen Sternhaufen[1] und eine geringere Rate an Sternneubildung.

Spiralgalaxien bestehen aus einer rotierenden Scheibe aus Sternen und interstellarem Medium sowie einem zentralen Bulge[2] aus im Allgemeinen älteren Sternen. Vom Bulge aus erstrecken sich relativ helle Arme nach außen. Im Hubble-Klassifizierungsschema werden Spiralgalaxien als Typ S aufgeführt, gefolgt von einem Buchstaben (a, b oder c), der den Grad der Dichtheit der Spiralarme

[1] Ist eine Ansammlung von etwa hundert bis zu mehreren tausend Sternen, welche aus derselben Riesen-Molekülwolke entstanden sind.
[2] Mit diesem Ausdruck wird der dichte Zentralbereich einer Spiralgalaxie beschrieben.

und die Größe des zentralen Bulge angibt. Die Arme sind sichtbar, weil die hohe Dichte die Sternentstehung begünstigt und sie daher viele helle und junge Sterne beherbergen.

Die Milchstraße ist eine Balkenspirale. Das heißt, dass sich die Spiralarme an einem langen Balken orientieren. Eingeteilt werden diese Formen von Galaxien in die Klassen SBa, b, c nach gleichen Kriterien wie die Spiralgalaxien.

Die linsenförmigen Galaxien, oder auch lentikuläre Galaxien, sind der Klasse S0 zuzuschreiben. Ihre Eigenschaften ähneln unteranderem denen von elliptischen und spiralförmigen Galaxien. So hat die linsenförmige Galaxie eine gleichmäßig helle Scheibe, was der elliptischen Galaxie ähnelt und einen Kern, der mit dem der Spiralgalaxie vergleichbar ist.

Die irregulären Galaxien sind zumeist Zwerggalaxien. Sie haben weder eine elliptische Form, noch weisen sie Spiralarme auf. Allgemein sind diese leuchtschwächer als die vorig genannten Galaxie-Typen. [1]; [2]; [3]

In unserem Sonnensystem dreht sich alles zunächst um die Sonne. Doch wie ist sie und die unzählbaren anderen Sterne entstanden?

1.2 Sternentstehung und Sternentwicklung

Sternentstehung ist der Prozess, bei dem dichte Regionen innerhalb von Molekülwolken im interstellaren Raum, die manchmal auch als stellare Kinderstuben bezeichnet werden, kollabieren und Sterne bilden. Die meisten Sterne bilden sich nicht isoliert, sondern als Teil einer Gruppe von Sternen, die als Sternhaufen bezeichnet werden.

Wie Sterne entstehen und unter welchen Bedingungen, bestimmt das Aussehen und die Eigenschaften von Galaxien. Sterne werden in sehr großen Wolken aus interstellarem Gas und Staub geboren. Wenn eine Gasregion in diesen Wolken auf Grund der Eigengravitation oder durch eine Supernova kollabiert, zieht sich das darin enthaltene Gas zusammen, bis Druck und Temperatur hoch genug sind, um eine Kernfusion einzuleiten: Ein neuer Stern entsteht.

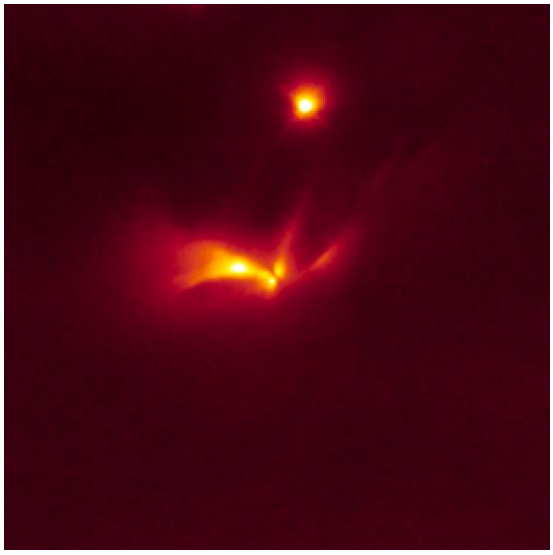
Eine Spiralgalaxie wie die Milchstraße enthält Sterne, stellare Überreste und ein diffuses interstellares Medium (ISM)[3] aus Gas und Staub. Das interstellare Medium besteht aus 10^{-4} bis 10^{20} Teilchen pro cm^3 und setzt sich in der Regel zu etwa 70 % aus Wasserstoff zusammen, während der größte Teil des restlichen Gases aus Helium besteht. Es ist chemisch angereichert durch Spuren von schwereren Elementen, die von den Sternen durch die Fusion von Helium erzeugt und ausgestoßen wurden, als sie das Ende ihrer Lebenszeit überschritten. Regionen mit höherer Dichte im interstellaren Medium bilden Wolken oder diffuse Nebel, in denen die Sternentstehung stattfindet.

Allgemein kann man die Sternentwicklung in das Hertzsprung-Russell-Diagramm einordnen. Bevor die Sterne jedoch auf die Hauptreihe gelangen, gibt es noch die unterschiedlichen Kollapsphasen. [4]; [5]

[3] In der Astronomie bezeichnet das interstellare Medium die Materie und die Strahlung, die sich im Raum zwischen den Sternsystemen einer Galaxie befinden. Diese Materie umfasst Gas in ionischer, atomarer und molekularer Form sowie Staub und kosmische Strahlung. Sie füllt den interstellaren Raum und geht nahtlos in den umgebenden intergalaktischen Raum über. [6]

1.2.1 Kollapsphasen

Wenn eine Wolke so massiv ist, dass der Gasdruck nicht mehr ausreicht, um sie zu tragen, kollabiert die Wolke aufgrund der Gravitation. Die Masse, ab der eine Wolke einen solchen Kollaps erlebt, wird als Jeans-Masse bezeichnet. Die Jeans-Masse hängt von der Temperatur und der Dichte der Wolke ab, liegt aber in der Regel bei Tausenden bis Zehntausenden von Sonnenmassen. Während des Kollapses der Wolke bilden sich Dutzende bis Zehntausende von Sternen gleichzeitig. Das Endprodukt des Kernkollapses ist ein offener Sternhaufen.



Dichte prästellare Kerne, aus denen sich eine neue Generation von Sternen bilden wird, werden beobachtet und stellen ein sehr frühes Stadium des Sternentstehungsprozesses bei geringer Masse dar. Sie beginnen, das umliegende Gas gravitativ anzuziehen und mit sich rotieren zu lassen. Wenn sich ein prästellarer Kern in diesem Stadium befindet, wird dieser als Protostern bezeichnet. Er nimmt noch Masse aus seiner ursprünglichen Molekülwolke auf. Die abgestrahlte Energie des Kerns wird noch von seiner dichten Gashülle absorbiert, jedoch erhitzt diese Strahlung die Hülle und wird als Infrarotstrahlung sichtbar. Das Zentralgestirn wird erst dann sichtbar, wenn die Hülle eine geringere optische Dichte aufweist.

Abbildung 4: Zentrum eines Protosterns (Hubble)

In der letzten Entwicklungsphase vor der Hauptreihe erreicht ein Stern das Stadium eines Vorhauptreihensterns. Zu diesem Zeitpunkt hat der Stern fast seine gesamte Masse erreicht, aber noch nicht mit der Kernfusion von Wasserstoff begonnen. Der Stern zieht sich dann zusammen, wobei seine Innentemperatur ansteigt. Diesen Zeitraum der Kontraktion[4] bezeichnet man als das Vorhauptreihenstadium. Die Leuchtkraft wird nun hauptsächlich durch die Eigenkontraktion des Zentralgestirns geliefert. [7]; [8]; [9]; [10]

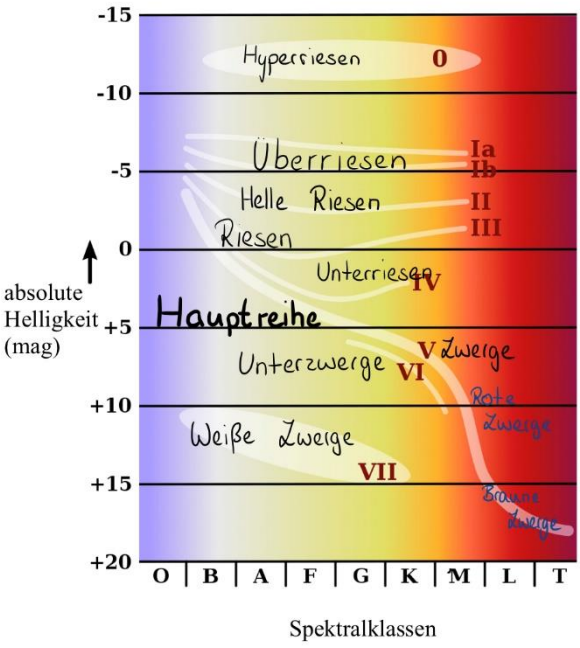
1.2.2 Die Hauptreihe und das Hertzsprung-Russell-Diagramm

Wenn ein Stern in seinem dichten Kernbereich thermische Energie durch Kernfusion von Wasserstoff zu Helium erzeugt, wird ihm ein Hauptreihenstadium zugesprochen. In dieser Phase seines Lebens befindet sich der Stern auf der Hauptreihe an einer Position, die in erster Linie durch seine Masse, aber auch durch seine chemische Zusammensetzung und sein Alter bestimmt wird. Die Kerne von Hauptreihensternen befinden sich in einem hydrostatischen Gleichgewicht, in dem der vom heißen Kern ausgehende Wärmedruck durch den von den darüber liegenden Schichten ausgehenden Druck des Gravitationskollapses ausgeglichen wird. Die starke Abhängigkeit der Energieerzeugungsrate von Temperatur und Druck trägt zur Aufrechterhaltung dieses Gleichgewichts bei. Die im Kern erzeugte Energie gelangt an die Oberfläche und wird an der Photosphäre abgestrahlt.

Ein Stern verbleibt während seiner Entwicklung die längste Zeit auf der Hauptreihe.

[4] Wortbedeutung: das Sichzusammenziehen

Je massereicher ein Stern ist, desto kürzer ist jedoch seine Lebensdauer auf der Hauptreihe. Nachdem der Wasserstoffbrennstoff im Kern verbraucht ist, entwickelt sich der Stern im Hertzsprung-Russell-Diagramm von der Hauptreihe weg zu einem Überriesen, Roten Riesen oder direkt zu einem Weißen Zwerg.



Das Hertzsprung-Russell-Diagramm, abgekürzt auch als H-R-Diagramm bekannt, ist ein Streudiagramm von Sternen, welches die Beziehung zwischen den absoluten Helligkeiten[5] der Sterne und ihren Sternklassifikationen darstellt. Das Diagramm wurde 1911 von Ejnar Hertzsprung und 1913 von Henry Norris Russell unabhängig voneinander erstellt und war ein wichtiger Schritt zum Verständnis der Sternentwicklung. [11]; [12]

Abbildung 5: Hertzsprung-Russell Diagramm

1.3 Endstadium

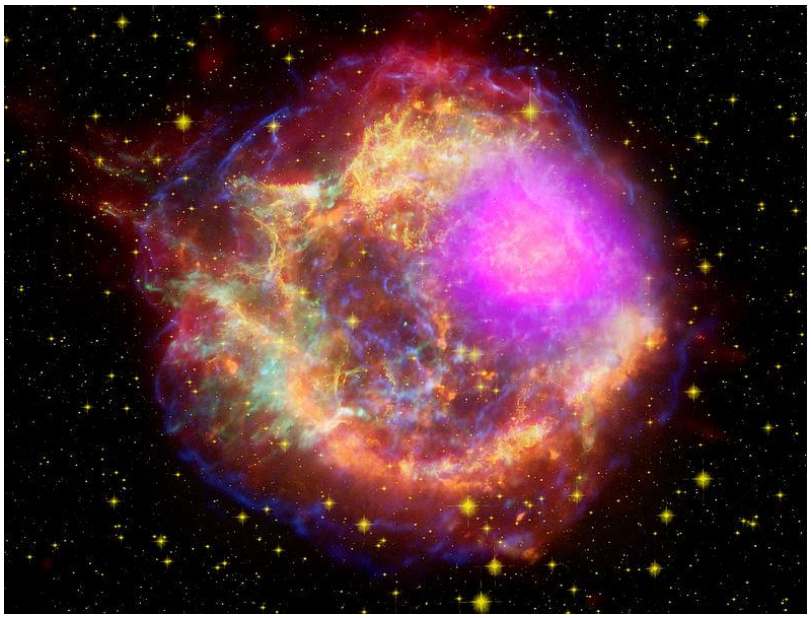


Abbildung 6: Cassiopeia A supernova

Das Sterben eines Sterns bezeichnet man als Supernova. Sterne vom selben Typus wie die Sonne, implodieren durch die eigene Gravitation, wenn im Kern kein Wasserstoff mehr fusioniert werden kann. In den oberen Schichten findet jedoch weiterhin eine gewisse Wasserstofffusion statt. Wenn sich der Kern zusammenzieht, erwärmt er sich. Dadurch werden die oberen Schichten ebenfalls erwärmt, so dass sie sich ausdehnen. Wenn sich die äußeren Schichten ausdehnen, vergrößert sich der Radius des Sterns und er wird zu einem Roten Riesen. Irgendwann wird der Kern so heiß, dass das Helium zu Kohlenstoff fusioniert. Wenn dann das Helium verbraucht ist, dehnt sich der Kern aus und kühlt zeitgleich ab. Die oberen Schichten dehnen sich aus und stoßen Material aus, das sich um den sterbenden Stern sammelt und einen planetarischen Nebel bildet. Der Stern

[5] Ist eine Hilfsgröße in der Astrophysik, um die tatsächliche Helligkeit von Himmelskörpern im sichtbaren Spektralbereich vergleichen zu können. [13]

explodiert. Schließlich kühlt der Kern zu einem Weißen Zwerg und schließlich zu einem Schwarzen Zwerg ab. Dieser gesamte Prozess dauert einige Milliarden Jahre.

