

Fernes Licht, im Garten zerlegt

Seit einigen Jahren ist es Amateurastronomen möglich, mit ihrer Ausrüstung in Bereiche des Universums vorzustoßen, die bis dahin professionellen Sternwarten vorbehalten waren. Ein mittelgroßes Teleskop, ausgestattet mit einer erschwinglichen CCD-Kamera und einem Spektrografen ermöglicht es, kosmische Gasnebel und Galaxien zu untersuchen und sogar die Rotverschiebung von Quasaren zu messen.

Von Roland Bähr

Jeder, der sich mit Astronomie beschäftigt, wird irgendwann die Faszination spüren, die von den unvorstellbaren Weiten des Universums ausgeht. Vielleicht wird er wie ich dazu animiert, die Möglichkeiten und Grenzen seiner Ausrüstung an möglichst weit entfernten Objekten zu erproben. Hierfür bieten sich die Methoden der Spektroskopie an. In der professionellen Astronomie wird sie seit Jahrzehnten routinemäßig eingesetzt, im Amateurbereich ist sie gerade erst im Kommen. Dabei gibt es einfache und preiswerte Möglichkeiten, sich dem Thema zu nähern (siehe SuW 7/2011, S. 78). Ein handelsübliches Blaze-Gitter mit 1¼-Zoll-Gewinde, das sich wie ein Filter in den Strahlengang des Teleskops bringen lässt, ermöglicht bereits den Einstieg in die spaltlose Spektroskopie (siehe SuW 4/2006, S. 72). Das mit zahlreichen Linien geritzte Glasplättchen erlaubt mit geringem Aufwand anspruchsvolle spektroskopische Beobachtungen.

Nach ersten spektroskopischen Untersuchungen von helleren Sternen, Planeten, Planetarischen Nebeln und Wolf-Rayet-Sternen kommen immer lichtschwächere Objekte vor das Objektiv. Je weiter sie entfernt sind, desto besser – wobei man zwangsläufig irgendwann im Reich der Galaxien landet. Gewöhnliche Galaxien sind jedoch für die spaltlose Spektroskopie eher enttäuschend, da ein

derart ausgedehntes Objekt auch ein entsprechend flächenhaftes, strukturloses Spektrum mit geringer Flächenhelligkeit liefert. Besser eignen sich die punktförmigen Supernovae; jedoch treten ausreichend helle Exemplare leider nicht allzu häufig auf.

Aber schließlich gibt es noch die ungewöhnlichen Galaxien, beispielsweise solche mit aktivem Kern (englisch: active galactic nucleus, AGN) oder Galaxien mit begrenzten Bereichen intensiver Sternentstehung und hellen Wasserstoffwolken. Solche Helligkeitskonzentrationen können bereits auswertbare Spektralstreifen liefern, in denen sich starke Emissionslinien erkennen lassen.

Bei entsprechend hohen Fluchtgeschwindigkeiten der Galaxien sollten sich anhand der Spektrallinien sogar Rotverschiebungen messen lassen. Allerdings gilt im Universum: Je höher die Fluchtgeschwindigkeit eines Objekts ist, desto weiter ist es von uns entfernt, und desto lichtschwächer ist es. Deshalb musste ich zunächst geeignete Objekte suchen und ausprobieren, was mit meiner Ausrüstung erreichbar ist.

Meine Beobachtungen an weit entfernten aktiven Galaxien hatten zunächst weniger zum Ziel, neue wissenschaftliche Erkenntnisse zu erlangen. Vielmehr galt es, astronomische Erkenntnisse und wissenschaftliches Arbeiten nachzuvollzie-

hen und aufzuzeigen, dass dies auch mit einem geringeren apparativen Aufwand möglich ist.

Mit Teleskop, CCD-Kamera und Blaze-Gitter

Als Aufnahmeoptiken nutze ich ein Newton-Teleskop mit acht Zoll Öffnung ($f/5$) und einen relativ farbneuen 90-Millimeter-Refraktor ($f/6,6$). In die CCD-Kamera Meade DSI-Pro schraube ich das im Astrofachhandel erhältliche Transmissionsgitter »Staranalyzer 100« ein, das die Spektren erzeugt. Das Ganze wird von einer parallaxischen Montierung vom Typ H-EQ5 getragen, deren Nachführung nicht korrigiert wird.

Das vor der Kamera platzierte Transmissionsgitter (Blaze-Gitter) lässt einen Teil des Lichts ungehindert passieren. Dieser Anteil wird als die »nullte Ordnung« des Spektrums bezeichnet. Einen weiteren Lichtanteil zerlegt das Gitter in einen lang gezogenen farbigen Streifen. Diese »erste Ordnung« ist das interessierende Spektrum. Der Abstand des Gitters vor dem Chip beträgt nur wenige Zentimeter, wodurch sowohl das Originalbild des anvisierten Objekts (nullte Ordnung) als auch das streifenförmige Spektrum (erste Ordnung) auf dem kleinen Kamerachip Platz finden. Die nullte und erste Ordnung lassen sich somit in derselben Aufnahme abbilden. Auf diese Weise werden die Ga-



Mit seinem Acht-Zoll-Newton-Teleskop ($f/5$) und dem preisgünstig erhältlichen Blaze-Gitter »Staranalyzer 100« analysiert Roland Bähr das Licht von Gasnebeln und fernen Galaxien. Das Gitter ist mit einer CCD-Kamera verbunden, mit der sich die Spektren aufnehmen lassen.

Roland Bähr



laxien und Sterne gemeinsam mit ihren Spektren sichtbar. Ein Beispiel hierfür bietet meine Aufnahme der aktiven Galaxie NGC 4151 (siehe Kasten unten und Bild S. 69).

Aus dem geringen Abstand zwischen Gitter und Kamerasensor resultieren optimierte Bedingungen für lichtschwache Objekte: Es ergeben sich kürzere Spektralstreifen, die höhere Lichtintensitäten auf dem Chip erzielen, auch wenn sich dadurch die spektrale Auflösung reduziert. Zudem erleichtert die gleichzeitige Abbildung von Objekt und Spektrum in einer Aufnahme die spätere Zuordnung zwischen Kamerapixeln und Wellenlängen, die so genannte Wellenlängenkalibrierung. Die Orientierung des Gitters relativ zum CCD-Chip der Kamera wird vor der Aufnahme außerdem so ausgerichtet, dass die Dispersionsrichtung parallel zu den Pixelzeilen oder -spalten des Sensors zu liegen kommt.

Die Belichtungszeiten der Einzelbilder beschränkte ich auf maximal 15 Sekunden, da Ungenauigkeiten der einfachen motorisierten Nachführung während dieser kurzen Zeit nicht ins Gewicht fallen. Dementsprechend weisen die Bilder allerdings ein beträchtliches Hintergrundrauschen auf. Es lässt sich erheblich verringern, indem man möglichst viele gleichartige Aufnahmen addiert. Daher nahm ich von jedem Objekt rund 100 bis 150 Einzelbilder à 15

Sekunden Belichtungszeit auf und kombinierte sie mit der im Internet erhältlichen Bildbearbeitungssoftware »Fitswork« zu einem Summenbild.

Unmittelbar nach jeder Aufnahme subtrahierte ich von jeder Einzelaufnahme ein Dunkelbild, das ich bei gleicher Belichtungszeit und Temperatur und mit abgedeckter Teleskopoptik aufgenommen hatte. Ein solches »Darkframe« nutzte ich, um fehlerhaft helle Pixel zu unterdrücken. Auf eine Hellbilddivision zur Korrektur von Abschattungen durch Staubpartikel auf dem Chip – die so genannte Flatfield-Korrektur – verzichtete ich, weil sich solche Störungen durch geeignete Platzierung des Spektralfadens im Bildfeld weitestgehend vermeiden ließen. Ebenso wurden der Himmels hintergrund und die spektrale Empfindlichkeit der Apparatur nicht korrigiert (Flusskalibration), da für die folgenden Auswertungen im Wesentlichen die Wellenlängen der Linien und weniger ihre Intensitäten benötigt werden. Solche Einflüsse müssen jedoch berücksichtigt werden, wenn die Intensitäten unterschiedlicher Linien miteinander verglichen werden sollen.

