

Astronomie und Astrophysik

Extragalaktische Astronomie

von

Andreas Schwarz



Stand: 28.10.2017

0.0 Inhaltsverzeichnis

1.0 Einleitung.....	4
2.0 Die Galaxis (Milchstraße).....	8
2.1 Der Aufbau der Galaxis.....	8
2.2 Dynamische Prozesse in der Galaxis.....	11
2.3 Entfernungsbestimmungsmethoden innerhalb der Galaxis.....	13
2.4 Die Entwicklung der Galaxis	15
2.5 Die Galaxis als Galaxie.....	16
3.0 Normale Galaxien.....	17
3.1 Die Katalogisierung der Galaxien.....	17
3.2 Die Typisierung von Galaxien.....	18
3.3 Spiral- und Balkenspiralgalaxien.....	19
3.4 Elliptische Galaxien.....	24
3.5 Irreguläre Galaxien.....	26
3.6 Die scheinbare und die tatsächliche Verteilung der Galaxientypen.....	28
3.7 Extragalaktische Entfernungsbestimmungsmethoden.....	28
4.0 Aktive Galaxien.....	32
4.1 Der Aktive Galaktische Kern.....	32
4.2 Das Supermassive Schwarze Loch.....	33
4.3 Die Akkretionsscheibe.....	34
4.4 Der Staubtorus.....	38
4.5 Die galaktischen Jets.....	40
4.6 Strahlungsprozesse in Aktiven Galaktischen Kernen.....	42
4.7 Typen von Aktiven Galaktischen Kernen.....	43

5.0 Die Entwicklung von Galaxien.....	48
5.1 Die Entstehung von Galaxien.....	50
5.2 Gruppen, Haufen und Superhaufen von Galaxien.....	52
6.0 Schlusswort.....	55
7.0 Literatur-, Quellen- und Bilderverzeichnis.....	56

1 Einleitung

Galaxien sind Ansammlungen von einigen hundert Milliarden Sternen und großen Mengen von Interstellarer Materie, welche dynamisch und kosmogonisch eine Einheit bilden. Sie sind damit die größten Bausteine des Universums und im Rahmen der Kosmologie. Allerdings bilden Galaxien Gruppen und Haufen, welche wiederum Super-Haufen bilden können. Bis in die Mitte der 1920er Jahre war unklar, ob Galaxien als Nebel Bestandteile unserer Milchstraße (Galaxis) sind oder eigenständige Sternsysteme darstellen. Im Jahr 1924 konnten die nächsten Galaxien zunächst teilweise in Einzelsterne aufgelöst werden und im Jahre 1925 erstmals die Entfernung von einer Galaxie bestimmt werden. Damit war klar, dass Galaxien jeweils eigenständige Sternsysteme und keine Nebel sind. Aufgrund ihrer großen Entfernung erscheinen Galaxien als Nebel und nicht als Ansammlung von Einzelsternen. Unsere Galaxis ist eine gewöhnliche Balkenspiralgalaxie, welche etwa 300 Milliarden Sterne beinhaltet. Die Galaxis hat einen Durchmesser von etwa 100.000 Lichtjahren und eine Dicke von etwa 3.000 bis 16.000 Lichtjahren. In ihrem Zentrum (Bulge) befindet sich ein Supermassives Schwarzes Loch mit etwa 4 Millionen Sonnenmassen. Unsere Sonne mit ihren Planeten befindet sich in einem der Spiralarme der Galaxis, etwa 26.000 Lichtjahre vom Zentrum entfernt, und umkreist dieses einmal in 220 Millionen Jahren.

Nach dem heutigen Wissenstand gibt es im sichtbaren Universum etwa 200 Milliarden Galaxien, welche insgesamt etwa 10^{22} Sterne beinhalten. Es gibt verschiedene Typen von Galaxien. Nach der sogenannten Hubble-Klassifikation gibt es Spiralgalaxien, Elliptische Galaxien und Irreguläre Galaxien. Die Spiralgalaxien spalten sich wiederum in die Typen normale Spiralgalaxien und Balkenspiralgalaxien auf. Doch gibt es noch weitere Klassifikationen, etwa Starburst-Galaxien mit hoher Sternentstehungsrate und Aktive Galaxien, welche neben der thermischen Sternenstrahlung den größten Teil ihrer Energie im nichtthermischen Bereich abstrahlen. Die Typen von Galaxien unterscheiden sich nicht nur in ihren äußeren Erscheinungsformen, sondern auch in physikalischer Hinsicht. So beinhalten sie unterschiedliche Sterntypen, was sich in den Farben der ausgesendeten Strahlung von Galaxien bemerkbar macht. Allerdings ist auch die Menge an Interstellarer Materie, insbesondere von Staub, in den verschiedenen Typen von Galaxien unterschiedlich. Aufgrund der durch Staub bedingten Extinktion, der Abschwächung von Strahlung beim Durchgang durch ein Medium, wird das Licht von Galaxien mit zunehmender Staubkonzentration röter. Die Sternbildungsrate ist ebenfalls unterschiedlich und vom Typ einer Galaxie abhängig. Letztendlich haben sich die verschiedenen Typen von Galaxien, welche eine unterschiedliche Morphologie haben, auch unterschiedlich entwickelt.

Die Spiralgalaxien bestehen aus einer Scheibe, welche eine Spiralstruktur hat. In dieser Scheibe befindet sich eine zentrale Verdickung, welche als Bulge bezeichnet wird. Der Bulge ist der schwach abgeplattete Kern der Spiralgalaxie, welcher morphologisch einer elliptischen Galaxie ähnelt. Heute gilt als sicher das sich in einem Galaxiekern ein Supermassives Schwarzes Loch befindet, welches mehrere Millionen bis mehrere Milliarden Sonnenmassen haben kann. Im Falle der Balkenspiralgalaxie ist der Kern balkenförmig ausgebildet, an den Enden dieser Balken setzen dann die Spiralarme an. Die Spiralarme werden durch Dichtewellen erzeugt. In ihnen ist die Dichte an Interstellarer Materie größer und entsprechend ist auch die Sternbildungsrate am höchsten. Somit findet in Spiralgalaxien auch noch aktive Sternentstehung statt. Allerdings gibt es zwei Populationen von Sternen in einer Spiralgalaxie. Der Population I (Scheibenpopulation) gehören relativ junge und blaue Sterne an, welche sich überwiegend im Bereich der galaktischen Scheibe und der Spiralarme befinden. Im Gegensatz dazu gehören der Population II eher alte und rote Sterne an, welche in dem Bulge konzentriert sind. Die Spiralgalaxien werden mit dem Buchstaben S bezeichnet. Mit zunehmender Öffnung der Spiralarme erfolgt eine Klassifizierung von a bis c. So haben Spiralgalaxien vom Typ Sa eng anliegende Spiralarme und die von Typ Sc weit geöffnete Spiralarme. Diese Klassifizierung gilt auch für Balkenspiralen, welche mit SB bezeichnet werden. Je nach Öffnung der Balkenspiralen gibt es dann die Klassifizierungen von SBa bis SBc. Zwischen

den Spiralgalaxien und den Elliptischen Galaxien gibt es einen Übergangstypen, welcher mit S0 bzw. SB0 bezeichnet wird.

In einer Elliptischen Galaxie befinden sich hauptsächlich Sterne der Population II, also alte und rote Sterne. Bei Elliptischen Galaxien handelt es sich um Galaxien, welche nach der vorherrschenden Auffassung aus der Verschmelzung von jungen Spiralgalaxien hervorgegangen sein sollen. Sie besitzen kaum noch Interstellare Materie und somit findet kaum noch Sternbildung statt. Dies erklärt auch das Fehlen von Sternen der Population I, also von jungen und blauen Sternen. Die Supermassiven Schwarzen Löcher in Elliptischen Galaxien sind in der Regel wesentlich massenreicher als in Spiralgalaxien, da diese aufgrund ihres Alters über einen langen Zeitraum Materie akkretiert (aufgenommen) haben und durch Verschmelzungsprozesse entstanden sein dürften. Sie haben Massen im Bereich von mehreren Milliarden Sonnenmassen. Ein Teil des fehlenden interstellaren Gases wurde von diesen Supermassiven Schwarzen Löchern aufgenommen, was dessen geringe Konzentration in einer Elliptischen Galaxien erklärt. Die Elliptischen Galaxien werden nach ihrer Abplattung klassifiziert und nach den Typen E0 bis E7 unterschieden. E steht hierbei für Ellipse, während die nachgestellte Ziffer den Abplattungsgrad dieser Ellipse beschreibt. Mit zunehmender Zahl von E0 bis E7 steigt die Abplattung einer Elliptischen Galaxie. Daneben gibt es noch Sondertypen von Elliptischen Galaxien, wie z.B. Zwergellipsen.

Die Irregulären Galaxien zeigen keine besondere Symmetrie, verfügen jedoch über höhere Anteile von Interstellarer Materie sowie über relativ junge und blaue Sterne. Nach der vorherrschenden Vorstellung sollen Irreguläre Galaxien durch gravitative Wechselwirkung mit anderen Galaxien aus Spiralgalaxien und Elliptischen Galaxien entstanden sein. Durch diese Wechselwirkung wurde die ursprüngliche Galaxie stark deformiert und zeigt danach keine symmetrischen Strukturen mehr.

Von der Beobachtung her haben Spiralgalaxien einen Anteil von 77 Prozent an der Gesamtzahl der Galaxien. Tatsächlich haben sie nur einen Anteil von 33 Prozent. Für die Bestimmung aller Werte wurden die Galaxien bis in eine Entfernung von 9,1 Megaparsec (Mpc) berücksichtigt. Hierbei sind ein Mpc eine Million Parsec und ein Parsec 3,26 Lichtjahre. Ein Mpc entspricht also einer Entfernung von 3,26 Millionen Lichtjahren. Nach der Beobachtung scheinen Irreguläre Galaxien nur einen Anteil von 3 Prozent zu haben, doch stellen sie mit 54 Prozent den größten Anteil der Galaxien dar. Im Falle der Elliptischen Galaxien liegen der beobachtete Anteil bei 20 Prozent und der tatsächliche bei 13 Prozent.

Neben dieser Einteilung nach Galaxientypen gibt es noch weitere Typisierungen. Hervorgehoben werden sollen noch die Starburst-Galaxien und die Aktiven Galaxien. Doch gibt es natürlich noch andere Klassifizierungen. In Spiralgalaxien liegt die Sternbildungsrate bei etwa drei Sonnenmassen pro Jahr. Im Falle von Starburst-Galaxien kann die Sternbildungsrate bei 100 Sonnenmassen und mehr liegen. Hintergrund für die hohe Sternbildungsrate in Starburst-Galaxien können gravitative Wechselwirkungen oder Verschmelzungen mit anderen Galaxien sein. Eine weitere Ursache können Gasströme entlang von Balken in Balkenspiralen sein. Häufig findet die Sternbildung in Starburst-Galaxien in dichten Molekülwolken statt, welche einen relativ großen Staubanteil haben.

Die Strahlung der genannten Galaxien stammt im Wesentlichen von den Sternen, aus denen diese unter anderem bestehen. Die spektrale Verteilung der Galaxienstrahlung ist hauptsächlich eine Überlagerung der Spektren der Sternpopulationen. Es handelt sich in diesen Fällen um thermische Strahlung. Ein Stern hat in Abhängigkeit von seiner Oberflächentemperatur ein bestimmtes Strahlungsspektrum. Mit steigender Oberflächentemperatur ändert sich die Farbe eines Sterns von rot über orange, gelb, grün und blau zu violett. Am roten Ende des optischen Spektrums schließt sich der Infrarotbereich, am violetten Ende der ultraviolette Bereich an. Die Sternstrahlung wird im Ergebnis durch Kernfusion im Kern des Sterns erzeugt.

Bei Aktiven Galaxien bzw. Aktiven Galaktischen Kernen (Active Galactic Nucleus, AGN) kommt ein erheblicher Bruchteil der Leuchtkraft nicht von der thermischen Strahlung, sondern es handelt sich um umgewandelte Gravitationsenergie. Diese Energie wird bei der Akkretion von Materie in ein Supermassives Schwarzes Loch frei. In diesem Fall kommt es zum Einfall von Materie in dieses Supermassive Schwarze Loch. Dabei kommt es zur Herausbildung einer sogenannten Akkretionsscheibe, welche sich senkrecht zur Rotationsachse des Supermassiven Schwarzen Loches herausbildet. Diese besteht aus Gas und Staub. Der Drehimpuls dieser Gas- und Staubteilchen wird nach außen transportiert, so dass die Materie nach innen diffundieren und vom Supermassiven Schwarzen Loch aufgenommen werden kann. Dabei wird die Materie so stark aufgeheizt, dass Strahlung bis in den Röntgenbereich erzeugt wird. Um diese Akkretionsscheibe befindet sich noch ein dichter Staubtorus, welcher die Akkretionsscheibe mit Materie speist. Ein Großteil der erzeugten Strahlung ist allerdings nichtthermischer Natur. In Verbindung mit Magnetfeldern bilden sich in beiden Richtungen der Rotationsachse sogenannte Jets heraus. In diesen wird Materie aus geladenen Teilchen, sogenannte Plasmen, gebündelt und bewegt sich spiralförmig entlang der Magnetfeldlinien vom Supermassiven Schwarzen Loch weg. Dabei werden diese Plasmen, hauptsächlich Protonen, Heliumkerne und Elektronen sowie ein kleiner Anteil schwerere Kerne, auf annähernder Lichtgeschwindigkeit beschleunigt. Spiralförmig bewegte bzw. beschleunigte Plasmen erzeugen sogenannte Synchrotronstrahlung. Hierbei handelt es sich um elektromagnetische Strahlung, deren Frequenzen vom Radiowellenbereich bis in den Röntgenbereich reichen können. So strahlen Aktive Galaxien unter anderem besonders hell im Radiowellenbereich oder im Röntgenbereich.

Die Einteilung der Aktiven Galaxien in verschiedene Typen ist historisch bedingt und erfolgte auf Grund spektraler Unterschiede. Konkret können diese Unterschiede im Fehlen bestimmter spektraler Komponenten oder in deren unterschiedlicher Ausprägung bestehen. Neben diesen spektralen Unterschieden gibt es noch morphologische Unterschiede. Typen von Aktiven Galaxien sind: Quasare, Blazare, BL Lactertea, Radiogalaxien, Seyfertgalaxien, LINER-Galaxien und ULIG-Galaxien. Zusätzlich zu der Einteilung der Aktiven Galaxien nach bestimmten Typen gibt es auch noch innerhalb dieses Typs verschiedene Einteilungen. So wird oft bei den einzelnen Typen von Aktiven Galaxien noch zwischen Typ-1 und Typ-2 unterschieden. Zwischen dem Typ-1 und dem Typ-2 als Grenzfällen gibt es noch Zwischentypen, wie etwa Typ-1.6. Die unterschiedlichen Typen von Aktiven Galaxien werden überwiegend geometrisch gedeutet, wobei diese Deutung wahrscheinlich alleine nicht ausreichen wird. Je nach Orientierung des Staubtorus zum Beobachter ist der Blick ins Innere des aktiven galaktischen Kerns entweder frei oder nicht. Dies führt zu Unterschieden bei den zu beobachteten Eigenschaften einer Aktiven Galaxie.

Galaxien sind nicht die größten Strukturen im Universum, sondern bilden Gruppen und Haufen. Bei Gruppen und Haufen handelt es sich um die massereichsten gravitativ gebundenen Strukturen im Universum. Der Übergang zwischen Haufen und Gruppen ist hierbei fließend und die nachfolgende Definition nur ein Richtwert. Gruppen haben bis zu 50 Mitglieder in einer Sphäre mit einem Durchmesser von etwa $D < 1,5h^{-1}$ Mpc. Haufen haben mehr als 50 Mitglieder in einer Sphäre von etwa $D > 1,5h^{-1}$ Mpc. Gruppen und Haufen können sich wiederum noch zu Super-Haufen zusammenschließen, welche die größten Strukturen im Universum bilden.

Auch hinsichtlich der Masse gibt es eine mögliche Differenzierung als Richtwert. Gruppen beinhalten etwa $3 \cdot 10^{13}$ Sonnenmassen, Haufen etwa $3 \cdot 10^{14}$ Sonnenmassen und mehr. Insgesamt bewegt sich die Masse von Gruppen und Haufen in einem Bereich von 10^{12} bis 10^{15} Sonnenmassen. Ein Großteil der Masse von Galaxien bzw. Galaxiengruppen und -haufen liegt jedoch nicht in Form von Interstellarer Materie und Sterne, sondern in Form von sogenannter Dunkler Materie vor. Was hinter der Dunklen Materie steckt, ist noch ungeklärt. Vermutet werden massive Teilchen jenseits des Standardmodells. Die große Mehrheit der Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler favorisiert diese These. Von einer Minderheit werden auch Thesen vertreten, wonach die gängigen

Gravitationstheorien reformiert werden müssten. Nach diesen Thesen sollen sich bei größeren Abständen die gravitativen Gesetzmäßigkeiten ändern und so die Existenz der Dunklen Materie vortäuschen.

Bei der Galaxienentstehung dürfte Dunkle Materie eine entscheidende Rolle gespielt haben. Diese bildete zunächst Strukturen, an denen sich dann die normale Materie aus Atomen (baryonische Materie) anlagerte. Zunächst in Form von Gas, welches zu etwa drei Vierteln aus Wasserstoff und zu einem Viertel aus Helium bestand. Daraus bildeten sich dann die ersten Sterne. Mit der Galaxienentstehung dürften auch die Supermassiven Schwarzen Löcher entstanden sein. Zunächst bildeten sich kleine Galaxien. Durch Verschmelzungsprozesse unter den Galaxien entstanden immer größere Galaxien. Die ersten Galaxien entstanden etwa 400 Millionen Jahre nach dem Urknall. In der Frühphase der Galaxienentstehung dürften zunächst Aktive Galaxien entstanden sein.

Die zeitliche Entwicklung von Galaxien ist auch in die zeitliche Entwicklung des Universums als Ganzes eingebettet. Die von Albert Einstein im Jahr 1915 aufgestellte Allgemeine Relativitätstheorie sagte bereits die Expansion des Universums voraus. Hierbei expandiert die Raumzeit und zieht die Galaxien mit. Im Jahr 1929 entdeckte der Astronom Edwin Hubble, dass alle Galaxien sich von uns wegbewegen. Je weiter die Galaxien von uns entfernt sind, desto höher ist die sogenannte Fluchtgeschwindigkeit. D.h. der Abstand r zwischen zwei beliebigen Galaxien bzw. zwischen uns und einer Galaxie ist proportional zur Fluchtgeschwindigkeit v dieser Galaxien. Der Proportionalitätsfaktor zwischen der Entfernung und der Fluchtgeschwindigkeit ist der sogenannte Hubble-Parameter $H(t)$. Es gilt:

$$v = H(t) \cdot r$$

Bestimmt wird die Fluchtgeschwindigkeit der Galaxien mit Hilfe ihrer Spektren. Je höher die Fluchtgeschwindigkeit ist, desto weiter sind die Spektrallinien aufgrund des sogenannten Dopplereffekts in den langwelligen Bereich bzw. den roten Bereich des Spektrums verschoben. Daher wird auch von Rotverschiebung gesprochen. Für die Rotverschiebung z gilt:

$$z = v/c$$

Hierbei ist v wieder die Fluchtgeschwindigkeit und c die Lichtgeschwindigkeit. Die Rotverschiebung ist also ein direktes Maß für die Entfernung einer Galaxie. Die im Jahre 1929 nachgewiesene Fluchtgeschwindigkeit der Galaxien ist ein Beleg für das Standardmodell der Kosmologie.

Bestimmte Typen von Aktiven Galaxien, etwa von Quasaren oder Seyfertgalaxien, korrelieren mit ihrem Alter bzw. ihrer Entfernung von der Erde. Die Häufigkeit von Quasaren erreicht bei einer Rotverschiebung von $z = 2,0$ einen Höhepunkt, die von Seyfertgalaxien bei $z = 0,7$. Allgemein kann gesagt werden, dass die Häufigkeit eines bestimmten Typs von Aktiver Galaxie von seiner Leuchtkraft abhängt. So haben z.B. Quasare eine höhere Leuchtkraft als Seyfertgalaxien. Diese beschriebenen Sachverhalte stützen zusätzlich die These, wonach zeitliche Entwicklungseffekte bei den beobachtbaren Eigenschaften von Aktiven Galaxien eine Rolle spielen. Ein Quasar ist wahrscheinlich eine Aktive Galaxie in einer früheren Entwicklungsstufe als eine Seyfertgalaxie. Aktive Galaxien mit höherer Leuchtkraft scheinen sich zu einem früheren Zeitpunkt gebildet zu haben als solche mit geringerer Leuchtkraft.

Nachfolgend wird auf die Galaxien und Galaxienhaufen, die verschiedenen Arten von Galaxien sowie deren Aufbau und ihre Entwicklung ausführlich eingegangen.

2 Die Galaxis (Milchstraße)

Die Galaxis, in der unser Sonnensystem liegt, wird als Galaxis bezeichnet. Das Wort kommt aus dem Griechischen und bedeutet Milchstraße. Nach einer alten griechischen Sage soll die Göttin Hera Milch verschüttet haben, so dass die Milchstraße am Himmel entstanden ist. Tatsächlich ist die Milchstraße eine gewöhnliche Galaxis, welche aus rund 300 Milliarden Sternen und Interstellare Materie besteht. Die sichtbare Materie (Sterne + Interstellare Materie) macht etwa 400 Milliarden Sonnenmassen aus. Allerdings ist die Galaxis in einem sphärischen Halo aus Dunkler Materie gehüllt. Zusammen mit der Dunklen Materie beträgt die Gesamtmasse der Galaxis etwa 9,4 Billionen Sonnenmassen. Nach modernen Erkenntnissen ist die Milchstraße eine Balkenspiralgalaxie mit einem Durchmesser von etwa 100.000 Lichtjahren. Die Dicke der Scheibe beträgt etwa 3.000 Lichtjahre und die des Bulges rund 16.000 Lichtjahre. In dem Bulge bzw. im Zentrum der Galaxis befindet sich ein Supermassives Schwarzes Loch von rund vier Millionen Sonnenmassen.

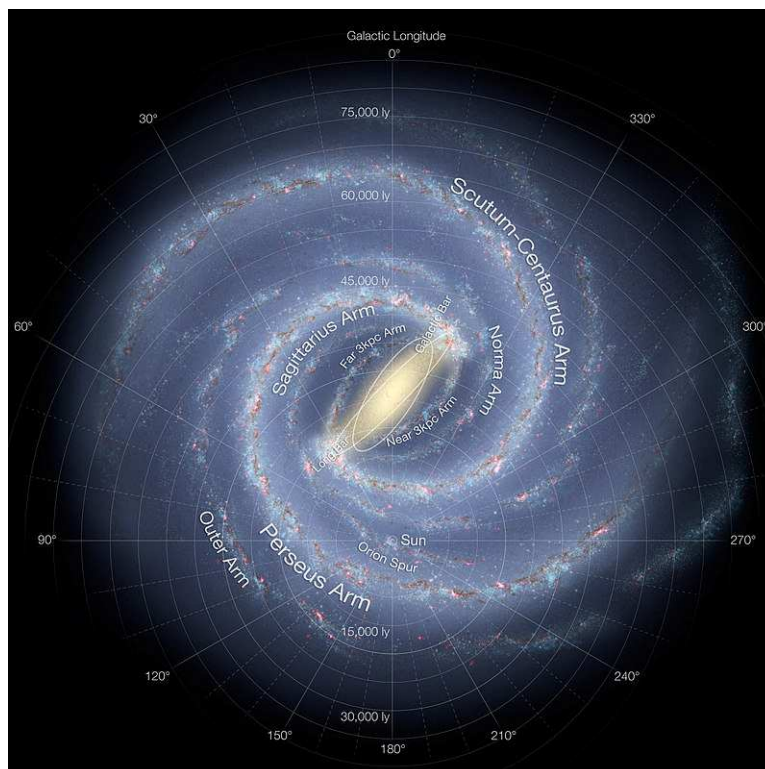


Bild 1: Die Galaxis als Balkenspirale / Quelle: Wikipedia

2.1 Der Aufbau der Galaxis

Die Galaxis besteht aus vier Bereichen:

- Die Scheibe;
- Die zentrale Verdickung (Bulge);
- Einem Halo, eine sphärische Verteilung von Sternen und Kugelsternhaufen um die Scheibe herum;
- Einem Halo aus Dunkler Materie, welche sich sphärisch um die Galaxis verteilt.

Nach einer Definition der Internationalen Astronomischen Union (IAU) liegt das Sonnensystem 8,5 Kiloparsec (kpc) vom galaktischen Zentrum entfernt. Ein Kiloparsec (kpc) entspricht 1.000 Parsec (pc) und ein Parsec (pc) entspricht 3,26 Lichtjahren (LJ). Tatsächlich dürfte die Entfernung des Sonnensystems vom galaktischen Zentrum etwa 8,0 kpc entsprechen, was einer Entfernung von

26.080 Lichtjahren entspricht. Ein Lichtjahr ist die Strecke, welche das Licht mit einer Geschwindigkeit von $c = 299.792.458$ m/s in einem Jahr zurücklegt. Das entspricht einer Entfernung von 9,46 Billionen Kilometern. In der Extragalaktischen Astronomie und der Kosmologie sind Entfernungen von Megaparsec üblich. Ein Megaparsec (Mpc) entspricht einer Million Parsec.

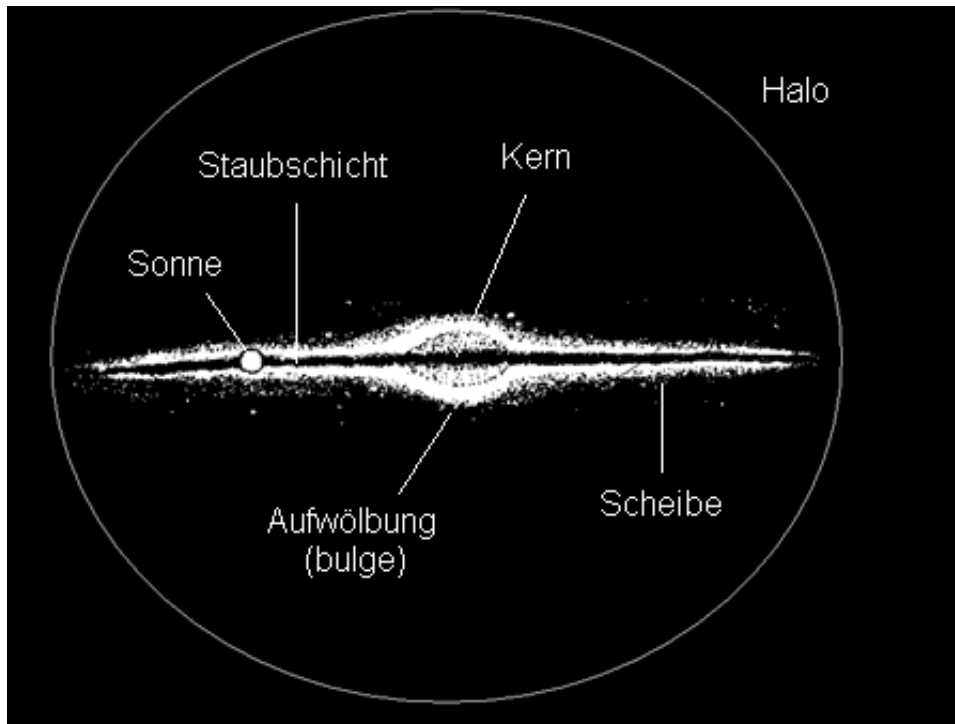


Bild 2: Der Aufbau der Galaxis / Quelle: www.sternwarte-eberfing.de

In der galaktischen Ebene und in den Spiralarmen befinden sich größere Konzentrationen von Interstellarer Materie. Diese Materie besteht aus Gas und Staub. Interstellar bedeutet zwischen den Sternen. Sie besteht zu etwa Dreiviertel aus Wasserstoff und zu etwa einem Viertel aus Helium. Alle schwereren Elemente, in der Astrophysik als Metalle bezeichnet, kommen nur in geringen Anteilen vor. Aus dieser Materie entstehen wiederum Sterne. Genaugenommen aus Wolken, welche aus Interstellarer Materie bestehen. Gewöhnliche Interstellare Materie hat eine Dichte von etwa einem Teilchen pro Kubikzentimeter. Dies ist praktisch ein ideales Vakuum. Wolken aus Interstellarer Materie haben Dichten von etwa 10 bis 100 Teilchen pro Kubikzentimeter. In diesen Bereichen der Galaxis findet also noch Sternbildung statt. Diese jungen Sterne werden unter dem Begriff „Population I“ zusammengefasst. Sie strahlen bläulich und haben einen höheren Anteil an sogenannten Metallen. Dies resultiert daher, dass Sterne der vorherigen Generation bereits durch Kernfusion Elemente mit höheren Massezahlen als Helium erzeugt und damit die Interstellare Materie angereichert haben. Die Sterne der Population I finden sich in Offenen Sternhaufen, in Sternassoziationen und in der Nähe von interstellaren Wolken aus Gas und Staub.

