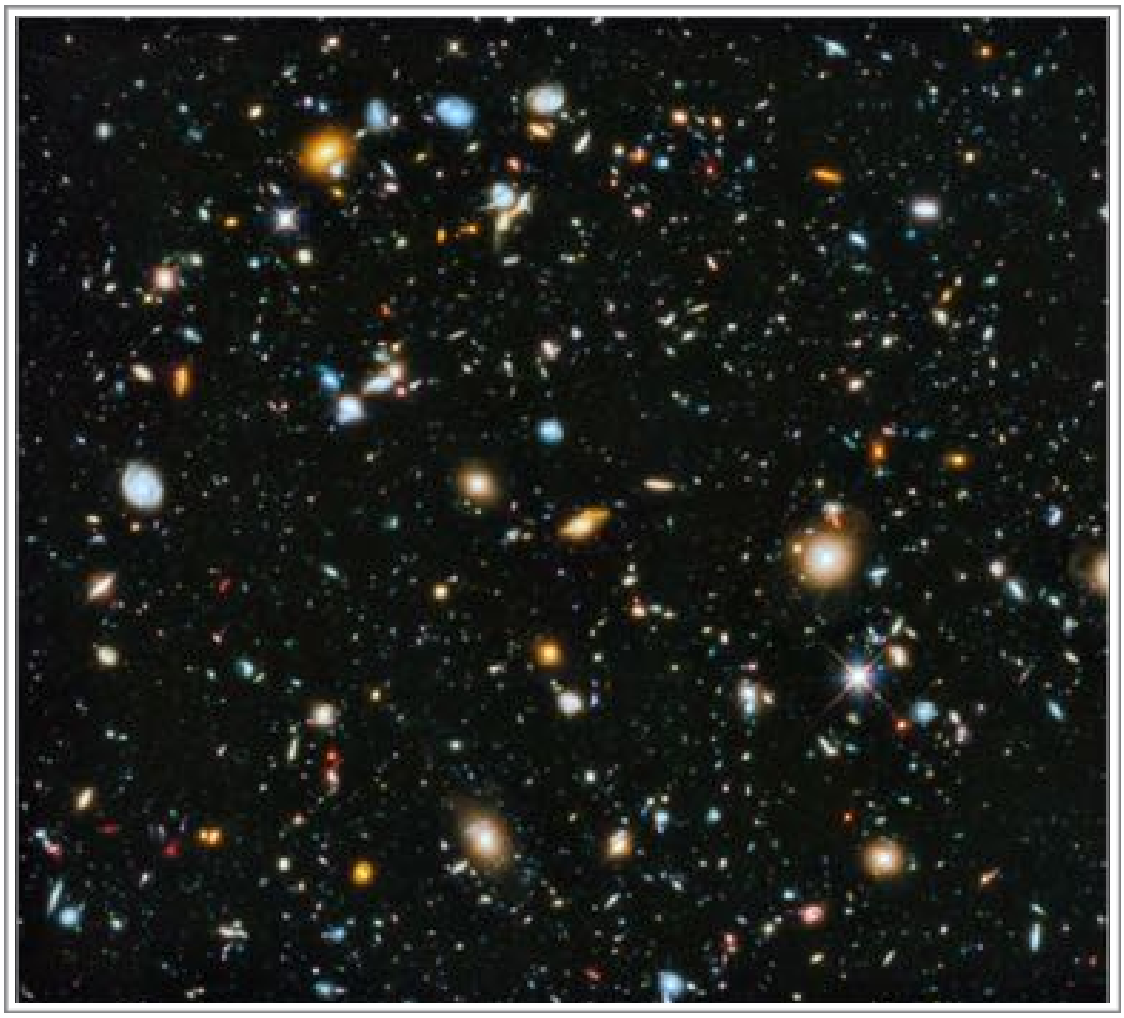
Galaxien

- Faszinierende Großstrukturen im Universum

Melina Anna Mitsakos



Städt. Gymnasium Wülfrath, Jahrgangsstufe EF

17.05.2021

Arbeit im Rahmen des Projektkurses
Astronomie 2020/21 am CFG Wuppertal

Kursleitung: Bernd Koch

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung 3
2. Historischer Überblick 4
3. Theorie zu Galaxien 5
    - Klassifikation in Galaxientypen 5
    - Aufbau und Eigenschaften 7
    - Entwicklung 16
4. Unsere Milchstraße 17
    - Eigenschaften 17
    - Entwicklung 18
5. Eigene Forschung 20
    - Forschungsziel 20
    - Verwendete Geräte 20
    - Experimenteller Aufbau 23
    - Durchführung der Beobachtung 24
    - Auswertungsprozess 25
    - Ergebnisdiskussion 27
6. Fazit 30
7. Anhang 31
    - Quellenverzeichnis 31
    - Literatur- und Softwareverzeichnis 33
    - Abbildungsverzeichnis 33
    - Danksagung 35
    - Selbstständigkeitserklärung 35

1. Einleitung

Galaxien gehören zu meinen Lieblingsobjekten im Universum. Sie faszinieren mich immer wieder aufs Neue. Sie sind komplex, so unterschiedlich, unheimlich groß und bilden trotzdem eine Einheit für sich. Das Besondere an Galaxien ist für mich, dass sie alle außergewöhnliche Eigenschaften haben und man immer etwas Neues entdecken kann. Galaxien sehen außerdem wunderschön aus und beeindrucken durch ihre gigantischen Maßstäbe.

Das Titelbild zeigt eine Aufnahme des Hubble Space Telescope, erschienen im Jahr 2014. Es handelt sich hierbei um eine Zusammensetzung vieler Bilder des Hubble Ultra Deep Fields, welches zwischen 2002 und 2012 mehrfach aufgenommen wurde. Die Aufnahme zeigt einen kleinen Himmelsausschnitt aus dem Sternbild Fornax (Chemischer Ofen) der südlichen Hemisphäre. Dieses Bild zeigt ungefähr 10 000 Galaxien, von denen manche einen Abstand von 13 Milliarden Lichtjahren von uns haben und damit kurz nach dem Urknall entstanden sein müssen. In diesem Bild kann man Galaxien unterschiedlichen Typs in unterschiedlichen Entwicklungsstadien sehen.[1] Ich finde dieses Bild und den Gedanken, dass uns so viele atemberaubend schöne Galaxien umgeben, überwältigend.

Da ich mich letztes Jahr mit dem Thema „Sterne und Sternentwicklung“ auseinandergesetzt habe, wollte ich dieses Mal einen Schritt weiter gehen. Meine Motivation dieser Arbeit ist, mich intensiv mit dem Thema Galaxien zu beschäftigen und dabei viele verschiedene Aspekte kennenzulernen. Die Erforschung von Galaxien ist meiner Meinung nach von großer Relevanz für die Wissenschaft, damit wir besser verstehen können, wie sich das Universum entwickelt hat, denn blickt man sehr weit in die Vergangenheit zurück bzw. in den Kosmos hinein, so sind Galaxien die Objekte, welche man besonders gut beobachten kann.

Im Rahmen dieser Arbeit gehe ich auf die Entwicklung der Galaxienforschung, die unterschiedlichen Erscheinungsformen von Galaxien, die Eigenschaften bestimmter Galaxientypen und ihren Aufbau ein. Mein Interesse gilt hier speziell der Entstehung der Spiralmuster in (Balken-)Spiralgalaxien. Die Forschungsfragen lauten also für mich, wie die Spiralmuster konsistent sein und wie Beobachtungen die Theorie unterstützen können. Dafür gehe ich auf die zwei Galaxien M51 und M61 im praktischen Teil mit eigenen Aufnahmen ein.

Das Thema Galaxien ist sehr breit gefächert und diese Arbeit soll Einblicke in ein paar Gebiete geben.

2. Historischer Überblick

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. Es schlug vor, dass die Erde um die Sonne kreist und wir somit nicht das Zentrum des Universums sind. Viele Menschen konnten das zu der damaligen Zeit nicht nachvollziehen, aber es gab auch Befürworter.

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.[2] 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 und die Messier-Bezeichnungen sind bis heute gängig. Die im Messier-Katalog aufgeführten Galaxien haben in etwa einen Durchmesser von 8000 bis 180 000 Lichtjahren und sind 2,52 Millionen bis 67 Millionen Lichtjahre von uns entfernt.[3]

Die Spiralstruktur von extragalaktischen Nebeln war ein Gebiet, mit dem sich William Parsons, auch bekannt unter dem Namen Lord Rosse, beschäftigte. Sir William Huggins nutzte die Spektroskopie, um die Nebel unterscheiden zu können. Galaxien zeigen ein Spektrum, welches dem von vielen überlagerten Sternspektren ähnelt, weil Galaxien aus sehr vielen Sternen bestehen.

Eine sehr große Entdeckung machte Henrietta Leavitt, nämlich die Periode-Leuchtkraft-Beziehung der δ-Cepheidensternen (Pulsationsveränderliche). Dank ihr kann man durch die Bestimmung der scheinbaren Helligkeit und Periode von Sternen, die regelmäßige Muster in den Helligkeitskurven im Helligkeits-Zeit-Graphen zeigen, die absolute Helligkeit berechnen und anschließend unter Anwendung des Entfernungsmoduls die Entfernung berechnen. Harlow Shapley maß die Entfernung von Kugelsternhaufen in der Umgebung mittels Fotometrie von RR Lyrae-Sternen und fand heraus, dass diese ein kugelförmiges System (Halo) von etwa 30 000Lj 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 000Lj hat. Schon drei Jahre später, 1923, konnte Edwin Hubble mittels der Cepheidenmethode von

Henrietta Leavitt zeigen, dass der Andromedanebel eine Entfernung von einer Million Lichtjahre hat und daher außerhalb der Milchstraße liegen muss.[4]
Das war ein unglaublicher Schritt vorwärts. Inzwischen sind Milliarden von Galaxien im Universum bekannt.
Da Edwin Powell Hubble eine so große Rolle in der Astronomie und Kosmologie spielte, möchte ich hier noch einmal besonders auf ihn eingehen. Einer der wichtigsten Astronomen des 20. Jahrhunderts wurde am 20.11.1888 geboren und starb am 28.09.1953. Dennoch war die Astronomie nicht sein ursprüngliches Arbeitsgebiet. Er studierte zunächst Rechtswissenschaften in Oxford. Erst später (1910) machte er einen Bachelor in Mathematik und Astronomie in Chicago. Anschließend trat er seinen Militärdienst im ersten Weltkrieg an und promovierte 1917 ebenfalls in Chicago in der Astronomie. Er forschte danach am Mount Wilson Observatorium, wo er 1923 mit seiner Beobachtung des Andromedanebels und dessen Entfernungsbestimmung die Astronomie revolutionierte. Edwin Hubble bewies die Existenz anderer Galaxien außer der Milchstraße. Er begann mit einer morphologischen Untersuchung der Galaxien (Hubble Tuning Fork Diagram) und untersuchte deren Rotverschiebung. So gelang es ihm sogar, die Expansion des Kosmos mittels des Hubble-Gesetzes zu beschreiben. Ihm zu Ehren wurde eines der leistungsstärksten Teleskope im Weltraum nach ihm benannt: das Hubble Space Telescope (HST).[5]
Inzwischen gab und gibt es vielfältige Instrumente zur Erforschung von Galaxien, zum Beispiel das Hubble Space Telescope HST (Messungen im optischen Bereich und im nahen Infrarotbereich), den Cosmic Background Explorer COBE (Messungen im Infrarotbereich zur Hintergrundstrahlung), das Spitzer Space Telescope SST (Messungen im Infrarotbereich zu aktiven galaktischen Kernen und zu Infrarotgalaxien), die Wilkinson Microwave Anisotropy Probe WMAP (Messung von Temperaturunterschieden in der Hintergrundstrahlung von bis zu 20 Millionstel Kelvin), den Planck Surveyor PLANCK (Mikrowellenteleskop zur Messung von Temperaturunterschieden in der Hintergrundstrahlung), das Chandra X-ray Observatory CXO (Röntgenteleskop) sowie das Compton Gamma Ray Observatory (Beobachtungen von Gammastrahlung).[6] Bei der Erforschung von Galaxien kommen folglich unterschiedlichste Geräte zum Einsatz, um ein möglichst umfassendes Bild bieten zu können.

3. Theorie zu Galaxien

Klassifikation in Galaxientypen

Galaxien sind riesige eigenständige Sternsysteme mit Milliarden von Sternen sowie Ansammlungen von Gas und interstellarem Staub. Diese ganzen Komponenten werden von der Gravitation zusammengehalten, wobei es viele Variationen bezüglich Größe, Form und Struktur gibt.[7] Galaxien sind häufig in Galaxiengruppen bzw. Galaxienhaufen und Galaxiensuperhaufen angeordnet, sodass sie früher oder später meist miteinander interagieren.[8]

Die Hubble-Sequenz

Edwin Hubble entwickelte 1936 ein Schema (Abb. 2), die inzwischen sogenannte Hubble-Sequenz, um die Galaxien nach ihrer Morphologie zu sortieren und miteinander zu vergleichen. Er teilte die Galaxien nach ihren Formen im optischen Wellenlängenbereich

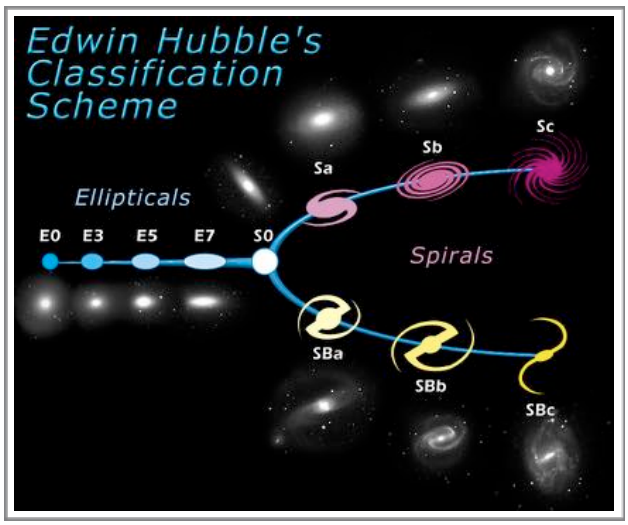


Abb. 2: Schema der Hubble-Sequenz

($\lambda = 4000 - 7000$Å) in drei Hauptklassen ein: elliptisch, spiralförmig und irregulär. Die Hubble-Sequenz ist wie eine Stimmgabel aufgebaut und wird daher auch Hubble tuning fork genannt. Dabei befinden sich links die elliptischen Galaxien, rechts oben die spiralförmigen Galaxien und rechts unten die Balkenspiralgalaxien. Die irregulären Galaxien sortierte er jedoch nicht in dieses Schema ein, da sie zu unterschiedlich sind.

Bezeichnung des Galaxientyps

Die elliptischen Galaxien werden zudem nach dem Verhältnis der großen zur kleinen Halbachse in sieben Untertypen geordnet. E0 erscheint fast kreisförmig, während E7 schon stark elliptisch ist. Mithilfe der Formel $\epsilon = 1 - \frac{b}{a}$ mit b für die große Halbachse und a für die kleine Halbachse kann man die Elliptizität ϵ einer elliptischen Galaxie bestimmen, die multipliziert mit 10 und gerundet auf die nächste ganze Zahl den Typ N der Unterklasse angibt.