Sterne, die massereicher sind als die Sonne, fusionieren ebenfalls Helium zu Kohlenstoff. Jedoch reicht ihre Masse aus, um Kohlenstoff in schwerere Elemente, wie zum Beispiel Eisen, umzuwandeln.

Der Stern kollabiert durch seine eigene Schwerkraft und der Eisenkern heizt sich auf. Der Kern wird so dicht gepackt, dass Protonen und Elektronen zu Neutronen verschmelzen. In weniger als einer Sekunde schrumpft der Eisenkern zu einem Neutronenkern. Die äußeren Schichten des Sterns fallen nach innen auf den Neutronenkern. Der Kern erhitzt sich auf Milliarden von Grad und explodiert (Supernova), wobei große Mengen an Energie und Material in den Weltraum freigesetzt werden. Die Schockwelle der Supernova kann die Sternentstehung in anderen interstellaren Wolken auslösen. Die Überreste des Kerns können je nach der Masse des ursprünglichen Sterns einen Neutronenstern oder sogar ein Schwarzes Loch bilden. [14]

1.4 Schwarzes Loch in unserer Milchstraße photographiert

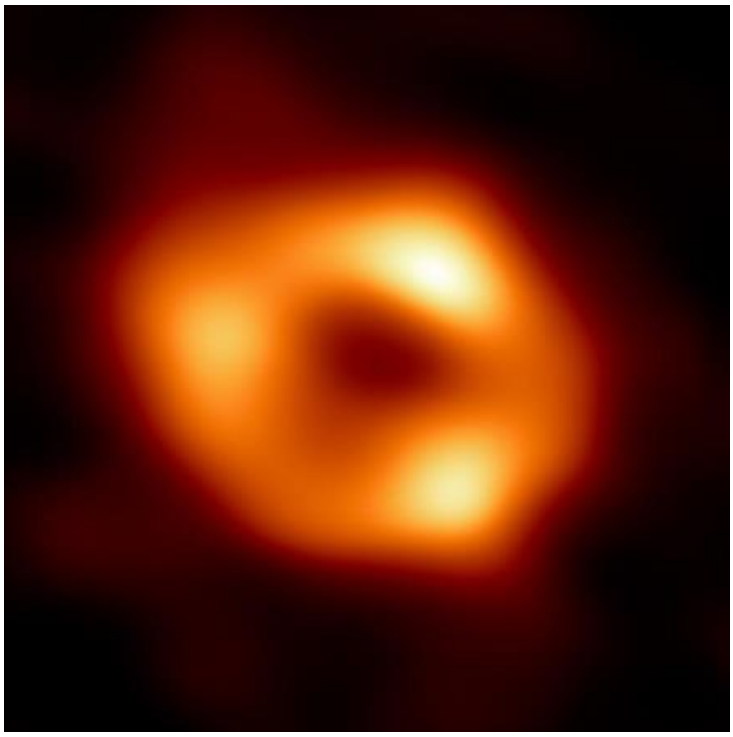


Abbildung 7: Bild des Schattens von Sagittarius A

Am 12.05.2022 wurde ein Bild von Sagittarius A, dem Schwarze Loch in unserer Milchstraße, veröffentlicht. Dieses wurde im Rahmen des *Event Horizon Telescope- Projekts* angefertigt. Somit wird der Menschheit erstmals ein Blick in das Zentrum unserer Galaxie gewähret. Fest steht damit auch, dass in der Mitte unserer Galaxie ein Schwarzes Loch von enormer Größe sitzt. Im Vergleich zu M87, welches als erstes Schwarzes Loch jemals photographiert wurde, ist es jedoch mit seinen 4,3 Millionen Sonnenmassen eher klein. Auf der Abbildung ist der Schatten von Sagittarius A zu sehen. [15]

2.1 Aktiver Galaktischer Kern (AGN)

Die Aktiven Galaktischen Kerne (engl. Active Galactic Nuclei, AGN) beschreiben die Zentralregion äußerst heller und aktiver Galaxien. Sie geben große Mengen an Strahlung ab, welche auf einen nichtstellaren Ursprung zurückzuführen ist.

Anhand von spektralen Eigenschaften[6] unterscheiden Astronomen zwischen verschiedenen AGN-Klassen. Diese sind folgendermaßen unterteilt:

- *quasi-stellare Objekte (QSOs)* und *Quasare*
- *Seyfertgalaxien*
- *Radiogalaxien*
- *BL-Lac-Objekte*
- *Blazar*
- *Low Ionization Nuclear Emission Line Regions (LINERs)*
- *Ultraleuchtkräftige Infrarotgalaxien (ULIRGs)*
- *Markariangalaxien*

Die letzten Jahre wurde von Astronomen auf ein physikalisches Modell hingearbeitet, welches die verschiedenen AGN-Klassen vereinheitlichen soll. Die Unifikation der AGN ist unter Betrachtung eines Standardmodells eines AGN mit folgenden Charakteristika möglich:

- Rotierendes, supermassereiches Schwarzes Loch
- Akkretionsscheibe
- Staubtorus
- Jets

Die Diversität, welche sich in den AGN-Klassen zeigt (siehe oben), findet ihren Ursprung in den verschiedenartigen Grundcharakteristika. So sammelt der AGN, welcher in Form eines Quasars vorkommt, in kurzer Zeit sehr viel Materie auf. Im Gegensatz dazu steht eine Radiogalaxie, welche von Jets dominiert wird und starke Radioemissionen aufzeigt.

Physikalisch sind die Ausprägungen durch Parameter wie Masse des Schwarzen Lochs, Akkretionsrate[7], Torusmasse, etc. zu erklären. Aber auch die Geometrie (Orientierung des AGN in Bezug auf den Betrachter) kann zum Beispiel die Unterscheidung zwischen Quasar und Blazar hervorrufen.
Als der „zentraler Motor“ eines AGN gilt nach gängiger Vorstellung, welche vor mehr als 30 Jahren ihren Ursprung findet, ein akkretierendes, rotierendes, supermassereiches Schwarzes Loch.

Unsere Heimatgalaxie, die Milchstraße, hat keinen AGN. Es gibt jedoch Vermutungen, dass sie vor Millionen von Jahren eine Seyfertgalaxie[8] gewesen sein müsste, wenn man von einer höheren Aktivität ausgeht und die Masse des Schwarzen Lochs im Zentrum unserer Galaxie betrachtet.

Die folgende Abbildung entspricht einem Querschnitt durch die innersten Parsec[9] eines AGN. Die horizontale und vertikale Richtung sind aus Darstellungsgründen logarithmisch skaliert.

[6] Z.B. wie dem hellsten Spektralbereich (Radio, Infrarot, UV, Röntgen, etc.).
[7] Akkretion bezeichnet einen Prozess, bei welchem Materie von einem kosmischen Objekt aufgesammelt wird.
[8] Sind Spiral- oder irreguläre Galaxien mit einem sehr hellen Galaxiekern.
[9] Kurzform von Parallaxensekunde; definiert als der Abstand, von welchem Sonne und Erde unter dem Winkel von einer Bogensekunde zu betrachten ist.1 pc entsprechen 3,26 Lj. Hier angewendet, um den innersten Bereich zu beschreiben. [17]

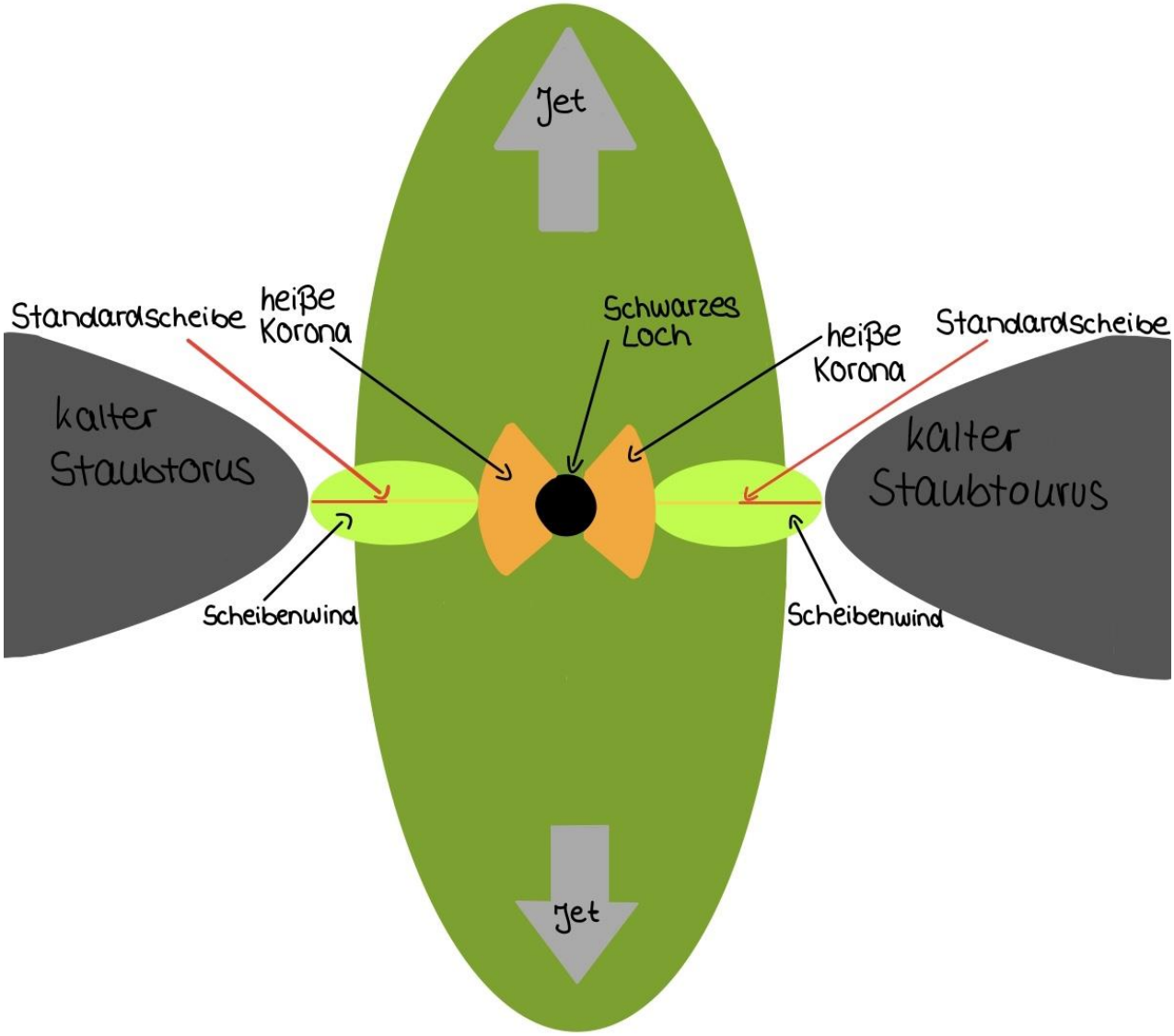


Abbildung 8: Standardmodell eines AGN

Die Akkretionsscheibe setzt sich aus der kalten, geometrisch dünnen und optisch dicken Standardscheibe und aus dem heißen, advektions-dominierten[10], optisch dünnen Akkretionsfluss zusammen. Die Standardscheibe kollabiert vertikal aufgrund des Drehimpulses der einfallenden Materie und der Strahlungskühlung. Sie verbindet sich nach innen mit dem Staubtorus. Der heiße, ausgedehnte Bereich am inneren Rand dieser, in welchem die hochenergetische elektromagnetische Strahlung des AGN entsteht, wird als Korona bezeichnet. Die Akkretionsscheibe wirkt durch Magnetisieren als „galaktischer Dynamo“ und bildet und verstärkt dadurch die dortigen Magnetfelder. Am Ereignishorizont des rotierenden Schwarzen Lochs (Kerr-Typ) wird durch den ergosphärischen Dynamo ein schlauchartiges Magnetfeld erzeugt, welches erheblich zur Entstehung von Poynting-Fluss[11]-dominierten Jets beiträgt. Diese sind magnetisch getrieben. Scheibenwinde