In dem Bulge und jenseits der galaktischen Ebene befinden sich ältere Sterne. Zum Teil befinden sie sich in der Endphase ihrer Entwicklung, wurden zu sogenannten Roten Riesen und strahlen daher rötlich. Diese Sterne werden unter dem Begriff „Population II“ zusammengefasst. In dem Bulge und außerhalb der galaktischen Ebene ist die Konzentration an Interstellarer Materie deutlich geringer und es kommt nicht mehr zu Sternbildungen. Aufgrund ihres höheren Alters ist der Anteil an Metallen in diesen Sternen deutlich geringer.

Von der Erde aus betrachtet liegt das Zentrum der Galaxis im Sternbild des Schützen. Eine exakte Definition des Zentrums ist schwierig. Allerdings umlaufen die Sterne der Galaxis dieses Zentrum,

welches im optischen Bereich durch interstellare Gas- und Staubwolken verdeckt wird. Im Radiobereich ist es beobachtbar und zeigt eine komplexe Struktur. Zunächst gibt es eine zentrale Scheibe aus nicht ionisiertem Wasserstoffgas, so genannte HI-Gebiete. Mit der römischen Ziffer I wird nicht ionisierte Materie beschrieben. Die Ziffer II würde einfach ionisierte Materie bzw. in unserem Fall einfach ionisierter Wasserstoff bezeichnen. Jede höhere Ziffer würde eine entsprechend höhere Ionisationsstufe bedeuten. Allerdings hat Wasserstoff nur ein Elektron in der Hülle, so dass es maximal eine Ionisationsstufe hat. Bei allen anderen Elementen sind auch höhere Ionisationsstufen, jedoch maximal so viele wie es Elektronen in der Hülle hat, möglich. Die Scheibe aus HI-Gas hat eine Ausdehnung von 100 bis 1.000 pc. Aus der Rotationsgeschwindigkeit dieser Scheibe kann eine Masse von rund 30 Millionen Sonnenmassen innerhalb eines Radius von 2.000 pc abgeleitet werden. Es gibt Radiofilamente, welche sich senkrecht zur galaktischen Scheibe ausdehnen. Des Weiteren gibt es sogenannte Supernova-Überreste. Im Zentralbereich gibt es auch zahlreiche Kugelsternhaufen und Gasnebel. Im Röntgenbereich sind die Emissions-Linien von sehr heißen Gasnebeln und Röntgen-Doppelsterne sichtbar.

Die inneren 8 pc bzw. 26,08 Lichtjahre enthalten die Radioquelle Sagittarius A. Diese besteht aus folgenden Komponenten:

- Einem zirkumstellaren molekularen Ring, welcher einen inneren Radius von 2 pc und einen äußeren von 8 pc hat. Dieser Torus hat eine auffällig scharfe innere Kante, welche wohl durch ein energetisches Ereignis im galaktischen Zentrum innerhalb der letzten 100.000 Jahre entstanden sein dürfte.
- Sagittarius Ost ist eine Quelle von nicht-thermischer Synchrotronstrahlung. Diese Strahlung entsteht aufgrund der spiralförmigen Beschleunigung von geladenen Teilchen um Magnetfeldlinien. Es dürfte sich bei dieser Quelle um den Überrest einer Supernova handeln, welche vor 100 bis 5.000 Jahren stattfand.
- Sagittarius West ist eine thermische Quelle aus heißem ionisiertem Wasserstoffgas. Diese HII-Region zeigt eine spiralförmige Struktur.
- Sagittarius A* ist eine starke kompakte Radioquelle, welche sich nahe des Zentrums von Sagittarius West befindet. Die Ausdehnung der Quelle beträgt weniger als 3 AE und strahlt im Millimeter- und Zentimeterbereich. Sagittarius A* dürfte das Zentrum der Galaxis sein und mit einem Supermassiven Schwarzen Loch assoziiert sein.

Um die Quelle Sagittarius A* konzentriert sich ein Sternhaufen mit hoher Sterndichte. Innerhalb von einer Millionen Jahre kann es hier zu nahen Sternbegegnungen kommen. Aufgrund der Dynamik der Sterne des Haufens kann auf eine zentrale Massenkonzentration geschlossen werden, welche eine Ausdehnung von nur etwa 0,01 pc und eine Masse von rund vier Millionen Sonnenmassen hat. Hierbei handelt es sich um das bereits angesprochene Supermassive Schwarze Loch. Dieses dürfte bei der Entstehung der Galaxis entstanden sein.

In einem sphärischen Halo mit einem Durchmesser von etwa 1.000 kpc befinden sich Sterne der Population II und Kugelsternhaufen. Die Kugelsternhaufen dürften zusammen mit der Galaxis entstanden sein und gehören daher zu deren ältesten Bestandteilen. Die Sterne in diesen Haufen sind sehr alt, rötlich und enthalten im Prinzip keine Metalle. Daher wird im Falle dieser Sterne auch von Angehörigen der extremen Population II gesprochen. Die Galaxis verfügt etwa über 150 bekannte Kugelsternhaufen. Der tatsächliche Anteil dürfte wesentlich höher sein. Im Falle der Milchstraße werden weitere 10 bis 20 unentdeckte Kugelsternhaufen vermutet. Doch muss dies noch nicht die Grenze sein. So verfügen die anderen Galaxien in der Regel über mehrere Hundert Kugelsternhaufen, so die Andromedagalaxie über rund 500.

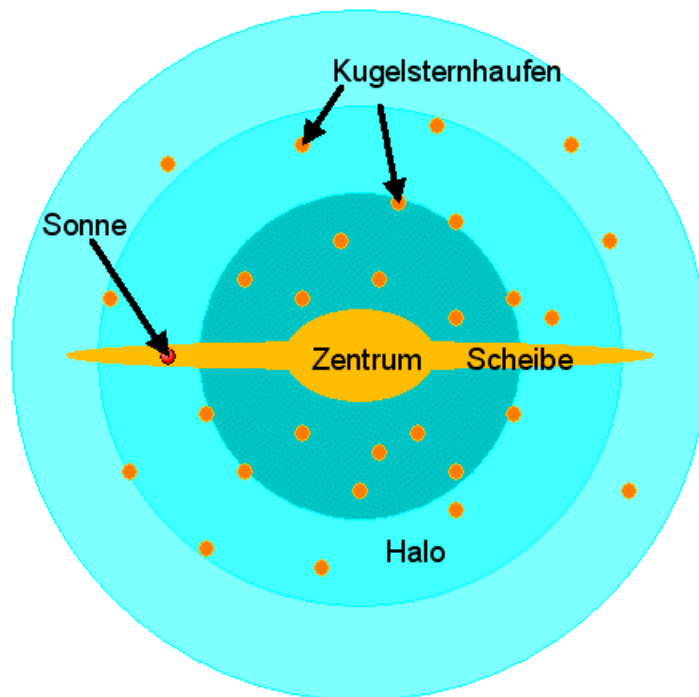


Bild 3: Die Galaxis mit Halo aus Kugelsternhaufen / Quelle: www.sternwarte-eberfing.de

Der noch viel größere Halo aus Dunkler Materie lässt sich nur indirekt nachweisen, aufgrund des Rotationsverhaltens der Sterne in der Galaxis. Für die Bewegung der Sterne um das galaktische Zentrum gelten die Keplerschen Gesetze. Bestünde die Galaxis nur aus der sichtbaren Materie, also aus Sternen und Interstellarer Materie, dann müsste die Rotationsgeschwindigkeit der Sterne um das galaktische Zentrum mit steigendem Abstand von diesem Zentrum abnehmen. Tatsächlich bleibt die Rotationsgeschwindigkeit jedoch konstant. Die plausibelste Erklärung hierfür ist die Annahme einer größeren Menge an Dunkler Materie, welche einen Anteil von rund 80 Prozent an der Gesamtmaterie hat. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass die sichtbare Materie aus Sternen und Interstellarer Materie nur einen Anteil von 20 Prozent an der Gesamtmaterie in der Galaxis ausmacht. Die Dunkle Materie wechselwirkt zwar gravitativ, nicht jedoch elektromagnetisch. Sie kann daher nur aufgrund ihrer gravitativen Wirkung auf sichtbare Materie indirekt wahrgenommen werden, ist selbst jedoch in allen Bereichen des elektromagnetischen Spektrums absolut unsichtbar. Was hinter der Dunklen Materie steckt, ist noch ungeklärt. Vermutet werden massive Teilchen jenseits des Standardmodells. Die große Mehrheit der Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler favorisiert diese These. Von einer Minderheit werden auch Thesen vertreten, wonach die gängigen Gravitationstheorien reformiert werden müssten. Nach diesen Thesen sollen sich bei größeren Abständen die gravitativen Gesetzmäßigkeiten ändern und so die Existenz der Dunklen Materie vortäuschen.

2.2 Dynamische Prozesse in der Galaxis

Die Galaxis ist eine normale Balkenspiralgalaxie. Ihre Spiralarme entstehen aufgrund von dynamischen Prozessen. Abschließend geklärt ist die Entstehung von Spiralarmen einer Galaxie noch nicht. Es muss einen Prozess geben, nach dem die Spiralarme als dauerhafte Strukturen erhalten bleiben. Wären die Spiralarme ein Relikt aus der Entstehungszeit der Galaxis, dann hätten sie aufgrund der Rotation der Milchstraße nicht dauerhaft weiter bestehen können. Nach der Dichtenwellentheorie entstehen die Spiralarme durch rotierende Dichtewellen. Die galaktische Scheibe, in der die Spiralarme eingebettet sind, ist gegenüber Störungen instabil. Diese Störungen breiten sich ähnlich wie Schallwellen aus. Dabei wachsen sie und ziehen Materie entlang von spiralförmigen Bahnen an. Allerdings rotieren diese Störungen nur mit der Hälfte der

Rotationsgeschwindigkeit der Galaxis. Das führt dazu, dass Materie durch solche Dichtewellen hindurchgeht und Gas, welches die galaktische Scheibe durchdringt, in spiralförmige Strukturen gebracht und verdichtet wird. Dort wo Materie verdichtet wird, kommt es im Ergebnis auch zur Bildung von Sternen. Aus diesem Grund befinden sich in den Spiralarmen hauptsächlich junge, bläuliche Sterne der Population I. Die Spiralstruktur ist hierbei quasi-stationär und bleibt erhalten. Das dort konzentrierte interstellare Gas definiert die Spiralarme und wird ständig für die Sternbildung verbraucht.

Die Objekte des sphärischen Halos, Sterne der Population II und Kugelsternhaufen mit Sternen der extremen Population II, bewegen sich auf elliptischen Bahnen mit großen Exzentrizitäten und großen Neigungen. Die Umlaufzeiten betragen etwa 100 Millionen Jahre. Dabei können die Kugelsternhaufen hinsichtlich ihrer Bahnen in zwei Gruppen eingeteilt werden:

- Zufällige Bewegungen, ohne Rotation um das galaktische Zentrum,
- Flachere Verteilung und Rotation um das Zentrum mit etwa der halben Rotationsgeschwindigkeit, welche normalerweise die Kreisbahngeschwindigkeit an dieser Stelle wäre.

Innerhalb dieses Halos befinden sich auch die Kleine und die Große Magellansche Wolke, welche Begleitgalaxien der Galaxis sind. Bei den beiden Magellanschen Wolken handelt es sich um irreguläre Zwerggalaxien. Allerdings ist der Übergang zwischen einem Kugelsternhaufen und einer Zwerggalaxie fließend. Im Halo ist ebenfalls auch Gas enthalten. Zur galaktischen Ebene hin nimmt die Dichte an Sternen stark zu. Etwa die Hälfte der Masse der Galaxis befindet sich innerhalb der Bahn der Sonne um das galaktische Zentrum. Die Sonne beschreibt eine annähernd kreisförmige Bahn um das galaktische Zentrum mit einem Radius von etwa 8 kpc und benötigt für einen Umlauf etwa 220 Millionen Jahre.

Insgesamt rotieren die Sterne um das galaktische Zentrum. Hierbei bleibt die Bahngeschwindigkeit dieser Sterne aufgrund der Existenz der Dunklen Materie mit zunehmendem Abstand zum galaktischen Zentrum weitgehend konstant. Der Geschwindigkeitsvektor eines Sterns lässt sich in zwei Komponenten zerlegen.

- Radialgeschwindigkeitskomponente (v_r)
- Tangentialgeschwindigkeitskomponente (v_t)

Die Radialgeschwindigkeitskomponente (v_r) ist die Geschwindigkeitskomponente, welche auf uns zu oder von uns weg gerichtet wird. Hierbei handelt es sich also um die Bewegung auf uns zu oder von uns weg. Gemessen wird diese mit Hilfe des optischen Dopplereffekts. Wenn sich eine Strahlenquelle auf uns zu bewegt, dann werden deren Wellen gestaucht. In diesem Fall nimmt die Wellenlänge der Strahlung ab bzw. ihre Frequenz zu. D.h. die Strahlung wird blauer und Spektrallinien werden in den blauen Bereich des Spektrums verschoben. Wenn sich eine Strahlenquelle von uns weg bewegt, dann werden deren Wellen gestreckt. In diesem Fall nimmt die Wellenlänge der Strahlung zu bzw. deren Frequenz ab. D.h. die Strahlung wird roter und Spektrallinien werden in den roten Bereich eines Spektrums verschoben. Die Wellenlänge im bewegten Zustand ist λ_{bew} , im Ruhezustand λ_0 . Der Unterschied beträgt $\Delta\lambda = \lambda_{bew} - \lambda_0$ und es gilt:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = v_r / c$$

(1)

Hierbei ist c die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum. Bei der Bestimmung der Radialgeschwindigkeitskomponente muss noch die Bewegung der Erde um die Sonne

berücksichtigt werden, welche mit einer Bahngeschwindigkeit von rund 30 km/s erfolgt. Die Messgenauigkeit liegt bei 10 m/s.

Die **Tangentialgeschwindigkeitskomponente** (v_t) gibt die Bewegung eines Sterns an der scheinbaren Himmelskugel an und wird als Eigenbewegung bezeichnet. Die Eigenbewegung eines Sterns hängt neben seiner tatsächlichen Geschwindigkeit auch von der Entfernung des Sterns von uns ab. Je weiter ein Stern entfernt ist, desto geringer ist auch seine Eigenbewegung. Daher können sehr viel weiter entfernte Sterne als Referenzpunkte benutzt werden. Die Gesamtgeschwindigkeit v eines Stern ergibt sich mit Hilfe des Satzes des Pythagoras zu:

$$v^2 = v_r^2 + v_t^2 \quad \text{bzw.} \quad \tan(\Theta) = v_t / v_r$$

(2)

2.3 Entfernungsbestimmungsmethoden innerhalb der Galaxis

In der Galaxis können verschiedene Methoden zur Entfernungsbestimmung herangezogen werden. Bei den parallaktischen Methoden erfolgt die Entfernungsmessung mit mathematisch-geometrischen Methoden.

Die **Trigonometrische Parallaxe** nutzt die scheinbare Verschiebung von relativ nahen Sternen gegenüber deutlich weiter entfernten Hintergrundsternen bei verschiedenen Blickwinkeln zur Entfernungsbestimmung. Hierbei ergeben sich die verschiedenen Blickwinkel bei einem Umlauf der Erde um die Sonne. Der zu messende Stern beschreibt gegenüber den weiter entfernten Hintergrundsternen dann eine Bewegung am Himmel, die sogenannte Parallaxe mit dem Winkel π . Wenn a die mittlere Entfernung Erde – Sonne sei, dann gilt für die Entfernung r des Sterns vom Beobachter:

$$\sin(\pi) = a/r$$

(3)

Die mittlere Entfernung Erde – Sonne beträgt $a = 149\,597\,870\,700$ m. Dies wird in der Astronomie als Astronomische Einheit (AE) definiert. Mit zunehmender Entfernung des Sterns wird seine Parallaxe immer kleiner, so dass sie immer schwieriger zu messen ist. Die Einheit der Parallaxe ist die sogenannte Parallaxesekunde (Parsec, pc). In einer Entfernung von 3,26 Lichtjahren von der Erde hat die Parallaxe den Wert 1 pc. D.h. ein Parsec entspricht einer Entfernung von 3,26 Lichtjahren.

Die **Säkulare Parallaxe** nutzt die Bewegung der Sonne zur Bestimmung der Entfernung r . Die Sonne bewegt sich mit 20 km/s in Richtung eines Punktes im Sternbild Herkules fort. Die hierbei zurückgelegte Strecke ist b . D.h. auf der Strecke b bewegt sich die Sonne entlang. Sie ist nach einer gewissen Zeit von einem Punkt der Strecke b zu einem anderen Punkt gelangt. Die Entfernung r ist der Radiusvektor, die Verbindungslinie zwischen der Sonne und dem Stern. Diese Verbindungslinie schneide die Strecke b der Sonne mit einem bestimmten Winkel, welcher von der Position der Sonne auf der Strecke b abhängt. In der ersten zu messenden Position hat der Winkel den Wert α . Nach einer gewissen Zeit ist die Sonne auf der Strecke b weitergewandert. In der dann zu messenden Position hat der Winkel zwischen der Strecke b und der Entfernung r den Wert β . Für die Entfernung r ergibt sich dann mit Hilfe des Sinussatzes (aus der Geometrie) folgende Beziehung:

$$r = b \cdot \sin(\alpha) / \sin(\beta - \alpha)$$

(4)

Die **Sternstromparallaxe** nutzt die Tatsache, dass sich alle Mitglieder eines Sternhaufens in dieselbe Richtung zu einem Fluchtpunkt bewegen. Auch hierbei wird in Bewegungsrichtung eine bestimmte Strecke b zurückgelegt. Die Verbindungslinie bzw. Entfernung r Beobachter – Stern schneide diese Strecke b mit dem Winkel Θ . Die Geschwindigkeit lässt sich, wie bereits angesprochen in zwei Komponenten zerlegen. Die Geschwindigkeitskomponente auf uns zu oder von uns weg wird als Radialgeschwindigkeit v_r bezeichnet und die auf der scheinbaren Himmelskugel als Eigenbewegung μ bzw. tangentielle Geschwindigkeitskomponente v_t . Für die Zerlegung der Geschwindigkeit v in ihre Komponenten gilt:

$$v_r = v \cos(\Theta)$$

$$v_t = v \sin(\Theta)$$

(5)

Für den Zusammenhang zwischen Eigenbewegung und Tangentialgeschwindigkeit gilt:

$$v_t = \mu r = \mu / \pi$$

(5a)

Hierbei ist π wieder die Parallaxe, welche in Bogensekunden ($''$) angegeben wird. Die Eigenbewegung μ wird ebenfalls in Bogensekunden angegeben und die Radialgeschwindigkeit v_r in km/s. Für den Wert von π , aus dem sich über die Beziehung (3) der Wert für die Entfernung r ergibt, gilt:

$$\pi = 4,74 \mu / v_r \tan(\Theta)$$

(6)

Der Faktor 4,74 ergibt sich aus der Erdbahngeschwindigkeit dividiert durch 2π . Hierbei wird angenommen, dass die Erdbahn annähernd kreisförmig ist und bei einem Einheitsradius mit dem Wert $r = 1$ den Kreisumfang 2π hat. Die mittlere Bahngeschwindigkeit der Erde beträgt rund 30 km/s.

Im Falle der **Dynamischen Parallaxe** wird das dritte Keplersche Gesetz auf Doppelsterne angewandt. Das dritte Keplersche Gesetz stellt einen Zusammenhang zwischen der großen Halbachse a der Bahnellipse eines Himmelsobjektes mit seiner Masse m und seiner Umlaufperiode T her. Ein Stern umkreist einen anderen Stern auf einer Bahnellipse a mit einer Umlaufzeit T . Die Massen der beiden Sterne betragen m_1 und m_2 . Nach dem dritten Keplerschen Gesetz gilt dann:

$$a^3 / T^2 = m_1 + m_2$$

(7)

Für die Parallaxe gilt:

$$\pi = a['] / a[AE]$$

(8)

Hierbei ist a die große Halbachse des einen Sterns, welcher den anderen umläuft, in Bogensekunden angegeben. Diese muss bestimmt werden. Als Bezugsgröße für die zu bestimmende Parallaxe gilt wieder die mittlere Entfernung Erde – Sonne, welche in AE angegeben wird. Aus den Gleichungen (7) und (8) ergibt sich dann:

$$\pi = a[\text{''}] / [T^2(m_1 + m_2)]^{1/3}$$

(9)

Im Falle der **Durchmesser­methode** wird der scheinbare Durchmesser d eines Objektes in Bogensekunden (``) mit seinem tatsächlichen Durchmesser D in AE verglichen. Für die Parallaxe π in Bogensekunden gilt dann Gleichung (8) analog:

$$\pi = d[\text{''}] / D[\text{AE}]$$

(10)

Bei dieser Methode muss allerdings der tatsächliche Durchmesser des Objektes bekannt sein.

Bei der **Photometrischen Parallaxe** wird zur Entfernungsbestimmung r die scheinbare Helligkeit eines Stern m mit seiner absoluten Helligkeit M verglichen:

Das Verhältnis zwischen der scheinbaren Helligkeit m und der absoluten Helligkeit M eines Sterns liefert uns seine Entfernung r :

$$m - M = -2,5 \log_{10} (10 \text{pc}/r)^2 = -5 + 5 \log_{10} r$$

(11)

2.4 Die Entwicklung der Galaxis

Die Galaxis ist etwa vor 13 Milliarden Jahren aus einer Ansammlung von Gas entstanden. Quantenfluktuationen führten direkt nach dem Urknall an bestimmten Orten zu höheren Materiedichten. Aufgrund der sprunghaften Ausdehnung des Universums um den Faktor 10^{30} während der Inflationsphase wurden diese Fluktuationen ins makroskopische übertragen. Danach handelte es sich um Massenfluktuationen, also Orte mit höherer Massendichte und Gravitation. Aufgrund der höheren Gravitation wurde noch mehr Masse angezogen und konzentriert. Allerdings konnte sich zunächst nur die Dunkle Materie daran beteiligen. Diese unterliegt nicht der elektromagnetischen Wechselwirkung und war daher bei der Strukturbildung von der gegebenen Temperatur unabhängig. Erst nach etwa 400 Millionen Jahren war das Universum so weit abgekühlt, dass das baryonische Gas, welches aus Atomen oder Molekülen aufgebaut ist, den Strukturen aus Dunkler Materie folgen konnte. Dieses Gas bestand zu Dreivierteln aus Wasserstoff und zu einem Viertel aus Helium. Schwerere Elemente, in der Astrophysik Metalle genannt, kamen noch nicht vor.

In diesem Gas kam es zu dynamischen Prozessen, welche zu höheren Massenkonzentrationen an bestimmten Orten dieser Wolke führten. Dort kollabierte die Gaswolke und die ersten Sterne entstanden. Diese ersten Sterne waren mit mehreren Hundert Sonnenmassen sehr massenreich und hatten daher nur eine sehr kurze Lebensdauer. Solch massereiche Sterne konnten nur aufgrund der reinen Zusammensetzung aus Wasserstoff und Helium sowie des Fehlens der Metalle entstehen. Sie reicherten die Galaxis erst mit den Metallen an und werden als Sterne der Population III bezeichnet.

Aufgrund der Verteilung der Objekte des Halos kann abgeschätzt werden, dass die Galaxis aus einer Wolke von etwa 100.000 pc Durchmesser entstand. Dies entspricht einem Durchmesser von 326.000 Lichtjahren. Zunächst bildeten sich die Kugelsternhaufen. Aus der restlichen Materie bildete sich eine flache Scheibe, welche sich zunehmend verdichtete. Mit zunehmender Dichte kam es zu Phasen mit erhöhter Sternbildung. In diesen Fällen wird von Bursts in der Sternbildung gesprochen.

Im Rahmen der Entwicklung der Galaxis dürfte es auch immer wieder Wechselwirkungen mit anderen Galaxien gegeben haben. Galaxien bilden Galaxiengruppen und -haufen. Innerhalb des Haufens beträgt der durchschnittliche Abstand zwischen den Galaxien etwa das 20-fache der Durchmesser von Galaxien. Dies führt zu häufigen Kollisionen von Galaxien und den damit verbundenen Wechselwirkungen. Es wird auch diskutiert, ob die Spiralarme von Galaxien nicht auch aufgrund der Gezeitenwirkung durch andere Galaxien entstanden sein könnten. Trotz dieser Galaxienkollisionen ist eine Kollision zwischen einzelnen Sternen sehr unwahrscheinlich. Im Vergleich zu den durchschnittlichen Abständen der Galaxien ist der von den Sternen um ein vielfaches höher. In einigen 100 Millionen Jahren wird eine erst kürzlich entdeckte Zwerggalaxie mit der Galaxis kollidieren. Die Andromeda-Galaxie, welche über eine Billion Sterne und eine Masse von 800 Milliarden Sonnenmassen aus sichtbarer Materie verfügt, wird in etwa drei bis vier Milliarden Jahren mit der Galaxis kollidieren. Dabei werden beide Galaxien miteinander verschmelzen und es wird eine Elliptische Galaxie entstehen. Der Verschmelzungsprozess wird etwa drei Milliarden Jahre dauern.



Bild 4: Die Galaxis / NASA

2.5 Die Galaxis als Galaxie

Die Galaxis hat den Vorteil, dass wir aufgrund der relativen Nähe zu ihr viele Details studieren können. Da wir allerdings ein Teil von ihr sind, können wir sie nicht als Ganzes von außen betrachten und das ist wiederum ein Nachteil. Dennoch gilt heute als gesichert, dass die Galaxis bzw. Milchstraße eine normale Galaxie ist. Die Galaxis ist eine Balkenspiralgalaxie. Ihre Eigenschaften entsprechen grundsätzlich denen von anderen Spiralgalaxien bzw. Balkengalaxien. Wenn im nachfolgenden Kapitel auf Spiralgalaxien bzw. Balkengalaxien eingegangen wird, dann wird sich vieles mit diesem Kapitel überschneiden.

3 Normale Galaxien

Die Strahlung von sogenannten normalen Galaxien stammt im Wesentlichen von den Sternen, aus denen diese unter anderem bestehen. Die spektrale Verteilung der Galaxienstrahlung ist hauptsächlich eine Überlagerung der Spektren der Sternpopulationen. Es handelt sich in diesen Fällen um thermische Strahlung. Ein Stern hat in Abhängigkeit von seiner Oberflächentemperatur ein bestimmtes Strahlungsspektrum. Mit steigender Oberflächentemperatur ändert sich die Farbe eines Sterns von rot über orange, gelb, grün und blau zu violett. Am roten Ende des optischen Spektrums schließt sich der Infrarotbereich, am violetten Ende der ultraviolette Bereich an. Die Sternstrahlung wird im Ergebnis durch Kernfusion im Kern des Sterns erzeugt. Bei Aktiven Galaxien ist dies anders. Dort beruht ein Großteil ihrer Ausstrahlung auf nicht-thermische Prozessen in ihren Aktiven Galaktischen Kernen. Daher soll in dieser Abhandlung zwischen Normalen und Aktiven Galaxien unterschieden werden.

3.1 Die Katalogisierung von Galaxien

Galaxien sind in mehreren Katalogen aufgeführt. Am bekanntesten sind der „Messier-Katalog“ („M“) von Charles Messier (1730 – 1817) und der „New General Catalogue“ („NGC“) von Johan Ludvig Emil Dreyer (1852 – 1926). Der Messier-Katalog wurde erstmals im Jahre 1771 und bis zum Jahre 1784 jeweils zweimal in erweiterter Version veröffentlicht. Heute enthält er 110 Objekte, welche von M1 bis M110 gekennzeichnet sind. Nicht alle aufgeführten Objekte sind allerdings Galaxien. Aufgeführt sind auch Nebel, wie der Krebsnebel M1 oder der Orionnebel M42. Als Galaxien aufgeführt sind die Andromeda-Galaxie M31, die Dreiecksgalaxie M33 und die Whirlpoolgalaxie M 57. Objekte des Messier-Kataloges sind besonders geeignet für Beobachtungen im amateur-astronomischen Bereich. Der im Jahre 1888 veröffentlichte New General Catalogue beinhaltet ebenfalls nicht nur Galaxien. Auch dieser wurde in den Jahren 1895 und 1908 jeweils erweitert. Diese Erweiterungen werden mit dem Index IC I und IC II gekennzeichnet. In diesem Katalog werden die Objekte mit NGC-Nummern bezeichnet. Die Andromeda-Galaxie hat zum Beispiel in diesem Katalog die Bezeichnung NGC 224.

