

Greselius Gymnasium Bramsche
Schuljahr 2024/2025

sf 2 Astronomie | 12 | Q 1.2



Galaxienarten - Die kosmischen Städte und ihre Klassifikation

von

Alexej Knölker

Facharbeit

im Seminarfach Astronomie

Fachlehrer: Herr Riemer

Abgabetermin: 03. März 2025, Bramsche

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
2	Grundlagen über Galaxien	3
2.1	Definition	3
2.2	Allgemeiner Aufbau	3
2.3	Milchstraße als Beispiel	4
3	Klassifikation	6
3.1	Hubbles morphologische Einteilung	6
3.2	Arten	7
3.2.1	Elliptische Galaxien	7
3.2.2	Spiralgalaxien	8
3.2.3	Balkenspiralgalaxien	11
3.2.4	Irreguläre Galaxien	12
3.2.5	Sondertypen	13
4	Fazit	15
	Literaturverzeichnis	16
	Abbildungsverzeichnis	21
A	Anhang	I
A.1	Anmerkungen	I
A.2	ergänzende Berechnungen	I
A.3	Reflexion	II
A.4	Erklärungen	III
A.4.1	Selbstständigkeitserklärung	III
A.4.2	Einverständniserklärung zur Veröffentlichung	III

1 Einführung

Damals, bis vor einigen Jahrzehnten, ist man noch davon ausgegangen, dass es lediglich ein Milchstraßensystem gibt. Technische Entwicklungen des 20. Jahrhunderts wie große Fernrohre, Satelliten oder speziell das Hubble-Weltraumteleskop der NASA [1] ermöglichen es, eine verbesserte Sicht auf die Dimensionen des Universums zu erhalten. Die Erkenntnis der Existenz fremder Galaxien von Edwin Hubble im Jahr 1923 [2] und den darauf aufbauenden Forschungen führen zu dem heutigen Stand: Es gibt mehrere hundert Millionen Galaxien, die jeweils mehrere Milliarden Sterne enthalten. Die Größenordnung ist unvorstellbar, daher können offensichtlich nur Schätzungen getroffen werden. ([3], S.60)

Galaxien im Universum sind ein zentrales, immer wieder erwähntes astronomisches Objekt. Denn entweder wird etwas betrachtet, von dem das übergeordnete System die Galaxie ist, sie selbst wird betrachtet oder als Teil eines größeren Systems. Bei jedem Mal ist es von hoher Bedeutung, eine gewisse grundlegende Vorstellung von Galaxien zu erhalten, um Zusammenhänge im Universum bestmöglich zu verstehen.

Darüber hinaus ist bemerkenswert, wie sehr Galaxien mit Städten auf der Erde vergleichbar sind. Genauso wie wenn man einer Stadt begegnet, nimmt man bei Galaxien plötzlich ein geschlossenes „Siedlungsgebiet“ mit einer hohen Anzahl und Dichte an Sternen wahr. Betrachtet man Sterne als Einfamilienhäuser, Sternsysteme als Mehrfamilienhäuser, das Zentrum einer Galaxie als City, wovon sich Sterne im übertragenen Sinn anziehen lassen wie Menschen, sowie weniger dichte Außenbereiche als Vororte - und alles leuchtet mit unterschiedlicher Intensität wie in der städtischen Nacht - sind die kosmischen Städte noch besser vorstellbar. Wenn beispielsweise unsere Heimatgalaxie, die Milchstraße, so groß wie die Stadt Köln sein wür-

de, ergibt sich eine Distanz von der Milchstraße bis zur benachbarten Andromeda-Galaxie von Köln bis zur tschechischen Hauptstadt Prag beziehungsweise $537 \text{ km}^{\text{A.2}}$. Sowohl Galaxien als auch Städte weisen eine Vielfalt an Größe, Form und Aussehen auf. Zudem finden innerhalb der Galaxie an gewissen Stellen Kollisionen und Wechselwirkungen statt, sodass neue Strukturen entstehen, sowie durch Einflüsse aus der Umgebung. Allerdings sind Städte anders als Galaxien künstlich geplant und umgesetzt, was diesen Vergleich so spannend macht. Gibt es bei der unfassbaren Menge an Galaxien (natürlichen Ursprungs) Strukturmerkmale ähnlich wie bei einer Stadt, die jeweils nur ein Teil aller Galaxien erfüllt? Und damit eine Möglichkeit, eine Übersicht zu generieren, mit dem Ziel, Galaxien systematisch zu untersuchen und eventuell ihre allgemeine Funktion im Universum nachzuvollziehen?

Tatsächlich existieren Modelle zur Systematik von Galaxien, und in dieser Facharbeit werde ich mich intensiv der heute bekanntesten grundlegenden sogenannten „Morphologischen Klassifikation“ nach Edwin Hubble widmen ([4], S.32f.). Darüber hinaus bestehen weitere Galaxienklassifizierungen wie die der Größe, Farbe oder Masse, jedoch würden ihre Erläuterungen den Rahmen der Facharbeit sprengen, zumal sie bei weitem weniger bedeutend für die Wissenschaft sind.

2 Grundlagen über Galaxien

2.1 Definition

Galaxien sind riesige gravitativ gebundene Systeme bestehend aus Sternen, Planeten, Gasnebel, Staubwolken, Dunkler Materie und weiteren astronomischen Objekten [?]. Ihre Gesamtmasse erstreckt sich über ca. 10^9 - 10^{13} Sonnenmassen [5] mit Tausend bis mehreren Billionen Sternen; ihr Durchmesser beträgt in der Regel 3.000 - 300.000 Lichtjahre [6] beziehungsweise ca. 10^{19} m $\hat{=}$ 1057 Lichtjahre (Abb. 1).