[10] Advektion ist eine, in waagerechter Zufuhr erfolgende Verfrachtung.
[11] Ist ein elektromagnetischer Energie-Fluss, welcher durch Magnetfelder getrieben ist. In der Theorie werden diese ausgerechnet, damit die Plasmaphysik diverser kosmischer Objekte verstanden werden kann. [18]

entstehen durch Teilchenströme an der Oberfläche der Akkretionsscheibe, welche in ihrer Bildung analog zu der des Sonnenwinds verlaufen.

Je nach AGN-Typ lässt sich die Wirtsgalaxie mit unterschiedlichen Formen beschreiben. So können Quasare in allen Typen vorgefunden werden, Seyfertgalaxien jedoch zumeist in spiralförmigen und Radiogalaxien ausschließlich in elliptischen Galaxien. [16]

2.2 Der Quasar

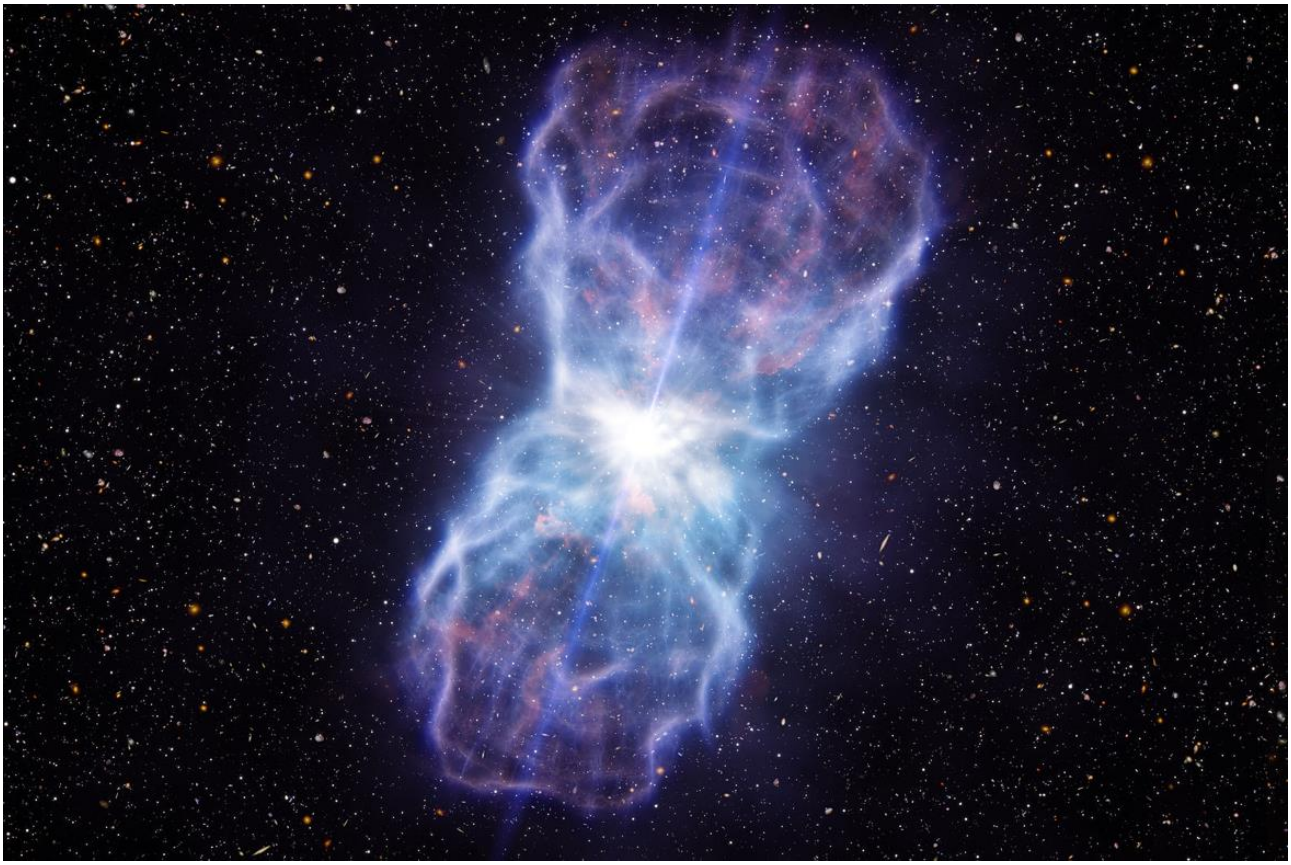


Abbildung 9: künstlerische Darstellung eines Quasars (Autor: ESO/L. Calçada)

Die wohl bekannteste AGN-Klasse ist der Quasar. Der Begriff Quasar kommt von dem englischen Ausdruck „*quasi-stellar radio source*“, was zu Deutsch „*sternartige Radioquelle*“ bedeutet.

Quasare sind Aktive Galaktische Kerne (engl. Active Galactic Nuclei, AGN) von Galaxien. Für den Menschen erscheinen sie punktförmig (sternartig), wobei sie gleichzeitig große Mengen an Energie in andere, für den Menschen nicht sichtbare Wellenlängenbereiche emittieren. Die Leuchtkräftigsten erreichen einen Wert von 10^{47} erg/s[12], was allgemein normale Galaxien übertrifft. Quasare haben eine der bisher größten beobachteten absoluten Helligkeit. Durch die erstaunlich hohe Entfernung in einem Bereich bis zu Milliarden Lichtjahren kann man schließen, dass sie äußerst früh im Universum

[12] 1 erg entspricht 10^{-7} Joule; eine Einheit für Energie. Hier: Der angegebene Wert entspricht 100 Billionen Sonnenleuchtkräften.

entstanden sind. Diese Galaxien können jeden Hubble-Typ haben. Doch stellte man ein besonderes Vorkommen bei elliptischen Galaxien fest.

In den 1950er Jahren wurde der Begriff verwendet, um kosmische Radioquellen zu beschreiben, welche als bläulich und „sternförmig“ wahrgenommen wurden. Durch Spektralanalyse wurde 1963 durch Maarten Schmidt erkannt, dass die Radioquelle 3C 273[13] mit einer Rotverschiebung[14] von 0,158 nur *quasi* sternartig ist.

Dies legte den Grundstein für weitere Forschungen. So lichtete das Weltraumteleskop Hubble 1990 erstmals Wirtsgalaxien (engl. host galaxies) der Quasare ab. Daraus konnte geschlossen werden, dass Quasare die aktiven Kerne, eingebettet in Wirtsgalaxien, sind.

Eine der meist gestellten Fragen in Bezug zu den Quasaren ist, woher diese enorme Leuchtkraft kommt. Die theoretische Astrophysik beschäftigt sich damit seit der Entdeckung dieser. Ende der 1960er wurde ein physikalisches Modell entwickelt, welches bis heute das Paradigma für alle Quasare darstellt. Die enorme Leuchtkraft wird durch die Akkretion auf ein supermassereiches Schwarzes Loch erklärt.

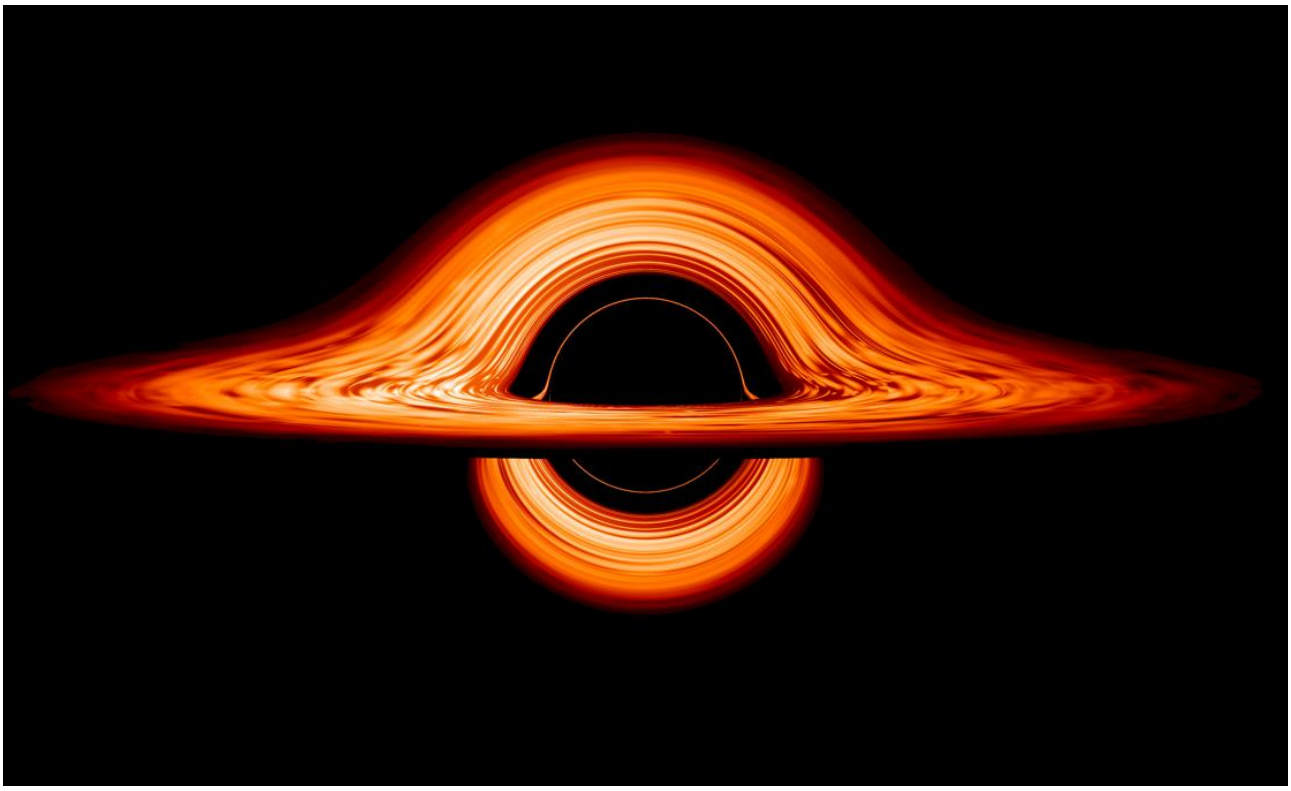


Abbildung 10: Akkretion um ein Schwarzes Loch (künstlerische Darstellung)

Dies ist ein Bild einer Akkretionsscheibe um ein Schwarzes Loch, wie sie von einem Beobachter gesehen wird, der sich fast direkt an der Scheibe befinden würde. Durch die extreme Schwerkraft des Schwarzen Lochs wird das Licht der Scheibe gebeugt, wodurch die verzerrte Form oberhalb und unterhalb der Bahnebene entsteht. Ebenfalls sichtbar ist ein innerer Lichtkreis, der von Photonen erzeugt wird, die den ganzen Weg um das Schwarze Loch zurücklegen, bevor sie entweichen und den Beobachter erreichen.