Zwischen den elliptischen Galaxien und den Spiralgalaxien, also an der Gabelung der Hubble tuning fork, befinden sich die lentikulären Galaxien. Sie sehen linsenförmig aus und werden danach unterschieden, ob sie einen Balken im Zentrum (SB0) oder keinen Balken im Zentrum haben (S0). Sie verfügen über einen hellen Zentralbereich und eine längliche Scheibe, in der sich aber keine Spiralarme erkennen lassen.

Sowohl die Spiralgalaxien als auch die Balkenspiralgalaxien werden nach denselben Kriterien in die Untertypen eingeteilt. Ein A oder B nach dem Buchstaben S (Spiralgalaxie) bedeutet, dass sie anämisch sind (A) oder einen Balken aus Sternen in der Mitte haben (B). Ist der Zentralbereich sehr groß und hell und sind die Spiralarme eng gewunden, so folgt danach ein kleines a. Mit der Abnahme der Helligkeit und Größe der Zentralregion und der Öffnung der Spiralarme werden die Galaxien weiter rechts in der Hubble tuning fork einsortiert und bekommen den Kleinbuchstaben c. Die Galaxien im Übergang zwischen diesen beiden Zuständen haben die Bezeichnung b. Schließlich folgt noch die Bezeichnung r, wenn die Spiralarme aus einem Ring hervorgehen, oder s, wenn sie dem Galaxienkern entstammen. Da eine genaue Einteilung oftmals nicht möglich ist und es viele Zwischenformen gibt, werden auch häufig Kombinationen der einzelnen Buchstaben verwendet. Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal betrifft die Erkennbarkeit der einzelnen Spiralarme. Galaxien, deren Spiralarme deutlich hervortreten und sich voneinander abgrenzen, werden auch als grand-design spirals bezeichnet, wohingegen Galaxien mit diffusem Erscheinungsbild der Spiralarme (sie verschwimmen also ineinander) als flocculent spirals bezeichnet werden.

Bei den irregulären Galaxien unterscheidet man schließlich noch zwischen Irr I und Irr II, wobei erstere eine Form von Unterstruktur zeigen, während bei den Galaxien des Typs Irr II keine klare Unterstruktur sichtbar ist. Irreguläre Zwerggalaxien werden mit dI bezeichnet.[9]

Bei diesen ganzen Bezeichnungen gilt zu beachten, dass Galaxien nicht immer deutlich zuzuordnen sind, da es fließende Übergänge gibt und es sich jeweils immer nur um eine Momentzuordnung handelt (so wie man die Galaxie zu einem bestimmten Zeitpunkt beobachten kann), weil sie sich fortlaufend weiterentwickeln. Da es sich um eine morphologische Einteilung der Galaxien handelt, spielt natürlich auch die Lage bzw. Ausrichtung der Galaxien zum Betrachter hin eine große Rolle - so kann beispielsweise eine lentikuläre Galaxie vom Ende her gesehen wie eine elliptische Galaxie erscheinen. Besonders bei den elliptischen Galaxien kann es auch so zu Irrtümern kommen.
Typische Vertreter der aufgeführten Galaxientypen werden später vorgestellt, können aber auch hier[10] gut eingesehen werden.

Entgegen Hubbles Annahme, dass es sich bei der Hubble-Sequenz um ein zeitliches Entwicklungsschema handeln könnte, weiß man inzwischen, dass die Formen der Galaxien durch einen komplizierteren Prozess entstehen, der aber immer noch nicht ganz verstanden ist. Man vermutet, dass sich langfristig durch das Verschmelzen und Interagieren verschiedener spiralförmiger oder irregulärer Galaxien zumindest ein Teil der elliptischen Galaxien herausbildet. Bei der Beobachtung sehr weit entfernter und somit sehr alter Galaxien fällt jedoch auf, dass sie sich nicht so gut in die Hubble-Sequenz einordnen lassen und stark irregulär sind. Die Hubble-Sequenz scheint also eher für die Galaxien des näheren Universums gültig zu sein. Wie noch folgen wird, hat die Hubble-Sequenz trotz ihrer eher unphysikalischen und rein morphologischen Klassifikation der Galaxien eine große Bedeutung und erfreut sich weltweiter Nutzung, da die einzelnen Galaxientypen doch Ähnlichkeiten in ihren Eigenschaften (und natürlich im Aufbau) aufweisen.

Aufbau und Eigenschaften

Elliptische Galaxien

Elliptische Galaxien (Abb. 3) haben einen hellen Zentralbereich und sind nach außen hin kugelförmig bzw. elliptisch aufgebaut. In ihrem Zentrum befindet sich ein supermassereiches Schwarzes Loch von mehreren Millionen bis Milliarden Sonnenmassen. Damit es so groß werden konnte, musste es sehr viel Materie wie zum Beispiel Gas akkretieren, was unter anderem dessen geringes Vorkommen in diesen Galaxien erklärt. Anhand von Beobachtungen fand man heraus, dass elliptische Galaxien kaum über Staub oder Gas verfügen, aber über sehr viele ältere, kühlere Sterne. Spektroskopische Untersuchungen zeigten, dass diese einem Mückenschwarm ähnlich auf unglaublich vielen Bahnen scheinbar unbeeinflusst voneinander um das Zentrum rotieren. Sogenannte Isophoten (Linien gleicher Helligkeit) zeigen, dass die Ellipsen eher kastenförmig (boxy) oder zitronenförmig (disky) aufgebaut sind. Dies hängt mit der Bewegung der Sterne in der Galaxie zusammen. Bei den boxy Ellipsen bewegen sich die Sterne mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten fort und sorgen so für das elliptische, abgeplattete Erscheinungsbild, während bei den disky Ellipsen dieses Erscheinungsbild durch die Rotation der Sterne in der Galaxie zu erklären ist. Es scheint einen Zusammenhang zwischen Erscheinungsbild und Eigenschaft der elliptischen Galaxien zu geben, denn die hellen, massereichen Objekte haben meist boxy Isophoten, während die leuchtschwächeren elliptischen Galaxien hauptsächlich disky Isophoten aufweisen.[11] Die alten, kühlen und

metallreichen Sterne sind für das rötliche Erscheinungsbild dieses Galaxientyps verantwortlich, da aufgrund des Mangels an Gas kaum Sternentstehung möglich ist (hierbei sei auf das Hertzsprung-Russell-Diagramm verwiesen, dass die Zusammenhänge zwischen Leuchtkraft, Farbe, Helligkeit und Spektralklasse von Sternen aufzeigt). Die Metallizität der Sterne und somit auch die Sternentstehung nehmen nach außen hin radial ab. Kürzlich fand man jedoch heraus, dass große Halos aus heißem Röntgenstrahlen-emittierendem Gas (bis zu 10 Mio. Kelvin) die Galaxien umgeben, und sich einige Sterne erst vor Kurzem (wenigen Milliarden Jahren) gebildet haben. Man vermutet, dass dies mit der Entwicklung von elliptischen Galaxien zusammenhängen könnte, auf die später noch eingegangen wird. Aufgrund des Aufbaus nimmt die Flächenhelligkeit vom Zentrum bis zu den Rändern der Galaxien gleichmäßig ab, was als wichtiges Unterscheidungsmerkmal von den morphologisch ähnlichen Kugelsternhaufen dient. Die Flächenhelligkeit kann gut mit dem de Vaucouleur-Profil beschrieben werden, das folgendermaßen lautet: $\log\left(\frac{I(r)}{I_e}\right) = -3.3307\left[\left(\frac{r}{r_e}\right)^{\frac{1}{4}} - 1\right]$, wobei I die Flächenhelligkeit, r_e der effektive Radius (Radius, bei welchem die Hälfte der Gesamtleuchtkraft erreicht ist) und I_e die Flächenhelligkeit des effektiven Radius ist.[12]

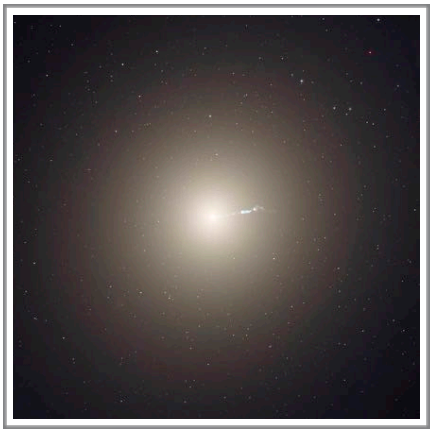


Abb. 3: Foto von M87, Galaxie des Typs E0

Elliptische Galaxien können bis zu eine Billion Sterne beinhalten, einen Durchmesser von zwei Millionen Lichtjahren (typisch ist eine Ausdehnung von 80 000Lj) und eine Masse von bis zu 10^{42}kg haben, was ca. eine Billion Sonnenmassen entspricht. Damit zählen sie zu den größten und massereichsten Galaxien im Universum, wobei längst nicht alle elliptischen Galaxien solche gigantischen Ausmaße haben.[13]

Lentikuläre Galaxien

Lentikuläre Galaxien (Abb. 4) haben eine helle Kernregion, auch Bulge genannt, und eine gasarme, galaktische Scheibe. In dieser Scheibe sind keine Spiralarme erkennbar. Auch sie bestehen, wie die elliptischen Galaxien, hauptsächlich aus alten Population II Sternen, die ihnen die gelblich-rötliche Färbung verleihen.[14]

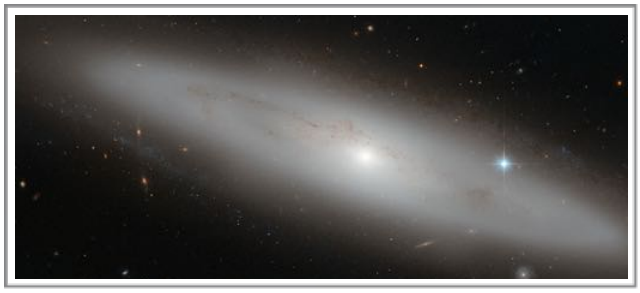


Abb. 4: Foto von NGC4866, Galaxie des Typs S0a

(Balken-)Spiralgalaxien

(Balken-)Spiralgalaxien (Abb. 5 und 6) wirken auf den ersten Blick schöner, vielfältiger und interessanter als elliptische oder lentikuläre Galaxien und sind auch vom Aufbau her deutlich

komplizierter, weshalb in diesem Abschnitt besonders auf die einzelnen Bestandteile eingegangen wird.
Möchte man mehr über den Aufbau von Spiralgalaxien herausfinden, so spielt es eine große Rolle, wie die Galaxie zum Beobachter ausgerichtet ist. Steht die Galaxie frontal zu uns, so wird sie Face-on-Galaxie genannt, wobei sich Muster, Balken oder Spiralen am

Abb. 5: Foto von NGC4622, Spiralgalaxie des Typs SA(r)ab

Abb. 6: Foto von NGC1300, Balkenspiralgalaxie des Typs SBbc

einfachsten erkennen lassen. Der Scheibenaufbau von (Balken-)Spiralgalaxien ist am besten sichtbar, wenn die Galaxie mit ihrer Kante zum Beobachter steht (Edge-on-Galaxie).[15]
Ist Letzteres der Fall, so sieht man die galaktische Scheibe, welche meistens eine Ausdehnung von 10-20kpc und eine Dicke von 100pc-1kpc hat. Die Mitte der Scheibe, also der Galaxienkern, ist von einer Ausbuchtung, dem sogenannten Bulge umgeben. Dieser Komplex ist in einen sphärischen stellaren Halo gebettet, in dem zahlreiche Kugelsternhaufen und andere Materie durch Gravitation an die Galaxie gebunden sind.[16] Darum schließt sich ein Halo aus Dunkler Materie.

Kugelsternhaufen - stellarer Halo

Die Kugelsternhaufen des Halos sind sehr viel größer als offene Sternhaufen und haben einen Durchmesser von 30 bis 300 Lichtjahren. Sie enthalten in der Regel 10^5 bis 10^6 Sterne, die aufgrund der Dichte zueinander eine einheitlich leuchtende Fläche bilden, sodass einzelne Sterne nur am Rand sichtbar sind. Mithilfe der Spektroskopie fand man heraus, dass die Sterne in den Kugelsternhaufen kaum schwere Elemente in ihren Hüllen enthalten, also sehr metallarm sind. Bei der Einordnung der Sterne ins Hertzsprung-Russell-Diagramm fällt auf, dass es auf der Hauptreihe für große Massen oder Leuchtkräfte kaum Vertreter aus den Kugelsternhaufen gibt, was darauf hindeutet, dass die Sterne schon ein sehr hohes Alter erreicht haben. Anhand beider Beobachtungen (kaum schwere Elemente in den Hüllen, kaum Sterne mit großer Masse oder Leuchtkraft) schätzt man die Sterne auf ein Alter von 10^{10} Jahren, was astronomisch gesehen schon „kurz“ nach dem Urknall ist und ordnet sie den Sternen der Population II zu. Der stellare Halo hat insgesamt einen geringen Massenanteil an der Galaxie.[17]

Dunkle Materie-Halo

Anhand der bei Spiralgalaxien gut beobachtbaren Rotation und Bewegung der Objekte fand man bei Messungen heraus, dass deutlich mehr Masse in den Galaxien und in ihrem Umfeld vorhanden sein muss, als man beobachten kann, damit solche Bewegungsprofile entstehen können. Die mysteriöse Masse bzw. Materie tritt dabei aber nur durch ihre gravitative Wirkung auf die herkömmliche baryonische Materie hervor und ist sonst nicht auszumachen. Sie interagiert nicht mit elektromagnetischer Strahlung, weswegen sie als Dunkle Materie bezeichnet wird. Gründe für ihre Existenz sind trotzdem, dass die Sterne mit höheren Umlaufgeschwindigkeiten als erwartet in den Galaxien rotieren und ohne Dunkle Materie sogar aus ihren Umlaufbahnen flögen. Die starke Lichtablenkung in Gravitationslinsen, z.B. Einstein-Ringen und -Bögen in massereichen Galaxienhaufen, sind ein weiterer Hinweis auf ihre Existenz. Bis jetzt wurde noch nicht näher bestimmt, aus was diese Materie bestehen könnte, nur dass sie die uns bekannte Materie und ihre Strukturen zusammenhält. Dennoch gibt es potentielle Kandidaten für diese Dunkle Materie (dark matter): dunkle, baryonische Materie wie zum Beispiel erkaltete Braune Zwerge oder Schwarze Löcher (MACHOs: Massive Astrophysical Compact Halo Objects) oder nicht-baryonische Materie (WIMPs: Weakly Interactive Massive Particles) - aber zum Beispiel keine Neutrinos, da diese zu leicht und zu schnell sind, um gravitativ gebunden zu werden - die bis jetzt allerdings noch nicht experimentell nachgewiesen werden konnten.[18] Dunkle Materie, die etwa 85% der gesamten Materie und etwa 27% der Energie des Universums ausmacht, ist ebenfalls in Halos um Galaxien angeordnet. Der Halo aus Dunkler Materie ist im Gegensatz zum stellaren Halo sehr massereich, er macht sogar den Großteil der Masse der Galaxie aus, und ist im Vergleich mit dem stellaren Halo deutlich größer.

