Städtisches Gymnasium Wülfrath
in Kooperation mit dem CFG Wuppertal
Betreuer: Bernd Koch

Projektarbeit

im Rahmen des
Projektkurses Astronomie
2021/22 am Carl-Fuhlrott-Gymnasium

Die Evolution des Kosmos

—

Die Hubble-Konstante als Schlüssel
zur Untersuchung des Universums

Vorgelegt von:

Melina Anna Mitsakos
Kastanienallee 63
42489 Wülfrath

melina-anna.mitsakos@sgw.logineo.de,
bernd.koch@astrofoto.de

Abgabedatum: 16.05.2022

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis **II**

Tabellenverzeichnis **III**

Abkürzungsverzeichnis **III**

1 Einleitung **1**

2 Entwicklungsgeschichte des Kosmos **2**

2.1 Weg zum Paradigma 2

2.2 Paradigma 3

3 Kosmologisches Standardmodell **8**

3.1 Forschung 8

3.2 Hubble-Konstante 12

3.3 Widersprüche und Schwierigkeiten 13

4 Eigene Forschung **14**

4.1 Forschungsziel 14

4.2 Verwendete Geräte 15

4.3 Experimenteller Aufbau 19

4.4 Spektroskopie 20

4.5 Durchführung der Beobachtung 21

4.6 Auswertungsprozess 22

4.7 Ergebnisse und Diskussion 28

5 Fazit und Ausblick **31**

Quellenverzeichnis **33**

Anhang **36**

Danksagung **44**

Selbstständigkeitserklärung **44**

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Modell der Evolution des Kosmos 7
Abbildung 2: Foto des CMB von PLANCK und WMAP 10
Abbildung 3: Plot zu verschiedenen Werten der Hubble-Konstante 13
Abbildung 4: Foto der Galaxie NGC7469 14
Abbildung 5: Foto des C14 EdgeHD Teleskops mit Montierung 15
Abbildung 6: Darstellung des Strahlengangs im C14 EdgeHD Teleskop 15
Abbildung 7: Foto der Kamera STF-8300M 16
Abbildung 8: Modell einer Photozelle 16
Abbildung 9: Foto des Strahlengangs im DADOS-Spaltspektrographen 18
Abbildung 10: Foto der Messgeräte 18
Abbildung 11: Foto der Referenzlampe 19
Abbildung 12: Foto des Beobachtungsaufbaus 19
Abbildung 13: Skizze der Interferenzbedingung am Gitter 20
Abbildung 14: Bildschirmfoto während der Beobachtung 21
Abbildung 15: Bildschirmfoto des Kalibrationsmodus 22
Abbildung 16: Bildschirmfoto der Anwendung der Kalibration 22
Abbildung 17: Bildschirmfoto des Ausschnitts des Spektrums 24
Abbildung 18: Bildschirmfoto der Kalibration des NeAr-Spektrums 24
Abbildung 19: Bildschirmfoto eines Gaußfits an Hα 25
Abbildung 20: Bildschirmfoto der baryzentrischen Korrektur 26
Abbildung 21: Bildschirmfoto der Berechnung der Entfernungsgeschwindigkeit 26
Abbildung 22: Bildschirmfoto der Messung der Dispersion von Hα 27
Abbildung 23: Bildschirmfoto der Messung der Instrumentendispersion 27
Abbildung 24: Foto von 3C273 32
Abbildung 25: Simulation der Parameter des Spektrographen 36
Abbildung 26: Bildschirmfoto aller Rohbilder 37
Abbildung 27: Bildschirmfoto der Kalibration des Spektrums von α Lac 38
Abbildung 28: Bildschirmfoto des kalibrierten Galaxienspektrums von NGC7469 . . 39
Abbildung 29: Bildschirmfoto der Entfernungsangaben der NED 40
Abbildung 30: Skizze der Wasserstoffwolke in NGC7469 41
Abbildung 31: Bildschirmfoto der Auswertung der Messungen (1) 42
Abbildung 32: Bildschirmfoto der Auswertung der Messungen (2) 43

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht der Ergebnisse der Rotverschiebung und der Hubble-Konstante 28
Tabelle 2: Übersicht der Ergebnisse der Radialgeschwindigkeit 28
Tabelle 3: Übersicht der Ergebnisse der Geschwindigkeitsdispersion 30

Abkürzungsverzeichnis

ADU	Analog-Digital-Unit
AGN	Active Galactic Nucleus
ART	Allgemeine Relativitätstheorie
BASS	Basic Astronomical Spectroscopy Software
BLR	Broad Line Region
CDM	Cold Dark Matter
CMB	Cosmic Microwave Background
COBE	Cosmic Background Explorer
FWHM	Full Width Half Maximum
IAU	International Astronomical Union
IFU	Integral Field Unit
JWST	James Webb Space Telescope
MACHO	Massive (Astrophysical) Compact Halo Object
MEGARA	Multi-Espectrógrafo en GTC de Alta Resolución para Astronomía
MOND	Modified Newtonian Dynamics
NED	NASA Extragalactic Database
NGC	New General Catalogue
QE	Quantum Efficiency
QSO	Quasi-stellar Object
SIMBAD	Set of Identifications, Measurements, and Bibliography for Astronomical Data
SNR	Signal-Noise-Ratio
WIMP	Weakly Interactive Massive Particle
WMAP	Wilkinson Microwave Anisotropy Probe

1 Einleitung

Warum ist der Himmel bei der überwältigenden Anzahl an Sternen und anderen Objekten in jeder Richtung des Kosmos nicht unfassbar hell, egal, wohin wir schauen? Diese Überlegung ist auch unter dem Namen Olbers'sches Paradoxon bekannt. Die wahrscheinlichste Lösung des Problems: Wäre das Universum statisch, so dürfte es keinen dunklen Nachthimmel für uns geben. Da dies nicht der Fall ist, geht man davon aus, dass sich der Kosmos ausdehnt und in einem Urknall begonnen hat, sodass das beobachtbare Universum nicht unendlich groß ist und keine unendliche Zahl an Sternen enthält. Beobachtungen haben diese Annahme bis zum heutigen Zeitpunkt bestätigt. [1]

Mich fasziniert das Zusammenspiel von Materie und Raum auf den großen Skalen des Universums. Dabei stellen sich mir einige Fragen: Wie hat das Universum begonnen, und wie wird es sich weiterentwickeln? Ist das Universum grenzenlos?

Meine Motivation dieser Projektarbeit ist, Licht ins Dunkel der Entwicklung des Universums zu bringen beziehungsweise es einzufangen und damit dem Geheimnis des Kosmos um seine Geschichte sowie Zukunft auf die Spur zu kommen.

Im Rahmen dieser Arbeit gehe ich auf die oben gestellten Fragen ein, insbesondere auf das Paradigma über die Entwicklung des Universums, die Forschung zur Unterstützung und Widersprüche dieses Modells sowie die eigene Bestimmung der Hubble-Konstante im Zusammenhang mit der Expansion des Universums. Die Hubble-Konstante spielt eine zentrale Rolle bei der Erforschung des Kosmos, konnte bisher aber nicht mit hoher Genauigkeit festgelegt werden, da unterschiedliche Messungen verschiedene Ergebnisse lieferten. Von besonderem Interesse ist also, wie genau die Hubble-Konstante im Rahmen einer Projektarbeit gemessen werden kann. Dafür wird exemplarisch die Galaxie NGC7469 spektroskopiert, ihre kosmologische Rotverschiebung und die Geschwindigkeitsdispersion der Hα-Linie gemessen, woraus ihre Radialgeschwindigkeit berechnet sowie die Hubble-Konstante bestimmt wird.

2 Entwicklungsgeschichte des Kosmos

2.1 Weg zum Paradigma

Unser Bild von unserem Platz im Universum und dem Universum selbst hat sich seit Beginn der Menschheit immer weiter entwickelt. Es gab viele verschiedene Weltbilder; eines davon ist das heliozentrische Weltbild von Nikolaus Kopernikus, der von 1473 bis 1543 lebte. Er schlug vor, dass die Erde um die Sonne kreist und wir somit nicht das Zentrum des Universums sind. Das entsprach nicht dem Konsens der Bevölkerung, die Aristoteles' Idee von einem statischen Universum mit der veränderlichen Erde als Mittelpunkt adaptiert hatte.
Schon lange Zeit rankten sich Mythen um das weißliche Band am Firmament, das wie Milch aussah und daher von den Griechen Galaxis (Milchstraße) genannt wurde. Der erste Schritt hin zur Entdeckung von Galaxien wurde wohl von Galileo Galilei gemacht. Er „entlarvte“ 1609 mithilfe seines Fernrohrs als erster das Milchstraßenband am Himmel als eine Ansammlung von Sternen. Thomas Wright schlug daraufhin 1750 vor, dass die Milchstraße eine flache Sternscheibe ist und wir uns in ihr befinden, weshalb sie als Band am Nachthimmel zu sehen ist. Anfang der 1780er Jahre, also eine ganze Zeit nach der Beobachtung Galileis, untersuchte Wilhelm Herschel die Anzahl und Struktur der Sternanordnungen und katalogisierte sie.
Im 18. Jahrhundert waren Kometen nach der Veröffentlichung des Buches über Kometen von Edmond Halley die favorisierten Beobachtungsobjekte, da Neuentdeckungen deren Beobachter schnell berühmt machten. Auch Charles Messier und Pierre Méchain gingen auf „Kometenjagd“, wobei sie allerdings unter anderem auf sich nicht bewegende Nebel stießen. Daher fertigten sie einen Katalog mit zahlreichen Objekten an, um Nebel von Kometen unterscheiden zu können. Tatsächlich handelt es sich bei einigen dieser Nebel um Galaxien, deren Messier-Bezeichnungen bis heute gängig sind. Die im Messier-Katalog aufgeführten Galaxien haben in etwa einen Durchmesser von 8 kLj bis 180 kLj und sind $2,52$ MLj bis 67 MLj von uns entfernt. [2]
Sir William Huggins nutzte die Spektroskopie, um die Nebel unterscheiden zu können. Nähere Galaxien zeigen ein Absorptionsspektrum, welches dem von vielen überlagerten Sternspektren ähnelt, während bei sehr weit entfernten Galaxien häufig Emissionsspektren zu beobachten sind, welche deutlich die Emissionslinien von Wasserstoff oder Synchrotronstrahlung zeigen.
1912 machte Henrietta Swan Leavitt die Entdeckung der Periode-Leuchtkraft-Beziehung der δ-Cepheidensterne (Pulsationsveränderliche), mit der die Entfernung von Objekten bis 3 MLj bestimmt werden kann. Harlow Shapley maß die Entfernung von Kugelsternhaufen in der Umgebung der Milchstraße mittels Fotometrie von RR Lyrae-Sternen und fand heraus, dass diese ein kugelförmiges System (Halo) von etwa 30 kLj Entfernung von der Erde bilden, und dass der Rest der Sterne auf einer flachen Scheibe verteilt ist.
1920 gab es „The Great Debate“: eine Debatte in der National Academy of Sciences über die Größe der Milchstraße bzw. des Universums sowie den Aufbau und die Position der Spiralnebel. Harlow Shapley befürwortete hierbei die big-galaxy-Hypothese, also dass die Milchstraße die einzige Galaxie des Universums ist und einen Durchmesser von 300 kLj hat. Schon drei Jahre

später, 1923, konnte Edwin Hubble mittels der Cepheidenmethode von Henrietta Swan Leavitt zeigen, dass der Andromedanebel eine Entfernung von 1 MLj hat und daher außerhalb der Milchstraße liegen muss. Das war ein sehr bedeutsamer Schritt vorwärts. Inzwischen sind mehr als 100 Milliarden Galaxien im Universum bekannt. [3]
Infolge der spektroskopischen Untersuchung von Galaxien stellte der amerikanische Wissenschaftler Vesto Slipher Anfang des 20. Jahrhunderts eine Rotverschiebung in den Spektren einiger Galaxien fest, die analog zum akustischen Dopplereffekt als eine Folge der Fortbewegung von Lichtquellen vom Beobachter interpretiert wurde (optischer Dopplereffekt). Georges Lemaître, ein belgischer Astronom und katholischer Priester, war der Erste, der populär die Ansicht vertrat, das Universum habe sich von einem Punkt unendlicher Dichte zu seinem heutigen Zustand entwickelt und sich dabei nach allen Seiten ausgedehnt, ohne dass die in ihm enthaltenen Objekte dadurch ihre Position verändert haben oder selbst größer wurden. Letztendlich war es Edwin Powell Hubble 1929, zwei Jahre nach Lemaître, der dank der Radialgeschwindigkeitsuntersuchungen einiger Galaxien mit Milton Humason die Expansionsgeschwindigkeit des Universums bestimmte und das nach ihm benannte Hubble-Gesetz mit der Hubble-Konstante prägte. [4] [5]
Albert Einsteins ART aus dem Jahr 1915 führt bei der „Zurückspulung“ der Zeit dazu, dass sich eine Singularität ergibt, also ein Punkt unendlicher Dichte, an dem die uns bekannten Naturgesetze versagen. Dieser Punkt wurde von Fred Hoyle 1949 mit dem Begriff „Big Bang“ in Zusammenhang gebracht und sollte zukünftig im deutschsprachigen Raum als Urknall bezeichnet werden. Lemaîtres Überlegungen stützten sich übrigens auf die ART. [6]

Auch in dieser Arbeit werden einige bereits getroffene Annahmen in Bezug auf Kosmologie übernommen. Zunächst wird vorausgesetzt, dass die Gesetze der Physik universelle Gültigkeit haben. Außerdem werden die ART und ihre Aussagen als grundlegend zur Beschreibung des Universums erachtet; also ist die Gravitation ein Effekt der Krümmung der Raumzeit und träge und schwere Masse sind dasselbe. Weiterhin gilt das kosmologische Postulat, welches besagt, dass das Universum ab sehr großen Skalen von etwa 100 Mpc homogen (die Verteilung der Masse ist gleichmäßig) und isotrop (das Universum sieht von jedem Punkt gleich aus) ist. [5] [7]

2.2 Paradigma

Urknall

Die Geschichte des Universums begann mit dem Urknall bzw. big bang, der Explosion des Raumes selbst. Dieser Abschnitt der Entwicklung kann kaum erforscht werden, da die Gesetze der Physik diese Singularität nicht zu beschreiben vermögen. Aufgrund der Kopplung von Raum und Zeit als Raumzeit kann auch nicht nach dem „Davor“ gefragt werden, weil die Zeit erst mit dem Urknall zu existieren begann. Es muss am Anfang einen Überschuss von Materie zu

Antimaterie gegeben haben, weil das Universum sonst jetzt leer wäre. Was diesen Überschuss hervorgerufen hat, ist unklar.

Teilchenplasma, Inflation und Nukleosynthese

Erst nach Ablauf der Planck-Zeit $t_P \approx 10^{-43}$ s können Aussagen über den Zustand des Universums getroffen werden. Nach dieser Zeitspanne hatte das Universum eine Temperatur von 10^{32} K, eine geringere Ausdehnung als ein Proton und enthielt Quarks sowie Leptonen, ohne dass sie unterschiedliche Eigenschaften aufgewiesen hätten. In der darauffolgenden inflationären Expansion des Universums um den Faktor 10^{30} innerhalb von 10^{-8} s aufgrund des „Schwungs“ des Urknalls, kühlte es auf 10^{27} K ab. Bis $t \approx 10^{-4}$ s erfolgte eine Abkühlung auf 10^{10} K, sodass sich Protonen und Neutronen sowie ihre Antiteilchen bilden konnten. Außerdem gab es hochenergetische Photonen und Leptonen, die sich durch den sehr dichten Raum bewegten und folglich stark gestreut wurden. Eine Minute nach dem Urknall begann die Nukleosynthese von Protonen und Neutronen zu Deuterium-, Helium- und Lithiumkernen. Das geschah bei einer Temperatur von 10^7 K, welche infolge der weiteren Expansion in den nächsten Minuten abnahm und daher die Kernfusion unterbrach. Im anschließenden Zeitraum bis $t \approx 380\,000$ a standen die Atomkerne, Protonen, Neutronen und Elektronen im thermischen Gleichgewicht mit der elektromagnetischen Strahlung.

Rekombination und dunkles Zeitalter

Dann begann der Zeitraum der Rekombination. Bei einer Temperatur von 3000 K konnten Atomkerne und Elektronen miteinander binden und leichte Atome bilden, hauptsächlich Wasserstoffatome, aber auch Helium. Dementsprechend konnten sich die Photonen ungehinderter ausbreiten und das Universum wurde durchsichtig. Man spricht auch von der Entkopplung von Materie und Strahlung, da sie einander nicht mehr so stark beeinflussten wie noch zuvor, als Photonen Atomkerne spalteten. Bei dem in der Phase der Rekombination durch frei-gebunden-Übergänge von Elektronen mit Protonen zu Wasserstoffatomen ausgesandten Licht handelt es sich um die kosmische Mikrowellenhintergrundstrahlung, auf die näher in Abschnitt 3.1 eingegangen wird. Es sei angemerkt, dass wir keine früheren Strukturen als den Mikrowellenhintergrund beobachten können, weil das Universum vor der Rekombination für Licht undurchdringbar war.
Bis zum Entstehen der ersten Sterne war die Materie größtenteils neutral und transparent, weshalb weder Lichtabsorption noch Lichtemission stattfanden. Diese Ära wird daher auch als dunkles Zeitalter bezeichnet.

Strukturbildung und Reionisierung

Die Gravitation sorgte fortan dafür, dass sich die Materie trotz der ähnlichen Dichte im Universum wegen schwachen Fluktuationen zu dichten Strukturen ansammelte, welche allerlei Objekte

hervorbrachten - Sterne, Sternsysteme, Galaxien und (Super-)Galaxienhaufen. Die ersten Sterne bildeten sich nach $t \approx 4 \cdot 10^6$ a und das von ihnen ausgesandte ultraviolette Licht reionisierte umliegende Gaswolken im interstellaren Medium. Durch Supernovae, stellare Winde, den Strahlungsdruck der Sterne und besondere Endstadien wie Neutronensterne oder Schwarze Löcher wurde zudem die Umgebung stark beeinflusst, sodass sich auch schwerere Elemente, Moleküle und andere Strukturen bilden konnten. Die ersten Quasare erschienen nach $t \approx 10^9$ a, während die ersten nicht-elliptischen Galaxien nach $t \approx 5 \cdot 10^9$ a entstanden. [5] [7] Eine interessante Simulation zur Phase der kosmischen Reionisierung findet sich unter folgendem Link. [8]

Expansion

Im weiteren Verlauf der stetigen Expansion bildeten sich die Materiestrukturen immer deutlicher heraus. Die Rotverschiebung des Großteils der Galaxienspektren wird als ein Effekt der Expansion des Kosmos interpretiert. Dadurch, dass sich dieser nach allen Seiten ausbreitet, wobei die Objekte aber relativ gesehen an ihren eigentlichen Positionen bleiben, dehnt sich der Raum zwischen den Galaxien aus. Somit wird auch die Wellenlänge der Photonen größer, und sie werden dem rötlicheren Bereich des Spektrums zugeordnet. Es wird in diesem Zusammenhang trotz desselben Erscheinungsbilds nicht von einem optischen Dopplereffekt gesprochen, weil dieser auf einer Eigenbewegung der Objekte basiert (wie sie zum Beispiel bei Sternen zu finden ist). Auch in der Nähe sehr massereicher Objekte wie Schwarzen Löchern kommt es zu einer Rotverschiebung des Lichts, allerdings aufgrund der starken Krümmung des Raumes. Bei sehr weit entfernten Objekten überwiegt die kosmologische Rotverschiebung deutlich die anderen beiden Aspekte. Wegen der Zunahme der Wellenlänge der Photonen gibt es nach $f = \frac{c}{\lambda}$ eine Abnahme der Frequenz, was bedeutet, dass die Energie der Photonen durch $E_\gamma = hf$ geringer wird. Da die ART keinen Energieerhaltungssatz fordert, ist dieser Umstand kein Problem.