Es gibt auch Kataloge speziell für Galaxien. Der „Shapley-Arms-Katalog“ von Harlow Shapley (1885 – 1972) und Adelaide Ames (1900 - 1932) wurde bis zum Jahre 1932 veröffentlicht und enthielt 1249 Objekte. Im Jahre 1981 veröffentlichten Allan Sandage (1926 – 2010) und Gustav Tamman (geb. 1932) eine aktualisierte Version dieses Kataloges unter den Namen „Revised Shapley-Ames Catalog“ („RSA“). Die ursprüngliche Galaxienliste wurde beibehalten, mit der Ausnahme von drei Objekten die nach heutigem Wissensstand keine Galaxien sind. Die Informationen zu den 1246 einzelnen Galaxien wurden aktualisiert und wesentlich erweitert.

Der „Reference Catalogue of Bright Galaxies“ („RC“) wurde von Gérard-Henri de Vaucouleurs (1918 – 1995) und seinen Mitarbeitern veröffentlicht. Die erste Version (RC1) wurde im Jahre 1964, die letzte (RC3) im Jahre 1991 veröffentlicht. Der RC ist die bisher umfangreichste Katalogisierung von Galaxien. So beinhalten alle Versionen grundlegende Daten wie Durchmesser, Helligkeit, Farbe, Rotverschiebung und Klassifizierung. Des Weiteren sind die Identifikationen mit anderen Galaxienkatalogen und Literaturreferenzen aufgeführt. Der RC1 (1964) enthielt Daten für zunächst 2599 Objekte. Später stellte sich heraus, dass sechs der aufgeführten Objekte keine Galaxien waren. Der im Jahre 1976 veröffentlichte RC2 enthielt 4364 Objekte. Auch hier stellte sich später heraus, dass zwei dieser Objekte keine Galaxien waren. Die aktuelle Version ist der im Jahre 1991 veröffentlichte RC3, in welchem 23024 Galaxien katalogisiert sind. Die Kataloge RC1 und RC2 enthielten die Daten bekannter Galaxien, ohne dabei die Vollständigkeit bis zu einer bestimmten Grenze anzustreben. Die Version RC3 hingegen strebt die Vollständigkeit für alle Galaxien mit Durchmessern von über einer Bogenminute, einer Blauhelligkeit von unter 15.5 Magnituden, und einer Rotverschiebung von unter 15000 km/s an. Von den insgesamt 23.024 aufgeführten Galaxien erfüllen 11897 diese Bedingungen.

Der im Jahre 1989 veröffentlichte „Principal Galaxies Catalogue“ („PGC“) enthält sogar mehr als 70.000 Galaxien. Aufgrund der sich zunehmend rasant entwickelten Beobachtungstechnik werden immer mehr Galaxien entdeckt, welche katalogisiert werden müssen. So gibt es verschiedene Durchmusterungsprogramme zur Erfassung von Galaxien, wie etwa den „Millennium Galaxy Catalogue“ (MGC). Der „Sloan Digital Sky Survey“ („SDSS“) besteht aus zwei Teilen. Der erste Teil (SDSS-I) wurde in den Jahren 2000 bis 2005 erstellt und der zweite Teil (SDSS-II) von 2005 bis 2008. In diesem Katalog sind mehr als 930.000 Galaxien verzeichnet. Dies wird nicht das Ende sein. Das sichtbare Universum dürfte etwa 200 Milliarden Galaxien beinhalten.

3.2 Die Typisierung von Galaxien

Es gibt verschiedene Klassifikationen für Galaxien. Am bekanntesten ist die sogenannte Hubble-Klassifikation von Edwin Powell Hubble (1885 – 1953), welche er im Jahre 1936 entwickelt hat. Nach dieser werden Galaxien in folgende Gruppen unterteilt:

- Spiralgalaxien
- Elliptische Galaxien
- Irregulärer Galaxien



Bild 5: Die Hubble-Klassifikation / Quelle: Wikipedia.org

Im Falle der Spiralgalaxien wird noch zwischen normalen Spiralgalaxien und Balkenspiralgalaxien unterschieden. Seinerzeit dachte Hubble, dass seine Klassifizierung eine Entwicklungssequenz der Galaxien aufzeigt. So werden noch heute Elliptische Galaxien als frühe Galaxientypen, die Spiral- bzw. Balkenspiralgalaxien als mittlere Typen und die Irregulären Galaxien als späte Typen bezeichnet. Dies ist jedoch falsch, da tatsächlich mit der Hubble-Sequenz keine Entwicklungssequenz beschrieben wird. Die Hubble-Klassifikation wird noch überlagert von der Unterteilung der Galaxien in Normale Galaxien und Aktive Galaxien. Dann kann bei den Galaxien noch aufgrund der Sternbildungsrate unterschieden werden zwischen Starburst-Galaxien mit Sternbildungsraten von 100 Sonnenmassen pro Jahr und mehr sowie mit normalen Sternbildungsraten von etwa 3 Sonnenmassen pro Jahr.

Es gibt noch andere Typisierungen von Galaxien. Nach Gérard-Henri de Vaucouleurs gibt es drei Unterscheidungskriterien für Galaxien:

1. Spiralstruktur: E (elliptisch) \leftrightarrow S (Spiralförmig) \leftrightarrow Im (Irregulär), vergleichbar der Hubble-Klassifikation.
2. Balken: A (gewöhnlich) \leftrightarrow B (Balken) \leftrightarrow AB (Zwischenklassen).
3. Ringförmigkeit: s (kein Ring, sogenannte s-Form) \leftrightarrow r (Ring) \leftrightarrow sr (Zwischenklassen)

Zusammen mit Philip C. Keenan (1908 – 2000) entwickelte William Wilson Morgan (1906 – 1994) am Yerkes-Observatorium das sogenannte Yerkes-Morgan-Schema. Nach diesem wird zwischen dem Spektrum, der Form und der Neigung der Galaxien unterschieden:

1. Spektrum: Von a wo A-Sterne dominieren bis hin zu k wo K-Sterne dominieren (Spektralklassen).
2. Form: B Balkenspiralen, D rotationssymmetrisch, E elliptisch, E p elliptisch mit Staubabsorption, I irregulär, L Low surface brightness, N kleiner heller Kern, S Spirale.
3. Neigung: 1 Galaxie von oben gesehen bis 9 Galaxie von der Seite gesehen.

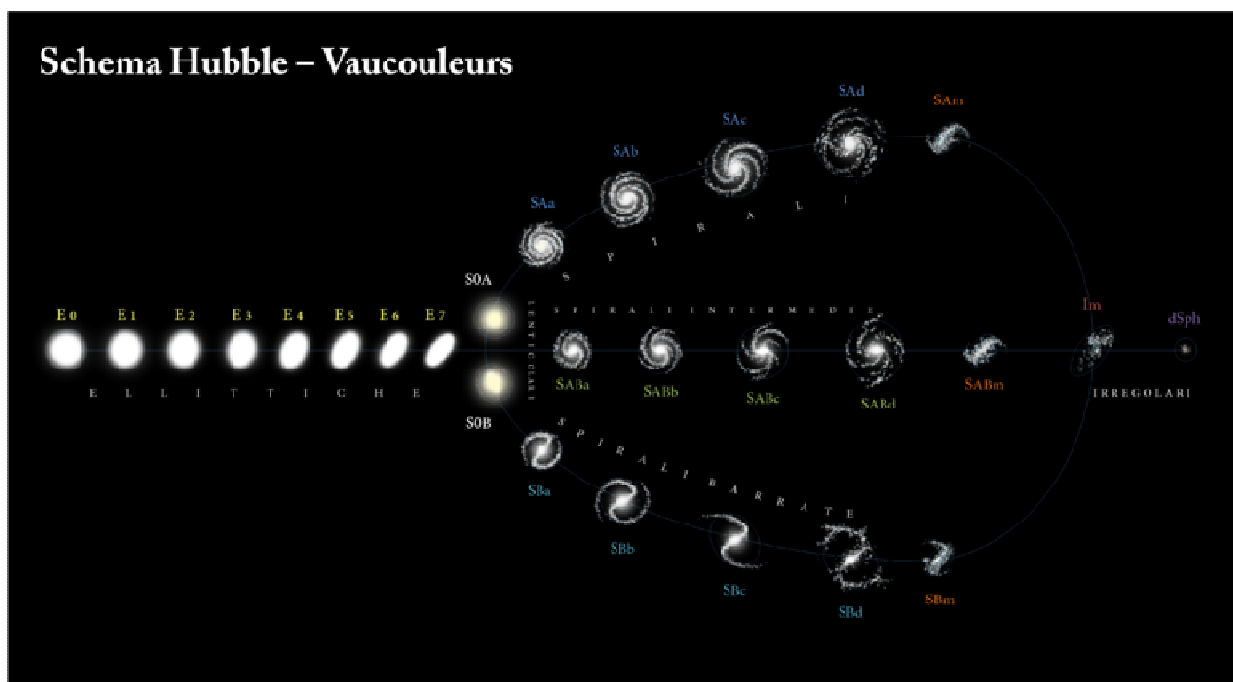


Bild 6 Hubble-Sequenz und Klassifikation nach Vaucouleurs / Quelle: Wikipedia.org

3.3 Spiral- und Balkenspiralgalaxien

Die Spiralgalaxien bestehen aus einer Scheibe, welche eine Spiralstruktur hat. In dieser Scheibe befindet sich eine zentrale Verdickung, welche als Bulge bezeichnet wird. Der Bulge ist der schwach abgeplattete Kern der Spiralgalaxie, welcher morphologisch einer elliptischen Galaxie ähnelt. Heute gilt als sicher, dass sich in einem Galaxiekern ein Supermassives Schwarzes Loch befindet, welches mehrere Millionen bis mehrere Milliarden Sonnenmassen haben kann. Im Falle der Balkenspiralgalaxie ist der Kern balkenförmig ausgebildet, an den Enden dieser Balken setzen dann die Spiralarme an. Die Spiralarme werden durch Dichtewellen erzeugt. In ihnen ist die Dichte an Interstellarer Materie größer und entsprechend ist auch die Sternbildungsrate am höchsten. Somit findet in Spiralgalaxien auch noch aktive Sternentstehung statt. Allerdings gibt es zwei

Populationen von Sternen in einer Spiralgalaxie. Der Population I (Scheibenpopulation) gehören relativ junge und blaue Sterne an, welche sich überwiegend im Bereich der galaktischen Scheibe und der Spiralarme befinden. Im Gegensatz dazu gehören der Population II eher alte und rote Sterne an, welche in der Bulge konzentriert sind. Die Spiralgalaxien werden mit dem Buchstaben S bezeichnet. Mit zunehmender Öffnung der Spiralarme erfolgt eine Klassifizierung von a bis c. So haben Spiralgalaxien vom Typ Sa eng anliegende Spiralarme und die von Typ Sc weit geöffnete Spiralarme. Diese Klassifizierung gilt auch für Balkenspiralen, welche mit SB bezeichnet werden. Je nach Öffnung der Balkenspiralen gibt es dann die Klassifizierungen von SBa bis SBc. Zwischen den Spiralgalaxien und den Elliptischen Galaxien gibt es einen Übergangstypen, welcher mit S0 bzw. SB0 bezeichnet wird.

Spiral- und Balkenspiralgalaxien bestehen wie die Galaxis bzw. Milchstraße aus vier Bereichen:

- Die Scheibe;
- Die zentrale Verdickung (Bulge);
- Einem Halo, eine sphärische Verteilung von Sternen und Kugelsternhaufen um die Scheibe herum;
- Einem Halo aus Dunkler Materie, welche sich sphärisch um die Galaxis verteilt.

In der galaktischen Scheibe sind die Spiralarme eingebettet. Nach der gängigen These entstehen sie durch Dichtewellen, wie es im Falle der Galaxis in Kapitel 2.2 bereits beschrieben wurde. Allerdings dürften auch galaktische Magnetfelder für die Dynamik der Spiralarme verantwortlich sein. Spiralarme sind Orte mit höherer Dichte von Sternen und Interstellarer Materie. Daher findet in den Spiralarmen noch aktive Sternentstehung statt. Pro Jahr entstehen in Normalen Galaxien etwa zwei bis drei Sonnenmassen an neuen Sternen. Infolgedessen finden sich in den Spiralarmen eine Vielzahl massereicher, junger blauer und blauweißer Sterne von den Spektraltypen O und B. Diese Sterne werden wie bereits beschrieben unter dem Begriff Population I zusammengefasst. Insgesamt ist die Dichte der Interstellaren Materie in der galaktischen Scheibe höher als in anderen Bereichen einer Spiral- oder Balkenspiralgalaxie.

Im Zentrum der galaktischen Scheibe befindet sich eine Verdickung, der Bulge. Der Bulge ist der schwach abgeflachte Kern einer Galaxie. In diesem Kern befindet sich typischerweise ein Supermassives Schwarzes Loch mit mehreren Millionen bis mehreren Milliarden Sonnenmassen. Diese Supermassiven Schwarzen Löcher dürften bei der Entstehung der Galaxien entstanden sein. In Abhängigkeit von der Masse des Supermassiven Schwarzen Loches ergibt sich eine charakteristische Geschwindigkeitsverteilung (Geschwindigkeitsdispersion) der dieses umgebenden Sterne. Aus dieser Geschwindigkeitsdispersion kann die Masse des Supermassiven Schwarzen Loches abgeleitet werden. In dem Bulge befindet sich eine Vielzahl an alten, rötlichen Sternen, welche unter dem Begriff Population II zusammengefasst werden. Der Bulge ist im Prinzip eine Elliptische Galaxie bzw. eine Elliptische Galaxie ist ein Bulge ohne Scheibe.

Um die Spiral- und Balkengalaxie gibt es eine sphärische Verteilung von Kugelsternhaufen, was als galaktisches Halo bezeichnet wird. Die Kugelsternhaufen sind bei der Entstehung der Galaxie entstanden und beinhalten die ältesten Sterne einer Galaxie. Daher wird in diesem Fall auch von Sternen der extremen Population II gesprochen. Kugelsternhaufen bestehen aus etwa 100.000 Sternen. Es gibt Anzeichen dafür, dass sie mittelschwere Schwarze Löcher mit einigen 1.000 bis 100.000 Sonnenmassen beinhalten.

Aus dem Rotationsverhalten von Spiralgalaxien lässt sich ableiten, dass ein Großteil der Masse aus nicht sichtbarer Materie besteht. Würde eine Galaxie nur aus sichtbarer Materie bestehen, dann würden sich die äußeren Bereiche dieser Galaxie nach den Keplerschen Gesetzen um das

Galaxiezentrum bewegen. In diesem Fall würde die Rotationsgeschwindigkeit mit zunehmendem Abstand vom Zentrum abnehmen. Tatsächlich wird jedoch beobachtet, dass die Rotationsgeschwindigkeit mit zunehmendem Abstand vom Zentrum konstant bleibt.

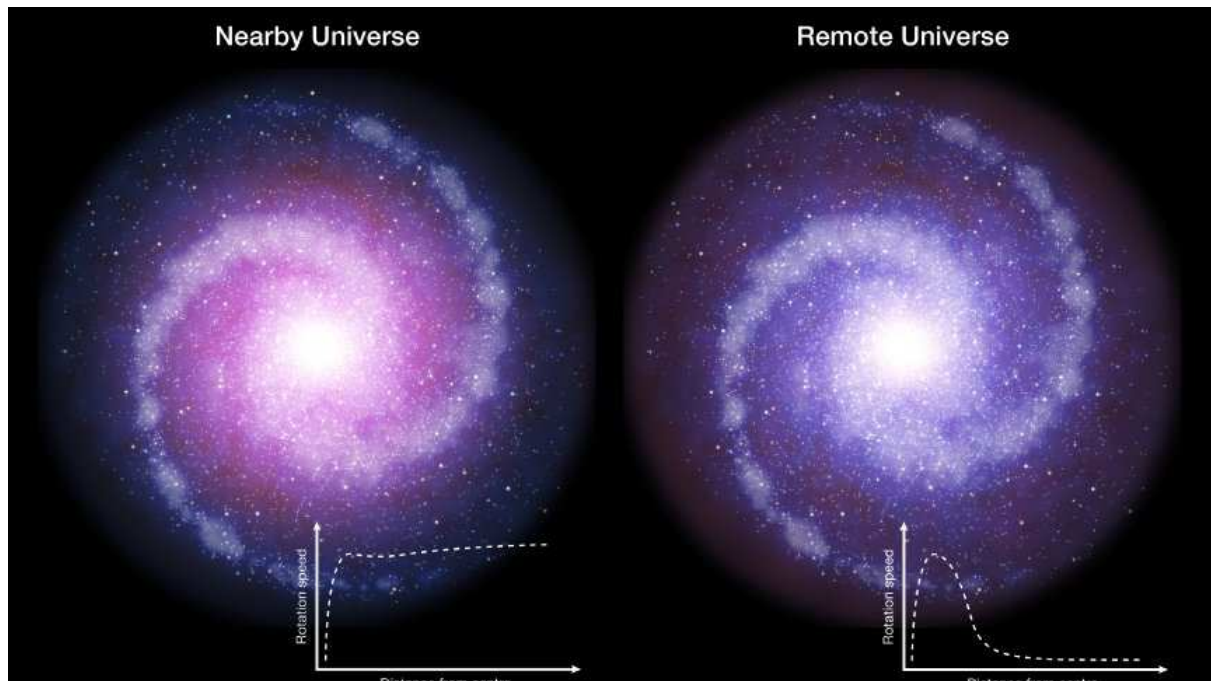


Bild 7: Galaxierotation mit und ohne Dunkler Materie / Quelle: www.spiegel.de

Die Dunkle Materie bildet einen noch viel größeren Halo als die Kugelsternhaufen und umgibt eine Galaxie sphärisch. Eine ausführlichere Darstellung zur Dunklen Materie in Galaxien findet sich in Kapitel 2.1 Der Aufbau der Galaxis. Nachfolgend ein Bild von der Verteilung der Dunklen Materie.



Bild 8: Das Halo aus Dunkler Materie um einer Galaxie / Quelle: www.spiegel.de

In den nachfolgenden Grafiken wird der in diesem Unterkapitel skizzierte Aufbau von Spiral- und Balkenspiralgalaxien einmal von oben und einmal von der Seite dargestellt:

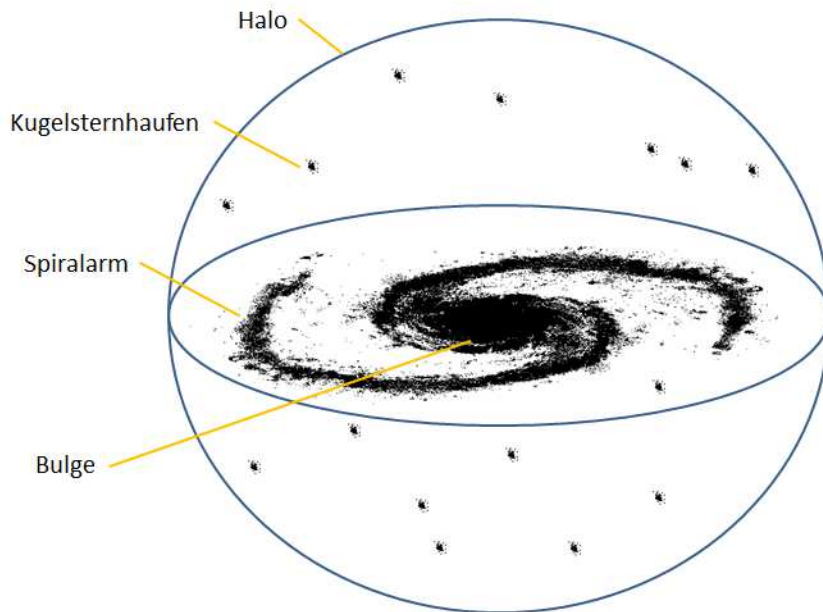


Bild 9: Der Aufbau einer Spiral- und Balkenspiralgalaxie (Draufsicht) / Quelle: wikipedia.org

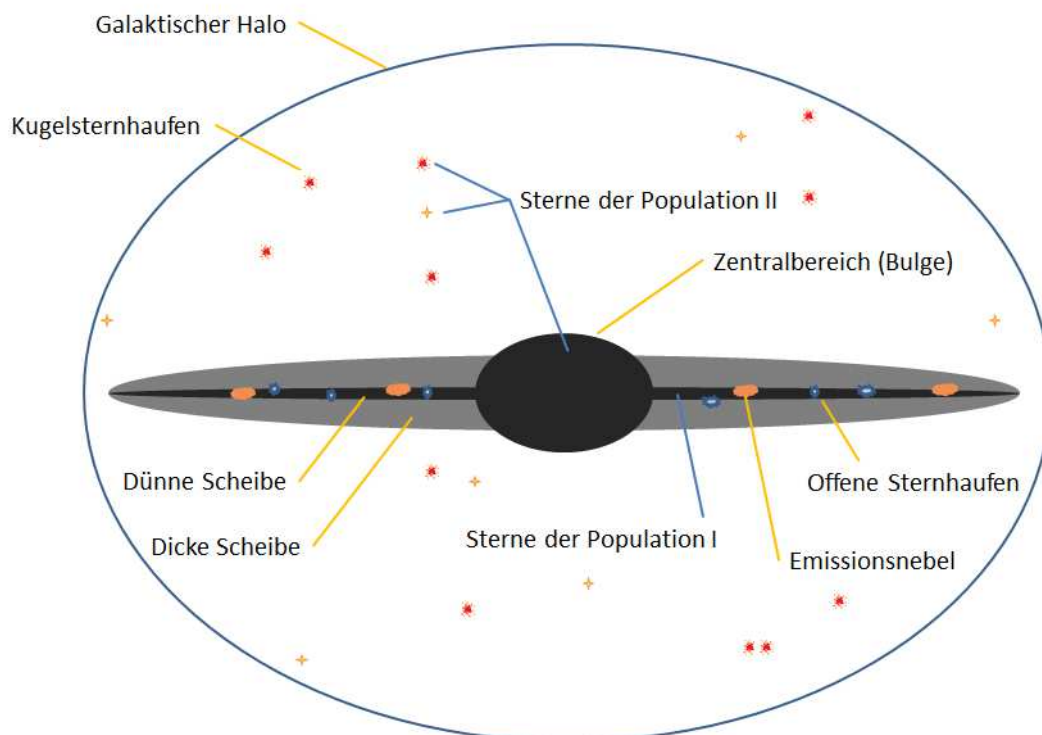


Bild 10: Der Aufbau einer Spiral- und Balkenspiralgalaxie (Seitenansicht) / Quelle: wikipedia.org

Die Unterklassifikation der Spiral- und der Balkenspiralgalaxien wird durch die Öffnung der Spiralarme und die Größe der Bulge bestimmt.

- Der Typ Sa / SBa hat eng am Kern anliegende Spiralarme und einen hellen Bulge;
- Der Typ Sb / SBb hat weiter geöffnete Arme und einen weniger hellen Bulge;
- Der Typ Sc / SBc hat weit geöffnete Arme und einen kleinen Bulge.

Dieses System kann entsprechend um Sd, Se, etc erweitert werden.

Die Balkenspiralgalaxien besitzen ebenfalls die oben dargestellten Eigenschaften. Sie besitzen allerdings zusätzlich zu diesen Eigenschaften einen auffälligen Balken, welcher quer durch das Kerngebiet verläuft. Die Spiralarme schließen senkrecht von beiden Seiten an den Balken an. Neuere Untersuchungen im optischen und infraroten Bereich zeigen, dass viel mehr Galaxien einen Balken besitzen als früher angenommen. So ist auch die Galaxis bzw. Milchstraße eine Balkenspiralgalaxie. Es wird vermutet, dass sich die Balken aufgrund der gravitativen Wechselwirkung (Gezeitenkräfte) mit anderen Galaxien herausgebildet haben. Die nachfolgenden Bilder zeigen einmal eine Spiralgalaxie und einmal eine Balkenspiralgalaxie. Bei Bild 11 handelt es sich um die Pinwheel-Galaxie bzw. Feuerrad-Galaxie (M101 / NGC 5457).



Bild 11: Eine Spiralgalaxie / Quelle: NASA / ESA / HST

Bild 12 zeigt eine typische Balkenspiralgalaxie mit der Katalogbezeichnung NGC 1300.

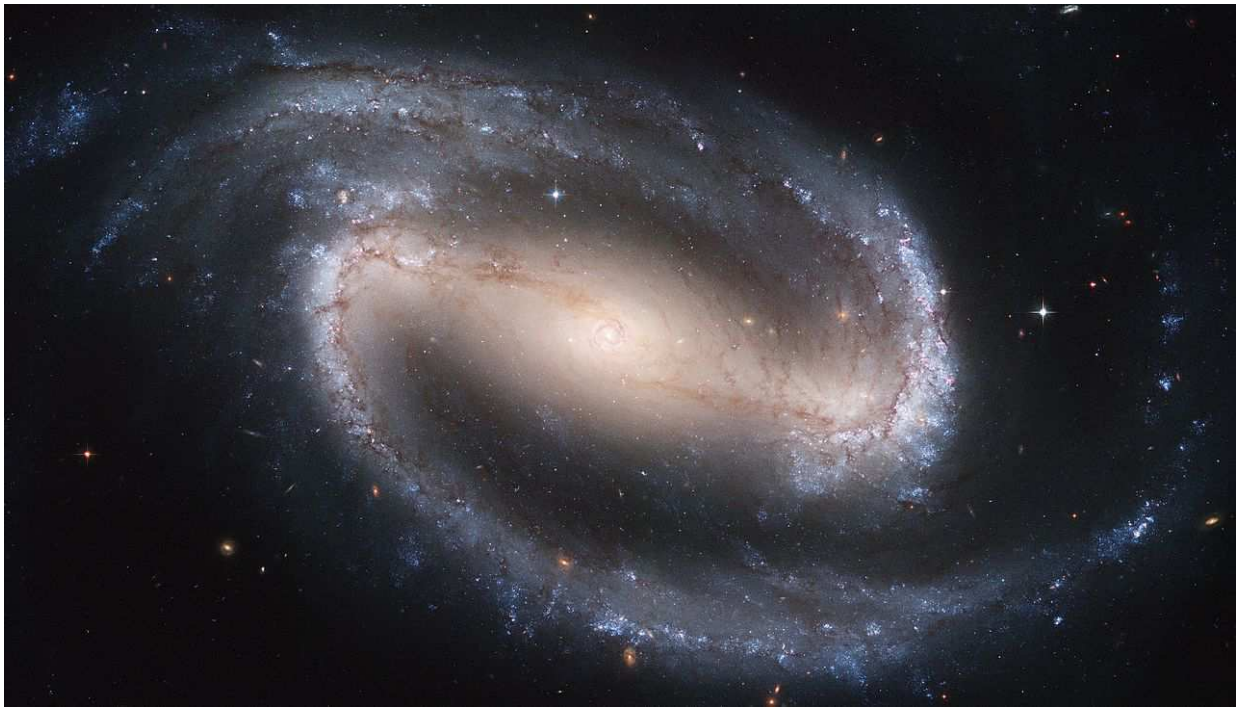


Bild 12: Eine Balkenspirale / Quelle: NASA / ESA / HST

Die Linsengalaxie (Typ S0): Der Hubble-Typ S0 ist ein Übergangstyp. Einmal ist dieser Typ ein Übergangstyp zwischen Spiral- bzw. Balkenspiralgalaxien und Elliptischen Galaxien. Zum anderen setzt bei diesem Typ die Aufgabelung in Spiralgalaxien und Balkenspiralgalaxien ein. Linsengalaxien bzw. der Typ S0 zeichnen sich aus durch eine auffällig helle Kernregion (Bulge) und eine galaktischen Scheibe, welche nur wenig Gas enthält. Aufgrund dieser Rahmenbedingungen besitzt die Scheibe kaum irgendwelche Ausprägungen. Vermutlich gehen Linsengalaxien bzw. der Typ S0 wie die Elliptische Galaxien aus der Verschmelzung von Spiralgalaxien hervor.

3.4 Elliptische Galaxien

In einer Elliptischen Galaxie befinden sich hauptsächlich Sterne der Population II, also alte und rote Sterne. Bei Elliptischen Galaxien handelt es sich um Galaxien, welche nach der vorherrschenden Auffassung aus der Verschmelzung von jungen Spiralgalaxien hervorgegangen sein sollen. Sie besitzen kaum noch Interstellare Materie und somit findet kaum noch Sternbildung statt. Dies erklärt auch das Fehlen von Sternen der Population I, also von jungen und blauen Sternen. Die Supermassiven Schwarzen Löcher in Elliptischen Galaxien sind in der Regel wesentlich massenreicher als in Spiralgalaxien, da diese aufgrund ihres Alters über einen langen Zeitraum Materie akkretiert (aufgenommen) haben und durch Verschmelzungsprozesse entstanden sein dürften. Sie haben Massen im Bereich von mehreren Milliarden Sonnenmassen. Ein Teil des fehlenden interstellaren Gases wurde von diesen Supermassiven Schwarzen Löchern aufgenommen, was dessen geringe Konzentration in einer Elliptischen Galaxien erklärt.

