

## Präsentationen der Professoren

[Eigenschaften von Galaxien](#) ⓘ

[Verteilung von Galaxien](#) ⓘ

## Weitere interessante Infos

[Astrokramkiste](#) ↗

[Abenteuer-Universum](#) ↗

## Inhaltsverzeichnis

Überblick.....	2
Galaxienspektrum .....	3
Galaxiehaufen .....	3
Kollision von Galaxien .....	4
Jets.....	4
Hubble-Deep-Field .....	5
Quasare .....	6
Galaxiearten (Hubble-Schema) .....	2
Elliptische Galaxien .....	7
Spiralgalaxien .....	12
Unregelmäßige Galaxien.....	16
Zwerggalaxien.....	18

## Überblick

Eine Galaxie ist eine Zusammenhäufung von Sternen, Gas (IGM - intergalaktischen Medium) und dunkler Materie.

### Galaxiearten (Hubble-Schema)

Elliptische Galaxien	Spiralgalaxien	Balkenspiralgalaxien	Sonstige Galaxien
E0 	Sa 	SBa 	S0 
E7 	Sb 	SBb 	Irr 
	Sc 	SBC 	

#### Abb.9.3.: Die Unterteilung der Galaxiearten nach dem Hubble-Schema

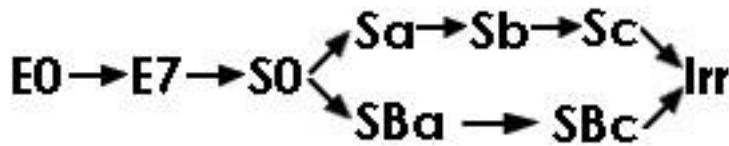
Hubble hat die Galaxien nach ihrer Form in 4 Galaxiearten unterteilt. Diese Unterteilung nennt man Hubble-Schema. In dieser Grafik sind die Stellen innerhalb der Galaxie, an denen sich besonders viele Sterne befinden rot und die Stellen, an denen sich besonders wenige Sterne befinden, blau eingezzeichnet.

Die Galaxien die sich elliptisch angeordnet haben, werden elliptische Galaxien (E) genannt. Je nachdem, wie stark ihre Exzentrizität ist, werden die Galaxien von E0 bis E7 durchnummerniert, wobei 0 die rundesten und 7 die elliptischsten Galaxien sind.

Wenn sich außen Spiralarme gebildet haben, heißen die Galaxien Spiralgalaxien (S). Bei Balkenspiralgalaxien (SB) verdicken sich die Arme in der Mitte zu einem sogenannten Bulge. Beide Galaxietypen werden je nachdem, wie stark die Spiralarme abstehen, in 3 Klassen geteilt. Bei Sa bzw. SBa liegen die Arme am nächsten an, bei Sc, bzw. SBc gehen die Arme am weitesten weg. Zusätzlich gibt es noch den Galaxientyp S0, der die Form einer elliptischen Galaxie hat (deshalb ist er aus der Entfernung kaum von den elliptischen Galaxien unterscheidbar), aber wie eine Spiralgalaxie aufgebaut ist.

Wenn sich die Sterne in irgendeiner anderen Form angeordnet haben, nennt man sie irreguläre Galaxien (Irr). Man hat noch keine Möglichkeit gefunden, irreguläre Galaxien in Galaxiearten zu unterteilen.

In der Nähe der Milchstraße kann man das Verhältnis der Galaxien zueinander am besten abschätzen, weil man dort alle Galaxien problemlos sehen kann. In diesem Bereich sind 34% Spiralgalaxien, 13% elliptische Galaxien und 53% unregelmäßige oder Zwerggalaxien.

**Abb.9.4.: Hubbles Vorstellung von der Galaxienentstehung**

Ursprünglich hat Hubble geglaubt, dass sich die Galaxien wie oben dargestellt entwickelt haben. Inzwischen wurde seine Theorie jedoch widerlegt, so gab es zum Beispiel im Hubble-Deep-Field viel mehr unregelmäßige Galaxien als heute.

Eine weitere Vorstellung die falsifiziert wurde, ist, dass die Galaxiearten in irgendeiner Weise mit der Gravitation zusammenhängen.

Anhand der Form einer Galaxie kann man gut erkennen, ob die Galaxie vor kurzem eine kleinere Galaxie verschluckt hat, weil die gravitativen Auswirkungen der Galaxien aufeinander noch lange Zeit sichtbar sind.

Wenn die Galaxien einander sehr nahe sind, kann man manchmal nicht erkennen, welcher Stern zu welcher Galaxie gehört. Manchmal kann man aus der Bewegung erkennen, um welche Galaxie ein Stern rotiert oder es befinden sich in einer Galaxie nur bestimmte Sternarten, die sich in der anderen Galaxie nicht befinden (zum Beispiel weil die Galaxien ein unterschiedliches Alter haben und in der älteren lauter Endstadien sind, während sich in der jüngeren noch lauter Hauptreihensterne befinden). Wenn sich der Stern nicht bewegt und laut Sternart zu beiden Galaxien gehören könnte, ist es nicht möglich, festzustellen, zu welcher Galaxie der Stern gehört.

## Galaxienspektrum

Wenn man eine Spektralanalyse einer Galaxie anfertigt, erhält man Informationen über die Bestandteile aller Sterne einer Galaxie, insbesondere welche Stoffe in der Galaxie vorherrschen. Am intensivsten erscheinen die Spektrallinien von mittelalten Hauptreihensternen (wie unsere Sonne) in den Spektralklassen A und F. In den Spektralklassen G und K sind rote Riesen am deutlichsten zu erkennen. Insgesamt stellt man fest, dass mit zunehmendem Alter die Sterne in einer höheren Spektralklasse am deutlichsten zu sehen sind. Wenn man beispielsweise die Kernregion eines Kugelsternhaufens betrachtet, erkennt man, dass dort das Spektrum bei den Spektralklassen G und K am deutlichsten ist. Daraus kann man schließen, dass sich in dieser Region viele rote Riesen befinden. Man kann also aus den Galaxiespektren die Altersverhältnisse in Galaxien ablesen. Aus den Altersverhältnissen kann man wiederum ablesen, wann wie viele Sterne entstanden sein müssen.