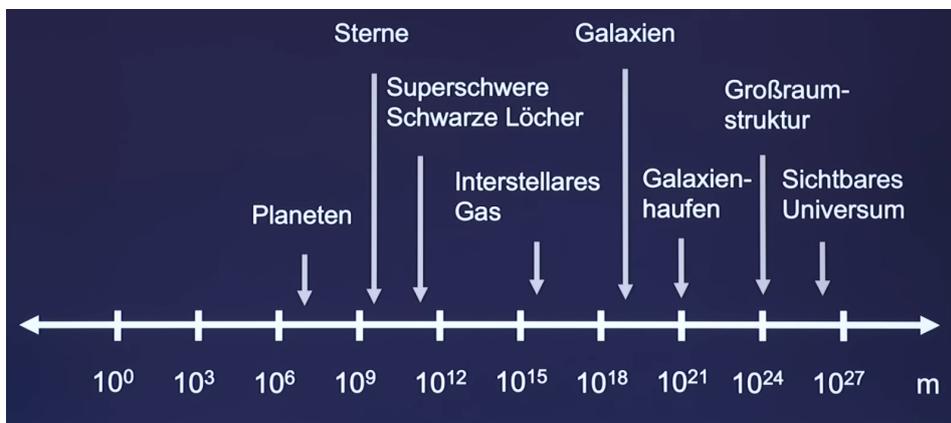


Abbildung 1: Skalen des Universums [7]

Sie bilden in der Astronomie eine hinsichtlich der Größe mittlere Systemklasse, die somit eine zentrale Stellung für astronomische Zusammenhänge darstellen. Intergalaktische Distanzen liegen meist im Bereich von Millionen Lichtjahren, wie die zwischen der Milchstraße und ihrer benachbarten Andromeda-Galaxie, wofür das Licht 2.500.000 Jahre zurücklegen müsste. Zudem ist die Dichte innerhalb von Galaxien wesentlich höher als die Dichte des intergalaktischen Mediums, was damit vergleichsweise leer erscheint [8]. [5]

2.2 Allgemeiner Aufbau

Jede Galaxie besteht aus Sternen als Hauptbestandteil und aus Gas und Staub im interstellaren Medium. Darüber hinaus weisen sie ein

Zentrum auf, bei dem die gravitativen Kräfte dominieren und die höchste Materiedichte besteht. Bei größeren Galaxien besteht dann oft ein schwarzes Loch. Den äußeren Rand einer Galaxie, dort wo noch gravitative Kräfte herrschen, bildet der Halo, der die Galaxie mit einem zwei- bis zehnfachen Durchmesser kugelförmig umgibt und aus Resten der Galaxieentstehung besteht [9]. Möglich sind ebenfalls wenige Satellitengalaxien, kleinere Galaxien, die gravitativ an die Hauptgalaxie gebunden sind [10].

Die Sterne bestimmen das Erscheinungsbild einer Galaxie und bilden zusätzlich die größte Masse der sichtbaren Materie einer Galaxie, und damit tragen sie maßgeblich zur Entwicklung und Dynamik einer Galaxie bei. Junge, blaue Sterne befinden sich eher außerhalb vom Zentrum bei Gaswolken; alte, rote Sterne im Zentrum oder in alten (elliptischen) Galaxien. Gas und Staub ermöglichen die Entstehung von Sternen. Wenn Gas aufgebraucht ist, können Galaxien theoretisch „sterben“, sie verblassen über Zeiträume von mehreren Milliarden Jahren [11]. Die Dunkle Materie ist entscheidend für die Gravitation und damit wirkt sie sich auch auf die Geschwindigkeit einer Galaxie aus [12].

Im Gegensatz dazu unterscheidet sich bei den Galaxien die Anordnung der Sterne, sodass zum Beispiel zwei Spiralarme entstehen können oder vier. Galaxien rotieren unterschiedlich, zum Teil auch nicht. Darüber hinaus variieren Masse, Größe, Farbe, Sternpopulationen, Entwicklungsstadien sowie die Umgebung, die zu Wechselwirkungen mit anderen Galaxien führen kann. Hinsichtlich der Form lassen sich jedoch wiederkehrende Muster erkennen.

[13]

2.3 Milchstraße als Beispiel

Die Milchstraße (Abb. 2) ist eine Balkenspiralgalaxie, deren Durchmesser etwa 150.000 Lichtjahre beträgt. Mit einem Umfang von min.

300 Milliarden Sternen und einer Gesamtmasse von etwa einer Billion Sonnenmassen zählt sie zusammen mit der Andromeda-Galaxie zu den mit Abstand größten Galaxien der lokalen Gruppe [10].

Allerdings macht die leuchtende Materie in etwa nur 20% aus. Sie weist ein massereiches Zentrum (*bulge*) auf, mit einem supermassereichen schwarzen Loch namens Sagittarius A*. Ihm entspringen vier große Spiralarme, unser Sonnensystem befindet sich in dem Nebenarm Orion. Des Weiteren lässt sich eine 2000 Lichtjahre dünne Scheibe (*disc*), die von einer ca. 7000 Lichtjahre dicken Scheibe umgeben ist, identifizieren, sowie ein umschließender Halo ([14], S.24f.). Dieser ist leuchtschwach, da er sich hauptsächlich aus dunkler Materie zusammensetzt, jedoch existieren einige Kugelsternhaufen (*globular clusters*), bestehend aus alten Sternen. [15]

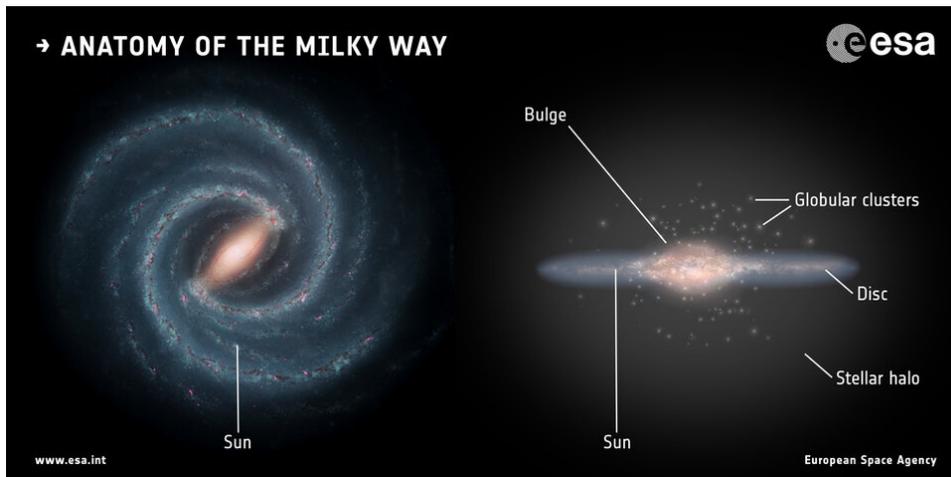


Abbildung 2: Milchstraße [16] Credit: *Left: NASA/JPL-Caltech; right: ESA; layout: ESA/ATG medialab*