[13] Der erste entdeckte und scheinbar hellste Quasar. Er findet sich im Sternbild Jungfrau wieder.
[14] Ist die Lageveränderung bekannter Spektrallinien im Emissions- und Absorbtionsspektrum astronomischer Objekte.

Quasare, welche so nah im Raum beisammenstehen, dass sie sich über gravitative Wechselwirkung stark verformen oder sogar miteinander verschmelzen, kann man als „Kannibalen“ bezeichnen. [16]; [19]; [20]; [21]

2.3 QSO 0957 + 561 A, B (Doppelquasar)

Der Doppelquasar (engl. Twin Quasar) QSO 0957 + 561 A, B befindet sich im Sternbild Ursa Major, welches auch unter dem Namen *Großer Bär* bekannt ist. Er wird durch die Gravitationslinse YGKOW G1 zweifach abgebildet und ist das erste entdeckte Gravitationslinsensystem. Mit einer Entfernung von 9 Milliarden Lichtjahren misst man bei Abbildung A eine Helligkeit von 16,7 mag und bei Abbildung B eine Helligkeit von 16,5 mag.

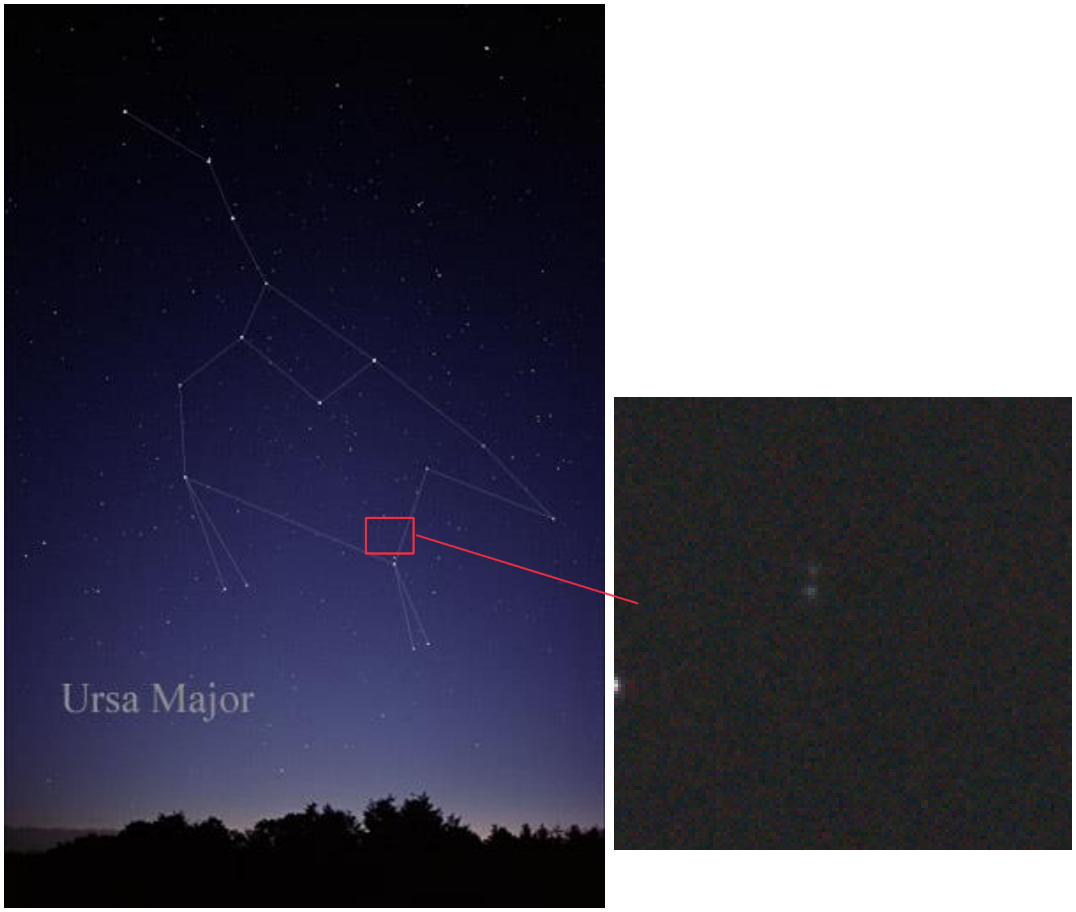


Abbildung 11+12: Sternbild *Ursa Major* (Autor: Till Credner); Doppelquasar QSO 0957 + 561

Doch woraus schloss man, dass es sich um dasselbe Objekt handelte? Als das Objekt im Frühjahr 1979 von dem anglo-amerikanischen Team um die Briten Robert Carswell und Dennis Walsh und Rey Weymann aus den Vereinigten Staaten in Arizona, USA mit Hilfe eines 2,1 m Teleskopes entdeckt wurde, fiel ihnen die ungewöhnliche Nähe der kosmischen Objekte, sowie die Ähnlichkeit der Rotverschiebung und des Lichtspektrums im sichtbaren Bereich auf. Dadurch entstand die Vermutung, dass es sich um ein einziges Objekt, einen einzigen Quasar handelt, welcher alleinig durch ein Gravitationslineneffekt, welcher durch den Galaxienhaufen, bei dem YGKOW G1 auch Teil ist, verstärkt wird, zweifach erscheint.

Dies konnte auch von Fachastronomen nachgewiesen werden. 1983 fand ein Team um Marc V. Gorenstein Materiejets der Quasarabbildungen A und B, welche als eindeutig spiegelsymmetrisch identifiziert werden konnten.

Die leicht unterschiedliche Lichtlaufzeit von B, welcher einen 1,1 Lichtjahre längeren Weg zurücklegt, und die leichten spektralen Unterschiede sind auf die unterschiedlichen Bedingungen zurückzuführen, die auf den Weg hierhin herrschen können. So kann es beispielsweise an einer unterschiedlichen Extinktion[15] liegen, also an Nebeln, welche durchquert werden müssen, oder durch Himmelsobjekte, welche „umrundet“ werden müssen. Die Lichtlaufzeit wird somit verlängert. Die spektralen Unterschiede sind auf die Elemente, welche sich in der durchquerten Materie befinden, zurückzuführen. [22]

Auch bei der von mir angefertigten Aufnahme von QSO 0957 + 561 (siehe Titelbild) kann man die leicht wahrnehmbaren Unterschiede erkennen.

3.1 **YGKOW G1** (Gravitationslinse)

Abbildung 13: YGKOW G1 als heller Punkt zwischen QSO 0957+561 zu erkennen

Ungefähr 4 Milliarden Lichtjahre von der Erde entfernt – direkt in unserer Sichtlinie – befindet sich die massereiche Galaxie YGKOW G1. Diese Galaxie ist die erste jemals beobachtete Gravitationslinse, ein massives Objekt, das Licht von Objekten dahinter beugt. Dieses Phänomen ermöglicht es uns, Objekte in diesem Fall sogar doppelt zu sehen. YGKOW G1 übt als ein Galaxienhaufen eine äußerst starke Gravitationskraft aus. Dies wirkt sich nicht nur auf die Form dieser Galaxie, die Sterne, die sie gebildet haben, und die Objekte in ihrer Umgebung aus, sondern auch auf den Raum, in dem sie sich befindet, verformt und verzerrt ihre Umgebung und erzeugt bizarre Effekte wie QSO 0958+561 – doppelt visuell. [23]

3.2 Einsteinring

Einsteinringe sind Ringe elektromagnetischer Strahlung von entfernten Objekten, die durch die Gravitationseffekte von Galaxien im Vordergrund verursacht werden. Diese Galaxien werden Gravitationslinsen genannt. Einstein hat dieses Phänomen in seiner Allgemeinen Relativitätstheorie vorhergesagt. Bei Gravitationslinsen sieht der Beobachter das dahinterliegende Objekt mehrfach, weil Licht es auf unterschiedliche Weise erreichen kann. Befindet sich das Objekt direkt hinter der

[15] Unter dem Begriff Extinktion versteht man in der Astronomie die Schwächung des Lichts von Himmelskörpern beim Durchgang durch die Erdatmosphäre oder interstellarer Materie. Hierbei wird sowohl die Absorption, als auch die Streuung des Lichts im durchquerten Medium gemeint.

Linse, erscheint das Bild als Ringsegment um die Galaxie – unter idealen Bedingungen kann sogar ein vollständiger Ring gebildet werden. [24]

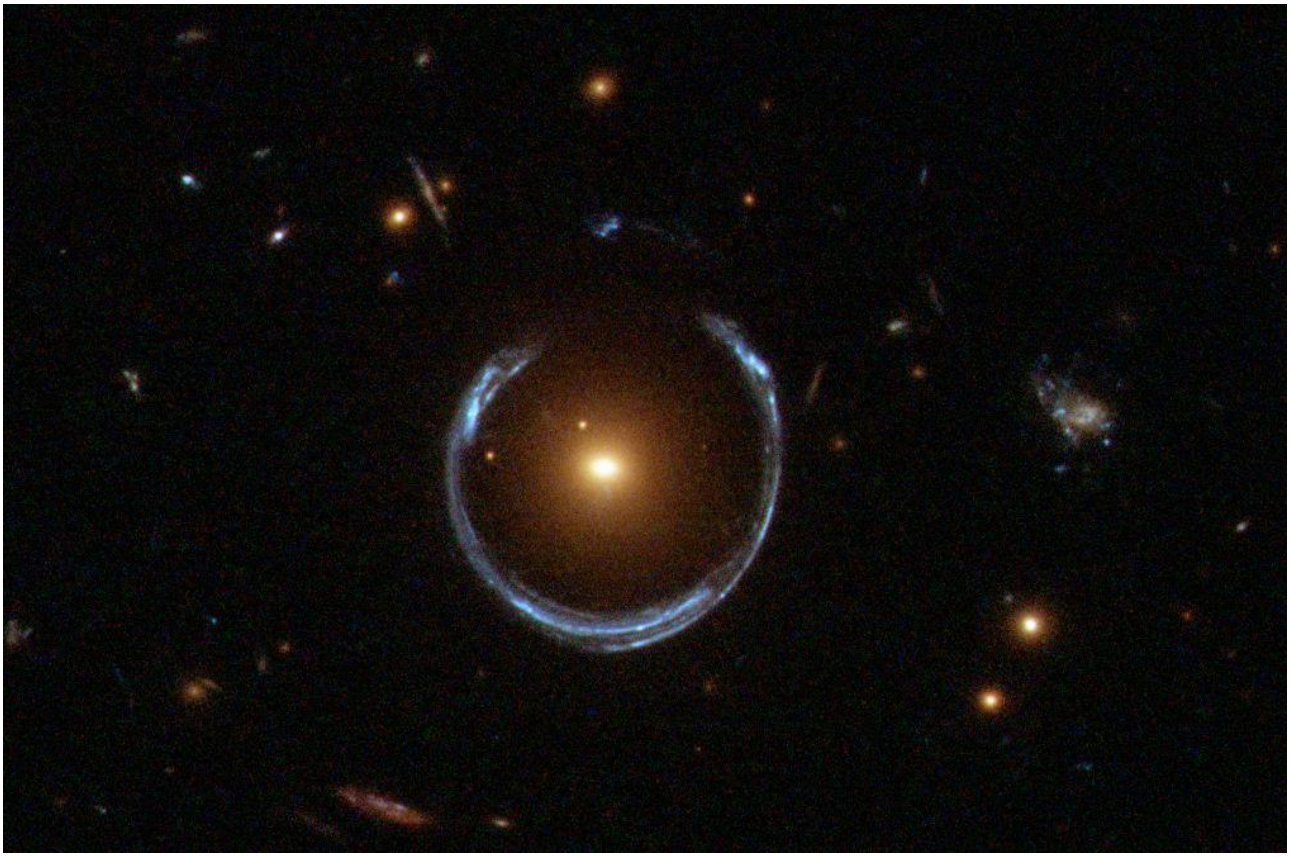


Abbildung 14: Einsteinring um LRG 3-757, auch bekannt als *„Cosmic Horseshoe“*

„Cosmic Horseshoe“ ist der Spitzname für ein gravitativ gelinsenes System aus zwei Galaxien im Sternbild Löwe. Die Linsengalaxie LRG 3-757 erweist sich als extrem massereich, mit einer Masse, die hundertmal größer ist als die unserer Galaxie. Diese ist bemerkenswert, weil sie zu einer seltenen Klasse von Galaxien gehört, die als leuchtende rote Galaxien bezeichnet werden und eine extrem helle Infrarotemission aufweisen. Im Gegensatz zu den meisten gelinsten Galaxien erscheint das gelinste Objekt hier hufeisenförmig. [25]

3.3 Die Linsengleichung der Gravitationslinse

Im Folgenden wird die Herleitung der Gleichung für die Massenberechnung von YGKOW G1 dargestellt.