Der Bulge

Nun geht es vom ganz Großen zum Kleinen: um das Zentrum von Spiralgalaxien schließt sich der stellare Bulge, eine Ausbuchtung, die deutlich über die Scheibendicke hinausgeht, aber in etwa nur ein Fünftel so groß ist (typisch ist ein Radius von 2kpc) und dem Aufbau von elliptischen Galaxien ähnelt. Auch die Helligkeit des Bulges lässt sich mit der schon bei den elliptischen Galaxien aufgeführten Formel von de Vaucouleur berechnen. Die Form des Bulges kommt dadurch zustande, dass der Drehimpuls der Sternansammlung gering und die Geschwindigkeitsdispersion (Geschwindigkeitsverteilung) hoch ist, wodurch sich sehr ungeordnete Bewegungsbahnen für die Sterne ergeben, die letztlich die Ausbuchtung formen. Der Bulge besteht hauptsächlich aus älteren Sterne und es findet kaum Sternentstehung mehr statt.

Schwarze Löcher in Galaxienkernen

Der Bulge umgibt den Galaxienkern, der aufgrund des Staubs und der Sterne im Bulge am besten im infraroten Bereich des elektromagnetischen Spektrums beobachtet wird. Dabei stellte sich heraus, dass sich supermassereiche Schwarze Löcher im Zentrum von Spiralgalaxien befinden. 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 (vielleicht Hawking-Strahlung, die jedoch sehr schwach ist und bis jetzt noch nicht experimentell nachgewiesen wurde). Wird ein (supermassereiches) Schwarzes Loch jedoch 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 (siehe Abb.3). Die Materie in den Jets bewegt sich mit nahezu Lichtgeschwindigkeit fort, sodass relativistische Ereignisse 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/ Positronen im Magnetfeld. Die Umwandlung von Gravitations- in Strahlungsenergie ist bei Akkretionsscheiben von Schwarzen Löchern also extrem effizient.[19]
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 mit AGN für active galactic nuclei bezeichnet. Diese Objekte lassen sich am besten im Radiowellenbereich entdecken, da kurzwelliges oder sichtbares Licht häufig vom Staubtorus der Akkretionsscheibe absorbiert wird. Die Radiostrahlung ist davon eher nicht 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.
Wissenschaftler des Max-Planck-Instituts für extraterrestrische Physik beobachteten einen Zusammenhang zwischen der Ausbildung des Bulges und der Masse des supermassereichen Schwarzen Loches in Galaxien. Je kleiner die Bulges waren, desto geringer war auch die Masse der Schwarzen Löcher.[20] Auch die Geschwindigkeitsdispersion der Sterne scheint im Zusammenhang mit der Masse des Schwarzen Lochs und der Masse des Bulges zu stehen.[21]
Die Ansicht einer Edge-On-Galaxie verrät, dass der Körper einer Spiralgalaxie flach ist, während eine Face-On-Galaxie eine elliptische bzw. runde Form der Galaxie zeigt. Kombiniert man diese beiden Beobachtungen, so erhält man eine Scheibe, deren Helligkeitsprofil mit der Formel $I(R) = I_0\, e^{-\frac{R}{R_D}}$ beschrieben werden kann, wobei I die

Intensität, I_0 die maximale Intensität, R der Radius und R_D der Bezugsradius ist. Der Bezugsradius ist der Radius außerhalb des Bulges, ab dem die Formel erst gültig wird.[22]

Galaktische Fontänen

Aufgrund der Scheibennatur der Spiralgalaxien können sich auch besondere Phänomene wie galaktische Fontänen ereignen. Finden mehrere Supernovae in einem kurzen Zeitraum statt, so kann sich eine Superblase aus heißem Gas in der galaktischen Scheibe bilden, die, wenn sie von ihrer Größe her die Scheibendicke übertrifft, in den Halo ausbrechen kann. Das Gas in der Blase kühlt sich im Verlauf der Zeit ab und bildet Wolken, welche schließlich auf die Scheibe abregnen. So kommt ein Materiekreislauf zustande.

Scheibenaufbau

Die Face-On-Galaxien offenbaren die Strukturen in Spiralgalaxien. Man erkennt, dass die Scheiben mit Sternen, Staub, HI-Regionen und interstellarem Gas (10-20%) angefüllt sind. Man unterscheidet zwischen der dünnen Scheibe, in welcher der Staub- und Gasanteil sehr hoch und die Sternentstehung sehr aktiv ist, sowie der dickeren Scheibe, in der weniger aktiv Sternentstehung stattfindet, da der Gasanteil hier nicht so groß ist.

Spiralgalaxien enthalten damit sowohl jüngere (PopI) als auch ältere Sterne (PopII), wobei erstere eher in der dünnen Scheibe und letztere vielmehr im Bulge oder in der dicken Scheibe vorkommen. Das Gas in der (dünnen) Scheibe dient als Quelle für neue Sterne und Staub.[23] Auch in der näheren Umgebung des Zentrums (Zentrale Molekulare Zone, CMZ) scheint es in manchen Galaxien große Mengen Gas zu geben, allerdings verhindern von Druckwellen ausgelöste Turbulenzen im Gas die Bildung von Sternen. Die Bildung der Druckwellen wird von Zusammenstößen der Gaswolken hervorgerufen.[24] Die flache Form einer Scheibe kommt durch den hohen Drehimpuls und die geringe Geschwindigkeitsdispersion der Materie zustande, ansonsten ergäbe sich ein ellipsoidales bzw. sphärisches Gebilde.

Spiralarme und Dichtewellentheorie

Besonders faszinierend sind die Spiralarme, die sich entweder als gut erkennbare Großstruktur (grand-design spirals) oder als verschwimmendes Muster (flocculent spirals) beobachten lassen. Ich möchte hier speziell auf die Spiralarme der grand-design spirals eingehen. Dabei stellt sich natürlich die Frage, wie diese Spiralarme entstehen können und wie sie sich stabil bewegen.

Durch spektroskopische Beobachtungen (Dopplereffekt) zeigte sich, dass die Sterne in einer Spiralgalaxie differentiell rotieren, ihre Winkelgeschwindigkeit also von der Entfernung zum Zentrum abhängt, während ihre Rotationsgeschwindigkeit bzw. Bahngeschwindigkeit fast gleich groß bleibt. Sie führen eine Keplerbewegung aus. Materie in der Nähe des Galaxienkerns hat eine höhere Winkelgeschwindigkeit als weiter außerhalb befindliche Materie. Diese Beobachtung war übrigens auch ein Hinweis auf die Existenz von Dunkler Materie.

Ginge man jetzt davon aus, dass die Materie in einer Spiralgalaxie wegen ihrer differentiellen Rotation die Spiralarme bildete, so stöße man auf das Problem, dass sich diese schon nach vergleichsweise kurzer Zeit (etwa 100 Mio. Jahren) aufgewickelt hätten, weil sich die weiter innen gelegene Materie so viel schneller bewegt. Das Ganze ist auch unter dem „winding problem“ bekannt und konnte nicht mit den Beobachtungen in Einklang gebracht werden, da

sonst sehr viele Galaxien überaus eng aufgewickelte Spiralarme und riesige Bulges haben müssten.
Einen anderen Ansatz zur Erklärung liefert die von Bertil Lindblad 1925 entworfene und von Chia-Chiao Lin und Frank Shu 1969 maßgeblich weiterentwickelte Dichtewellentheorie.[25]
Knapp gesagt, geht sie davon aus, dass es spezielle Bereiche höherer Dichte innerhalb der Materie der Galaxienscheibe gibt, die als quasistationäre (stehende) Dichtewellen starr um das Zentrum rotierend die Scheibe durchlaufen.[26]
Grundlegend ist für die Theorie, dass die Sterne nicht auf perfekten Kreisbahnen um das Zentrum rotieren, sondern eine elliptische Bewegung ausführen. Diese kommt dadurch zustande, dass die Sterne, ausgelöst durch eine Störung, mit einer bestimmten Frequenz um ihre Ursprungsbahnen pendeln, während sie weiterhin um das Zentrum rotieren. Dadurch bewegen sich die Sterne auf sogenannten Epizykeln, also auf von Kreisbahnen leicht abweichenden Orbits in einem eine Kreisbewegung ausführenden System.
Bei einer bestimmten Winkelgeschwindigkeit des rotierenden Galaxiensystems ergibt sich, dass die Epizykelbewegungen der Körper eine geschlossene Rosettenbahnkurve bilden, was dann als Dispersionsbahn bezeichnet wird. Die hierfür benötigte Winkelgeschwindigkeit lässt sich mit $\Omega_P = \Omega - \frac{\kappa}{m}$ berechnen und wird auch innere Lindblad-Resonanz genannt, weil eine Resonanz zwischen der Epizykel-Frequenz eines Körpers und der Winkelfrequenz des Spiralmusters besteht, die das Spiralarmmuster weiter verstärkt. Hier liegen Ω_P als Winkelgeschwindigkeit des rotierenden Galaxiensystems (bzw. „Pattern-Frequency“ des Spiralmusters), Ω als Winkelgeschwindigkeit eines Körpers auf einer Dispersionsbahn, κ als Frequenz des Pendelns des abgelenkten Massepunktes um die Ursprungsbahn (Epizykel-Frequenz) und m als natürliche Zahl der Spiralarme vor, die meistens recht klein ist. Das Resonanzphänomen erklärt auch, warum besonders häufig zweiarmige Spiralgalaxien vorkommen.[27] Das Gegenstück zur inneren Lindblad-Resonanz ist die äußere Lindblad-Resonanz, welche durch $\Omega_P = \Omega + \frac{\kappa}{m}$ beschrieben wird. Die Spiralarme können sich nur in dem Bereich zwischen der inneren und äußeren Lindblad-Resonanz bilden, da sonst die von den Spiralarmen regelmäßig ausgehende Anziehung größer als die Epizykel-Frequenz der Körper ist und sich das Spiralmuster und die Dispersionsbahnen folglich nicht in Resonanz befinden. Tatsächlich ist es so, dass die Winkelgeschwindigkeit Ω_P des rotierenden Galaxiensystems bzw. des Spiralmusters fast unabhängig von der Entfernung zum Zentrum ist, sodass viele verschiedene Dispersionsbahnen bei derselben Winkelgeschwindigkeit $\Omega - \frac{\kappa}{2}$ stabil bleiben können (hier ist $m = 2$, weil die meisten grand-design Spiralgalaxien zwei Spiralarme haben). Verschiebt man nun die Dispersionsbahnen relativ zueinander, so ergibt sich ein Spiralarmmuster (Abb. 7).

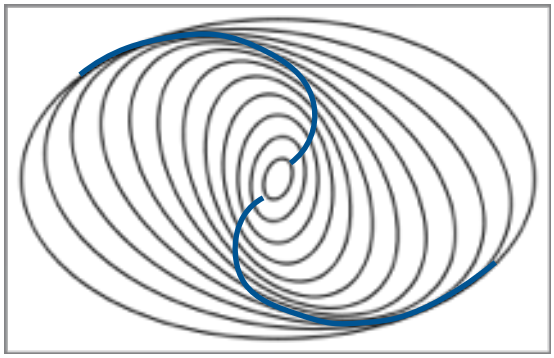


Abb. 7: Modell von relativ zueinander verschobenen Dispersionsbahnen mit eingezeichneten Spiralarmen (blau)

Hier lassen sich deutlich die Zonen erkennen, in denen die Dispersionsbahnen näher aneinanderliegen und wo folglich auch die Materiedichte höher ist. Daraus folgt, dass in diesen Bereichen, den Armen, auch die Gravitation größer ist, was die Arme zusätzlich stabilisiert. Die Dichtewellen bleiben durch die Verschiebung der einzelnen Dispersionsbahnen und die Gravitation der Körper in ihnen über einen langen Zeitraum stabil bestehen, obwohl die Materie nicht dauerhaft in ihnen verbleibt, sondern nur durch sie hindurchströmt.[28] Die Dichtewellen rotieren starr um das Zentrum, in Bewegungsrichtung der Materie, während sich diese mit differentieller Rotation durch die Galaxie und auch durch die Dichtewellen bewegt.[29]

Wegen der erhöhten Gravitation wird Materie in der Nähe von Dichtewellen zu ihnen hin beschleunigt, dann jedoch abgebremst, weil sie auf Schockfronten trifft, die durch Gasströmungen von Geschwindigkeiten oberhalb der Schallgeschwindigkeit zustande kommen. Gaswolken werden bei diesem Prozess also durch den Einfluss der erhöhten Gravitation zunächst komprimiert, wobei sie sich aufheizen, und kühlen anschließend schnell ab, wenn sie auf Schockfronten treffen und dabei stark abgebremst werden. Kühle, dichte Gaswolken werden somit zu HII-Regionen komprimiert, welche das Ausgangsmaterial für Sterne sind. Besonders die hellen, großen, heißen O- oder B-Sterne fallen bei der Betrachtung der Spiralarme auf, weil ihre Strahlung umliegendes Gas ionisiert und sie hauptsächlich in den Spiralarmen vorkommen. Das lässt sich dadurch erklären, dass heiße, blaue Sterne nur eine recht kurze Lebensdauer haben und die Fusionsprozesse in ihrem Inneren aufhören, bevor sie einen Spiralarm verlassen konnten. Sterne mit höherer Lebensdauer hingegen, also vor allem Sterne mit niedrigeren Temperaturen und eher rötlicher Färbung, enthalten genügend Brennstoff und existieren daher lange genug, um wieder aus der Dichtewelle auszutreten und weiter durch die Galaxie zu strömen. Diese Prozesse können erklären, weshalb die Spiralarme besonders hell leuchten und sich viele junge, heiße Sterne sowie Staub in ihnen befinden, vor allem an den Innenseiten (konkave Seiten der Spiralarme).

Warum die verschobenen Orbits überhaupt entstehen, ist immer noch nicht geklärt. Man vermutet den Ursprung jedoch in Gezeitenkräften durch die Interaktion mit einer anderen Galaxie oder durch gravitative Wirkungen eines Balkens im Zentrum einer Galaxie. Auch galaktische Magnetfelder könnten etwas damit zu tun haben.[30]

In Bezug auf die flocculent spirals und die (vielen) Nebenzweige in Spiralgalaxien vermutet man, dass Supernovae mittels von ihnen ausgelösten Schockwellen naheliegende Gaswolken zum Kollaps bringen und so Sterngeburten auslösen und zum vermehrten Auftreten von Sternen in bestimmten Regionen führen.