Ihre Satellitengalaxien sind etwa die Sagittarius-Zwerggalaxie mit einer Entfernung von ca. 80.000 Lichtjahren zur Milchstraße und die Große Magellansche Wolke mit einer Entfernung von ungefähr 160.000 Lichtjahren ([17], S.57). Die Rotationsgeschwindigkeiten der Sterne belaufen sich auf ca. 200 km/s. Das damit einhergehende Problem der Spiralarme sowie weitere Erläuterungen zu den Spiralgalaxien folgen im Kapitel 3.2.2.

3 Klassifikation

3.1 Hubbles morphologische Einteilung

Der US-amerikanische Astronom Edwin Hubble klassifiziert 1936 die Galaxien nach morphologischen Merkmalen (Abb. 3), eine Einteilung, die heute noch weit verbreitet ist. Dabei stößt er auf elliptische Formen, Spiralformen, Spiralformen mit zentralem Balken und geometrisch uneindeutige Formen mit jeweils leichten Abweichungen. Die elliptischen Galaxien (*ellipticals*) E0 - E7 beginnen bei E0 kugelförmig und nehmen mit steigender Zahl an Elliptizität zu. Dann folgen linsenförmige Galaxien (*lenticulars*) S0 als Zwischenform zwischen den elliptischen und den Spiralgalaxien, denn diese enthalten bereits eine Scheibe, nur keine Spiralarme. Normale Spiralgalaxien (*normal spirals*) werden mit Sa - Sc gekennzeichnet, Balkenspiralgalaxien (*barred spirals*) mit SBa - SBc, wobei der kleine Buchstabe alphabetisch aufwärts für eine Verkleinerung des Zentralbereichs und eine Öffnung der Spiralarme steht. Irreguläre Galaxien (*irregulars*) stehen isoliert neben dem Stimmgabel-Schema und bilden den Rest: Galaxien, die strukturell chaotisch erscheinen. ([18], S.66ff.) [13]

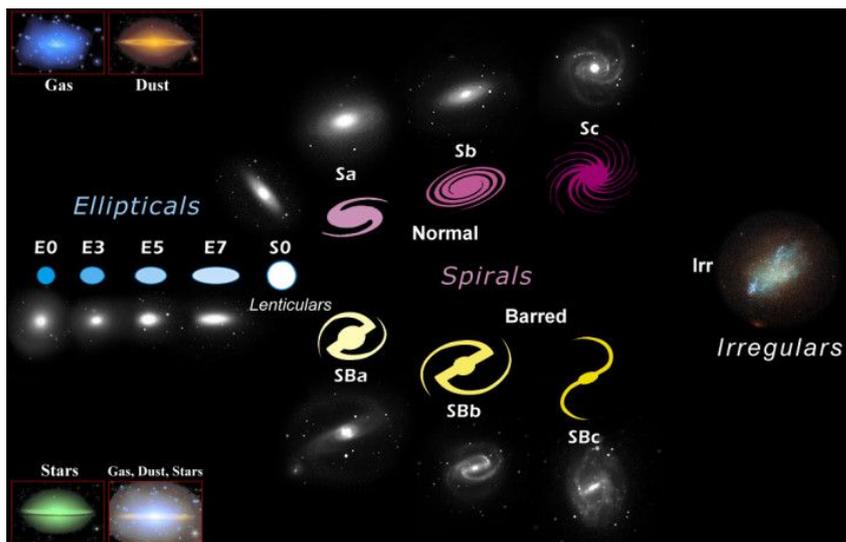


Abbildung 3: Hubble-Klassifikation [19]

Die Entwicklung der Galaxien ist absichtlich nicht entlang eines Pfads von links nach rechts zu deuten. Jedoch erwies sich Hubbles Vermu-

tung, elliptische Galaxien seien Vorstufen von Spiralgalaxien, als inkorrekt. Aktuelle Einblicke in die Eigenschaften von Galaxien und deren Entwicklung, durch Betrachtung naher sowie weit entfernter rotverschobener Galaxien per Teleskop, zeigen, dass elliptische Galaxien umgekehrt aus Kollisionen von Spiralgalaxien entstehen können. [20]

3.2 Arten

3.2.1 Elliptische Galaxien

Elliptische Galaxien (20%|13%)^{A.1} sind von innen strukturlos, bilden aber als Ganzes einen kugelförmigen bis elliptischen dreidimensionalen Körper, und ihre Helligkeit nimmt von innen nach außen ab. Der Inhalt einer solchen Galaxie besteht hauptsächlich aus Sternen der Population II (alt, rot), die sich zufällig bewegen, sowie aus wenig interstellarer Materie. Folglich wird die Bildung von jungen, blauen Sternen gehemmt. Darüber hinaus existieren massive schwarze Löcher von mehreren Milliarden Sonnenmassen, da sie bereits über einen langen Zeitraum bestehen und aus Verschmelzungen hervorgehen. [21]

Denn die Spiralgalaxien, die viel interstellares Gas, junge Sterne und eine geordnete Struktur aufweisen, würden durch Verschmelzungen logisch begründet ihre Struktur verlieren und einen immer größeren Anteil alter Sterne gewinnen. Eine solche Verschmelzung betrifft uns in drei bis vier Milliarden Jahren, wenn sich die Sterne der Milchstraße und Andromeda-Galaxie treffen und in weiteren drei Milliarden Jahren zu der elliptischen „Milkomeda“-Galaxie entwickeln; ihre Halos stünden bereits in Kontakt [23]. [24]



Abbildung 4: M60/NGC 4649 (E2) [22] Credit: NASA, ESA, and the Hubble Heritage (STScI/AURA)-ESA/Hubble Collaboration