Zur Erklärung: In diesem Schaubild der Linsen-Geometrie, übertragen ins Visuelle, ist die Quelle hier der eigentliche Quasar und die gelinste Quelle das, was man als Beobachter von der Erde aus sehen kann, da die Linse das Licht ablenkt.

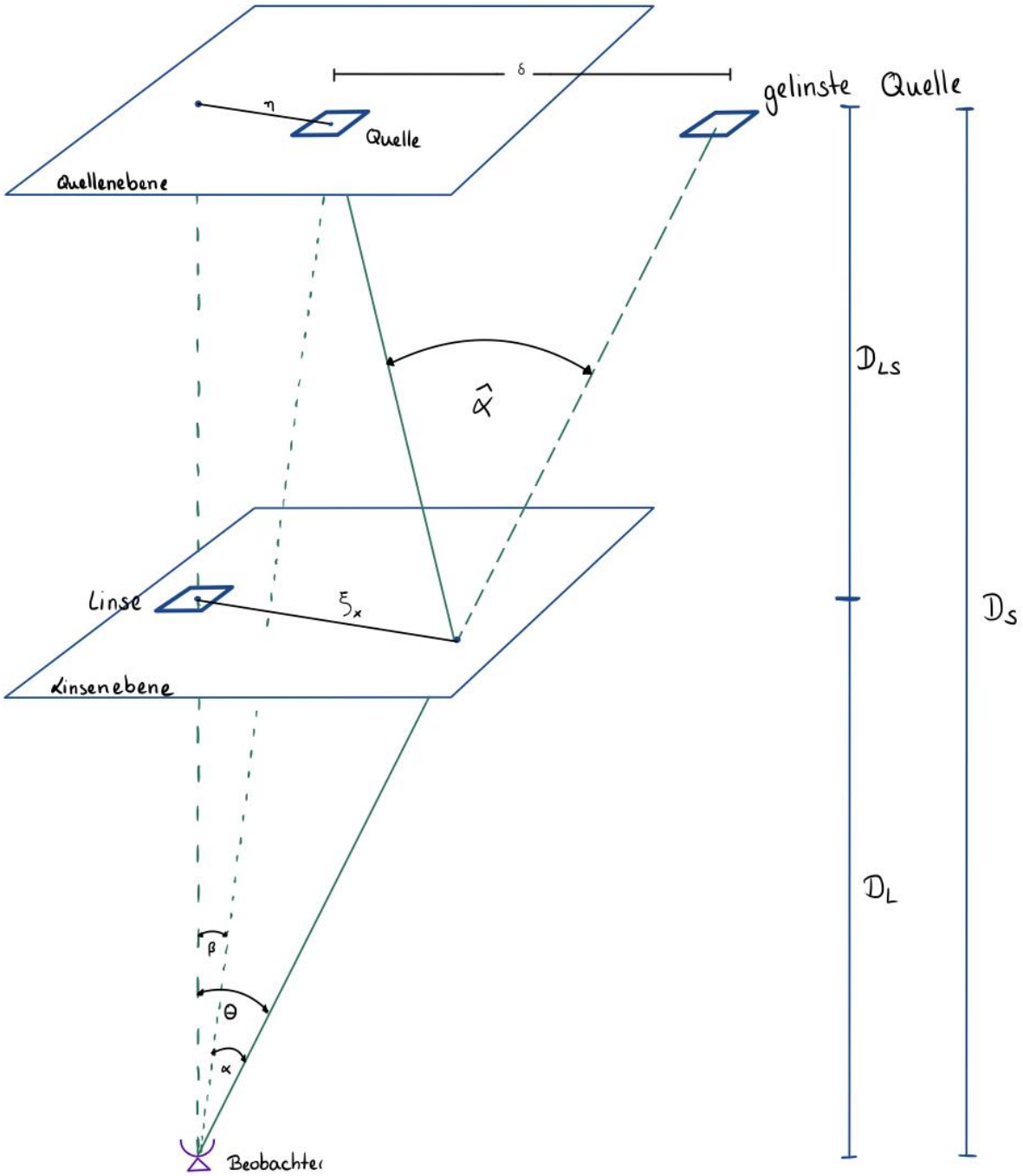


Abbildung 15: Schaubild; Linsen-Geometrie

Gearbeitet wird mit folgenden Messgrößen:

DS: Abstand Beobachter – Quelle

DL: Abstand Beobachter – Linse

DLS: Abstand Linse - Quasar

Θ: Beobachtungsgröße ≙ Abstand Linse - gelinsten Quelle

(1) Nach Einstein gilt: $\hat{a} = \frac{4*G*M(x)}{c^2*x}$

Bei kosmologischen Entfernungen gilt im Allgemeinen: DLS ≠ DS-DL (Nur in erster Näherung (Raum expandiert (Raumkrümmung), (Rotverschiebung))

Nach Abbildung 15 gilt:

(2) a $\beta = \Theta - a$

(2) b $\frac{a}{\hat{a}} = \frac{DLS}{DS}$

$$\tan a = \frac{\delta}{DS}$$

$$\tan \hat{a} = \frac{\delta}{DLS}$$

wobei vorausgesetzt wird, dass die Linse sphärisch ist, also eine regelmäßige Form hat.

Bei einer asymmetrischen Linse muss die vektorielle Schreibweise gewählt werden:

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

Im Weiteren gehen wir von einer symmetrischen Linse aus.

Aus Abb. 4 folgt weiter:

/->Im Bogenmaß, für kleine Winkel Theta

$$\tan \Theta = \Theta = \frac{x}{DL}$$

(3) $\Theta = \frac{x}{DL}$

(4) => $x = \frac{\Theta}{DL}$

$\beta = \Theta - a$ mit $a = \frac{DL}{DS} * \hat{a}$ (2) b folgt:

$$\beta = \Theta - \frac{DLS}{DS} * \hat{a}$$

Einsetzung von (1) ergibt:

$$\beta = \Theta - \frac{DLS}{DS} * \frac{4GM(x)}{c^2 * x}$$

mit Einsetzen von x aus (4) folgt

$$\beta = \Theta - \frac{DLS}{DS} * \frac{4GM(x)}{c^2 * x} = \Theta - \frac{DLS}{DL * DS} * \frac{4GM}{c^2 * \Theta}$$

Wenn die Linse exakt vor der Quelle sitzt, gilt $\beta = 0$ => $\Theta = \Theta E$

Damit folgt:

$$\beta = 0 = \Theta E - \frac{DLS}{DL*DS} * \frac{4GM}{c^2*\Theta E} \qquad /* \Theta E$$

$$0 = \Theta E^2 - \frac{DLS}{DL * DS} * \frac{4GM}{c^2}$$

$$\Theta E = \sqrt{\frac{4GM}{c^2}} * \sqrt{\frac{DLS}{DL * DS}}$$

ΘE: Einstein-Radius einer ringförmig geringsten Quelle (Idealfall).

ΘE ist dimensionslos im Bogenmaß ausgedrückt!

Messgröße ist der Abstand der beiden gelinsten Abbildungen: δ

$\delta = 5{,}98''$ $\qquad \Theta E = \frac{\delta^{rad}}{2} = \frac{5{,}98''}{2} * \frac{\pi}{180*60*60}$

(in Bogensekunden); (im Bogenmaß); (ins Bogenmaß umgerechnet) [2π=360°]

Damit folgt für die Masse der Linse:

$$\Theta E^2 = \frac{DLS}{DL * DS} * \frac{4GM}{c^2}$$

$$\boldsymbol{M = \frac{DL * DS * c^2 * \Theta E^2}{DLS * 4G}}$$

G: Gravitationskonstante: $G = 6{,}67 * 10^{-11} m^3 kg^{-1} s^{-2}$

c: Lichtgeschwindigkeit: $c = 2{,}99793 * 10^8 m * s^{-1}$

Θ: (Abstand Quasar A-B: in Bogensekunden): $\Theta = \frac{5{,}98''}{2} * \frac{\pi}{180*60*60}$

$DS = 8{,}7 * 10^9 Lj = 8{,}23 * 10^{25} m$

$DL = 2{,}4 * 10^9 Lj = 2{,}27 * 10^{25}\ m$

$DSL = 6{,}3 * 10^9 Lj = 5{,}96 * 10^{25} m$

Prüfen der Einheiten: $\qquad kg = \frac{m^4 * kg * s^2}{m^4 * s^2}$

Einsetzen der Werte:

$$M = \frac{\left(\frac{5.98}{2} * \frac{\pi}{180 * 60 * 60}\right)^2 * (2.99793 * 10^8)^2 * 8.23 * 10 * 10^{25} * 2.27 * 10^{25}}{4 * 6.67 * 10^{-11} * 5.96 * 10^{25}}$$

$$\underline{M = 2.218853832 * 10^{42} kg}$$

In Sonnenmassen entspricht dies: $1\mathrm{M}\odot = 1.99 * 10^{30} kg$

$$M = 1.115 * 10^{12}\mathrm{M}\odot$$

Im Vergleich mit unserer Heimatgalaxie Milchstraße:

Milchstraße: $1.5 * 10^{12}\mathrm{M}\odot$

Dementsprechend beträgt die Masse der Linsengalaxie YGKOW G1 etwa 75% der Masse der Milchstraße.

Durch das Hubble-Bild von QSO 0957+561 lässt sich aber auch der mögliche Maximalwert des Winkels β ableiten. $0 \leq \beta \leq 1.02''$

Setzt man nun mit $\beta \neq 0$, muss man bei der Gleichung für die Masse $+\frac{\beta}{\frac{\mathrm{DLS}}{\mathrm{DL*DS}}}$ rechnen, um einen Annäherungswert zu bestimmen:

$$M = 2.218853832 * 10^{42} + \frac{1.02 * \frac{\pi}{180 * 60 * 60}}{\frac{8.23 * 10^{25} * 2.27 * 10^{25}}{5.96 * 10^{25}}}$$

$$\underline{M = 2.218853832 * 10^{42} kg}$$

Es lässt sich dasselbe Ergebnis auf die gegebenen Nachkommastellen ausrechnen. Daher kann man hier den Winkel β vernachlässigen.

[26]; [27]; [28]; [29]; [30]; [31]

4.1 Aufnahme

Für die photographische Aufnahme im Rahmen meines praktischen Teils der Projektarbeit von dem Quasar QSO 0958+561 habe ich die folgenden Geräte und Software verwendet. Nähere Informationen zu der Hardware und Downloadlinks für die Software lassen sich auf den zugehörigen, verlinkten Webseiten im *Quellenverzeichnis* unter *Benutzte Hard- und Software* finden. Die Aufnahme wurde am 20.12.2021 ab 18:20 Uhr getätigt.

Das Teleskop der Station 7 auf dem Schuldach des Carl-Fuhlrott Gymnasiums ist per Internet mit dem verwendeten Rechner im anliegenden Gebäude synchronisiert.