Die Spektren benachbarter Feldsterne können sich mit dem Spektrum des interessierenden Objekts überlagern und so zu falschen Linien führen. Den Einfluss dieser Sterne ermittelte ich durch den Vergleich mit Aufnahmen des Digitized Sky

Survey (DSS) vom Space Telescope Science Institute und habe ihn entsprechend berücksichtigt. Sofern störende Feldsterne vorhanden waren, versuchte ich bei Wiederholungsaufnahmen durch gemeinsames Drehen von Kamera und Gitter den Spektralstreifen so zu verschieben, dass keine Feldsterne im Bereich des Spektrums zu liegen kamen. Sofern dies nicht vollständig gelang, kennzeichnete ich in den ausgewerteten Spektren die durch Feldsterne verursachten »Scheinlinien«.

Wie findet man lohnende Ziele?

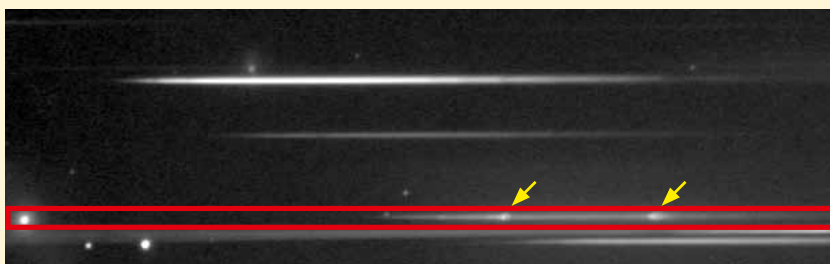
Wie der Name schon andeutet, zeigen aktive Galaxienkerne ungewöhnlich helle Emissionen auf einer vergleichsweise kleinen Fläche – hoffnungsvolle Voraussetzungen für die spaltlose Spektroskopie. Objektlisten mit AGN gibt es zur Genüge im Internet, allerdings sind nur wenige der dort aufgeführten Kandidaten mit einer einfachen amateurastronomischen Ausrüstung erreichbar. Es stellte sich jedoch heraus, dass nicht nur eine ausreichende Anzahl von AGN als spektroskopische Ziele in Betracht kommen. Tatsächlich eignen sich auch die leuchtenden Wasserstoffwolken von Sternentstehungsgebieten. Diese so genannten HII-Regionen lassen sich nicht nur in unserer Galaxis, sondern häufig auch in nahen Galaxien beobachten. Bei der Suche nach geeigneten Objekten berücksichtigte ich folgende Kriterien:

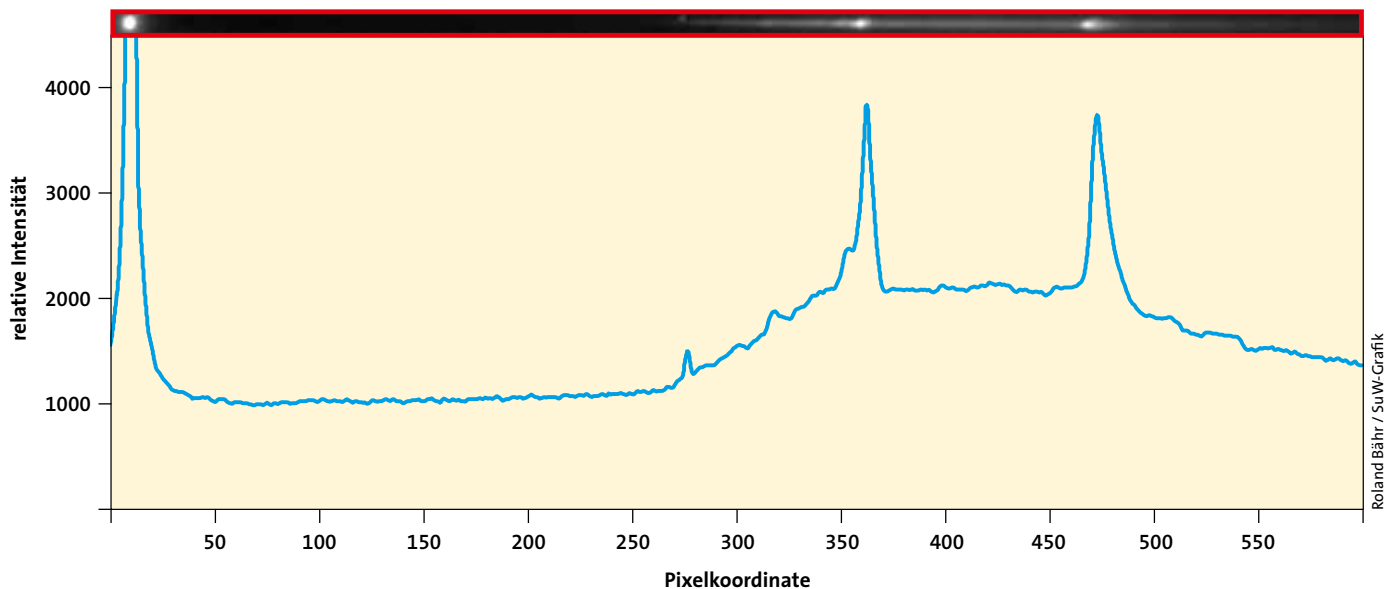
- Das Objekt muss mindestens 14,5 mag hell sein – je heller, umso besser.
- Es sollte möglichst punktförmig sein und sich deutlich von der flächigen Muttergalaxie abheben. HII-Regionen sollten mehrere Helligkeitszentren aufweisen, um Strukturen erkennen zu lassen.
- Das Objekt sollte im Zeitraum der Aufnahmen möglichst hoch am Himmel stehen und ausreichend lange sichtbar sein.

Diese Anforderungen schränken die Auswahl zwar gewaltig ein – insbesondere wenn man als Beobachtungsort eine Gartenterrasse am Rand einer Kleinstadt wählt –, aber dennoch verbleiben genügend Objekte für eine Untersuchung. Aber selbst, wenn die genannten Kriterien erfüllt werden, erweist sich ein Großteil der Kandidaten als ungeeignet. Beispielsweise lassen sich in vielen Spektren keine auswertbaren Details erkennen, wenn der Kern einer Galaxie oder seine Emissionslinien zu schwach ausgeprägt sind. Des

Aktive Galaxie NGC 4151: So entsteht ein Spektrum

Durch ein spaltloses Transmissionsgitter (Blaze-Gitter) an einem Newton-Teleskop mit acht Zoll Öffnung nahm Roland Bähr die aktive Galaxie NGC 4151 und ihre Umgebung auf. Im Bild liegen die Spektralstreifen rechts neben den zugehörigen Objekten. Sie verlaufen jeweils parallel zum unteren Bildrand (links blau, kurzwellig; rechts rot, langwellig). Die Aufnahme erfasst sowohl das Spektrum der Galaxie als auch die Spektren von Feldsternen. Der Galaxienkern ist am linken unteren Bildrand deutlich sichtbar, während die Außenbereiche des Sternsystems nahezu vollständig im Hintergrund verschwinden. Rot umrandet sind die »nullte Ordnung« und das Spektrum des Kerns mit seinen deutlichen Emissionslinien (Pfeile). Zur weiteren Auswertung wird dieser Bereich ausgeschnitten. Weitere hellere Objekte, die sich zum Teil links außerhalb des Bilds befinden, erzeugen ebenfalls Spektralstreifen.