Balken

Viele Spiralgalaxien (etwa die Hälfte) enthalten einen Balken aus Sternen und Staub, der sich durch das Zentrum und über den Bulge hinausgehend erstreckt. An ihm setzen in diesen Galaxien die Spiralarme an. Beobachtungen im Infrarotbereich zeigen deutlich mehr Galaxien mit Balken als im optischen Bereich, was sich auf interstellare Extinktion zurückführen lässt: die großen Mengen an Staub im Balken verhindern die Ausbreitung des Lichtes. Auch hier vermutet man gravitative Wechselwirkungen mit anderen Galaxien als Ursache für die Ausbildung des Balkens.[31]

Die folgende Abb. 8 zeigt zusammengefasst, wie die einzelnen in den vorherigen Abschnitten angesprochenen Komponenten von (Balken-)Spiralgalaxien angeordnet sind. Die Abbildung

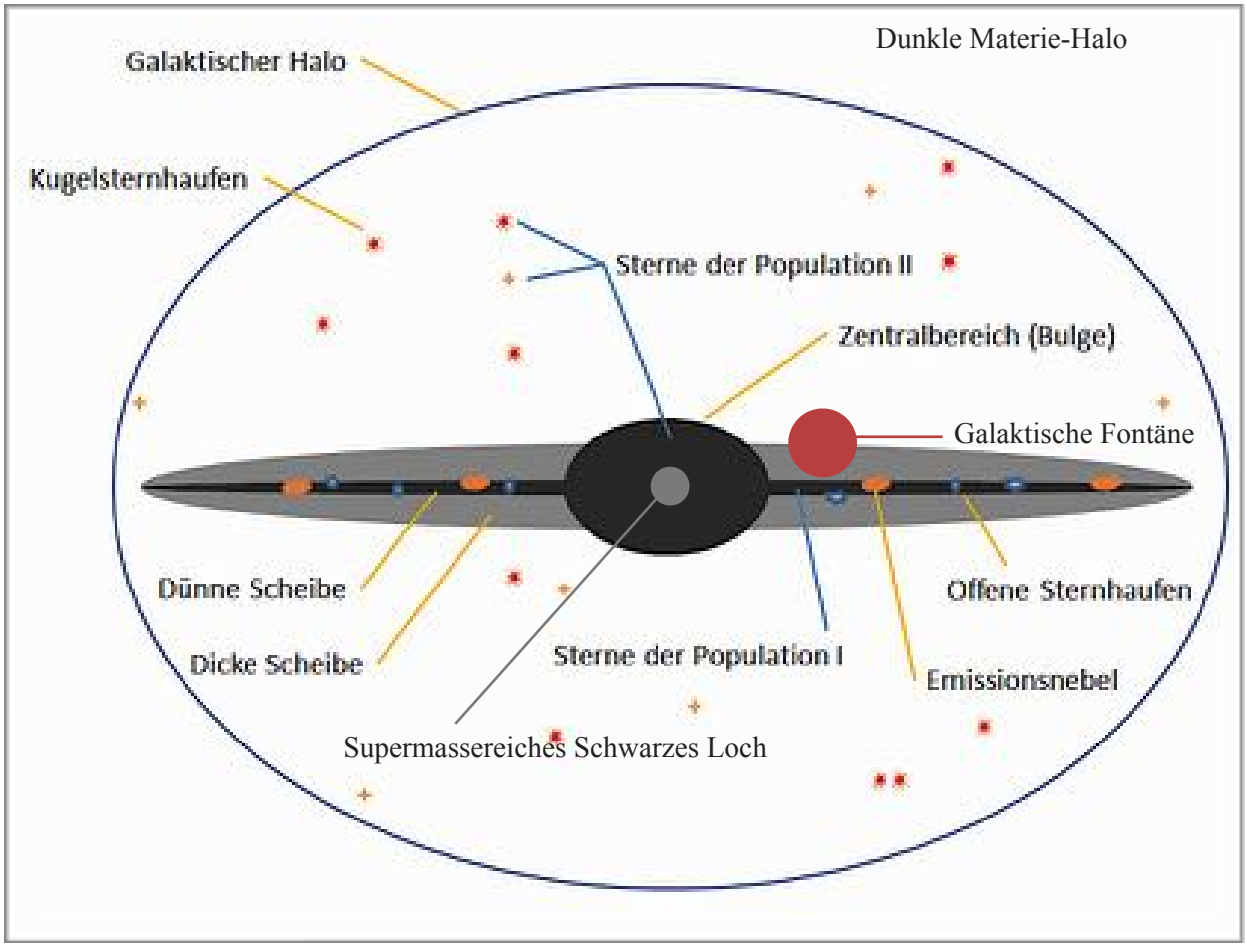


Abb. 8: Modell der Seitenansicht einer Spiralgalaxie, Edge-On Ansicht (mit eigenen Ergänzungen)

ist nicht maßstabsgetreu, da die beiden Halos zum Beispiel deutlich größer sind, sie gibt sonst aber einen recht guten Überblick über die Größenverhältnisse der einzelnen Bestandteile. Die Abb. 10 auf der nächsten Seite zeigt den möglichen Aufbau einer Spiralgalaxie aus der Frontansicht. Hier wird besonders die unterschiedliche Bewegung der Spiralarme und der Sterne ersichtlich und welche Auswirkungen die Dichtewellen auf die Sternentstehung haben.

Irreguläre Galaxien

Diese Typen von Galaxien (Abb. 9) enthalten sehr viel Gas und überwiegend Sterne der Population I. Hier ist die Sternentstehung deutlich aktiver als bei den anderen Galaxientypen, weil die Bewegung der Materie sehr ungeordnet ist und die Galaxien besonders viel Gas enthalten, das in Wolken zusammenstößt, kollabiert und neue Sterne bildet. Irreguläre Galaxien entstehen höchstwahrscheinlich durch (gravitative) Interaktionen von Galaxien, die so stark sind, dass sie massive Systemstörungen hervorrufen.

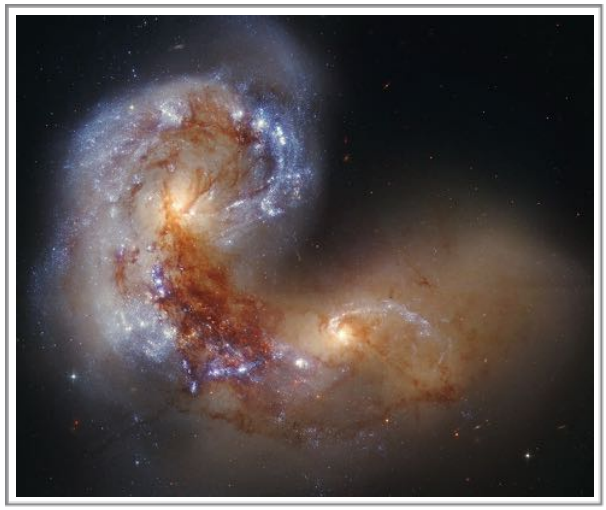


Abb. 9: Foto von NGC4038, Antennen-Galaxie, Irreguläre Galaxie (Merger)

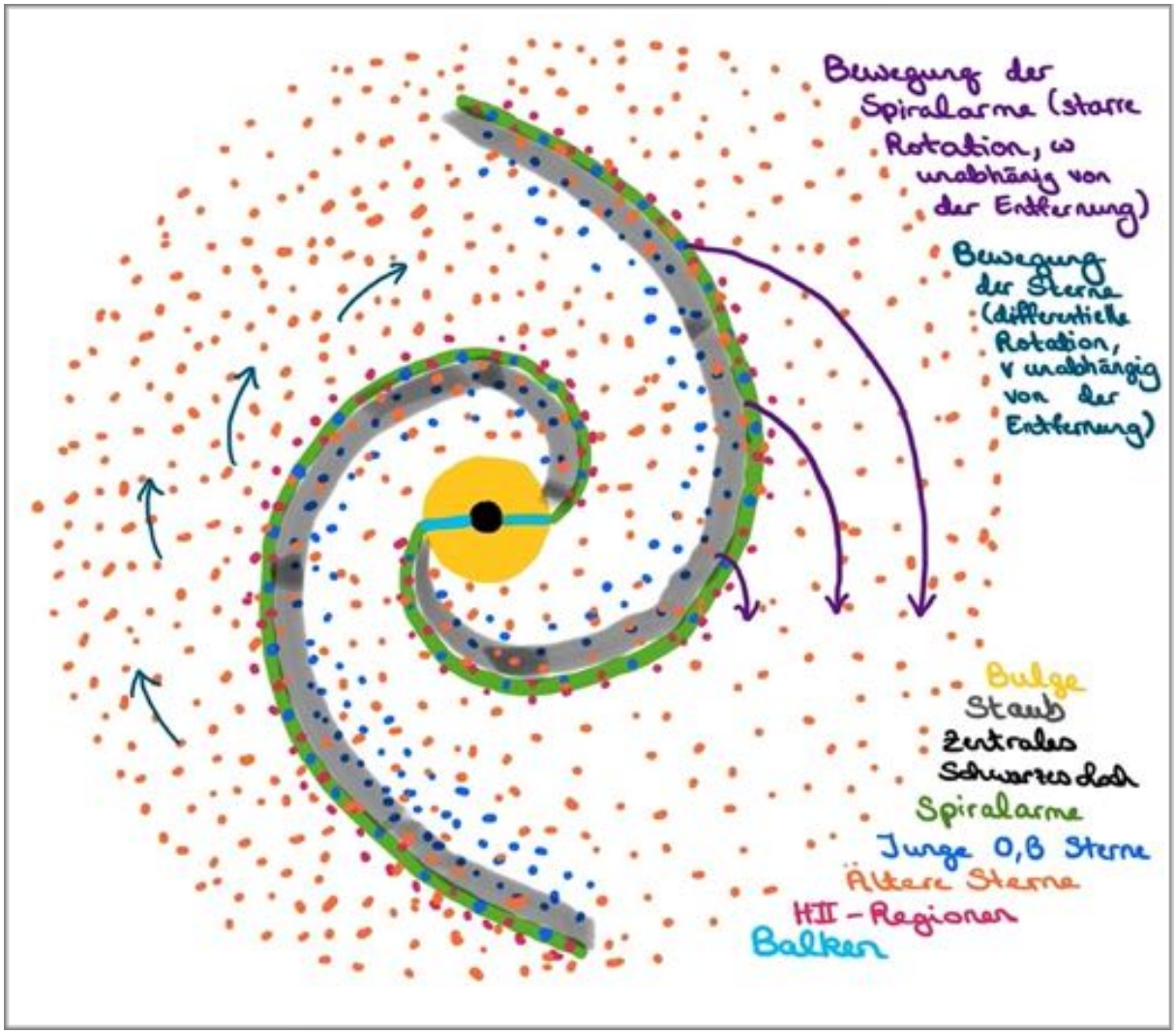


Abb. 10: Modell der Frontansicht einer Spiralgalaxie, Face-On Ansicht (eigene Darstellung)

Entwicklung

Beim Blick ins Universum fällt auf, dass Galaxien in Haufen angeordnet sind. Das lässt sich durch netzartige Filamente aus Dunkler Materie erklären, die in bestimmten Regionen stärker ausgebildet sind und in manchen weniger. In den Regionen besonders hoher Gravitation, also dort, wo sich viel Dunkle Materie befindet, hat sich im Verlauf der Zeit immer mehr baryonische Materie angesammelt, die schließlich zu Galaxienhaufen, Galaxien, Kugelsternhaufen, Sonnensystemen und Sternen zusammengeklumpt ist. Verschmolzen mehrere Dunkle Materie-Halos miteinander, so wurde unheimlich viel Gas in kurzer Zeit dorthin angezogen und es entstanden innerhalb eines kurzen Zeitraums viele Sterne, die zusammen riesige elliptische Galaxien bildeten. Es kam zu einem sogenannten Starburst. Weil das Gas jedoch so schnell aufgebraucht wurde, nahm die Sternentstehungsrate stetig ab und es blieben Ansammlungen aus alten Sternen zurück. Tatsächlich hat man solche riesigen elliptischen Galaxien gefunden, die schon eine bis eineinhalb Milliarden Jahre nach dem Urknall entstanden sind.[32]

Bei Untersuchungen zur Galaxiendichte hat man herausgefunden, dass elliptische Galaxien häufiger in Regionen höherer Galaxiendichte und Spiralgalaxien eher in weniger dichten Gebieten vorkommen. Dies lässt sich einerseits dadurch erklären, dass Spiralmuster sehr empfindlich gegenüber gravitativen Einflüssen sind und andererseits, dass elliptische Galaxien auch aus Mergern hervorgehen können. Merger sind Galaxiengebilde, die sich durch die Verschmelzung von Galaxien gebildet haben. Kollidieren zwei Galaxien miteinander, so bewegen sich die Sterne wegen der Gravitationswechselwirkung auf sehr ungeordneten Bahnen und es bilden sich irreguläre Galaxien. Wegen der stark gestörten Gravitationsfelder werden viele Gaswolken komprimiert und es entstehen viele neue Sterne (deshalb enthalten irreguläre Galaxien auch so viele blau leuchtende Regionen). Nach einer gewissen Zeit kann sich das System zu einer elliptischen Galaxie weiterentwickeln, wenn die Orbits der Sterne etwas geregelter werden. Wenn Galaxien kollidieren oder miteinander verschmelzen, so ist es fast unmöglich, dass Sterne aufeinander treffen, weil die Abstände zwischen den einzelnen Sternen so groß sind.[33]
Der Entstehungsprozess von Spiralgalaxien ist noch nicht vollständig geklärt, scheint aber Ähnlichkeiten zum Entstehungsprozess von Sonnensystemen aufzuweisen. Ich gehe noch einmal genauer auf diesen Prozess bei der Entwicklung unserer Milchstraße im nächsten Abschnitt ein. Galaxien können sogar auch „sterben“, wenn den Sternen der Brennstoff ausgeht, weil es nicht mehr genug Gas gibt. Prozesse, die so etwas beschleunigen könnten, sind zum Beispiel aktive galaktische Kerne (AGNs), die Materie in Form von Jets aus den Galaxien transportieren oder die Einflüsse von verschmelzenden oder aneinander vorbeiziehenden Galaxien, die einen schnellen Starburst auslösen und dann im Laufe der Zeit alte Sterne zurücklassen, ohne dass neue Sterne nachgebildet werden können.

4. Unsere Milchstraße

Eigenschaften

Unsere Milchstraße, auch Galaxis genannt, ist eine zweiarmige Balkenspiralgalaxie des Typs SAB(rs)bc und Heimat unseres Sonnensystems. Mit 53 weiteren Galaxien bildet sie die Lokale Gruppe, von der die Galaxis und M31 (Andromedagalaxie) die beiden größten Galaxien sind. Die Lokale Gruppe selbst wird von dem 65 Millionen Lichtjahre entfernten Virgo-Galaxienhaufen angezogen, welcher ein Teil des Virgo-Superhaufens ist. Dieser enthält bis zu 200 Galaxienhaufen.[34]
Die Milchstraße enthält über 100 Milliarden Sterne. Anhand der Verteilung der sichtbaren Masse schließt man auf eine Masse der Galaxis von $1{,}3 \cdot 10^{10}$ Sonnenmassen, allerdings muss sie deutlich größer sein, weil die Masse der Dunklen Materie noch hinzukommt.
Das Zentrum der Galaxis und das Schwerezentrum der Kugelsternhaufen im Halo liegt bei der punktförmigen Radioquelle Sagittarius A*, einem Supermassiven Schwarzen Loch von etwa 3,6 Millionen Sonnenmassen. Derzeit gibt die Akkretionsscheibe nicht so viel Strahlung ab, aber das Schwarze Loch ist trotzdem durch die Bewegung von umliegenden Sternen nachweisbar. Dafür beobachtet man die Umlaufbahnen von Sternen in der Nähe des Schwarzen Lochs, die im günstigsten Fall dabei durch das Perizentrum, also den nächsten Punkt am Massezentrum, laufen. Anhand mehrerer Bahnpunkte ist es dann möglich,

Keplerbahnen der beobachteten Objekte und die Masse im Zentrum zu berechnen, sodass man nach Objekten mit entsprechenden Eigenschaften zur Erklärung suchen kann, in diesem Fall einem Supermassiven Schwarzen Loch.[35] Abb. 11 zeigt ein Foto von Sagittarius A* und dem es umlaufenden Stern S2, dessen Bahndaten für die Berechnung der Masse des Schwarzen Lochs verwendet wurden.