Man kann sich den Raum eines expandierenden Universums wie die Oberfläche eines Luftballons vorstellen, wenn der Luftballon im Verlauf der Zeit aufgeblasen wird, wodurch sich die Objekte voneinander entfernen. Hierbei muss lediglich beachtet werden, dass sich die Objekte selbst nicht vergrößern, weil die Gravitation auf den kleineren Skalen überwiegt. Daher sind die Galaxien auch nicht ganz gleichmäßig im Universum verteilt, weil die ursprünglichen Materie- bzw. Masseverdichtungen zusammengeblieben sind. Beobachtungen in dieser Hinsicht lassen sich beispielsweise an Galaxienhaufen mit bis zu 1000 Galaxien und 5 Mpc Ausdehnung sowie Galaxien-Superhaufen mit bis zu 50 Mpc Ausdehnung machen, welche miteinander vernetzt sind und leere Blasen namens „Voids“ umschließen. [5]
Selbst wenn die Objekte im expandierenden Universum ebenfalls etwas gedehnt worden wären, würden wir es nicht bemerken, da die Maßstäbe dieselbe Streckung erfahren hätten. Bleibt man bei der Analogie des Luftballons, so wird auch deutlich, dass wir den Raum mit der Eigenschaft einer flachen (euklidischen) Geometrie wahrnehmen können, weil das Universum durch die Inflation so weit gedehnt wurde, dass jegliche Krümmung insignifikant klein wurde. [1]

Dunkle Materie

Betrachtet man alle sichtbare Materie und schätzt deren Masse ab, so wird deutlich, dass sie bei Weitem nicht ausreicht, um so große gravitative Effekte auszuüben, dass sie solch ausgedehnte Strukturen zusammenhalten kann. Auch die fast gleichbleibend hohe Bahngeschwindigkeit von Objekten in Spiralgalaxien kann zunächst nicht erklärt werden, da sie von der Entfernung eines Objektes zum Zentrum seiner Galaxie unabhängig zu sein scheint, was nicht den Erwartungen entspricht. Auch die starke Lichtablenkung durch Gravitationslinsen wie Einstein-Ringe oder -Bögen erfordert größere Massen als beobachtet. Man vermutet daher die Existenz von Dunkler Materie, welche 85 % der Materie und 27 % der Gesamtdichte Ω_0 des Universums ausmacht, weitere 5 % sind durch gewöhnliche baryonische Materie gegeben. Dunkle Materie wird so genannt, weil sie nicht mit elektromagnetischer Strahlung, sondern nur mit baryonischer Materie über Gravitation interagiert. Potenzielle Kandidaten für Dunkle Materie sind MACHOs (dunkle baryonische Materie, zum Beispiel erkaltete Braune Zwerge oder Schwarze Löcher) oder WIMPs (nicht-baryonische Materie). MACHOs können durch die von ihnen hervorgerufenen Mikro-Gravitationslinseneffekte nachgewiesen werden, allerdings gibt es nicht genug solcher Objekte, um die große Massendiskrepanz zu tilgen. Dunkle Materie ist in Halos um Galaxien herum angeordnet, wobei der Halo aus Dunkler Materie deutlich massereicher und größer als der stellare Halo ist. Die Strukturen der Dunklen Materie ermöglichten erst eine Anordnung der baryonischen Materie, wie wir sie heute beobachten können. Geht man von der Existenz Dunkler Materie aus, so erübrigen sich die genannten Probleme, da nun genug Masse vorhanden ist, um in Spiralgalaxien außen gelegene Objekte zu beschleunigen und Licht im Raum abzulenken. [5] [7]

Gegenwart und Dunkle Energie

Im gegenwärtigen Zustand des Kosmos lassen sich durchschnittlich 10^7 Photonen der Mikrowellenhintergrundstrahlung sowie 1 Atom in einem Volumen von $5\,\mathrm{m}^3$ finden. [6] Derzeit hat der Kosmos ein Alter von etwa $t = 13,8 \cdot 10^9\,\mathrm{a}$ und dehnt sich beschleunigt aus, wie beispielsweise das Supernova-Kosmologie-Projekt vom Ende des 20. Jahrhunderts nahelegt. Je weiter Objekte von uns entfernt sind, desto schneller bewegen sie sich von uns weg. Eine Übersicht über die bisherige Entwicklung des Kosmos bietet Abbildung 1.
Die übrigen 68 % der bereits erwähnten Gesamtdichte Ω_0 des Universums sind unbekannt und werden daher als Dunkle Energie bezeichnet, welche als ein negativer Druck aufgefasst werden kann, der dem gravitativen Zusammenfall des Universums entgegenwirkt. Diese Beobachtung wird in der ART mit der kosmologischen Konstante Λ berücksichtigt, welche Einstein ursprünglich einführte, um ein statisches Universum zu erhalten, welches sich aufgrund von Gravitation zusammenzog und daher durch eine intrinsische Kraft im Gleichgewicht gehalten werden musste. Einstein wandte sich später von der Idee eines statischen Universums ab und bezeichnete

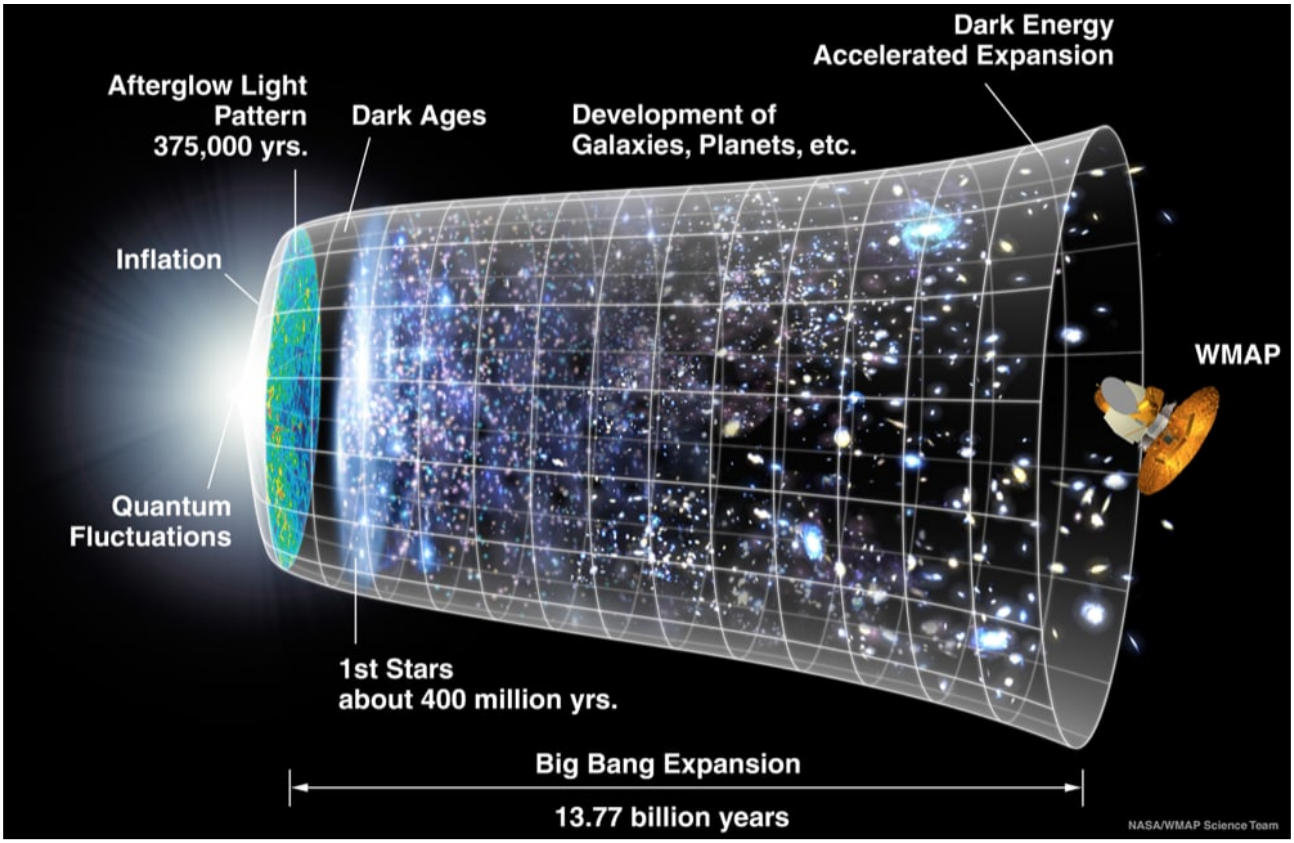


Abbildung 1: Modell der zeitlichen Entwicklung eines Ausschnitts des Kosmos bis zur Gegenwart, Veränderung: Ausschnitt des Originalbildes [9]

seine Überlegungen zur kosmologischen Konstante darauffolgend als größte Eselei seines Lebens; dennoch ist der Wert der Dunklen Energie mit der kosmologischen Konstante vereinbar. Aufgrund der Annahmen zu der Existenz Dunkler Materie und Dunkler Energie wird das gängige kosmologische Standardmodell auch mit Λ-CDM abgekürzt.

Grenzen und Dichteparameter

Wir können keine Aussagen darüber treffen, ob das Universum grenzenlos ist oder nicht, weil uns Licht von Objekten oder Strukturen, das zeitlich vor dem Abbild des CMB einzuordnen ist, nicht erreichen kann. Durch die endliche Lichtgeschwindigkeit können wir generell nur das Licht wahrnehmen, welches sich, verglichen mit der Expansionsgeschwindigkeit des Universums, schneller bewegt hat. Das beobachtbare Universum ist kleiner als das tatsächlich existierende. Aus der Luftballon-Analogie zur Expansion des Universums geht hervor, dass es keinen Rand und keinen im Universum gelegenen Mittelpunkt haben muss. Das beobachtbare Universum hat hingegen einen Rand.
Wie der Kosmos enden wird, hängt von dem Dichteparameter $\Omega_0 = \frac{\rho_0}{\rho_c} = \frac{8\pi G\rho_0}{3H_0^2}$ ab. Das bedeutet, wenn die gegenwärtige Dichte ρ_0 größer als die kritische Dichte ρ_c ($\Rightarrow \Omega_0 \gg 1$) ist, dass irgendwann die Gravitation die Überhand gewinnt und der Kosmos kontrahiert. Sind die beiden Dichten gleich groß ($\Rightarrow \Omega_0 = 1$), wird der Zustand des Universums in der Zukunft als kritisch

bezeichnet. Die Expansion wird gerade so aufhören und das Universum wird nicht kollabieren, aber dieser unsichere Zustand ist eher unwahrscheinlich. Ist die gegenwärtige Dichte kleiner als die kritische Dichte ($\Rightarrow \Omega_0 \ll 1$), so wird sich der Kosmos ewig weiter ausdehnen. Beobachtungen zeigen, dass sich unser Universum wahrscheinlich nicht nur ewig ausdehnen, sondern sogar weiterhin leicht beschleunigt expandieren wird. [7]

Zukünftige Entwicklung

Infolgedessen werden sich die Objekte im Universum also immer weiter voneinander entfernen. Die Wellenlänge des Lichts wird auf dem Weg zu uns stetig gedehnt werden - irgendwann so stark, dass wir es nicht mehr wahrnehmen können. Somit wird das Universum immer dunkler und auch kühler. Die vielen kommenden Sterngenerationen werden so lange scheinen, wie noch Materie vorhanden ist, welche aus Elementen mit einer niedrigeren Ordnungszahl als Eisen besteht. Danach wird es nicht mehr möglich sein, dass in Sternen Kernfusion stattfindet, weil die Kernfusion bei Elementen mit höherer Ordnungszahl energetisch ungünstig ist.
Weiterhin führen Jets von AGNs dazu, dass potentielle Materie für die Kernfusion von Sternen in den interstellaren Raum und somit von den Sternen wegtransportiert wird. Aneinander vorbeiziehende bzw. miteinander wechselwirkende Galaxien lösen einen schnellen Starburst aus, sodass im Laufe der Zeit alte Sterne zurückbleiben, ohne dass neue Sterne nachgebildet werden können. Zusätzlich zum Verlust von Licht durch extreme Rotverschiebung wird es also zunehmend an Lichtquellen mangeln. Schließlich werden aufgrund der andauernden Expansion die ganzen Materiestrukturen auseinandergerissen und sich zu einem dünnen Gas entwickeln. Selbst die größten Schwarzen Löcher werden irgendwann aufgrund der Hawking-Strahlung verdampfen. In der Größenordnung von $t = 10^{100}\,\mathrm{a}$ wird das Universum fast auf den absoluten Nullpunkt abgekühlt und leer sein. [1]

3 Kosmologisches Standardmodell

3.1 Forschung

Entfernungsbestimmung

Eine sehr große Entdeckung machte Henrietta Swan Leavitt, nämlich die Periode-Leuchtkraft-Beziehung der δ-Cepheidensternen. Dank ihr kann man durch die Bestimmung der mittleren scheinbaren Helligkeit $\overline{m}$ und Pulsationsperiode P von Sternen, die regelmäßige Muster in den Helligkeitskurven im Helligkeits-Zeit-Graphen zeigen, die absolute Helligkeit M mit $M = -1,67 - 2,54 \cdot \log \frac{P}{1\,\mathrm{d}}$ berechnen und anschließend unter Anwendung des Entfernungsmoduls $r = 10^{0,2\cdot(\overline{m}-M)} \cdot 10\,\mathrm{pc}$ die Entfernung r bestimmen. Dies geht für Objekte, die $0,3\,\mathrm{kLj}$ bis $3\,\mathrm{MLj}$ von uns entfernt sind, also lokale Galaxien.

Die Distanz von Galaxien oder Objekten von $1,5\,\mathrm{kLj}$ bis $300\,\mathrm{MLj}$ Entfernung kann mithilfe von Supernovae des Typs Ia bestimmt werden. Das geht, weil diese Art von Standardkerzen immer dieselbe maximale absolute Helligkeit $M_{max} = -19,4\,\mathrm{mag} \pm 0,2\,\mathrm{mag}$ haben. Bei dieser Art von Supernovae gibt es einen Zusammenstoß zwischen zwei Weißen Zwergsternen oder es findet Akkretion von Gas eines aufgeblähten Roten Riesen auf einen Weißen Zwerg statt, bis es zur thermonuklearen Explosion der immer gleichen Chandrasekhar-Grenzmasse von $1,4\,\mathrm{M}_\odot$ kommt. Das Besondere an den Spektren dieser Vorgänge ist, dass keine Wasserstoff- oder Heliumlinien vorkommen, dafür aber Linien von Elementen aus bestimmten radioaktiven Zerfällen wie beispielsweise von Ni56 zu Co56 zu Fe56 mit Halbwertszeiten von $6\,\mathrm{d}$ bis $77\,\mathrm{d}$. Zudem ist der Verlauf der Kurve im Helligkeits-Zeit-Diagramm im Anschluss an die Explosion charakteristisch für diesen Typ Supernova. Nach Bestimmung der scheinbaren Helligkeit kann wieder mit dem Entfernungsmodul $r = 10^{0,2\cdot(\overline{m}+19,4\pm0,2)} \cdot 10\,\mathrm{pc}$ die Entfernung berechnet werden.
Eine weitere Methode zur Entfernungsbestimmung ist die Anwendung der Hubble-Beziehung $r = \frac{v_r}{H_0}$. Dafür wird die Rotverschiebung $z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0}$ des Spektrums eines Objekts gemessen, daraus mit $v_{r(n.r.)} = z \cdot c$ mit $v_r \ll c$ die Radialgeschwindigkeit v_r berechnet und schließlich durch die derzeitige Hubble-Konstante H_0 geteilt. Diese Methode kann für Objekte mit einer Entfernung von $3\,\mathrm{MLj}$ bis $10\,\mathrm{GLj}$ angewandt werden. Die Beziehung $v_{r(n.r.)} = cz$ eignet sich jedoch nur für geringe Entfernungen, nämlich so lange, wie es sich um eine nicht-relativistische Radialgeschwindigkeit handelt. Liegen Objekte hingegen in großer Distanz zum Beobachter, ergibt sich die Rotverschiebung im Spektrum durch $z = \sqrt{\frac{c+v}{c-v}} - 1$. Aufgelöst nach der die Relativität beachtenden Radialgeschwindigkeit erhält man $v_{r(r.)} = \frac{cz^2+2cz}{z^2+2z+2}$. [5] [7]

Kosmische Hintergrundstrahlung

Die Entdeckung der kosmischen Mikrowellenhintergrundstrahlung im Jahr 1965 war ein glücklicher Zufall. Eigentlich sollten Arno Penzias und Robert Wilson Messungen an einer Hornstrahler-Antenne machen, mit der über Mikrowellen kommuniziert werden sollte. Stattdessen maßen sie ein gleichmäßiges Rauschen aus allen Richtungen mit einer Wellenlänge von $\lambda = 7,35\,\mathrm{cm}$. [10] Dieses wurde später als die bereits länger vorhergesagte kosmische Hintergrundstrahlung identifiziert - die Strahlung aus dem Entwicklungsabschnitt des Universums, als die Rekombination der Materie stattfand und damit den Photonen ermöglichte, sich in den Raum auszubreiten. Durch die Expansion des Kosmos dehnten sich die Wellenlängen dieser Strahlung etwa um den Faktor 1100.
Satelliten wie COBE, WMAP oder PLANCK vermaßen die kosmische Hintergrundstrahlung sehr genau, wie Abbildung 2 zeigt. Bei Auftragung der Wellenlänge gegen die Intensität stellte sich heraus, dass die Hintergrundstrahlung in ihrem Verlauf der Hohlraumstrahlung eines schwarzen Körpers bei $2,725\,\mathrm{K}$ entspricht (Plancksches Strahlungsgesetz). Damit erhält man eine Temperatur von etwa $3000\,\mathrm{K}$, die während der Rekombination geherrscht haben muss.

Wie schon in dem Namen von WMAP steckt, ist die Mikrowellenhintergrundstrahlung anisotrop. Das bedeutet, dass sie nicht in jeder Richtung gleich groß ist. Obwohl die Schwankungen um den Temperaturmittelwert nur im Bereich von ungefähr 10^{-6} K liegen, sind sie doch signifikant, denn zeigte die Strahlung keinerlei Schwankungen, so hätte auch die Materieverteilung 380 000 a nach dem Urknall absolut gleich sein müssen, weshalb sich nicht die von uns beobachtbaren Strukturen hätten bilden können. Auffällig ist eine Struktur namens „Sloan Great Wall“, welche eine Ausdehnung von 1,4 GLj hat. [5] [7]

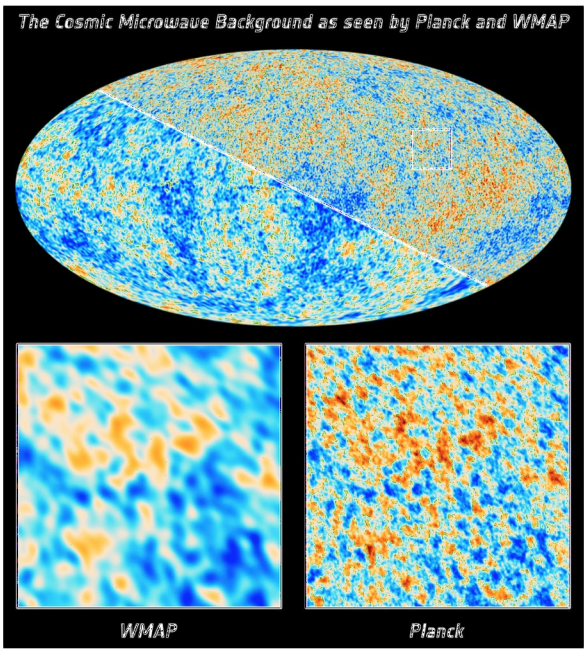


Abbildung 2: Foto des CMB von PLANCK und WMAP im Vergleich (die Farben entsprechen den Abweichungen vom Temperaturmittelwert), Veränderung: Ausschnitt des Originalbildes [11]

AGN und ihre Eigenschaften

Es stellte sich heraus, dass im Zentrum aller Galaxien supermassereiche Schwarze Löcher zu finden sind. Diese emittieren selbst keine elektromagnetische Strahlung, da sie die Raumzeit mit ihrer Masse so stark krümmen, dass noch nicht einmal Photonen ihrer Anziehungskraft entfliehen können. Wahrscheinlich emittieren Schwarze Löcher Hawking-Strahlung, welche sich dadurch ergibt, dass sich im Vakuum ständig Teilchen-Antiteilchen-Paare bilden und normalerweise wieder gegenseitig vernichten; verschwindet allerdings eines der Teilchen hinter dem Ereignishorizont, so kann das andere in die Weiten des Weltalls gelangen. Hawking-Strahlung ist jedoch sehr schwach und konnte bisher noch nicht beobachtet werden. Wird ein (supermassereiches) Schwarzes Loch von sehr viel Materie umgeben, so ordnet sich diese in einer Akkretionsscheibe an, die aus einer Gasscheibe und einem Staubtorus (also generell interstellarem Medium) besteht. Weiterhin gibt es auch Strömungen des intergalaktischen Mediums (fein verteilter Materie und Staub) in Richtung der Akkretionsscheibe und des Schwarzen Lochs, die cooling flows genannt werden. Die Akkretionsscheibe endet, bevor sie den Ereignishorizont erreicht, spätestens bei der letzten stabilen Umlaufbahn. Wenn ein Teilchen diese Umlaufbahn verlässt, stürzt es entweder im freien Fall auf den Ereignishorizont zu oder es kann dem Sturz in das Schwarze Loch durch einen Jet entkommen. Jets sind gebündelte Ausströmungen von Materie des Akkretionsflusses. Sie entstehen, wenn der Drehimpuls der akkretierten Materie groß ist und die Materie folglich zu schnell ist, um in das Schwarze Loch zu fallen, oder wenn die geladenen Teilchen des Akkretionsflusses entlang der magnetischen Feldlinien nach außen geleitet werden. Die von den Magnetfeldern hervorgerufenen Lorentzkräfte bündeln außerdem den Plasmastrom. Dies wird auch magnetische Kollimation genannt. Die Jets von supermassereichen Schwarzen Löchern in Zentren von Galaxien können deren Längen um ein Vielfaches übertreffen, da sie mehrere

Mpc groß werden können. Die Materie in den Jets bewegt sich mit nahezu Lichtgeschwindigkeit fort, sodass relativistische Erscheinungen auftreten. Untersucht man das von Akkretionsscheiben von supermassereichen Schwarzen Löchern ausgehende Licht, so kann man ein schwaches kontinuierliches Spektrum mit breiten Emissionslinien erkennen. Diese Art von Strahlung wird auch Synchrotronstrahlung genannt, die entsteht, wenn leichte, geladene Teilchen wie beispielsweise Elektronen oder Positronen durch ein Magnetfeld abgelenkt werden. Generell wird bei der Akkretion sehr viel Strahlung frei, unter anderem thermische Strahlung durch Reibungseffekte, Bremsstrahlung durch die Ablenkung oder Stoppung von elektrisch geladenen Teilchen im elektromagnetischen Feld oder die schon erwähnte Synchrotronstrahlung durch die Ablenkung von Elektronen bzw. Positronen im Magnetfeld. Die Umwandlung von Gravitations- in Strahlungsenergie ist bei Akkretionsscheiben von Schwarzen Löchern also extrem effizient. Die Begünstigung der heißen und schnellen Akkretionsflüsse bei kompakten Objekten führt zu sehr großen (den größten bekannten) Leuchtkräften im Kosmos; bei Akkretion auf ein supermassereiches Schwarzes Loch im Zentrum von Galaxien können Leuchtkräfte von 10^{14} Sonnenleuchtkräften erreicht werden. Diese werden dann als AGN bezeichnet. Weil kurzwelliges oder sichtbares Licht häufig vom Staubtorus der Akkretionsscheibe absorbiert wird, lassen sich diese Objekte am besten im Radiowellenbereich entdecken. Die Radiostrahlung ist davon nicht so stark betroffen.
Absorbiert und akkretiert das Schwarze Loch kaum Materie, da zu wenig in der näheren Umgebung zur Verfügung steht, so dienen es umgebende Objekte wie Sterne als Bestimmungsmittel für dessen Masse und folglich auch andere Eigenschaften. [7] [12]