Ein Beispiel ist die Galaxie M60/NGC 4649 (Abb. 4), die ca. 55 Millionen Lichtjahre entfernt ist, eine leichte Elliptizität aufweist (E2) und aufgrund ihrer Sterne der Population II mit kühlen Roten Riesen schwach rötlich erscheint. [25]

3.2.2 Spiralgalaxien

Im Gegensatz zu elliptischen Galaxien besitzen Spiralgalaxien (77%|33%) eine klar erkennbare Struktur mit einem Kern und einer anliegenden Scheibe, die aus vom Zentrum entspringenden Spiralarmen besteht. Normale Spiralgalaxien machen in etwa 1/3 aller Spiralgalaxien aus. Der Kern enthält überwiegend Sterne der Population II und oft ein zentrales schwarzes Loch. Im Kontrast dazu weist die Scheibe einen hohen Anteil an Gas und Staub sowie leuchtkräftigen Sternen der Population I (jung, blau) auf. Weil mit zunehmender Entfernung die Dichte abnimmt und der nicht leuchtende Gasanteil zunimmt, nimmt die Flächenhelligkeit der Galaxie exponentiell ab ([3]S.63). [26]

Daher erscheint das Zentrum eher rötlich und die Spiralarme bläulich, wie bei der NGC 2008 (Abb. 5). Sie ist eine Spiralgalaxie mit kleinem Zentrum und weit geöffneten Spiralarmen, deswegen die Bezeichnung Sc. [27]

Die Entstehung von Spiralgalaxien beginnt mit dem Kollaps von Protogalaxien, bei dem sich Materie unter der eigenen Gravitation verdichtet, wodurch ein gravitatives Zentrum entsteht. Währenddessen wandern größere Sternhaufen dort hinein, wodurch sich ein kugelförmiger heller Kern bildet. Anders als bei elliptischen Galaxien, in denen eine schnelle Sternentstehung zu der namensgebenden Form führt, existiert in Spiralgalaxien ein größerer



Abbildung 5: NGC 2008 (Sc) [27]
Credit: ESA/Hubble & NASA, A. Bellini; CC BY 4.0

Anteil an diffusem Gas, zum Beispiel durch Supernovae, und bleibt auch erhalten. Dies bedeutet, dass die Sternbildung verlangsamt und über lange Zeiträume stattfindet. In der rotierenden Gasmasse kollidieren zufällig bewegende Wolken, wodurch sich allmählich geordnete Umlaufbahnen herausbilden. Schließlich entsteht eine zentrale Umlaufbahn, die ein stabiles Verhältnis zwischen der Massenanziehung des Kerns und der Zentrifugalkraft des sich bewegenden Gases darstellt. Mit der Zeit werden Anzeichen einer Spiralstruktur erkennbar. Auch Kugelsternhaufen geben sich im Halo zu erkennen, wenn das Gas zur Scheibe hin entweicht. Durch die fortlaufenden Prozesse wächst die Galaxie weiter und entwickelt sich zu einer eindeutigen Struktur aus einer zentralen Kugel und einer ausgedehnten rotierenden Scheibe. ([4], S.130ff.)

Verwunderlich ist, dass in der Scheibe die Rotationsgeschwindigkeiten nach außen hin nicht abnehmen, sondern fast konstant bleiben und leicht zunehmen. Klar ist, dass es sich nicht um eine feste Scheibe handelt,

$$v = \omega \cdot r \quad (1)$$

wobei die Bahngeschwindigkeit v wegen konstanter Winkelgeschwindigkeit ω proportional zum Radius wachsen würde. [28]

Es wäre zu erwarten, dass bei mehreren Objekten, die sich um ein Massezentrum bewegen, mit zunehmendem Radius die gravitative Anziehungskraft abnimmt, und damit auch in festgelegtem Maße die Geschwindigkeit, wie es das dritte Keplersche Gesetz darstellt:

$$\frac{T^2}{r^3} = C \quad (2)$$

Dabei ist T die Umlaufzeit, r der Radius zum Zentralobjekt und C eine Konstante, die bei allen Himmelskörpern desselben Zentralobjekts gleich ist. Erhöht man also den Radius, der kubiert wird, muss sich die Umlaufzeit, die quadriert wird, noch mehr erhöhen, um die Konstante C zu erhalten. Daraus ergibt sich für die Bahngeschwindigkeit

v ,

$$v = \frac{2\pi r}{T} \quad (3)$$

dass der Nenner verhältnismäßig zunimmt und die Bahngeschwindigkeit insgesamt abnimmt, je weiter das Objekt vom Zentrum entfernt ist. Genauer gesagt nimmt die Bahngeschwindigkeit mit dem Kehrwert der Wurzel des Radius ab:

$$v = \frac{2\pi}{\sqrt{C \cdot r}} \quad \left| \quad v \propto \frac{1}{\sqrt{r}} \right. \quad (4)$$

[29]

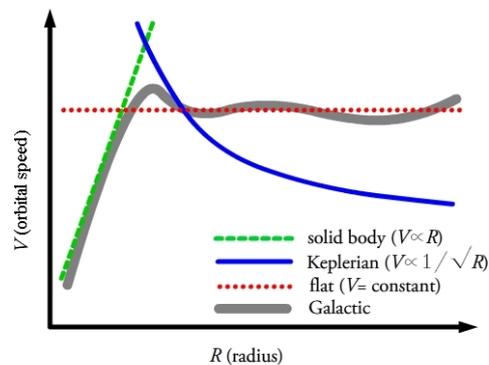


Abbildung 6: Rotationskurve einer Galaxie [30]

Weil aber die Objekte in der Milchstraße (fast) gleich schnell rotieren ([31], S.423f.) - man spricht von einer flachen Rotationskurve (Abb. 6) - würde ein Stern in der Nähe des galaktischen Zentrums die Galaxie aufgrund des kürzeren Orbits viel schneller umkreisen als ein Stern am Rand. Diese differenzielle Rotation würde dazu führen, dass sich die Spiralarme verformen, sie bleiben jedoch in ihrer Form stabil. [32]

Daher besteht die sogenannte Dichtewellentheorie, die besagt, Spiralarme seien Dichtewellen. Diese entstehen im interstellaren Raum konsequent durch gravitationsbedingte Variationen in der Dichte, wobei sich die Dichte ansammeln kann wie in einem Galaxiekern. Dort wandern Gas und Sterne hindurch, es liegt eine hohe Sternentstehung vor und durch die differenzielle Rotation ergibt sich die Spiralstruktur.