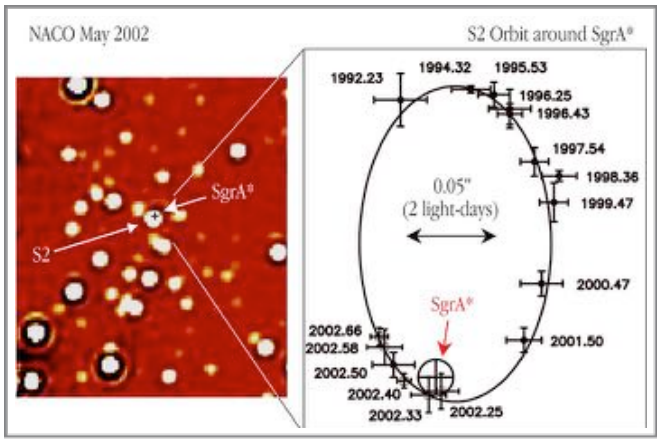


Abb. 11: Foto vom Schwarzen Loch im Zentrum der Milchstraße und von dem es umkreisenden Stern S2

Unsere Milchstraße hat zwei vom zentralen Balken ausgehende große Spiralarme mit den Bezeichnungen Scutum-Centaurus Arm und Perseus Arm. Man geht davon aus, dass sich diese zwei Spiralarme etwas weiter außen noch einmal aufteilen. Unsere Sonne befindet sich im Orionsporn, der zwischen den beiden großen Spiralarmen eingebettet ist.[36] Sie hat eine Entfernung von 8,1kpc vom Zentrum, eine Bahngeschwindigkeit von $v_{\odot} = 265\text{km/s}$ und umläuft das Zentrum somit einmal in 200 Millionen Jahren.[37]

Der Durchmesser der Scheibe beträgt 30kpc, der des Halos 100kpc. Im Halo liegt der von 150 derzeit bekannten Kugelsternhaufen hellste galaktische Kugelsternhaufen ω-Centauri mit 10 Millionen Sternen.[38]

Grundlegend für die Erforschung unserer Heimatgalaxie war die Entwicklung der Radioastronomie, weil sehr viel Licht von Staub durch interstellare Extinktion absorbiert wird und somit unser Blickfeld stark einschränkt. Schon auf „normalen“ Fotos vom Milchstraßenband fallen dunkle Regionen, sogenannte „Dunkelwolken“ auf, die unter anderem aus Staub bestehen. Mithilfe der Radioastronomie konnte man allerdings deutlich weiter entfernte Regionen innerhalb unserer Milchstraße beobachten und so zum Beispiel die Spiralarme durch die Verteilung des interstellaren Wasserstoffs oder das Zentrum erforschen. Unser heutiges Bild von unserer Milchstraße entstand auf Basis von Untersuchungen bei verschiedenen Wellenlängen (von Gamma-Strahlung bis zu Radiowellen) und einer Kombination der Ergebnisse unter Berücksichtigung der Rotation zu einem Strukturbild, wie es zum Beispiel Abb. 12 zeigt. Die verschiedenen Wellenlängen geben nämlich Aufschluss über bestimmte Objekte in unterschiedlichen Entfernungen, sodass man auch eine Tiefenansicht erhalten kann. Eine tolle Übersicht über den Anblick der Milchstraße in verschiedenen Wellenlängen und mit zusätzlichen Erklärungen ist hier[39] zu finden.

Entwicklung

Anhand der Beobachtung von den Kugelsternhaufen unserer Galaxis kann man auf bestimmte Vorgänge in ihrer Entstehung schließen. Man vermutet, dass eine kugelförmige und rotierende Gaswolke vor 10^{10} Jahren aufgrund von gravitativen Einflüssen kontraktiert ist und dichte Wolkenmassen zu verhältnismäßig kleinen Kugelsternhaufen gebildet hat. Wegen der Drehimpulserhaltung und der Zentripetalkraft hat sich das Gebilde im Verlauf von 10^8 Jahren

zu einer Scheibe abgeflacht. Die differentielle Rotation der Materie sorgte schließlich für zum Zentrum gerichtete Kräfte und eine Materiezufuhr in ebendiese Richtung. So konnte sich der Bulge bilden. Die Zufuhr kühlen Gases zur Scheibe ermöglichte die Bildung von Sternen, besonders in den Bereichen höherer Dichte. Die Entstehung der Spiralarme ist, wie schon bei den Dichtewellen angesprochen, noch nicht geklärt, allerdings könnte hier der zentrale Balken involviert gewesen sein. Die Sternentstehungsrate war/ist in den Spiralarmen besonders hoch, weil hier die Dichte höher ist und besonders viel Gas stärker komprimiert wird, sodass neue Sterne entstehen können. Einige Kugelsternhaufen blieben auch außerhalb der galaktischen Scheibe und bildeten den stellaren Halo.[40]

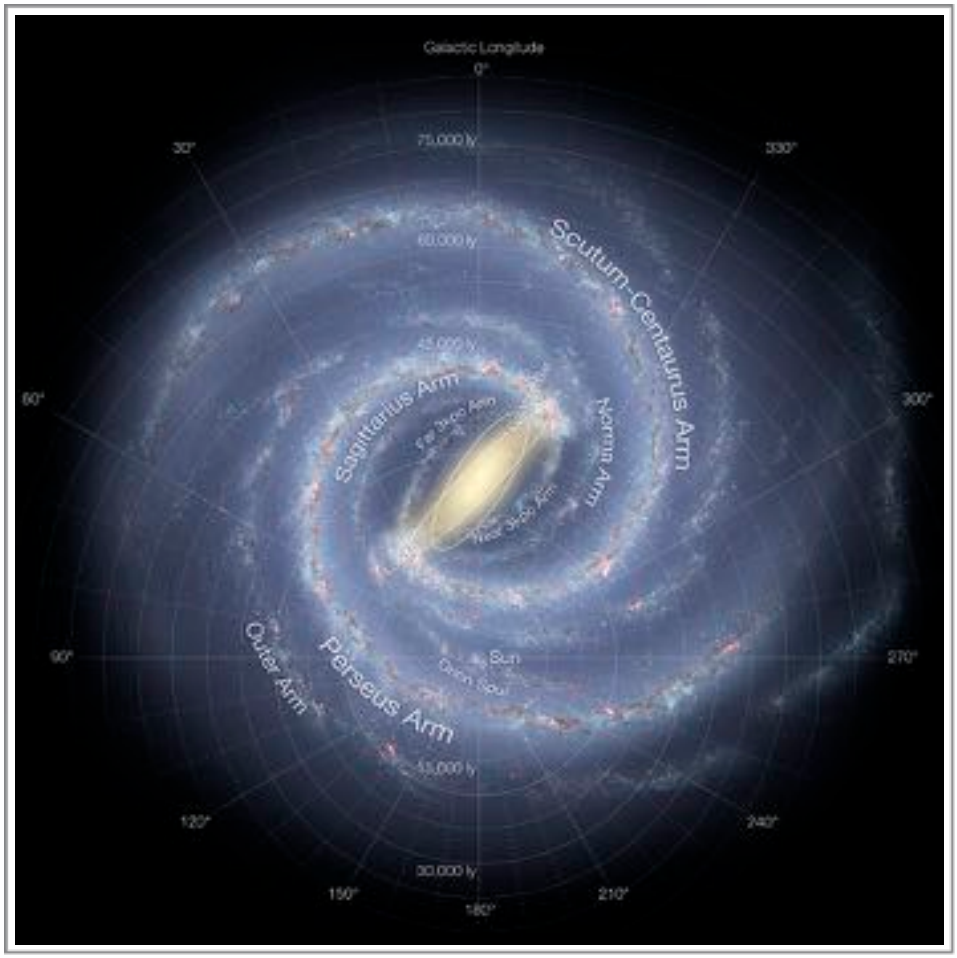


Abb. 12: Grafik des möglichen Aussehens unserer Milchstraße

Bei der spektroskopischen Beobachtung des Lichtes der Andromedagalaxie fiel auf, dass sie sich auf die Milchstraße zubewegt. Man schätzt, dass die Milchstraße und die Andromedagalaxie in vier Milliarden Jahren kollidieren werden, wobei aber keine Sterne aufeinanderstoßen werden.[41] Es zeigte sich außerdem, dass die Milchstraße schon mehrere kleine Zwerggalaxien „verschluckt“ hat.[42] Man vermutet, dass Zwerggalaxien von ihren großen Galaxien aufgenommen werden können und dabei ihre äußeren Hüllen aus Sternen verlieren. So könnten dann kompakte Kugelsternhaufen übrig bleiben, die man immer noch beobachten kann.[43]

5. Eigene Forschung

Forschungsziel

Das Ziel der Beobachtung war es, den Aufbau zweier Spiralgalaxien näher unter die Lupe zu nehmen. Ich habe mich dabei für die Galaxien M51 und M61 entschieden, weil sie nicht nur grandios aussehen und vorteilhaft zur Beobachtung positioniert sind, sondern auch, weil man besondere Phänomene beobachten konnte. M51 habe ich im Hinblick auf die Spiralstruktur und die Interaktion mit einer irregulären Zwerggalaxie aufgenommen, während in M61 zum Zeitpunkt der Beobachtung eine Supernova zu sehen war und diese Galaxie eine außergewöhnliche Form von Spiralarmen aufweist.

Verwendete Geräte

Für die Observationen wurde beide Male das Schmidt-Cassegrain-Teleskop C14 Edge HD von Celestron eingesetzt. Die Abb. 13 und 14 zeigen einmal den Strahlengang als schematische Darstellung und einmal das montierte Teleskop. Das Außergewöhnliche an

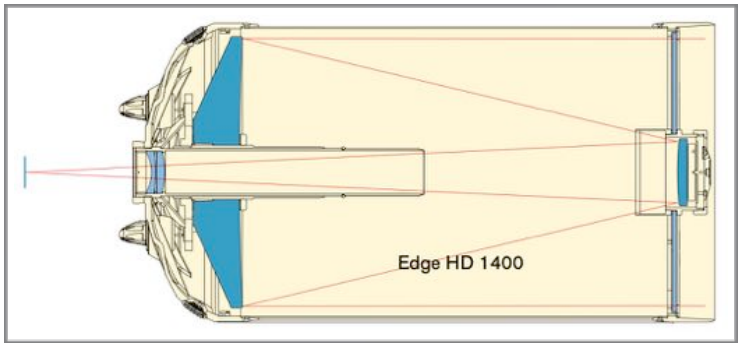


Abb. 13: Schematische Darstellung des Strahlengangs im Teleskop (hier: von rechts nach links)

Abb. 14: Foto des C14 EdgeHD Teleskops mit Montierung

diesem Teleskop ist, dass der Strahlengang so konzipiert wurde, dass selbst an den Rändern noch viel Licht ankommt und die Sterne in den äußeren Bereichen punktförmig dargestellt werden. Dieses spezielle Teleskop ermöglicht Aufnahmen von weiten Gesichtsfeldern ohne Qualitätsverlust an den Rändern, weil es ein flaches Bild erzeugt. Ventilatoren hinter dem ersten Spiegel sorgen zudem dafür, dass die Bildqualität noch besser wird, indem warme Luft abgeführt wird. Das Teleskop hat eine maximale Brennweite von 3,81m und eine Blendenöffnung von 0,36m. Das maximale Öffnungsverhältnis ist somit $f/10{,}8$. Verglichen mit dem menschlichen Auge kann es 2579 mal so viel Licht einfangen.[44]

Als Kameras wurden die STF-8300M (Abb. 15) für M51 und die STL-11000M (Abb. 16) für M61 von SBIG verwendet. Bei den Kameras handelt es sich um CCD-Kameras mit 16bit Auflösung, die speziell für die Astronomie gebaut wurden. Die STF-8300M verfügt über 3326x2504 Pixel. Das Leserauschen liegt bei 9,3e^- und das Dunkelstromrauschen bei 0,37e^- pro Pixel und Sekunde bei einer Temperatur von 0°C.[45] Die STL-11000M hat 4008x2672

Pixel. Das Leserauschen beträgt hier 13e⁻ und das Dunkelstromrauschen 0,5e⁻ pro Pixel und Sekunde bei 0°C.[46] Die Funktionsweise der Kameras basiert auf dem von Albert Einstein 1905 entdeckten Photoelektrischen Effekt, für den er den Nobelpreis in Physik erhielt. Die Photozellen der Kameras bestehen aus Halbleitern. Wenn die Photonen auf den Halbleiter treffen, übertragen sie ihre Energie und lösen die 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 weiterfließen und einen Stromkreis schließen, dessen Strom dann gemessen wird. Da jedes Photon eine bestimmte Energie hat, kann man anschließend Rückschlüsse auf das „eingefangene" Licht ziehen. Abb. 17 zeigt modellhaft den Aufbau einer Photozelle und wie die verschiedenen Wellenlängen auf die Elektronen treffen. Jede Photozelle hat aber nur eine bestimmte Kapazität für freie Elektronen, was Full Well Capacity genannt wird. Werden also zu viele Elektronen 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, wird Quantum Efficiency (QE) genannt. Bis jetzt gibt es noch keine Technik, die eine QE von 100% hat, weil Photonen des roten Wellenlängenbereichs so niedrig frequent sind, dass sie vielleicht keine Elektronen treffen. Die für die Beobachtungen eingesetzten Kameras haben eine sehr hohe Quanteneffektivität, wodurch die beobachteten Objekte also sehr akkurat wiedergegeben werden. Die Photozellen können $2^{16} = 65536$ ADU (Analog-Digital-Unit) Helligkeitsstufen unterscheiden und an den Computer weitergeben. Eine ADU-Intensität von 65536 kommt bei einem Heißen Pixel vor, in diesem Pixel herrscht also ein konstanter Elektronenfluss. Bei einem Pixel von einer ADU-Intensität von 0 handelt es sich um einen Kalten Pixel, also einem, in dem kein Elektronenfluss stattfindet. Die Aufnahmen wurden außerdem im 2x2 Binning gemacht, was heißt, dass vier Pixel zu einem „Superpixel" kombiniert wurden und

Abb. 15: Foto der STF-8300M Kamera von SBIG

Abb. 16: Foto der STL-11000M Kamera von SBIG, am Teleskop angeschlossen

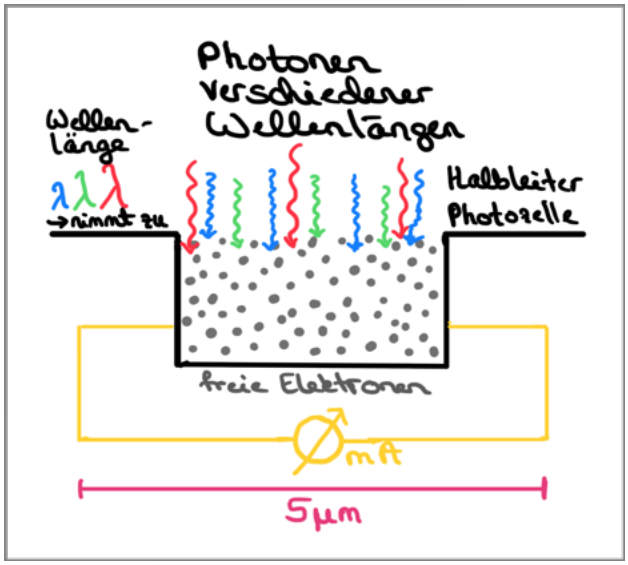


Abb. 17: Schematische Darstellung der Funktionsweise von CCD-Kameras

daher vier Mal so viel Licht aufnehmen können, allerdings nimmt dadurch die Auflösung auf die Hälfte ab.[47]

Das schon bei den Kamerawerten erwähnte Rauschen entsteht durch den Elektronenfluss aufgrund von Wärme (thermische Energie wird in kinetische Energie umgewandelt und sorgt so für eine Elektronenbewegung). Dieser Effekt lässt sich allerdings beeinflussen, indem die Kamera stark abgekühlt (meist auf -20/-30°C) und die Belichtungszeit reduziert wird, weil so nur weniger Elektronen fließen können. Um später ein korrektes Bild zu erhalten (Lightframe), werden auch Darkframes aufgenommen. Hierfür wird die Teleskopöffnung geschlossen und ein Dunkelbild aufgenommen, damit das Rauschen dargestellt werden kann. Die Darkframes werden später von den Lightframes abgezogen, damit das Rauschen aus dem Bild herausgerechnet wird. Das hat zur Folge, dass die Belichtungszeit nicht allzu stark reduziert werden kann, weil sie für die Lights und Darks gleich groß sein muss. Das Rauschen kann dennoch minimiert werden, indem viele Darks aufgenommen und schließlich gemittelt werden, da man so näher an das tatsächliche Rauschen herankommt, was ein Effekt der Statistik ist. Das Rauschen sinkt mit der Wurzel der Anzahl der Aufnahmen.