Es gibt verschiedene Arten von AGN: unter anderem Radiogalaxien, Seyfert-Galaxien und Quasare. Das Besondere an Radiogalaxien ist, dass ihre Jets nicht stark gebündelt, sondern mit zunehmender Entfernung immer ausladender sind. Weil die Jets vor allem Radiowellen emittieren, werden sie auch Radiokeulen bzw. Radiolobes genannt. Ihre außergewöhnliche Struktur scheint sich dadurch zu ergeben, dass sie von einem heißen intergalaktischen Gas umgeben werden, in welches sie sich ausbreiten, und das sich infolge der Radiostrahlung immer mehr aufheizt. Daher kann man bei Beobachtungen dieser Galaxien in kleineren Wellenlängenbereichen in der Umgebung der Radiolobes eine starke Röntgenemission feststellen. [1]
Seyfert-Galaxien sind Spiralgalaxien und zeichnen sich durch eine Kontinuumsstrahlung aus, die sich vom optischen bis in den ultravioletten Spektralbereich zieht. Je nachdem, wie die Galaxie relativ zum Beobachter ausgerichtet ist, lassen sich zwei verschiedene Typen unterscheiden, wobei es auch Mischformen gibt. Breite H- und He-Emissionslinien sowie schmale [NII]- und [OIII]-Linien sind charakteristisch für Seyfert-Galaxien des Typs 1 (angewinkelte Ansicht), während bei Seyfert-Galaxien des Typs 2 alle Linien schmal sind (Seitenansicht). Die Linienverbreiterung wird auf eine Geschwindigkeitsdispersion bewegter Gaskomponenten im AGN zurückgeführt. [13]

Quasare sind so weit von uns entfernt und so hell, dass sie wie Sterne aussehen und deshalb auch als „quasistellare Objekte“ bezeichnet werden, die Abkürzung im Englischen ist QSO. Sie zeichnen sich durch sehr hohe Leuchtkräfte, große Rotverschiebungen und Jets aus. Die bei ihnen beobachteten Helligkeitsschwankungen ergeben sich aufgrund der unterschiedlichen Menge an verfügbarer Materie für die Akkretion. Es wird weiterhin zwischen radiolauten Quasaren (kühlere Akkretionsscheiben, häufig Jets, viel Synchrotronstrahlung) und radioleisen Quasaren (heiße Akkretionsscheiben, seltener Jets, weniger Synchrotronstrahlung und mehr thermische Strahlung) unterschieden. [5] [14]

3.2 Hubble-Konstante

Eine der wichtigsten Größen zur Untersuchung des Universums bildet die Hubble-Konstante $H_t = \frac{v_r(t)}{r(t)}$. Die Formel zeigt, dass die Hubble-Konstante von der Radialgeschwindigkeit v_r (Geschwindigkeit, mit der sich ein Objekt aufgrund der Expansion des Universums von uns entfernt) sowie der Entfernung r des Objekts abhängt. Das t in der Formel steht für den Zeitpunkt, zu dem die Messungen bzw. Beobachtungen gemacht wurden. Die Hubble-Konstante ist grundsätzlich also gar nicht zeitlich konstant, ändert sich aber im Vergleich mit der Zeitspanne der Forschung nicht wahrnehmbar und wird somit als konstant angesehen und immer in Bezug auf aktuelle Messungen ($t = 0$) angegeben, wofür dann das Symbol H_0 verwendet wird. Die angenommene Konstanz kommt außerdem daher, dass die Hubble-Konstante in alle Richtungen des Universums gleich groß ist. Die Einheit der Hubble-Konstante ist $[H_t] = \frac{\mathrm{km}}{\mathrm{s \cdot Mpc}}$. Qualitativ ausgedrückt, gibt sie also an, mit welcher Geschwindigkeit sich ein Objekt bewegt, wenn es sich um 1 Mpc radial von uns entfernt. Da diese Bewegung des Objekts aufgrund der Expansion des Kosmos geschieht, kann man auch sagen, dass die Hubble-Konstante die Ausdehnungsgeschwindigkeit des Raumes bei einer Ausdehnung um 1 Mpc beschreibt.

Für Erstaunen sorgt in der Wissenschaft, dass die für die Hubble-Konstante zum aktuellen Zeitpunkt gemessenen Werte stark voneinander abweichen. Aus den Vermessungen des CMB durch PLANCK ergibt sich eine Hubble-Konstante von $H_0 = 68\,\frac{\mathrm{km}}{\mathrm{s \cdot Mpc}}$, während aus dem klassischen Ansatz von der Bestimmung der Rotverschiebung und Entfernung eines Objekts ein Wert von $H_0 = 74\,\frac{\mathrm{km}}{\mathrm{s \cdot Mpc}}$ folgt. Auch andere Ansätze grenzten den Bereich nicht näher ein, sodass es eine Diskrepanz von etwa $\Delta(H_0) = 6\,\frac{\mathrm{km}}{\mathrm{s \cdot Mpc}}$ gibt. Alle Messmethoden wurden mehrmals geprüft und ihre Ergebnisse evaluiert, aber bis heute konnte keine Lösung des Problems gefunden werden, sodass man sich allgemein auf einen vorläufigen Wert von $H_0 \approx 70\,\frac{\mathrm{km}}{\mathrm{s \cdot Mpc}}$ einigte. [5] [15]

Abbildung 3 zeigt die Streuung der Werte der gemessenen Hubble-Konstante und differenziert dabei zwischen den verschiedenen Messmethoden. Es wird deutlich, dass man den Bereich im Verlauf der Zeit schon näher eingrenzen konnte, aber dass es trotzdem kein eindeutiges Ergebnis gibt.

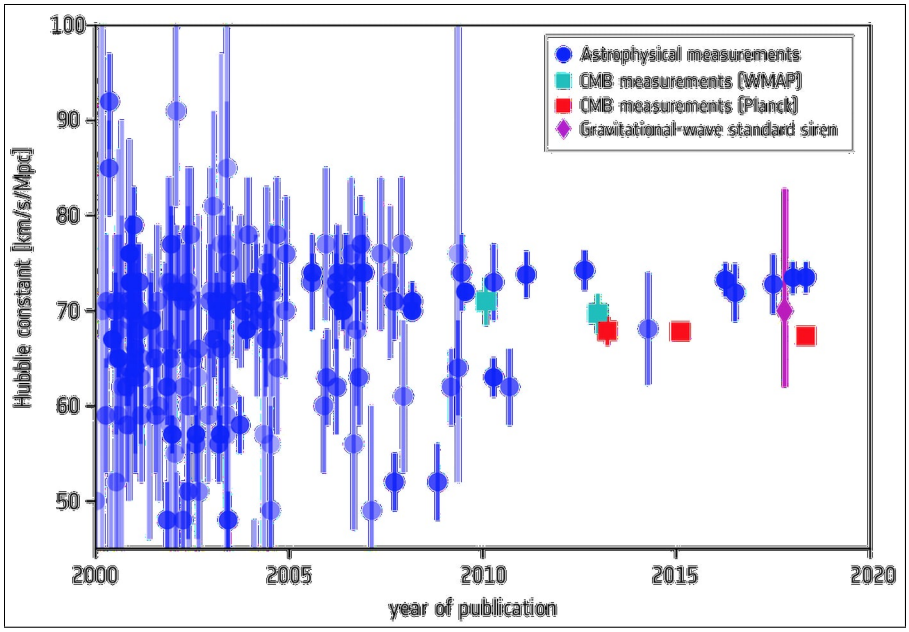


Abbildung 3: Plot zu verschiedenen Werten der Hubble-Konstante H_0 bei unterschiedlichen Messmethoden im zeitlichen Verlauf [16]

3.3 Widersprüche und Schwierigkeiten

Bei Betrachtung der bis jetzt diskutierten Aspekte fällt auf, dass das kosmologische Standardmodell noch nicht vollständig ist. Zum Einen stellt man fest, dass wir einen Großteil der Materie nicht sehen können und auch nicht wissen, woraus diese bestehen könnte. Man vermutet ein exotisches Teilchen, obwohl das Standardmodell der Teilchenphysik grundsätzlich als abgeschlossen angesehen wird. Doch man braucht nicht nur Dunkle Materie zur Erklärung der Beobachtungen, sondern auch noch Dunkle Energie, welche noch rätselhafter als Dunkle Materie ist. Sie scheint irgendwie im Zusammenhang mit Einsteins kosmologischer Konstante zu stehen, wirft ansonsten aber nur Fragen auf. Dementsprechend wurde vermutet, dass eventuell die Gesetze zur Gravitation fehlerhaft oder unvollständig seien, aber eigentlich erwiesen sie sich schon mehrmals als korrekt, insbesondere die ART. Daraufhin wurde die MOND-Theorie vorgeschlagen, welche das Newton'sche Gravitationsgesetz verbessern sollte. Trotzdem kann auch dieses nicht die „fehlende Masse“ ausgleichen, welche zur Annahme der Dunklen Materie führt. Zum Schluss sei noch auf das Problem mit der Hubble-Konstante verwiesen, welches im vorherigen Abschnitt 3.2 behandelt wurde.

Letztendlich bleibt uns nichts anderes übrig als weiterhin zu forschen und das Universum aufmerksam zu beobachten, um die bedeutenden Fragen zu klären. Besonders erfolgsversprechend ist dabei die Multimessenger-Astronomie, welche verschiedene Informationsträger aus dem Kosmos auswertet und miteinander vergleicht - dazu zählen optische Beobachtungen, kosmische Teilchen sowie Gravitationswellen. Indem man viele unterschiedliche Messmethoden verwendet, erhöht man die Wahrscheinlichkeit, Lösungen zu finden.

4 Eigene Forschung

4.1 Forschungsziel

Nachdem nun ausführlich die Theorie zum Standardmodell des Universums behandelt wurde, sollen auch eigene Messungen erfolgen. Der Schwerpunkt soll hierbei auf der Messung der Radialgeschwindigkeit v_r einer Galaxie liegen, die sich aufgrund der Expansion des Universums von uns entfernt. Bestimmt man die Rotverschiebung z des Galaxienspektrums, so kann die Radialgeschwindigkeit berechnet werden. Sind Entfernung r und Radialgeschwindigkeit eines weit entfernten Objekts bekannt, ist es möglich, damit die aktuelle Hubble-Konstante $H_{t=0}$ anzunähern, da es sich mit $H_t = \frac{v_r(t)}{r(t)}$ um einen linearen Zusammenhang handelt.

Als Beobachtungsobjekt habe ich mir NGC7469 (siehe Abbildung 4) ausgesucht. Bei NGC7469 handelt es sich um eine Spiralgalaxie des Typs SB(rs)a, welche einen AGN hat und der Kategorie Seyfert 1 zugeordnet wird. Sie hat eine visuelle Helligkeit von $12,09\,\mathrm{mag}$ und liegt im Sternbild Pegasus bei $23^{\mathrm{h}}03^{\mathrm{m}}15,62^{\mathrm{s}}$ Rektaszension und +08°52'26,4" Deklination. Die Entfernung von NGC7469 wurde auf $r = 56,29\,\mathrm{Mpc} \pm 12,15\,\mathrm{Mpc}$ bestimmt. [17] Interessant ist, dass diese Galaxie zu einer der ersten gehören wird, die vom JWST beobachtet werden. [18]

Abbildung 4: Foto der Galaxie NGC7469, Veränderung: Ausschnitt des Originalbildes [19]

4.2 Verwendete Geräte

Teleskop und Montierung

Abbildung 5: Foto des Teleskops mit Montierung, ©Bernd Koch [20]

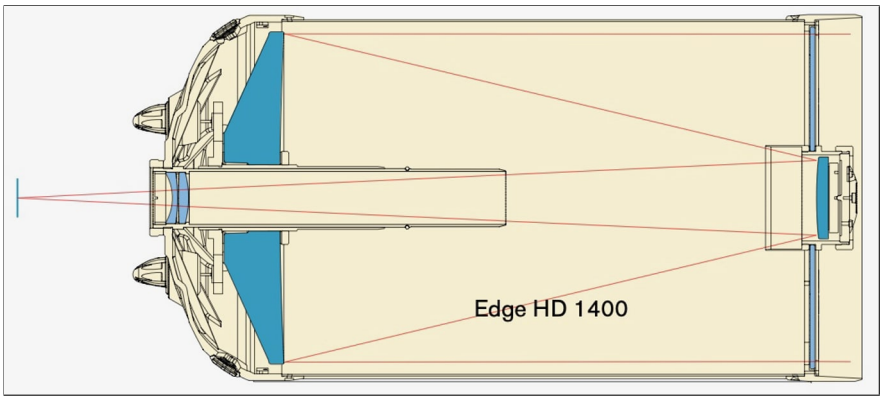


Abbildung 6: Schematische Darstellung des Strahlengangs im C14 EdgeHD Teleskop (hier: von rechts nach links) [21]

Zur Aufnahme des Spektrums der Galaxie NGC7469 wurde das Schmidt-Cassegrain-Teleskop C14 EdgeHD von Celestron auf einer 10Micron GM2000HPS Montierung verwendet, wie in Abbildung 5 gesehen werden kann. An das Ende des Strahlengangs des Teleskops wurde ein DADOS-Spaltspektrograph angebracht, an den die CCD-Kamera STF-8300M von SBIG angeschlossen war. Die genannte Ausstattung gehört zur Privatsternwarte von Herrn Bernd Koch und steht in Sörth im Westerwald.

Das Außergewöhnliche an dem C14 EdgeHD Teleskop ist, dass der Strahlengang so konzipiert wurde, dass weite Gesichtsfelder ohne Qualitätsverlust an den Rändern aufgenommen werden können, weil ein flaches Bild erzeugt wird, wie Abbildung 6 zeigt. Ventilatoren hinter dem ersten Spiegel führen zudem warme Luft ab und erhöhen dadurch die Bildqualität. Das Teleskop hat eine maximale Brennweite von $3,81\,\mathrm{m}$ und eine Blendenöffnung von $0,356\,\mathrm{m}$. Das maximale Öffnungsverhältnis ist somit $f/10{,}8$. Verglichen mit dem menschlichen Auge kann es 2579-mal so viel Licht einfangen. [22] Bei den Aufnahmen wurde ein Reducer verwendet, mit dem die Brennweite $2,74\,\mathrm{m}$ und die Blende somit $f/7{,}7$ betrug. Dies wurde getan, damit das Licht der Galaxie über eine geringere Fläche verteilt und mehr auf den Spalt des Spektrographen konzentriert wird, um ein besseres Spektrum zu erhalten. Dennoch fällt durch den zylindrischen Bau des Teleskops automatisch unterschiedlich viel Licht in verschiedene Bereiche, wodurch eine Abdunkelung zum Rand hin entsteht (Vignettierung), welche allerdings durch die Aufnahme von Flatfields ausgeglichen werden kann.

Kamera

Abbildung 7: Foto der CCD-Kamera STF-8300M von SBIG, eigene Aufnahme

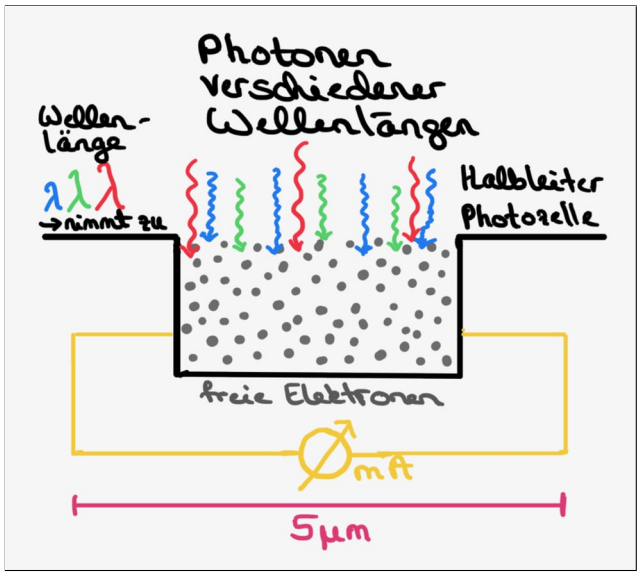


Abbildung 8: Modell einer Photozelle von CCD-Kameras, eigene Darstellung

Bei der STF-8300M (siehe Abbildung 7) handelt es sich um eine speziell für die Astronomie gebaute CCD-Kamera der Marke SBIG, die eine Auflösung von 16 bit hat und über 3326×2504 Pixel verfügt. Das Leserauschen liegt bei $9,3\,\mathrm{e}^-$ und das Dunkelstromrauschen bei $0,37\,\mathrm{e}^-$ pro Pixel und Sekunde bei einer Temperatur von 0 °C. [23] Die Funktionsweise der Kamera basiert auf dem von Albert Einstein 1905 gedeuteten Photoelektrischen Effekt, für den er 1921 den Nobelpreis in Physik erhielt. [24] Die Photozellen der Kamera bestehen aus Halbleitern. Wenn die Photonen auf den Halbleiter treffen, übertragen sie ihre Energie und lösen Elektronen aus ihren ursprünglichen Positionen. Da Halbleiter so konzipiert sind, dass einige Elektronen nicht an feste Plätze gebunden sind und sich unter bestimmten Bedingungen frei bewegen, können sie mit der zugeführten Energie propagieren und einen Stromkreis schließen, dessen Strom dann gemessen wird. Anhand des Stroms kann man feststellen, wie viele Photonen auf die Halbleiterzelle getroffen sein müssen, um die bestimmte Menge an Elektronen in Bewegung versetzt zu haben. Letztendlich erfasst man also die Intensität des eingefangenen Lichts. Abbildung 8 zeigt modellhaft den Aufbau einer Photozelle und wie die Photonen verschiedener Wellenlängen auf die Elektronen treffen. Jede Photozelle hat aber, analog zum Volumen eines Brunnens und der Wasseraufnahme, nur eine bestimmte Kapazität für freie Elektronen, was Full Well Capacity genannt wird. Werden also zu viele Elektronen aus ihrer ursprünglichen Position gelöst, so gibt es einen Informationsüberschuss, die Stelle wird überbelichtet und erscheint im Bild weiß. Die Angabe, wie effizient die Elektronen von den Photonen gelöst werden, macht die Quantum Efficiency. Bis jetzt gibt es noch keine Technik, welche eine QE von 100% hat, weil manche Photonen des roten Spektralbereichs so große Wellenlängen haben, dass sie viel-

leicht keine Elektronen treffen. Die für die Aufnahme eingesetzte Kamera hat eine sehr hohe Quanteneffektivität von 54%, wodurch das Spektrum sehr akkurat wiedergegeben wird. Die Photozellen können $2^{16} = 65\,536$ ADU Helligkeitsstufen unterscheiden und an den Computer weitergeben. Eine Intensität von 65 536 ADU kommt bei einem Heißen Pixel vor, in welchem also ein konstanter Elektronenfluss herrscht. Bei einem Pixel mit einer Intensität von 0 ADU handelt es sich um einen Kalten Pixel, also einen solchen, in dem kein Elektronenfluss stattfindet. Die Aufnahmen wurden außerdem im 3×3 Binning gemacht, was bedeutet, dass neun Pixel zu einem „Superpixel“ kombiniert wurden und daher neun Mal so viel Licht aufnehmen können wie ein einzelner Pixel, allerdings nimmt dadurch auch die Auflösung auf ein Drittel ab. [25]
Das schon bei den Kamerawerten erwähnte Dunkelstromrauschen entsteht durch den Elektronenfluss aufgrund von Wärme (thermische Energie führt zur stärkeren Bewegung von Elektronen und wird somit in kinetische Energie umgewandelt). Dieser Effekt lässt sich allerdings beeinflussen, indem die Kamera stark abgekühlt (in unserem Fall auf −20 °C) und die Belichtungszeit reduziert wird, weil so nur weniger Elektronen fließen können. Das Ausleserauschen geht auf die Datenübertragung zwischen Kamera und Computer zurück und hat somit einen Geräte-spezifischen, konstanten Wert. Im Auswertungsprozess (siehe Abschnitt 4.6) werde ich noch näher auf den Umgang mit dem Rauschen eingehen.

Spektrograph

Der DADOS-Spaltspektrograph vom Hersteller Baader Planetarium wurde bei der Beobachtung verwendet, um das von der Galaxie ausgesandte Licht in seine Spektralfarben zu zerlegen, damit an dem Spektrum Messungen gemacht werden können. Der Strahlengang (siehe Abbildung 9) verläuft so, dass das im Teleskop gesammelte Licht zunächst durch einen der drei Spalte (25 µm, 35 µm oder 50 µm Breite) fällt, wodurch nur das Licht einer bestimmten Quelle, nämlich das des Zielobjekts, weitergelangt. Anschließend werden die divergenten Lichtstrahlen im Kollimator annähernd parallel ausgerichtet und fallen auf das Blaze-Gitter, wo das Licht in seine Spektralfarben aufgeteilt wird. Mit dem Objektiv kann dann noch der Brennpunkt der nun konvergenten Lichtstrahlen so eingestellt werden, dass er auf der Focalebene der Kamera liegt. Die in Abbildung 9 gezeigte Kamera wurde nicht für die Beobachtung verwendet, sondern dient hier nur der Veranschaulichung des Strahlengangs. Die bei der Beobachtung tatsächlich eingesetzte Gerätekombination ist in Abbildung 10 zu sehen. Was genau an einem Gitter passiert, wird in Abschnitt 4.4 aufgegriffen.
Für unsere Aufnahmen wurden der 50 µm Spalt sowie ein Gitter mit 300 Linien/mm verwendet, was zwar eine niedrigere Auflösung zur Folge hat, als mit dem Spektrographen möglich ist, aber für lichtschwache Objekte wie weit entfernte Galaxien verwendet werden muss, damit sich das Signal überhaupt vom Himmelshintergrund abhebt. Das liegt daran, dass die Intensität der Spektrallinien mit der Abnahme der Spaltbreite bzw. der Zunahme der Gitterlinien abnimmt.