## Galaxiehaufen

Galaxiehaufen sind Ansammlungen von Galaxien, die sich aufgrund ihrer Gravitation nah beieinander befinden. Um die Zusammenballung zu erreichen genügt aber nicht die Gravitation der Galaxie selbst, sondern es bedarf auch noch der 3 bis 10-fache Masse an dunkler Materie, die sich ebenfalls in diesen Galaxiehaufen befinden muss. Diese Anhäufungen sind 1 bis 10 Mpc groß. Auch Gase (IGM) werden von diesen Galaxiehaufen

angezogen. So kommt es, dass ein durchschnittlicher Galaxiehaufen die 10-fache Masse einer elliptischen Galaxie besitzt, obwohl er nur aus 5 Galaxien besteht. Mehrere Haufen formen sich wiederum zu sogenannten Superhaufen, die sich über Distanzen von 100Mpc erstrecken. Die leeren Räume, an denen sich keine Superhaufen befinden, nennt man Voids. Auch innerhalb der Voids gibt es einzelne Galaxien, allerdings mit großen Abständen. Man kann beobachten, dass sich die Galaxien langfristig von den Voids weg bewegen und zu Anziehungspunkten, sogenannten großen Attraktoren hinbewegen. Lokale Supercluster sind kettenförmig angeordnet und im Durchschnitt sind sie 6-mal so lang wie sie breit sind. Sie haben einen durchschnittlichen Radius von 15Mpc, aber eine durchschnittliche Länge von 80Mpc. Bis zu diesen Skalen ist die Anziehung der Galaxien- und Galaxiehaufen untereinander stärker als das Auseinanderdriften aufgrund der Expansion des Universums. Auf ganz großen Skalen betrachtet, verteilen sich die Galaxien homogen.

[Mehr über das intergalaktische Medium im Skriptum über das interstellare Medium ⓘ](#)

Unsere Milchstraße befindet sich in der „lokalen Gruppe“, das ist ein Galaxiehaufen in dem sich 40 Galaxien versammeln und zwar nur elliptische Galaxien und Zwerggalaxien. Die lokale Gruppe ist ein Teil des Virgozentrums.

## Kollision von Galaxien

Die Kollision von Galaxien ist oft unspektakulärer, als es klingt. Die meisten Sterne sind so weit voneinander entfernt, dass sie sowieso nicht kollidieren sondern aneinander vorbeiziehen. Nur ganz wenige Sterne stürzen ineinander. Noch dazu verteilt sich dieser Vorgang über zig Millionen Jahre, sodass man nur ganz selten Sterne kollidieren sieht. Dafür führt die Kollision von Galaxien zu vermehrter Sternentstehung, weil sich viele Molekülwolken verbinden (sie sind von der Kollision viel stärker betroffen als die Sterne). 10% des interstellaren Mediums verwandelt sich dabei zu Sternen. Mit dem Hubble-Space-Telescope hat man festgestellt, dass es in zwei kollidierenden Galaxien normalerweise 1000 Sternentstehungsgebiete gibt. Bei den meisten Galaxien weiß man, dass sie durch Kollision entstanden sind. Man vermutet auch, dass Zwerggalaxien dadurch entstehen, dass sie bei der Kollision zweier Galaxien abgespaltet werden. Auch unsere Milchstraße wird eines Tages mit dem Andromedanebel kollidieren und sich dabei von einer Spiralgalaxie in eine elliptische Galaxie verwandeln. (Weil sich die Sterne aufgrund der Gravitation umverteilen).

## Jets

Jets sind Gase, die in nur eine Richtung strömen. Solche Jets kommen bei vielen Himmelskörpern, unter anderem auch bei Galaxien, vor. Man unterscheidet grob zwischen zwei Arten von Jets, die sich vor allem aufgrund des Aussehens stark unterscheiden. Bei der Leuchtkraft verwenden wir eine Einheit aus dem Cgs-System und zwar erg pro Sekunde.

$$1 \frac{\text{erg}}{\text{s}} = 1 \frac{\text{gcm}^2}{\text{s}^3}$$

Um die Leuchtkraft anschaulicher darzustellen, wird sie zusätzlich mit der Leuchtkraft einer Supernova verglichen.

### **Kompakte Quellen (<1“)**

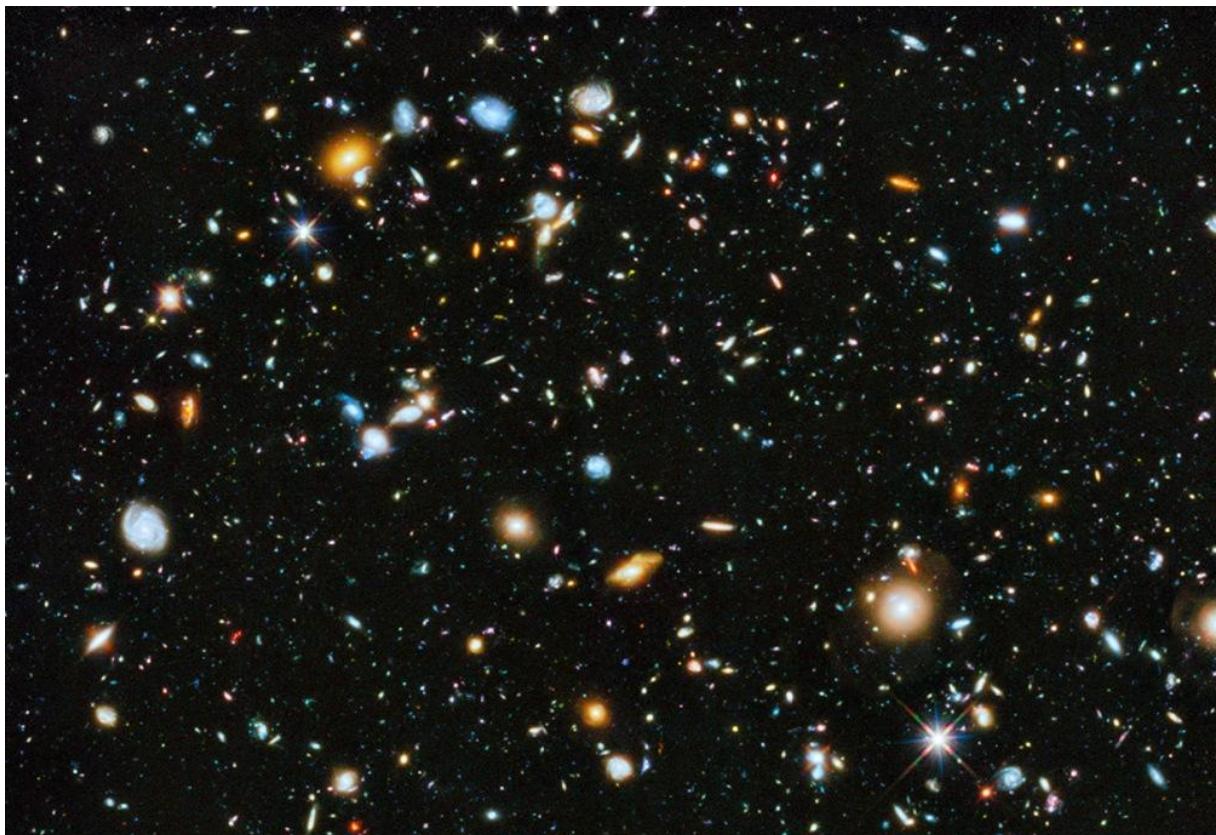
Alle Jets die am Himmel weniger als eine Bogensekunde einnehmen, bezeichnet man als kompakte Quellen. Sie sind weniger als 10 Parsec lang und strahlen nur mit  $10^{52}$  bis  $10^{58}$  Erg, das ist 10 bis 10-millionenmal so stark wie eine Supernova.