Roland Bähr / SuW-Grafik

Dem am oberen Bildrand dargestellten Spektralstreifen der Galaxie NGC 4151 entspricht das im Diagramm gezeigte Intensitätsprofil. Um es zu erzeugen, wurden die Pixelintensitäten des Spektralstreifens spaltenweise addiert. Die Hintergrundhelligkeit des Himmels verursachte eine Verschiebung des gesamten Spektrums um einen konstanten Wert nach oben, hier um rund 1000 Einheiten.

Weiteren können die Aufnahmebedingungen ungünstig sein: Eine zu große Luftunruhe, ein zu heller Himmelshintergrund oder zu viele Sterne im Bildfeld können die Aufnahme auswertbarer Spektren verhindern.

Aus Testaufnahmen von insgesamt etwa 30 Objekten mit Helligkeiten zwischen 10,6 und 14,6 mag erschienen mir 15 für nähere Untersuchungen geeignet: zwölf AGN und drei HII-Regionen. Bevor ich die Auswertung und eine Auswahl meiner Ergebnisse beschreibe, betrachte ich diese Objektklassen etwas näher.

HII-Regionen und Starburst-Galaxien: Die untersuchten Sternentstehungsgebiete enthalten riesige Wolken aus Wasserstoff (H), in manchen Galaxien mit einer sehr hohen Sternentstehungsrate (englisch: Starburst). Den anfänglich neutralen Wasserstoff, der aus einem Proton und einem Elektron besteht, bezeichnen die Astronomen auch als HI. Eine Energiezufuhr durch die intensive Strahlung benachbarter heißer Sterne kann einem Wasserstoffatom sein Elektron entreißen. So entsteht ionisierter Wasserstoff (HII). Beim umgekehrten Vorgang, der »Rekombination«, fängt

der Atomkern ein Elektron ein. Hierbei wird Energie in Form von Strahlung freigesetzt, wovon ein Teil auch im sichtbaren Spektralbereich auftritt.

HII-Regionen treten häufig in Spiralgalaxien auf. Hohe Sternentstehungsraten können durch störende Gezeitenkräfte oder Stoßfronten, beispielsweise als Folge von Galaxienkollisionen, ausgelöst werden. Im Unterschied zu den Emissionsgebieten der AGN sind solche HII-Regionen nicht zwangsläufig im zentralen Bereich der Galaxie konzentriert.

Seyfert-Galaxien: Diese Klasse aktiver Galaxien ist nach dem US-amerikanischen Astronomen Carl Keenan Seyfert (1911–1960) benannt, der die Besonderheiten dieser Objekte in den 1940er Jahren erforschte. Seyfert-Galaxien sind durch helle Galaxienkerne mit starken Emissionslinien im optischen Spektrum charakterisiert. Man kennt Spektren, in denen sowohl breite als auch schmale Linien vorkommen, und solche, in denen ausschließlich schmale Linien auftreten. Während man breite und schmale Linien von Wasserstoff und Helium (He) findet, beobachtet man von Sauerstoff (O), Stickstoff (N), Silizium (Si) und anderen Elementen schmale »verbotene« Linien. Diese rühren von Übergängen eines Elektrons zwischen zwei Energieniveaus eines Atoms her, die sehr unwahrscheinlich sind und unter Laborbedingungen nur sehr selten auftreten. Sie werden durch eckige Klammern gekennzeichnet, beispielsweise bei [OIII], einem verbotenen Übergang des zweifach ionisierten Sauerstoffs.

Gemäß dem Standardmodell für aktive Galaxienkerne entstehen die breiten Linien innerhalb von Gaswolken, die sich

relativ nahe am Zentrum befinden und deshalb mit hohen Geschwindigkeiten um ein dort vorhandenes massereiches Schwarzes Loch kreisen. Diese hohen Geschwindigkeiten führen zu einer Verbreiterung der Linien auf Grund des Dopplereffekts. Die große Materiedichte in den Wolken verhindert außerdem, dass dort verbotene Linien entstehen können. Dieses Gebiet ist von einer reifenförmigen Staubstruktur, dem Torus, umgeben. In einem Abstand von 30 bis 300 Lichtjahren vom Zentrum entstehen in weniger dichten Wolken die schmalen Emissionslinien.

Anhand der Linienprofile in den optischen Spektren lassen sich zwei Typen von Seyfert-Galaxien unterscheiden:

- Seyfert-1-Galaxien (Sy 1) mit breiten Linien von H und He, verursacht durch die hohen Geschwindigkeiten in der Zentralregion. Dieses Spektrum wird überlagert von den schmalen Linien von H, He, [OIII] und anderen Elementen aus weiter vom Zentrum entfernten Gebieten. Je nach Ausprägung der schmalen Linien wird noch feiner in Sy 1,5, Sy 1,8 und Sy 1,9 unterteilt.
- Seyfert-2-Galaxien (Sy 2) zeigen nur die schmalen Linien von H, He, [OIII] und anderen Elementen ohne die breiten H- und He-Anteile aus der Zentralregion.

Die Unterschiede in den Spektren der Typen der Seyfert-Galaxien werden je nach Blickwinkel des Beobachters durch unterschiedlich starke Abschattungen der emittierenden Zentralregion durch den umgebenden Staubtorus erklärt.

Quasare: Die quasistellaren, also sternähnlich aussehenden Objekte (englisch: quasi-stellar objects, QSO), sind leuchtkräftige Kerne extrem weit entfernter



Am linken Bildrand ist der zentrale Teil der Galaxie Messier 82 zu sehen. Die Spektralstreifen rechts im Bild werden durch helle Feldsterne und mehrere Helligkeitszentren innerhalb der Galaxie verursacht. Dabei verschmiert das Spektrum der flächigen Bereiche der Galaxie zu einer Aufhellung der gesamten rechten Bildhälfte. Die Helligkeitskonzentration nahe der Mitte der Aufhellung ist die H-Alpha-Emission des hellsten Kernbereichs der Galaxie (gelbe Quadrate).

visuell (nullte Ordnung)

H-Alpha

aktiver Galaxien. Ihre Spektren ähneln meist den näheren, lichtschwächeren Seyfert-Galaxien und werden analog dazu in Typ 1 und Typ 2 kategorisiert, wobei auch der Entstehungsprozess der Strahlung vergleichbar ist. Wegen ihrer großen Entfernung und bedingt durch die Expansion des Universums weisen die Quasare hohe Fluchtgeschwindigkeiten auf, die zu einer beträchtlichen Rotverschiebung der Linien in ihren Spektren führt.

Die verborgene Botschaft entschlüsseln

Ein Objekt, das sein Licht nur bei bestimmten Wellenlängen aussendet, beispielsweise eine HII-Region, hinterlässt in einem spaltlosen Spektrografen jeweils an den Positionen der Emissionslinien ein Abbild der gesamten Quelle. Ist die Quelle als Fläche im Bild erkennbar und strukturiert, so zeigen die Abbilder bei den entsprechenden Wellenlängen auch die Emissionszentren der einzelnen Strukturen (siehe Bilder S. 72). Aus solchen spaltlos aufgenommenen Spektren können die Astronomen Rückschlüsse auf die räumliche Verteilung von Elementen und auf die physikalischen Zustände innerhalb der Quelle ziehen.