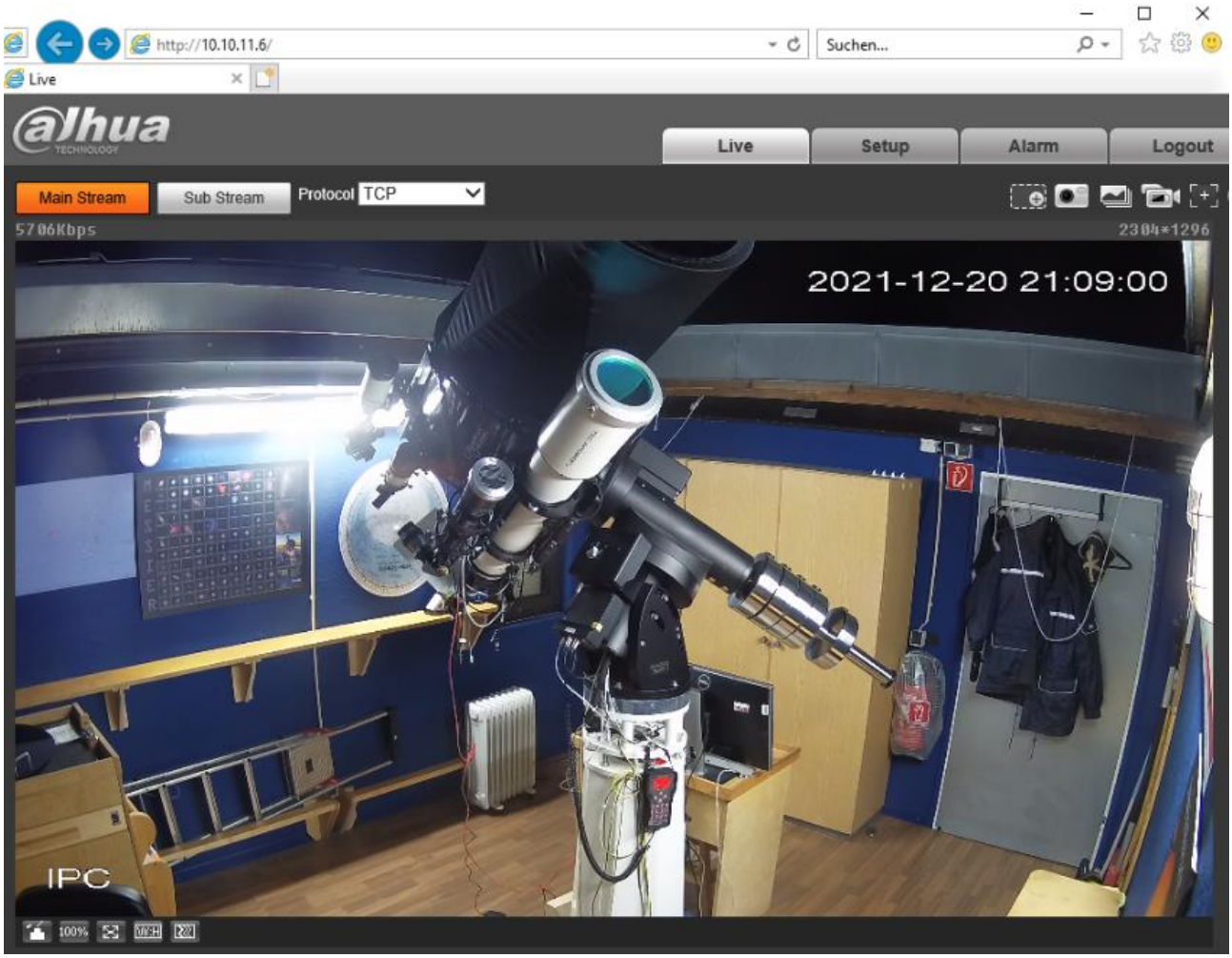


Abbildung 16: 0,51m CDK20- Teleskop in Station 7 des Schülerlabors Astronomie am CFG Wuppertal

4.2 Hardware

Dieses Teleskop wurde verwendet, um die Photographie anzufertigen.

Abbildung 17: Teleskop: Planewave CDK 20, 0,51m Öffnung, 3417mm Brennweite

Abbildung 18: Montierung 10Micron GM4000HPSII. Montierung mit Absolutencodern

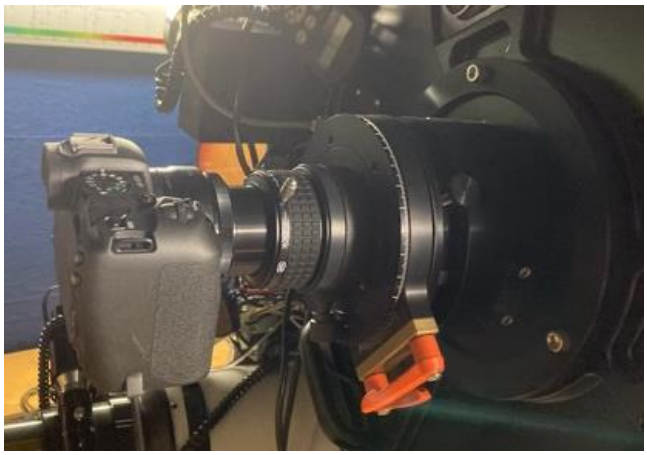


Abbildung 19 + 20: Kamera: Canon EOS RPa; rechts: mit dem Teleskop verbaut

Die Kamera wurde astromodifiziert zur Erhöhung der H-alpha-Rotempfindlichkeit von Markus Meel

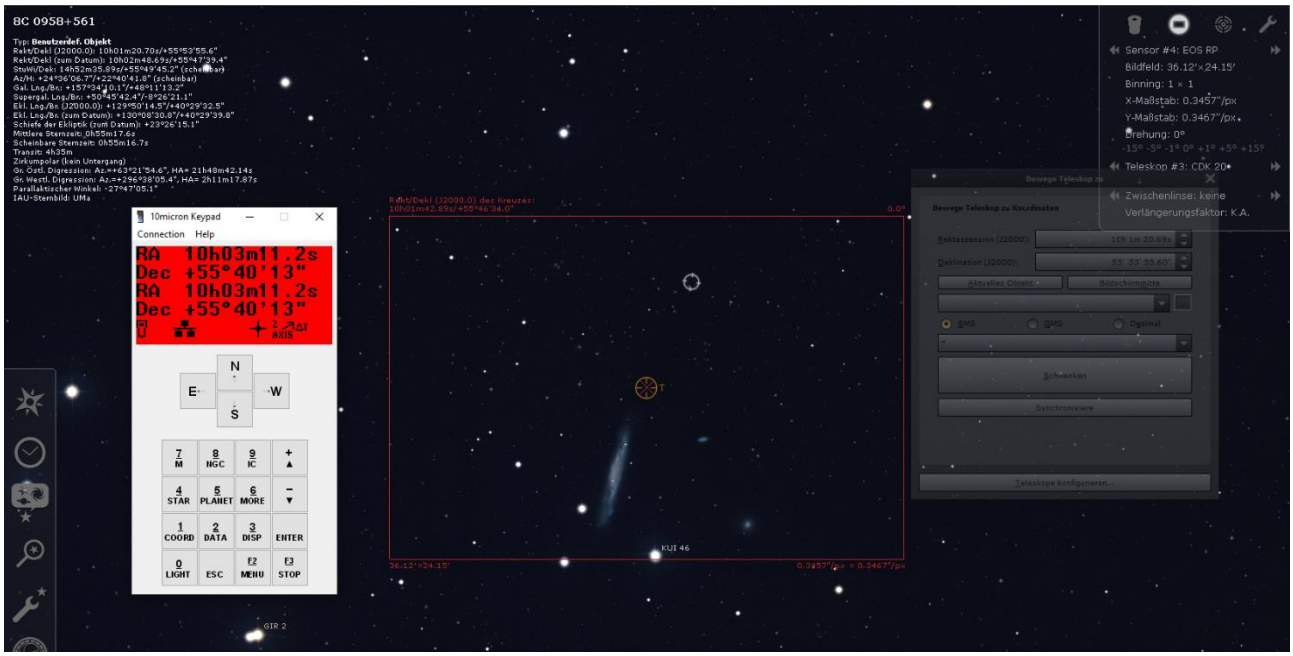
Abbildung 21 a, b: aufgebautes Teleskops am CFG Wuppertal

4.3 Software

Die genutzten Software-Programme dienten zur Hilfe der Bildaufnahmen von dem Quasar QSO 0958+561, der zu dem praktischen Teil meiner Projektarbeit gehörte, und dem anschließenden Bearbeiten der Photographien.

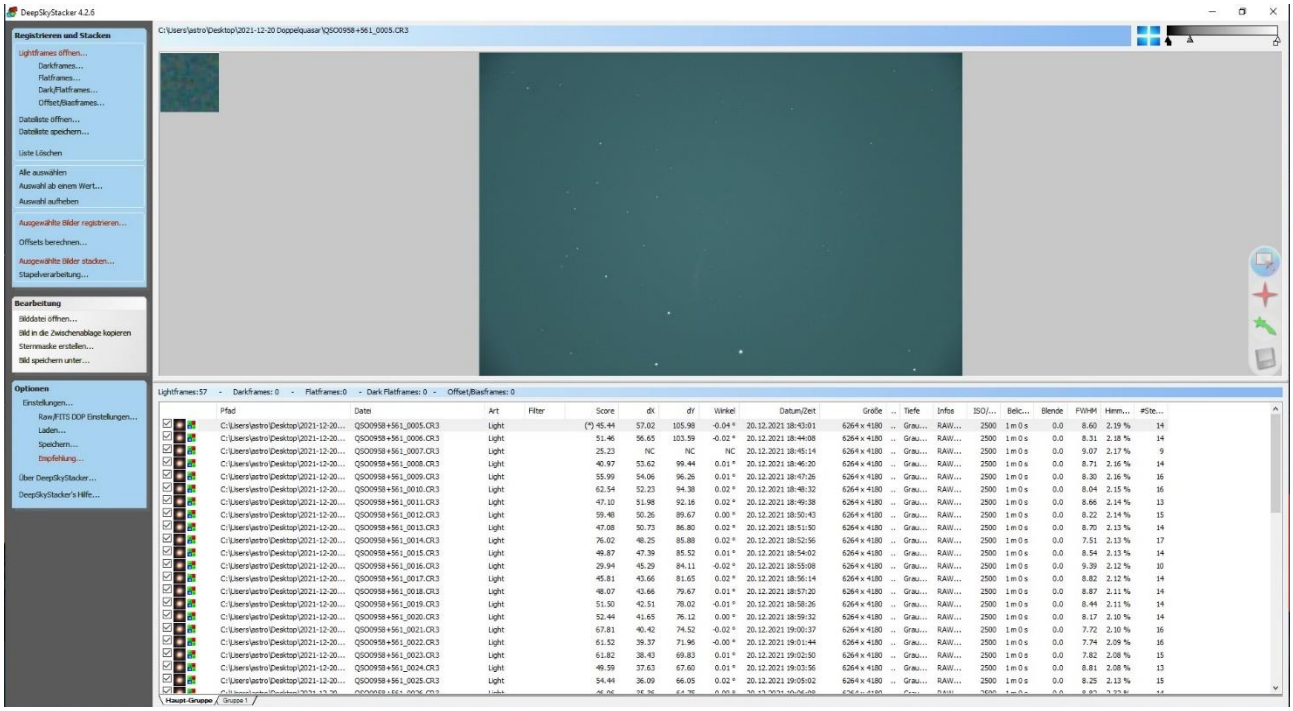
Für die folgenden, von mir angefertigten Screenshots habe ich FSCapture genutzt. Die Abbildungen sind alle von mir von den jeweils benannten Softwares angefertigt worden.

In der Programmplanung haben wir zunächst Stellarium genutzt, um die Position des Quasars ausfindig zu machen. Als dann das Teleskop an die korrekte Position gesteuert wurde, haben wir die Kamera eingestellt und den zu photographierenden Bereich ausgewählt. In dem Bild wollten wir sowohl den Quasar ablichten, als auch die Phantom Frisbee-Galaxie.