### **Lineare Quellen (>1“)**

Alle Jets, die mehr als eine Bogensekunde am Himmel einnehmen, bezeichnet man als lineare Quellen. Sie sind länger als 10 Kiloparsec und strahlen mit  $10^{58}$  bis  $10^{61}$  Erg, das ist  $10^7$  bis  $10^{10}$ -fach so stark wie eine Supernova.

Wenn ein Jet fast direkt in unsere Richtung zeigt, kommt es vor, dass wir den Eindruck haben, dass er sich schneller als das Licht bewegt. Der Grund: Dadurch, dass uns der Jet am Ende näher ist, als am Anfang, benötigt auch der Lichtstrahl am Ende weniger lang zu uns, als am Anfang. Dadurch, dass wir den Beginn mit größerer Zeitverzögerung, als das Ende sehen, haben wir den Eindruck, dass der Jet schneller ist. In Wirklichkeit ist der Jet langsamer als das Licht.

## **Hubble-Deep-Field**



**Abb.9.1.: Ein kleiner Ausschnitt aus dem Hubble-Deep-Field (Jeder Punkt entspricht einer Galaxie)**

Jeder Blick ins Universum ist gleichzeitig auch ein Blick in die Vergangenheit. Wenn man sich beispielsweise den nächsten Stern, Alpha Centauri, anschaut, sieht man ihn, wie er vor 3 Jahren ausgesehen hat, weil das Licht von Alpha Centauri 3 Jahre bis zu uns braucht. Das brachte Wissenschaftler auf die Idee, zu versuchen, möglichst weit weg zu schauen, um möglichst weit in die Vergangenheit zu sehen.

Um möglichst weit weg zu sehen, ist es sinnvoll, wenn möglichst wenig die Sicht versperrt. Deshalb richtete man das Hubble-Space-Telescope auf einen Teil des Himmels, auf dem sich überhaupt keine Sterne befinden. Dieses Bild in die Vergangenheit nannte man Hubble-Deep-Field. Man kann darauf Galaxien erkennen, die schon vor 12 Milliarden Jahren existiert haben! Um trotz der großen Entfernung gut zu sehen, benötigte man eine lange Belichtungszeit von 10 Tagen. Man entdeckte im Hubble-Deep-Field viel Staub und viele unregelmäßigen Galaxien. Spiralgalaxien hatten damals meist große Verformungen, Balkenspiralgalaxien findet man, wenn man so weit in die Vergangenheit zurückblickt, fast gar keine. Außerdem entdeckte man in einer großen Entfernung noch viele kleine Galaxien. Man vermutet, dass das zu viele Galaxien sind, sodass sie sich wohl im Laufe ihrer Entwicklung zum Großteil miteinander verbunden haben. Die Helligkeiten waren bereits mit jenen von der Milchstraße vergleichbar aber die Massen waren noch viel kleiner. Schon nach 1 Milliarde Jahren gab es die ersten schweren Elemente. Die meisten Sterne entstanden demnach vor 7 bis 9 Milliarden Jahren. Das Hubble-Space-Telescope hat sogar schon ein Ultra-Deep-Field aufgenommen, das noch weiter in die Vergangenheit (13 Milliarden Jahre) reicht.

**Quasare**



**Abb. 9.2.: Ein Foto von einem Quasar**

Quasare (quasistellare Radioquellen) sind die leuchtkräftigsten Objekte im Universum. Quasare erscheinen punktförmig, als ob sie ein Stern wären. Sie sind so hell, dass sie ihre Galaxie überstrahlen. Am stärksten strahlt der Quasar dabei im Röntgenbereich.

Zum ersten Mal wurde so ein Quasar von Maarten Schmidt im Jahr 1963 beobachtet. Er wunderte sich darüber, dass die Balmerlinien so weit verschoben waren, obwohl das Objekt so hell war. Die einzige logische Schlussfolgerung war, dass sie aus der Nähe ganz besonders extrem hell sein müssen.

Ein Quasar ist kein Stern, sondern Materie, die sich rund um ein schwarzes Loch angesammelt hat. Quasare befinden sich daher immer im Zentrum einer Galaxie (egal ob Spiral- oder elliptische Galaxie). Die Helligkeit entsteht dadurch, dass die Sterne in der Nähe des schwarzen Lochs durch Überschreitung der Roche-Grenze zerrissen wurden und somit viel Energie in Form von Helligkeit frei wurde. Ein Quasar, der zu einem schwarzen Loch mit  $10^8$  Sonnenmassen gehört, gibt dabei innerhalb eines Jahres so viel Lichtenergie ab, wie ein durchschnittlicher Hauptreihenstern im Laufe seines gesamten Lebens.

Heute sind alle Quasare die wir beobachten können weit entfernt. Der Grund: Die hellsten Quasare haben vor 10 Milliarden Jahren existiert. Seitdem hat ihre Helligkeit stetig abgenommen, weil sich im Zentrum einer Galaxie immer weniger Sterne befinden, die zerrissen werden können. Heute kann man in der Nähe nur noch Mikroquasare beobachten, die so klein und leuchtschwach sind, dass man nicht einmal die Mikroquasare in unserer Milchstraße gut beobachten kann.