Diese bleibt erhalten, da sich die Dichtewellen aufgrund von Wechselwirkungen regenerieren können. Trotzdem handelt es sich nur um eine Theorie wie Spiralarme entstehen. Da Gravitation eine Rolle spielt, könnte auch Dunkle Materie für die Spiralstruktur verantwortlich sein. [33]

3.2.3 Balkenspiralgalaxien

Im Wesentlichen entspricht der Aufbau von Balkenspiralgalaxien dem der normalen Spiralgalaxien, sie bilden mit etwa $2/3$ den größeren Anteil aller Spiralgalaxien. Der Kern enthält jedoch einen Balken, der über das Zentrum hinausgeht und deren Spiralarme aus den beiden Enden entspringen. Die Milchstraße (Abb. 2) ist wie die NGC 6217 (Abb. 7) eine Balkenspiralgalaxie. Beide tragen die Kennzeichnung bc (Hubble-Klassifikation) für die Variante



Abbildung 7: NGC 6217 (SBbc)
[34] Credit: NASA, ESA, and the Hubble SM4 ERO Team

eines mittellangen Balkens, sowie einigermaßen weit geöffneter Spiralarme. Der Balken verursacht eine Gravitationsstörung, sodass Sterne in länglicher Form verlaufen und auch Gas in Richtung Zentrum geleitet werden kann, womit die Sternentstehung im Kern steigt. Balkenspiralgalaxien können sich auf die Art entwickeln, dass der Balken die Spiralarme stabilisiert oder sie immer mehr verformt; der Balken kann sogar zerfallen, folglich durchläuft die Galaxie eine Transformation zu einer elliptischen und weniger strukturierten Form. [35]

3.2.4 Irreguläre Galaxien

Irreguläre Galaxien (3%|54%) enthalten große Mengen an Gas und Staub, was zu einer aktiven Sternentstehung und folglich zu einem hohen Anteil an Sternen der Population I führt. Sie sind in der Anordnung ihrer Sterne unregelmäßig und erscheinen optisch chaotisch. Dennoch werden zwei Typen unterschieden. Galaxien des Typs Irr-I sind grundsätzlich ein wirres Gebilde, jedoch zeigen sie leichte Merkmale von Spiralgalaxien. Die NGC 7292 (Abb. 8) ist in ihrem Erscheinungsbild außergewöhnlich, allerdings ist der „Kern zu einem ausgeprägten Balken ausgestreckt“^{A.1} und die Anordnung der Sterne zwar asymmetrisch, aber grob kugelförmig.

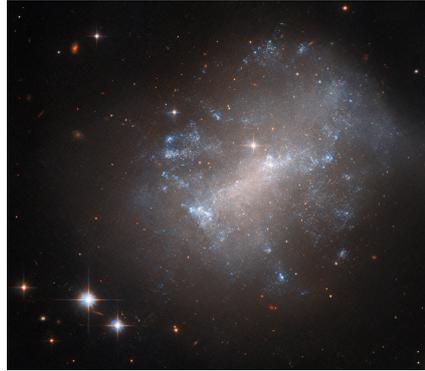


Abbildung 8: NGC 7292 (Irr-I) [36]
Credit: *ESA/Hubble & NASA; CC BY 4.0*

Galaxien des Typs Irr-II sind überhaupt nicht einer geometrischen Form zuzuordnen. Dazu gehört die 62 Millionen Lichtjahre entfernte NGC 1427A (Abb. 9). Sie ist in den Fornax-Haufen geraten, der viel Gas enthält und zu einer intensiven Sternentstehung mit blauen Sternen führt. Darüber hinaus ist die Pfeilform aus der Bewegung der Galaxie abzuleiten, die mit ca. 600 km/s in Richtung Pfeilspitze durch den Haufen treibt. Die Galaxie wird wie ein Blatt, welches in eine schlechte Wetterlage geraten ist und durch Winde - unkontrollierte Geschwindigkeiten - sei-

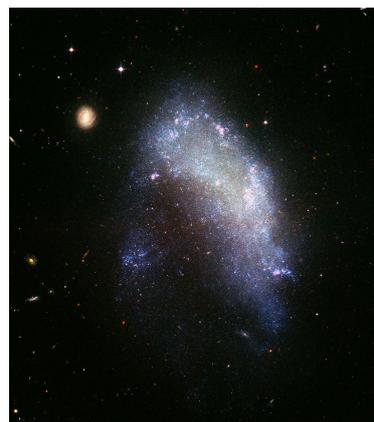


Abbildung 9: NGC 1427A (Irr-II) [37] Credit: *NASA, ESA, and The Hubble Heritage Team (STScI/AURA); Acknowledgment: M. Gregg (Univ. Calif.-Davis and Inst. for Geophysics and Planetary Physics, Lawrence Livermore Natl. Lab.)*

nen Halt verliert, allmählich durch die Umwelt - den Gravitationskräften nahegelegener Galaxien - zersetzt. Nach wenigen Milliarden Jahren wird diese Galaxie zerstört sein, sodass sich Sterne und Gas im intergalaktischen Medium des Fornax-Haufen verteilen; diese Galaxie liefert nebenbei einen Einblick in die Entstehung und Entwicklung von Galaxienhaufen per Galaxienzerstörung. [38]

Ihre Dynamik ist aufgrund der Form entsprechend chaotisch. Im Hinblick auf die Entstehung solcher Galaxien ist davon auszugehen, dass Galaxien durch Wechselwirkungen oder Kollisionen mit anderen Galaxien ihre Struktur verloren haben, durch den hohen Gasanteil über zu wenig Masse und Rotation für eine Struktur verfügen, an zufälligen lokalen Stellen extreme Sternentstehungsprozesse stattfinden, oder sie sind lediglich frühe Galaxien, die eine Struktur entwickeln. Ein Beispiel ist die bereits erwähnte Große Magellansche Wolke des Typs Irr-I, die als Satellit unter dem gravitativen Einfluss der Milchstraße steht und dadurch möglicherweise fortschreitend verzerrt wird. [39]