Die Elliptischen Galaxien werden nach ihrer Abplattung klassifiziert und nach den Typen E0 bis E7 unterschieden. E steht hierbei für Ellipse, während die nachgestellte Ziffer den Abplattungsgrad dieser Ellipse beschreibt. Mit zunehmender Zahl von E0 bis E7 steigt die Abplattung einer Elliptischen Galaxie. Der größte Radius einer Ellipse wird als große Halbachse a bezeichnet, ihr kleinster als kleine Halbachse b . Im Falle eines Kreises gilt $r = a = b$. Der Grad der Abplattung ergibt sich aus folgendem Verhältnis zwischen der großen und der kleinen Halbachse:

$$\text{Abplattungsgrad} = (a - b) / a$$

(12)

Nachfolgend erfolgt eine grafische Darstellung des Aufbaus einer Elliptischen Galaxie. Diese ist dreidimensional aufgebaut, so dass zusätzlich zu den Halbachsen a und b noch eine dritte Komponente c hinzukommt.

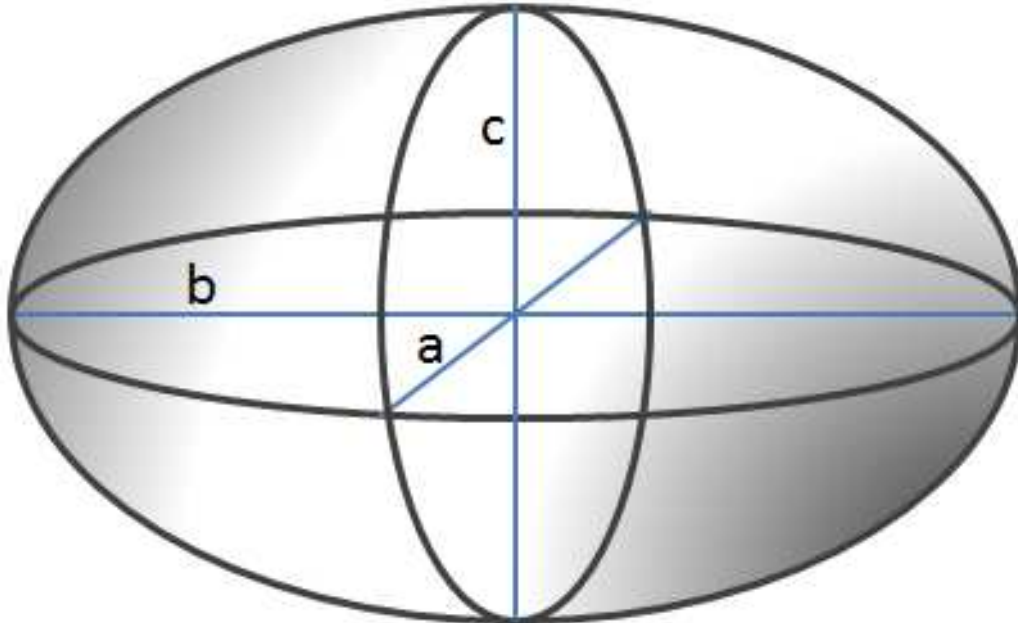


Bild 13: Grafische Darstellung des Aufbaus einer Elliptischen Galaxie / Quelle: Wikipedia.org

Normale Ellipsen umfassen die Riesenellipsen (Typ gE) mit normalen Leuchtkräften und kompakten Ellipsen (Typ cE). Sie haben Massen zwischen 10^8 und 10^{13} Sonnenmassen. Die Ausdehnung dieser normalen Elliptischen Galaxien wird mit dem Wert D_{25} bezeichnet. Hierbei steht der Index 25 für die Ausdehnung bei der Helligkeit 25^m . Die Ausdehnungen betragen hierbei typischerweise 1.000 bis 200.000 pc. Neben der typischen Elliptischen Galaxie, welche mit E und ihrem Abplattungsgrad von 0 bis 9 bezeichnet wird, gibt es noch folgende Sondertypen:

- cD: Extrem massereiche Ellipsen: Dieser Typ befindet sich in den Zentren von dichten Galaxienhaufen und hat eine extreme Leuchtkraft.
- eE: Zwergellipsen (Zwerggalaxien): Dieser Typ hat eine geringere Flächenhelligkeit und eine geringere Metallizität.
- eSCH: Zwergsphäroiden: Dieser Typ hat nur eine geringere Helligkeit und kann daher nur innerhalb der Lokalen Gruppe beobachtet werden.
- BCD: Blaue kompakte Zwerggalaxien: Dieser Typ beinhaltet viele blaue Sterne und viel Gas.

Elliptische Galaxien ähneln wie bereits beschrieben dem Kern von Spiralgalaxien. Nach einer gängigen These wird davon ausgegangen, dass Elliptische Galaxien aus der Verschmelzung von Spiralgalaxien entstehen. Nachfolgend ein Bild der Elliptischen Galaxie ESO 325 - 004

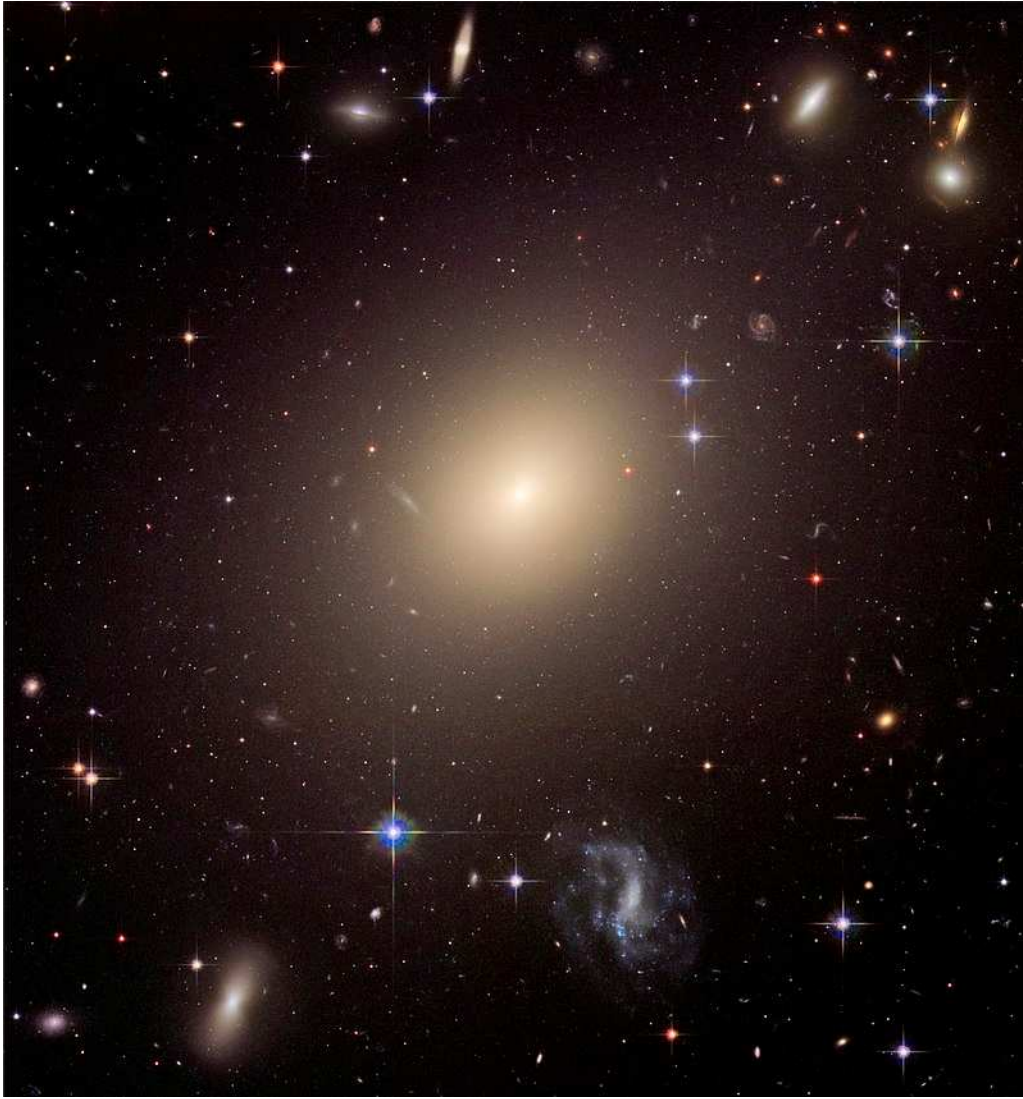


Bild 14: Elliptische Galaxie / Quelle: NASA / ESA / HST

3.5 Irreguläre Galaxien

Die Irregulären Galaxien zeigen keine besondere Symmetrie, verfügen jedoch über höhere Anteile von interstellarer Materie sowie über relativ junge und blaue Sterne. Nach der vorherrschenden Vorstellung sollen Irreguläre Galaxien durch gravitative Wechselwirkung mit anderen Galaxien aus Spiralgalaxien und Elliptischen Galaxien entstanden sein. Durch diese Wechselwirkung wurde die ursprüngliche Galaxie stark deformiert und zeigt danach keine symmetrischen Strukturen mehr.

Konkrete Kennzeichen einer Irregulären Galaxie sind:

- Keine ausgezeichnete Symmetrieebene
- Keine Spiralarme
- Keine elliptische Form
- Kein Kern
- Viel Gas und Staub sowie viele junge Sterne (Aktive Sternentstehung)
- Aktive Sternentstehung
- Sterne sind unregelmäßig verteilt

Es wird unterschieden zwischen folgenden Typen:

- Irr I: Es gibt gewisse Strukturen. Nach de-Vaucouleurs gibt es die Untergruppen Sm (Andeutung einer Spiralstruktur) und Im (keine Spiralstruktur).
- Irr II: Dieser Typ zeigt überhaupt keine Strukturen mehr.
- dIrr: Hierbei handelt es sich um irreguläre Zwerggalaxien mit geringer Metallizität und hohem Gasgehalt. Das deutet darauf hin, dass es sich um die ersten Galaxien handelt, welche sich im früheren Universum gebildet haben.

Die gängige These zur Entstehung von Irregulären Galaxien ist die, dass diese Galaxien aus Spiralgalaxien oder Elliptischen Galaxien aufgrund der gravitativen Wechselwirkung mit anderen Galaxien entstanden sind. Dabei kam es zu Verformungsprozessen, bei denen die vorher vorhandenen Strukturen beseitigt worden sind. Es gibt jedoch auch noch weitere Thesen. So könnte sich primordiales Gas bei ausreichender Abkühlung nach dem Urknall in einem relativ flachen gravimetrischen Potentialtopf angesammelt haben, welcher aufgrund der entsprechenden Verteilung von Dunkler Materie entstanden ist. Nach einer anderen These könnten Irreguläre Galaxien bei der Verschmelzung von zwei Zwerggalaxien entstehen. Neben diesen von außen induzierten Entstehungsprozessen könnten auch innere Prozesse in Galaxien zu deren Verformung führen, was eine Irreguläre Galaxie zum Ergebnis haben könnte. So könnte es in bestimmten Regionen von Galaxien zu extremen lokalen Sternentstehungsprozessen gekommen sein, welche im Ergebnis zu einer entsprechenden Verformung einer Galaxie mit Strukturen hin zu einer Irregulären Galaxie geführt haben. Nachfolgend ein Bild der Großen Magellanschen Wolke. Sowohl diese als auch die Kleine Magellansche Wolke sind Begleitgalaxien der Galaxis und Irregulären Galaxien.



Bild 15: Eine Irreguläre Galaxie / Quelle: NASA / ESA / HST

3.6 Die scheinbare und die tatsächliche Verteilung der Galaxientypen

Zwischen der beobachtbaren und der wahren Verteilung der einzelnen Galaxientypen muss unterschieden werden. Bei der beobachtbaren Verteilung werden helle Galaxien bevorzugt, da diese mit einer gegebenen Beobachtungsmethode leichter zu erfassen sind. Bei der tatsächlichen Verteilung werden alle Galaxien unabhängig von ihrer Helligkeit in einem bestimmten Raumvolumen erfasst. So beziehen sich die nachfolgenden Angaben über die wahre Verteilung der Galaxien auf ein Raumvolumen, welches bis in eine Entfernung von 9,1 Megaparsec reicht.

Von der Beobachtung her haben Spiralgalaxien einen Anteil von 77 Prozent an der Gesamtzahl der Galaxien. Tatsächlich haben sie nur einen Anteil von 33 Prozent. Im Falle der Elliptischen Galaxien liegen der beobachtete Anteil bei 20 Prozent und der tatsächliche bei 13 Prozent. Nach der Beobachtung scheinen Irreguläre Galaxien nur einen Anteil von 3 Prozent zu haben, doch stellen sie mit 54 Prozent den größten Anteil der Galaxien dar.

3.7 Extragalaktische Entfernungsmethoden

Für die Bestimmung von extragalaktischen Entfernungen eignen sich besonders die fotometrischen Standardkerzen, welche nun nachfolgend im Einzelnen aufgeführt werden sollen.

Grundlage für die **Parallaxe aus dem Farbenhelligkeitsdiagramm** sind die Hertzsprung-Russell-Diagramme (HRD) und die Farben-Helligkeits-Diagramme (FHD) von Sternhaufen. Eine ausführliche Erläuterung dieser Diagramme erfolgt in Kapitel 3.5 der Abhandlung „Die Geburt, das Leben und der Tod der Sterne“. Bei dieser Methode wird ein Diagramm mit den bekannten absoluten Helligkeitswerten über das mit den scheinbaren Helligkeiten der Sterne eines Haufens geschoben. Daraus kann dann abgelesen werden:

- Aus der Verschiebung der Abszisse (der waagerechten oder der x-Achse) ergibt sich die Verfärbung und
- aus der Verschiebung der Ordinate (der senkrechten oder der y-Achse) ergibt sich das Entfernungsmodul $m - M$, welches mit Gleichung (11) eingeführt wurde.

Im Prinzip werden mit dieser Methode die scheinbaren Helligkeiten (m) der Haufenmitglieder mit ihren absoluten Helligkeiten (M) verglichen und daraus die Entfernung r bestimmt. Mit dieser Methode können sowohl Entfernungen innerhalb der Galaxis als auch zu anderen Galaxien bestimmt werden, da auch in den anderen Galaxien Sternhaufen nachgewiesen werden können.

Perioden-Leuchtkraft-Beziehungen bei bestimmten veränderlichen Sternen: Bei diesen Sternen gibt es eine feste Beziehung zwischen der Periode ihrer Veränderlichkeit und ihrer absoluten Leuchtkraft. Durch Messung ihrer Perioden kann also ihre absolute Leuchtkraft bestimmt und mit ihrer scheinbaren Helligkeit verglichen werden. Darauf lässt sich wieder das Entfernungsmodul aus Gleichung (11) anwenden und die Entfernung berechnen. Nachfolgend werden die wichtigsten Typen, welche eine Perioden-Leuchtkraft-Beziehung zeigen, aufgeführt.

Cepheiden: Die Lichtkurven dieser Veränderlichen zeigen einen relativ steilen Anstieg zum Maximum und dann einen merklich flachen Abfall. Die Amplitude beträgt typischerweise eine Größenklasse (1^m). Die Perioden liegen zwischen 2 und 50 Tagen, wobei es ein Häufigkeitsmaximum bei Perioden mit 5 Tagen gibt. Cepheiden sind Riesensterne, welche aus Sternen mit mittlerer Masse (3 bis $8M_{\odot}$) entstanden sind und in denen das Heliumbrennen stattfindet (siehe Kapitel 6 / Unterkapitel 6.1 Weiße Zwerge der Abhandlung „Die Geburt, das Leben und der Tod der Sterne“). Für die Entfernungsbestimmung sind die Cepheiden aufgrund der sogenannten Perioden-Leuchtkraft-Beziehung von großer Bedeutung. Die Leuchtkraft dieser Sterne wächst mit ihrer Periode. Statt der Leuchtkraft wird in der Regel die absolute Helligkeit M (z.B. die

absolute Helligkeit M_v) als Berechnungsgrundlage genommen, so dass daraus eine Perioden-Helligkeits-Beziehung wird:

$$M_v = -2,99^m \cdot \log(P/1d) - 1,37^m \quad (13)$$

Zur Entfernungsbestimmung muss dann die aus der Periode berechnete absolute Helligkeit mit der scheinbaren Helligkeit verglichen werden. Gleichung (21) ist die einfachere Form. Die Bezeichnung $1d$ bedeutet einen Tag. Aufgrund der interstellaren Extinktion kommt es zu einer Verfärbung des Sternlichtes, so dass ein korrigierter Farbindex $(B - V)$ mit berücksichtigt werden muss:

$$M_v = -2,47^m - 3,53^m \cdot \log(P/1d) - 2,65^m \cdot (B - V)_0 \quad (14)$$

Der korrigierte Farbindex $(B - V)_0$ hat typischerweise Werte von $0,4^m$ und $0,9^m$. Nachfolgend eine grafische Darstellung:

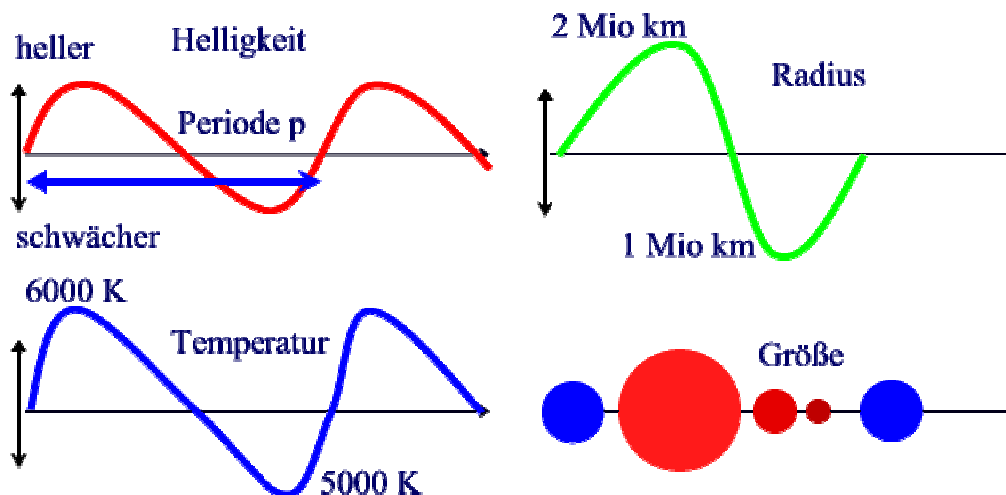


Bild 16: Die Perioden-Leuchtkraft-Beziehung bei Cepheiden /
Quelle: <http://www.fornoff.homepage.t-online.de/Qastro/4Sterne/veraenderliche.htm>

RR Lyrae-Sterne: Diese Veränderlichen ähneln den Cepheiden. Die Amplituden ihrer Helligkeitsveränderungen betragen auch etwa eine Größenklasse. Allerdings ist die Periode zwischen $0,1d$ und einem Tag ($1d$) wesentlich kleiner. Das Häufigkeitsmaximum dieser Perioden liegt bei $0,5d$. Im Vergleich zu den Cepheiden haben die RR Lyrae-Sterne nur eine geringe Streuung ihrer absoluten Helligkeit (M_v), welche zwischen 0 und $0,8^m$ liegt. Bei den RR Lyrae-Sternen handelt es sich um Riesensterne, welche sich aus den massearmen Sternen ($0,5$ bis $3M_{\odot}$) entwickelt haben und in denen das Helium-Brennen stattfindet (siehe Kapitel 6 / Unterkapitel 6.1 Weiße Zwerge der Abhandlung „Die Geburt, das Leben und der Tod der Sterne“).

W-Virginis-Sterne und Cepheiden der Population II: Hierbei handelt es sich um massearme, metallarme Sterne, welche ebenfalls die Perioden-Leuchtkraft-Beziehung zeigen. Diese Sterne finden sich meist im Halo von Galaxien, in Kugelsternhaufen oder nahe den galaktischen Zentren.

Novae und Supernovae haben relativ große und in Abhängigkeit von ihrem Typ bestimmte Helligkeiten. Sie eignen sich besonders gut als Standardkerzen für die extragalaktische

Entfernungsbestimmung. Die Nova ist ein kataklysmisch veränderlicher Stern. Bei diesen Sternen kommt es in regelmäßigen Abständen zu Helligkeitsausbrüchen aufgrund von thermonuklearen Prozessen auf ihren Oberflächen. So wird von einem Stern, etwa einem Roten Riesen, Materie von einem anderen Stern, etwa einem Weißen Zwerg, aufgenommen. Auf der Oberfläche des aufnehmenden Sternes bildet sich eine Akkretionsscheibe. Mit zunehmender Aufnahme von Materie steigen Masse und Temperatur in der Akkretionsscheibe immer mehr an, bis es zur explosionsartigen Zündung von thermonuklearen Prozessen kommt. Diese führen im Ergebnis zum Helligkeitsausbruch des Sterns. Im Maximum kann eine Nova eine Helligkeit von etwa $M_V \approx -10$ erreichen. Zum Vergleich: Der Vollmond hat eine Helligkeit von etwa $-12,5^m$. Im Falle der Nova existiert folgende empirische Beziehung:

$$M_{V,\max} = -9,96 - 2,31 \log(m_r) \quad (15)$$

Die Kernkollaps-Supernova ist die Implosion eines massereichen Sternes, welche anschließend in eine Explosion übergeht. Wenn der Kernbrennstoff in diesen Sternen endgültig aufgebraucht ist, dann kommen die Kernfusionen in ihnen zum Stillstand. Das Gleichgewicht der Kräfte ist dann augenblicklich nicht mehr gegeben und die Gravitationskraft nimmt überhand. Infolgedessen kollabieren diese Sterne jeweils in einer Supernova. Die Grenzmasse für diesen Vorgang beträgt etwa 1,4 Sonnenmassen und wird als Chandrasekhar-Grenze bezeichnet. Aufgrund dieser scharfen Grenze läuft der Vorgang in etwa immer gleich ab. Wenn der Stern bereits vorher seine Wasserstoffhülle verloren hat, dann wird von einer Supernova von Typ I gesprochen. Anderenfalls von Typ II. Für die Helligkeitsentwicklung gilt:

- Typ I: $-18^M,7$
- Typ II: $-16^M,5$

Hiervon abweichend gibt es noch die sogenannte thermonukleare Supernova, welche als Typ Ia bezeichnet wird. Wenn einem Weißen Zwergstern in einem Doppelsternsystem von seinem Begleitstern, etwa einem Rotem Riesen, noch Materie zugeführt wird, dann kann es im Falle des Weißen Zwerges zum Überschreiten der Chandrasekhar-Grenze kommen. Dies führt Augenblicklich zur Implosion des Weißen Zwerges, welche in eine Explosion übergeht und im Ergebnis als Supernova vom Typ Ia sichtbar wird. Bei diesem Typ macht sich die scharfe Chandrasekhar-Grenze noch deutlicher bemerkbar, so dass diese Supernovae in etwa alle die gleichen absoluten Helligkeiten haben und sich daher gut als Standardkerzen für die extragalaktische Entfernungsbestimmung eignen.

Die **gleiche Gesamthelligkeit bei gleichartigen Objekten** lässt sich ebenfalls zur Entfernungsbestimmung heranziehen. Hierbei wird angenommen, dass Kugelsternhaufen, HII-Gebiete, etc in etwa die gleiche Gesamthelligkeit besitzen.

Im Falle der **interstellaren Absorptionslinien** wird von einer gleichmäßigen Verteilung des interstellaren Gases ausgegangen. In Abhängigkeit von seiner Entfernung muss die ausgesandte Strahlung eines Objektes entsprechende Schichtbreiten dieses interstellaren Gases durchqueren. Dabei werden bestimmte Wellenlängen dieser Strahlung zunehmend absorbiert. So gibt es einen Zusammenhang zwischen der Äquivalentbreite der Linien des einfach ionisierten Calciums (Ca^+) und der Entfernung der Quelle:

$$r(\text{kpc}) = 3,00 W(K) \quad (16)$$

Hierbei bezeichnet $W(K)$ die Äquivalentbreite einer bestimmten Linie des Ca^+ , die sogenannte K-Linie. Für die beiden D-Linien (D_1 und D_2) des Natriums (Na) gilt:

$$r(\text{kpc}) = 2,38(W(D_1) + W(D_2))/2$$

(17)

Im Falle des Wilson-Bappu-Effektes wird im Detail das Profil der H- und der K-Linien des ionisierten Calciums betrachtet. Dabei wird folgendes beobachtet:

- Breite Absorptionslinie, H1, K1. Diese entstehen durch kühles Gas in der Atmosphäre des Sterns.
- In der Mitte des Profils gibt es Emissionslinien, H2, K2. Diese werden durch die Re-Emission der zuvor absorbierten Strahlung in der höheren Atmosphäre des Sterns hervorgerufen.
- Zentrale Absorptionslinien H3, K3. Diese werden durch kühles Gas hervorgerufen.

Zwischen der absoluten Helligkeit M_V eines Sterns und der Äquivalentbreite dieser zentralen Absorption gibt es nachfolgenden Zusammenhang, welcher als Wilson-Bappu-Effekt bezeichnet wird:

$$dM_V / (d\log(W_3)) = \text{const.}$$

(18)

Nachfolgendes Bild zeigt eine Aktive Galaxie bzw. einen Aktiven Galaktischen Kern (AGN). Mit diesen Galaxien befasst sich das folgende Kapitel.

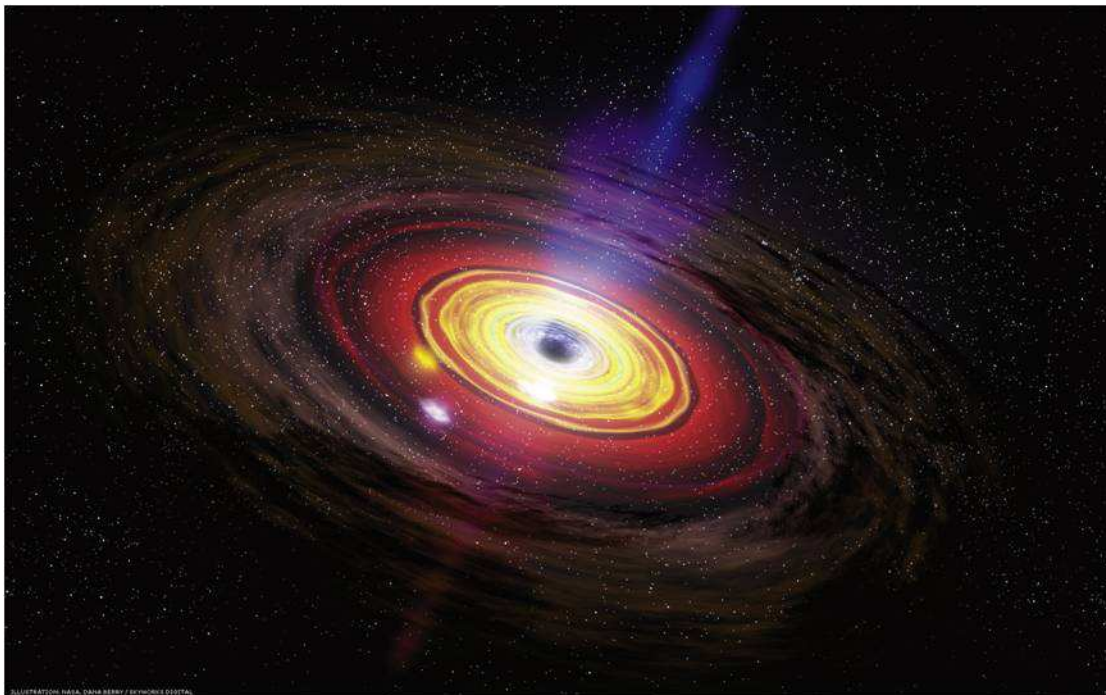


Bild: 17: Eine Aktive Galaxie bzw. ein Aktiver Galaktischer Kern / Quelle: NASA

4 Aktive Galaxien

Es gibt verschiedene Typen von Aktiven Galaxien die alle als grundlegenden und zentralen Bestandteil den Aktiven Galaktischen Kern (engl. *Active Galactic Nucleus*, kurz AGN) beinhalten. Die Einteilung der Aktiven Galaxien in verschiedene Typen erfolgte aufgrund spektraler Unterschiede und ist daher historisch bedingt. Diese Unterschiede können im Fehlen bestimmter spektraler Komponenten oder deren unterschiedlicher Ausprägung bestehen. Wenn ein Aktiver Galaktischer Kern darüber hinaus im Rahmen der Beobachtungstechnik komplett aufgelöst werden kann, machen sich noch morphologische Unterschiede bemerkbar. Die beobachteten Unterschiede zwischen den verschiedenen Typen von Aktiven Galaxien werden heute überwiegend geometrisch gedeutet. Allerdings lassen sich nicht alle Unterschiede rein geometrisch deuten, so dass auch die zeitliche Entwicklung der Aktiven Galaxien eine Rolle zu spielen scheint. So haben zum Beispiel Beobachtungen mit den Röntgenteleskopen *XMM-Newton* und *Chandra* gezeigt, dass die Häufigkeit des AGN Typ 2 gegenüber dem AGN Typ 1 mit zunehmender Röntgenleuchtkraft abnimmt. Dies lässt sich mit rein geometrischen Effekten nicht erklären und deutet auf zeitliche Entwicklungseffekte der Aktiven Galaxie hin.