## Elliptische Galaxien

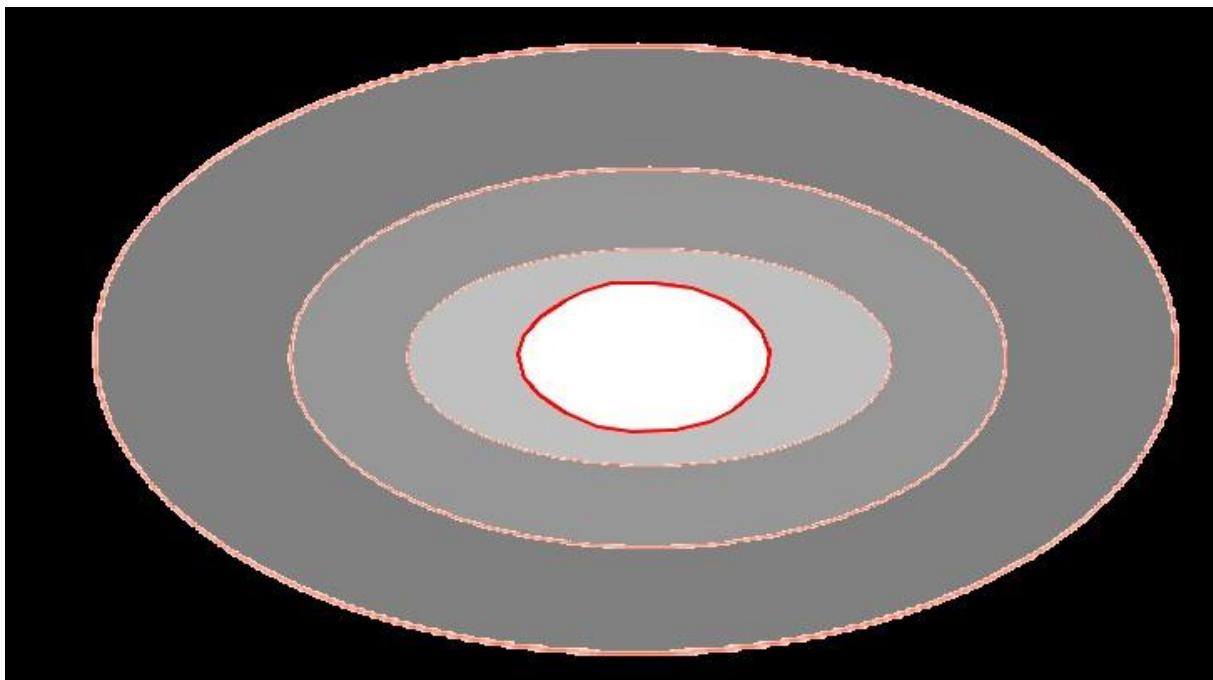


**Abb.9.5.: Der Vergleich zwischen einer elliptischen Galaxie (links) und einer S0-Galaxie (rechts)**

In der Abbildung kann man erkennen, dass man elliptische Galaxien und S0-Galaxien aus der Entfernung kaum unterscheiden kann. Wir können nur elliptische Galaxien in unserer Nähe klar von S0-Galaxien unterscheiden, weil es in S0-Galaxie jüngere Sterne und ein kühleres interstellares Medium gibt.

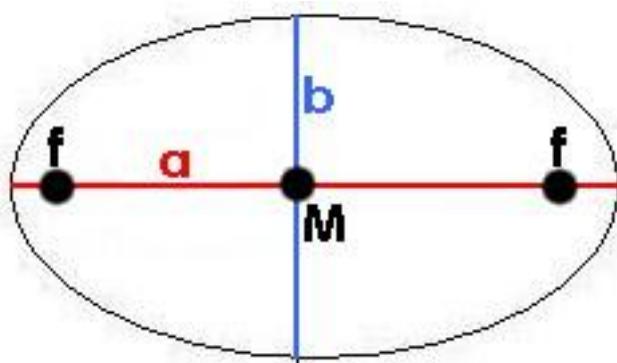
### Unterteilung der elliptischen Galaxien

Die Elliptischen Galaxien werden je nach Exzentrizität in 7 Klassen eingeteilt, wobei 0 die rundeste und 7 die länglichste ist.



**Abb.9.6.: Helligkeitsverteilung und Isophoten in einer elliptischen Galaxie**

Die Sterne verteilen sich weitgehend gleichmäßig innerhalb der elliptischen Galaxie, wobei die Sterndichte in Richtung Galaxierand gleichmäßig abnimmt. Aus der Entfernung sieht es so aus, als würde die Helligkeit der Galaxie nach außen hin abnehmen. (Diese Abnahme ist gleichmäßiger als in der obigen Grafik dargestellt). Der Rand ist dabei normalerweise schon extrem dunkel: Oft findet man mit genaueren Teleskopen am Rand noch weitere Sterne, wodurch sich die Exzentrizität ändert. Deshalb legt man eine Helligkeit fest, zieht eine Linie (in der Grafik rot dargestellt) dort, wo die Galaxie diese Helligkeit noch hat und legt von der daraus resultierenden Ellipse die Achsenverhältnisse fest. Diese Linien nennt man Isophoten.



**Abb.9.7.: Bestimmung des Galaxientyps aus dem Verhältnis der Achsen**

Aus den Achsenverhältnissen kann man den Typ der Galaxie mit der Formel

$$10 \frac{a - b}{a}$$

berechnen, wobei a die längere Achse (rot) und b die kürzere Achse (blau) darstellt. Das Ergebnis sollte immer ein Wert zwischen 0 und 7 sein. Dadurch, dass wir normalerweise schräg auf ein Ellipsoid blicken, können wir nur zwei Achsen vermessen und nicht drei. Die Typenfestlegung ist daher nur von unserem Blickwinkel aus richtig!

### Verteilung der Sterne

Im Schnitt nimmt die Helligkeit der Galaxie mit dem Faktor  $r^{0,25}$  nach außen hin ab, weil die Sternenhäufigkeit am Rand geringer wird.

Es kann aber auch vorkommen, dass in einem äußeren Bereich eine überproportionale Sternansammlung besteht (durch Objekte mit starker Gravitation), wodurch dieser Bereich heller erscheint, als normalerweise erwartet. Eine mögliche Ursache kann sein, dass sich eine andere Galaxie in der Nähe befindet, und diese äußeren Sterne sich teilweise im gravitativen Einflussbereich der anderen Galaxie befinden.

Dadurch, dass die 3 Achsen (Länge, Breite, Höhe) meistens unterschiedlich lang sind, sind die Bahnen der Sterne sehr komplex. Die Zeit eines Umlaufs lässt sich mit der Boltzmann-Gleichung

$$t_c = \frac{R}{V}$$

ermitteln. In dieser Formel entspricht R dem Radius, V dem Volumen des Sterns und  $t_c$  der Umlaufdauer. Durchschnittlich ist das Ergebnis  $t_c = 10^8$  Jahre. Die Zeit bis alle Sterne wieder im gleichen Verhältnis zueinander stehen heißt Relaxationszeit. Man rechnet sie mit der Formel

$$t_r = 0,2 \frac{N}{\log N} t_c$$

aus. In dieser Formel steht N für die Anzahl der Sterne,  $t_c$  für die Umlaufdauer eines Sterns und  $t_r$  für die Relaxationszeit. Die durchschnittliche Relaxationszeit beträgt  $t_r = 10^{17}$  Jahre. Da das Universum erst 13,8 Milliarden Jahre alt ist, hatten die meisten Galaxien noch gar nicht genug Zeit um zu relaxieren. Wenn die Anzahl der Sterne (N) klein genug ist, ist die Relaxationszeit um so viel kürzer, dass eine Relaxation stattgefunden haben kann.