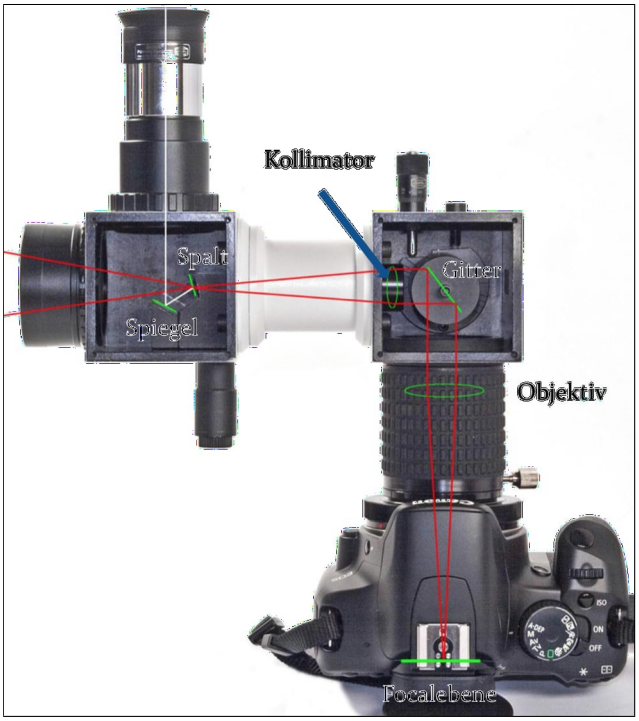


Abbildung 9: Foto des DADOS-Spaltspektrographen von Baader Planetarium mit eingezeichnetem Strahlengang [26]

Abbildung 10: Foto der Anordnung der verwendeten Messgeräte, eigene Aufnahme

Mithilfe von SimSpec können verschiedene Parameter des Spektrographen berechnet werden, was hilfreich für die Beobachtungsplanung ist. [27] Dabei werden zahlreiche Variablen abhängig von eingesetztem Teleskop, Spektrograph, Kamera und Beobachtungsbedingungen berücksichtigt. Die entsprechenden Werte können der Abbildung 25 im Anhang entnommen werden. Hier soll nur erwähnt werden, dass das simulierte Auflösungsvermögen (auch Instrumentenbreite genannt) des Spektrographen bei $R = 593$, die Dispersion bei $\rho = 4,49\,\text{Å}/\text{Pixel}$ und die spektrale Auflösung bei $\Delta\lambda = 11,07\,\text{Å}$ liegt. Mit der spektralen Auflösung ist gemeint, wie weit zwei Wellenberge voneinander entfernt sein müssen, damit sie noch als eigene Maxima zu erkennen sind. Das Auflösungsvermögen bzw. die Instrumentenbreite R gibt das Verhältnis zwischen der Breite einer Spektrallinie ($\Delta\lambda$) und der tatsächlichen Wellenlänge der Spektrallinie (λ) an. Der an dem Referenzspektrum selbst gemessene Wert für das Auflösungsvermögen beträgt $R = 726$. Dass der gemessene Wert vom simulierten Wert abweicht, ist nicht allzu problematisch, da insbesondere das Seeing und die Himmelshelligkeit einen großen Einfluss auf diesen haben und sich während einer Beobachtung fortwährend ändern, weshalb sie in der Simulation nur angenähert werden können. Das Seeing beträgt im Durchschnitt meist $2,5\,\text{arcsec}$, die Himmelshelligkeit wurde während der Beobachtung auf etwa $20,85\,\text{mag}/\text{arcsec}^2$ bestimmt.

Referenzlampe

Zum Einsatz kam auch die Lampe PF0037-Alpy Calibration Module (siehe Abbildung 11), deren Spektrum als Referenz für die spätere Kalibrierung des Galaxienspektrums dienen sollte.

Diese Lampe besteht aus einem Neon-Argon-Gasgemisch, dessen Elektronen in den Atomen durch die Anlegung einer Spannung in Erregung versetzt und zur Emission von Photonen angeregt werden. Man erhält also, wenn man den Spektrographen anlegt und eine Kamera anschließt, ein Emissionsspektrum, das immer gleich aussieht und aufgrund des direkten Anschlusses an den Spektrographen eine Relativgeschwindigkeit von $v_{rel.} = 0\,\mathrm{m/s}$ hat, also auch nicht wegen des Doppler-Effekts verschoben ist. Die Referenzlampe ist von der Marke Shelyak. [28]

Abbildung 11: Foto der NeAr-Referenzlampe von Shelyak, eigene Aufnahme

4.3 Experimenteller Aufbau

Ziel war es, mithilfe des DADOS-Spektrographen die Rotverschiebung der Galaxie zu messen. Dafür wurde das Teleskop auf das entsprechende Objekt ausgerichtet und der DADOS-Spektrograph hinter dem Strahlengang angeschlossen, wie die Abbildung 12 zeigt.
Die STF-8300M fing die Photonen ein. Nach den Lightframes wurden das Referenzspektrum sowie die Darkframes und die Flatfields aufgenommen.

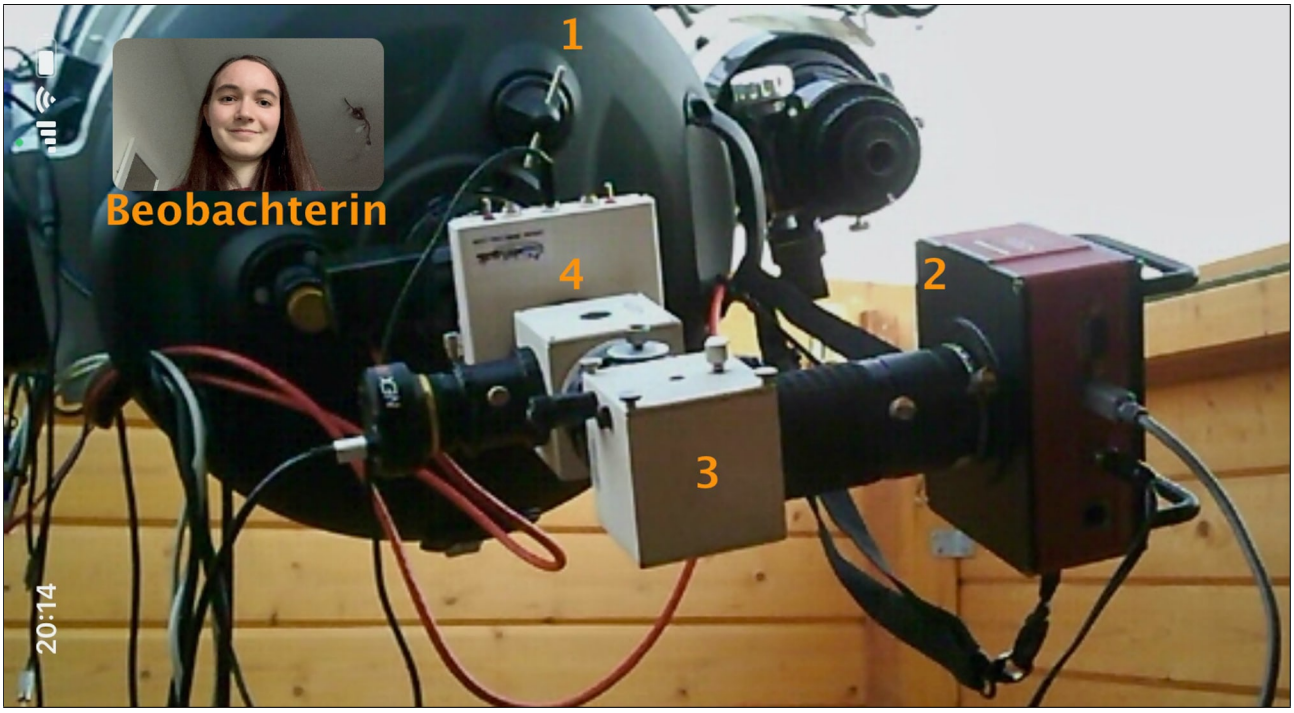


Abbildung 12: Foto des Beobachtungsaufbaus: Teleskop (1), Kamera (2), Spektrograph (3) und Referenzlampe (4), eigene Aufnahme während des Videoanrufs am Start der Beobachtungsnacht am 04.09.2021

4.4 Spektroskopie

Die Spektroskopie beschäftigt sich mit der Zerlegung von Licht, um Informationen über die Zusammensetzung und die Eigenschaften von Objekten zu gewinnen. Das funktioniert, weil Photonen, wie alle Quantenobjekte, Welleneigenschaften besitzen. Die Interferenzbedingungen am Gitter werden im Folgenden kurz dargestellt. Konstruktive Interferenz, also Verstärkung, findet nur dann statt, wenn der Gangunterschied zweier bzw. mehrerer Wellen ein ganzzahliges Vielfaches der Wellenlänge λ ist: $\Delta s = n\lambda$ mit $n \in \mathbb{N}$. Bei destruktiver Interferenz, also Auslöschung, ist es dementsprechend ein Gangunterschied von halbzahligen ungeraden Vielfachen der Wellenlänge: $\Delta s = (n + \frac{1}{2})\lambda$. Aus Abbildung 13 geht hervor, dass der Gangunterschied durch $\Delta s = g \cdot \sin(\alpha)$ beschrieben werden kann, wobei g die Gitterkonstante (der Abstand zwischen zwei Gitterspalten) ist. Den Beobachtungswinkel α erhält man durch das Dreieck $\Delta S M_0 M_n$ (Spalt, Maximum nullter Ordnung, Maximum n-ter Ordnung) mit der Beziehung $\alpha = \arctan(\frac{a_n}{e})$ mit a_n als Abstand zwischen M_0 und M_n sowie e als Abstand zwischen Spalt und Schirm. Da bei der Analyse des Galaxienspektrums lediglich die Maxima von Interesse sind, wird nur die Interferenzbedingung für konstruktive Interferenz behandelt. Durch Einsetzen erhält man $n\lambda = g \cdot \sin(\alpha)$. Beobachtet man jeweils das Maximum erster Ordnung ($n = 1$), so wird deutlich, dass eine Zunahme der Wellenlänge eine Zunahme des Beobachtungswinkels α zur Folge hat. Dadurch wird das Licht anhand der Wellenlängen seiner Photonen aufgespalten; man erhält einen Verlauf von blau über grün, gelb, orange und rot, welcher sich vom Maximum nullter Ordnung nach außen erstreckt. Dieses erscheint weiß, da sich dort alle Farben überlagern. Weiterhin lässt sich festhalten, dass eine Zunahme der Spaltanzahl zu schärferen und schmaleren Linien, eine Zunahme der Gitterkonstante zu kleineren Abständen der Maxima und eine Zunahme der Spaltbreite zu einer höheren Intensität der Linien führt. Je mehr Spalte ein Gitter hat, desto größer ist seine Auflösung, aber desto schwächer sind die Maxima.

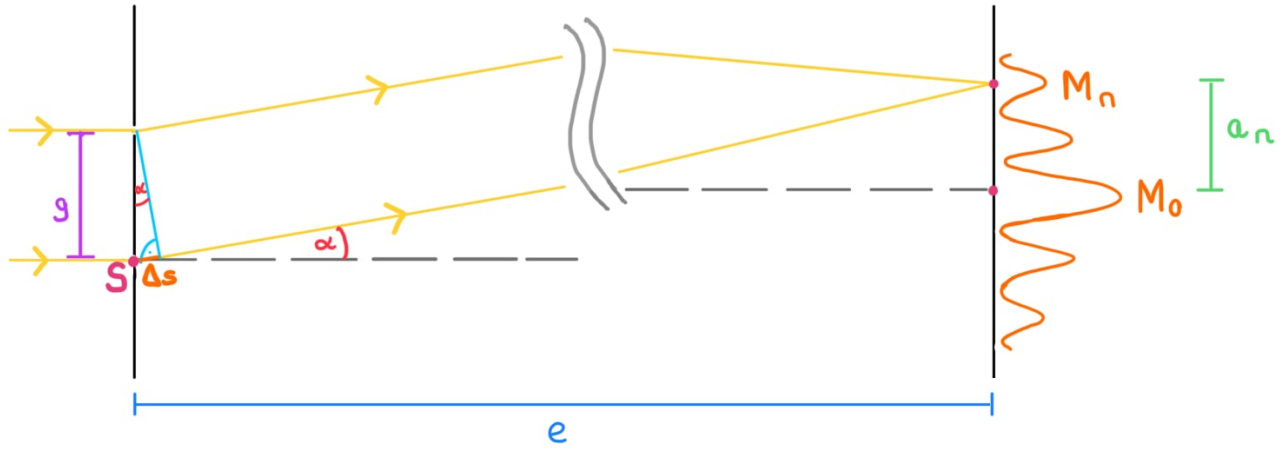


Abbildung 13: Skizze der Interferenzbedingung am Gitter; Gitterkonstante g, Spalt S, Gangunterschied Δs, Beobachtungswinkel α, Maximum nullter Ordnung M_0, Maximum n-ter Ordnung M_n, Abstand a_n zwischen M_0 und M_n, Abstand e zwischen Spalt und Schirm, eigene Darstellung

4.5 Durchführung der Beobachtung

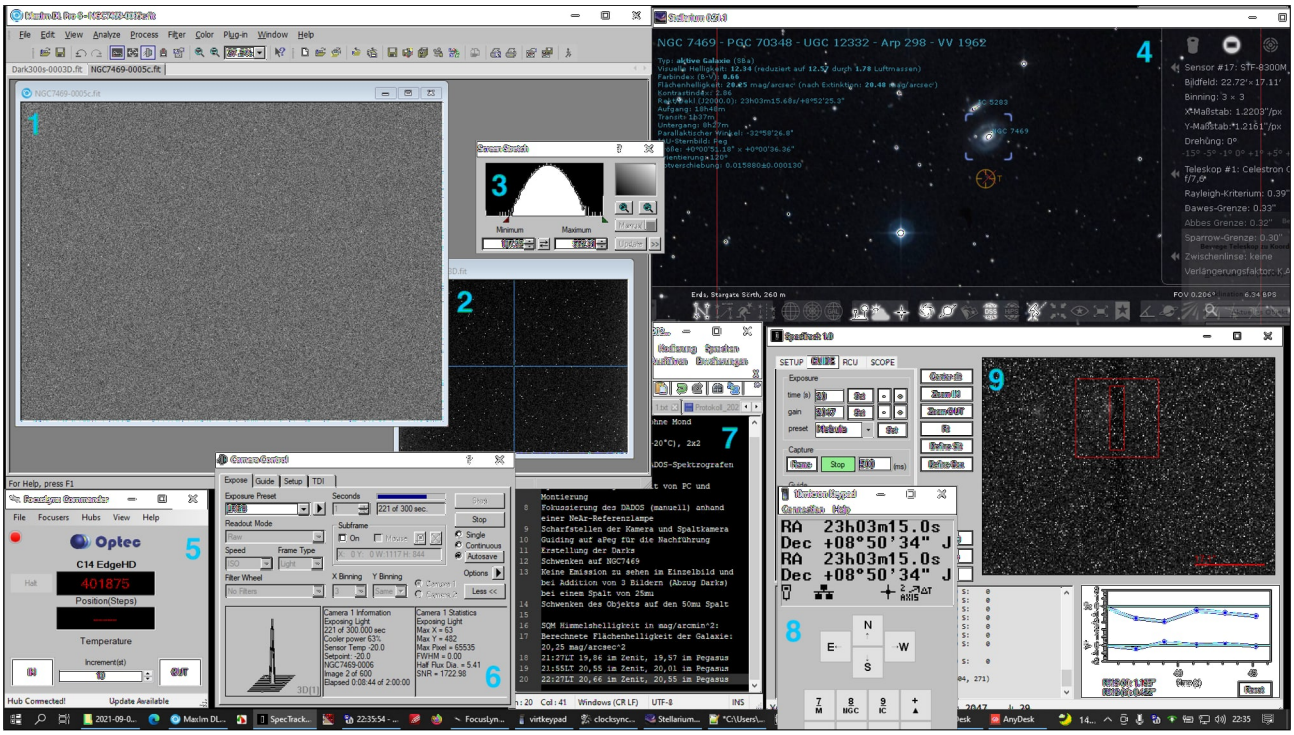


Abbildung 14: Bildschirmfoto während der Beobachtung; Lightframe (1), Darkframe (2), Histogramm (3), Stellarium mit dem Blickfeld des Teleskops (4), Fokussierung des Teleskops (5), Steuerung der Kamera (6), Beobachtungsprotokoll (7), Steuerung der Teleskopmontierung (8), Bild der Spaltkamera - der Fleck links des Spaltes ist ein Teil von NGC7469 (9)

Aufgrund der guten Beobachtungsbedingungen in Sörth im Westerwald und des günstigen Zeitpunkts wurden die Aufnahmen an der Privatsternwarte von Herrn Bernd Koch (IAU Stationscode: B72) per remote control gemacht. Dafür trafen sich Herr Koch und ich in einer Videokonferenz via Signal, wobei ich über AnyDesk auf seinen Computer zugreifen konnte, mit dem Teleskop, Montierung und Kamera gesteuert werden (siehe Abbildung 14). Die Ausrichtung des Teleskops erfolgte mit der Software Stellarium, während die Steuerung der Kamera mit MaxIm DL Pro5 realisiert wurde. [29] [30]
Zunächst wurde die Zeit von Computer und Montierung synchronisiert. Anschließend wurde der DADOS manuell anhand der NeAr-Referenzlampe fokussiert, woraufhin die Scharfstellung der Kamera sowie der Spaltkamera erfolgten. Ein Stern in der Nähe des Beobachtungsobjekts wurde gesucht, sodass das zweite Teleskop darauf ausgerichtet war und für die Nachführung verwendet werden konnte. Insegesamt wurden von dem Spektrum der Galaxie NGC7469 15 Aufnahmen von je 300 s Belichtungszeit gemacht, sowie 10 mal 300 s Darkframes. Hierfür wurde die Teleskopöffnung geschlossen und ein Dunkelbild unter den ansonsten gleichen Bedingungen aufgenommen. Für die Flatframes wurde 10 mal 300 s gegen eine helle Fläche (LED-Schirm) belichtet. Das Referenzspektrum der NeAr-Lampe wurde wegen der größeren Intensität allerdings kürzer belichtet. Es wurde auch ein Spektrum des Sterns α Lac (Alpha Lacertae) aufgenommen.

Grundsätzlich muss bei Aufnahmen beachtet werden, dass die Lichtwege durch Luftströmungen in der Atmosphäre verzerrt werden (Astronomisches Seeing), und dass die daraus resultierende sprunghafte Bewegung von Objekten einerseits eine präzise Nachführung der Montierung (Guiding), andererseits die Aufnahme vieler Bilder erfordert, damit die besten von ihnen ausgewählt und zu einem Bild kombiniert werden können (Lucky Imaging). Weitere Schwierigkeiten stellen die Lichtverschmutzung von umliegenden Lichtquellen sowie die atmosphärische Dispersion dar, weshalb man Objekte in größerer Höhe über dem Horizont bevorzugt. Die atmosphärische Dispersion ist insofern ein Problem, als dass das Licht des beobachteten Objekts schon an der Luft in seine spektralen Bestandteile aufgespalten wird und deshalb das Licht nicht mehr konzentriert auf den Spalt des Spektrographen fällt, weshalb ein Teil des Lichts und somit auch ein Teil der Informationen fehlen.

4.6 Auswertungsprozess

Die folgenden Schritte zur Kalibrierung der Rohbilder (RAWs) erfolgten mit MaxIM DL Pro5. Eine Übersicht von allen Rohbildern zeigt Abbildung 27. Zunächst wurden alle Bilder einer Kategorie (also Bias, Darks und Flats) zu einem Summenbild gestackt, also übereinandergelegt, wobei ein Mittelwert für die Intensität jedes einzelnen Pixels aus den Intensitäten desselben Pixels aus allen Aufnahmen berechnet wird. Dadurch nähert man sich der Realität immer mehr an. Dafür verwendet man die Funktion „Set Calibration“ (siehe Abbildung 15). Die Summenbilder der Darkframes und Flatfields werden auch als MasterDark und analog MasterFlat bezeichnet. Schließlich wird das MasterDark von dem Lightframe subtrahiert, damit das Rauschen aus dem Bild herausgerechnet wird. Das hat zur Folge, dass die Belichtungszeit der Darkframes nicht

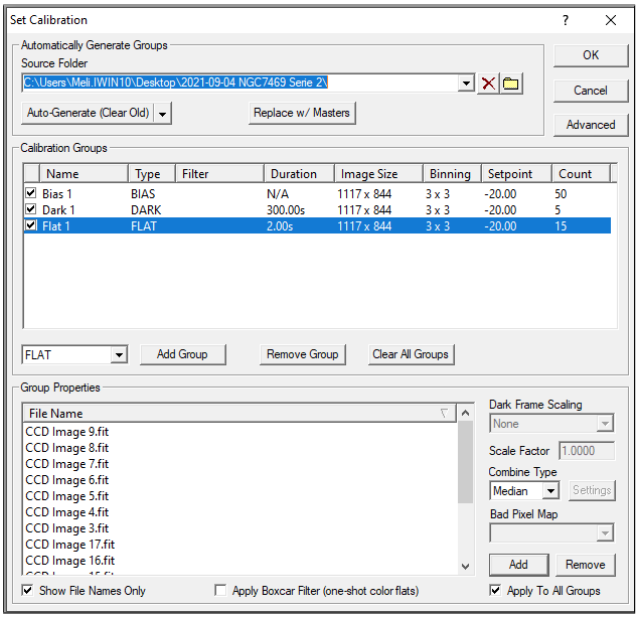


Abbildung 15: Bildschirmfoto des Kalibrationsmodus

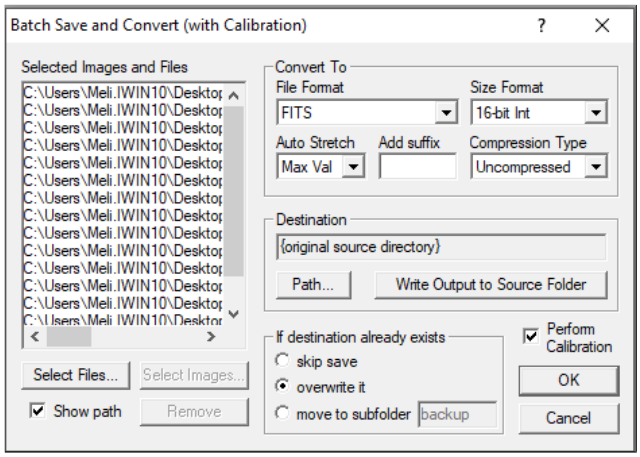


Abbildung 16: Bildschirmfoto der Kalibration der Lights mit „Perform Calibration“

allzu stark reduziert werden kann, weil sie für die Lights und Darks gleich groß sein muss. Das Rauschen der Bilder kann dennoch minimiert werden, indem viele Darks aufgenommen und anschließend gemittelt werden, da das Rauschen mit der Wurzel der Anzahl der Aufnahmen sinkt. Das Ausleserauschen, auch Bias genannt, entsteht durch die Datenübertragung von der Kamera auf den Computer und kommt bei allen Aufnahmen vor, daher wird es durch den Abzug des MasterBias vom Light herausgearbeitet. Durch den Bau des Teleskops fällt automatisch unterschiedlich viel Licht in verschiedene Bereiche, wodurch eine Abdunkelung zum Rand hin entsteht (Vignettierung). Um diese Vignettierung und Verschmutzungen auf der Kamera oder im Strahlengang, wie Staubkörner, zu erfassen, wird gegen eine helle Fläche belichtet. Nach den Aufnahmen werden die Pixelhelligkeiten des Lightframes durch das MasterFlat dividiert. Da die Vignettierung und die Staubkörner sowohl im Light als auch im MasterFlat vorkommen, ergibt sich hierbei ein Pixelwert von eins. Objekte, die aber nur auf dem Lightframe vorkommen, verschwinden somit nicht. Da das Bild im Anschluss an diesen Bearbeitungsschritt einen von der Helligkeitsintensität her flachen Hintergrund hat, es also keine Vignettierung mehr gibt, wird das Endbild auch Flatfield genannt. Für die Fehlerbeseitigung mittels Bildmathematik wird also die Formel $\text{Kalibriertes Bild} = \frac{\text{Lightframe} - \text{MasterDark}}{\text{MasterFlat} - \text{MasterDark}}$ angewandt. Die genannten Bearbeitungsschritte erfolgen bei MaxIM DL Pro5 automatisch mit der Funktion „Batch Save and Convert (with Calibration)“ (siehe Abbildung 16). Weiterhin wurden im kalibrierten Bild mit den Funktionen „Kernel Filters“ und „Clone Tool“ diejenigen Pixel korrigiert, bei denen es sich um Heiße und Kalte Pixel handelt. Dabei wurden die Intensitäten der Pixel aus dem direkten Umfeld des fehlerhaften Pixels genommen, gemittelt und als neue Pixelintensität ersetzt. Dabei ist Vorsicht geboten, um das Spektrum nicht zu verfälschen, daher wurde nichts im Bereich des Spektrums selbst verändert, sondern nur das Umfeld bereinigt. Damit ein Objekt erkennbar wird, sollte der Signal-Noise-Ratio $\text{SNR} = \frac{\text{S}}{\text{N}} > 2$ sein.