Wir gehen heute davon aus, dass allen Aktiven Galaxien der gleiche grundlegende Mechanismus zugrunde liegt. Im Zentrum der Aktiven Galaxie befindet sich der Aktive Galaktische Kern. Dieser besteht wiederum in seinem Zentrum aus einem Supermassiven Schwarzen Loch. Die Umgebung des Kerns fungiert als Wirt und versorgt das Schwarze Loch mit Material. Bei diesem Material kann es sich um typische Interstellare Materie aus Gas und Staub oder auch um ganze Sterne handeln. Durch den Mechanismus der Akkretion gelangt diese Materie in das Schwarze Loch. Der Mechanismus der Akkretion reicht dabei von großen Längenskalen im Kiloparsec-Bereich bis auf kleine Längenskalen im Bereich von wenigen astronomischen Einheiten. Im Bereich der Akkretion wird dann Materie in Strahlung umgewandelt. Mit diesem Prozess sind heftige Strahlungsprozesse verbunden, die letztendlich die Ursache für die enormen Leuchtkräfte der Aktiven Galaktischen Kerne sind. Hierzu ein Vergleich: Im Rahmen des Proton-Proton-Prozesses, also der Verschmelzung von Wasserstoff zu Helium in einem kleineren Hauptreihenstern, wird 0,7 % der Masse in Energie umgewandelt. Bei den anderen Fusionsprozessen in den Sternen ist dieser Wirkungsgrad noch kleiner. Im Falle der Akkretion wird bis zu 42 % der Masse in Energie umgewandelt. Die Akkretion ist also nach unserem bisherigen Wissensstand der effektivste Mechanismus für die Umwandlung von Masse in Energie. Aktive galaktische Kerne sind neben den Gammastrahlenausbrüchen das Leuchtkräftigste, was unser Universum zurzeit zu bieten hat.

Aktive Galaktische Kerne kommen in allen Typen von Galaxien vor: Spiralgalaxien, Balkengalaxien, Elliptischen Galaxien und Irregulären Galaxien. Bestimmte Typen von Aktiven Galaxien stehen teilweise auch nur mit bestimmten Typen von Galaxien in Verbindung. Im Nachfolgenden wird auf den Aufbau eines Aktiven Galaktischen Kerns und seiner Komponenten eingegangen.

4.1 Der Aktive Galaktische Kern

Klassische Astronomie ist die Analyse der Strahlung, die uns von den Aktiven Galaxien erreicht. Die Spektren der Aktiven Galaxien zeigen zahlreiche Unterschiede, die zu der mittlerweile als bloß historisch anzusehenden Einteilung der Aktiven Galaxien nach verschiedenen Typen geführt haben. Der heutige Trend geht jedoch dahin, die unterschiedlichen Typen auf ein einziges Standardmodell zurückzuführen. Die beobachteten Unterschiede lassen sich im Rahmen dieses Modells als geometrische Effekte deuten. Neuere Beobachtungen deuten darauf hin, dass Unterschiede auch auf Entwicklungseffekte der Aktiven Galaktischen Kerne zurückzuführen sind. Im Rahmen der Vereinheitlichung der Aktiven Galaktischen Kerne (engl. *Unifikation of the AGN*) führen die Spektren und deren Interpretation sukzessiv zu einem einheitlichen Bild der Aktiven Galaktischen Kerne. Dieses Bild weist verschiedene, jedoch wesentliche Elemente auf, die alle im Einzelnen

vorgestellt werden. Jedes dieser Elemente ist bei einem Aktiven Galaktischen Kern in mehr oder weniger starker Ausprägung vorhanden. Die nachfolgende Abbildung zeigt diese Elemente, wobei auf beiden Achsen eine logarithmische Skala berücksichtigt werden muss. Im Zentrum dieses Bildes befindet sich ein Supermassives Schwarzes Loch, dessen Ereignishorizont bei wenigen Gravitationsradien ($1 r_g = GM/c^2$) an einer Standardscheibe auf der sup-pc-Skala anschließt. Diese Standardscheibe ist im Bereich der pc-Skala wiederum von einem Staubtorus umgeben; der nach außen schießende Jet benötigt wiederum zu seiner Darstellung die kpc- bis Mpc-Skala. Nachfolgend werden diese Elemente im Einzelnen von innen nach außen dargestellt.

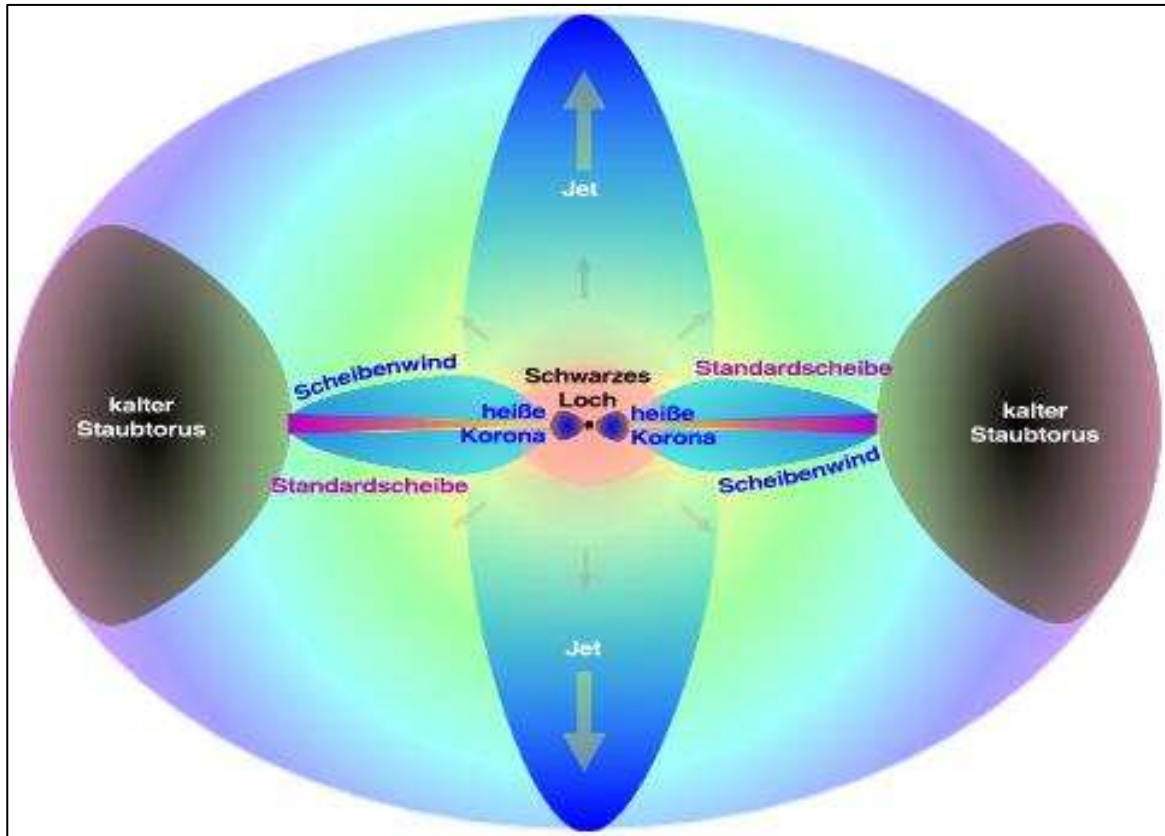


Bild 18: Aufbau eines Aktiven Galaktischen Kerns. Das Bild zeigt die im Text ausführlich beschriebenen Elemente eines AGN, wobei auf beiden Achsen eine logarithmische Skala berücksichtigt werden muss. Im Zentrum dieses Bildes befindet sich ein Supermassives Schwarzes Loch, dessen Ereignishorizont bei wenigen Gravitationsradien ($1 r_g = GM/c^2$) an einer Standardscheibe auf der sup-pc-Skala anschließt. Diese Standardscheibe ist im Bereich der pc-Skala wiederum von einem Staubtorus umgeben, der nach außen schießende Jet benötigt wiederum zu seiner Darstellung die kpc- bis Mpc-Skala. Quelle: Dr. Andreas Müller / Lexikon der Astrophysik

4.2 Das Supermassive Schwarze Loch

Ein rotierendes Supermassives Schwarzes Loch ist die Energiequelle der Aktiven Galaktischen Kerne. Letztendlich wird die Rotationsenergie des Schwarzen Loches in Strahlungsenergie umgewandelt. Auf das Supermassive Schwarze Loch fällt von außen akkretierende Materie. Dabei wird potentielle Energie im Gravitationsfeld des Schwarzen Loches in kinetische Energie und im Falle der Akkretion in Strahlungsenergie umgewandelt. Vor dem Erreichen des Ereignishorizonts kommt es zu heftigen Strahlungsprozessen, die zu den enormen Leuchtkräften der Aktiven Galaktischen Kerne führen. Die Akkretion reichert das Supermassive Schwarze Loch mit noch mehr Materie an, so dass sein Ereignishorizont immer mehr zunimmt. Von zentraler Bedeutung für die zu beobachtenden Eigenschaften der Aktiven Galaktischen Kerne ist die Rotation des

Supermassiven Schwarzen Lochs. So entsteht der Jet in einer schnell rotierenden Zone, der sogenannten Ergosphäre. Innerhalb dieser Ergosphäre wird die Raumzeit von der Rotation des Supermassiven Schwarzen Loches mitgezogen und verdrillt. Dies wird als Lense-Thirring-Effekt bezeichnet. Wenn die Raumzeit verdrillt wird, dann werden natürlich auch die Raumzeit-Koordinaten bzw. das Bezugssystem mit verdrillt und dies wird als Frame-Dragging bezeichnet.

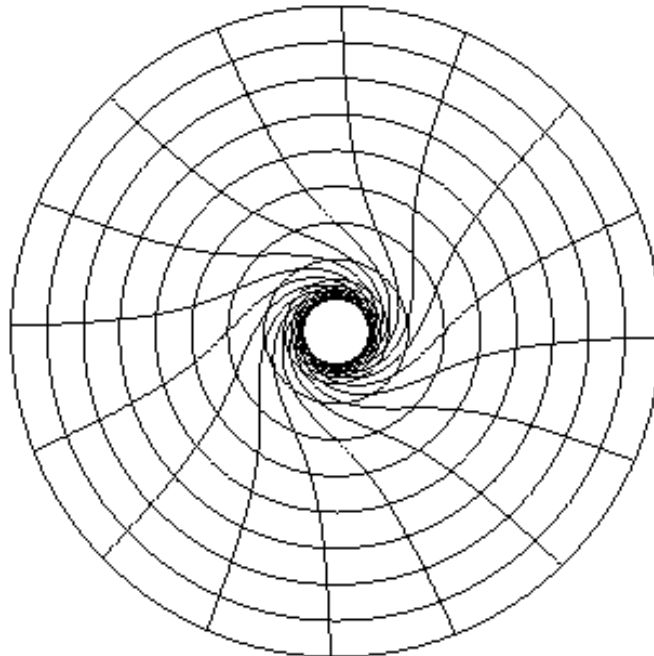


Bild 19: Lense-Thirring-Effekt bzw. Frame-Dragging / Quelle: tex.stackexchange.com

Die Rotation des Supermassiven Schwarzen Lochs ist auch deshalb plausibel, weil die auf das Schwarze Loch einfallende akkretierende Materie ebenfalls Drehimpuls besitzt. Dieser Drehimpuls wird auf das supermassive Schwarze Loch übertragen. Die Ausdehnungen der Ereignishorizonte der Supermassiven Schwarzen Löcher gehören zu den größten im Universum. Je nach Typus der Aktiven Galaktischen Kerne und dem Rotationszustand reichen die Horizonsradien von drei Millionen Kilometern (entspricht 0,02 AE) für ein Loch mit einer Million Sonnenmassen bis etwa 30 Milliarden Kilometern (entspricht 200 AE) für ein Loch mit einer Milliarde Sonnenmassen. Eine Astronomische Einheit (AE bzw. AU) ist die mittlere Entfernung Erde – Sonne, 1 AE = 149.597.870.700 Meter bzw. 149.597.870,7 km.

4.3 Die Akkretionsscheibe

Die auf das Supermassive Schwarze Loch einfallende Materie bildet eine Akkretionsscheibe und wird vom Rand der Scheibe in Richtung des Zentrums immer heißer. Zunächst kann die einfallende Materie mit Hilfe der sogenannten Bondi-Akkretion annähernd sphärisch beschrieben werden. Die Bondi-Akkretion ist eine kugelförmige Akkretion auf ein massives Objekt, in der Regel einen Neutronenstern oder ein Schwarzes Loch. Dieses Modell ist von Hermann Bondi (1919 – 2005) im Jahr 1952 aufgestellt worden. In diesem Modell wird davon ausgegangen, dass für die Akkretionsrate gilt:

$$\dot{M} = 4\pi r^2 \rho v \quad (19)$$

Mit r wird der effektive Radius der Akkretion bezeichnet, mit ρ wird die Dichte des Akkretionsmediums, mit v wird entweder die Geschwindigkeit des Objekts oder die Schallgeschwindigkeit c_s im umgebenden Medium bezeichnet, wenn die Geschwindigkeit des Objekts niedriger als diese Schallgeschwindigkeit ist. Der effektive Radius R ergibt sich aus der Gleichsetzung der Schallgeschwindigkeit innerhalb des umgebenden Mediums mit der Fluchtgeschwindigkeit auf dem Objekt:

$$R = \frac{2GM}{c_s^2} \quad (20)$$

Setzen wir Gleichung (19) in Gleichung (20) ein, so erhalten wir eine Näherung für die Bondi-Akkretionsrate:

$$\dot{M} = \frac{8\pi\rho G^2 M^2}{c_s^3} \quad (21)$$

Da die einfallende Materie jedoch Drehimpuls besitzt, der zum Zentrum hin immer mehr zunimmt, flacht sich die sphärische Verteilung der Materie immer mehr zu einer scheibenförmigen Verteilung der Materie ab. Die Bewegung der Materie kann angenähert mit Hilfe der Kepler-Gesetze beschrieben werden. Diese scheibenförmige Verteilung der Materie in Verbindung mit ihrem Bewegungszustand wird als Akkretionsscheibe bezeichnet. Strahlungsprozesse in der Scheibe kühlen sie ab, so dass sie vertikal kollabiert.

Zunächst wird die Akkretionsscheibe als Standardscheibe beschrieben, als sogenannte *Shakura-Sunyaev Disk* (SSD). Die Scheibe reicht in ihrem Innern bis auf wenige Gravitationsradien an den Ereignishorizont des Schwarzen Loches heran und erreicht nach außen hin eine Ausdehnung von etwa 1000 Gravitationsradien, was im Parsec-Bereich liegt. Im Innern der Akkretionsscheibe nimmt diese aufgrund ihrer hohen Temperatur in diesem Bereich wieder eine etwas sphärischere oder schlauchförmige Gestalt an. Die genaue Form der Scheibe hängt hauptsächlich von folgenden Parametern ab:

- Akkretionsrate (Einfallende Masse pro Zeit),
- Masse des Supermassiven Schwarzen Loches,
- Effizienz der Strahlungsprozesse,
- genaue Zusammensetzung der Materie,
- Wärmeleitung der Materie,
- Geometrie der Raumzeit am Ort der Scheibe.

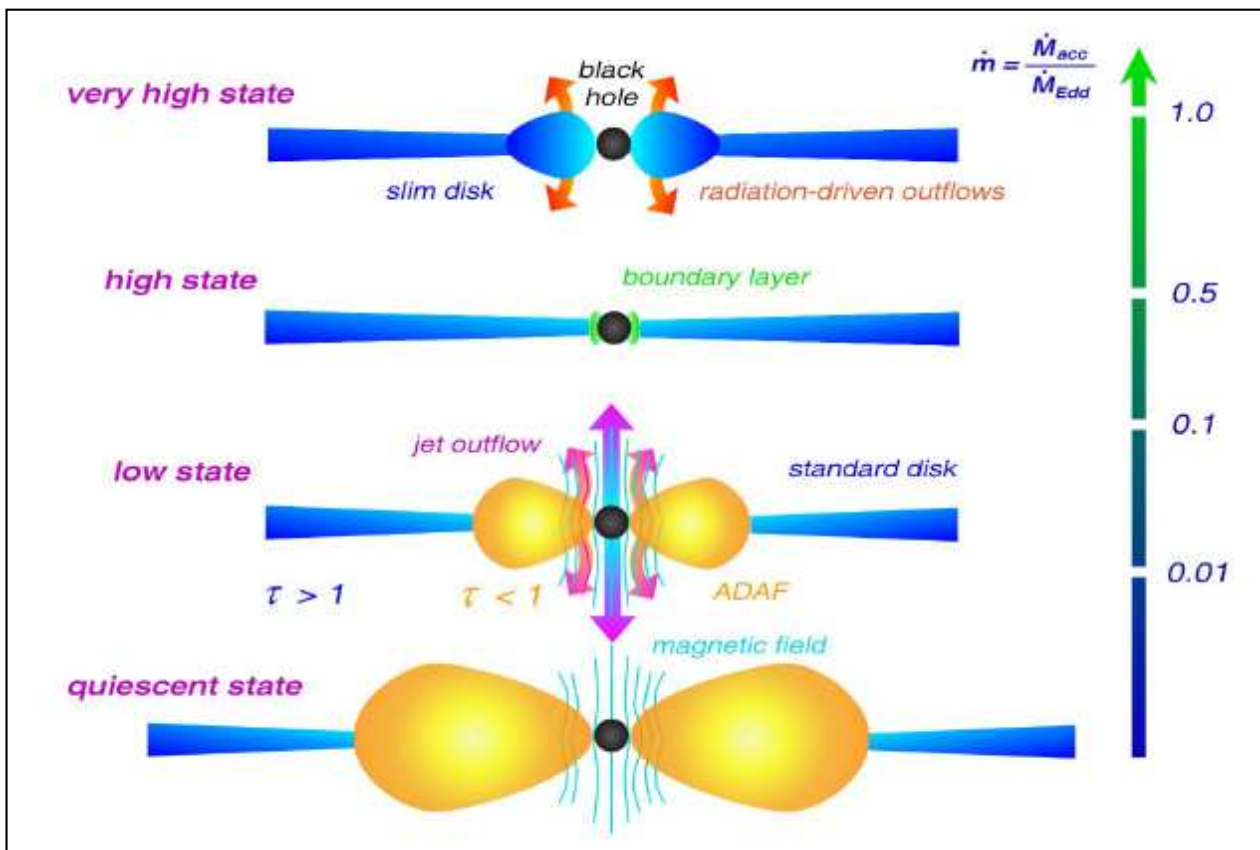


Bild 20: Darstellung eines vereinheitlichten Schemas für eine Akkretion um ein Schwarzes Loch in Abhängigkeit von der Akkretionsrate. Die SAD ist blau, der ADAF ist gelb, der Jet-Ausfluss pink und das Schwarze Loch schwarz dargestellt. Am rechten Bildrand wird die Akkretionsrate in Einheiten der sogenannten Eddington-Akkretionsrate dargestellt. Am linken Bildrand sind die Zustände der Quellen gemäß der spektroskopischen Nomenklatur genannt (quiescent, low high, high, very high). Die Theoretiker versuchten das zu modellieren und zu verstehen. Das Schema zeigt, dass sich je nach Akkretionsrate unterschiedliche Akkretionslösungen ergeben. Die Standardscheibe (blau dargestellt) kommt sehr häufig vor und ist mehr oder weniger Unabhängig von der Akkretionsrate. Der ADAF (gelb dargestellt) kommt nur bei kleinen Akkretionsraten vor, die unterhalb von 10 % der Eddington-Akkretionsrate liegen. Gerichtete, signifikante Materieausflüsse in Form von Jets (durch violette Pfeile dargestellt) entstehen nach diesem Schema vorzugsweise bei einer Akkretionsrate von 5 % der Eddington-Akkretionsrate. Des Weiteren spielen die oben im Haupt-Text genannten Parameter eine Rolle. Quelle: Dr. Andreas Müller / Lexikon der Astrophysik

Die Geometrie der Raumzeit wird wiederum von der Masse des Supermassiven Schwarzen Loches und seiner Rotation bestimmt. Zunächst kann die Bewegung der Materie in der Standardscheibe mit der Hydrodynamik wie eine Flüssigkeit mit hoher Viskosität beschrieben werden. Jedoch spielen magnetische und elektrische Effekte eine sehr große und nicht mehr zu vernachlässigende Rolle, so dass die Hydrodynamik nicht mehr für eine Beschreibung der Bewegung der Materie ausreicht. Dies führt zu einer Verbindung der Hydrodynamik und der Physik des Magnetfeldes zur Magnetohydrodynamik (MHD). Innerhalb der Magnetohydrodynamik werden verschiedene Modelle diskutiert, die bestimmte Teileigenschaften erfolgreich erklären können:

- Advection Dominated Accretion Flow (ADAF),
- Adiabatic Inflow-Outflow Solution (ADIOS),
- Convective Dominated Accretion Flow (CDAF),

- Ion-Supported Accretion Flow (ISAF),
- Truncated Disk – Advective Tori (TDAT),
- Non-Radiative Accretion Flow (NRAF).

Diese Aufzählung ist nicht abschließend. Jedes konkrete Modell stellt bestimmte Parameter in den Vordergrund und betrachtet diese. Für eine abschließende Theorie, die alles beschreiben kann, reichen diese Modelle und die damit verbundenen Betrachtungen nicht aus. In der Nähe des Supermassiven Schwarzen Loches müssen noch die relativistischen Effekte berücksichtigt werden. Die Verbindung von Magnetohydrodynamik und Allgemeiner Relativitätstheorie führt uns zur Allgemein Relativistischen Magnetohydrodynamik (GRMHD). Die dort aufgestellten Gleichungen wurden bisher in der theoretischen Astrophysik nicht abschließend gelöst.

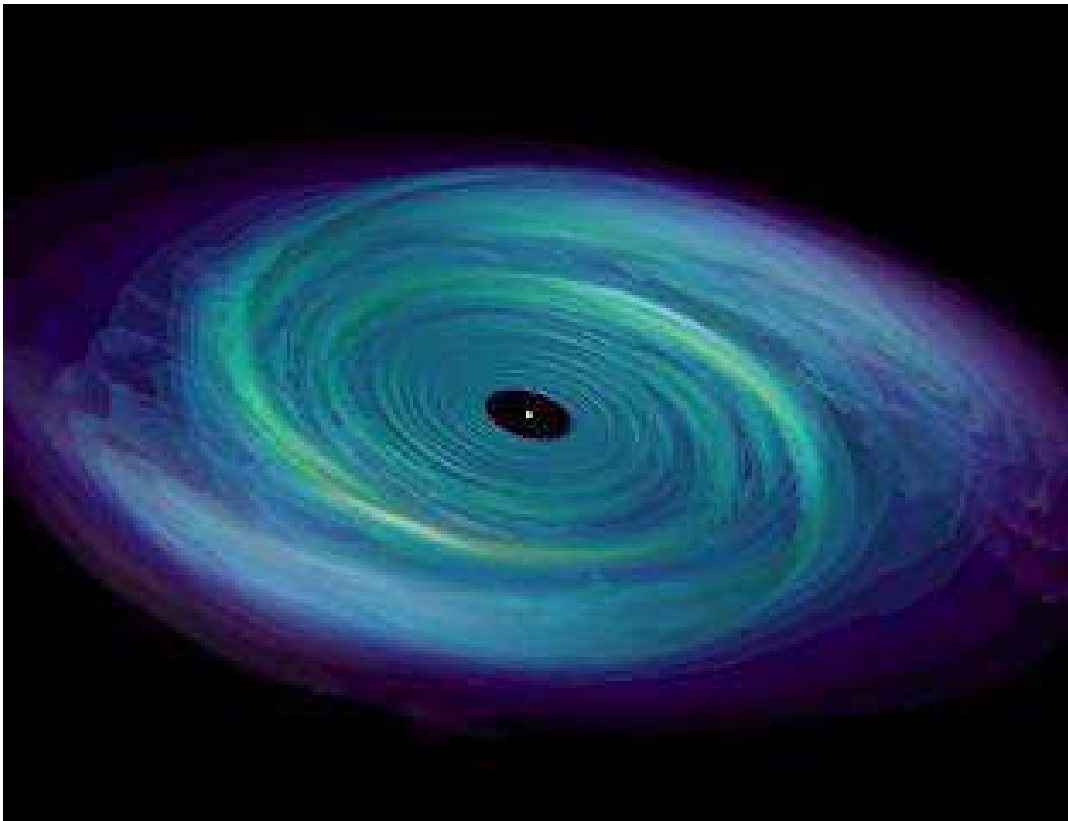


Bild 21: Die Akkretionsscheibe / Quelle: North Carolina State University

Analog zum Sonnenwind gibt es einen sogenannten Scheibenwind. Auf der Oberfläche der Scheibe sorgen MHD-Wellen für eine Teilchenemission aus der Scheibe. Dies wird im Blandford-Payn-Szenario beschrieben. Hohe Magnetfelder reißen die geladenen Teilchen mit und hüllen die Akkretionsscheibe in eine entsprechende Wolke ein. Werden diese Teilchen weiter beschleunigt, können sie die Jets speisen. Im Innern der Scheibe, sehr nah am Supermassiven Schwarzen Loch, gibt es eine Korona, deren Geometrie bis heute nicht genau geklärt ist und wahrscheinlich von verschiedenen Parametern abhängt. Aus dieser Korona erreichen uns besonders harte Photonen im Bereich der Röntgen-Strahlung, in einem Energiebereich zwischen einem und mehreren hundert keV. Wahrscheinlich ist die Korona mit einem heißen Akkretionsfluss assoziiert, der optisch dünn und nahezu durchsichtig ist. Zur Beschreibung ist das ADAF-Modell ein möglicher Kandidat. Die Emission von Strahlung bewirkt keine effektive und ausreichende Kühlung des Akkretionsflusses, so dass dieser sich immer mehr aufheizt. Dieses Gas ist transparent für einige Photonen, so dass sie an heißen Elektronen im Gas Compton-gestreuert oder Comptonisiert werden. Beim Compton-Effekt wird durch Streuung von Elektronen und Photonen Energie von den Photonen auf die Elektronen

übertragen. Es gibt auch einen inversen Compton-Effekt, bei dem Energie von den Elektronen auf die Photonen übertragen wird. Dies führt dazu, dass die Photonen kinetische Energie von den Elektronen aufnehmen und die Korona mit einer entsprechend höheren Energie verlassen. Die heiße Strahlung der Korona wird auf der deutlich kälteren Akkretionsscheibe gespiegelt, was zu Fluoreszenzeffekten und entsprechenden Linien im Spektrum führt. So ist die Eisen-Kalium-Linie, wie etwa in dem AGN-Typ ULIRGs beobachtet, auf diesen Effekt zurückzuführen. Das Supermassive Schwarze Loch bewirkt aufgrund von relativistischen Effekten eine Verbreiterung dieser Linien. Das eigentliche Spektrum der Korona selbst ist ein Kontinuum.

4.4 Der Staubtorus

Der Staubtorus umgibt die Akkretionsscheibe auf der pc- bis kpc-Skala als schlauchförmiges (toroidales) Materiereservoir mit einer Masse von zehntausend bis 100 Millionen Sonnenmassen. Der Staub stammt von den vielen Riesensternen aus der näheren Umgebung, die vor allem im Zentrum einer Galaxie anzutreffen sind, und hat eine Temperatur von etwa 700 Kelvin. Aufgrund der relativ geringen Temperatur des Staubes kommen daher auch Moleküle in ihm vor. Zwei Merkmale des Staubtorus stechen besonders hervor: Er ist optisch dick und er ist geometrisch dick. Ersteres bedeutet, dass der Staubtorus undurchsichtig ist, letzteres, dass er kaum abgeflacht ist.