### Alter der Sterne

In Elliptischen Galaxien sind die Sterne normalerweise alt, weil es keine Molekülwolken gibt, aus denen noch neue Sterne entstehen könnten. Die Sterne haben deshalb eine hohe Population und die Sternentwicklung ist schon weitgehend abgeschlossen.

### Temperatur

Die Temperatur einer Galaxie kann man (genauso wie die Temperatur eines Sterns) messen, indem man die Wellenlänge misst, in welcher die Galaxie strahlt. Elliptische Galaxien strahlen stark im Röntgenbereich, das bedeutet, dass sie eher warm sind.

[Der Zusammenhang zwischen Strahlung und Temperatur im Skriptum „Eigenschaften der Sterne“ \(i\)](#)

Ganz besonders warm ist dabei das interstellare Medium. Es hat eine Temperatur zwischen 10 und 20-Millionen Kelvin und ist damit mehr als 1000-mal so heiß wie die Effektivtemperatur unserer Sonne.

Ein Grund für diese Wärme könnte die dunkle Materie sein. Eine gängige Theorie über den Aufbau der dunklen Materie besagt, dass die dunkle Materie aus WIMPS (Weakly interacting massive particles, schwach wechselwirkende Elementarteilchen) besteht. Durch schwache Wechselwirkungen mit Atomkernen erwärmen sie dennoch ihre Umgebung.

[Mehr über die dunkle Materie im Skriptum „Unser Universum“ ⓘ](#)

Diese zusätzliche Wärme würde erklären, wieso die elliptischen Galaxien langsamer auskühlen, als sie unter den sonstigen Umständen sollten.

Weitere Temperaturerhöhungen kommen durch sogenannte Stoßwellen zustande. Das sind Medien, die sich mit Überschallgeschwindigkeit durch sich selbst bewegen. Der Grund für solche Bewegungen ist die Anziehungskraft einer anderen Galaxie. Beispielsweise wird das ISM in der Galaxie M86 in Richtung M87 angezogen. Die Reibung der Galaxieteilchen aneinander erzeugt Wärme.

Es kommen in der Theorie auch gegenteilige Effekte vor: Das ISM in der Mitte der Galaxie kühlt sich aufgrund der geringeren Umgebungstemperatur ab. Dabei zieht es sich zusammen, wodurch der kältere Teil des ISM weiter nach innen strömen und so die Galaxie noch weiter auskühlen kann. Diesen Effekt nennt man „Cooling flows“.

## Interstellare Medium

Das interstellare Medium in elliptischen Galaxien ist immer heiß und dünn. Das liegt daran, dass die elliptischen Galaxien selbst kein ISM mehr erzeugen, sondern das gesamte ISM durch Kollisionen mit Spiralgalaxien entsteht. Das ISM, das die Galaxie ursprünglich selber erzeugt hat, ist schon längst aufgebraucht. Wenn doch ein kälteres ISM in der Galaxie existiert, kommt es von einer anderen Galaxie, die sich durch die Gravitation mit der elliptischen Galaxie verbunden hat. Besonders interessant ist die elliptische Galaxie NGC1319, weil hier das ISM erst vor 100 Millionen Jahren entstanden ist, so dass es noch nicht genug Zeit hatte, sich durch gravitative Wechselwirkungen in der Galaxie zu verteilen. Vielmehr bildet das ISM Staubbänder in beide Richtungen.

[Über das interstellare Medium existiert ein eigenes Skriptum ⓘ](#)

## Kräfte

So wie Sterne und Planeten müssen sich auch die Galaxien im Kräftegleichgewicht befinden. Zusätzlich zu Druck und Temperatur kommt bei einer Galaxie auch die dunkle Materie mit ins Spiel. Je nachdem, wie stark die dunkle Materie in welcher Richtung zieht, kann man darauf schließen, wo sich diese dunkle Materie befinden müsste.

## Schwarze Löcher

In der Mitte jeder Galaxie befindet sich ein supermassereiches schwarzes Loch. Es hat in der Galaxie dieselbe Funktion, wie die Sonne im Sonnensystem: Es sorgt dafür, dass die Galaxie

zusammenhält. Je größer das schwarze Loch ist, desto größer ist auch die Galaxie, die es halten kann. Das ist erstaunlich, weil das Größenverhältnis zwischen dem schwarzen Loch und der Galaxie, dasselbe, wie zwischen einer 1€-Münze und der Erde ist. Die Zentralmasse kann man nicht gut bestimmen, weil die Messung abhängig vom Sichtwinkel ist.

### **Schalen**

Ein Fünftel aller elliptischen Galaxien sind von sogenannten Schalen umgeben. Diese Schalen bestehen vermutlich aus Sternen aus anderen Galaxien, die von der elliptischen Galaxie angezogen wurden. Diese Galaxien werden von der elliptischen Galaxie im Normalfall vollständig aufgesogen. Diese Galaxieschalen haben im Normalfall ungefähr die gleiche Form wie die elliptische Galaxie selber. Dadurch ist es möglich, etwas über die Form der elliptischen Galaxie durch die Form der Schalen herauszufinden. Besonders viele Schalen wurden bei der Galaxie NGC 3923 gefunden: Bisher (Stand: 2018) wurden 42 Schalen entdeckt, die in den unterschiedlichsten Wellenlängen sichtbar waren.

### **Umgebung**

Die elliptischen Galaxien haben durch ihre Gravitation auch einen Einfluss auf ihre Umgebung. Deshalb befinden sich in der Nähe von elliptischen Galaxien besonders viele Kugelsternhaufen.

### **Elliptische Riesengalaxie**

Die elliptischen Riesengalaxien sind ähnlich wie die normalen elliptischen Galaxien aufgebaut, nur dass sie um einiges leuchtkräftiger sind. Eine durchschnittliche elliptische Riesengalaxie hat eine Leuchtkraft von  $2 \times 10^{41}$  erg/s. Zum Vergleich: Eine normale elliptische Galaxie misst nur  $4 \times 10^{40}$  erg/s. Die elliptische Riesengalaxie ist also 5-mal so hell. Auch die Masse einer elliptischen Riesengalaxie ist besonders hoch und kann bis zu mehreren Billionen Sonnenmassen erreichen.