3.2.5 Sondertypen

Linsenförmige Galaxien S0 besitzen, ähnlich wie Spiralgalaxien, eine scheibenförmige Struktur mit vergleichbaren Rotationsbewegungen und einem zentralen Kern, jedoch ohne ausgeprägte Spiralarme. Ähnlich wie bei elliptischen Galaxien existiert wenig Gas, daher stehen die Sterne der Population II hervor. Somit gelten sie als Hybrid zwischen Spiral- und elliptischen Galaxien. Sie könnten durch ältere Spiralgalaxien entstanden sein, deren Arme verblasst sind beziehungsweise der Gas- und Staubgehalt der Scheibe reduziert vorliegt, oder durch Verschmelzungen von Galaxien. [40]

Zwerggalaxien sind Galaxien geringer Leuchtkraft, schwacher Struktur und geringer Größe mit nur bis zu wenigen Milliarden Sternen und ca. einer Masse von 10^9 Sonnenmassen ([31], S.429). Die Leuchtkraft

kann genauer definiert werden:

$$L_Z = \left(\frac{1}{10} \quad \text{bis} \quad \frac{1}{100.000} \right) \cdot \underbrace{1,5 \cdot 10^{10} L_S}_{L_M} \quad (5)$$

wobei L_S für die Leuchtkraft der Sonne, L_M für die der Milchstraße [41] und L_Z für die Leuchtkraft der Zwerggalaxien steht, die ein Bruchteil der Leuchtkraft der Milchstraße ausmacht [42]. Außerdem sind sie oft Begleiter einer größeren Galaxie, wie die irreguläre Zwerggalaxie Große Magellansche Wolke. Sowohl die NGC 7292, als auch die NGC 1427A gehören diesem Typ an, es bestehen aber ebenfalls Zwergelliptische Galaxien, Zwergspiralgalaxien (selten), zwergsphäroidale Galaxien (linsenförmig) und blaue kompakte Zwerggalaxien ([31], S.429). [43]

Starburstgalaxien sind helle Galaxien mit sehr hoher Sternentstehungsrate von ca. 100 Sonnenmassen pro Jahr, während Spiralgalaxien nur 3 Sonnenmassen pro Jahr ausbilden. Möglich machen es dichte Molekülwolken, die durch Kontakt mit anderen Galaxien oder gegebenenfalls durch die Gasströme des Balkens entstehen. [24]

Bei aktiven Galaxien handelt es sich um Galaxien mit aktivem galaktischen Kern (AGN). Dieser akkumuliert Materie aus unmittelbarer Nähe, wodurch vor dem „Fall in das schwarze Loch“ starke Aufheizungen entstehen, die energiereiche, vor allem nichtthermische Strahlung an die Umgebung abgeben. Die schwarzen Löcher sind zwar nicht sichtbar, aber die sogenannte Akkretionsscheibe um den Kern herum, insbesondere ihr Gasanteil, leuchtet dann extrem hell im Vergleich zu anderen astronomischen Objekten im Universum. Zu diesem Galaxientyp gehören etwa Quasare, Blazare, Seyfert- und Radiogalaxien, die sich in ihrem Beobachtungswinkel, ihrer Entfernung sowie Stärke und Art der Strahlung unterscheiden können. [44]

4 Fazit

Galaxien sind unfassbar beeindruckende gravitativ gebundene Systeme, die einen riesigen Einfluss auf den intergalaktischen Raum des Universums ausüben. Gravitation, Wechselwirkungen und Kollisionen verleihen dem Universum, wie auch den enthaltenen Galaxien, eine erstaunliche Dynamik.

Die Untersuchung von Galaxien zeigt, dass morphologische Muster bestehen, wonach sie systematisch in bestimmte Klassen eingeteilt werden können. Insbesondere das bewährte Hubble-Schema von 1936 mit den elliptischen, linsenförmigen, Spiral-, Balkenspiral- und irregulären Galaxien ermöglicht eine grundlegende Aufklärung. Innovative technische Beobachtungsmethoden der Neuzeit erreichen eine Erweiterung des Hubble-Schemas, wie das De-Vaucouleurs-System oder andere Klassifizierungen, in denen auch teilweise Kriterien wie Ringförmigkeit, verschiedene Ansätze der Spiralarme am Bulge, das Lichtspektrum oder die Dichte von Bedeutung sind. ([31], S.417ff.)

Durch die vielfältigen Klassifizierungsansätze wird deutlich, dass die Erforschung von Galaxien alles andere als abgeschlossen, dahingegen hochaktuell ist. Trotzdem sind bereits Erkenntnisse zu der Zusammensetzung von Galaxien, ihren Gemeinsamkeiten und Differenzen untereinander, Besonderheiten, ihrer Entwicklung und Entstehung und Wechselwirkungen zwischen Galaxien vorhanden, die in der Facharbeit dargestellt worden sind.

Das Ziel der Galaxienforschung geht längst darüber hinaus, lediglich Aussagen über den Aufbau von Galaxien treffen zu können. Heute umfasst die Intention, fundamentale Prozesse des Universums zu erklären, Dunkle Materie nachzuvollziehen, Vorhersagen zu treffen, bisherige Erkenntnisse zu präzisieren und neue physikalische Theorien aufzustellen, die das Verständnis für Galaxien erweitern, wobei metaphysische Fragen nach dem „Warum“ realistisch(erweise) (noch) nicht gelöst werden können.