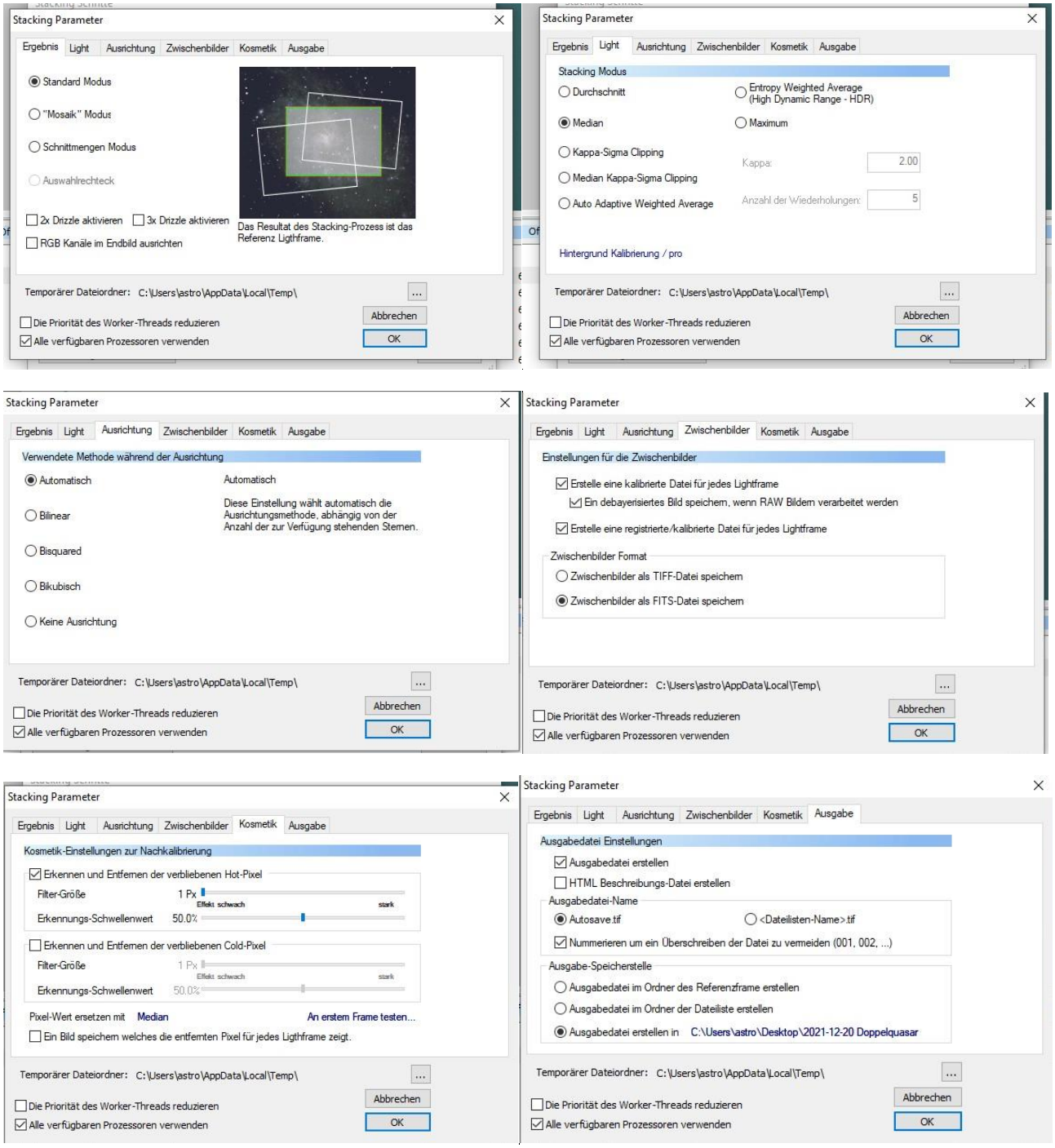


Mit einer Belichtungszeit von einer Minute haben wir 57 Lightframes aufgenommen. Die so entstandenen Bilder sahen folgendermaßen aus:

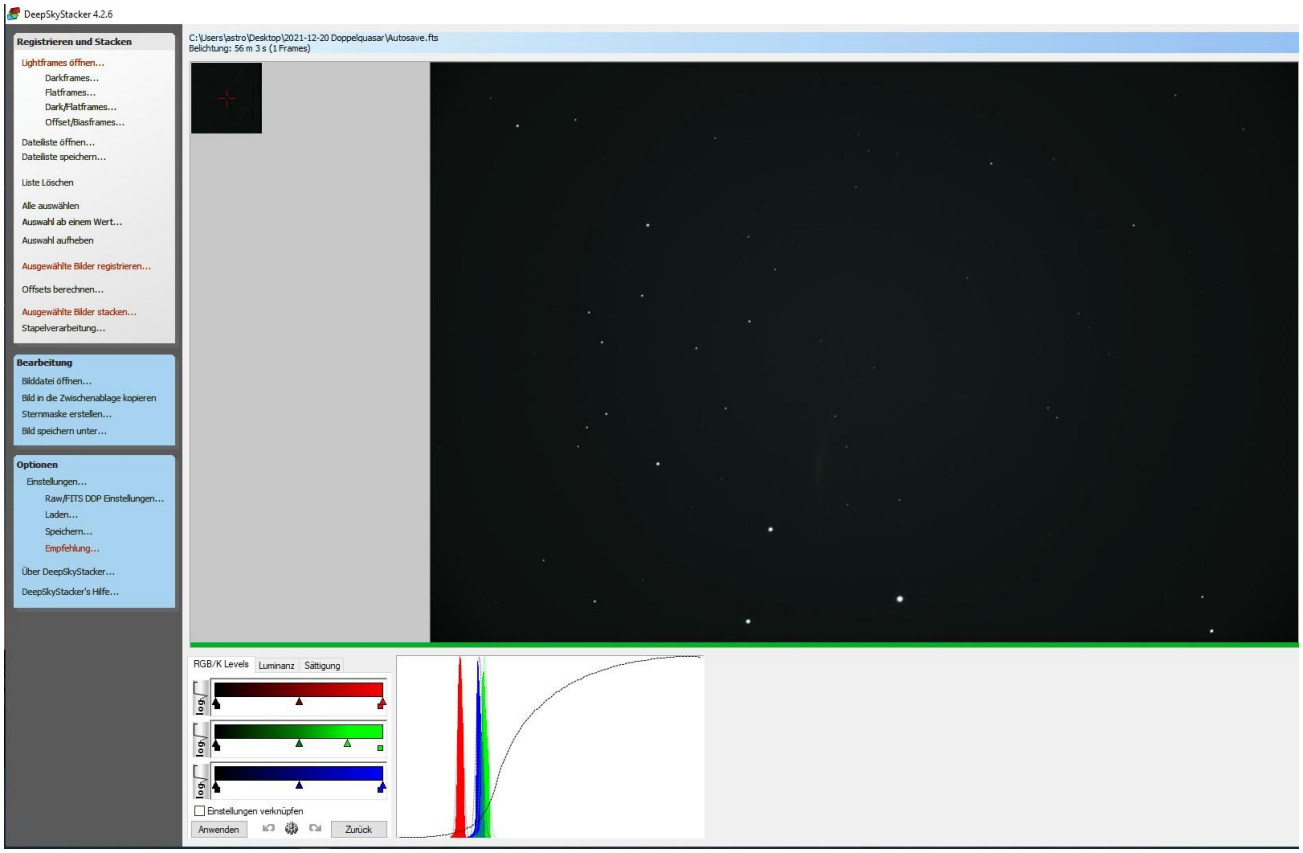
Die Rohbilder wurde im nächsten Schritt mit Deep Sky Stacker gestackt, also übereinandergelegt, um am Ende das bestmögliche Bild zu bekommen.



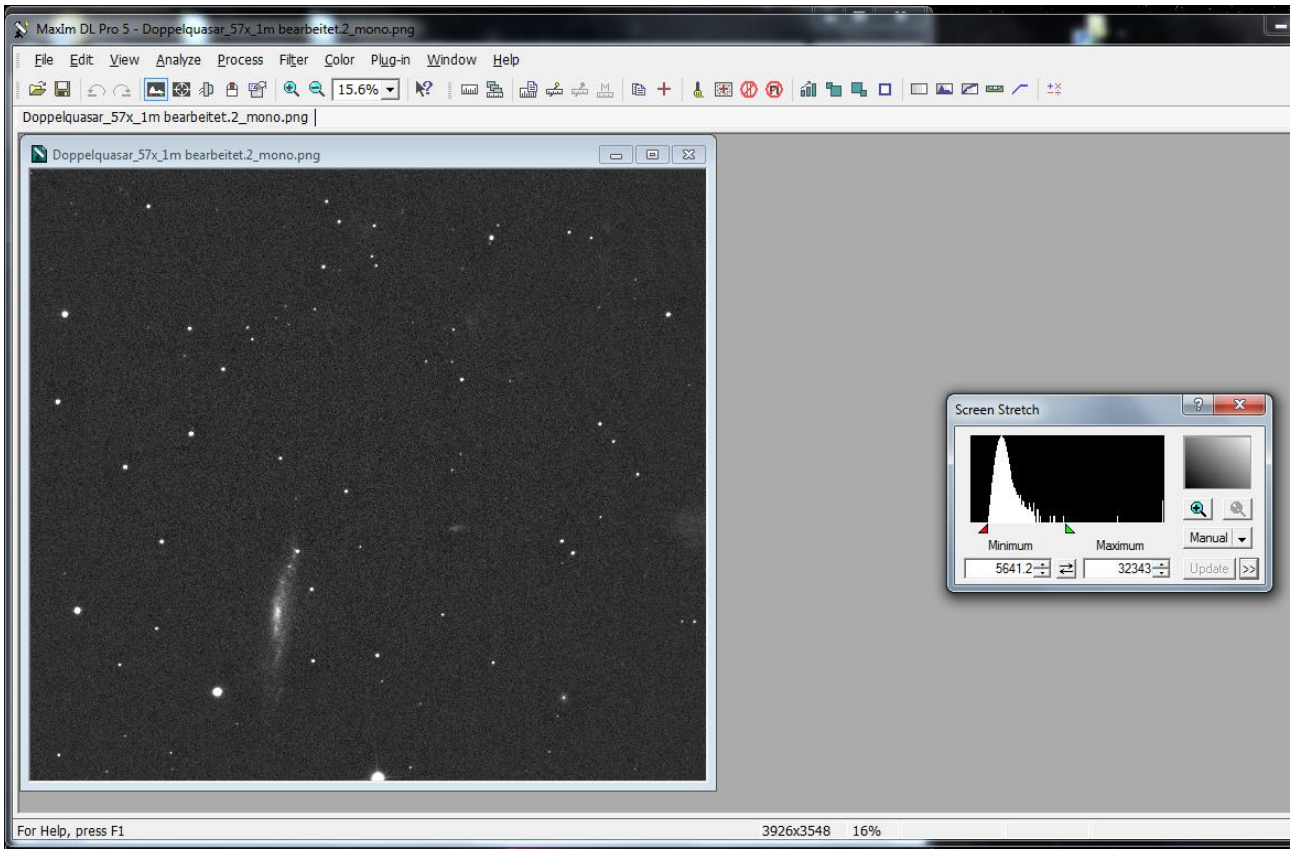
Da bei einer so hohen Entfernung zum Objekt unterschiedliche Parameter, wie Wind, welcher das Teleskop nur ganz leicht zum Bewegen animiert und somit aber veranlasst, dass die Rohbilder einen minimal unterschiedlichen Bereich ablichten, eine Rolle spielen, müssen diese im Laufe der Bildbearbeitung korrigiert werden.