Zur weiteren Auswertung der Daten wurde die Software BASS verwendet. [31] Mit der Funktion „Subtraction Region 2“ des „Region Selection Tool“ (siehe Abbildung 17) wurde das Spektrum aus dem kalibrierten Bild ausgeschnitten. Ähnlich wurde mit der Aufnahme des Spektrums des Sterns α Lac sowie der NeAr-Lampe verfahren, hier wurde jedoch die Funktion „Active Binned Region“ verwendet und jeweils ein Streifen des mittleren Spektrums ausgeschnitten.

In BASS wurden dann zunächst die Absorptionslinien des Sternspektrums von α Lac manuell identifiziert, wobei die Peaks präzise eingegrenzt und ihnen mit „Calibration Reference Points“ eine Wellenlänge zugeordnet wurde. Es zeigte sich, dass das Spektrum von α Lac selbst verschoben ist und daher nicht als Referenz verwendet werden kann. Recherchen ergaben, dass sich α Lac mit $v = 4,5\,\text{km/s}$ auf uns zubewegt, was etwa $z = -0,000015$ entspricht. [32]
Daraufhin analysierten wir das Spektrum der NeAr-Referenzlampe (auf allen Abbildungen in grüner Farbe), grenzten anhand des zugehörigen Referenzspektrums sechs Peaks schmallinig ein und ordneten ihnen eine Wellenlänge zu (siehe Abbildung 18). [33]

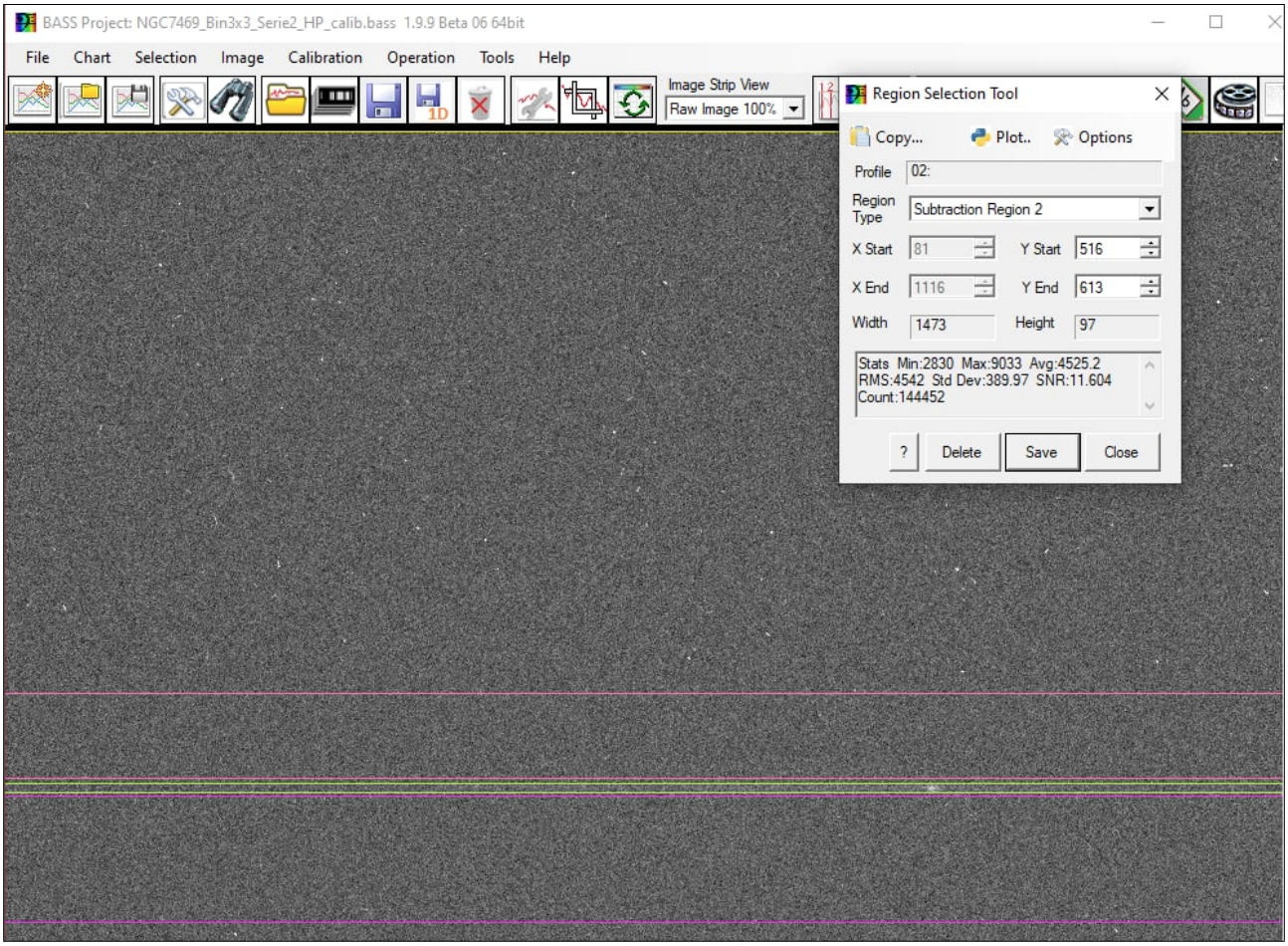


Abbildung 17: Bildschirmfoto des Ausschnitts des Spektrums aus dem kalibrierten Bild

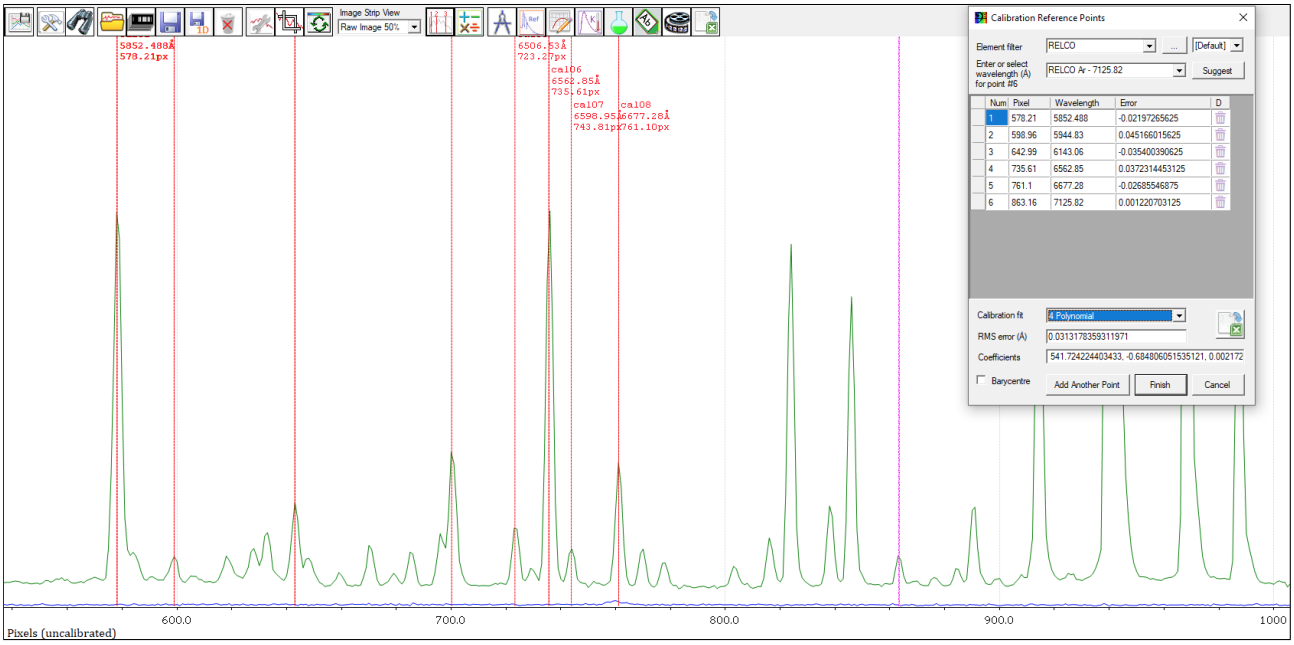


Abbildung 18: Bildschirmfoto der Kalibration des NeAr-Referenzspektrums

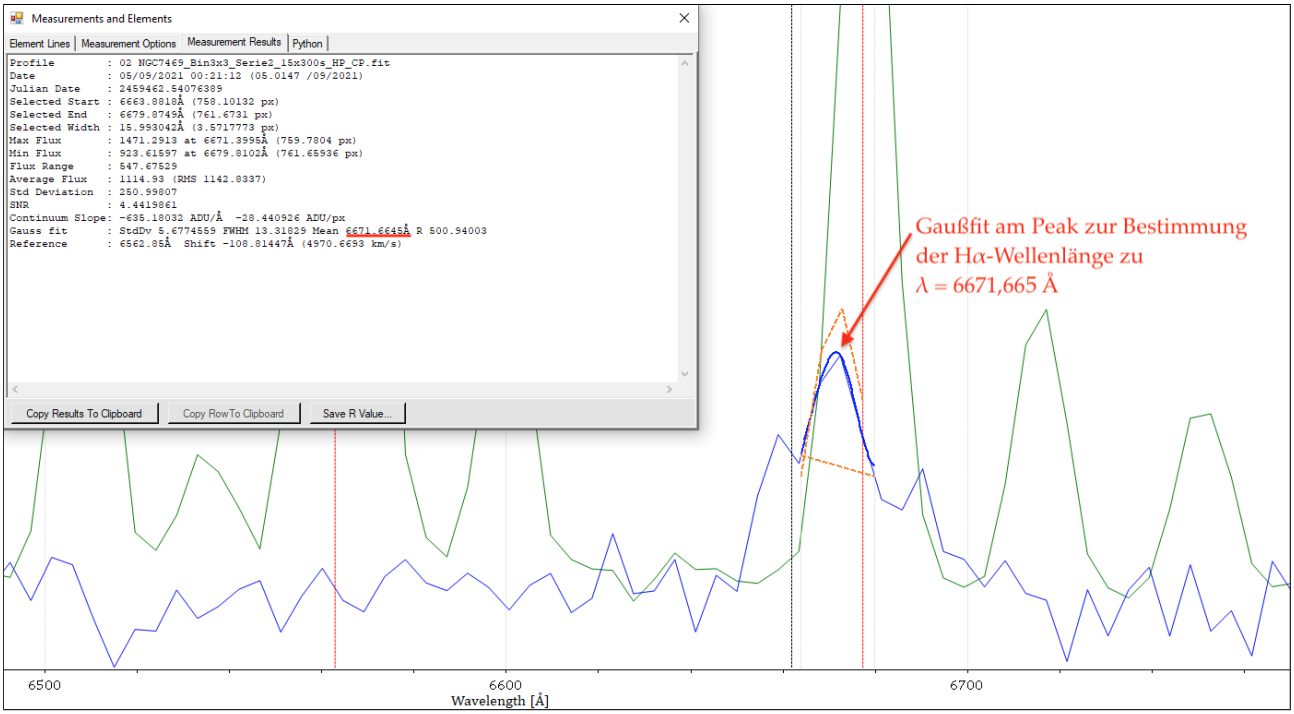


Abbildung 19: Bildschirmfoto eines Gaußfits an Hα zur Bestimmung der Wellenlänge dieses Peaks zu $\lambda = 6671,665\,\text{Å}$

Danach konnte das Galaxienspektrum (auf allen Abbildungen in blauer Farbe) hinzugeladen werden, wobei die Wellenlängenzuordnung basierend auf den Kalibrationskoeffizienten des NeAr-Referenzspektrums nun vorgegeben war. Dabei wurde ersichtlich, dass die Emissionslinien des Galaxienspektrums nicht in den zu erwartenden Wellenlängenbereichen lagen, sondern deutlich rechts davon, was auf die Rotverschiebung zurückzuführen ist. Folglich haben wir die Wellenlänge der Hα-Linie bestimmt, indem mehrere Gaußfits an dem Intensitätsmaximum gemacht wurden, wie Abbildung 19 zeigt, und die gemessenen Wellenlängen gemittelt wurden. Anhand der gemessenen Wellenlänge der Hα-Linie und der Ruhewellenlänge des Wasserstoffs (Hα) von $\lambda_0 = 6562,852\,\text{Å}$ wurde die Rotverschiebung mit der Formel $z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{\lambda_{gemessen}}{\lambda_0} - 1 = \frac{6670{,}741\,\text{Å}}{6562{,}852\,\text{Å}} - 1 = 0,01644$ berechnet.
In BASS konnte weiterhin eingestellt werden (siehe Abbildung 20), dass das Galaxienspektrum noch um die Erdrotation und die Drehung der Erde um die Sonne korrigiert wird, weil dadurch bei der Beobachtung ungewollt eine minimale Blauverschiebung entsteht, welche die Messergebnisse leicht verfälscht. Außerdem konnte man sich mit der Funktion „Doppler Conversion Utility“ die Geschwindigkeit, mit der sich die Galaxie von der Erde entfernt, angeben lassen (siehe Abbildung 21). Zur Verdeutlichung der Emissionlinien des Galaxienspektrums wurde es mit „Normalise Flux Scale“ auf die Intensität 1 normiert, wobei ein Abschnitt des Spektrums mit wenig Rauschen und keinen Peaks als Norm ausgewählt wurde (6400 Å - 6500 Å), sodass die Peaks, relativ gesehen, größer erscheinen. Das vollständig kalibrierte Spektrum ist im Anhang enthalten (siehe Abbildung 28). Dort sind sowohl das aufgenommene Spektrum von NGC7469 (in blau), als auch das um die Rotverschiebung korrigierte Spektrum (in lila) zu sehen.

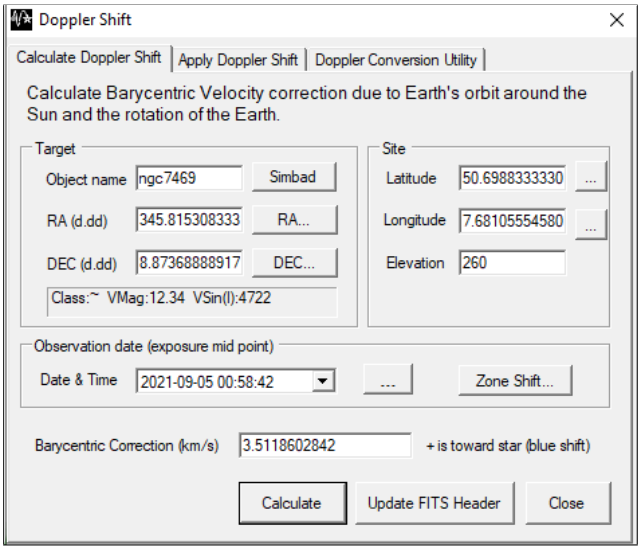


Abbildung 20: Bildschirmfoto der baryzentrischen Korrektur

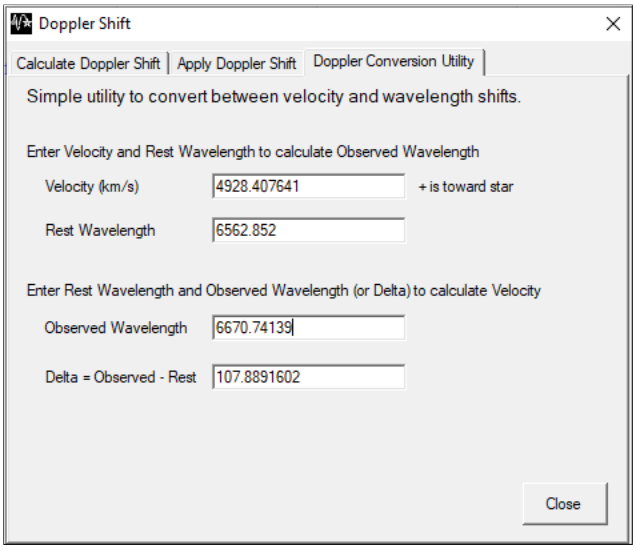


Abbildung 21: Bildschirmfoto der Berechnung der Entfernungsgeschwindigkeit

Weiterhin wurde die Dispersion bzw. Verbreiterung der Hα-Linie gemessen und zwar als FWHM-Wert in Å und als Geschwindigkeit in km/s. Dabei wurde die Ruhewellenlänge von Hα als Bezug ausgewählt und der Geschwindigkeit $v_0 = 0\,\mathrm{km/s}$ zugeordnet. Danach wurden die Ränder des Hα-Peaks etwa bei der Intensität von 1 eingegrenzt und dem Peak von BASS ein FWHM-Wert zugeordnet (Abbildung 22 zeigt detailliert, wo die Messungen im Spektrum erfolgten). Das bedeutet, dass bei der Hälfte der Intensität des Peaks die Breite gemessen und mit der Höhe multipliziert wurde. Diese Methode ist besonders geeignet, weil man nicht genau feststellen kann, wo der Peak beginnt, oder ob noch andere Emissionslinien im Peak enthalten sind; dies ist für die Breite bei der halben Höhe allerdings nicht so relevant. Auch hiervon wurden mehrere Messungen gemacht und gemittelt.
Der für die Messung des FWHM-Werts ursprünglich eingegrenzte Bereich an der Basis des Peaks entspricht der generellen Geschwindigkeitsdispersion der Hα-Linie (ohne Relation zur Ruhewellenlänge) und beträgt etwa $\Delta v_1 = 2523\,\mathrm{km/s}$.
Indem der FWHM-Wert in Å gemessen, durch die Ruhewellenlänge von Hα dividiert, mit 1 subtrahiert und mit c multipliziert wird, kann die durchschnittliche Geschwindigkeitsdispersion der Hα-Linie auf $\Delta v_2 = 971\,\mathrm{km/s} \pm 9\,\mathrm{km/s}$ bestimmt werden. Grundsätzlich bedeutet dies, dass die Verbreiterung des Peaks durch die genannten Rechenschritte in Relation zu der Ruhewellenlänge gesetzt und anschließend in eine Geschwindigkeit umgerechnet wird.
Beachtet wurde bei diesen Angaben, dass der Spektrograph selbst eine Dispersion verursacht, die sogenannte Instrumentendispersion. Diese haben wir an einer scharfen Linie des Referenzspektrums gemessen, genauer gesagt am Peak bei $\lambda = 6677\,\text{Å}$, und eine Instrumentendispersion von $\Delta_{Inst.} = 9,1\,\text{Å}$ bestimmt (siehe Abbildung 23). Dieses Ergebnis wurde bei den Berechnungen von Δv_1 und Δv_2 mit der Korrekturformel $\Delta v_{kor.} = \sqrt{(\Delta v_{Mes.})^2 - (\Delta_{Inst.})^2}$ berücksichtigt (jeweils in den passenden Einheiten km/s oder Å).