Literaturverzeichnis

- [1] N. Podbregar. 30 Jahre Hubble-Teleskop, 2020. URL <https://www.scinexx.de/dossier/25-jahre-hubble/>.
- [2] F. Hildebrand. Hubble beweist Welten jenseits Milchstraße, 2010. URL <https://www.br.de/radio/bayern2/sendungen/kalenderblatt/0712-Hubble100.html>.
- [3] G. D. Bothun. Die leuchtschwächsten Galaxien. *Kosmologie*, (3), 2004.
- [4] Galaxien. In *Reise durch das Universum*. Time-Life, 1992. ISBN 90-6182-367-6.
- [5] Wikipedia. Galaxie, 2024. URL <https://de.wikipedia.org/wiki/Galaxie>.
- [6] Canadian Space Agency. Fact sheet: Galaxie, 2020. URL <https://www.asc-csa.gc.ca/eng/astronomy/fact-sheets/galaxy.asp>.
- [7] R. Weinberger. Physik der Galaxienentstehung • neue Simulationen von großflächigen Strukturen, 2024. URL <https://youtu.be/F2fG04St4LA?si=WvsWkix5AH9YPswH>.
- [8] Wikipedia. Universum, 2024. URL <https://de.wikipedia.org/wiki/Universum>.
- [9] Perrypedia. Galaxie, 2025. URL <https://www.perrypedia.de/wiki/Galaxie>.
- [10] K. H. Schmidt. Die lokale Galaxiengruppe, 2003. URL https://leibnizsozietat.de/wp-content/uploads/2012/11/03_schmidt.pdf.
- [11] S. Weinmann. Vom rätselhaften Sterben der Welteninseln, 2012. URL <https://www.nzz.ch/wissen/wissenschaft/vom-raetselhaften-sterben-der-welteninseln-ld.823716>.

- [12] F. Konitzer. Sterne am rand der Milchstraße sind zu langsam unterwegs, 2024. URL <https://www.spektrum.de/news/dunkle-materie-milchstrassen-sterne-sind-zu-langsam-unterwegs/2206256>.
- [13] Josef M. Gaßner. Galaxien • inseln des lichts • formen, entwicklung, zusammensetzung, 2023. URL https://youtu.be/MOKltR_7jTg?si=quC7zwfV_45YPTwT.
- [14] C. Chiappini. Die entstehung der galaxis. *Die Milchstraße*, (4), 2003.
- [15] H. Paracki. Die Milchstraße, (o.D.). URL <https://abenteuer-universum.de/galaxien/milch.html>.
- [16] Anatomy of the milky way, 2016. URL https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2016/09/Anatomy_of_the_Milky_Way.
- [17] R. C. Kraan-Korteweg und O. Lahav. Verborgene galaxien. *Kosmologie*, (3), 2004.
- [18] Nogué J. C. Sternentstehung in spiralgalaxien. *Die Milchstraße*, (4), 2003.
- [19] Types of galaxies, (o.D.). URL <https://universe-review.ca/F05-galaxy.htm>.
- [20] Elliptische galaxien: Langweilige objekte oder schlüssel zum universum?, (o.D.). URL <https://www.usm.uni-muenchen.de/people/saglia/dm/galaxien/alldt/node16.html>.
- [21] Galaxientypen, (o.D.). URL https://naturwissenschaften.ch/astronomy-explained/celestial_bodies/galaxies/types_of_galaxies.
- [22] C. Andreoli. Elliptical galaxy M60, 2025. URL <https://science.nasa.gov/asset/hubble/elliptical-galaxy-m60/>.

- [23] B. Q. Morris. Milchstraße vs. andromeda: Die kollision hat schon begonnen, 2020. URL <https://hardsf.de/milchstrasse-vs-andromeda-die-kollision-hat-schon-begonnen/>.
- [24] Galaxien, 2021. URL <https://www.astronomie-whv-fri.de/galaxien/>.
- [25] C. Busch. Riesenellipse messier 60, 2024. URL https://www.spacewalk-telescopes.de/zeichnungen/messier_060.php.
- [26] M. Lehwald. Spiralgalaxien, (o.D.). URL http://www.andromedagalaxie.de/html/galaxien_spiral.htm.
- [27] A. Bellini. Open arms, 2020. URL https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2020/02/Open_arms.
- [28] Bahngeschwindigkeit und winkelgeschwindigkeit, (o.D.). URL <https://www.leifiphysik.de/mechanik/kreisbewegung/grundwissen/bahngeschwindigkeit-und-winkelgeschwindigkeit>.
- [29] Drittes KEPLERsches Gesetz, (o.D.). URL <https://www.leifiphysik.de/astronomie/planetensystem/grundwissen/drittes-keplersches-gesetz>.
- [30] Wikipedia. Rotationskurve, 2024. URL <https://de.wikipedia.org/wiki/Rotationskurve>.
- [31] B. Baschek A. Unsöld. *Der neue Kosmos: Einführung in die Astronomie und Astrophysik*. Springer, 1999.
- [32] L. Baudis. Galaktische rotationskurve; dunkle materie und suche nach machos; galaktisches zentrum, 2007. URL https://www.physik.uzh.ch/~lbaudis/astroph0607/lecture13_080207.pdf.
- [33] Wikipedia. Dichtewellentheorie, 2015. URL <https://de.wikipedia.org/wiki/Dichtewellentheorie>.

- [34] D. Bolles. Barred spiral galaxy ngc 6217, 2023. URL <https://science.nasa.gov/missions/hubble/barred-spiral-galaxy-ngc-6217/>.
- [35] S. Deiters. Porträt einer balkenspiralgalaxie, 2012. URL <https://www.astronews.com/news/artikel/2012/02/1202-006.shtml>.
- [36] A dishevelled irregular galaxy, 2023. URL https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2023/06/A_dishevelled_irregular_galaxy2.
- [37] C. Andreoli. Galaxy ngc 1427a plunges toward the fornax galaxy cluster, 2025. URL <https://science.nasa.gov/asset/hubble/galaxy-ngc-1427a-plunges-toward-the-fornax-galaxy-cluster/>.
- [38] C. Andreoli. Galaxy ngc 1427a plunges toward the fornax galaxy cluster, 2025. URL <https://science.nasa.gov/asset/hubble/galaxy-ngc-1427a-plunges-toward-the-fornax-galaxy-cluster/>.
- [39] A. Schwarz. Extragalaktische astronomie, 2017. URL <https://www.astronomie-whv-fri.de/wp-content/uploads/2022/12/AS171028Extragalaktische-Astronomie-2.pdf>.
- [40] D. Bolles. Galaxy types - lenticular galaxies, 2024. URL <https://science.nasa.gov/universe/galaxies/types/#:~:text=Lenticular%20galaxies>.
- [41] J. P. Huchra. The properties of galaxies, 2009. URL <https://lweb.cfa.harvard.edu/~dfabricant/huchra/seminar/galaxies/>.
- [42] Zwerggalaxien, (o.D.). URL <https://www.usm.uni-muenchen.de/people/saglia/dm/galaxien/alldt/node53.html>.
- [43] Wikipedia. Zwerggalaxie, 2024. URL <https://de.wikipedia.org/wiki/Zwerggalaxie>.