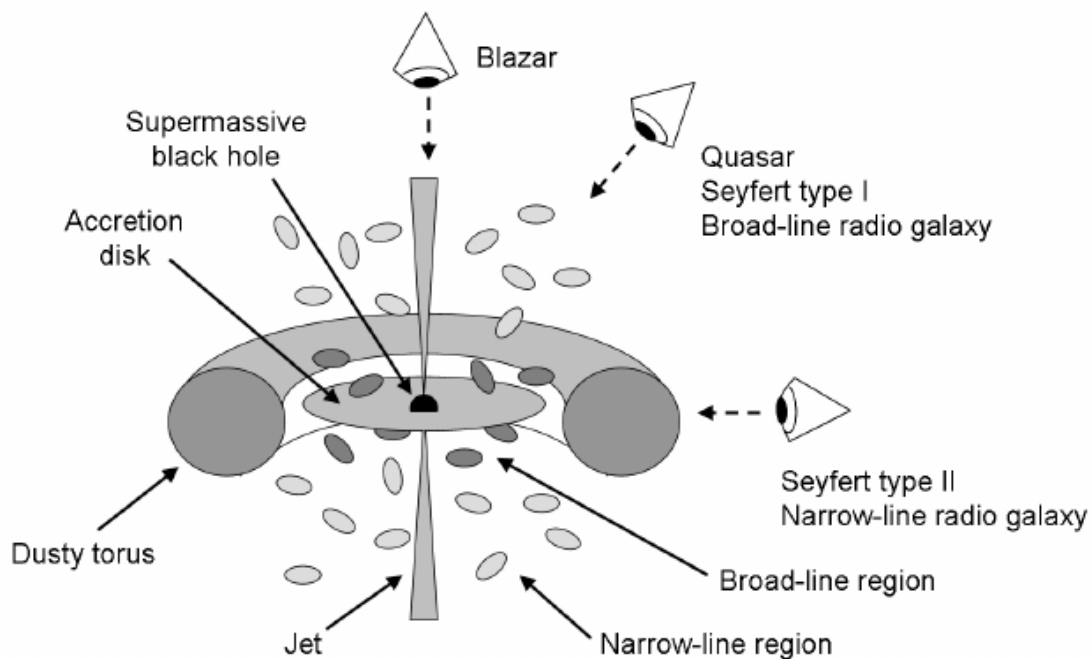


Bild 22: Der Staubtorus / Erik Zackrisson, Department of Astronomy, Stockholm University

Im Staubtorus finden Streuprozesse mit hochenergetischer Strahlung im Bereich von UV- bis Gammastrahlung zu kleineren Energien im infraroten Bereich statt, so dass Infrarotstrahlung zu beobachten ist. Diese Prozesse können mit Strahlungstransportgleichungen simuliert und mit Infrarotbeobachtungen verglichen werden. Die bereits beschriebene Zweiteilung der Aktiven Galaktischen Kerne in Typ-1 und in Typ-2 findet ihre Begründung im Staubtorus. Die Inklination der inneren Akkretionsscheibe muss nicht notwendigerweise mit der Inklination des Staubtorus übereinstimmen. Aufgrund des oben bereits beschriebenen Lense-Thirring-Effektes (Mitziehen der Raumzeit durch das rotierende Supermassive Schwarze Loch) kommt es zu einer Präzessionsbewegung der Akkretionsscheibe. Dies führt zu Reibungsprozessen im Innern der Scheibe, was zu einer bestimmten Ausrichtung der Akkretionsscheibe führt. Dieser Vorgang wird als Bardeen-Petterson-Effektes bezeichnet. Aufgrund dieses Effektes kann es zu einer deutlichen

Verbiegung der Akkretionsscheibe kommen. Die Toruskonfiguration ist eine natürliche Geometrie, die die interstellare Materie bei etwa konstantem Drehimpuls annimmt. Am Innenrand ist der Staubtorus zerfranst, da die heiße Strahlung aus dem Innern den Staub sublimiert.

Der Staubtorus ist nicht starr, sondern er rotiert und ist dabei nicht stabil. Eine Instabilität der Hydrodynamik, die so genannte *Papaloizou-Pringle-Instabilität* (PPI), sorgt dafür, dass immer wieder Material vom Staubtorus zum Innern des Aktiven Galaktischen Kerns gelangt. Die Papaloizou-Pringle-Instabilität kommt dadurch zustande, dass sich Wellen in einem engen inneren Bereich des Torus nicht ungehindert fortpflanzen können. Dadurch kommt es zu einer Trennung vom inneren zum äußeren Bereich des Torus, wo sich Wellen ungehindert fortpflanzen können. Im Rahmen der Magnetohydrodynamik sorgt die Magnetische Rotationsinstabilität (MRI) für magnetische Turbulenzen und bewirkt einen nach außen gerichteten Drehimpulstransport. Dies ist die Voraussetzung dafür, dass Materie ins Schwarze Loch fallen kann.

Die Magnetorotationsinstabilität bzw. die *Magnetische Rotationsinstabilität* (MRI) ist von Steven Andrew Balbus (geb. 1953) und John Frederick Hawley (geb. 1958) im Jahre 1991 entdeckt worden, was daher auch zur Bezeichnung *Balbus-Hawley-Instabilität* führt. Die Magnetorotationsinstabilität (MRI) wird durch die Scherung des Magnetfeldes im Plasma verursacht, da das Magnetfeld dem Plasma folgt und sich aufgrund der differentiellen Rotation die inneren Schichten schneller bewegen als die äußeren. Das Magnetfeld wirkt in so einem gescherten Flächenelement wie eine Feder, die die innere Schicht abbremst. Dadurch verliert die innere Schicht zugunsten der äußeren Schicht an Drehimpuls und wird so auf eine niedrigere Umlaufbahn gezwungen. Die Folge davon ist, dass Masse in Richtung des Kerr-Loches akkretieren kann und somit im Ergebnis für die hohen Leuchtkräfte entsprechenden Quellen verantwortlich ist. Die nachfolgende Dispersionsrelation kann aus der Stabilitätsanalyse der MHD-Gleichungen mit differentieller Rotation erhalten werden:

$$\begin{aligned}
 & [\omega^2 - (k \cdot v_A)^2] \cdot [\omega^4 - \kappa^2 (c_s^2 + v_A^2) \omega^2 + (k \cdot v_A)^2 \kappa^2 c_s^2] \\
 & - \left[\kappa^2 \omega^4 - \omega^2 \left(\kappa^2 \kappa^2 (c_s^2 + v_{A\phi}^2) + (k \cdot v_A)^2 \frac{d\Omega^2}{d(\ln r_{zyl})} \right) \right] \\
 & - \kappa^2 c_s^2 (k \cdot v_A)^2 \frac{d\Omega^2}{d(\ln r_{zyl})} = 0
 \end{aligned}
 \tag{22}$$

Die Größen k , und ω bezeichnen den Wellenvektor bzw. die Frequenz der Störung, v_A ist die Alfvén-Geschwindigkeit, c_s die Schallgeschwindigkeit, κ die Epizykelfrequenz und Ω die Rotationsfrequenz der Scheibe. Die MRI tritt ein, wenn ω imaginär wird. In diesem Fall erhalten wir in der Wellengleichung einer Störung $A \sim e^{i(kx - \omega t)}$ ein exponentielles Wachstum. Für genügend schwache Magnetfelder zeigt sich, dass der langsame Ast der magnetosonischen Welle instabil wird. Die charakteristische Wachstumszeit einer Störung ist dabei von der Größenordnung einer lokalen Rotationsdauer. Im Rahmen der Infrarotastronomie finden sich Belege für das Vereinheitlichungsmodell der Aktiven Galaktischen Kerne mit unterschiedlich geneigtem Torus. Silizium zeigt bei 10 Mikrometern eine starke Spektrallinie in bestimmten Quasaren. Im Typ-1 ist sie in Emission und in Typ-2 ist sie in Absorption zu beobachten. Dies haben Beobachtungen mit dem Weltraumteleskop *Spitzer* ergeben. Je nach Orientierung des Staubtorus zum Beobachter wird die hochenergetische Strahlung im Bereich von UV- bis Gammastrahlung aus dem Zentrum des

Aktiven Galaktischen Kerns am Staubtorus reflektiert oder gestreut. Im ersten Fall erscheint die Siliziumlinie in Emission, im zweiten und letzten Fall als Absorptionslinie.

4.5 Die galaktischen Jets

Die Jets entstehen direkt in einer schnell rotierenden Zone am Supermassiven Schwarzen Loch und erreichen dabei eine Ausdehnung in einem Bereich bis auf die Mpc- Skala. Bei den Jets handelt es sich um gebündelte (kollimierte) Materieströme, die als Ganzes quasi-neutral sind, jedoch lokal aus elektrisch geladenen Teilchen, vor allem aus Protonen, Elektronen und Positronen, bestehen. Es kommen jedoch auch schwerere Teilchen vor. Diese Teilchen werden durch Magnetfelder beschleunigt und zu einem Materiestrahl kollimiert.

Zunächst wurde versucht, diese Materiestrahlen mit Hilfe der Hydrodynamik oder mittels Fliehkräften zu beschreiben. Diese Ansätze reichten jedoch nicht aus, da sie die magnetischen Effekte nicht berücksichtigen. Die Hydrodynamik musste um die Physik des magnetischen und elektrischen Feldes zur Magnetohydrodynamik erweitert werden. Diese Theorie erlaubt eine Beschreibung von turbulent strömenden Plasmen, deren Dynamik von elektrischen und magnetischen Feldern beeinflusst wird. Diese Theorie ist schon eher geeignet, um die extrem hohen relativistischen Geschwindigkeiten der Jets der Aktiven Galaktischen Kerne zu erklären. Doch auch diese Theorie kann noch nicht alle beobachtbaren Eigenschaften der Jets erklären, da sie die relativistischen Effekte in der Nähe des Supermassiven Schwarzen Loches nicht berücksichtigt. Seit 1999 werden auch allgemeinrelativistische Effekte berücksichtigt und die Magnetohydrodynamik zur *General Relativistic Magnetohydrodynamics* (GRMHD) erweitert. Relativistische Effekte spielen nicht nur aufgrund des Supermassiven Schwarzen Loches eine Rolle, sondern auch wegen der hohen Geschwindigkeiten der Jets. Diese sind vor allem Effekte, die durch die spezielle Relativitätstheorie beschrieben werden, die jedoch in der Allgemeinen Relativitätstheorie mit enthalten ist. Es gibt zwei MHD-Szenarien, die zur Erklärung der Jet-Entstehung vorgeschlagen worden sind: Das Blandford-Payne-Szenario und das Blandford-Znajek-Szenario.

Im Blandford-Payne-Szenario sammelt sich das einfallende Plasma in der Akkretionsscheibe an. Die Akkretionsscheibe wird dabei von magnetischen Feldlinien durchstoßen und dadurch ein Teilchenwind erzeugt. Diese Vorgänge sind vergleichbar mit der Entstehung des Sonnenwindes. Aufgrund der Rotation der Akkretionsscheibe sind die Winkelgeschwindigkeiten dieser Scheibe vergleichbar mit den Rotationsgeschwindigkeiten an ihren jeweiligen Radien gemäß den Kepler-Gesetzen. Durch Nachbeschleunigung kann der Ausfluss von Teilchenwind deutlich schneller werden. Dieses Szenario ist 1982 als allgemeine MHD-Akkretion formuliert worden und ist unabhängig von der Existenz eines Schwarzen Loches.

Das Blandford-Znajek-Szenario geht von einem Supermassiven Schwarzen Loch im Zentrum des Aktiven Galaktischen Kerns aus und wurde im Jahr 1977 formuliert. Wichtigste Eigenschaft in diesem Szenario ist die Annahme eines rotierenden Supermassiven Schwarzen Loches, dem sogenannten Kerr-Loch. Die Kerr-Löcher übertragen ihre Rotation sowohl auf ihre Umgebung als auch auf die umgebende Raumzeit selbst. In der Ergosphäre des schnell rotierenden Supermassiven Schwarzen Loches werden aufgrund dieser Rotation und in Folge des *Frame-Draggings* Magnetfeldlinien aufgewickelt. Der Frame-Dragging-Effekt ist ein allgemeinrelativistischer Effekt, der besagt, dass jede rotierende Masse das lokale Bezugssystem mitzieht. Konkret bedeutet dies, dass selbst die Raumzeit mit dieser Masse rotiert und alles in der Umgebung dieser Masse gezwungen wird, sich mit der Drehrichtung der Masse zu drehen. Bei diesem Vorgang treffen früher oder später magnetische Feldlinien unterschiedlicher Polarität aufeinander, was zu ihrer sofortigen Vernichtung und zur schlagartigen Freisetzung der in ihnen gespeicherten magnetischen Energie führt. Die hierbei frei werdende Energie wird auf die Materie in der Umgebung übertragen. Dabei werden Energieflüsse, die sogenannten *Poynting-Flüsse*, trichterförmig nach außen bewegt und dadurch das akkretierte Plasma mitgerissen.

Die Akkretion hat dabei die Funktion, die Materie aus großer Entfernung zum Supermassiven Schwarzen Loch zu bringen. Der größere Anteil der Materie fliegt dabei in das Supermassive Schwarze Loch, in deren Folge Masse und Ereignishorizont des Supermassiven Schwarzen Loches immer mehr zunehmen. Die Rotation des Supermassiven Schwarzen Loches geht beim Aufwickeln der Magnetfeldlinien und im Ergebnis durch das Entstehen der energiereichen Jets verloren. Die Beschreibung von rotierenden Schwarzen Löchern erfolgt als eine bestimmte Lösung der Feldgleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie, der sogenannten Kerr-Lösung. Diese Lösung wurde im Jahr 1963 von Roy Kerr (geb. 1934) gefunden. Daher werden diese Schwarzen Löcher auch als Kerr-Löcher bezeichnet. Für die Jets bedeutet der beschriebene Mechanismus konkret: Die Jet-Energie wird aus der Rotation der Kerr-Löcher gespeist. Da jedoch immer wieder Materie mit Drehimpuls in das Kerr-Loch fliegt, nimmt seine Rotation wieder zu. Das ausfließende Plasma wird vor allem durch Lorentz-Kräfte von der breiten Trichterform zu einem engen Materiestrahl kollimiert. Dies geschieht bei einem Supermassiven Schwarzen Loch von einer Milliarde Sonnenmassen bei typischen Abständen von etwa 100 Schwarzschildradien, was in etwa 0,01 pc oder 2000 AE entspricht. Zahlreiche Beobachtungen zeigen für bestimmte Quellen Jets mit interessanten und unterschiedlichen Strukturen. So zeigen einige Beobachtungen zum Beispiel abgelenkte Jets, die mit der sogenannten Kink-Instabilität der Magnetohydrodynamik assoziiert sind. In der nachfolgenden Grafik ist dargestellt, wie ein Jet entsteht. Die magnetischen Lorentzkräfte bündeln (kollimieren) die Plasmen zu einem Strahl und treiben diesen Strahl an.

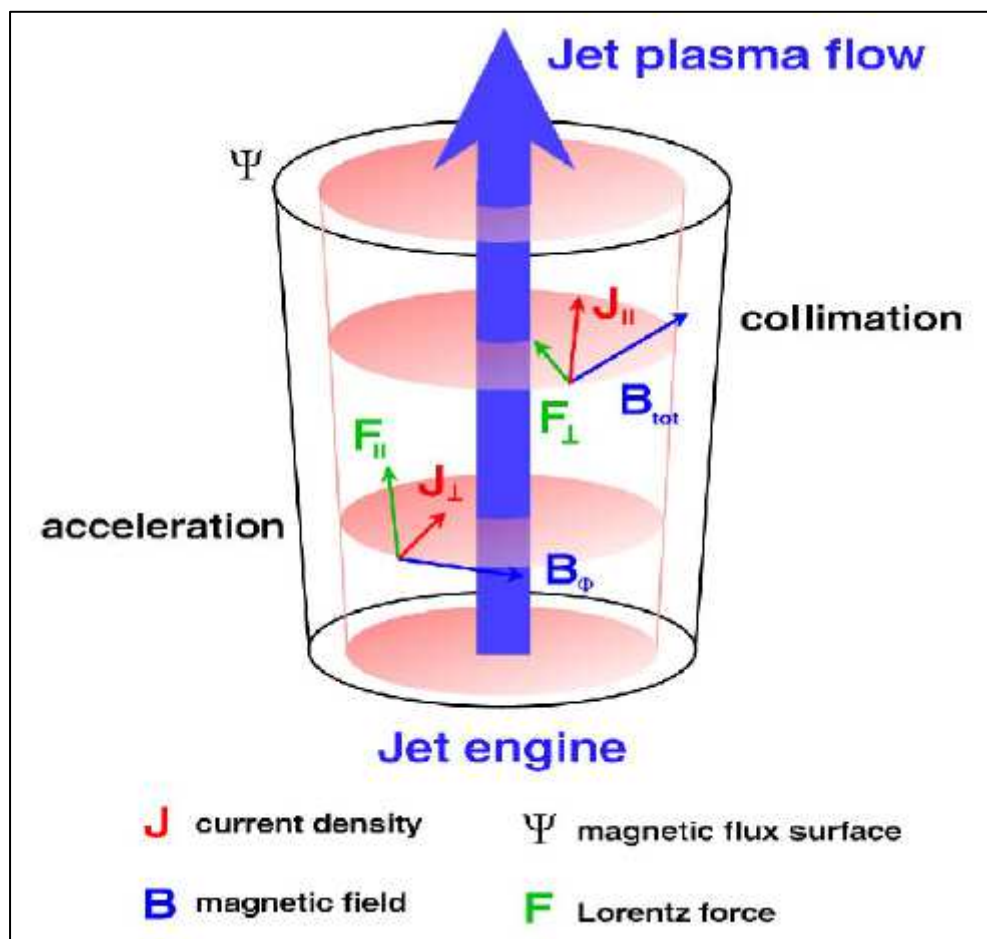


Bild 23: Die Jetentstehung durch magnetische Lorentzkräfte /
Quelle: Dr. Andreas Müller / Lexikon der Astrophysik

Weitere Beobachtungen von Jets zeigen Emissionsknoten entlang dieser Jets. Diese Emissionsknoten haben wahrscheinlich ihre Ursache in inneren schrägen Schockwellen, die abwechselnde Über- und Unterdichten erzeugen. Sogenannte *Hot Spots* sind Gebiete mit besonders

großer Temperatur. Sie entstehen in der Jetspitze beim Übergang vom relativistischen Plasma auf das intergalaktische Medium. Diese Hot Spots in den Jets sind vermutlich die Entstehungsorte der extragalaktischen Komponente der Kosmischen Strahlung in den Jets. Daher müssen bei der Suche nach der Quelle für die extragalaktische Komponente der Kosmischen Strahlung gerade Aktive Galaktische Kerne mit Hot Spots untersucht werden. Mit Hilfe von aufwendigen Computersimulationen muss ermittelt werden, wie entsprechende Strukturen zustande kommen und welche Spektren zu erwarten sind. Elektrisch geladene Teilchen werden aufgrund der hohen Magnetfelder beschleunigt und strahlen dabei Synchrotronstrahlung aus. Durch die Beobachtung der Synchrotronstrahlung konnten die Jets der Radiogalaxien, der radiolauten Quasare, Blazare und BL Lac-Objekte nachgewiesen werden. Sie erscheinen dabei als ausgedehnte Quellen.

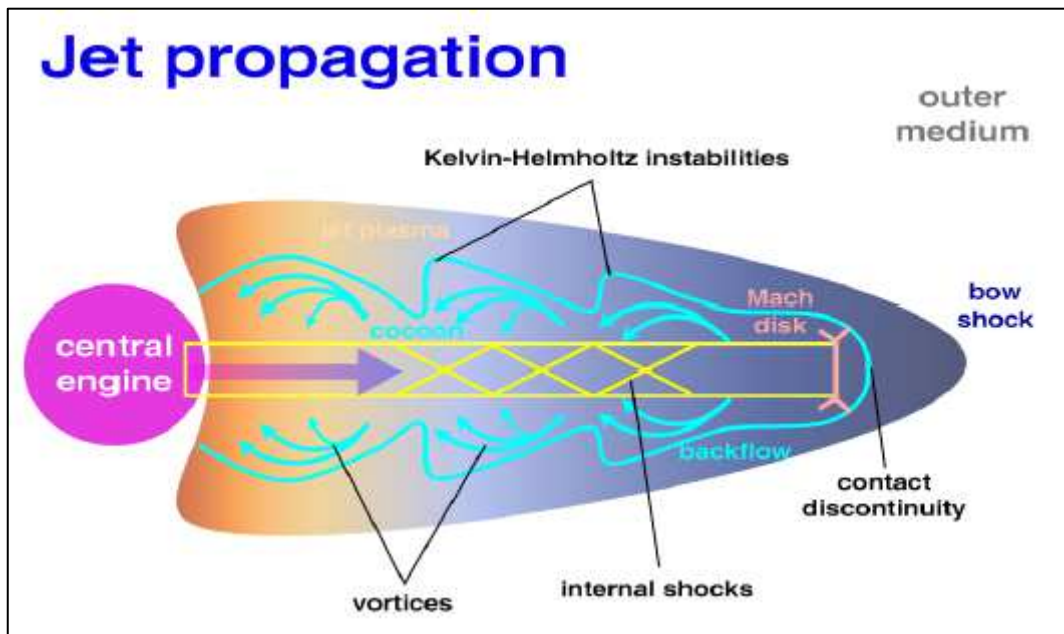


Bild 24: Darstellung der Vorgänge im Innern des Jets /
Quelle: Dr. Andreas Müller / Lexikon der Astrophysik

4.6 Strahlungsprozesse in Aktiven Galaktischen Kernen

Wir müssen bei den Strahlungsprozessen in Aktiven Galaktischen Kernen zwischen thermischen Strahlungsprozessen und nicht-thermischen Strahlungsprozessen unterscheiden.

Thermische Strahlungsprozesse: Bei der thermischen Strahlung handelt es sich um Wärmestrahlung, die Materie mit einer bestimmten Temperatur ausstrahlt. Es handelt sich hierbei um einen sogenannten Schwarzen Strahler, dem charakteristisch zur jeweiligen Temperatur eine Plancksche Strahlungsverteilung zugeordnet ist. Wir erwarten bei der Akkretionsscheibe eine von außen nach innen zunehmende Temperaturverteilung, die in ihrem Maximum zur Erzeugung von intensiver Röntgenstrahlung führen sollte. Diese Röntgenstrahlung kann beobachtet werden. Die Akkretionsscheibe kann zur Beschreibung des thermischen Spektrums in Ringe mit konstanter Temperatur zerlegt werden, wobei jedem Ring eine charakteristische Planck-Kurve zugeordnet werden kann. Das Spektrum der Akkretionsscheibe ergibt sich dann aus der Überlagerung der einzelnen Kurven. Diese Überlagerung erscheint als breiter Buckel im Spektrum, in der Nähe des Zentrums des Aktiven Galaktischen Kerns macht sich dieser Buckel als weicher Exzess im Röntgenspektrum bemerkbar.

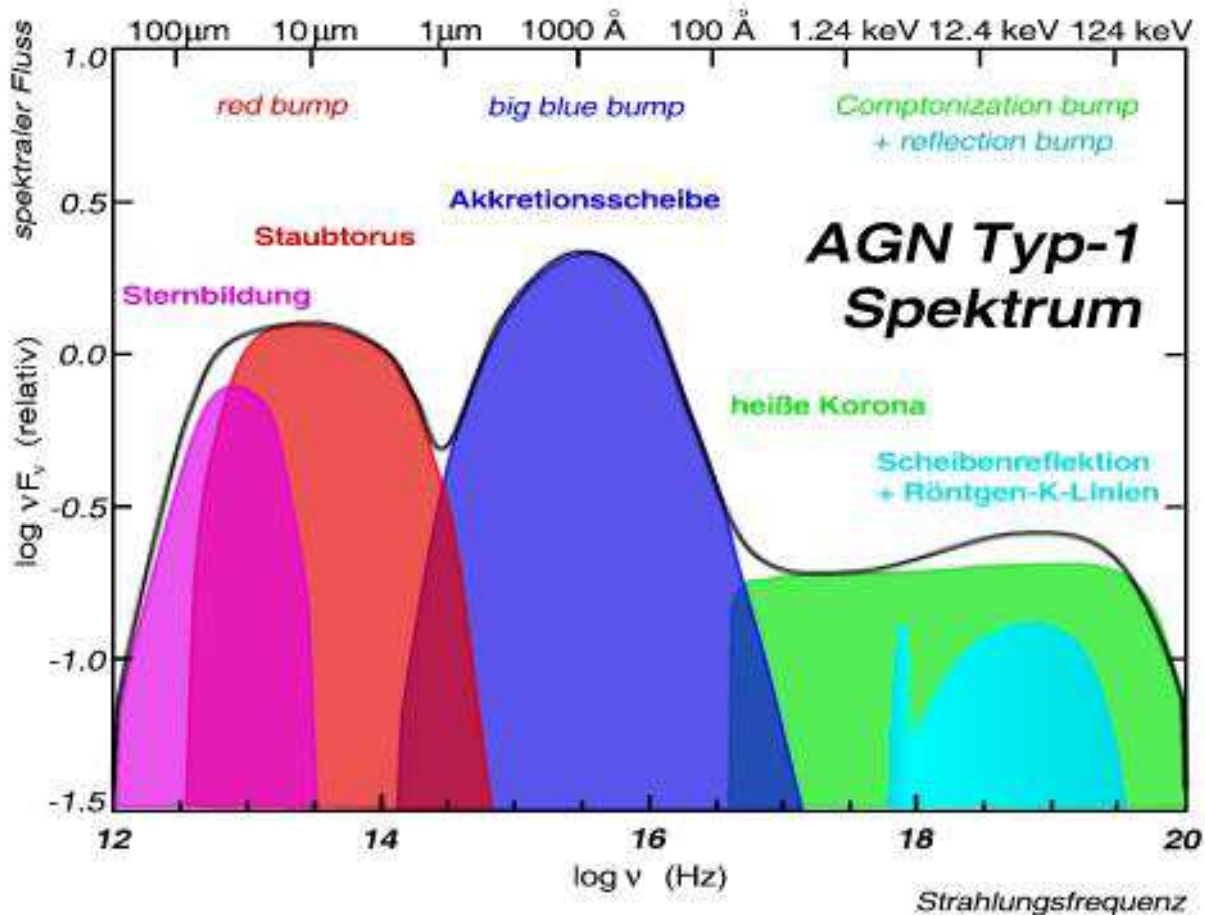


Bild 25: Spektrum eines AGN / Quelle: www.spektrum.de

Nicht-thermische Strahlungsprozesse: Durch die Beschleunigung von geladenen Teilchen in Magnetfeldern entsteht Synchrotronstrahlung. Sie stellt eine Form der nicht-thermischen Strahlung dar und überdeckt einen weiten Bereich im Energiespektrum (vom Radiobereich bis in den Röntgenbereich). Die Synchrotronstrahlung ist stets linear polarisiert, so dass sie durch Polarisationsmessungen evaluiert werden kann. Aufgrund der relativistischen Geschwindigkeit der geladenen Teilchen ist die Strahlung in Bewegungsrichtung kollimiert. Die Synchrotronstrahlung der Elektronen führt in kurzen Zeitskalen zur effektiven Abkühlung des Akkretionsflusses und macht den größten Teil der Strahlenemission im Jet aus. Beim abrupten Abbremsen oder bei abrupter Ablenkung von geladenen Teilchen entsteht Bremsstrahlung; diese Strahlung tritt vor allem beim Zusammentreffen von Jet-Plasma mit dem Plasma in der Umgebung auf. Treffen weiche Photonen der kalten, geometrischen dünnen und optisch dicken Akkretionsscheibe als Eingangsstrahlung auf die Korona, werden sie dort Comptonisiert. Durch inverse Compton-Streuung gewinnen die Photonen zusätzliche Energie, was im Ergebnis zu einem Comptonisierten Kontinuum im Spektrum führt. Dieser Mechanismus wird in der entsprechenden Theorie durch Lösung der Kompaneets-Gleichung, einer Integro-Differentialgleichung, beschrieben. Diese Gleichung muss numerisch für die entsprechenden Geometrien, Elektronenverteilungen und Strahlungen gelöst werden. Im Ergebnis führt diese Lösung auf ein typisches Röntgen-Gamma-Spektrum mit einem charakteristischen exponentiellen Abfall bei einigen 100 keV.