### **Beispiel: M87**

Die Galaxie M87 ist mit einer Größe von  $2,7 \times 10^{12}$  Sonnenmassen die größte bekannte elliptische Galaxie. Zum Vergleich: Die kleinste elliptische Galaxie hat bloß ein paar Millionen Sonnenmassen. M87 ist so groß, dass darin 15.000 Kugelsternhaufen Platz haben. Dagegen ist auch unsere Milchstraße mit ihren rund 200 Kugelsternhaufen winzig. Durch diese schiere Größe ist die Galaxie auch sehr hell. Besonders gut kann man sie mit einem Radioteleskop beobachten, doch auch im Röntgenbereich ist sie gut zu sehen. Für die gute Sichtbarkeit gerade in diesem Bereich, sind gleich mehrere Effekte verantwortlich: Das heiße Gas in der Galaxie selber, die Wechselwirkungen mit dem Medium zwischen den Galaxien und die Richtungsänderungen der Teilchen des Jets. Außerdem leuchtet der Virgothaufen, in dem sich die Galaxie befindet, nur schwach und der nächste Galaxienhaufen nach dem Virgothaufen ist 16 Megaparsec entfernt, sodass sie besonders gut aus ihrer Umgebung heraussticht. Bei der Galaxie M87 handelt es sich um eine fast runde Galaxie. Der Galaxientyp wird auf E0 oder E1 geschätzt. Es existiert auch mindestens ein Jet, in dem Elektronen fast mit Lichtgeschwindigkeit durch die Galaxie flitzen. Vermutlich werden diese Elektronen vom Magnetfeld der Galaxie beschleunigt. Nach ungefähr 2 Parsec werden die Elektronen noch langsamer, weil sie durch die Reibung mit dem intergalaktischen Medium gebremst werden. Gleichzeitig

verteilen sie sich und werden dabei zu sogenannten Radioblasen. (im Radiobereich sehen sie aus wie Blasen). So wie in jeder Galaxie befindet sich auch in der Mitte von M87 ein supermassereiches schwarzes Loch, das die Galaxie durch seine Gravitation zusammengefüht hat und zusammenhält. Es besteht aus 1000K heißem ionisiertem Wasserstoff. Wenn es sich in unserem Sonnensystem befinden würde, würde es mit einem Radius von 50AU bis zum Kuipergürtel reichen. Auch die Masse ist mit  $3,2 \times 10^9$  Sonnenmassen sehr hoch. Das schwarze Loch rotiert mit einer Geschwindigkeit von 550km/s. Mit dieser Geschwindigkeit könnte man die Erde in weniger als 2 Minuten umrunden. Ähnlich wie die Planeten um die Sonne kreisen, kreisen die Sterne in der Mitte der Galaxie um das schwarze Loch. Erst weiter außen werden die Bahnen chaotischer, weil dort die Anziehungskraft der Sterne untereinander größer ist, als jene vom schwarzen Loch.

### Spiralgalaxien



**Abb.9.8.: Der Unterschied zwischen Spiralgalaxien (links) und Balkenspiralgalaxien (rechts)**

Bei Spiralgalaxien unterscheidet man zwischen Balkenspiralgalaxien (haben in der Mitte eine Verdickung, einen sogenannten Bulge) und Spiralgalaxien (bestehen nur aus Spiralarmen). Die Spiralarme liegen dabei immer alle in einer Ebene. Derzeit hat man bei einem Drittel der Spiralgalaxien einen Balken entdeckt. Ob es wirklich Spiralgalaxien ohne Bulge gibt, ist dabei noch gar nicht geklärt, denn oft entdeckt man einen Bulge wenn man Teleskope mit einer höheren Auflösung auf die Galaxie richtet. Nicht einmal bei unserer Milchstraße wissen wir, ob ein Bulge existiert. Im Gegensatz zu elliptischen Galaxien entstehen in Spiralgalaxien laufend Sterne, weil viel interstellares Medium auch in Form von Molekülwolken existiert. Deshalb kann man darin auch die unterschiedlichsten Sternpopulationen beobachten. Da die Sterne meistens in den Spiralarmen entstehen, befinden sich dort die jüngeren Sterne mit einer niedrigeren Sternpopulation. In der Mitte sind die Sterne älter und haben daher auch eine höhere Sternpopulation. Obwohl die Sterne nur in den Spiralarmen entstehen, verteilen sie sich durch zufällige Bewegungen während der Sternentwicklung gleichmäßig über die Galaxien.

### Aussehen (Morphologie)

Der Aufbau von Spiralgalaxien wird stark von der umgebenden dunklen Materie beeinflusst, weil sie die äußeren Sterne anzieht. Dadurch existieren am Rand der Galaxie mehr Sterne als in der Mitte und die Rotationsgeschwindigkeit der Galaxie nimmt nicht ab. Am Rand der

Galaxie befinden sich die Sterne nicht mehr auf einer exakten Scheibe, sondern die Scheibe ist verbogen. Diese Verbiegung nennt man Warp.

### **Spiralarme**

Man hat unterschiedliche Theorien entwickelt, wieso die Spiralarme entstanden sein könnten. Eine Möglichkeit ist, dass die Sterne am Rand von anderen Galaxien in der Nähe gravitativ nach außen gezogen werden. Laut Dichtewelletheorie, handelt es sich dabei um eine Welle, die die Spiralarme immer nach außen schiebt. Laut stochastischer Sternentstehung entstehen die Sterne am Rand der Spiralarme und wandern dann im Laufe ihrer Entwicklung in die Mitte. Spiralarme sind in jungen und alten Galaxien gleichermaßen beobachtbar. Innerhalb der Spiralarme bilden sich oft Sterne, die später durch die Gravitation der Galaxie nach innen gezogen werden. Deshalb befinden sich in den Spiralarmen junge Sterne mit den Spektraltypen O und B. Die meisten Galaxien besitzen zwei Spiralarme. Es gibt aber auch Galaxien mit nur einem oder auch mehr als zwei Spiralarmen. Man kennt sogar Spiralgalaxien, die gar keine Spiralarme haben (diesen Typ nennt man S0). Im Gegensatz zu elliptischen Galaxien existieren dort sowohl junge, als auch alte Sterne, in unterschiedlichen Bereichen der Galaxie. Bei jüngeren Galaxien des Typ S0 kann man oft noch Teile von kleinen Spiralarmen beobachten. Laut dem Modell der propagierenden Sternentstehung werden die Spiralarme von Supernovae nach innen gezogen.

### **Balken**

Bisher hat man bei einem Drittel der Spiralgalaxien einen Balken beobachtet. Die Sterne sind innerhalb des Balkens normalerweise gleichmäßig verteilt. Die Länge der Balken ist 3 bis 5-fach so lang wie die Breite. Die Spiralarme beginnen an der kürzeren Seite des Balkens, dort entstehen auch besonders viele Sterne.