Vor diesem Hintergrund stellte ich mir die Frage, ob sich solche wellenlängenabhängigen Emissionsverteilungen auch in meinen Spektren nachweisen lassen. Dazu schnitt ich aus den Spektren der untersuchten HII-Regionen die interessanten Bereiche aus, verstärkte mit Hilfe

von Fitswork die Kontraste und verglich die Spektren der Strukturen. Auch vor der Auswertung der AGN-Spektren schnitt ich das Objekt zusammen mit seinem Streifenpektrum aus dem Summenbild heraus. Daraus lässt sich mit einer geeigneten Software, beispielsweise VSPEC, ein Intensitätsprofil erstellen, das die spaltenweise aufsummierten Pixelintensitäten entlang der Zeilen des ausgeschnittenen Bereichs grafisch darstellt (siehe Bild S. 69).

Im nächsten Schritt ordnete ich der in Pixelkoordinaten angegebenen Abszisse des Spektrums entsprechende Wellenlängen in Nanometern zu. Dazu musste ich die »Dispersion« ermitteln, also denjenigen Wellenlängenbereich, den ein Pixel abdeckt; er wird in Nanometer pro Pixel ausgedrückt. Die Dispersion lässt sich ermitteln, indem mit der Apparatur und unveränderten Einstellungen innerhalb einer Nacht mehrere Sternspektren aufgenommen werden. Mit etwas Glück finden sich geeignete Kalibrationssterne, bei denen die Wellenlängen der Spektrallinien genau bekannt sind, sogar in der Aufnahme der untersuchten Galaxie. Am besten eignen sich hierfür Sterne vom Spektraltyp A, da hier die Wasserstoff-Absorptionslinien deutlich ausgeprägt sind.

Mit den bekannten Absorptionslinien dieser Sterne, die sich als dunkle Stellen in ihren Spektren verraten, lassen sich die Wellenlängen kalibrieren und die berechnete Dispersion, gemittelt über mehrere Sternspektren, auf das Galaxienspektrum übertragen. Hierbei ist enorm hilfreich,

dass die Sternabbildung der nullten Ordnung den Nullpunkt der Wellenlängenskala festlegt. Somit liefert die bekannte Wellenlänge einer Spektrallinie, dividiert durch ihren in Pixeln gemessenen Abstand zur nullten Ordnung, unmittelbar die gesuchte Dispersion. Alternativ lässt sich die Dispersion auch aus der Wellenlängendifferenz zwischen zwei bekannten Linien, dividiert durch deren Abstand in Pixeln, berechnen. Ich bevorzugte jedoch die erste Methode, denn für meine Zwecke ist die über das gesamte Spektrum gemessene Dispersion hinreichend genau linear. Sie beträgt bei sämtlichen Spektren rund 1,4 Nanometer pro Pixel.

Bei dieser Prozedur verzichtete ich auf eine Korrektur der spektralen Empfindlichkeit der Apparatur (englisch: spectral response). Zwar würden sich dadurch die Intensitätsverhältnisse der diskutierten Linien um rund 20 Prozent verändern, jedoch spielen solche Abweichungen für die nun folgende Diskussion keine Rolle. Für die weitere Auswertung suchte ich in den Spektren mögliche Linien und ermittelte ihre Wellenlängen. Durch einen Vergleich mit Literaturdaten konnte ich die meisten Linien identifizieren.

Galaxien mit erhöhter Sternentstehung

Zwei relativ nahe Galaxien eigneten sich besonders für meine spektrale Untersuchungen: Messier 82 im Sternbild Großer Bär und Messier 33 im Sternbild Dreieck. Beide Systeme zeichnen sich durch eine

erhöhte Sternentstehung beziehungsweise leuchtkräftige HII-Regionen aus.

Messier 82: Für visuelle Beobachter ist diese Galaxie wegen ihrer außergewöhnlichen Morphologie attraktiv. Ihre helleren Bereiche sind von dunklen Staubbändern durchsetzt. Die Galaxie weist eine erhöhte Sternentstehungsrate auf und war im Januar 2014 Schauplatz der Supernova 2014J, die sich auch in Amateurteleskopen beobachten ließ (siehe SuW 2/2014, S. 66). Aber auch für spektrale Untersuchungen ist Messier 82 ein lohnendes Ziel. Das Spektrum ihres zentralen Teils zeigt auffällig die Emissionslinie H-Alpha des Wasserstoffs bei 656,3 Nanometer (siehe Bilder S. 70). Weitere Emissionslinien lassen sich nicht ausmachen.

Ein Vergleich der Intensitätsverteilung der H-Alpha-Emissionen mit der Helligkeitsverteilung des Zentrums von Messier 82 im sichtbaren Licht zeigt Abweichungen. Solche Unterschiede wurden auch in anderen Arbeiten beschrieben. Diese Strukturen entstehen vermutlich durch die Kombination von gestreutem Licht aus einer intensiven zentralen Quelle und selbstleuchtenden HII-Wolken, verursacht von kompakten aktiven Sternentstehungsregionen oder von einem sich bildenden AGN.

Die vergrößerten und kontrastverstärkten Ausschnitte des Spektrums lassen vermuten, dass die H-Alpha-Emissionen aus dem auch visuell hellsten Kernbereich der Galaxie stammen, dass ihre räumliche Verteilung jedoch nicht exakt mit den Emissionen im sichtbaren Licht übereinstimmt.

Messier 33: Diese nahe Spiralgalaxie beherbergt die leuchtkräftige HII-Region NGC 604 (siehe Bild rechts). Es handelt sich dabei um HII-Wolken, in die ein Sternentstehungsgebiet mit zahlreichen jungen und sehr heißen Sternen eingebettet ist. Das Spektrum von NGC 604 zeigt ebenfalls kräftige H-Alpha-Emissionen, wobei im Unterschied zum Kernbereich von Messier 82 noch zusätzlich Emissionen von H-Beta bei 486,1 Nanometer und von [OIII] bei 500,7 Nanometer sichtbar sind (siehe Bilder S. 72). Im Spektrum liegt das Maximum dieser beiden Spektrallinien, die sich auf Grund der flächigen Ausdehnung des HII-Gebietes überlagern, bei rund 500 Nanometer. Demnach dürfte der wesentliche Anteil dieser Emission von [OIII] herrühren. Die räumliche Verteilung der H-Alpha-, H-Beta- und [OIII]-Emissionen von

NGC 604 entsprechen, soweit erkennbar, der Verteilung im sichtbaren Licht (siehe Bilder S. 72).

Neben der H-Alpha-Linie sind auch Emissionen von H-Beta und [OIII] vorhanden. Deren Helligkeitsverteilung scheint zwar von der Helligkeitsverteilung in der nullten Ordnung abzuweichen, jedoch dürfte dies zumindest zum Teil aus Überlagerungen von H-Beta, [OIII] und den horizontalen Spektralstreifen benachbarter Feldsterne herrühren.