4.7 Typen von Aktiven Galaxien

Die Einteilung der Aktiven Galaxien in verschiedene Typen ist historisch bedingt und erfolgte auf Grund spektraler Unterschiede. Konkret können diese Unterschiede im Fehlen bestimmter spektraler Komponenten oder in deren unterschiedlicher Ausprägung bestehen. Neben diesen spektralen Unterschieden gibt es noch morphologische Unterschiede. Zusätzlich zu der Einteilung

der Aktiven Galaxien nach bestimmten Typen gibt es auch noch innerhalb dieses Typs verschiedene Einteilungen. So wird oft bei den einzelnen Typen von Aktiven Galaxien noch zwischen Typ-1 und Typ-2 unterschieden. Zwischen dem Typ-1 und dem Typ-2 als Grenzfällen gibt es noch Zwischentypen, wie etwa Typ-1.6. Die unterschiedlichen Typen von Aktiven Galaxien werden überwiegend geometrisch gedeutet, wobei diese Deutung wahrscheinlich alleine nicht ausreichen wird. Je nach Orientierung des Staubtorus zum Beobachter ist der Blick ins Innere des Aktiven Galaktischen Kerns entweder frei oder nicht. Dies führt zu Unterschieden bei den zu beobachteten Eigenschaften einer Aktiven Galaxie. Im Falle von kleinen Inklinationen ist der Blick in das Innere von Aktiven Galaktischen Kernen frei, während er im Falle von großen Inklinationen verwehrt ist. Die Zwischentypen ergeben sich aus Inklinationen, die dazwischen liegen.

Optisch ist der Unterschied zwischen dem Typ-1 und dem Typ-2 anhand der Detektierbarkeit von Gebieten breiter Emissionslinien (engl. *Broad Line Region*, BLR) gegenüber von Gebieten schmaler Emissionslinien (engl. *Narrow Line Region*, NLR) entdeckt worden. Die BLRs sind Gebiete, wo sich das emittierende Plasma mit einigen Tausend Kilometern pro Sekunde sehr schnell bewegt und daher die Emissionslinien aufgrund des Doppler-Effekts verbreitert sind. Die BLRs befinden sich tief im Innern des Aktiven Galaktischen Kerns, da nur dort der Akkretionsfluss bzw. frei fallende Wolken diese hohe Geschwindigkeiten erreichen können. Dies ist der Grund dafür, warum BLRs nur bei kleinen Inklinationen im Spektrum beobachtet werden können. In diesem Fall wird entlang der Jet-Achse beobachtet. Das Fehlen der BLRs deutet darauf hin, dass sie vom Staubtorus bedeckt werden und eine signifikant hohe Inklination vorliegt. Die Beobachtung der BLRs und der NLRs erfolgt durch die Verwendung der Spektrallinien des Wasserstoffs (486 nm) und des Sauerstoffs (501 nm).

Gegen die rein geometrische Deutung dieser Zweiteilung sprechen heute die Beobachtungen des tiefen Kosmos durch die Röntgenteleskope *XMM-Newton* und *Chandra*. Die Anzahl der Aktiven Galaktischen Kerne vom Typ-2 nimmt mit zunehmender Röntgenleuchtkraft ab. Dies ist rein geometrisch nicht zu deuten und deutet eher auf zeitliche Entwicklungseffekte innerhalb der Aktiven Galaktischen Kerne hin. Die beobachtete Röntgenleuchtkraft eines AGN hängt grundsätzlich nicht von der Inklination des AGN bzw. von der Lage des Staubtorus ab. Es gibt jedoch eine beobachtbare Korrelation zwischen der Röntgenleuchtkraft eines AGN und seiner Entfernung zu uns. Diese Korrelation und die beobachtbare Abnahme der Häufigkeit des Typ-2 mit zunehmender Röntgenleuchtkraft deutet darauf hin, dass die zeitliche Entwicklung eines AGN neben der geometrischen Deutung auch eine Rolle für die Unterteilung in Typ-1 und Typ-2 spielt. Auch die Häufigkeit von bestimmten Typen von Aktiven Galaxien, etwa von Quasaren oder Seyfert-Galaxien, korrelieren mit ihrer Entfernung von der Erde. Die Häufigkeit von Quasaren erreicht bei einer Rotverschiebung von $z = 2,0$ einen Höhepunkt, die von Seyfert-Galaxien bei $z = 0,7$. Allgemein kann gesagt werden, dass die Häufigkeit eines bestimmten Typs von Aktiver Galaxie von seiner Leuchtkraft abhängt. Diese beschriebenen Sachverhalte stützen zusätzlich die These, wonach zeitliche Entwicklungseffekte bei den beobachtbaren Eigenschaften von AGN eine Rolle spielen. Ein Quasar ist wahrscheinlich ein AGN in früherer Entwicklungsstufe als eine Seyfert-Galaxie. AGNs mit höherer Leuchtkraft scheinen sich zu einem früheren Zeitpunkt gebildet zu haben als AGNs mit geringerer Leuchtkraft. Viele Fragen zu den Aktiven Galaktischen Kernen und damit zu den Aktiven Galaxien bleiben damit zur Zeit offen. Doch wollen wir uns jetzt den einzelnen Typen von aktiven Galaxien selbst zuwenden.

Quasare erscheinen sternförmig, daher die Bezeichnung Quasistellares Objekt (kurz: „Quasar“). Bis zum Jahre 1963 konnten ihre Spektren nicht verstanden werden. Dann entdeckte Maarten Schmidt (geb. 1929), dass es sich bei den Spektren um ganz normale Balmer-Linien handelte, welche jedoch extrem ins Rote verschoben sind. D.h. dass Quasare extrem weit entfernt sind und dennoch über eine enorme Strahlkraft verfügen müssen. Heute ist bekannt, dass Quasare zu den frühesten und leuchtkräftigsten Aktiven Galaktischen Kernen gehören. Der Quasar ist eine starke

Quelle für harte Gammastrahlung und hat einen starken Jet. Es gibt eine Zweiteilung in radiolaute und in radioleise Quasare.

Quasare kommen in Verbindung mit allen Galaxientypen vor, also in Spiralgalaxien, Balkengalaxien, Elliptischen Galaxien und in Irregulären Galaxien. Die Strahlung der Quasare zeigt eine Variabilität auf Zeitskalen von Tagen. Optisch erscheint der Quasar als Punktquelle und ähnelt auf den ersten Blick einem Stern. Das Spektrum zeigt breite Emissionslinien, wobei besonders die Emissionslinien im Infraroten und im Ultravioletten stark sind. Neben den Emissionslinien gibt es Absorptionslinien, nach denen sich die Quasare einteilen lassen:

- Quasare mit breiten Absorptionslinien: In diesem Fall befindet sich das Gas in der direkten Umgebung des Quasars. Hierbei handelt es sich um interstellare Wolken, welche stark beschleunigt werden und mit bis zu $0,1c$ ($c = 299.792.458 =$ Lichtgeschwindigkeit im Vakuum) expandieren.
- Quasare mit scharfen Linien: Bei diesen Quasaren betragen die Geschwindigkeitsdifferenzen zwischen den Emissionslinien und den Absorptionslinien nur rund 3.000 km/s . In den Spektren dieser Quasare zeigen sich auch die Linien von Metallen.
- Quasare mit scharfen Metalllinien: In ihren Spektren zeigen sich scharfe Metalllinien.
- Lyman-Alpha-Forest: Die Spektren dieser Quasare zeigen Linien mit geringer Geschwindigkeitsdispersion.

Der Versuch, die Rotverschiebung der Quasare anders zu deuten als durch Fluchtgeschwindigkeit bei extrem großer Entfernung, blieben erfolglos. D.h. sie sind tatsächlich extrem weit entfernt und extrem hell. In ihnen wird etwa 1000-mal mehr Energie produziert als in den hellsten Normalen Galaxien. Diese Energieproduktion findet in einem relativ kleinen Raumbereich statt mit einer Größe von wenigen Lichttagen. Die Größe dieses Bereiches kann aus der Variabilität der ausgesandten Strahlung abgeschätzt werden. Hierbei ist R der Radius des Objektes, c die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum und T die Periode der Änderung. Es gilt:

$$R \leq cT$$

(23)

Dies lässt darauf schließen, dass es sich bei dem Quasar um einen Aktiven Galaktischen Kern handelt, welcher aus einem Supermassiven Schwarzen Loch, einer Akkretionsscheibe, einem Staubtorus und einem starken Jet besteht. Beispiele für Quellen von Quasaren sind: 3C 273, 3C 48 und SDSS 1030+0524 ($z = 6.28$).

Blasare kommen in Verbindung mit Elliptischen Galaxien vor und haben eine wesentlich höhere Leuchtkraft als Quasare. Ihre Strahlung zeigt eine Variabilität auf Zeitskalen von Tagen. Zur Klassifizierung eines Objektes als Blazar müssen folgende Bedingungen erfüllt sein:

- Das Objekt muss wie ein Quasar punktförmig bzw. sternförmig erscheinen. Einige Blazare haben auch Nebel um sich herum, doch kommt fast die gesamte Strahlung vom Blazar selbst.
- In den Spektren der Blazare gibt es, im Gegensatz zu den Spektren der Quasare, keine Absorptionslinien.
- Das sichtbare Licht ist überwiegend teilweise polarisiert.
- Die Strahlung eines Blazars variiert viel schneller und mit größerer Amplitude als bei einem normalen Quasar.

Die Strahlungskurve eines Blazars zeigt in ihrem Verlauf einen doppelten Buckel, wobei das Maximum dieser Strahlung im ultravioletten Bereich ist. Die Gammastrahlung ist in einem Bereich von TeV, womit die Blazare die leuchtkräftigsten Gammastrahlenquellen sind. Die Blazare haben einen kompakten Radiokern. Ihre Jets sind sehr stark und leuchtkräftig und zeigen in Richtung Erde. Beispiele für Quellen von Blazaren sind: Mrk 501, MrK 421,1219+285, 3C 279 und H1426+428.

Radiogalaxien kommen überwiegend in Verbindung mit dem Typ der Elliptischen Galaxie oder dem Typ S0 vor. Sie zeigen eine starke Radiostrahlung, haben einen flachen Kern und einen starken Jet. Im Jet zeigen sich helle, heiße Flecken, die sogenannten *Hot Spots*. Der Jet und die heißen Flecken zeigen im Spektrum einen steilen Anstieg. Ihre Strahlung zeigt eine Variabilität auf Zeitskalen von Monaten. Radiogalaxien zeichnen sich vor allem dadurch aus, dass sie starke Radioquellen sind. Eine normale Galaxie strahlt im Radiobereich mit einer Leistung von 10^{33} Watt (W), Radiogalaxien haben im Radiobereich Leistungen von 10^{37} W und sind damit im Radiobereich um den Faktor 10.000 leuchtkräftiger. Unterschieden wird zwischen ausgedehnten und kompakten Radiogalaxien:

- Ausgedehnte Radiogalaxien erscheint oft als Doppelgalaxie, welche durch Bögen mit überdeckenden Distanzen im Bereich von Megaparsec verbunden sind. Die Radiokomponenten sind immer außerhalb der optisch sichtbaren Galaxie und wesentlich größer. Die sichtbare Galaxie befindet sich meist im Zentrum der Radioquellen.
- Die kompakten Radiogalaxien haben im Gegensatz zu den ausgedehnten einen sehr kleinen Bereich, aus dem die Radiostrahlung stammt. Der Durchmesser dieses Bereiches beträgt nur einige Lichtjahre und ist im Kern einer Radiogalaxie lokalisiert.

Die erste Radiogalaxie wurde im Jahre 1946 von James Stanley Hey (1909 – 2000) und seinen Mitarbeitern im Sternbild Schwan (lat. Cygnus) identifiziert. Sie trägt die Bezeichnung Cygnus A. Beispiele für Quellen von Radiogalaxien sind: Cyg A, M87, M82 und 3C 219.

Seyfert-Galaxien kommen zu mehr als 90 Prozent in Verbindung mit dem Typ der Spiralgalaxien vor, wobei besonders ihr heller Kern auffällt. Nur ein kleiner Teil der Seyfert-Galaxien ist elliptisch. Es wird vermutet, dass alle Galaxien in ihrer anfänglichen Entwicklung durch ein Seyfertstadium gehen. Das Spektrum einer Seyfert-Galaxie zeigt ein kontinuierliches Compton-Spektrum. Des Weiteren zeigt das Spektrum thermische Absorptions- und Emissionslinien sowie Reflexionsstöße. Die Strahlung einer Seyfert-Galaxie zeigt eine Variabilität auf Zeitskalen von Monaten. Sie haben einen schwachen Jet. Es wird im Falle der Seyfert-Galaxien zwischen zwei Bereichen unterschieden. Im Zentrum befindet sich ein kleines Gebiet, welches Photonen emittiert, die weiter außen zwei verschiedene Gasbereiche treffen:

- Eine Zone, in der breite Emissionslinien entstehen. Diese Linien sind veränderlich mit Variabilitäten von einigen Wochen bis Monaten. Daraus folgt, dass die Bereiche eine Ausdehnung von etwa 0,1 Lichtjahren haben.
- Eine Zone, in der schmale Linien entstehen. Diese Zone ist vermutlich 1000-mal ausgedehnte als die Zone mit den breiten Emissionslinien.

Seyfert-Galaxien lassen sich wie die meisten Aktiven Kerne in zwei Typen, Typ I und Typ II, unterteilen:

- Der Typ I zeigt eine extreme Dopplerbreitening der Wasserstofflinien, was auf hohen Geschwindigkeiten der beteiligten Gase von 5.000 bis 10.000 km/s hinweist.

- Der Typ II zeigt im Vergleich zu Typ I nur schmale Linien, was auf geringe Geschwindigkeit von 200 bis 400 km/s hindeutet.

Der Typ dürfte hauptsächlich von der Inklination (Neigung) der Seyfert-Galaxien abhängen. Im Falle von Typ I ist die Neigung gering und wir schauen von oben auf die Galaxie. In diesem Fall können wir in den Kern direkt hineinschauen und die dort ablaufenden dynamischen Prozesse, welche mit hohen Geschwindigkeiten verbunden sind, wahrnehmen. Bei einer hohen Neigung schauen wir auf den Staubtorus, welcher die Sicht auf den Kern verhindert. Interessant ist, dass auch Typenwechsel beobachtet werden. In diesem Fall verschieben sich Staubwolken, welche dann einen Blick in den Kern verhindern und so aus dem Typ I einen Typ II machen. Doch auch der umgekehrte Fall ist möglich.

Die abgestrahlte Gesamtenergie einer Seyfert-Galaxie beträgt etwa 10^{37} bis 10^{38} W. Die Helligkeit dieses Galaxientyps kann im Bereich zwischen einigen Tagen und Monaten variieren. Viele Seyfert-Galaxien sind Bestandteil eines Doppelsystems. Daher könnten gravitative Wechselwirkungen bzw. Gezeitenkräfte eine Rolle bei ihrer Aktivität spielen. Wahrscheinlich wird aufgrund der Gezeitenkräfte das Supermassive Schwarze Loch mit Materie versorgt.

Die ersten sechs Seyfert-Galaxien wurden im Jahre 1943 von Carl Keenan Seyfert (1911 – 1960) gefunden. Beispiele für Quellen von Seyfert-Galaxien sind: NGC 1068, NGC 4151 und MCG-6-30-15.

BL Lacertae (BL Lac) wurde zunächst irrtümlich für veränderliche Sterne gehalten, daher ihre Bezeichnung. Tatsächlich handelt es sich jedoch um Aktive Galaktische Kerne, welche hauptsächlich in Verbindung mit Elliptischen Galaxien vorkommen. Ihre Strahlung zeigt eine Variabilität auf Zeitskalen von Tagen, wobei sich diese Variabilität auch im optischen Spektrum zeigt. Ihr Spektrum zeigt keine Emissions- oder Absorptionslinien. Sie haben eine hohe Leuchtkraft und strahlen sehr stark im Radiobereich. Ihre maximale Leuchtkraft zeigen sie im infraroten Bereich. Über einen Jet verfügen BL Lac nicht. Folgende Punkte charakterisieren die BL-Lacertae-Objekte:

- Schneller Helligkeitswechsel im Radio-, Infrarot- und im optischen Bereich,
- keine Emissionslinien,
- nicht thermische kontinuierliche Strahlung,
- starke und rasch variable Polarisation,
- erscheinen sternförmig,
- die Emissionen variieren rasch und zufällig.

Quellenbeispiele sind: BL Lac und PKS 2155-304.

Low-Ionization Nuclear Emission-Line Region Galaxy (LINER-Galaxie). Diese Aktiven Galaktische Kerne kommen in Verbindung mit allen Typen von Galaxien vor und haben einen Jet. Ihre Strahlung zeigt eine Variabilität, das Spektrum zeigt schmale Emissionslinien von Sauerstoff, Schwefel und Stickstoff. Beispiel für eine Quelle von LINERs ist: NGC 4258.

Ultra-Luminous Infrared Galaxy (ULIRG). ULIRGs kommen in den Übergängen von allen Galaxientypen vor. Ihre Strahlung zeigt eine Variabilität und sie haben einen Jet. ULIRGs zeigen hohe Leuchtkräfte im infraroten Bereich und im Röntgenbereich. Das Spektrum zeigt Linien von Fe K. Beispiele für mögliche Quellen sind: NGC 6240, IRAS 05189-2524.

5 Die Entwicklung von Galaxien

In diesem Kapitel soll sowohl auf die Entstehung der Galaxien als auch auf deren Strukturbildung im Bereich von kosmologischen Skalen eingegangen werden. Etwa 400 Millionen Jahre nach dem Urknall bildeten sich die ersten Galaxien, welche kleiner und masseärmer waren als die heutigen. Durch Verschmelzungsprozesse von kleineren Galaxien (Merging) bildeten sich die größeren. Die Galaxien bilden wiederum Gruppen und Haufen sowie Super-Haufen.

Die zeitliche Entwicklung von Galaxien ist auch in die zeitliche Entwicklung des Universums als Ganzes eingebettet. Die von Albert Einstein im Jahr 1915 aufgestellte Allgemeine Relativitätstheorie sagte bereits die Expansion des Universums voraus. Hierbei expandiert die Raumzeit und zieht die Galaxien mit. Im Jahr 1929 entdeckte der Astronom Edwin Hubble, dass alle Galaxien sich von uns wegbewegen. Je weiter die Galaxien von uns entfernt sind, desto höher ist die sogenannte Fluchtgeschwindigkeit. D.h. der Abstand r zwischen zwei beliebigen Galaxien bzw. zwischen uns und einer Galaxie ist proportional zur Fluchtgeschwindigkeit v dieser Galaxien. Der Proportionalitätsfaktor zwischen der Entfernung und der Fluchtgeschwindigkeit ist der sogenannte Hubble-Parameter $H(t)$. Es gilt:

$$v = H(t) \cdot r \quad (24)$$

Bestimmt wird die Fluchtgeschwindigkeit der Galaxien mit Hilfe ihrer Spektren. Der optische bzw. sichtbare Bereich des elektromagnetischen Spektrums besteht aus den Farben Violett, Blau, Grün, Gelb, Orange und Rot. Dem violetten Ende des optischen Bereiches schließen sich die ultraviolette Strahlung, die Röntgenstrahlung und die Gammastrahlung an. Auf dem roten Ende des optischen Spektrums folgen die infrarote Strahlung, die Mikrowellenstrahlung und die Radiostrahlung.

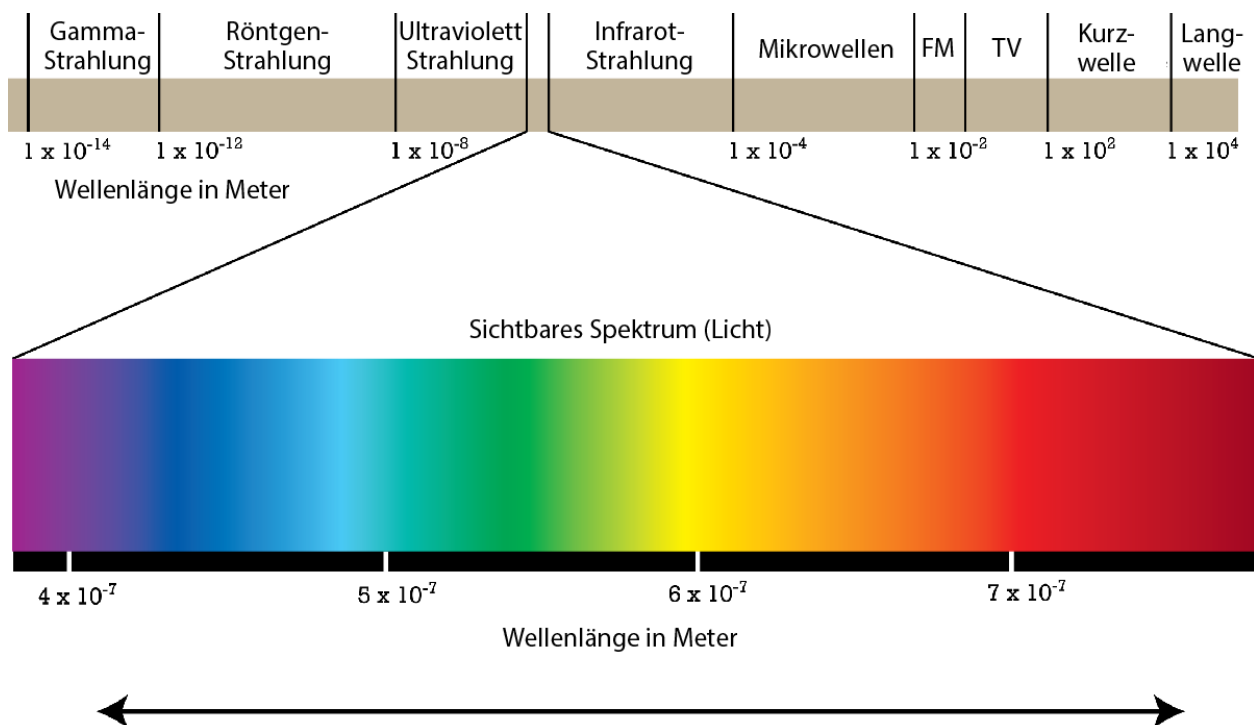


Bild 26: Das elektromagnetische Spektrum / Quelle <http://www.pion.cz>

Die Farbe bzw. das Spektrum hängt von der Wellenlänge bzw. Frequenz der Strahlung ab. Blaues Licht hat eine kürzere Wellenlänge bzw. eine höhere Frequenz, während rotes Licht eine größere Wellenlänge und kleinere Frequenz hat. Wenn sich die Galaxie auf uns zu bewegt, dann werden die Lichtwellen gestaucht. Pro Raumeinheit kommen mehr Wellen an bzw. deren Längen werden kleiner und ihre Frequenzen höher. In diesem Fall wird das Licht der Galaxien blauer. Wenn sich Galaxien von uns wegbewegen, dann werden die Lichtwellen gestreckt. Pro Raumeinheit kommen weniger Wellen an bzw. ihre Längen werden größer und ihre Frequenzen kleiner. In diesem Fall wird das Licht rötler.

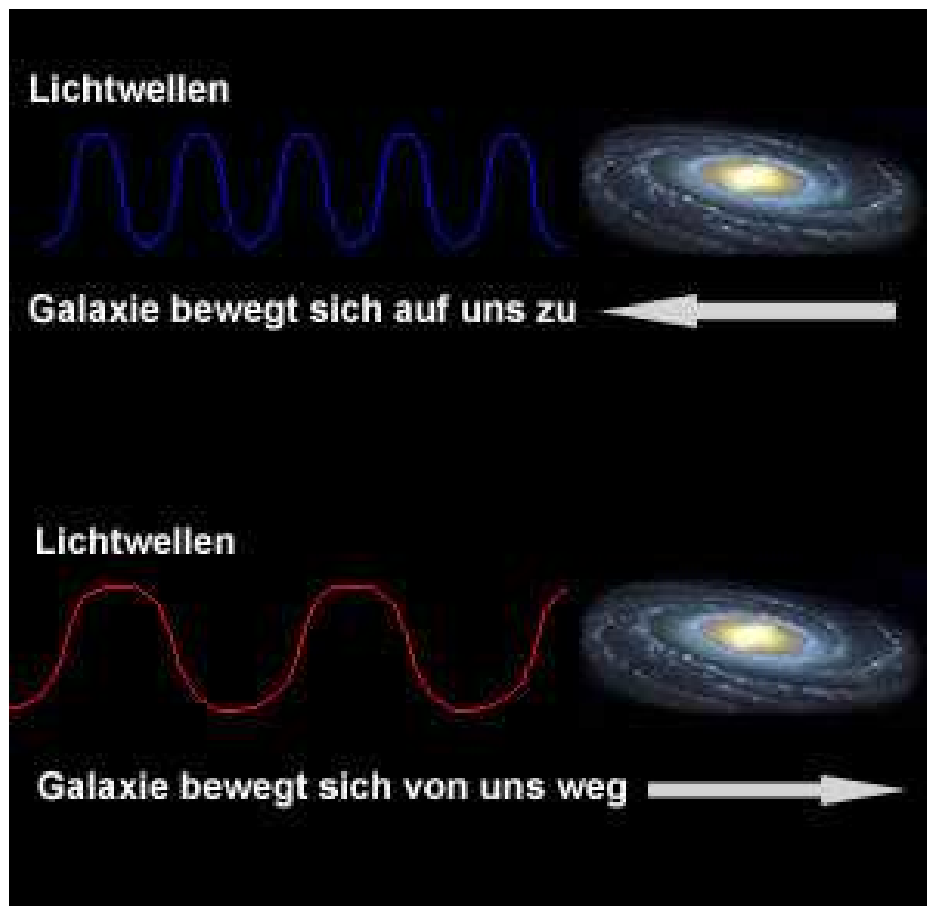


Bild 27: Die Rotverschiebung von Galaxien / Quelle: <https://stellariumblog.com>

Mit zunehmender Entfernung der Galaxien bzw. mit zunehmender Größe der betrachteten kosmischen Skalen dominiert die Wirkung der Expansion des Universums. Die Bewegung der Galaxien ist in diese eingebettet. Alle Galaxien entfernen sich voneinander. Die Entfernungsgeschwindigkeit wird als Fluchtgeschwindigkeit bezeichnet. Je höher diese Fluchtgeschwindigkeit ist, desto weiter sind die Spektrallinien aufgrund des sogenannten Dopplereffekts in den langwelligen Bereich bzw. den roten Bereich des Spektrums verschoben. Daher wird auch von Rotverschiebung gesprochen. Für die Rotverschiebung z gilt:

$$z = v/c$$

(25)

Hierbei ist v wieder die Fluchtgeschwindigkeit und c die Lichtgeschwindigkeit. Die Rotverschiebung ist also ein direktes Maß für die Entfernung einer Galaxie. Die im Jahre 1929 nachgewiesene Fluchtgeschwindigkeit der Galaxien ist ein Beleg für das Standardmodell der Kosmologie.

5.1 Die Entstehung der Galaxien

Je weiter eine Galaxie von uns entfernt ist, desto länger ist ihr Licht zu uns unterwegs gewesen. D.h. wir sehen die Galaxie nicht in ihrem aktuellen Ist-Zustand, sondern wie sie aussah, als ihr Licht ausgesandt wurde. Wenn eine Galaxie 13 Milliarden Lichtjahre von uns entfernt ist, dann sehen wir im Prinzip, wie sie vor 13 Milliarden Jahren aussah. Das stimmt natürlich nicht ganz exakt, da auch die beschleunigte Expansion des Universums mit berücksichtigt werden muss. Mit zunehmender Rotverschiebung beobachten wir also die Galaxien in immer früheren Entwicklungsstadien. Galaxien können mit Werten für die Rotverschiebung von etwa bis zu $z = 6$ beobachtet werden. Dennoch ist das Studium der Galaxien in ihren früheren Entwicklungsphasen schwierig und noch sind viele Fragen offen. Besonders schwierig zu verstehen sind bisher die Beziehungen zwischen Galaxien mit unterschiedlichen Rotverschiebungen. Ein Grund hierfür ist auch, dass bei deren Beobachtung unterschiedliche Selektionskriterien angewendet werden müssen. Daher wird zunächst versucht, die Entwicklung von Galaxien im Rahmen von Modellen zu verstehen. Innerhalb dieser Modelle müssen dann die verschiedenen Beobachtungssachverhalte interpretiert werden.