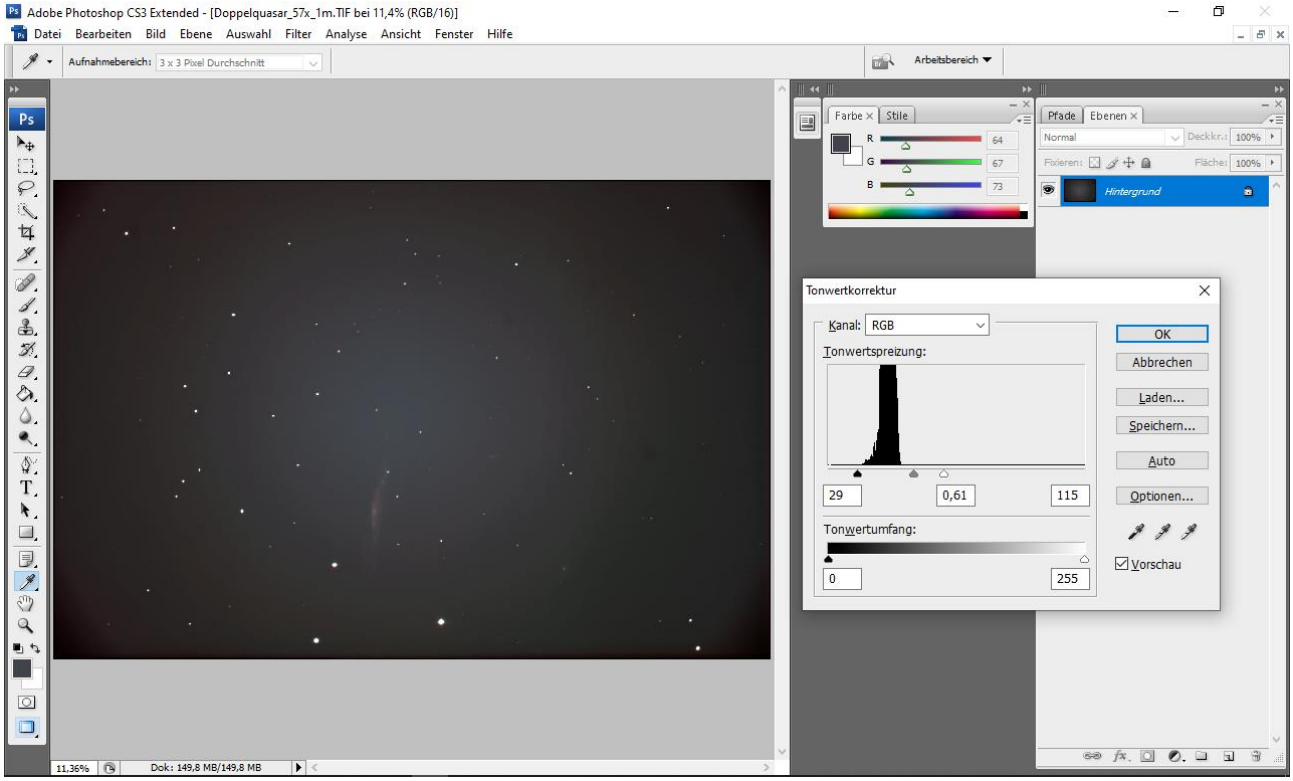


Kommen wir nun zum Endprodukt von Deep Sky Stacker, wo wir dann angefangen haben, ein Farbbild zu erzeugen.



Für den weiteren Bearbeitungsprozess haben wir zunächst MaximDL für die Entwicklung eines Farbbildes und dann Adobe Photoshop zur weiteren Bearbeitung genutzt. Die folgenden Abbildungen zeigen die Farbbearbeitung, Farbkorrekturen und Pixelfehlerreduktion.





Für weitere Farbkorrekturen habe ich den zu schützenden Bereich vor der Bearbeitung ausgeschnitten und daraufhin auf Photoshop den Befehl *GradientXTerminator* ausführen lassen.

Vorher

Nachher

Als ich dann die gewünschte Einfärbung erreicht hatte, gab es aufgrund von Pixelfehlern schwarze Stellen auf dem Bild. Diese konnten auch mit Photoshop mit dem Werkzeug *Stempel* wegretuschiert werden.

Bildausschnitt mit Pixelfehlern

vorher und nachher

Links sind einzelne schwarze Felder zu sehen, rechts wurden diese korrigiert

So kommen wir schlussendlich auf folgendes Gesamtbild, welches ebenfalls auf der Titelseite zu sehen ist.

Im Vergleich mit der offiziellen NASA/ESA Aufnahme von QSO 0957+561 kann man erkennen, dass das Hubble-Teleskop die Gravitationslinse YGKOW G1 abbilden konnte:

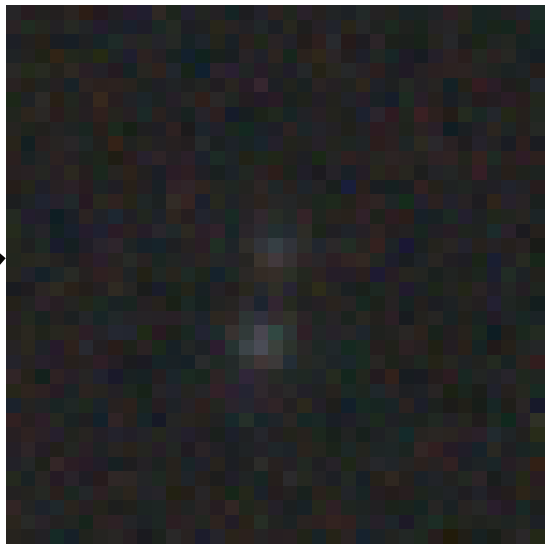


Abbildung 22 a, b: Aufnahmen von Doppelquasar QSO 0957+561 im Vergleich

Danksagung

Ich bedanke mich beim Carl-Fuhlrott-Gymnasium in Wuppertal und meiner Schule, dem Humboldtgymnasium in Solingen, für die Möglichkeit einer Teilnahme an dem Projektkurs für Astronomie. Für die zur Verfügung gestellten technischen Instrumenten und den zugehörigen Softwares gilt mein Dank dem Carl-Fuhlrott-Gymnasium, welches mit seiner hauseigenen Sternwarte beste Voraussetzungen für eine gelungene Projektarbeit liefert.

Mit besonderem Dank möchte ich mich an unseren Projektleiter Bernd Koch wenden. Er hat den außerschulischen Projektkurs möglich gemacht und uns, die Teilnehmer, an der Faszination für die Astronomie teilhaben lassen. Er hat uns durch das Schreiben der Projektarbeit geführt und uns bei Fragen zur Seite gestanden.

Quellenverzeichnis

Literatur

[1]		https://de.wikipedia.org/wiki/Morphologische_Klassifizierung_von_Galaxien
[2]		https://en.wikipedia.org/wiki/Galaxy
[3]		https://de.wikipedia.org/wiki/Galaxie
[4]		https://de.wikipedia.org/wiki/Sternentstehung#Erster_Kollaps
[5]		https://physik.cosmos-indirekt.de/Physik-Schule/Sternentstehung
[6]		https://de.wikipedia.org/wiki/Interstellares_Medium
[7]		https://iopscience.iop.org/article/10.1086/589963
[8]		https://sternentstehung.de/protosterne
[9]		https://sternentstehung.de/vorhauptreihensterne
[10]		https://en.wikipedia.org/wiki/Pre-main-sequence_star
[11]		https://en.wikipedia.org/wiki/Main_sequence
[12]		https://en.wikipedia.org/wiki/Hertzsprung%E2%80%93Russell_diagram
[13]		https://de.wikipedia.org/wiki/Absolute_Helligkeit
[14]		https://science.howstuffworks.com/star6.htm
[15]		https://www.swr.de/wissen/astronomische-sensation-schwarzes-loch-im-zentrum-der-milchstrasse-100.html
[16]		https://www.spektrum.de/lexikon/astronomie/aktiver-galaktischer-kern/8
[17]		https://www.spektrum.de/lexikon/astronomie/parsec/327
[18]		https://www.spektrum.de/lexikon/astronomie/poynting-fluss/356
[19]		https://www.spektrum.de/lexikon/astronomie/quasar/382
[20]		https://de.wikipedia.org/wiki/Quasar
[21]		https://www.nasa.gov/press-release/goddard/2016/nasa-scientist-to-discuss-the-science-of-interstellar-at-library-of-congress-lecture
[22]		https://de.wikipedia.org/wiki/Q0957%2B561#cite_note-2
[23]		https://scitechdaily.com/hubble-views-double-quasar-qso-0957561/
[24]		https://de.wikipedia.org/wiki/Einsteinring

[25]		https://en.wikipedia.org/wiki/Cosmic_Horseshoe
[26]		https://de.wikipedia.org/wiki/Griechisches_Alphabet
[27]		gemeinsame Herleitung in Zusammenarbeit mit Projektleiter Herrn Koch
[28]		https://www.astro.umd.edu/~miller/teaching/astr422/lecture13.pdf
[29]		https://www.wissenschaft.de/astronomie-physik/wieviel-wiegt-die-milchstrasse/
[30]		https://physik.cosmos-indirekt.de/Physik-Schule/Sonnenmasse
[31]		https://de.wikipedia.org/wiki/Lichtgeschwindigkeit

Bildquellen

Abbildung 1		selbstangefertigte Aufnahme
Abbildung 2		selbstangefertigte Aufnahme
Abbildung 3		https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hubble_sequence_photo.png
Abbildung 4		https://www.jpl.nasa.gov/images/pia16690-protostar-lrll-54361
Abbildung 5		https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:HR-diag-no-text-3.svg (von mir beschriftet)
Abbildung 6		425985main_Cas_a_composite_unlabeled.jpg (2556×1935) (nasa.gov)
Abbildung 7		https://idw-online.de/de/image364514
Abbildung 8		selbstangefertigte Zeichnung, inspiriert durch die Zeichnung in der Textquelle
Abbildung 9		https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Artist%E2%80%99s_impression_of_the_huge_outflow_ejected_from_the_quasar_SDSS_J1106%2B1939.jpg
Abbildung 10		https://www.nasa.gov/sites/default/files/thumbnails/image/image2-_interstellar.jp
Abbildung 11		https://commons.wikimedia.org/wiki/File:UrsaMajorCC.jpg (Autor: Till Credner)
Abbildung 12		Ausschnitt aus selbstangefertigte Aufnahme
Abbildung 13		https://www.nasa.gov/sites/default/files/potw1403a_0.jpg
Abbildung 14		https://commons.wikimedia.org/wiki/File:A_Horseshoe_Einstein_Ring_from_Hubble.JPG
Abbildung 15		selbstangefertigte Zeichnung
Abbildung 16		mit FSCapture aufgenommene Photographie am Tag der Aufnahme
Abbildung 17		https://www.planewave.eu/produkte/teleskope/cdk20-astrograph-f/68-mit-quarzglas-optik
Abbildung 18		https://10micron.eu/montierungen/aequatoriale-montierungen/gm4000-hps-ii-goto-montierung
Abbildung 19		https://www.canon.de/cameras/eos-rp/
Abbildung 20		selbstangefertigte Aufnahme
Abbildung 21 a, b		selbstangefertigte Aufnahme, Person (rechts): Blanca Dewey
Abbildung		Alle Abbildungen ohne Bildunterschrift unter *4.3 Software* sind von mir angefertigte Aufnahmen
Abbildung 22 a		https://www.nasa.gov/sites/default/files/potw1403a_0.jpg

Abbildung 22 b		Ausschnitt aus selbstangefertigte Aufnahme

Benutzte Hard- und Software

Teleskop		https://www.planewave.eu/produkte/teleskope/cdk20-astrograph-f/68-mit-quarzglas-optik
Montierung		https://10micron.eu/montierungen/aequatoriale-montierungen/gm4000-hps-ii-goto-montierung
Kamera		https://www.canon.de/cameras/eos-rp/
Astromodifikation		http://www.astro-modifikationen.de/
Stellarium		https://stellarium.org/de/
Deep Sky Stacker		http://deepskystacker.free.fr/english/index.html
MaximDL		https://de.freedownloadmanager.org/Windows-PC/MaxIm-DL.html
Photoshop		https://www.adobe.com/de/products/photoshop.html
FSCapture		https://www.faststone.org/FSCaptureDownload.htm

Alle Quellen wurden zuletzt im April oder im Mai 2022 abgerufen.

Unterstützungsleistung

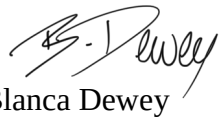
Kursleiter des Projektkurses am Carl-Fuhlrott Gymnasium Wuppertal Bernd Koch unterstützte die Teilnehmenden bei der erforderlichen Vorarbeit und begleitete uns beim Erstellen der Arbeit. Zusätzlich stellte er uns die technische Ausstattung der Schule zur Verfügung.

Abschlusserklärung

Hiermit versichere ich, dass ich diese Projektarbeit selbstständig angefertigt habe und alle Quellen, aus welchen ich Informationen bezogen habe, Bilder, welche nicht von mir angefertigt wurden und benutzte Hilfsmittel genau angegeben habe.

Hiermit erkläre ich mich mit einer schulinternen Veröffentlichung und einer Veröffentlichung auf der Homepage des Carl-Fuhlrott-Gymnasiums meiner Projektarbeit *Quasare- Aktive Kerne von Galaxien* einverstanden.

Solingen, den 15.05.2022



Blanca Dewey