Kosmische Leuchtf Feuer: Aktive Galaxien

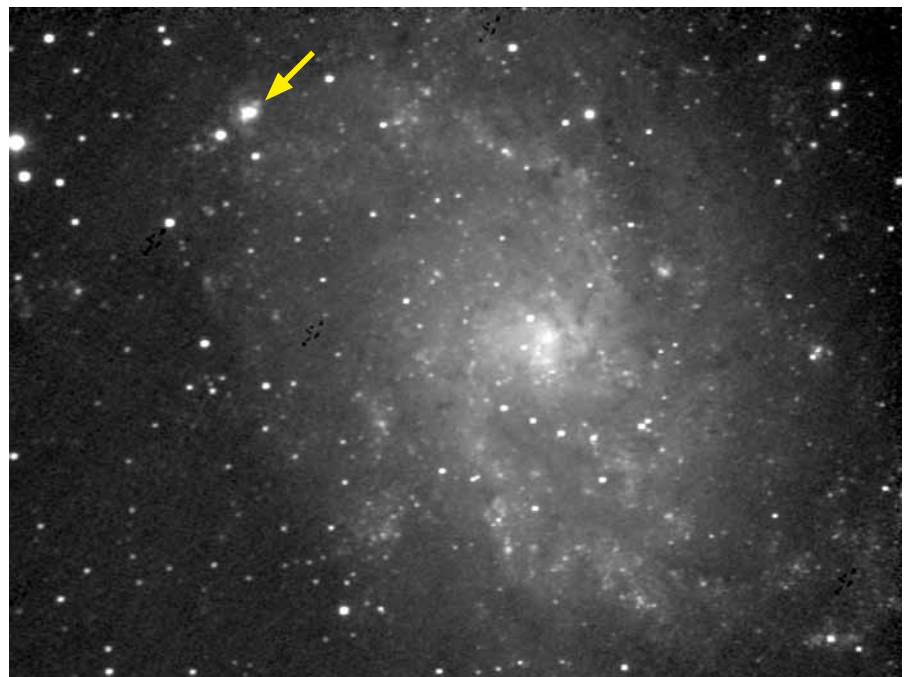
Die von mir aufgenommenen Spektren von Seyfert-Galaxien und Quasaren zeigen Emissionslinien des Wasserstoffs und die [OIII]-Linien des Sauerstoffs (siehe Kasten S. 73). Häufig heben sich die Linien wegen der geringen Helligkeit der Galaxien nur wenig vom Hintergrundrauschen ab, so dass ihre Identifizierung teilweise unsicher ist. Ausnahmen sind die Spektren der Seyfert-Galaxien NGC 4151 und Messier 77. Diese Objekte enthalten jeweils einen relativ hellen, punktförmigen AGN, dessen Licht die besten Signal-Rausch-Verhältnisse und deutlich ausgeprägte Linien liefert. Die Wellenlängen der Linienschwerpunkte ermittelte ich mit dem Programm VSPEC, die Linien identifizier

zierte ich durch Vergleiche mit geeigneten Spektren aus dem Internet.

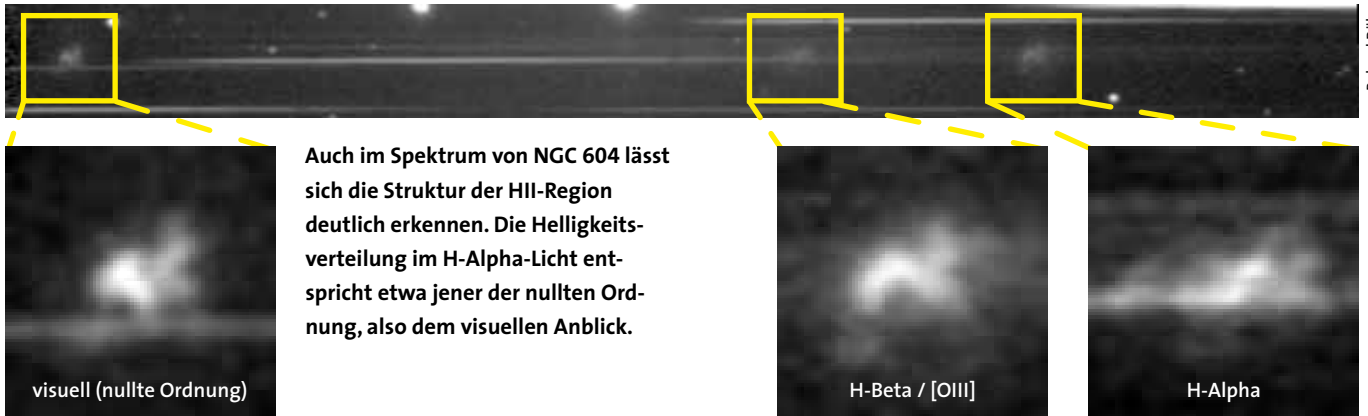
Auf Grund des relativ geringen Auflösungsvermögens meiner Apparatur von rund 1,4 Nanometern pro Pixel lassen sich eng benachbarte Linien in den Spektren der AGN selbst bei ähnlichen Intensitäten häufig nicht unterscheiden. Die von mir näher betrachteten Emissionslinien von H-Alpha, H-Gamma und [OIII] können deshalb eine Überlagerung mehrerer Linien sein. So könnte das Linienprofil von H-Gamma aus den Linien H-Gamma (434,0 Nanometer) und [OIII] (436,3 Nanometer) bestehen, das von [OIII] aus [OIII] (495,9 Nanometer) und [OIII] (500,7 Nanometer) sowie das von H-Alpha aus [NII] (654,8 Nanometer), H-Alpha (656,3 Nanometer) und [NII] (658,3 Nanometer).

Die H-Alpha-Linie ist in sämtlichen Spektren deutlich zu erkennen und mit Ausnahme von NGC 4151 auch die kräftigste Linie. Ihr Intensitätsprofil erscheint in den meisten Spektren am langwelligen Ende des Linienflügels asymmetrisch verbreitert. Dies könnte durch überlagerte weitere Emissionslinien – [NII] oder [SII] – oder durch die breiten Linienanteile der Seyfert-1-Galaxien verursacht sein. Ein Vergleich der Linienprofile der H-Alpha- und H-Beta-Linien in den Spektren von NGC 4151 und Messier 77 scheint das schmalere Linienprofil von Messier 77 zu bestätigen: NGC 4151 wird in der Literatur als Seyfert 1,5 klassifiziert, da die Wasserstofflinien sowohl eine breite als auch eine schmale Komponente aufweisen. Trotzdem ist hierbei Skepsis angebracht:

Die Sternentstehungsregion NGC 604 (Pfeil) in der Galaxie Messier 33 hebt sich deutlich von ihrer Umgebung ab.



Roland Bähr



Auch im Spektrum von NGC 604 lässt sich die Struktur der HII-Region deutlich erkennen. Die Helligkeitsverteilung im H-Alpha-Licht entspricht etwa jener der nullten Ordnung, also dem visuellen Anblick.

Ich gehe davon aus, dass zu den Asymmetrien, die ich auch in Spektren Planetarischer Nebel beobachtet habe, sicherlich Abbildungsfehler wesentlich beitragen, beispielsweise die Bildfeldkrümmung oder der Komafehler einer Newton-Optik.

Die [OIII]-Linie ist in den meisten Spektren erheblich schwächer als die H-Alpha-Linie. In den Spektren der Seyfert-2-Galaxie NGC 7469 und der beiden untersuchten Quasare erscheint die [OIII]-Linie gleichermaßen intensiv oder schwächer als die H-Beta-Linie (siehe Kasten S. 73). Bei allen anderen Spektren scheint sie stärker als H-Beta zu sein – im Spektrum von Messier 77 und NGC 4151 ist sie sogar sehr viel stärker. Solche Unterschiede können vielfältige Ursachen haben: Abschattungen der Emissionsgebiete, die chemische Zusammensetzung oder die physikalischen Bedingungen im Kern, wie Druck und Temperatur. Diesen Aspekt habe ich bisher nicht weiterverfolgt, er könnte jedoch Stoff für weitere Projekte bieten.

Bemerkenswert ist, dass sich die Spektren der Seyfert-Galaxien NGC 3227 und Markarian 926 trotz der enormen Helligkeitsunterschiede von 3,5 mag (Faktor 25) bei nahezu gleichen Aufnahmebedingungen hinsichtlich der Ausprägung der Linien und des Rauschuntergrunds in meinen Spektren nur wenig unterscheiden. Die Ursachen hierfür dürften in der unterschiedlichen Intensität und dem Profil der Linien liegen. Ein Blick in die Fachliteratur ergibt, dass das Spektrum von Markarian 926 bei H-Beta und H-Alpha im Vergleich zu NGC 3227 breite, asymmetrische Linienfüße aufweist. Zudem ist die Intensität der Emissionen aus beiden Galaxienkernen zeitlich variabel. Dies belegt, dass die Qualität der aufgenommenen Spektren nicht allein von der V-Helligkeit der Objekte bestimmt wird, sondern dass es sich lohnen kann, auch visuell lichtschwache Objekte spektral zu untersuchen.