### **Ringe**

Manche Balkenspiralgalaxien verfügen zusätzlich über Ringe. Diese werden im Hubbleschema mit einem r gekennzeichnet. Manchmal gibt es auch gleich mehrere solcher Ringe, manche weiter innen, manche weiter außen. Solche Ringe entstehen normalerweise durch Wechselwirkung mit anderen Galaxien. Aufgrund der Gravitation des schwarzen Lochs in der Mitte geht die Masse des Rings immer weiter nach innen. Man vermutet, dass die Ringe am Ende zur Gänze im Balken verschwindet und die Galaxie nachher wieder zu einer Balkenspiralgalaxie ohne Ring wird.

### **Halo**

Als Halo bezeichnet man das Material, dass um eine Galaxie herumfliegt, weil es von ihr angezogen wird. Bei Spiralgalaxien ist das Halo sphärisch und es befinden sich viele alte Sterne darin.

## Stern- und Gasbewegungen

Die Sterne und das Gas drehen sich um das schwarze Loch im Zentrum der Galaxie. Ähnlich wie bei Planetenbewegungen gilt auch in der Galaxie, dass sich Schwerkraft und Fliehkraft ausgleichen müssen.

$$\text{Schwerkraft} = \text{Fliehkraft}$$

$$\frac{GM}{r^2} = \frac{v^2}{r}$$

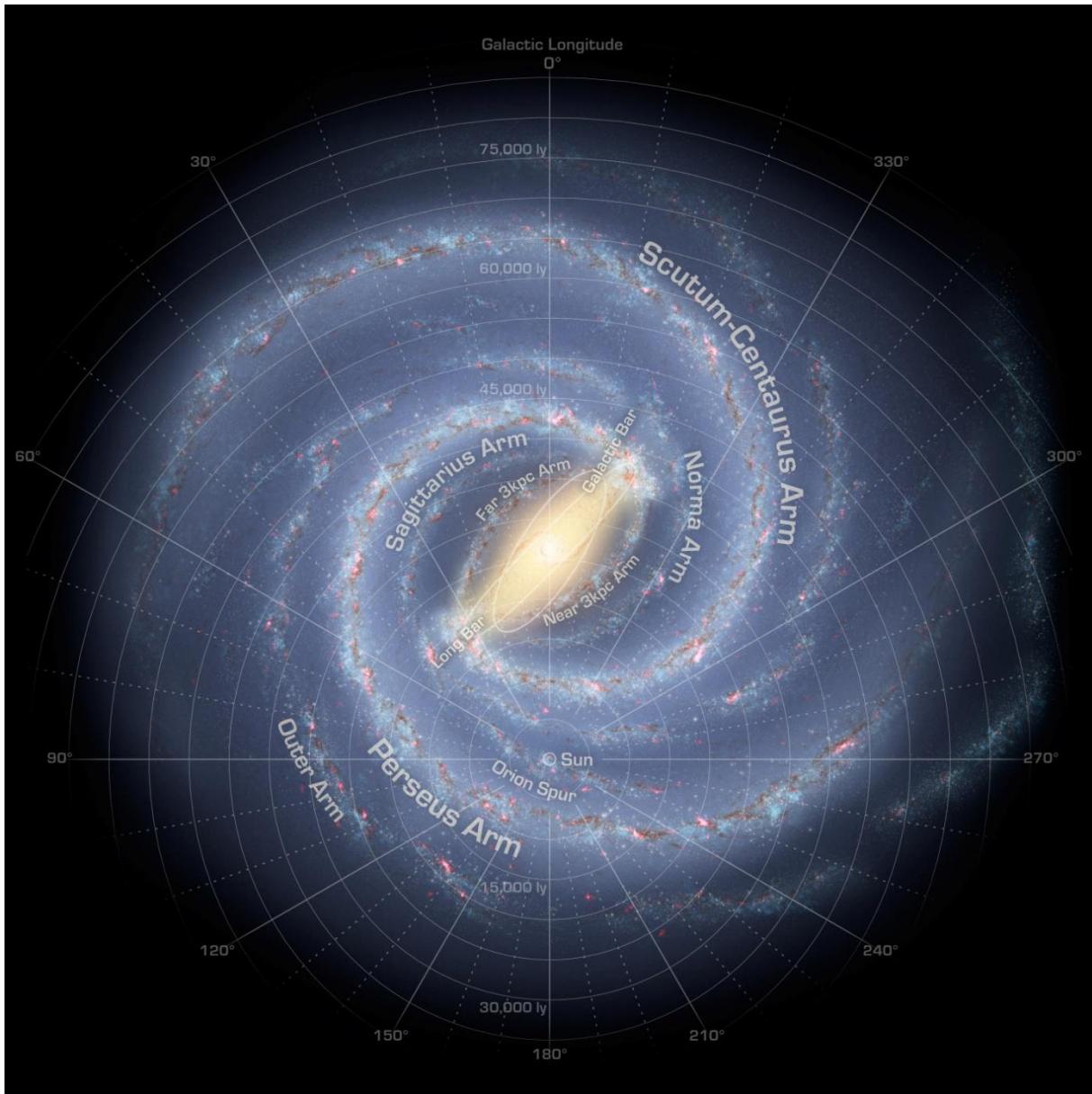
$$v^2 = \frac{GM}{r}$$

Allerdings meistens nicht so gleichmäßig wie ein Planet: Unsere Sonne bewegt sich beispielsweise durch die Wechselwirkung mit anderen Sternen in der Form einer Welle mal weiter innen und mal weiter außen um das Zentrum unserer Milchstraße. Auch die Gase bewegen sich sehr ungleichmäßig. Das ist auch gut so: Durch diese ungleichmäßigen Bewegungen verdichten sich die Gase und es kommt zur Sternentstehung. Diese Verdichtungen nennen sich HII-Regionen und leuchten ultraviolet. Sie bleiben ungefähr 10 Millionen Jahre bestehen, dann ist der Druck des nachströmenden Gases groß genug, dass sich die Wolke wieder auflöst. Dadurch ist die Ausbreitung des Gases auch sehr stoßwellenförmig: Nach dem Anstoß verlangsamt sich das Gas aufgrund der Reibung wieder und der Vorgang geht von vorne los. Für Gaswolken gilt:

$$M \sim r$$

$$\rho \sim \frac{1}{r^2}$$

Es gibt keine einheitliche Rotation in Galaxien, weil sich die Sterne und Gase sehr unterschiedlich bewegen. Dennoch kann man eine durchschnittliche Rotation messen, wenn man die Geschwindigkeit in Abhängigkeit zum Radius misst und so auf eine ungefähre Winkelgeschwindigkeit kommt. Da sich die meisten Himmelskörper nicht kreisförmig um das schwarze Loch drehen, ist das nicht wirklich eine Winkelgeschwindigkeit sondern vielmehr ein kurzfristiger Winkelgeschwindigkeitsvektor. Nimmt man den Durchschnitt dieser Vektoren erhält man die durchschnittliche Winkelgeschwindigkeit der Galaxie.