Das Ausleserauschen, auch Bias genannt, entsteht durch die Datenübertragung von der Kamera auf den Computer und hat einen spezifischen, konstanten Wert.

Damit ein Objekt erkennbar wird, sollte der Signal-Noise-Ratio $SNR = \frac{S}{N}$ über 2-3 liegen.

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, z.B. Staubkörner, zu erfassen, wird gegen eine helle Fläche (z.B. LED-Schirm) belichtet. Nach den Aufnahmen wird das

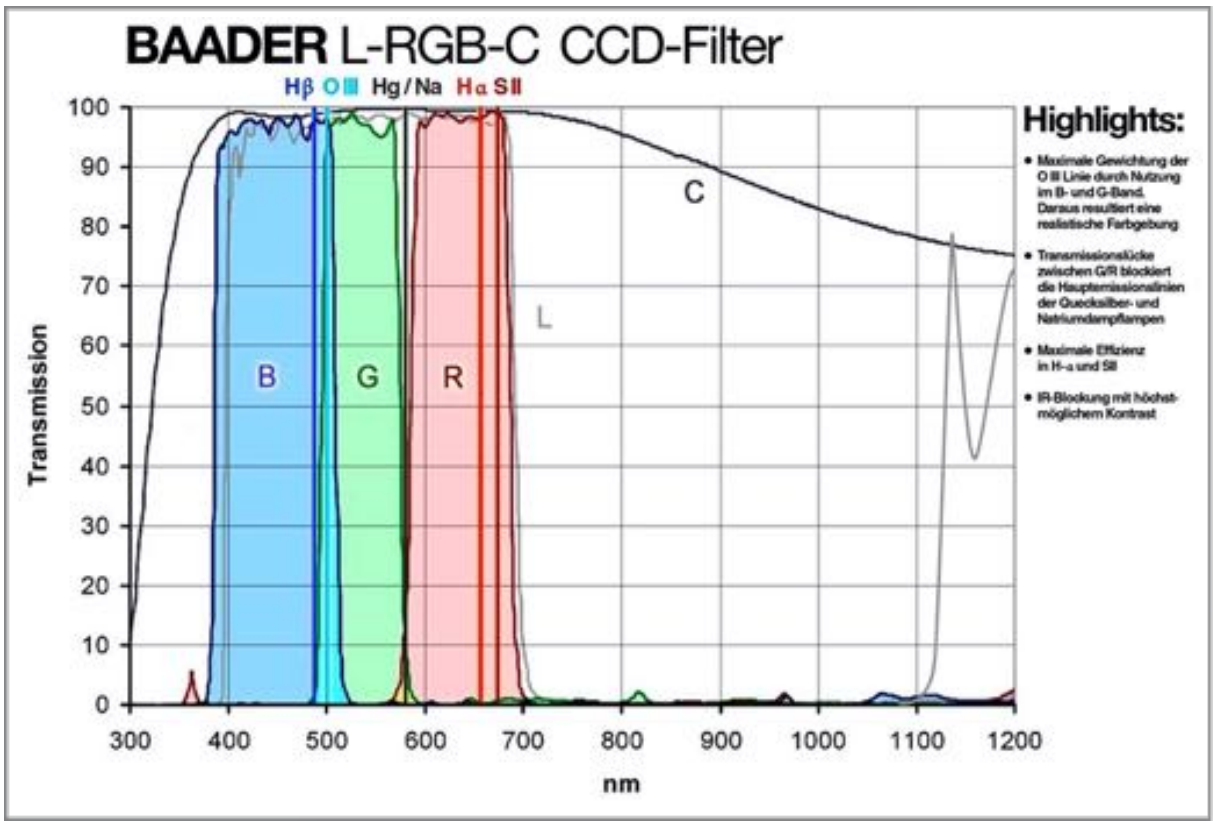


Abb. 18: Kurvendiagramm der Durchlässigkeit von Licht bestimmter Wellenlängen von den RGB-Filtern

Originalbild bzw. dessen Pixelhelligkeiten durch das Flat dividiert. Da die Vignettierung und die Staubkörner sowohl im Light als auch im Flat vorkommen, ergibt sich hierbei ein Pixelwert von eins. Objekte, die aber nur auf der Light-Aufnahme vorkommen, werden somit nicht verschwinden. 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 $\text{Kalibriertes Bild(Flatfield)} = \frac{\text{Lightframe} - \text{Darkframe(Bias)}}{\text{Flat} - \text{Flatdark(Bias)}}$ angewandt, damit man ein gutes Bild erhält, das weiter verarbeitet werden kann.

Zusätzlich haben wir den Baader Planetarium RGB-Filtersatz verwendet, denn weil die Kameras beide Monochrom-Kameras sind und folglich keine Farbe aufnehmen können, dies aber gewünscht war, braucht man spezielle Filter, um die Aufnahmen am Ende zu einem Farbbild zusammensetzen zu können. Es wurden drei Farbfilter (Rot, Grün, Blau) separat mittels einer Drehscheibe vor die Helligkeitssensoren gehalten, sodass ganz genau die Intensitäten der einzelnen Farbkanäle gemessen werden konnten. Die Abb. 18 zeigt die Durchlässigkeit der Filter hinsichtlich bestimmter Wellenlängen. Die Helligkeitskurven sind in den gefragten Wellenlängen sehr lichtdurchlässig (über 95 von 100), was wichtig für die Aufnahme von astronomischen Objekten ist.

Experimenteller Aufbau

Die Beobachtungen der beiden Objekte wurden im Frühjahr 2020 und 2021 an der Privatsternwarte von Herrn Koch per remote control durchgeführt. Die Sternwarte befindet sich in Sörth/Westerwald (Rheinland-Pfalz).

Die Kameras befanden sich am Ende des Strahlengangs vom Teleskop und waren über Kabel mit einem Computer verbunden. Neben dem großen Teleskop war noch ein kleines angebracht, welches ebenfalls mit einer Kamera verbunden war und zur Nachführung genutzt wurde.

Den Blick von einer Überwachungskamera auf das Teleskop, so wie es während der Beobachtung von M51 genutzt wurde, zeigt Abb. 19.

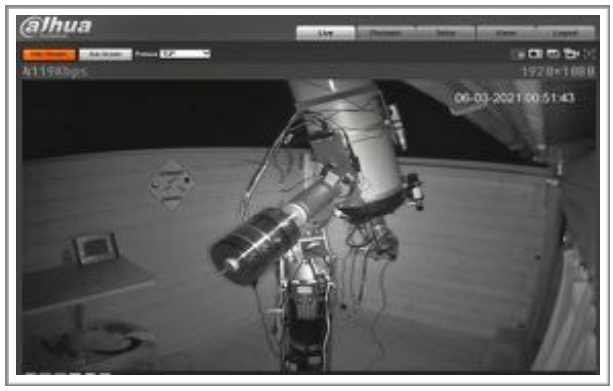


Abb. 19: Foto des Teleskops während der Beobachtung von der Überwachungskamera der Sternwarte

Dadurch, dass die Schulen zu beiden Zeiträumen geschlossen waren und ich die Beobachtung daher per remote control durchführen durfte, hatte Herr Koch den Aufbau und die Vorbereitung des Teleskops, der Kameras und des restlichen Equipments alleine vor Ort vorgenommen.

Was bei dieser Art von Observation neu hinzukam, war das Treffen in einer Videokonferenz (Jitsi oder Zoom) und die gemeinsame Steuermöglichkeit über AnyDesk, bei der man aus der Ferne auf andere Bildschirme zugreifen kann. So war es mir möglich, die für die Steuerung des Teleskops notwendigen Programme auf den Computern zu bedienen.

Durchführung der Beobachtung

Bei den Beobachtungen mussten einige Dinge beachtet werden: die Verzerrung der Lichtwege durch Luftströmungen in der Atmosphäre und die daraus resultierende sprunghafte Bewegung von Objekten bei einer Aufnahme (Astronomisches Seeing) erfordert die Aufnahme vieler Bilder, 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, die auftritt, weil die Lichtwellen an der Atmosphäre unterschiedlich stark gebrochen werden und das Licht so in sein Spektrum aufgeteilt wird (ein Beispiel hierfür ist die Sonne: tagsüber, wenn sie hoch am Himmel steht, erscheint sie hellweiß/-gelb und der Himmel hat eine blaue Farbe; bei Sonnenauf/-untergängen jedoch hat sie eine rötlich-orangene Farbe und der Himmel erscheint ebenfalls in warmen Farben). Deshalb beobachtet man lieber in größerer Höhe über dem Horizont, da die atmosphärische Dispersion dort nicht so stark auftritt. Bei beiden Beobachtungen hatten wir allerdings Glück, dass das Seeing nicht so stark war.

Nach einer kurzen Einführung von Herrn Koch in die Bedienung der Software konnte ich mit den Aufnahmen beginnen. Zunächst musste das Teleskop an einem Stern scharf eingestellt (Abb. 20) und mittels Stellarium auf das gewünschte Objekt ausgerichtet werden. Dann wurde ein Stern in der Nähe gesucht, sodass das zweite Teleskop darauf ausgerichtet war und für die Nachführung verwendet werden konnte. Schließlich musste noch eine Serie für die Aufnahmen eingerichtet werden (Filter, Dauer der Aufnahmen, Anzahl der Aufnahmen), damit die Aufnahmen automatisch gemacht wurden. Danach hieß es, immer wieder die Schärfe der Bilder, die korrekte Nachführung und die Bilder selbst zu kontrollieren (zum Beispiel darauf, ob irgendwo ein anderes Objekt durch das Bild geflogen ist). Abb. 21 zeigt eine Aufnahme des Bildschirms während der Beobachtung. Abschließend haben wir noch Darkframes und Flats aufgenommen.

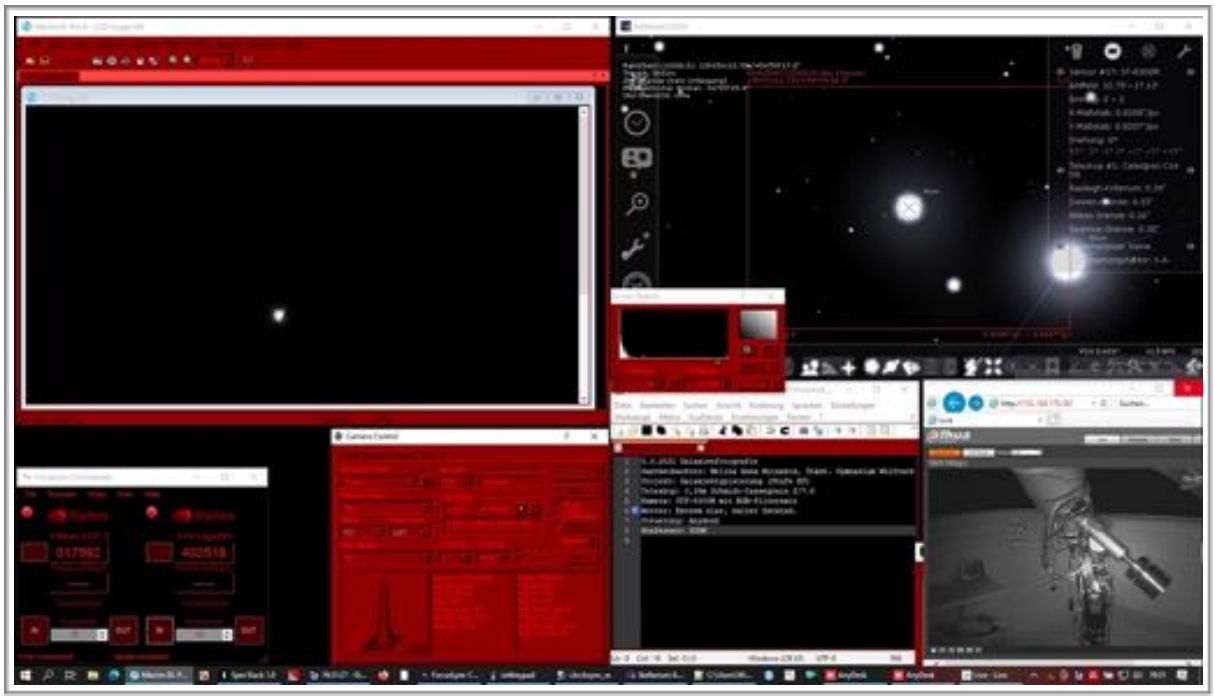


Abb. 20: Bildschirmfoto der Scharfstellung des Teleskops am Stern Alcor

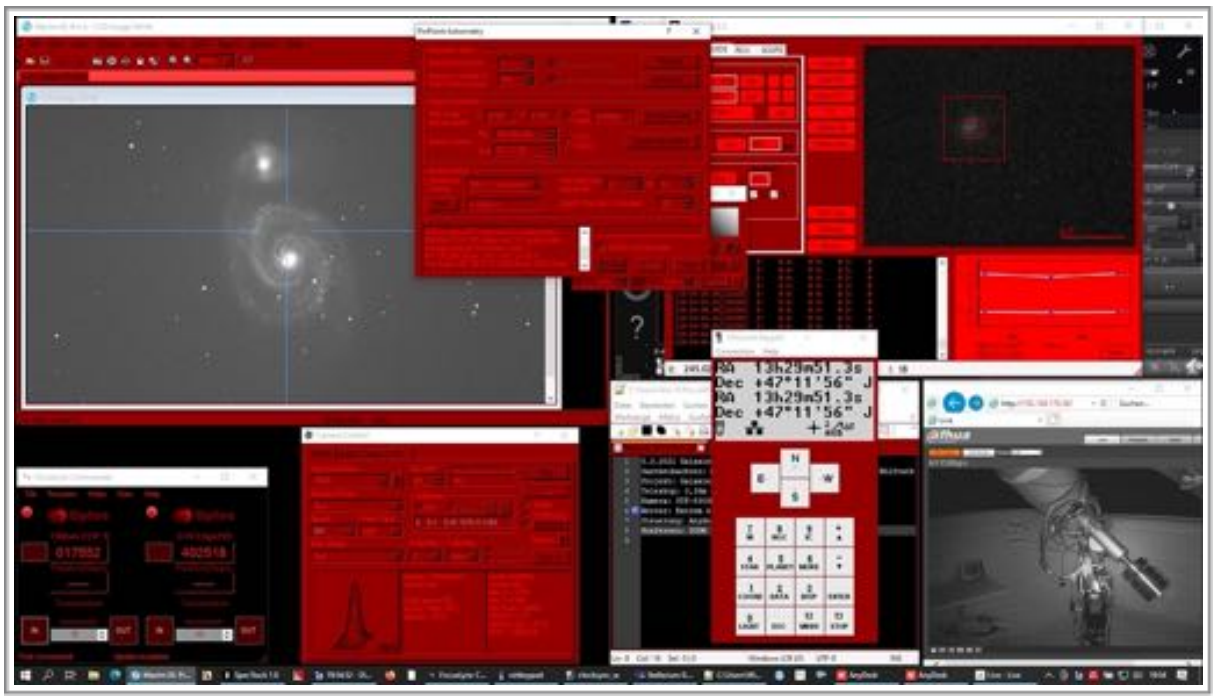


Abb. 21: Bildschirmfoto während der Beobachtung; oben links sieht man das aufgenommene Bild, unten links befinden sich die Einstellungen für die Schärfe der beiden Teleskope, oben rechts ist das Bild der Nachführkamera zu sehen, unten rechts ist ein Live-Bild des Teleskops, unten in der Mitte sieht man die Steuerung für die Ausrichtung des Teleskops und dahinter die Protokolldatei; links davon befindet sich die Einstellung für die Aufnahmen (Belichtungszeit, Filter, Anzahl der Aufnahmen)