Fingerabdruck der kosmischen Expansion

Das Licht eines sich vom Beobachter weg bewegenden Objekts erscheint ihm zu größeren Wellenlängen hin verschoben (»rotverschoben«). Die Linien in den Spektren weit entfernter Objekte weisen mit zunehmenden Entfernungen eine steigende Rotverschiebung auf. Sie resultiert aus der Fluchtgeschwindigkeit auf Grund der Expansion des Universums. Ihr überlagert sind die Einflüsse durch die Eigenbewegungen der Galaxien innerhalb eines Haufens und die Bewegung der Sonne um die Milchstraße. Die Rotverschiebung lässt sich auch bei einigen der von mir untersuchten Galaxien ermitteln, wobei hier die Eigenbewegungen der Galaxien einen kaum messbaren Beitrag liefern dürften.

Die Rotverschiebung wird mit dem Formelbuchstaben z bezeichnet. Sie ist definiert als die Abweichung der Wellenlänge λ_{mess} des von einer bewegten Quelle ausgesendeten Lichts von derjenigen Wellenlänge λ_0 , die eine relativ zum Beobachter ruhende Quelle aussendet:

$$z = (\lambda_{\text{mess}} - \lambda_0) / \lambda_0$$

Aus der ermittelten Rotverschiebung einer Galaxie lässt sich die Fluchtgeschwindigkeit v berechnen, mit der sie sich von uns weg bewegt. Dabei gibt z das Verhältnis von v zur Lichtgeschwindigkeit c an: $z = v/c$, wobei $c = 299792 \text{ km/s}$ die Lichtgeschwindigkeit ist. Daraus folgt für die gesuchte Fluchtgeschwindigkeit $v = z \times c$.

Wie genau sind nun die von mir auf diese Weise ermittelten Fluchtgeschwindigkeiten? Schließlich schränken die niedrige spektrale Auflösung meiner Apparatur und der zum Teil erhebliche Rauschanteil die Messgenauigkeit erheblich ein. Deshalb versuchte ich, die Unsicherheiten der Wellenlängenmessung zumindest grob abzuschätzen. Diese Betrachtung erfüllt

zwar nicht den Anspruch einer detaillierten Fehlerrechnung, sie sollte jedoch ungefähr die oberen Grenzen der Fehlerbandbreiten wiedergeben.

Dabei gehe ich davon aus, dass die Genauigkeit der Wellenlängenmessung im Wesentlichen von Unsicherheiten der Wellenlängenkalibrierung und der Ermittlung der Linienschwerpunkte bestimmt wird – insbesondere unter Berücksichtigung der im Vergleich zur Halbwertsbreite der Linien recht breiten Pixel. Hinzu kommt der Einfluss des Hintergrundrauschens.

Für den Fehler der Dispersion habe ich die Standardabweichung angesetzt, die sich aus mehreren Referenzspektren für die mittlere Dispersion ergab; sie liegt bei $\pm 0,2$ Prozent. Die Ungenauigkeit für die Bestimmung der Linienschwerpunkte sowie für die Festlegung der nullten Ordnung beträgt etwa $\pm 0,5$ Pixel, zuzüglich Ungenauigkeiten von ± 0 bis 3 Pixeln durch das überlagerte Rauschen. Daraus schätzte ich unter Berücksichtigung der Fehlerfortpflanzung bei einer Dispersion von 1,4 Nanometern pro Pixel Unsicherheiten der Wellenlängenbestimmung zwischen ± 2 und ± 5 Nanometer ab – je nach Wellenlänge und Qualität der Linien. Dies entspricht Fehlern der Fluchtgeschwindigkeiten von ± 900 bis 3000 Kilometern pro Sekunde.

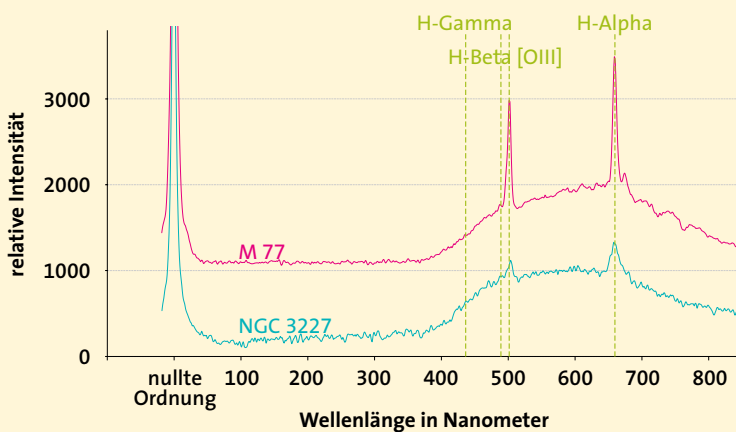
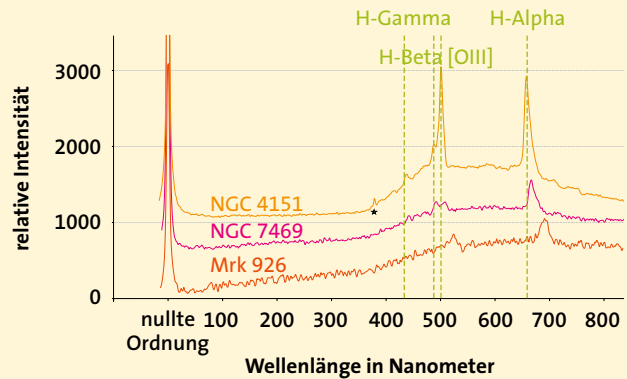
Den großen Fluchtgeschwindigkeiten der von mir beobachteten Quasare entsprechend sind die Emissionslinien in ihren Spektren nachweislich rotverschoben (siehe Kasten S. 74). Auch die Linien einiger Seyfert-Galaxien lassen eine Rotverschiebung der Linien deutlich erkennen (siehe Kasten S. 73). Bei den helleren und näheren Galaxien wie Messier 33 und Messier 82 sind die Rotverschiebungen für eine weitere Auswertung zu gering.

Die genauesten Werte der Rotverschiebung liefert erwartungsgemäß die H-Alpha-Linie, denn sie ist in fast allen Spek-

Spektren aktiver galaktischer Kerne

In den folgenden Diagrammen sind die Spektren der untersuchten Seyfert-1- und Seyfert-2-Galaxien sowie zweier Quasare als Intensitätsprofile dargestellt. Die Emissionslinien in den Spektren der Seyfert-Galaxien NGC 4151, NGC 7469 und Markarian 926 lassen die jeweilige Rotverschiebung des Lichts infolge der Expansion des Kosmos erkennen. Noch deutlicher zeigt sie sich in den Spektren der Quasare 3C 273 und B3 0754+394. Die Rotverschiebung nimmt mit der Entfernung der Galaxie zu – in den Diagrammen jeweils von oben nach unten. Zur Orientierung sind die Ruhewellenlängen der Linien H-Gamma bei 434,0 Nanometer, H-Beta bei 486,1 Nanometer, H-Alpha bei 656,3 Nanometer und [OIII] bei 500,7 Nanometer als senkrechte, gestrichelte Linien eingezeichnet. Betrachten wir nun Einzelheiten in den verschiedenen Spektren.