- [44] F. Konitzer. Aktive galaxienkerne, 2014. URL <https://www.weltderphysik.de/gebiet/universum/galaxien-und-galaxienhaufen/aktive-galaxienkerne/>.
- [45] Die milchstraße – hier ist unser platz im universum, 2023. URL <https://www.merkur.de/wissen/milchstrasse-universum-galaxie-erde-sonne-heimat-universum-92554927.html>.
- [46] S. Hieber.
- [47] Wikipedia. Köln, 2025. URL <https://de.wikipedia.org/wiki/K%C3%B6ln>.
- [48] S. Georg. Entfernung von köln, nordrhein-w., deu → prague, cze, 2021. URL <https://www.luftlinie.org/K%C3%B6ln,Nordrhein-W.,DEU/Prague,CZE>.

Abbildungsverzeichnis

1	Skalen des Universums [7]	3
2	Milchstraße [16] Credit: <i>Left: NASA/JPL-Caltech; right: ESA; layout: ESA/ATG medialab</i>	5
3	Hubble-Klassifikation [19]	6
4	M60/NGC 4649 (E2) [22] Credit: <i>NASA, ESA, and the Hubble Heritage (STScI/AURA)-ESA/Hubble Collaboration</i>	7
5	NGC 2008 (Sc) [27] Credit: <i>ESA/Hubble & NASA, A. Bellini; CC BY 4.0</i>	8
6	Rotationskurve einer Galaxie [30]	10
7	NGC 6217 (SBbc) [34] Credit: <i>NASA, ESA, and the Hubble SM4 ERO Team</i>	11
8	NGC 7292 (Irr-I) [36] Credit: <i>ESA/Hubble & NASA; CC BY 4.0</i>	12
9	NGC 1427A (Irr-II) [37] Credit: <i>NASA, ESA, and The Hubble Heritage Team (STScI/AURA); Acknowledgment: M. Gregg (Univ. Calif.-Davis and Inst. for Geophysics and Planetary Physics, Lawrence Livermore Natl. Lab.)</i>	12

A Anhang

A.1 Anmerkungen

1 - Die prozentualen Angaben des Typs ($x\%|y\%$) sind Angaben zu den Anteilen der verschiedenen Galaxienarten an der Gesamtmenge. Die erste Prozentzahl bezieht sich auf den beobachtbaren Anteil an Galaxien, die zweite Prozentzahl auf den tatsächlich vorhandenen Anteil in einer Entfernung bis 9,1 Megaparsec $\hat{=}$ 3,26 Millionen Lichtjahre. [24]

2 - Das direkte Zitat „Kern zu einem ausgeprägten Balken ausgestreckt“ im Unterkapitel irreguläre Galaxien ist eine automatische Übersetzung per Google Translate des englischen Originaltextes: „[Unusually, its] core is stretched out into a distinct bar[, a feature seen in many spiral galaxies]“ [36]

3 - Allgemein beziehen sich alle Entfernungsangaben auf den Ausgangspunkt der Milchstraße.

A.2 ergänzende Berechnungen

· Städtevergleich: Distanz Milchstraße - Andromeda-Galaxie (Einleitung)

$$A_{Koeln} = 405,01 km^2 \quad (6)$$

$$r = \sqrt{\frac{A}{\pi}} \approx 11,35 km \quad (7)$$

Maßstab ($r_{Milchstrasse} = 52.850$ Lichtjahre [45]):

$$52.850L : 11,35km \quad \Bigg| \quad 4.654,65L : 1km \quad (8)$$

(Entfernung zwischen Milchstraße und Andromeda-Galaxie: 2.500.000 Lichtjahre [46])

$$\frac{2.500.000L}{4.654,65L} \approx 537km \quad (9)$$

Wenn die Milchstraße die flächenmäßige Größe von Köln [47] haben würde, dann beträgt die Entfernung zur benachbarten Andromeda-Galaxie ca. $537km \approx$ Entfernung Köln - Prag [48].

A.3 Reflexion

Die Beschäftigung mit diesem Thema war äußerst intensiv, wodurch natürlich das Verständnis für astronomische Zusammenhänge gewachsen ist. Ich bin froh, dass ich den Umgang mit \LaTeX erlernt habe, denn es ist zwar zeitaufwendiger gewesen, aber am Ende hat man mehr Entscheidungsfreiheit als in üblichen Textverarbeitungsprogrammen. Auch der Umgang mit Literatur in der wissenschaftlichen Arbeit war insoweit hilfreich, dass ich nun über eine bessere Vorstellung von einem Studium an der Hochschule verfüge. Optimierungsbedarf gibt es im Zeitmanagement, denn mit diesem Satz schließe ich die Arbeit, in der Nacht vor Abgabe, um 5:36 Uhr ab.

A.4 Erklärungen

A.4.1 Selbstständigkeitserklärung

„Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Facharbeit selbstständig angefertigt, keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt und die Stellen der Facharbeit, die im Wortlaut oder im wesentlichen Inhalt aus anderen Werken entnommen wurden, mit genauer Quellenangabe kenntlich gemacht habe.“

Bramsche, den 03. März 2025

Alexej Knölker

A.4.2 Einverständniserklärung zur Veröffentlichung

„Hiermit erkläre ich, dass ich damit einverstanden bin, wenn die von mir verfasste Facharbeit der schulinternen Öffentlichkeit zugänglich gemacht wird.“

Bramsche, den 03. März 2025

Alexej Knölker