Die Aufnahmen der Galaxie M51 wurden von 19:16-23:59UTC am 05.03.2021 gemacht. Insgesamt wurden 14 Bilder im Rotkanal, 18 Bilder im Grünkanal, 12 Bilder im Blaukanal und 17 Darks für je 300s aufgenommen. Dazu kamen 10 Flats im Rotkanal (je 3s), Blaukanal (je 5s) sowie 11 Flats im Grünkanal (je 2s).
Die Aufnahmen von M61 begannen um 21:22UTC am 09.05.2020 und gingen bis 22:25UTC. Pro Farbkanal wurden 10 Bilder von je 120s Belichtungszeit aufgenommen. Hinzu kamen 10 Darkframes von je 120s und 10 Flats je 4s pro Farbkanal.

Auswertungsprozess

Die Rohbilder (RAWs) wurden automatisch in vorher angelegten Ordnern hinterlegt und anschließend mit der Software MaxIm DL Pro 5 weiterverarbeitet. Hierfür wurden zunächst die Darkframes zu einem MasterDark und die Flats der einzelnen Farbkanäle zu einem MasterFlat für jeden Farbkanal kombiniert (Abb. 22). Dann wurden die Lightframes gestackt, also übereinandergelegt und mithilfe des MasterDarks und der MasterFlats kalibriert, wie es Abb. 23 zeigt. Anschließend wurden die gestackten und kalibrierten Bilder der drei Farbkanäle zu einem Farbbild und zu einem Luminanzbild kombiniert, welches nachgeschärft wurde. Danach wurden Luminanz- und Farbbild kombiniert (Abb. 24) und die Farbgewichtung noch angepasst.
Der letzte Schritt war die Bearbeitung des Bildes in Photoshop hinsichtlich Helligkeitsanpassung, Retuschierung heißer Pixel mithilfe der Stempelfunktion und Beschriftung mit den relevanten Beobachtungsdaten.

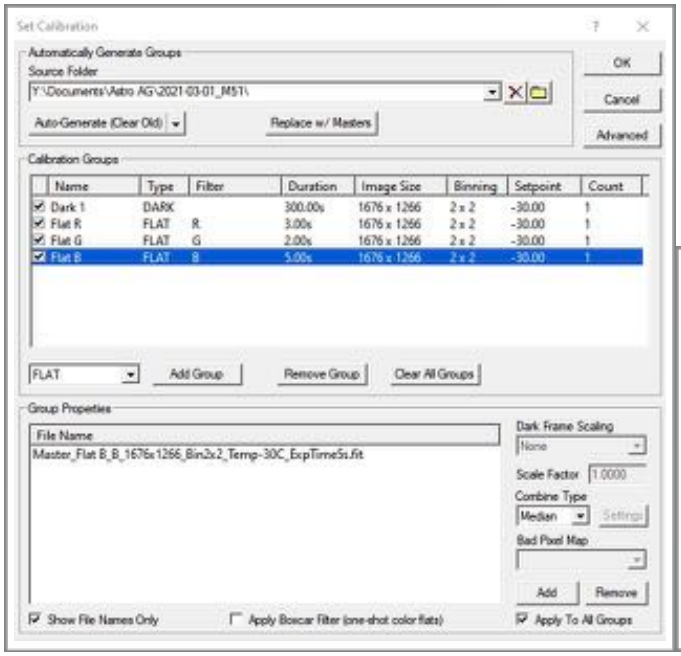


Abb. 22: Bildschirmfoto von der Erstellung von MasterDark und MasterFlats

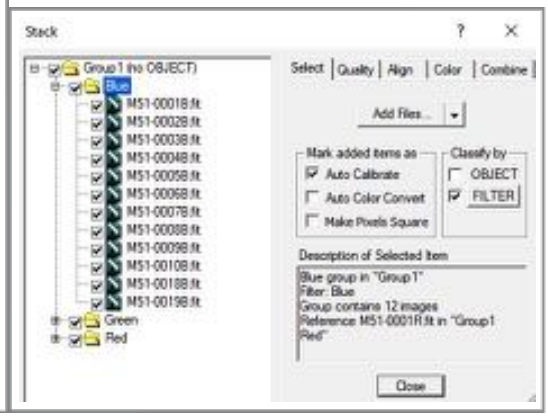


Abb. 23: Bildschirmfoto des Stackens und der Kalibrierung der Lightframes

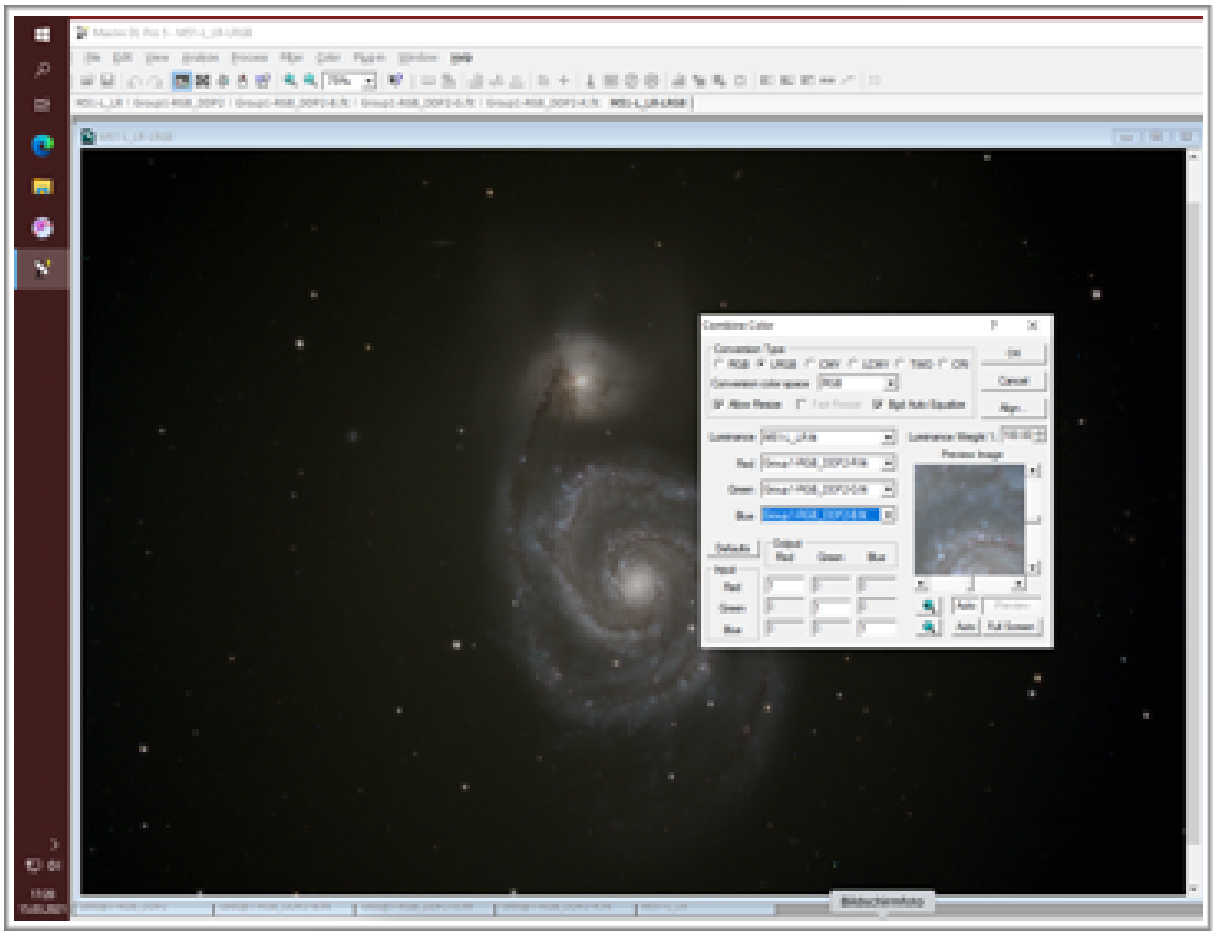


Abb. 24: Bildschirmfoto von der Kombination von Luminanz- und Farbbild in MaxIm DL Pro 5

Ergebnisdiskussion

Abb. 25 zeigt das Galaxienpaar NGC5194 und NGC5195, die zusammen M51 bilden. Das Paar ist auch unter dem Namen „Whirlpool-Galaxie“ bekannt, liegt im Sternbild Canes Venatici (Jagdhunde) bei 13h29,9min Rektaszension und +47°12’ Deklination und ist somit zirkumpolar. M51 liegt 28 bis 31 Millionen Lichtjahre von uns entfernt. Die größere der beiden Galaxien (NGC5194) ist vom Typ SA(s)bc und hat eine visuelle Helligkeit von 8,1mag. Sie wurde am 13.10.1773 von Charles Messier entdeckt und am 11.01.1774 seinem Katalog hinzugefügt. NGC5194 hat eine Ausdehnung von 89 000Lj, während die von der irregulären Galaxie NGC5195 (am 21.03.1781 von Pierre Méchain entdeckt) 49 000Lj beträgt. Der aktive Kern von NGC5194 ist mit einer Ausdehnung von 120Lj relativ klein und beherbergt ein Schwarzes Loch mit einer Akkretionsscheibe von 5Lj Ausdehnung.[48]

Abb. 25: Foto von M51, dem Galaxienpaar NGC5194 (Spiralgalaxie) und NGC5195 (irreguläre Galaxie); aufgenommen am 05.03.2021 19:16-23:59UTC von Melina Anna Mitsakos (per remote control) und Bernd Koch

Das, was im Foto (Abb. 25) als diffuser Nebel erscheint, sind in Wirklichkeit unheimlich viele Sterne, welche in den Galaxien liegen oder sie umgeben. Auch in diesem Bild werden die HII-Regionen (magentafarben), die O, B-Sterne (blau) und die älteren Sterne (gelblich-orange) gut sichtbar. Ebenso sind Dunkelwolken hinter den Spiralarmen (konvexe Seite) und die Brücke zwischen den beiden Galaxien gut zu erkennen. Die Interaktion der beiden Galaxien miteinander hat zu einem Starburst geführt, weshalb die große Galaxie besonders bläulich erscheint. Dieser Umstand ist auch ein Grund dafür, dass man in der Whirlpool-

Galaxie immer wieder Supernovae beobachten kann. Die letzte wurde 2011 gesichtet und trug den Namen SN2011dh[49]. Auf dem Foto erscheint es so, als würde die irreguläre Galaxie den einen Spiralarm mitziehen, allerdings zieht sie nur dahinter vorbei. Dennoch reichen die Gezeitenkräfte der Galaxie aus, um einen Starburst hervorzurufen und irgendwann werden die beiden Galaxien miteinander verschmelzen.[50] In den Fotos von Abb. 26 lässt sich eine Bekräftigung der Dichtewellentheorie finden. Das oberste Foto zeigt M51 im roten Farbkanal (570-700nm), das mittlere im grünen Farbkanal (490-600nm) und das untere im blauen Farbkanal (370-520nm). Selbst mit dem bloßen Auge lässt sich deutlich erkennen, dass M51 im oberen Bild diffuser als im unteren Bild aussieht. Von oben nach unten nimmt die Deutlichkeit der Spiralstruktur zu.

Daraus lässt sich schließen, dass die blauen Sterne hauptsächlich in den Spiralarmen vorkommen, während die gelblich-rötlichen Sterne in der ganzen Galaxie verteilt sind. Das ist eine zentrale Aussage der Dichtewellentheorie, denn die O, B-Sterne sind größtenteils zu kurzlebig, um den Spiralarm zu verlassen, in dem sie geboren wurden, während die gelblich-rötlichen Sterne deutlich länger leben und daher weite Strecken zurücklegen können. Sie bewegen sich mit differentieller Rotation durch die Galaxie und durch die Spiralarme.

Abb. 26: Fotos von M51 in den drei verschiedenen Farbkanälen rot, grün und blau (von oben nach unten)

Abb. 27: Foto von der Galaxie M61; aufgenommen am 09.05.2020 21:22-22:25UTC von Melina Anna Mitsakos (per remote control) und Bernd Koch

Abb. 28: Foto von der Galaxie M61, vergrößerte Darstellung

Die nächsten Fotos (Abb. 27 und 28) zeigen die etwa 55 Millionen Lichtjahre entfernte Galaxie M61 (NGC 4303). Die Galaxie vom Typ SAB(rs)bc liegt mit einer Rektaszension von 12h21,9min und einer Deklination von +04°28' im Sternbild Virgo (Jungfrau) und hat eine visuelle Helligkeit von 9,3mag. M61 hat eine Ausdehnung von 100 000Lj, eine Masse von 70 Milliarden Sonnenmassen und enthält über 300 Milliarden Sterne. Die Galaxie wurde als erstes am 05.05.1779 von Barnaba Oriani beobachtet und am 11.05.1779 von Charles Messier in den Messier-Katalog eingetragen.[51]

Am 06.05.2020 wurde wieder von einer sehr hellen Supernova berichtet, ein Ereignis, das in M61 recht häufig vorkommt, weil es sich auch hier um eine Starburst-Galaxie mit vielen kurzlebigen Sternen handelt. Wir bestimmten die Helligkeit der intensiv blau erscheinenden und folglich sehr heißen Supernova SN2020jfo auf 14,61mag (im grünen Farbkanal). Einen sehr ähnlichen

Wert haben auch andere Astronomen gemessen, was positiv ist. Unser Referenzstern war #141 mit V=14,056 mag. Bei dieser Supernova handelte es sich um eine des TypsIIP, den man anhand der Spektrallinien bestimmen kann.[52] Eine Supernova vom TypII bedeutet, dass in einem Stern von sehr großer Masse (z.B. in einem Roten Riesen) die Kernfusion irgendwann aufhört, wenn der Kern des Sterns nur noch aus Eisen besteht und daher keine weiteren Elemente mehr fusionieren kann. Dadurch fällt der durch die Kernfusion entstandene und nach außen gerichtete Strahlungsdruck weg und der Stern zieht sich aufgrund seiner eigenen Gravitation zusammen. Gerade der Kern wird dadurch noch dichter und wenn weiter Material auf die Mitte des Kerns einstürzt, prallt dieses einfach daran ab. Es wird in das Weltall zurückgeschleudert und löst dabei noch eine Druckwelle aus, welche das Material in den äußeren Schichten ebenfalls weiter nach außen drückt. Bei einer Supernova wird unglaublich viel Energie freigesetzt, die man in Form von Licht beobachten kann. Eine Supernova kann zwischenzeitlich so hell wie eine ganze Galaxie scheinen, allerdings ist sie schon nach ein paar Wochen nicht mehr im sichtbaren Bereich des Lichtes zu sehen.[53] Zurück bleiben so exotische Objekte wie Neutronensterne oder stellare Schwarze Löcher.
Auch diese Galaxie zeigt besonders ausgeprägte Spiralarme mit vielen jungen O, B-Sternen und einigen HII-Regionen. Die Supernova SN2020jfo ereignete sich knapp hinter, fast in einem Spiralarm und ist ein weiterer Hinweis auf die Richtigkeit der Dichtewellentheorie, weil die O, B-Sterne ihren Spiralarm meist nicht verlassen und noch in ihm zum Beispiel als Supernovae enden.