Seyfert-1-Galaxien: Im Spektrum des hellen aktiven Kerns von NGC 4151 sind die Linien von H-Alpha und [OIII] sehr gut ausgeprägt und etwa gleich stark. Auf der kurzwelligen Flanke der [OIII]-Linie sitzt H-Beta, und auch H-Gamma ist deutlich sichtbar. Die Linie eines Feldsterns ist durch ein Symbol (★) markiert (★). Bei der erheblich lichtschwächeren Galaxie NGC 7469 sind neben H-Alpha die Linien von H-Beta und [OIII] nur noch schwach ausgeprägt, H-Gamma lässt sich hier bestenfalls vermuten. Markarian 926 (Mrk 926), die lichtschwächste der untersuchten Galaxien, zeigt nur H-Alpha und schwach [OIII].



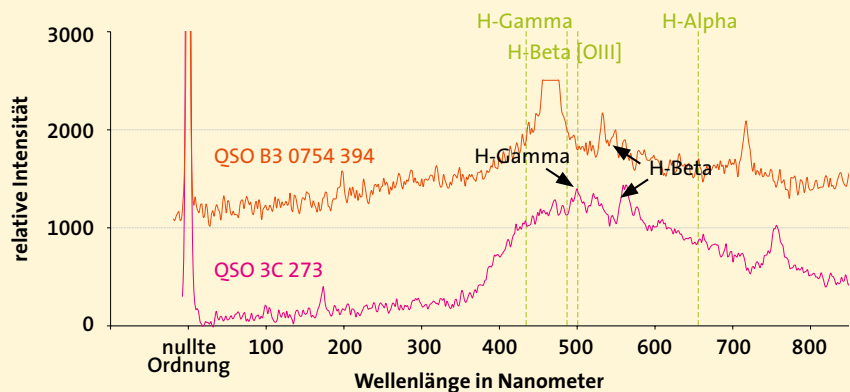
Seyfert-2-Galaxien: Die Spektren von Messier 77 (M 77) und NGC 3227 sind durch die H-Alpha- und [OIII]-Linien gekennzeichnet. Bei M 77 sind sie kräftig ausgeprägt und verglichen mit der Seyfert-1-Galaxie NGC 4151 relativ schmal.

Die H-Beta-Linie liegt bereits auf der kurzwelligen Flanke der [OIII]-Linie und ist nur schwach sichtbar. An der langwelligen Flanke der H-Alpha-Linie ist deutlich die Linie von [SII] (Ruhewellenlänge: 672,3 Nanometer) erkennbar. Obwohl NGC 3227 zu den helleren der untersuchten Galaxien gehört, sind die Linien von H-Alpha und [OIII] nur sehr schwach ausgeprägt.

Quasare: Im Unterschied zu den Seyfert-Galaxien sind die Linien der beiden Quasare (QSO) 3C 273 und B3 0754+394 auf Grund der hohen Fluchtgeschwindigkeit erheblich rotverschoben. In beiden Spektren tritt die rotverschobene H-Alpha-Linie deutlich hervor. Zudem lassen sich im Spektrum von 3C 273 noch die rotverschobenen Linien von H-Beta und schwach die Linie H-Gamma ausmachen. Zufällig liegt hier die H-Gamma-Linie genau bei der Ruhewellenlänge von [OIII]. Die kleine Linie an der langwelligen Flanke von H-Beta dürfte von [OIII] stammen. Zwischen H-Gamma und H-Beta ist eine weitere breite Erhebung zu erkennen, die auch in Spektren anderer Autoren enthalten ist – hier bei 522,0 Nanometer, entsprechend einer Ruhewellenlänge

von etwa 453,0 Nanometern. Es könnte sich dabei um Überlagerungen mehrerer Linien handeln, beispielsweise von Linien des einfach ionisierten Eisens (Fe II) und des einfach ionisierten Heliums (He II), die häufig in den Spektren von Seyfert-1-Galaxien und Quasaren gesehen werden. Beim Quasar

B30754+394 sind die Linien weniger stark rotverschoben. Dabei lässt sich H-Alpha deutlich, H-Beta schwach und [OIII] nur unsicher identifizieren. Die starke Linie eines störenden Feldsterns ist im Diagramm nach oben abgeschnitten und als Höcker sichtbar.



tren am deutlichsten ausgeprägt. Und dank ihrer großen Wellenlänge wirken sich absolute Fehler der Wellenlängenmessung weniger auf die gemessenen Rotverschiebungen und berechneten Fluchtgeschwindigkeiten aus. Besonders in den Spektren der Quasare lassen sich die Rot-

verschiebungen der einzelnen Linien wegen der hohen Fluchtgeschwindigkeit gut messen; hier wirken sich die Ungenauigkeiten der Wellenlängenbestimmung nur geringfügig aus. Sowohl bei 3C 273 als auch bei B3 0754+394 weichen die anhand der Linien H-Beta, [OIII] und H-Alpha ge-

messenen Rotverschiebungen und Fluchtgeschwindigkeiten untereinander nur um wenige Prozent voneinander ab. Des Weiteren werden die in der NASA/IPAC Extragalactic Database (NED) angegebenen Fluchtgeschwindigkeiten überraschend gut getroffen.

Rotverschiebungen und Fluchtgeschwindigkeiten

Die Tabelle fasst die aus den Spektren ermittelten Rotverschiebungen und die daraus berechneten Fluchtgeschwindigkeiten sowie Objektdaten aus der NASA/IPAC Extragalactic Database (NED) zusammen. Die ersten drei Spalten geben die Objektbezeichnung, den Seyfert-Typ beziehungsweise die scheinbare visuelle Helligkeit an. In den Spalten 4 bis 6 und 8 finden sich die untersuchten Spektrallinien, die gemessenen Wellenlängen (λ_{mess}) mit den daraus berechneten Rotverschiebungen (z_{mess}) und die Fluchtgeschwindigkeiten (v_{mess}). Die Spalten 7 und 9 geben zum Vergleich die entsprechenden Literaturwerte z_{Lit} und v_{Lit} an. Dabei entsprechen positive Geschwindigkeiten einer Bewegung von uns weg, negative Geschwindigkeiten einer Bewegung auf uns zu.

Die Spalte 10 gibt die gerundete Entfernung in Megaparsec (Mpc) gemäß NED nach Korrektur der Sonnenbewegung um das Zentrum unseres Milchstraßensystems an. Den berechneten Werten liegt eine Hubble-Konstante von 73 Kilometern pro Sekunde pro Megaparsec zu Grunde.

Objekt	Seyfert Typ ¹⁾	Helligkeit [mag] ¹⁾	Linie	λ_{mess} [nm]	z_{mess}	$z_{\text{Lit}}^{1)}$	v_{mess} [km/s]	$v_{\text{Lit}}^{1)}$ [km/s]	Entfernung ¹⁾ [Mpc]
Quasar 3C 273	1,0	12,9	H-Alpha	756,6	0,1529	0,1583	45858	47400	649
			[OIII] ²⁾	578,0	0,1544		46315		
			H-Beta	561,5	0,1550		46512		
			H-Gamma ²⁾	500,8	0,1539		46175		
Quasar B3 0754+394	1,5	14,4	H-Alpha	718,2	0,0943	0,0959	28305	28780	394
			[OIII] ²⁾	548,5	0,0955		28640		
Mrk 926	1,5	14,6	H-Alpha	690,7	0,0524	0,0469	15734	14048	194
			[OIII]	524,2	0,0469		14080		
NGC 7469	1	13,0	H-Alpha	667,8	0,0176	0,0163	5266	4892	69
			[OIII]	506,9	0,0124		3715		
			H-Beta	493,0	0,0141		4240		
NGC 4151	1,5	11,5	H-Alpha	657,8	0,0023	0,0033	695	995	14
			[OIII]	500,5	-0,0004		-120		
			H-Beta	487,0	0,0018		537		
			H-Gamma ³⁾	438,0	0,0092		2765		
			[OIII]	438,0	0,0039		1169		
NGC 3227	2	11,1	H-Alpha	659,0	0,0041	0,0039	1243	1157	15
			[OIII]	504,0	0,0066		1977		
Messier 77	2	9,6	H-Alpha	659,3	0,0046	0,0038	1381	1137	16
			[OIII]	501,7	0,0020		599		
			H-Beta ²⁾	487,6	0,0030		907		

1) Seyfert-Typ, Helligkeit, Rotverschiebung (z_{Lit}), Geschwindigkeit (v_{Lit}) und Entfernung aus der NASA/IPAC Extragalactic Database (<http://ned.ipac.caltech.edu/>) 2) Linie schwach, möglicherweise durch Rauschartefakte verfälscht. 3) Zuordnung H-Gamma / [OIII] im Spektrum nicht eindeutig.