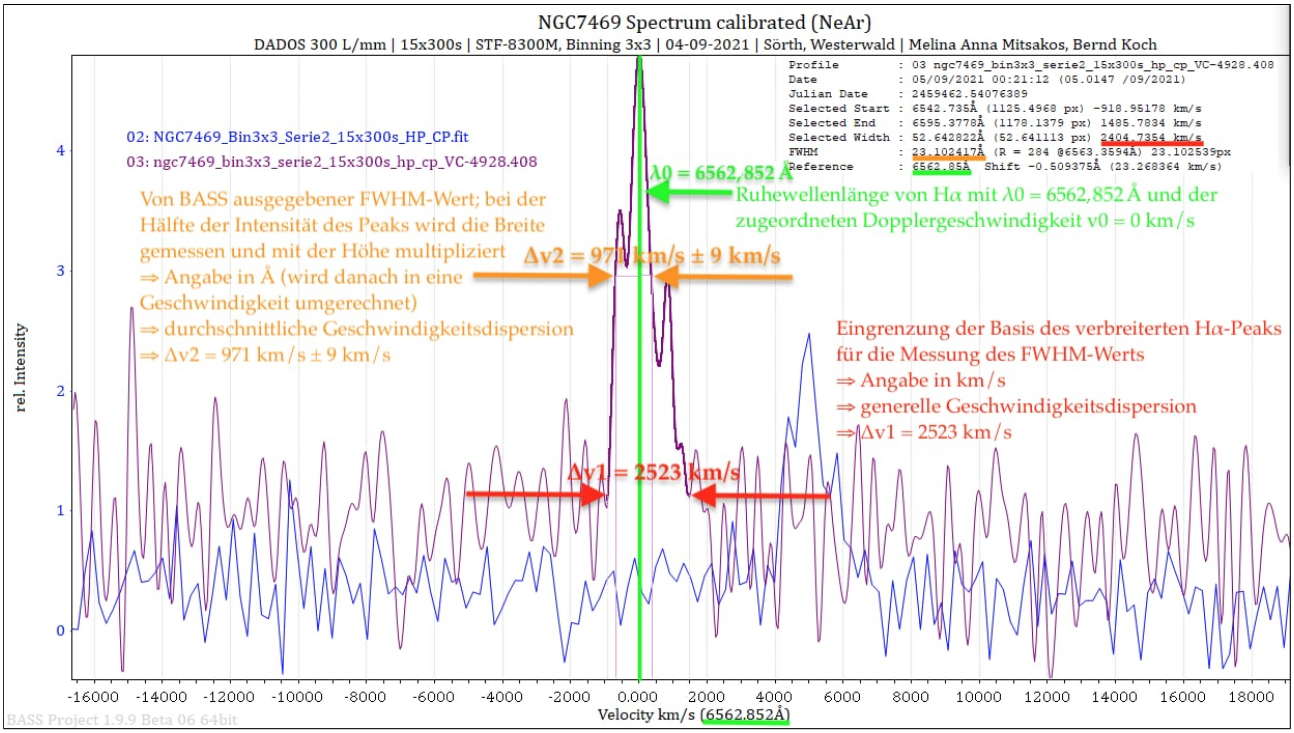


Abbildung 22: Bildschirmfoto der Messung der Geschwindigkeitsdispersion der Hα-Linie; Ruhewellenlänge von Hα (grün) mit $\lambda_0 = 6562,852\,\text{Å}$, eingegrenzter Bereich des Peaks (rot) mit $\Delta v_1 = 2523\,\text{km/s}$, Breite des FWHM-Werts (orange) mit $\Delta v_2 = 971\,\text{km/s} \pm 9\,\text{km/s}$

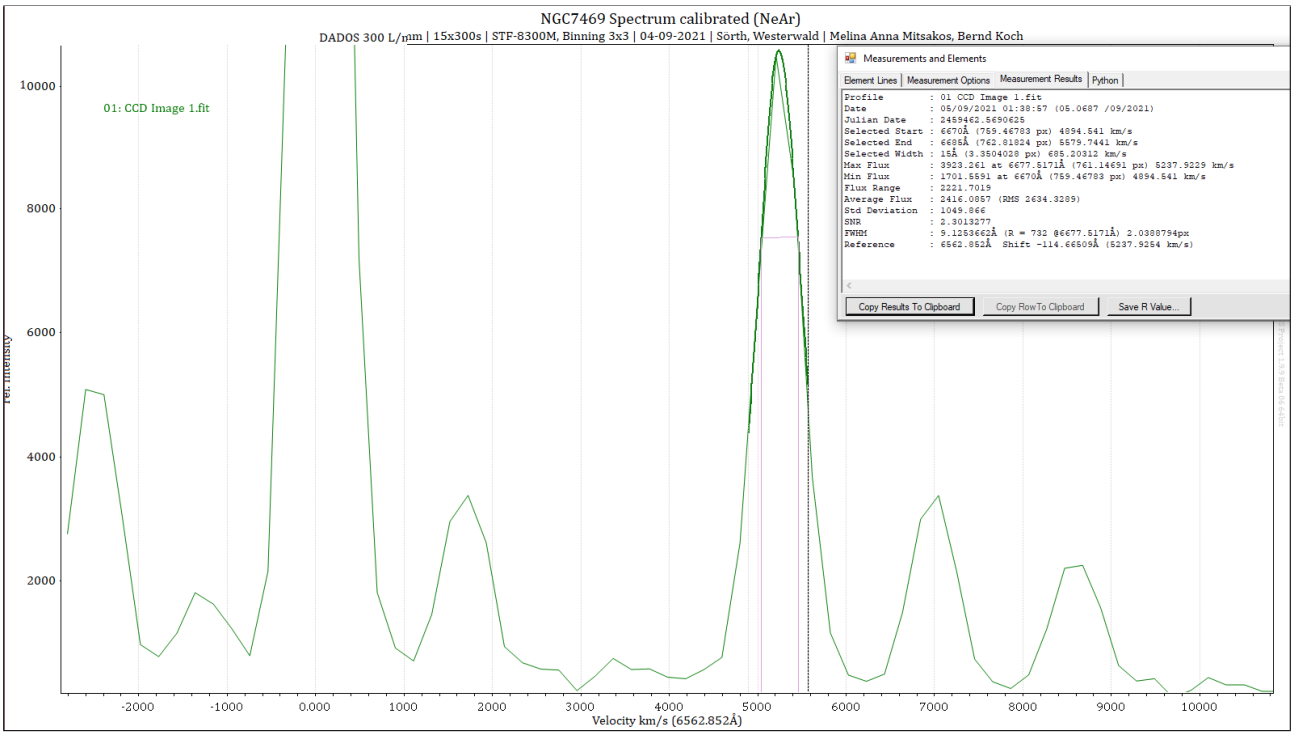


Abbildung 23: Bildschirmfoto der Messung der Instrumentendispersion an der Linie $\lambda = 6677\,\text{Å}$ im Referenzspektrum

Alle Messungen der Hα-Linie, der Rotverschiebung, der Geschwindigkeitsdispersion und der Instrumentendispersion, deren Mittelwerte und Standardabweichungen sowie Vergleiche mit Beobachtungen von anderen Forschern können den Abbildungen 31 und 32 entnommen werden.

4.7 Ergebnisse und Diskussion

Die Rotverschiebung der Galaxie wurde von uns auf $z = 0,01644$ bestimmt. Zum Vergleich des Wertes mit anderen Messungen wurde zunächst die Datenbank SIMBAD herangezogen. Dort wird der Wert mit $z = 0,016565$ angegeben, was einer Abweichung von $-0,76\,\%$ unseres Wertes vom SIMBAD-Wert entspricht. [34] Zudem schauten wir bei der Datenbank NED nach, wo der Wert $z = 0,01627$ beträgt. [17] Demnach hat unser z-Wert eine Abweichung von $1,04\,\%$ (siehe Tabelle 1). Eine genauere Betrachtung der in den Datenbanken angegebenen Werten zeigt, dass bei SIMBAD nur eine einzige Studie referenziert wird, während es sich bei NED um einen Mittelwert verschiedener Studien eines längeren Zeitraums handelt. Zwar muss auch hier berücksichtigt werden, dass manche Werte anscheinend grob gerundet wurden oder es teilweise ein paar Werte mehrmals gibt, allerdings scheint der Mittelwert von NED verlässlicher als der eine Wert von SIMBAD zu sein. Es muss weiterhin angemerkt werden, dass unsere Messung der Verschiebung des Spektrums nur an der Hα-Linie erfolgte und nicht an mehreren Emissionslinien, deren z-Werte dann hätten gemittelt werden können. Das ergab sich in unserem Fall daraus, dass andere Emissionslinien kaum zu erkennen und daher nicht auszuwerten waren.

Wendet man die Formel $v_{r(n.r.)} = c \cdot z$ an, erhält man die Radialgeschwindigkeit der Galaxie für nicht-relativistische Betrachtungen, was für unsere Messung in $v_{r(n.r.)} = 4928,4\,\mathrm{km/s}$ resultiert. Dies hat eine Abweichung vom NED-Wert $v_r = 4877\,\mathrm{km/s}$ von $1,05\,\%$. Die Formel für nicht-relativistische Betrachtungen ist nur eine Näherung für Objekte von eher geringer Entfernung vom Beobachter und ergibt sich aus der Formel für relativistische Betrachtungen. Berücksichtigt man also die Relativität zwischen Galaxie und Beobachter mit der Formel $v_{r(r.)} = \frac{cz^2+2cz}{z^2+2z+2}$, erhält man ein Ergebnis von $v_{r(r.)} = 4887,9\,\mathrm{km/s}$ mit einer Abweichung von $0,22\,\%$ vom NED-Wert (siehe Tabelle 2). Obwohl die Radialgeschwindigkeit $v_{r(r.)}$ nur einen Anteil von $1,63\,\%$ an der Lichtgeschwindigkeit c hat, beeinflusst die Relativität das Ergebnis maßgeblich.

Die gemessene Rotverschiebung und somit auch die Radialgeschwindigkeit der Galaxie werden nicht nur durch die Expansion des Raumes, sondern auch durch die Pekuliarbewegung der Galaxie beeinflusst, welche zum Beispiel aus gravitativen Wechselwirkungen mit anderen

Tabelle 1: Übersicht der Ergebnisse der Rotverschiebung z und der Hubble-Konstante H_0; Vergleich zwischen den eigenen Messungen (M., siehe Abbildung 19), der NED und SIMBAD

z M.	z NED	$\Delta(z)$ [%]	z SIMBAD	$\Delta(z)$ [%]	H_0 M. [km/s/Mpc]
0,01644	0,01627	1,04	0,016565	-0,76	71,42 - 110,75 ($\sim$86,84)

Tabelle 2: Übersicht der Ergebnisse der nicht-relativistischen ($n.r.$) und relativistischen ($r.$) Radialgeschwindigkeit v_r; Vergleich zwischen der eigenen Messung (M.) und der NED

v_r NED [km/s]	$v_{r(n.r.)}$ M. [km/s]	$\Delta(v_r)$ [%]	$v_{r(r.)}$ M. [km/s]	$\Delta(v_r)$ [%]
4877	4928,4	1,05	4887,9	0,22

Galaxien resultiert. Die Pekuliarbewegung tritt als Verschiebung des Spektrums wegen des relativistischen Dopplereffekts auf. Im Internet konnten keine Informationen über eine bekannte Pekuliargeschwindigkeit von NGC7469 gefunden werden. Trotzdem ist es wahrscheinlich, dass die Expansion des Raumes im Vergleich zu einem möglichen relativistischen Dopplereffekt einen deutlich größeren Einfluss auf die Rotverschiebung des Spektrums hat, weil die Galaxie so weit von uns entfernt ist. Daher handelt es sich hier um eine kosmologische Rotverschiebung.

Mit $H_{t=0} = \frac{v_{r(r.)}(t)}{r(t)} = \frac{4887{,}9\,\mathrm{km/s}}{56{,}29\,\mathrm{Mpc}} = 86,84\,\frac{\mathrm{km}}{\mathrm{s{\cdot}Mpc}}$ kann die Hubble-Konstante zum Zeitpunkt der Aufnahme der Daten berechnet werden. Aus den Angaben der NED lässt sich erkennen, dass sich die Entfernungsbestimmung der Galaxie nicht auf das Hubble-Gesetz als Methode, sondern unter anderem auf Supernovae des Typs Ia und die Tully-Fisher-Beziehung stützt. [17] Das ist relevant, weil die Hubble-Konstante bei der NED als $H_0 = 67,8\,\frac{\mathrm{km}}{\mathrm{s{\cdot}Mpc}}$ angegeben wird, was bei uns letztendlich über die Entfernung zu einem Trugschluss führen würde, da wir nur die von der NED verwendete Hubble-Konstante berechnen würden. Dennoch führt die größere Standardabweichung in der Entfernungsangabe (alle Werte: siehe Abbildung 29) dazu, dass die Hubble-Konstante nur auf den Bereich $H_0 = 71,42\,\frac{\mathrm{km}}{\mathrm{s{\cdot}Mpc}}$ - $110,75\,\frac{\mathrm{km}}{\mathrm{s{\cdot}Mpc}}$ eingegrenzt werden kann. Bei Betrachtung einiger anderer gemessener Werte(-bereiche) für die Hubble-Konstante (siehe Abbildung 3) wird deutlich, dass der von uns bestimmte Wertebereich mit anderen Messungen übereinstimmt.

Ein Paper aus dem Jahr 2020 mit dem Titel „NGC7469 as seen by MEGARA: new results from high-resolution IFU spectroscopy“ von Cazzoli et al. thematisiert die Geschwindigkeitsdispersionen und Dynamiken verschiedener Komponenten von NGC7469. Relevant für den Vergleich mit unseren Daten ist, dass die Geschwindigkeitsdispersion der Hα-Linie mittels FWHM auf $\Delta v_1 = 2590\,\mathrm{km/s}$ bestimmt wurde, während die durchschnittliche Geschwindigkeitsdispersion bei $\Delta v_2 = 1100\,\mathrm{km/s} \pm 10\,\mathrm{km/s}$ lag. Bei uns liegen die genannten Werte bei $\Delta v_1 = 2523\,\mathrm{km/s}$ und $\Delta v_2 = 971\,\mathrm{km/s} \pm 9\,\mathrm{km/s}$. Die Abweichungen betragen somit $-2,59\,\%$ und $-11,73\,\%$ (siehe Tabelle 3). Die Verbreiterung der Hα-Linie wurde von den Forschern auf eine Komponente im Kern des AGN von NGC7469 zurückgeführt, genauer auf die BLR, welche von einem Kreis mit dem Radius $r \leq 1,85\,\mathrm{arcsec} \sim 630\,\mathrm{pc}$ eingeschlossen wird. Es handelt sich bei der Komponente um eine expandierende Wolke aus Wasserstoff, von der sich ein Teil auf uns zubewegt (negative Dopplergeschwindigkeit) und ein Teil von uns wegbewegt (positive Dopplergeschwindigkeit), was Abbildung 30 im Anhang veranschaulicht. Die Verbreiterung der Hα-Linie in der BLR trägt laut dem Paper zu $41\,\% \pm 7\,\%$ der Verbreiterung der Hα-Linie im Gesamtprofil bei. Im Paper wird auch noch auf eine andere Studie verwiesen, welche eine Geschwindigkeitsdispersion der Hα-Linie in FWHM von $\Delta v_1 = 1615\,\mathrm{km/s} \pm 119\,\mathrm{km/s}$ angab, deren Messung allerdings bei deutlich niedrigerem Auflösungsvermögen durchgeführt wurde. Cazzoli et al. geben an, ihre Auflösung dementsprechend herunterskaliert und trotzdem einen Wert von $\Delta v_1 = 2100\,\mathrm{km/s}$ bestimmt zu haben. Sie schlussfolgern, dass die große Abweichung der Werte der Geschwin-

digkeitsdispersion daher nicht vom unterschiedlichen Auflösungsvermögen der Spektrographen, sondern von der Veränderlichkeit von AGNs herrührt. [35]
Bemerkenswert ist, dass unsere Ergebnisse trotz der großen Unterschiede im Auflösungsvermögen der Spektrographen (DADOS: $R = 727$, MEGARA: $R = 20000$) eine so geringe Abweichung zeigen. Es wäre uns zwar möglich gewesen, mit den Spektrographen LHIRES III oder BACHES mit einem spektralen Auflösungsvermögen von $R = 11000$ - 18000 zu arbeiten, allerdings wären die Belichtungszeiten deutlich zu lang geworden, da die Intensität geringer wird, wenn sich die durch die Pekuliarbewegung der Gaskomponente verbreiterte Spektrallinie auf eine noch größere Fläche verteilt. Die für die Studie gewonnen Daten wurden, ebenfalls wie bei uns, um die baryzentrische Bewegung sowie die Instrumentendispersion korrigiert, sodass alle Messwerte gut vergleichbar sind.

Tabelle 3: Übersicht der Ergebnisse der Geschwindigkeitsdispersion Δv_1 und Δv_2 der Hα-Linie; Vergleich: eigene Messung (M., siehe Abbildung 22) und die von Cazzoli et al. (C.) [35]

Δv_1 M. [km/s]	Δv_1 C. [km/s]	$\Delta(\Delta v_1)$ [%]	Δv_2 M. [km/s]	Δv_2 C. [km/s]	$\Delta(\Delta v_2)$ [%]
2523	2590	-2,59	971 ± 9	1100 ± 10	-11,73

5 Fazit und Ausblick

Mithilfe des kosmologischen Standardmodells lässt sich die Entwicklung des Universums beschreiben. Das Universum, inklusive Raum und Zeit, begann in einer Singularität vor rund 14 Milliarden Jahren. Anfänglich waren die Bedingungen so extrem, dass Licht und Materie ununterscheidbar waren. Im Laufe der Zeit kühlte sich das Universum ab, dehnte sich aus und nach und nach bildeten sich die uns heute bekannten Strukturen heraus. Blicken wir sehr weit in der Zeit zurück, indem wir Objekte in großer Distanz zu uns beobachten, sehen wir, wie winzige Temperatur- und Dichteunterschiede dazu führten, dass sich Sterne, Galaxien und Galaxienhaufen entwickeln konnten. Unser von der Geometrie her flaches Universum wird sich auch in der Zukunft immer weiter ausdehnen, sodass sich die in ihm enthaltenen Objekte relativ gesehen immer weiter voneinander entfernen. Schließlich wird der Kosmos immer kälter und dunkler werden, bis irgendwann (in $t = 10^{100}\,\mathrm{a}$) ein Zustand erreicht sein wird, in dem es komplett dunkel und fast maximal kalt ($T \approx 0\,\mathrm{K}$) ist.
Ob das Universum grenzenlos ist, lässt sich nicht feststellen, weil wir nur den Teil des Universums sehen können, von dem das Licht bisher die Strecke zurücklegen konnte. Das bedeutet, dass unser beobachtbares Universum sehr wohl einen Rand hat, wir aber keine Aussagen über die tatsächlichen Grenzen des Kosmos machen können.

Nicht unerreichbar ist hingegen das Licht der Galaxie NGC7469, welches wir spektroskopierten und analysierten. Die Bestimmung der Rotverschiebung und der daraus berechneten nichtrelativistischen und relativistischen Radialgeschwindigkeit haben eine extrem geringe Abweichung von den Werten in den Datenbanken SIMBAD und NED, was ein zufriedenstellendes Ergebnis ist.
Auch die Messergebnisse der Geschwindigkeitsdispersion der Hα-Linie sind innerhalb eines akzeptablen Abweichungsbereichs, wenn man sie mit einer Studie aus dem Jahr 2020 vergleicht. Insgesamt waren die Messungen also sehr erfolgreich.

Die aus einem Teil der eigenen Ergebnisse berechnete Hubble-Konstante stimmt mit den Wertebereichen neuerer Messungen überein, ist aber wegen der Ungenauigkeit der Entfernungsangabe (große Standardabweichung) etwas unpräzise.

Abgesehen davon bleibt das Problem bestehen, dass die Werte der Hubble-Konstante insgesamt eine größere Diskrepanz aufweisen, die bis jetzt noch nicht erklärt werden kann, weil unterschiedliche Bestimmungsmethoden (Messung des CMB oder Messung der kosmologischen Rotverschiebung und Distanz vieler Objekte) zu verschiedenen Ergebnissen führen. Insbesondere die zweite Methode, um die Hubble-Konstante zu bestimmen, ist stark von genauen Distanzmessungen abhängig, welche nicht trivial sind, weil besondere Ereignisse wie Supernovae des Typs Ia notwendig sind. Demzufolge müssen weiterhin präzise und vielfältige Messungen

gemacht werden, um den Bereich einzugrenzen und die Expansion des Universums besser verstehen zu können. Einen Ansatz hierfür bietet zum Beispiel die Multimessenger-Astronomie, welche sich auf eine Varietät von Informationsübermittlern aus dem Universum wie Licht, Teilchen und Gravitationswellen stützt.

Auch mein Ziel ist es, die Hubble-Konstante noch näher zu bestimmen, da sie der Schlüssel für das Verständnis der Entwicklung des Universums ist. Dafür wurde schon ein Datensatz des Spektrums eines der bekanntesten Quasare, nämlich das von 3C273 (siehe Abbildung 24), aufgenommen. Weiterhin steht noch die Beobachtung einer weiteren Galaxie aus. Die beiden Objekte sollen auf dieselbe Art und Weise wie NGC7469 ausgewertet werden, um eine gute Vergleichbarkeit der Messungen zu garantieren. Anschließend wird es möglich sein, die drei separat bestimmten Hubble-Konstanten miteinander zu vergleichen und noch genauer in den wissenschaftlichen Entwicklungsstand einzuordnen.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass das Ziel dieser Projektarbeit erreicht wurde, und ich sehr viel im Prozess gelernt habe. Dies hat meine Neugier geweckt, noch mehr über das Thema zu erfahren und die eigene Forschung in diesem Bereich fortzusetzen.