6. Fazit

Im Rahmen dieser Arbeit wurden verschiedene Bereiche rund um das Thema Galaxien und ihre Entwicklung beleuchtet.
Die Erarbeitung der Theorie zu Spiralarmen war sehr herausfordernd für mich, hat zugleich aber auch Spaß gemacht. Spiralarme von grand-design Galaxien benötigen Sterne, die um ihre Ursprungsbahnen pendeln und dabei sogenannte Dispersionsbahnen ziehen. Sind diese Dispersionsbahnen relativ zueinander in besonderer Weise verschoben, so ergibt sich ein Spiralmuster. In diesem Fall treten bestimmte Resonanzen zwischen den Umlaufbahnen der Sterne und dem Spiralmuster auf, sodass es zu einer Verstärkung kommt. Die Spiralarme können dann sowohl wegen der Resonanzen als auch wegen gravitativer Effekte über einen langen Zeitraum stabil rotieren. An Dichtewellen auftretende Phänomene sind eine verstärkte Entstehung von O, B-Sternen und eine Ansammlung von Staub hinter den Spiralarmen.
Die von Herrn Koch und mir durchgeführten Beobachtungen von M51 und M61 unterstützten die von der Dichtewellentheorie vorausgesagten Phänomene (Verteilung von blauen/gelblich-rötlichen Sternen und Staub) und waren für mich tolle sowie lehrreiche Erfahrungen.
Meine Bemühungen, die außergewöhnliche Spiralstruktur von M61 (die Spiralarme sind eher weniger geschwungen und dafür vielmehr eckig und gerade) zu erklären, waren nicht erfolgreich, weil ich zu diesem Phänomen bis jetzt keine Literatur gefunden habe.
Meine schon vor dieser Arbeit bestehende Faszination für galaktische Themen hat sich verfestigt, sodass ich mir gut vorstellen kann, mich auch in Zukunft weiter mit diesen zu beschäftigen, denn genug Geheimnisse liegen in den Galaxien noch verborgen.

7. Anhang

Quellenverzeichnis

[1] https://hubblesite.org/contents/media/images/2014/27/3380-Image.html 13. Mai 2021 20:55

[2] Beckmann Astrophysik: BS 152

[3] Die Messier-Objekte: BS 7

[4] Ganzer Abschnitt: https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-642-67024-4_1 13. Mai 2021 01:30

[5] https://asd.gsfc.nasa.gov/archive/hubble/overview/hubble_bio.html 13. Mai 2021 12:51
Metzler Astrophysik: BS 111

[6] Beckmann Astrophysik: BS 151, 172

[7] Metzler Astrophysik: BS 118

[8] Metzler Astrophysik: BS 136

[9] http://svn.ari.uni-heidelberg.de/svn/edu/trunk/aida_03_galaxies/de/de_aida_03_galaxies.pdf 8. April 2021 14:57
https://hera.ph1.uni-koeln.de/~ossk/Einfuehrung_Astronomie/Galaxien.pdf 12. April 2021 18:01

[10] https://www.spitzer.caltech.edu/download/MediaFile/245/binary/original 13. Mai 2021 21:14

[11] http://www.usm.uni-muenchen.de/people/saglia/dm/galaxien/alldt/node16.html 8. April 2021 21:40

[12] https://wwwmpa.mpa-garching.mpg.de/lectures/EinfuehrungAW/Galaxien.pdf 9. April 2021 15:37

[13] Metzler Astrophysik: BS 120

[14] https://astronomy.swin.edu.au/cosmos/L/Lenticular+Galaxy 9. April 2021 00:37

[15] Beckmann Astrophysik: BS 153

[16] https://www.spektrum.de/lexikon/physik/spiralgalaxien/13666 9. April 2021 17:06

[17] Beckmann Astrophysik: BS 153-154
https://www.haus-der-astronomie.de/3728747/06galaxien.pdf 9. April 2021 18:28

[18] Beckmann Astrophysik: BS 178-180
Metzler Astrophysik: BS 124-125

[19] https://www.spektrum.de/lexikon/astronomie/akkretion/7 10. April 2021 16:42

[20] https://www.mpg.de/1040498/galaxie-bulges_schwarzer_Loecher 11. April 2021 14:06

[21] https://www.spektrum.de/lexikon/astronomie/hubble-klassifikation/188 12. April 2021 16:17

[22] http://www.querbeet-astronomie.de/artikel/HelligkeitsprofilSpiralgalaxie.shtml 11. April 2021 15:32

[23] https://www.haus-der-astronomie.de/3728747/06galaxien.pdf 12. April 2021 18:06

[24] https://www.uni-heidelberg.de/presse/news2017/pm20170713_milchstrasse.html 12. April 2021 17:59

[25] https://www.spektrum.de/lexikon/physik/lindblad/9055 26. April 2021 20:24

[26] http://www.astrolehrbuch.de/Sterne/Sterne60.pdf 28. April 2021 22:46
https://www.spektrum.de/lexikon/physik/dichtewellentheorie/3014 28. April 2021 22:52

[27] https://www.youtube.com/watch?v=wIkOu45PHdA 2. Mai 2021 14:05

[28] http://adsabs.harvard.edu/full/1978MitAG..43...48R 3. Mai 2021 18:20

[29] https://www.weltderphysik.de/gebiet/universum/news/2018/dichtewellen-erzeugen-spiralstruktur/ 6. Mai 2021 00:58

[30] http://adsabs.harvard.edu/full/1978MitAG..43...48R 8. Mai 2021 17:47

[31] https://www.spektrum.de/lexikon/astronomie/hubble-klassifikation/188 10. Mai 2021 01:24

[32] https://www.mpg.de/vielfalt/galaxien 14. Mai 2021 13:47

[33] Metzler Astrophysik: BS 118

[34] Metzler Astrophysik: BS 113-114

[35] Beckmann Astrophysik: BS 154-156

[36] Metzler Astrophysik: BS 113

[37] Metzler Astrophysik: BS 112-114

[38] Beckmann Astrophysik: BS 153-154

[39] https://asd.gsfc.nasa.gov/archive/mwmw/images/mwmw_11a.pdf 14. Mai 2021 12:32

[40] Beckmann Astrophysik: BS 154

[41] https://hubblesite.org/contents/news-releases/2012/news-2012-20.html?Year=2012&Topic=105-galaxies 14. Mai 2021 14:20

[42] https://www.astronomie.de/aktuelles-und-neuigkeiten/aktuelles-aus-der-astronomie/detailseite/ein-sternstrom-in-der-sonnenumgebung/ 14. Mai 2021 14:50

[43] https://www.mpg.de/vielfalt/galaxien 14. Mai 2021 14:47

[44] https://www.celestron.com/products/edgehd-14-optical-tube-assembly-cge-dovetail#specifications 14. Mai 2021 19:45

[45] http://www.sbig.de/stf-8300/stf-8300.htm 15. Mai 2021 09:38

[46] http://www.sbig.de/htm-sbig/produkte.htm#generell 15. Mai 2021 09:31

[47] http://www.astrosurf.com/re/ccdrev.html 15. Mai 2021 09:41

[48] Die Messier-Objekte: BS 100

[49] https://www.messier-objects.com/messier-51-whirlpool-galaxy/ 16. Mai 2021 18:51

[50] https://hubblesite.org/contents/media/images/2005/12/1677-Image.html 16. Mai 2021 18:47

[51] Die Messier-Objekte: BS 118
https://www.messier-objects.com/messier-61/ 16. Mai 2021 20:16

[52] https://www.rochesterastronomy.org/sn2020/sn2020jfo.html 17. Mai 2021 18:55

[53] https://www.schuelerlabor-astronomie.de/astronomie-am-sfz-wuppertal/ 17. Mai 2021 19:12, eigener Text

Literatur- und Softwareverzeichnis

Metzler Physik, Joachim Grehn und Joachim Krause, Schroedel Verlag GmbH, Druckserie A 2014, 2012

Astrophysik, Dieter Beckmann, C.C. Buchner Verlag, 2010

Die Messier-Objekte, Bernd Koch und Stefan Korth, Franckh-Kosmos Verlags-GmbH&Co. KG, 2. aktualisierte Ausgabe, 2020

Stellarium, http://stellarium.org

MaxIm DL Pro5, https://diffractionlimited.com/maxim-dl/

Adobe Photoshop https://www.adobe.com/de/products/photoshop.html

Abbildungsverzeichnis

Abb.1: Foto des Hubble Ultra Deep Fields (HUDF) 2014 im Sternbild Fornax, https://hubblesite.org/contents/media/images/2014/27/3380-Image.html 9. April 2021 01:22

Abb.2: Schema der Hubble-Sequenz, https://en.wikipedia.org/wiki/Hubble_sequence 8. April 2021 14:35

Abb.3: Foto von M87, Elliptische Galaxie des Typs E0, https://www.nasa.gov/feature/goddard/2017/messier-87 17. Mai 2021 17:48

Abb.4: Foto von NGC4866, Lentikuläre Galaxie des Typs S0a, http://www.spacetelescope.org/images/potw1328a/ 17. Mai 2021 18:02

Abb.5: Foto von NGC4622, Spiralgalaxie des Typs SA(r)ab, https://hubblesite.org/image/1137/gallery 17. Mai 2021 18:09

Abb.6: Foto von NGC1300, Balkenspiralgalaxie des Typs SBbc https://apod.nasa.gov/apod/ap050112.html 16. Mai 2021 21:52

Abb.7: Modell von relativ zueinander verschobenen Dispersionsbahnen in der Dichtewellentheorie, https://de.wikipedia.org/wiki/Dichtewellentheorie 13. Mai 2021 14:13

Abb.8: Modell der Seitenansicht einer Spiralgalaxie (Edge-On Galaxie), https://de.wikipedia.org/wiki/Spiralgalaxie#/media/Datei:Spiralgalaxie_Seitenansicht.png 14. Mai 2021 11:42

Abb.9: Foto von NGC4038, Antennen-Galaxie, Irreguläre Galaxie (Merger), https://apod.nasa.gov/apod/ap120812.html 16. Mai 2021 21:51

Abb.10: Modell der Frontansicht einer Spiralgalaxie (Face-On Galaxie), eigene Darstellung

Abb.11: Foto vom Schwarzen Loch im Zentrum der Milchstraße und des umkreisenden Sterns S2, https://www.hq.eso.org/public/images/eso0226c/ 17. Mai 2021 17:34

Abb.12: Grafik des möglichen Aussehens unserer Milchstraße (Face-On Ansicht), https://www.eso.org/public/images/eso1339e/ 14. Mai 2021 12:27

Abb.13: Schematische Darstellung des Strahlengangs im 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 14. Mai 2021 23:04

Abb.14: Foto des C14 EdgeHD Teleskops mit Montierung in der Privatsternwarte von Bernd Koch, Sörth/Westerwald, https://www.schuelerlabor-astronomie.de/astronomie-in-zeiten-von-corona/, © Bernd Koch
Abb.15: Foto der STF-8300M Kamera von SBIG, http://www.sbig.de/stf-8300/stf-8300.htm 15. Mai 2021 01:22
Abb.16: Foto der STL-11000M Kamera von SBIG, während der Aufnahme am Teleskop angeschlossen, eigene Aufnahme von der Überwachungskamera der Sternwarte am 09.05.2020 um 23:12
Abb.17: Schematische Darstellung der Funktionsweise von CCD-Kameras, eigene Darstellung
Abb.18: Kurvendiagramm der Durchlässigkeit von Licht bestimmter Wellenlängen von den RGB-Filtern, https://www.baader-planetarium.com/de/blog/die-baader-l-rgb-c-ccd-filter/ 16. Mai 2021 12:04
Abb.19: Foto des Teleskops während der Beobachtung von der Überwachungskamera der Sternwarte, eigene Aufnahme vom 06.03.2021 um 00:51Uhr
Abb.20: Bildschirmfoto der Scharfstellung des Teleskops am Stern Alcor, eigene Aufnahme
Abb.21: Bildschirmfoto während der Beobachtung, eigene Aufnahme
Abb.22: Bildschirmfoto der Erstellung von MasterDark und MasterFlats, eigene Aufnahme
Abb.23: Bildschirmfoto des Stackens und der Kalibrierung der Lightframes, eigene Aufnahme
Abb.24: Bildschirmfoto von der Kombination von Luminanz- und Farbbild in MaxIm DL Pro5, eigene Aufnahme
Abb.25: Foto von M51, dem Galaxienpaar NGC5194 (Spiralgalaxie) und NGC5195 (irreguläre Galaxie); aufgenommen am 05.03.2021 19:16-23:59UTC von Melina Anna Mitsakos (per remote control) und Bernd Koch
Abb.26: Fotos von M51 in den drei verschiedenen Farbkanälen rot, grün und blau; aufgenommen am 05.03.2021 19:16-23:59UTC von Melina Anna Mitsakos (per remote control) und Bernd Koch
Abb.27: Foto von der Galaxie M61; aufgenommen am 09.05.2020 21:22-22:25UTC von Melina Anna Mitsakos (per remote control) und Bernd Koch
Abb.28: Foto von der Galaxie M61, vergrößerte Darstellung

Danksagung

Zunächst einmal möchte ich Herrn Bernd Koch herzlich für die Begleitung dieser Arbeit und sein Engagement im Projektkurs Astronomie danken. Es hat wieder sehr viel Spaß gemacht!
Mein Dank gilt auch besonders meiner Familie, die es mir ermöglicht hat, am Projektkurs Astronomie teilzunehmen und die mich immer unterstützt hat.

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, Melina Anna Mitsakos, dass ich die vorliegende Arbeit mit dem Titel „Galaxien - Faszinierende Großstrukturen im Universum“ selbstständig angefertigt, alle verwendeten Quellen und Hilfsmittel angegeben und die den Quellen und Hilfsmitteln entnommenen Stellen als Zitate kenntlich gemacht habe.
Ich erkläre mich damit einverstanden, dass diese Arbeit publiziert wird.

Wülfrath, den 17.05.2021

Melina Anna Mitsakos