Selbst die in mittleren Entfernungen stehenden Seyfert-Galaxien Markarian 926 und NGC 7496 weisen immer noch deutliche, gut messbare Rotverschiebungen auf. Insbesondere in Anbetracht der möglichen Unsicherheiten ergeben sich auch hier überraschend gute Übereinstimmungen mit den professionellen Daten. Die relativ nahen Galaxien NGC 4151, NGC 3227 und Messier 77 zeigen erwartungsgemäß nur geringe Rotverschiebungen. Hier dürfte die Fluchtgeschwindigkeit schon deutlich durch andere Bewegungskomponenten überlagert sein.

Die Literaturwerte der Geschwindigkeiten liegen bei diesen Objekten im Bereich um 1000 Kilometer pro Sekunde und damit innerhalb der abgeschätzten Unsicherheiten meiner Messungen. Deshalb ist es in diesen Fällen auch nicht verwunderlich, dass die an mehreren Linien innerhalb eines Spektrums gemessenen Rotverschiebungen untereinander stark variieren und von den Literaturwerten erheblich abweichen. Speziell im Spektrum der Seyfert-Galaxie NGC 4151 findet sich bei 438,0 Nanometer eine Linie, die ich nicht eindeutig identifizieren konnte. Hierbei könnte es sich um H-Gamma (434,0 Nanometer), um eine [OIII]-Linie (436,3 Nanometer) oder um eine Überlagerung beider handeln. Zur gemessenen Geschwindigkeit würde die [OIII]-Linie besser passen.

Insgesamt liegen die meisten der gemessenen Fluchtgeschwindigkeiten enger beieinander und näher an den Literaturwerten, als auf Grund meiner Fehlerabschätzung zu erwarten wäre – vielleicht ein Hinweis darauf, dass die Genauigkeit höher ist als gedacht.

Das kosmologische Weltbild erforschen

Bereits mit einer einfachen transportablen Amateurausrüstung, wie sie beispielsweise für eine Schule angeschafft werden kann, ist es möglich, tief in das Universum einzudringen: Man kann exotische Galaxientypen identifizieren, helle Emissionsgebiete in Galaxien untersuchen und die Expansion des Universums durch eigene Messungen überprüfen. Selbst Objekte jenseits einer scheinbaren Helligkeit von 14 mag sind erreichbar, sofern sie einen sternförmigen Kern mit intensiven Emissionslinien aufweisen.

Damit eröffnet sich ein Weg, Fragen zum heutigen kosmologischen Weltbild

Spektroskopie als Schülerprojekt

Um die hier vorgestellten astrophysikalischen Themen auch über den Unterricht hinaus praktizieren zu können, wurde im September 2013 am SRH Bildungszentrum in Neckargemünd die Arbeitsgruppe »Astronomische Spektroskopie« gegründet. An ihr beteiligen sich psychisch und körperlich behinderte Schüler gemeinsam mit nichtbehinderten Schülern sowie Auszubildenden im Alter von 15 bis 22 Jahren. Die Schüler besuchen die Stephen-Hawking-Schule (SHS) beziehungsweise das Leonardo da Vinci Gymnasium (LdVG), die Auszubildenden besuchen das Berufsbildungswerk Neckargemünd (BBWN).

Zur Unterstützung dieses Vorhabens erhielt die Arbeitsgruppe im November 2013 auf der Bochumer Herbsttagung der Amateurastronomen den 1. Förderpreis der Reiff-Stiftung für Amateur- und Schulastronomie. Mit dem Preisgeld finanzierte die Gruppe bislang eine Deep-Sky-Kamera, ein Transmissionsgitter und ein Spektroskop mittlerer Auflösung. Damit gewannen die Teilnehmer bereits erste Spektren von Sternen und Planetarischen Nebeln, werteten sie aus und stellten die Ergebnisse auf der Jahrestagung Aspekt 2014 der VdS-Fachgruppe Spektroskopie in Köln vor (siehe SuW 10/2014, S. 88).

Für zukünftige Schülerprojekte, insbesondere auch für die Messungen der Rotverschiebungen von Quasaren und Seyfert-Galaxien, plant die Arbeitsgruppe, ein größeres Teleskop anzuschaffen und einen stationären Beobachtungsplatz einzurichten. Dazu soll eine von Auszubildenden und Ausbildern des BBWN gemeinsam gebaute parallaktische Montierung eingesetzt werden.

selbst praktisch zu bearbeiten und nachzuvollziehen. Und sicherlich lassen sich auch die hier beschriebenen Ergebnisse noch erheblich verbessern und erweitern, beispielsweise durch die Optimierung der Aufnahmebedingungen und sorgfältigere Auswertungen. Es gibt zahlreiche geeignete Objekte am Himmel – sie warten nur auf neugierige Beobachter.



ROLAND BÄHR war nach seinem Physikstudium und der Promotion in Heidelberg zum Thema Geochronologie als Gutachter im Bereich Kernenergie und

Strahlenschutz tätig. Seit mehr als zehn Jahren unterrichtet er die Fächer Physik, Mathematik und Astronomie. Dabei ist er stets bestrebt, amateurastronomische Erfahrungen in den Schulunterricht einzubringen.

Dieser Artikel und Weblinks im Internet: www.sterne-und-weltraum.de/artikel/1323069

Literaturhinweise

Bähr, R.: Was für ein Typ ist denn das?

In: VdS-Journal für Astronomie 32/2010, S. 104 – 108

Borchmann, R.: Spektren für jedermann. In: Sterne und Weltraum 10/2014, S. 88 – 91

Dodorico, S., Rosa, M.: Wolf-Rayet Stars in the Giant HII Region NGC 604. In: The Astrophysical Journal 248, S. 1015 – 1020, 1981

Eversberg, T.: Spektroskopische Abenteuer. In: Sterne und Weltraum 7/2012, S. 76 – 84

Harrison, K. M.: Astronomical Spectroscopy For Amateurs. Springer, New York 2011

Leadbeater, R.: Spektroskopische Abenteuer. In: VdS-Journal für Astronomie 27/2008, S. 108 – 111

Osterbrock, D. E., Ferland, G. J.: Astrophysics of Gaseous Nebulae and Active Galactic Nuclei. University Science Books, Mill Valley 2005

Scarrot, S. M. et al.: The Scattered H α Emission-line Filaments in M 82. In: Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Short Communication 252, S. 12 – 16, 1991

Schmidt, G. D., Miller, J. S.: The Spectrum of the Nucleus of NGC 4151. In: The Astrophysical Journal 240, S. 759–767, 1980

Véron-Cetty, M. P., Véron, P.: A Catalogue of Quasars and Active Nuclei: 13th Edition. In: Astronomy & Astrophysics 518, S. 10 – 18, 2010