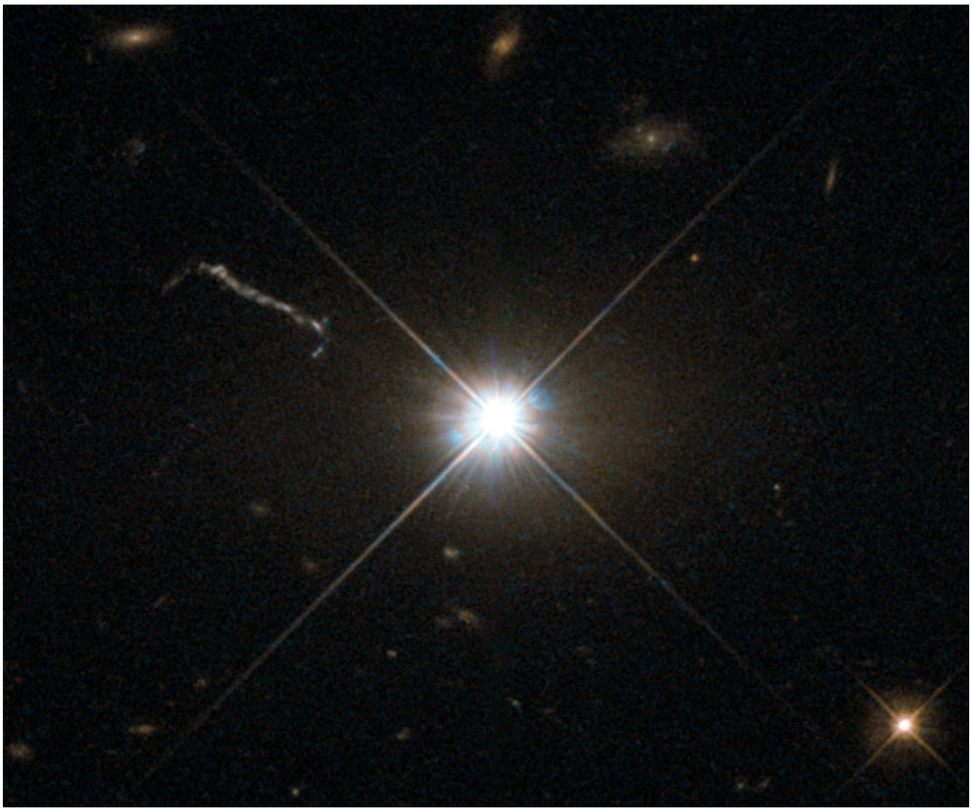


Abbildung 24: Foto des Quasars 3C273, Veränderung: Ausschnitt des Originalbildes [36]

Quellenverzeichnis

Bücher

[1]Jeffrey Bennett, Megan Donahue, Nicholas Schneider, Mark Voit, *Astronomie - Die kosmische Perspektive*, 9. aktualisierte Auflage (Pearson Deutschland GmbH, 2021), S. 888–955.

[2]Bernd Koch und Stefan Korth, *Die Messier-Objekte*, 2. aktualisierte Ausgabe (Franckh-Kosmos Verlags-GmbH&Co.KG, 2020), S. 7.

[5]Dieter Beckmann, *Astrophysik*, Auflage 2018 (C.C. Buchner Verlag, 2010), S. 151–180.

[7]Joachim Grehn und Joachim Krause, *Metzler Physik*, Druckserie A 2014 (Schroedel Verlag GmbH, 2012), S. 110–136.

Artikel

[6]Christian Wolf, „*Der Urknall - Oder: Erschafft sich der Kosmos immer wieder neu?*“, Sterne und Weltraum (Nr. 4 190549 608204 02), S.28 (Ausgabe 2, 2014).

Internetquellen

[3]*Entwicklung des Weltbilds*, `https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-642-77024-4_1`, (aufgerufen: 13.05.2021).

[4]*Edwin Hubble*, `https://asd.gsfc.nasa.gov/archive/hubble/overview/hubble_bio.html`, (aufgerufen: 13.05.2021).

[8]*THESAN-Simulation*, `https://thesan-project.com/thesan.html#nonspecial`, (aufgerufen: 01.05.2022).

[9]*Modell der Evolution des Kosmos*, `https://map.gsfc.nasa.gov/media/060915/index.html`, (aufgerufen: 06.05.2022).

[10]*Entdeckung des CMB*, `https://www.weltderphysik.de/gebiet/universum/kosmische-strahlung/planck-und-die-mikrowellenhintergrundstrahlung/`, (aufgerufen: 02.05.2022).

[11]*Foto CMB von PLANCK und WMAP*, `https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Planck/Planck_and_the_cosmic_microwave_background`, (aufgerufen: 06.05.2022).

[12]*Akkretion bei Schwarzen Löchern*, `https://www.spektrum.de/lexikon/astronomie/akkretion/7`, (aufgerufen: 10.04.2021).

[13]*Seyfert-Galaxien*, `https://application.wiley-vch.de/books/sample/3527403582_c01.pdf`, (aufgerufen: 06.05.2022).

[14] *Aktive galaktische Kerne*, https://sites.ualberta.ca/~pogosyan/teaching/ASTRO_122/lect27/lecture27.html, (aufgerufen: 06.05.2022).

[15] *Hubble-Konstante*, https://de.wikipedia.org/wiki/Hubble-Konstante, (aufgerufen: 06.05.2022).

[16] *Plot zur Hubble-Konstante*, https://sci.esa.int/web/planck/-/60504-measurements-of-the-hubble-constant, (aufgerufen: 06.05.2022).

[17] *Daten zu NGC7469*, http://ned.ipac.caltech.edu/byname?objname=NGC7469&hconst=67.8&omegam=0.308&omegav=0.692&wmap=4&corr_z=1, (aufgerufen: 25.02.2022).

[18] *JWST-Beobachtung von NGC7469*, https://www.nasa.gov/image-feature/goddard/2022/hubble-peers-at-peculiar-pair-of-galaxies, (aufgerufen: 11.04.2022).

[19] *Foto von NGC7469*, https://esahubble.org/images/heic0810cd/, (aufgerufen: 10.05.2022).

[20] *Foto von der Teleskopmontierung*, https://www.schuelerlabor-astronomie.de/astronomie-in-zeiten-von-corona/, (aufgerufen: 25.02.2022).

[21] *Foto vom C14 EdgeHD Teleskop*, https://celestron-site-support-files.s3.amazonaws.com/support_files/91030-XLT_91040-XLT_91050-XLT_91060-XLT_EdgeHD_OpticalTube_Manual_English_web.pdf, (aufgerufen: 25.02.2022).

[22] *C14 EdgeHD Teleskop*, https://www.celestron.com/products/edgehd-14-optical-tube-assembly-cge-dovetail#specifications, (aufgerufen: 25.02.2022).

[23] *STF-8300M CCD-Kamera*, https://www.astroshop.eu/astronomical-cameras/sbig-camera-stf-8300m/p,47233#tab_bar_1_select, (aufgerufen: 25.02.2022).

[24] *Photoelektrischer Effekt*, https://www.leifiphysik.de/quantenphysik/quantenobjekt-photon/geschichte/einstein-zum-photoeffekt, (aufgerufen: 25.02.2022).

[25] *Binning*, https://www.baslerweb.com/en/sales-support/knowledge-base/frequently-asked-questions/what-is-binning/15191/, (aufgerufen: 09.05.2022).

[26] *DADOS-Spaltspektrograph*, https://www.baader-planetarium.com/de/downloads/dl/file/id/188/product/0/dados_spalt_spektrograf_tutorial_110_seiten.pdf, (aufgerufen: 27.02.2022).

[28] *NeAr-Referenzlampe*, https://www.shelyak.com/produit/pf0037/?lang=en, (aufgerufen: 07.03.2022).

[32] *Alpha Lacertae*, http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/sim-basic?Ident=alf+Lac&submit=SIMBAD+search, (aufgerufen: 13.04.2022).

[33] *Kalibrierung der NeAr-Referenzlampe*, http://www.astrophoto.at/calibration-arne.html, (aufgerufen: 13.04.2022).

[34] *Daten zu NGC7469*, https://simbad.u-strasbg.fr/simbad/sim-id?Ident=NGC++7469, (aufgerufen: 15.04.2022).

[35] *Paper von Cazzoli et al.* `https://export.arxiv.org/pdf/2002.04031`, (aufgerufen: 15.04.2022).

[36] *Foto von 3C273*, `https://www.nasa.gov/content/goddard/nasas-hubble-gets-the-best-image-of-bright-quasar-3c-273/`, (aufgerufen: 10.05.2022).

Softwareverzeichnis

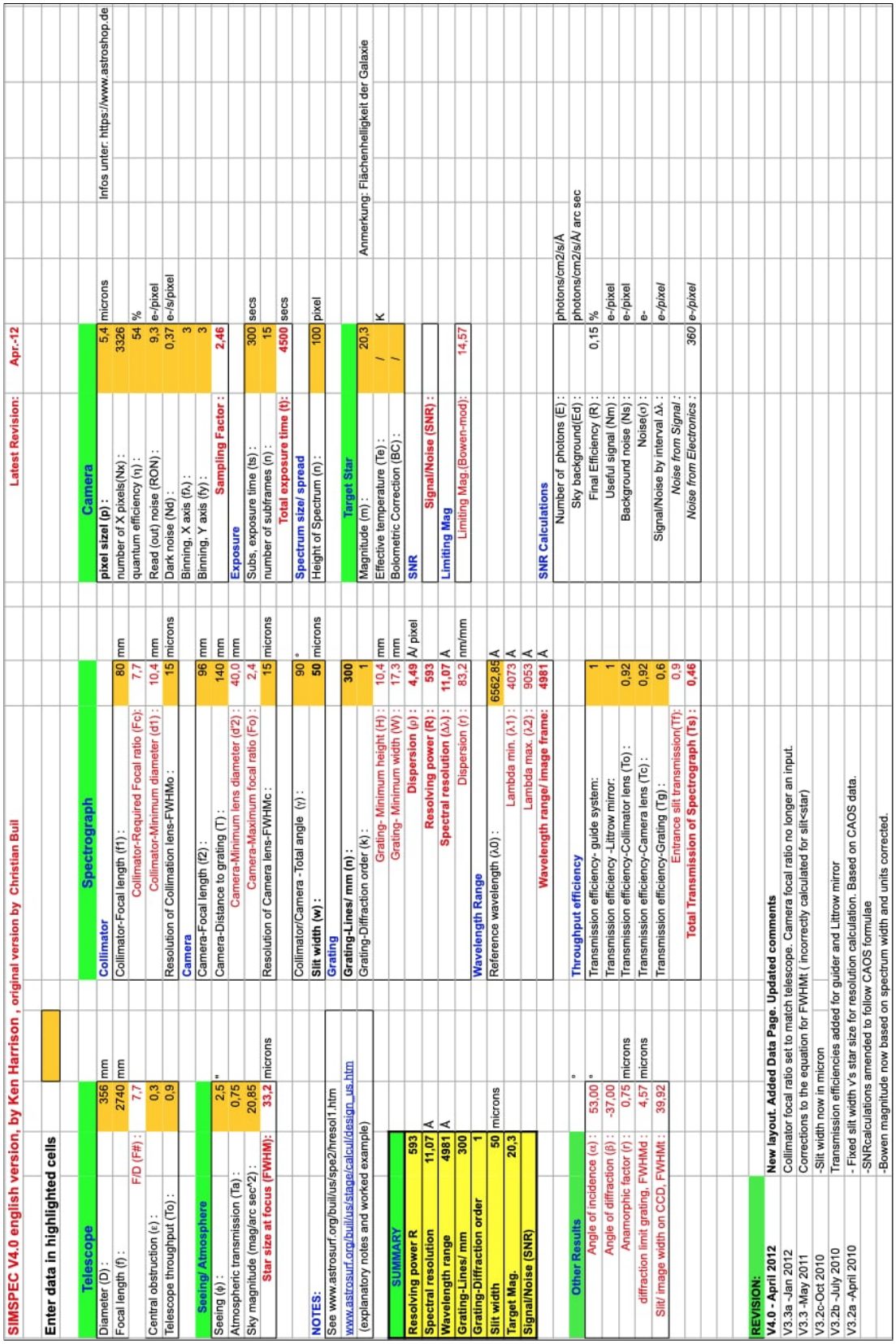
[27] Ken Harrison, Originalversion von Christian Buil, *SIMSPEC V4.0 english version (April 2012)* (http://www.astrosurf.com/buil/index.html), (aufgerufen: 26.04.2022).

[29] *Stellarium* (http://stellarium.org), (aufgerufen: 11.04.2022).

[30] *MaxIM DL Pro5* (https://diffractionlimited.com/maxim-dl/), (aufgerufen: 11.04.2022).

[31] *BASS* (https://groups.io/g/BassSpectro), (aufgerufen: 26.04.2022).

Anhang



SIMSPEC V4.0 english version, by Ken Harrison , original version by Christian Buil — Latest Revision: Apr.-12

Enter data in highlighted cells

Telescope		
Diameter (D) :	356	mm
Focal length (f) :	2740	mm
F/D (F#) :	7,7	
Central obstruction (ε) :	0,3	
Telescope throughput (To) :	0,9	
Seeing/ Atmosphere		
Seeing (φ) :	2,5	"
Atmospheric transmission (Ta) :	0,75	
Sky magnitude (mag/arc sec^2) :	20,85	
Star size at focus (FWHM):	33,2	microns

Spectrograph		
Collimator		
Collimator-Focal length (f1) :	80	mm
Collimator-Required Focal ratio (Fc):	7,7	
Collimator-Minimum diameter (d1) :	10,4	mm
Resolution of Collimation lens-FWHMo :	15	microns
Camera		
Camera-Focal length (f2) :	96	mm
Camera-Distance to grating (T) :	140	mm
Camera-Minimum lens diameter (d'2) :	40,0	mm
Camera-Maximum focal ratio (Fo) :	2,4	
Resolution of Camera lens-FWHMc :	15	microns
Collimator/Camera - Total angle (γ) :	90	°
Slit width (w) :	50	microns
Grating		
Grating-Lines/ mm (n) :	300	
Grating-Diffraction order (k) :	1	
Grating- Minimum height (H) :	10,4	mm
Grating- Minimum width (W) :	17,3	mm
Dispersion (μ) :	4,49	Å/ pixel
Resolving power (R) :	593	
Spectral resolution (Δλ) :	11,07	Å
Dispersion (r) :	83,2	nm/mm
Wavelength Range		
Reference wavelength (λ0) :	6562,85	Å
Lambda min. (λ1) :	4073	Å
Lambda max. (λ2) :	9053	Å
Wavelength range/ Image frame:	4981	Å

Camera		
pixel sizel (p) :	5,4	microns
number of X pixels(Nx) :	3326	
quantum efficiency (η) :	54	%
Read (out) noise (RON) :	9,3	e-/pixel
Dark noise (Nd) :	0,37	e-/s/pixel
Binning, X axis (fx) :	3	
Binning, Y axis (fy) :	3	
Sampling Factor :	2,46	
Exposure		
Subs, exposure time (ts) :	300	secs
number of subframes (n) :	15	
Total exposure time (t):	4500	secs
Spectrum size/ spread		
Height of Spectrum (n) :	100	pixel
Target Star		
Magnitude (m) :	20,3	
Effective temperature (Te) :	/	K
Bolometric Correction (BC) :	/	
SNR		
Signal/Noise (SNR) :		
Limiting Mag		
Limiting Mag.(Bowen-mod):	14,57	
SNR Calculations		
Number of photons (E) :		photons/cm2/s/Å
Sky background(Ed) :		photons/cm2/s/Å/ arc sec
Final Efficiency (R) :	0,15	%
Useful signal (Nm) :		e-/pixel
Background noise (Ns) :		e-/pixel
Noise(σ) :		e-
Signal/Noise by interval Δλ :		*e-/pixel*
Noise from Signal :		*e-/pixel*
Noise from Electronics :	360	*e-/pixel*

Infos unter: https://www.astroshop.de

Anmerkung: Flächenhelligkeit der Galaxie

SUMMARY		
Resolving power R	593	
Spectral resolution	11,07	Å
Wavelength range	4981	Å
Grating-Lines/ mm	300	
Grating-Diffraction order	1	
Slit width	50	microns
Target Mag.	20,3	
Signal/Noise (SNR)		

Other Results		
Angle of incidence (α) :	53,00	°
Angle of diffraction (β) :	-37,00	°
Anamorphic factor (r) :	0,75	microns
diffraction limit grating, FWHMd :	4,57	microns
Slit/ image width on CCD, FWHMt :	39,92	

Throughput efficiency	
Transmission efficiency- guide system:	1
Transmission efficiency -Littrow mirror:	1
Transmission efficiency-Collimator lens (To) :	0,92
Transmission efficiency-Camera lens (Te) :	0,92
Transmission efficiency-Grating (Tg) :	0,6
Entrance slit transmission(Tf):	0,9
Total Transmission of Spectrograph (Ts) :	0,46

NOTES:

See www.astrosurf.org/buil/us/spe2/hresol1.htm

www.astrosurf.org/buil/us/stage/calcul/design_us.htm

(explanatory notes and worked example)

REVISION:	
V4.0 - April 2012	New layout. Added Data Page. Updated comments
V3.3a -Jan 2012	Collimator focal ratio set to match telescope. Camera focal ratio no longer an input.
V3.3 -May 2011	Corrections to the equation for FWHMt (incorrectly calculated for slit<star)
V3.2c-Oct 2010	-Slit width now in micron
V3.2b -July 2010	Transmission efficiencies added for guider and Littrow mirror
V3.2a -April 2010	- Fixed slit width v's star size for resolution calculation. Based on CAOS data.
	-SNRcalculations amended to follow CAOS formulae
	-Bowen magnitude now based on spectrum width and units corrected.

Abbildung 25: Simulation der Parameter des Spektrographen bei der Beobachtung mit SimSpec [27]