In der Kosmologie werden sogenannte N-Teilchen-Simulationen durchgeführt, welche die Entwicklung der Verteilung der Dunklen Materie als Funktion der Rotverschiebung voraussagen sollen. Hierbei wird vor allem auf die Entstehung der galaktischen Halos und ihre Verschmelzung mit anderen zu noch größeren Halos abgezielt. Bei der Entstehung der Galaxien entstanden zunächst die Halos, welche vor allem durch die Kugelsternhaufen gebildet werden. Daher gehören die Sterne in den Kugelsternhaufen zu den ältesten Sternen einer Galaxie. Die galaktische Scheibe entstand erst nach der Bildung des Halos. Am Anfang der Entwicklung folgte das Gas der Dunklen Materie. Mit zunehmender Dichte des Gases spielen physikalische Effekte wie Heizung, Kühlung und Reibung eine Rolle. Allerdings unterliegt die Dunkle Materie diesen physikalischen Effekten nicht, da sie nicht elektromagnetisch wechselwirkt. Damit verlief die Entwicklung des baryonischen Gases (bestehend aus Atomen, welche der elektromagnetischen Wechselwirkung unterliegen) anders als die der Dunklen Materie hinsichtlich ihres Verhaltens und ihrer räumlichen Verteilung.

Im Falle der Dunklen Materie wird zwischen Kalter Dunkler Materie (CDM) und Heißer Dunkler Materie (HDM) unterschieden. Die Kalte Dunkle Materie bewegt sich nicht mit relativistischen Geschwindigkeiten. In ihrem Fall ist also Strukturbildung möglich. Hingegen bewegt sich die Heiße Dunkle Materie mit relativistischen Geschwindigkeiten, also mit Geschwindigkeiten in der Nähe der Lichtgeschwindigkeit. Bei solch hohen Geschwindigkeiten kann es zu keiner Strukturbildung kommen. Für die Galaxienentwicklung ist also die Kalte Dunkle Materie von Bedeutung. Im Rahmen eines CDM-Modells bilden sich zuerst Halos aus Dunkler Materie mit kleineren Massen. Durch Verschmelzungsprozesse von kleinen Halos miteinander bilden sich größere, massereichere Halos aus Dunkler Materie. Es wird in diesem Fall von einem Bottom-Up-Szenario gesprochen, bei dem sich aus kleineren Einheiten immer größere entwickeln. Im Gegensatz dazu steht das Top-Down-Szenario, bei dem sich zuerst die größeren Strukturen und daraus dann die kleineren entwickelt haben. In Galaxienhaufen ist die Galaxiendichte besonders groß, so dass dort besonders viele Verschmelzungsprozesse stattfinden sollten und auch beobachtet werden.

Bei einer effizienten Kühlung des baryonischen Gases in einem Halo konnten sich die ersten Sterne bilden. In diesem Fall bilden aufgrund dynamischer Prozesse Bereiche mit höherer Massendichte im Gas. Die Gravitation gewinnt die Überhand und es kommt zu einem Kollaps. Es bildet sich ein kugelsymmetrisches Gebilde, welches immer mehr Masse durch Akkretion aufnimmt. Wenn Druck und Temperatur ausreichend große Werte erreichen, dann kommt es zur Zündung der Kernfusion von Wasserstoff zu Helium und der Stern ist geboren. Da sich die Sterne in einem Halo zuerst bilden, gehören sie auch zu den ersten Sternen.

Sowohl der Halo aus Dunkler Materie als auch das baryonische Gas besitzen Drehimpuls. Aufgrund des Drehimpulses des Gases und seiner Dissipation (Zerstreuung) sammelt sich dieses in einer Scheibe an. Das Gas in der Scheibe erreicht dann ausreichend große Dichten, damit der Sternbildungsprozess auch dort einsetzen kann. Mit diesem Modell kann die Entstehung von sogenannten Scheibengalaxien, in denen sich aufgrund von Dichtewellen und anderen Prozessen Spiralarme ausbilden, nachvollzogen werden.

Die Entstehung von Elliptischen Galaxien ist deutlich schwieriger zu verstehen. Einen Hinweis könnte die Tatsache liefern, dass der Bulge der Scheibengalaxien im Prinzip dem Aufbau einer Elliptischen Galaxie entspricht. Allerdings haben die Sterne in einer Elliptischen Galaxie eine große Geschwindigkeitsdispersion (Geschwindigkeitsverteilung), so dass das Gas, aus denen sich diese Sterne gebildet haben, nicht erst durch Dissipation in einer Scheibe kalt geworden sein kann. Auf der anderen Seite kann durch fehlende Dissipation die Sternbildung nicht nachvollzogen werden. Denn erst die Dissipation des Gases führt zu dessen Verdichtung, welche Voraussetzung für die Sternentstehung ist.

Ein Modell wäre der sogenannte monolithische Kollaps. Nach diesem hat sich das Gas im Halo fast augenblicklich in Sterne umgewandelt und wurde dabei weitgehend verbraucht. Dies geschah, bevor sich aufgrund des Drehimpulses und der Dissipation des Gases eine Scheibe herausbilden konnte. In diesem Fall muss der Vorgang sehr schnell verlaufen und in etwa bei einer bestimmten Rotverschiebung stattgefunden haben. In diesem Fall müssten die Elliptischen Galaxien in etwa alle gleich alt sein. Die Beobachtungen sprechen allerdings gegen dieses Modell.

Nach den gängigen Modellen zur Galaxienentstehung wird eine hierarchische Strukturbildung erwartet. Demnach verschmelzen kleinere Galaxien zu größeren. Wenn zwei etwa gleichgroße Scheibengalaxien verschmelzen sollten Elliptische Galaxien daraus entstehen. Demnach gibt es auch deutlich jüngere Elliptische Galaxien und weitere werden sich auch in Zukunft bilden. So etwa durch die Verschmelzung der Galaxis mit der Andromeda-Galaxie in einigen Milliarden Jahren. Diesem Modell steht auch die Tatsache nicht entgegen, dass Elliptische Galaxien hauptsächlich aus älteren Sternen bestehen und wenig Gas enthalten. Die beobachtbare Eigenschaft von Elliptischen Galaxien, dass deren Bestandteile bzw. ihre Sterne alt sind, bedeutet noch nicht, dass diese Galaxien nicht auch jünger sein können. Vielmehr deutet diese Tatsache auf den oben beschriebenen Entwicklungsweg hin.

Die Verschmelzung von Galaxien (Merging) ist ein normaler Vorgang und findet noch immer statt. Die größeren Galaxien bildeten sich durch die Verschmelzung von kleineren Galaxien. Dies stimmt auch mit der Beobachtung überein, wonach die Galaxien bei hohen Rotverschiebungen deutlich kleiner waren. Allerdings können Galaxien auch mit unterschiedlichen Größen und Massen verschmelzen. In diesen Fällen dominiert die größere und massereichere Galaxie und ihre Strukturen bleiben weitgehend erhalten.

Die Entstehung der Supermassive Schwarze Löcher als Bestandteile der Scheibengalaxien und der Elliptischen Galaxien und wie ihre Entstehung mit der Entwicklung der Galaxien zusammenhängt, ist noch nicht verstanden und Gegenstand aktueller Forschung. Es wird davon ausgegangen, dass diese bereits mit der Entstehung der Galaxien entstanden sind. Wenn Galaxien miteinander verschmelzen, verschmelzen anschließend auch ihre Supermassiven Schwarzen Löcher. Es können auch Galaxien beobachtet werden, bei denen dieser Verschmelzungsprozess noch nicht abgeschlossen ist und sich dort zwei Supermassive Schwarze Löcher umkreisen. Bei diesem Verschmelzungsprozess werden Gravitationswellen ausgesandt, welche beobachtet werden können.

Auf die Entstehung von Irregulären Galaxien wurde ausführlich in Kapitel 2.5 „Irreguläre Galaxien“ eingegangen.

Der Unterschied zwischen einer Normalen und einer Aktiven Galaxien dürfte alleine darauf beruhen, ob das Supermassive Schwarze Loch ausreichend mit Materie gefüttert wird. Durch die Aufnahme von Materie bildet sich dann eine Akkretionsscheibe, welche wiederum von einem Staubtorus umgeben. In Verbindung mit einem Magnetfeld und aufgrund der Rotation des Supermassiven Schwarzen Loches können sich in beiden Richtungen der Rotationsachse Jets herausbilden. Durch Verschmelzungsprozesse von Galaxien kann ein Supermassives Schwarzes Loch mit Materie versorgt und aus einer Normalen Galaxie eine Aktive Galaxie werden. In der Frühphase des Universums scheinen besonders kleine Galaxien mit sehr hoher Aktivität entstanden zu sein. Dies würde die Existenz der Quasare erklären. Mit abnehmender Rotverschiebung nahm die Aktivität der Galaxien ab und die Zahl der Normalen Galaxien zu. In der nachfolgenden Grafik wird dies dargestellt:

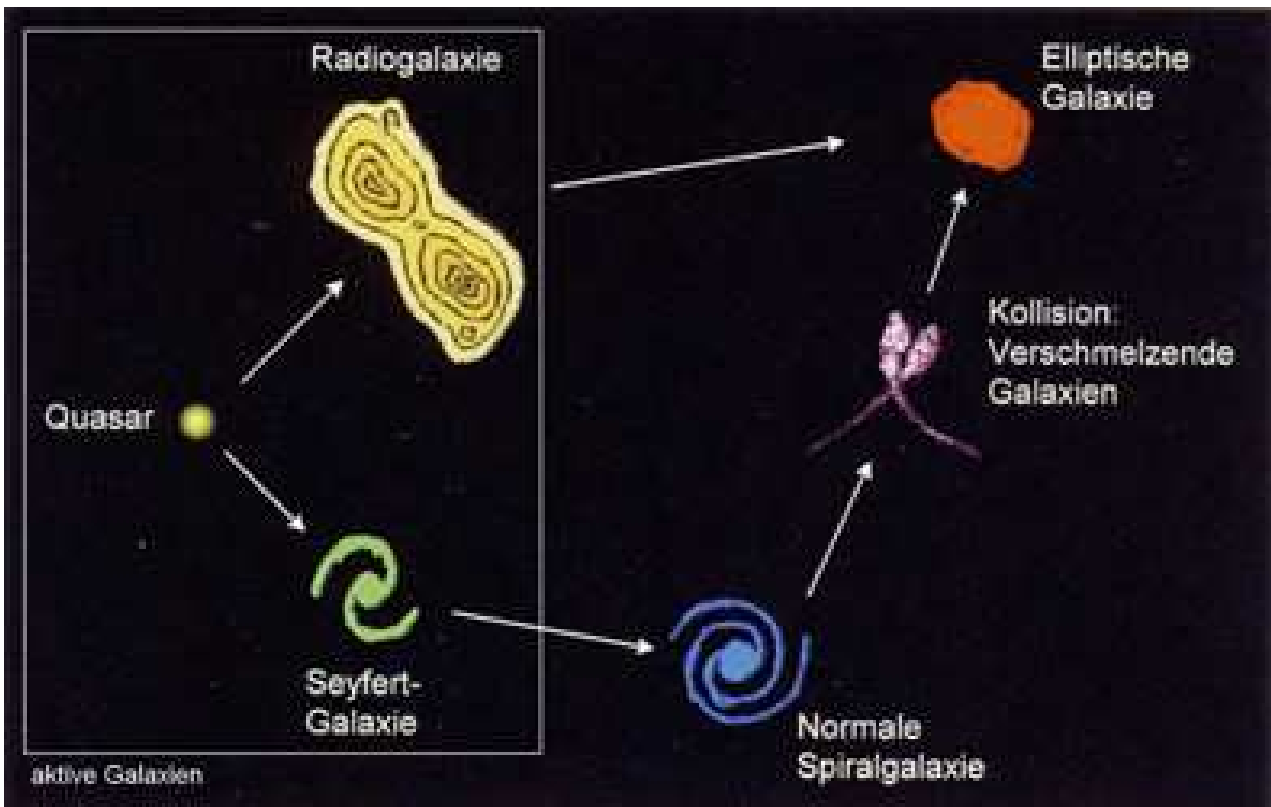


Bild 28: Die zeitliche Entwicklung von aktiven und normalen Galaxien /
Quelle: www.sternwarte-eberfing.de

5.2 Gruppen, Haufen und Superhaufen von Galaxien

Galaxien bilden Gruppen, Haufen und Super-Haufen. So gehört unsere Galaxis (Milchstraße) zusammen mit 20 weiteren Galaxien zur sogenannten Lokalen Gruppe. Zu dieser gehören unter anderen die Andromeda-Galaxie (M31), die Dreiecksgalaxie (M33) sowie die Kleine und die Große Magellansche Wolke. Bis auf unsere Galaxis sowie die Andromedagalaxie und die Dreiecksgalaxie handelt es sich bei den Mitgliedern der Lokalen Gruppe um Zwerggalaxien.

Bei Gruppen und Haufen handelt es sich um die massereichsten gravitativ gebundenen Strukturen im Universum. Der Übergang zwischen Haufen und Gruppen ist hierbei fließend und die nachfolgende Definition nur ein Richtwert. Gruppen haben bis zu 50 Mitgliedern in einer Sphäre mit einem Durchmesser von etwa $D < 1,5h^{-1}$ Mpc. Haufen haben mehr als 50 Mitglieder in einer Sphäre von etwa $D > 1,5h^{-1}$ Mpc. Gruppen und Haufen können sich wiederum noch zu Super-Haufen zusammenschließen, welche die größten Strukturen im Universum bilden.

Auch hinsichtlich der Masse gibt es eine mögliche Differenzierung als Richtwert. Gruppen beinhalten etwa $3 \cdot 10^{13}$ Sonnenmassen, Haufen etwa $3 \cdot 10^{14}$ Sonnenmassen und mehr. Insgesamt bewegt sich die Masse von Gruppen und Haufen in einem Bereich von 10^{12} bis 10^{15} Sonnenmassen. Ein Großteil der Masse von Galaxien bzw. Galaxiengruppen und -haufen liegt jedoch nicht in Form von Interstellarer Materie und Sternen, sondern in Form von sogenannter Dunkler Materie vor. Was hinter der Dunklen Materie steckt, ist noch ungeklärt. Vermutet werden massive Teilchen jenseits des Standardmodells. Die große Mehrheit der Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler favorisiert diese These. Von einer Minderheit werden auch Thesen vertreten, wonach die gängigen Gravitationstheorien reformiert werden müssten. Nach diesen Thesen sollen sich bei größeren Abständen die gravitativen Gesetzmäßigkeiten ändern und so die Existenz der Dunklen Materie vortäuschen.

Der Abell-Katalog umfasst heute 4073 Galaxienhaufen. Erstmals wurde dieser Katalog von George Ogden Abell (1927 – 1983) im Jahre 1958 veröffentlicht und enthielt ursprünglich 2712 Galaxienhaufen. Im Jahre 1989 wurde der Katalog um 1361 weitere Galaxienhaufen aus den zuvor noch nicht erfassten Teilen des südlichen Himmels ergänzt. Abell unterteilte die Galaxienhaufen in regelmäßige, welche eine sphärische Symmetrie zeigen, und in irreguläre ein. Die regelmäßigen Haufen enthalten nur E- und S0-Galaxien und haben viele Mitglieder, in der Regel mehr als 1.000. Die irregulären Galaxienhaufen umfassen alle Galaxientypen, haben jedoch nur wenige Mitglieder. Ein Beispiel für einen irregulären Galaxienhaufen bietet die Lokale Gruppe mit ihren 20 Mitgliedern, welche sich auf einen Bereich von über einem Mpc erstrecken. Das Fornax-System ist ein Nachbarhaufen der Lokalen Gruppe und enthält 16 Mitglieder. Der Comahaufen hingegen erstreckt sich auf einen Bereich von fast 10 Mpc und beinhaltet 100 Galaxien. Der Virgohaufen ist der nächste große Galaxienhaufen, welcher etwa 16 Mpc von uns entfernt ist und von uns aus gesehen im Sternbild Jungfrau liegt. Dieser beinhaltet mindestens 1.300 Galaxien, wahrscheinlich jedoch bis zu 2.000.

Zur Erfassung der Galaxienhaufen sind ihre Leuchtkraftfunktionen von Bedeutung. Diese geben an, wie viele Galaxien es bei einer bestimmten Helligkeit in einer bestimmten und begrenzten Volumeneinheit gibt. Dabei wird auf der Abszisse ein Größenklassenintervall und auf der Ordinate der Logarithmus von der Anzahl der Galaxien aufgetragen.

Interessant ist auch das Verhältnis zwischen den durchschnittlichen Entfernungen der Galaxien in einem Haufen und den Galaxiedurchmessern. Der durchschnittliche Abstand zwischen den Galaxien ist kleiner als das 100-fache ihrer Durchmesser und das ist deutlich geringer als bei anderen astrophysikalischen Systemen. So betragen die Abstände der Planeten im Sonnensystem das 100.000-fache ihrer Durchmesser und die Abstände der Sterne sogar das 10.000.000-fache ihrer Durchmesser. Daraus dürfte ersichtlich werden, dass die Galaxien in einem Sternhaufen häufiger miteinander kollidieren und dabei zu neuen Systemen verschmelzen können. Planeten und Sterne hingegen stoßen äußerst selten miteinander zusammen, selbst bei der Kollision von Galaxien sind Zusammenstöße von Sternen und Planeten untereinander äußerst selten.

Die Galaxiengruppen und Galaxienhaufen bilden wiederum sogenannte Super-Haufen, welche die größten Strukturen im Universum bilden. Diese Super-Haufen sind oft durch Ketten miteinander verbunden. Einen dieser Superhaufen bildet der Virgo-Superhaufen, dessen gravitatives Zentrum der oben genannte Virgo-Haufen bildet. Der Virgo-Superhaufen beinhaltet etwa 100 bis 200 Galaxienhaufen. Auch die Lokale Gruppe ist Teil dieses Super-Haufens. Zwischen diesen Superhaufen gibt es leere Bereiche, welche als Voids bezeichnet werden. Die Super-Haufen zeigen in der Regel keine sphärische Struktur, sondern gekrümmte, oft pfannkuchenartige Filamente. Die Voids wiederum sind sphärisch und beinhalten keine hellen Galaxien. Weitgehend alle Galaxienhaufen, mehr als 90 Prozent, dürften Bestandteile eines Super-Haufens sein.

Zwischen den Galaxien sowie zwischen den Haufen gibt es auch Materie, welche als Intergalaktische Materie bezeichnet wird. Auch sind Kollisionen von Galaxienhaufen möglich. In der zeitlichen Entwicklung Galaxien, Haufen und Super-Haufen dürften sich zuerst die Galaxien entwickelt haben, welche sich dann zu Galaxiengruppen und –haufen zusammenschlossen. Die Galaxien- und Haufenentstehung dürfte an bestimmten Orten im Universum bevorzugt verlaufen sein, während andere Bereiche eher leer bliebe. Auf diese Weise dürften dann im Ergebnis die Super-Haufen und die Voids entstanden sein. Nachfolgend ein Bild von den großräumigen Strukturen im Universum.

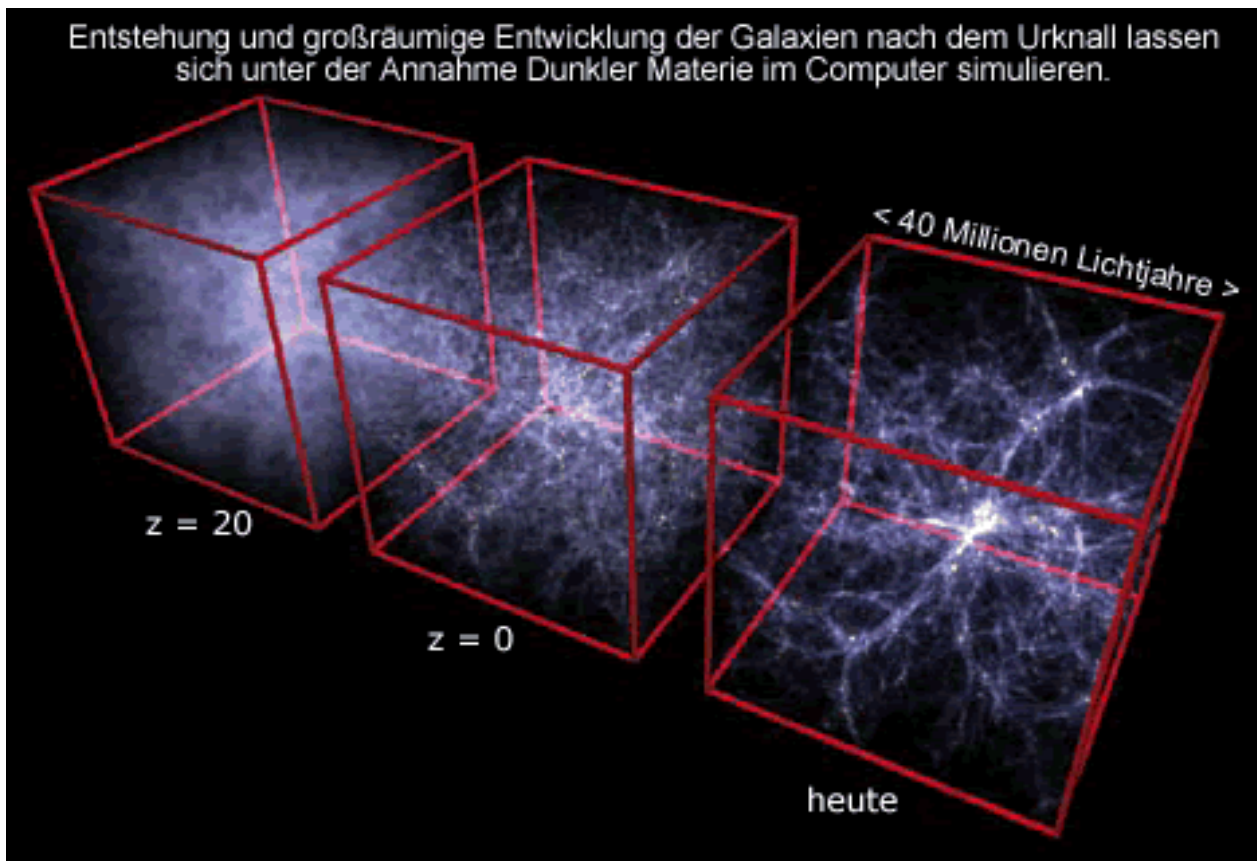


Bild 29: Der von den Galaxien gebildeten Strukturen im Universum / Quelle: www.der-kosmos.de

6 Schlusswort

Diese Abhandlung über die „Extragalaktische Astronomie“ stellt eine Literaturrecherche dar. Die hierfür verwendete Literatur ist im Literaturverzeichnis angegeben und eignet sich auch für die weitere Vertiefung der Thematik.

Auf kosmologischen Skalen bilden Galaxien die kleinsten Bausteine des Universums. Sie sind Ansammlungen von einigen hundert Milliarden Sternen und großen Mengen von Interstellarer Materie, welche dynamisch und kosmogonisch eine Einheit bilden. In der kosmologischen Hierarchie geht es noch weiter, in dem Galaxien Gruppen und Haufen bilden. In diesen Haufen sind die Galaxien gravitativ miteinander Verbunden und bilden ein System. Doch auch die Gruppen und Haufen können sich zu noch größeren Einheiten zusammenschließen, den Super-Haufen.

Die Galaxien werden wie Tröpfchen in einer fließenden Flüssigkeit von der sich ausdehnenden Raumzeit des Universums mitgenommen. Sie sind daher wichtige Indikatoren für die Kosmologie, welche das Universum als Ganzes beschreibt. Mit zunehmender Entfernung der Galaxien von uns überwiegt die durch die Expansion des Universums hervorgerufene Galaxienflucht. Diese macht sich wiederum durch die Rotverschiebung in den Galaxienspektren bemerkbar. Je höher die Rotverschiebung ist, desto weiter sind die betreffenden Galaxien entfernt. Doch mit zunehmender Entfernung sehen wir die Galaxien auch in zunehmend jüngeren Entwicklungsphasen. Die Lichtgeschwindigkeit ist endlich. Eine 13 Milliarden Lichtjahre entfernte Galaxien sehen wir so, wie sie etwa vor 13 Milliarden Jahre aussah und nicht, wie sie heute aussieht. Zum Teil können wir so erforschen, wie Galaxien sich entwickelt haben. Allerdings ist vieles noch wörtlich gesprochen im Dunkeln für uns und daher nicht geklärt.

Im Falle der Galaxienentstehung dürften deren Keime aufgrund von quantenphysikalischen Effekten entstanden sein. Kurz nach dem Urknall war das Universum sehr Dicht, die Raumzeit eine Art Schaum. Es kam zur spontanen Bildung von Teilchen, welche sich kurz nach ihrer Bildung wieder gegenseitig vernichteten. In diesem Fall wird von Quantenfluktuationen gesprochen. Doch kurz nach dem Urknall kam es zur sogenannten Inflationsphase, währenddessen sich das Universum blitzartig um den Faktor 10^{30} ausgedehnt haben soll. Die winzigen Quantenfluktuationen erzeugten Unregelmäßigkeiten in der Materiedichte, welche nun durch die Inflation ins makroskopische mitgerissen wurden. Dort bildeten sich dann Massenfluktuationen. In den Gebieten mit höherer Materiedichte bildeten sich dann die Galaxien. Zunächst konnte nur die Dunkle Materie Strukturen bilden. Es als das Universum ausreichend abgekühlt war, konnte das baryonische Gas diesen Strukturen folgen.

Im Ergebnis bildeten sich so Ansammlungen von Gas. Zuerst in Form eines Halos, dann in Form von Scheiben. Aus diesem Gas entstanden dann die ersten Sterne und die ersten Scheibengalaxien waren geboren. Eingebettet in diesen Scheiben entstanden dann Spiralarme. Die Elliptischen Galaxien entstanden wiederum durch die Verschmelzung von großen Scheibengalaxien. Die Irregulären Galaxien waren ursprünglich wohl Scheibengalaxien oder Elliptische Galaxien. Durch gravitative Wechselwirkung mit anderen Galaxien wurden diese nach der gängige These verformt und erhielten so ihre irreguläre Struktur.

Die Extragalaktische Astronomie ist ein aktuelles Forschungsgebiet. Es gibt in diesem Forschungsgebiet noch viele offene Frage, welche zu klären sind. Daher dürfte diese Abhandlung auch noch nicht das letzte Wort sein. Insgesamt stellt diese Abhandlung eine Zusammenfassung des grundlegenden Wissens über Galaxien dar und wurde daher kompakt gehalten. Diese Abhandlung wäre ohne die Mitwirkung von Freunden und Kollegen nicht möglich gewesen. So möchte ich allen Danken, welche mir in irgendeiner Form bei der Erstellung dieser Abhandlung geholfen haben. Ein besonderer Dank gilt auch demjenigen, der diese Abhandlung Korrektur gelesen hat. Doch auch meinen treuen Leserinnen und Lesern möchte ich sehr danken!

7 Literatur-, Quellen- und Bilderverzeichnis

Folgende Literatur fand bei der Erstellung dieser Abhandlung Verwendung und kann zur Vertiefung der Thematik empfohlen werden:

- 1) Arnold Hanslmeier; Einführung in die Astronomie und Astrophysik; 2013.
- 2) A. Weigert, H.J. Wendker, L. Wisotzki; Astronomie und Astrophysik; 2009.
- 3) Peter Schneider, Einführung in die Extragalaktische Astronomie und Kosmologie; 2008.
- 4) Dr. Andreas Müller; Black Hole Astrophysics: Magnetohydrodynamics on Kerr Geometrie; 2003.
- 5) Dr. Andreas Müller; Aktive Galaktische Kerne – Leuchtfeuer im All; abgerufen 2017.
- 6) Dr. Andreas Müller; Lexikon der Astrophysik; abgerufen 2017.

Bilderverzeichnis:

Titelbild: Ralf Schmidt

Bild 1: www.wikipedia.org

Bild 2: www.sternwarte-eberfing.de

Bild 3: www.sternwarte-eberfing.de

Bild 4: NASA

Bild 5: www.wikipedia.org

Bild 6: www.wikipedia.org

Bild 7: www.spiegel.de

Bild 8: www.spiegel.de

Bild 9: www.wikipedia.org

Bild 10: www.wikipedia.org

Bild 11: NASA / ESA / HST

Bild 12: NASA / ESA / HST

Bild 13: www.wikipedia.org

Bild 14: NASA / ESA / HST

Bild 15: NASA / ESA / HST

Bild 16: <http://www.fornoff.homepage.t-online.de/Qastro/4Sterne/veraenderliche.htm>

Bild 17: NASA

Bild 18: Dr. Andreas Müller / Lexikon der Astrophysik

Bild 19: tex.stackexchange.com

Bild 20: Dr. Andreas Müller / Lexikon der Astrophysik

Bild 21: North Carolina University

Bild 22: Erik Zackrisson, Department of Astronomy, Stockholm University

Bild 23: Dr. Andreas Müller / Lexikon der Astrophysik

Bild 24: Dr. Andreas Müller / Lexikon der Astrophysik

Bild 25: www.spektrum.de

Bild 26: www.pion.cz

Bild 27: <https://stellariumblog.com>

Bild 28: www.sternwarte-eberfing.de

Bild 29: www.der-kosmos.de