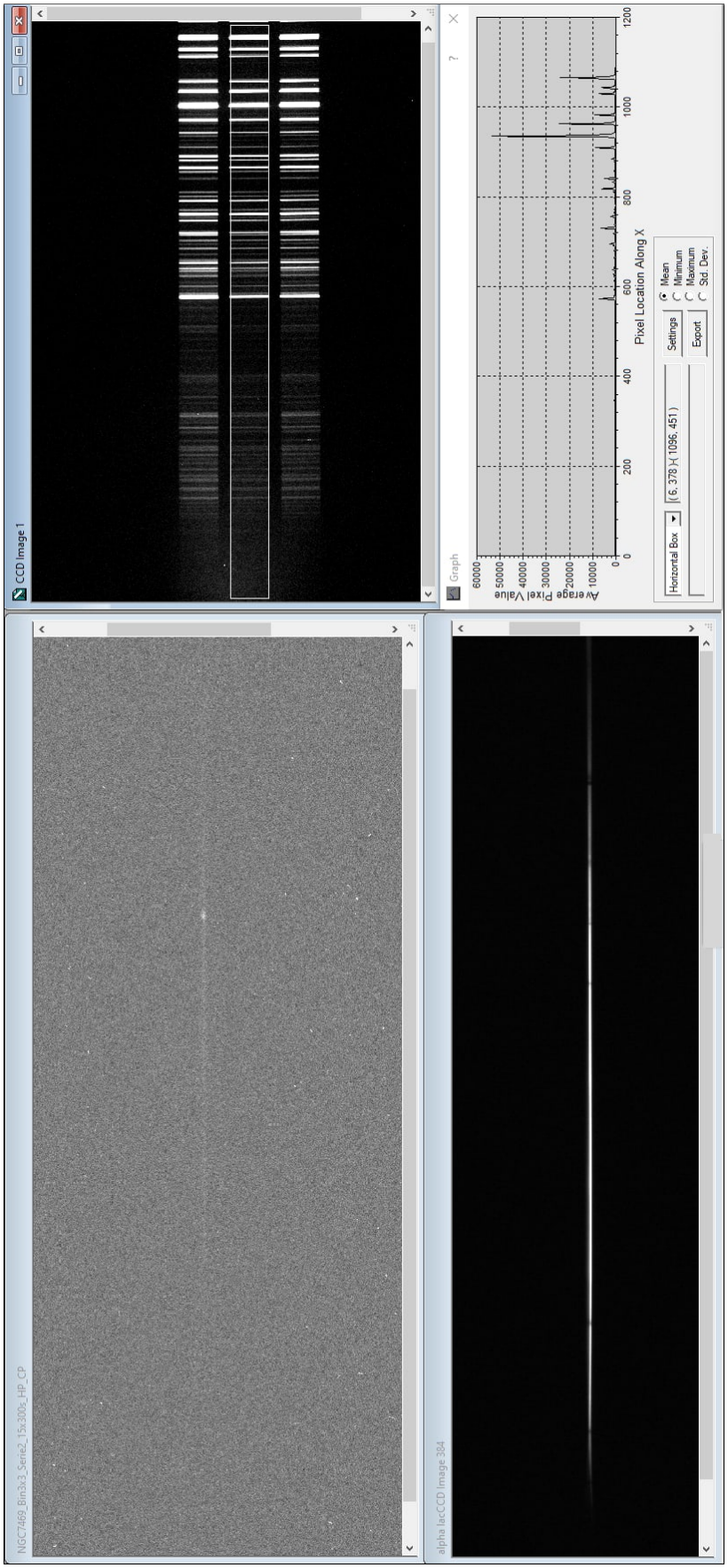


Abbildung 26: Bildschirmfoto aller Rohbilder mit den enthaltenen Spektren

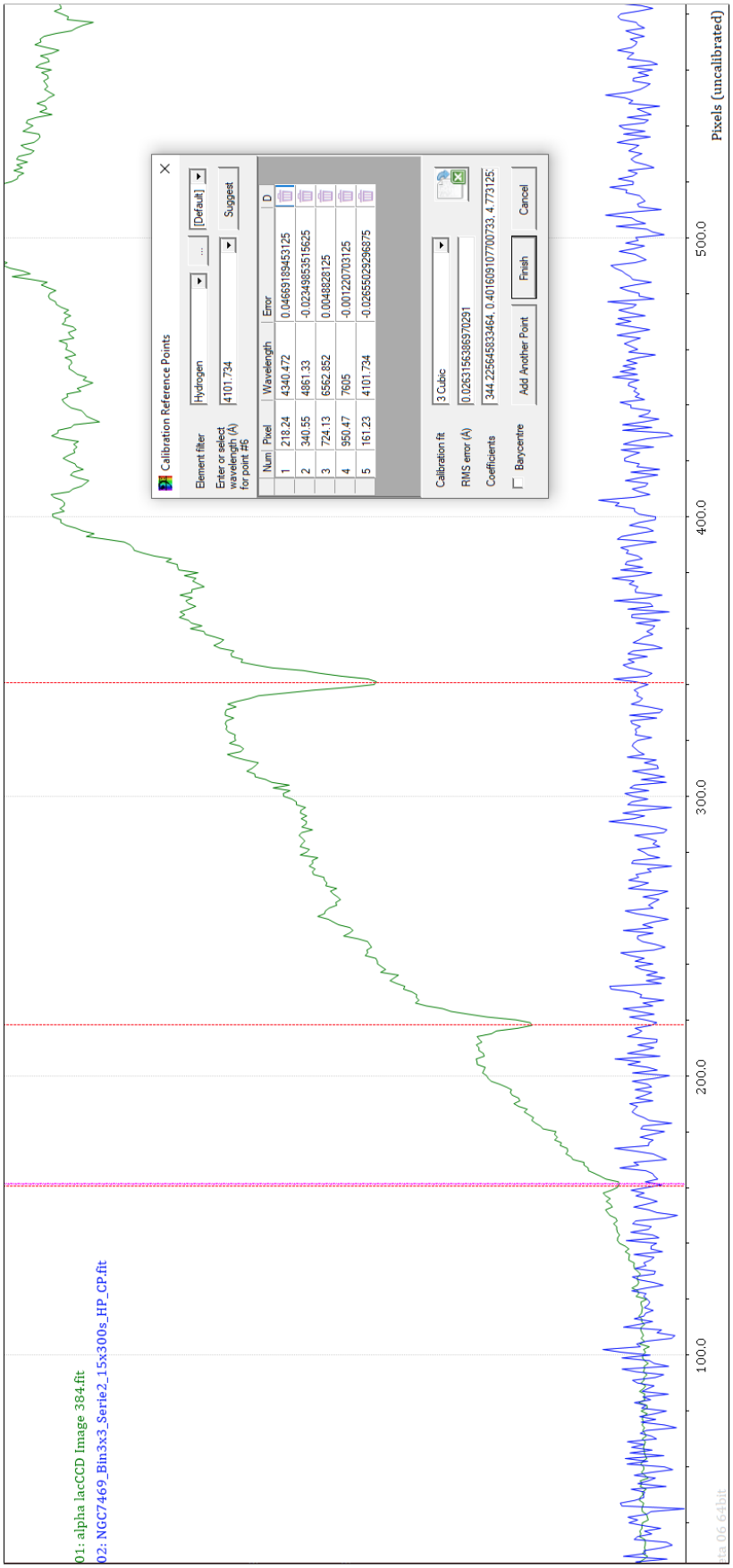


Abbildung 27: Bildschirmfoto der Kalibration des Spektrums von α Lac

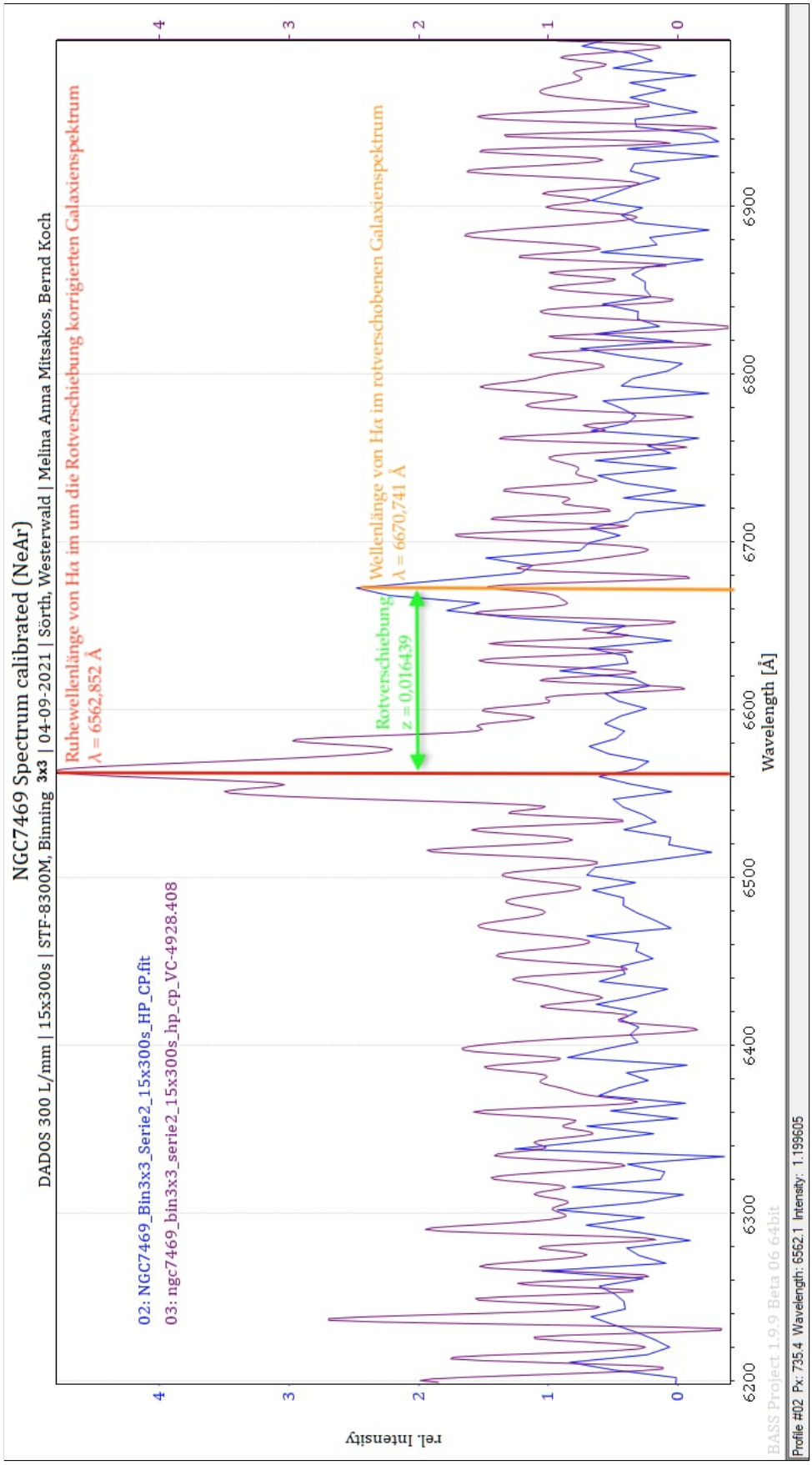


Abbildung 28: Bildschirmfoto des vollständig kalibrierten Galaxienspektrums von NGC7469; das nur kalibrierte Spektrum in blau, das zusätzlich um die Rotverschiebung korrigierte Spektrum in lila

View References in ADS (10)

1 of 1 (1 - 17 of 17)

No. (int)	(m-M) (mag) (double)	err(m-M) (mag) (double)	D(Mpc) (Mpc) (double)	Method (char)	Refcode (char)	Notes (char)	SN Name (char)	Redshift (double)	H0 (km/s/Mpc) (double)
1	33.79	0.08	57.30	SNIa	2017ApJ...842L..13K	SALT2	SN 2008ec		
2	33.88	0.13	59.70	SNIa	2017ApJ...842L..13K	MLCS2k2	SN 2008ec		
3	34.15	0.20	66.40	SNIa	2013MNRAS.433.2240G	SALT 2	SN 2008ec	0.016317001	70.00
4	33.39	0.07	47.70	AGN time lag	2014ApJ...784L..11Y				
5	34.43	0.55	77.00	AGN time lag	2007MNRAS.380..669C				44.00
6	35.34		117.00	AGN time lag	1999MNRAS.302L..24C				42.00
7	32.76		35.60	Tully-Fisher	1984A&AS...56..381B	B			103.00
8	33.04		40.60	Tully-Fisher	1984A&AS...56..381B	Mean of B mag and Diameter TF relation			103.00
9	33.24		44.40	Tully-Fisher	1994A&A...283...21S	CO			75.00
10	33.50	0.45	50.00	Tully-Fisher	2007A&A...465...71T	K			
11	33.60		52.50	Tully-Fisher	1984A&AS...56..381B	Diameter			103.00
12	33.65		53.60	Tully-Fisher	1994A&A...283...21S	HI			75.00
13	33.71	0.47	55.30	Tully-Fisher	2007A&A...465...71T	H			
14	33.88	0.46	59.60	Tully-Fisher	2007A&A...465...71T	J			
15	33.94	0.40	61.50	Tully-Fisher	2007A&A...465...71T	mean			
16	34.58	0.34	82.40	Black Hole	2014ApJ...793..108W				
17	33.80	0.84	57.00	Ring Diameter	1981ApJS...45..541P	Published at H = 100 km/s/Mpc			

Abbildung 29: Bildschirmfoto der Entfernungsangaben zu NGC7469 in der NED; es wurden unterschiedliche, von der Rotverschiebung unabhängige Methoden zur Entfernungsbestimmung verwendet (z.B. Supernovae des Typs Ia, Tully-Fischer-Beziehung); der Mittelwert ist $r = 56,29\,\mathrm{Mpc} \pm 12,15\,\mathrm{Mpc}$, wobei der stark abweichende Wert $r_6 = 117\,\mathrm{Mpc}$ nicht in der Berechnung des Mittelwerts und der Standardabweichung berücksichtigt wurde [17]

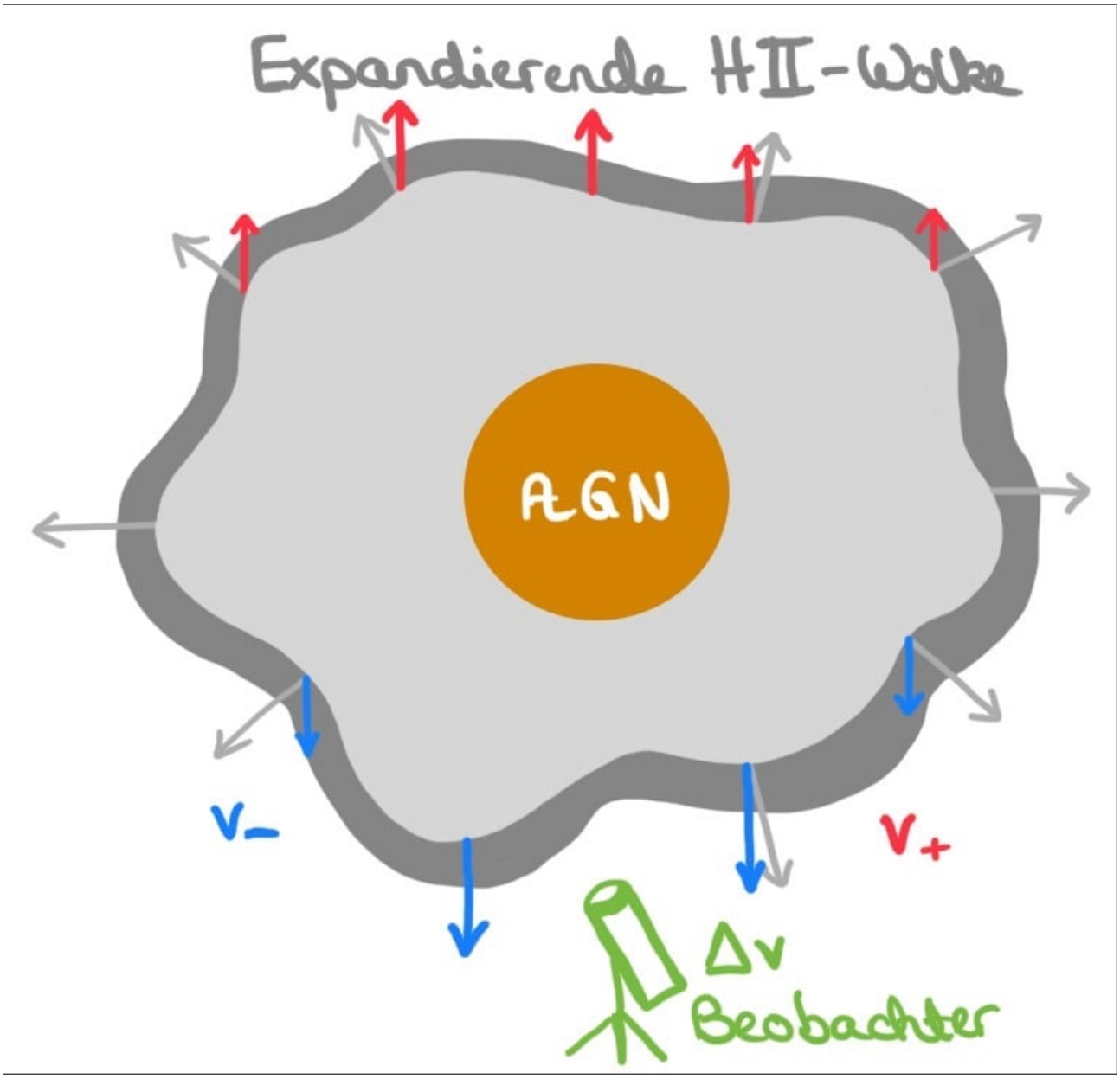


Abbildung 30: Skizze der expandierenden Wasserstoffwolke in der BLR von NGC7469; durch die Expansion und gleichzeitige Drehung der Wolke haben verschiedene Komponenten der Wolke unterschiedliche Relativgeschwindigkeiten (v_- und v_+) zum Beobachter; diese verursachen eine Dopplerverschiebung des Lichts in den blauen bzw. roten Spektralbereich, welche zu der Verbreiterung der Hα-Linie des Spektrums führt; die Verbreiterung der Hα-Linie kann man in Å im Spektrum messen und in Relation zu der Ruhewellenlänge von Hα setzen; diese Werte können in eine Geschwindigkeitsdispersion Δv umgerechnet werden, eigene Darstellung

	Mittelwellenlänge des Gaußfits [Å]		Messung z [Wellenlänge des Gaußfits/ Wellenlänge Hα] - 1		Entfernung r von NGC7469 [Mpc], nicht abhängig von der Rotverschiebung, NED	Radialgeschwindigkeit v_r	Geschwindigkeits-dispersion des Referenzspektrums bei λ = 6677Å [Å in FWHM]	Geschwindigkeits-dispersion der Hα-Linie [Å in FWHM] (korrigiert um 9,1Å)	Geschwindigkeits-dispersion der Hα-Linie [km/s in FWHM]	Geschwindigkeits-dispersion der Hα-Linie [km/s in FWHM] (korrigiert um 9,1Å)
Legende	6668,01		0,01602		57,30	Messung v_{r(n.r.)} [km/s]: c * Mittelwert Messung z	9,30	21,10	2526,46	2517,36
Hα-Wellenlänge des Gaußfits	6668,58		0,01611		59,70	4928,41	9,30	21,32	2465,60	2456,50
Rotverschiebung z	6668,70		0,01613		66,40	Messung v_{r(r.)} [km/s]: (c*z^2+2cz)/(z^2+2z+2) mit Mittelwert Messung z	8,77	21,67	3074,38	3065,28
Radialgeschwindigkeit v_{r(n.r.)} = c * z (n.r. = nicht relativistisch)	6668,81		0,01615		47,70	4887,91	9,30	21,32	2435,15	2426,05
Radialgeschwindigkeit v_{r(r.)} = (c*z^2+2cz)/(z^2+2z+2) (r. = relativistisch)	6670,01		0,01633		77,00	v_r [km/s]: c * z Simbad	9,13	21,32	2465,60	2456,50
Geschwindigkeitsdispersion der Hα-Linie [km/s]	6670,03		0,01633		35,60	4966,06	9,30	21,23	2465,57	2456,47
Geschwindigkeitsdispersion der Hα-Linie [km/s in FWHM]	6671,20		0,01651		40,60	v_r NED [km/s]	9,48	21,32	2435,15	2426,05
Auflösungsvermögen des Spektrographen	6671,20		0,01651		44,40	4877,02	8,95	20,67	2617,80	2608,70
Verhältnis Messung v_{r(r.)} zu c, c = 299792,458 km/s	6671,40		0,01654		50,00		8,95	21,23	2496,02	2486,92
Entfernung r von NGC7469, nicht abhängig von der Rotverschiebung, NED	6671,41		0,01654		52,50	Relativer Fehler: Messung v_{r(n.r.)} und v_r NED	9,30	21,32	2465,60	2456,50
Hubble-Konstante H_0	6671,66		0,01658		53,60	0,0105	9,12	21,23	2404,74	2395,64
	6671,67		0,01658		55,30	Relativer Fehler: Messung v_{r(r.)} und v_r NED	Mittelwert	Mittelwert	Mittelwert	Mittelwert
	6671,69		0,01658		59,60	0,0022	9,17	21,25	2532,01	2522,91
	6671,72		0,01659		61,50		Standardabweichun			Standardabweichung
	6671,74		0,01659		82,40	Verhältnis Messung v_{r(r.)} zu c	0,21			188,54
	6671,80		0,01660		57,00	0,0163				
	6671,84		0,01661		Mittelwert: Entfernung r [Mpc]		Maximale Intensität bei λ = 6677Å			
	6671,86		0,01661		56,29	Entfernung r von NGC7469 [Mpc], NED	3891,86			
	Mittelwert: Mittelwellenlänge des Gaußfits [Å]	Standardabweichung: Mittelwellenlänge des Gaußfits [Å]	Mittelwert: Messung z	Standardabweichung: Messung z	Standardabweichung: Entfernung r [Mpc]	56.29 ± 12.15	Minimale Intensität 1 am Fuß der Linie bei λ = 6677Å	Mittelwert: Minimale Intensität 1+2		
	6670,74	1,34	0,01644	0,00020	12,15	Bestimmung der Hubble-Konstante [km/s/Mpc]: H_0 = v_{r(r.)} / r NED	282,40	281,31		
	Mittelwert: Messung z	Standardabweichung: Messung z	z Simbad	z NED		71,42	Minimale Intensität 2 am Fuß der Linie bei λ = 6677Å	Mittlere Intensität bei λ = 6677Å		
	0,01644	0,00020	0,016565	0,01627		86,84	280,21	1805,28		
	Relativer Fehler: Mittelwert Messung z und z Simbad	Relativer Fehler: Mittelwert Messung z und z NED				110,75				
	-0,00758	0,01041								

Abbildung 31: Bildschirmfoto der Auswertung der Messungen (Teil 1)

Geschwindigkeitsdispersion der Hα-Linie [km/s]	Vergleich eigene Daten - Referenz von Cazzoli et al. 2020	Korrektur unseres FWHM-Werts	Auflösungsvermögen des DADOS-Spektrographen, gemessen an der Verbreiterung der Linie λ = 6677Å, FWHM
970,72	Relativer Fehler: Gerundeter Mittelwert Geschwindigkeitsdispersion [km/s] (eigene Messung) und Durchschnittliche Geschwindigkeitsdispersion [km/s] (Cazzoli et al. 2020)	Messung an der scharfen Linie λ = 6677Å	718
979,85	-0,12	9,1±0,2Å	718
961,58	Relativer Fehler: Gerundete Standardabweichung Geschwindigkeitsdispersion [km/s] (eigene Messung) und Abweichungen von der durchschnittlichen Geschwindigkeitsdispersion [km/s] (Cazzoli et al. 2020)	((23,1Å)^2-(9,1Å)^2)^(1/2) = 21,25±0,2Å	762
Mittelwert: Geschwindigkeitsdispersion der Hα-Linie [km/s]	-0,10		718
970,72	Relativer Fehler: Geschwindigkeitsdispersion [km/s in FWHM] korrigiert um 9,1Å (eigene Messung) und Geschwindigkeitsdispersion [km/s in FWHM] (Cazzoli et al. 2020)		732
Gerundeter Mittelwert: Geschwindigkeitsdispersion der Hα-Linie [km/s]	-0,03		718
971,00			704
Standardabweichung: Geschwindigkeitsdispersion der Hα-Linie [km/s]	Auflösungsvermögen R des Spektrographen (eigene Daten)		746
9,14	727,00		746
Gerundete Standardabweichung: Geschwindigkeitsdispersion der Hα-Linie [km/s]	Auflösungsvermögen R des Spektrographen (Simulation mit Simspec)		718
9,00	593		732
Gerundet: 971±9 km/s Man kann die Flanken der Hα-Linie nur schlecht feststellen, weil andere Linien zum Profil beitragen und der Spektrograph eine gewisse Breitenungenauigkeit hat, weshalb der FWHM-Wert verwendet wird (gemessen in Ångström). Bei uns beträgt er 21,25Å ± 0,2Å für die Geschwindigkeitsdispersion der Hα-Linie.	Auflösungsvermögen R des Spektrographen (Cazzoli et al. 2020)		Mittelwert: Auflösungsvermögen des DADOS-Spektrographen
Geschwindigkeitsdispersion der Hα-Linie korrigiert um 9,1Å [km/s in FWHM]	20000		727,33
2522,91			Gerundeter Mittelwert: Auflösungsvermögen des DADOS-Spektrographen
			727,00
Referenzen mit Radialgeschwindigkeiten und innerer Struktur der Galaxie (Geschwindigkeit, mit der das (Wasserstoff-)Gas um das schwarze Loch rotiert)			
Referenz von Cazzoli et al. 2020 (Seite 10)			
Durchschnittliche Geschwindigkeitsdispersion der Hα-Linie [km/s]			
1100			
Abweichungen von der durchschnittlichen Geschwindigkeitsdispersion der Hα-Linie [km/s]			
10			
Geschwindigkeitsdispersion der Hα-Linie [km/s in FWHM]			
2590			
Geschwindigkeitsdispersion der Hα-Linie [km/s in FWHM] von Peterson et al. 2004 und Bentz&Katz 2015, spektrale Auflösung von ~9Å	Mögliche Gründe für die Abweichungen: spektrale Auflösung, Variabilität des AGNs (nach Anpassung der spektralen Auflösung durch Cazzoli et al. und Erhalt eines stark abweichenden Ergebnisses von 2100 km/s, erscheint die Variabilität naheliegend)		
1615±119			

Abbildung 32: Bildschirmfoto der Auswertung der Messungen (Teil 2)

Danksagung

Ich möchte mich herzlich bei Herrn Bernd Koch bedanken, der diese Arbeit begleitet, den Projektkurs Astronomie mit viel Engagement unterrichtet und mir für meine Beobachtungen seine Privatsternwarte zur Verfügung gestellt hat.
Außerdem danke ich meiner Familie für die besondere Unterstützung während der Entstehungsphase dieser Arbeit und für die Ermöglichung der Teilnahme am Projektkurs.

Selbstständigkeitserklärung

Ich versichere hiermit, dass ich meine Projektarbeit

„Die Evolution des Kosmos
- Die Hubble-Konstante als Schlüssel zur Untersuchung des Universums“

selbstständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten oder nicht veröffentlichten Schriften entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht. Die in der Arbeit angegebenen Links wurden zum Zeitpunkt des Aufrufs überprüft und enthielten keine illegalen Inhalte. Für jegliche Änderungen der Inhalte übernehme ich keine Verantwortung.

Ich erkläre mich damit einverstanden, dass meine Arbeit publiziert wird.

Wülfrath, 16. Mai 2022

Melina Anna Mitsakos

Melina Anna Mitsakos