**Beispiel: Milchstraße****Abb. 9.9.: Unsere Milchstraße**

Unsere Milchstraße ist eine Sbc-Galaxie. Sie besteht aus 4 Spiralarmen: Dem Perseusarm, dem Segittarius-Carinna-Arm, dem Scutum-Crux-Arm und dem Normaarm. Diese Arme sind um 10-15° angestellt. Unsere Sonne befindet sich am äußeren Rand unserer Milchstraße zwischen Perseusarm und Segittarius-Carinna-Arm.

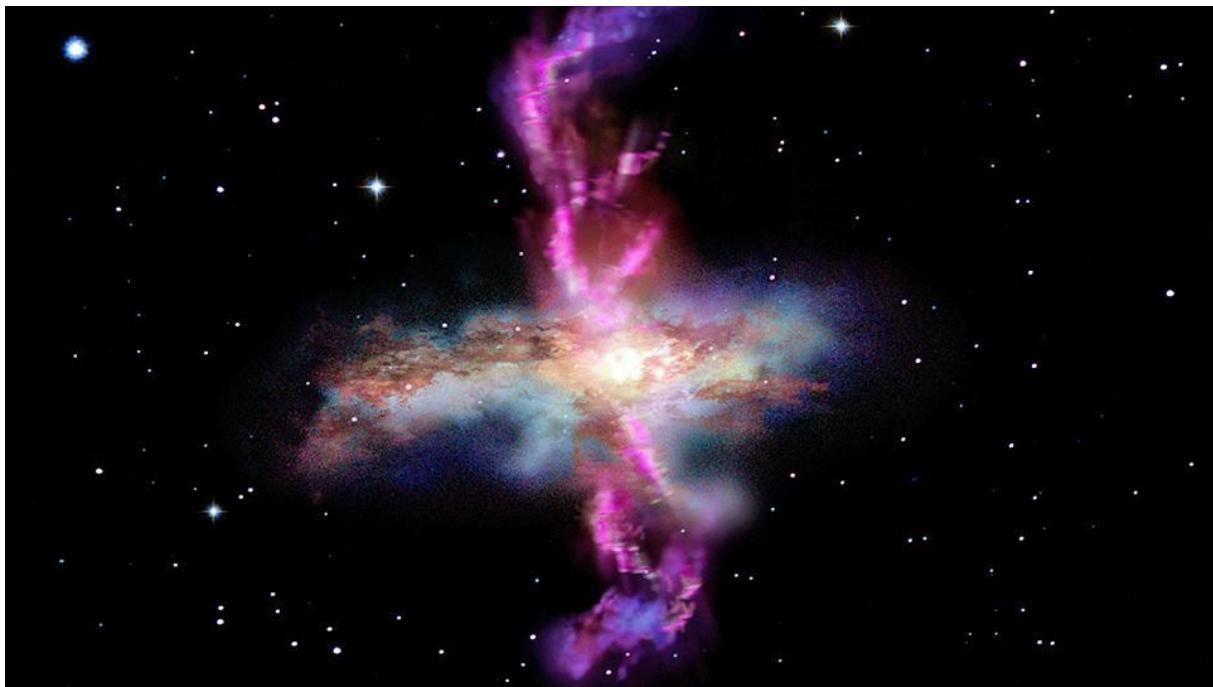
## Unregelmäßige Galaxien



**Abb.9.10.: Die vielfältigen Erscheinungsformen unregelmäßiger Galaxien**

Über unregelmäßige Galaxien kann man kaum allgemeine Aussagen treffen, weil die unregelmäßigen Galaxien im Grunde genommen all jene Galaxien sind, die nicht in das Schema zur Galaxieneinteilung passen. Dadurch gibt es auch keine Unterteilung in Arten von unregelmäßigen Galaxien. Es gibt keine Spiralarme und keine zentralen Ansammlungen in der Mitte, andernfalls würden sie als elliptische Galaxie bzw. Spiralgalaxie klassifiziert werden. In der Regel verteilen sich mehrere Verdichtungen über die Galaxie und es existiert viel interstellares Medium. Daraus bilden sich oft Sterne, weshalb viele junge Sterne existieren. Durchschnittlich sind unregelmäßige Galaxien mit nur einem Zehntel der Leuchtkraft unserer Milchstraße sehr leuchtschwach.

### Infrarotgalaxie



Wie der Name Infrarotgalaxie schon sagt, strahlen sie am stärksten im Infrarotbereich. Wenn zwei Infrarotgalaxien kollidieren, strahlen sie auch im UV-Bereich. Das liegt daran, dass sich bei der Kollision viele Molekülwolken vermischen und dabei neue Sterne bilden. Infrarotgalaxien kollidieren besonders oft, sodass die Sterne in diesen Galaxien meistens sehr ungleichmäßig verteilt sind und die Molekülwolken ständig von der Gravitation irgendeines Sterns angezogen werden. Aufgrund der ungleichmäßigen Verteilung kann man sie keiner Klasse zuordnen und es handelt sich um eine unregelmäßige Galaxie.

**Beispiel: Große Magellan'sche Wolke**

Die große Magellan'sche Wolke ist mit einer Entfernung von nur 60kpc von uns aus gesehen die nächste unregelmäßige Galaxie. Sie ist so nah, dass die Gezeitenkräfte der Milchstraße Form und Aufbau dieser Galaxie ändern. Die Masse ist mit  $2 \times 10^{10}$  Sonnenmassen kleiner als jene der Milchstraße. In der großen Magellan'schen Wolke gibt es zahlreiche HII-Regionen in denen auch Sterne entstehen. Ganz besonders viele Sterne entstehen in der Region NGC 1850. Deshalb stehen die Sterne in dieser Region auch so dicht, wie nirgendwo in der Milchstraße. Außerdem gibt es die unterschiedlichsten Formen von ISM, sowohl heißes als auch kaltes. Im Vergleich zur Milchstraße existieren wenige Metalle. Besonders interessant ist auch die Supernova SN 1987 A, die am 24.2.1987 in der großen Magellan'schen Wolke beobachtet werden konnte. Seit dem 17. Jahrhundert konnten keine Supernovae in ausreichender Nähe beobachtet werden. Dementsprechend viele Erkenntnisse brachte die Beobachtung dieses Supernova-Ausbruchs. Beim Beobachten der großen Magellan'schen Wolke ist wieder der Mikrolinseneffekt hilfreich, den wir schon von den Exoplaneten kennen.

[Erklärung des Mikrolinseneffekts im Skriptum „Erforschung der \(Exo\)planeten“ ⓘ](#)

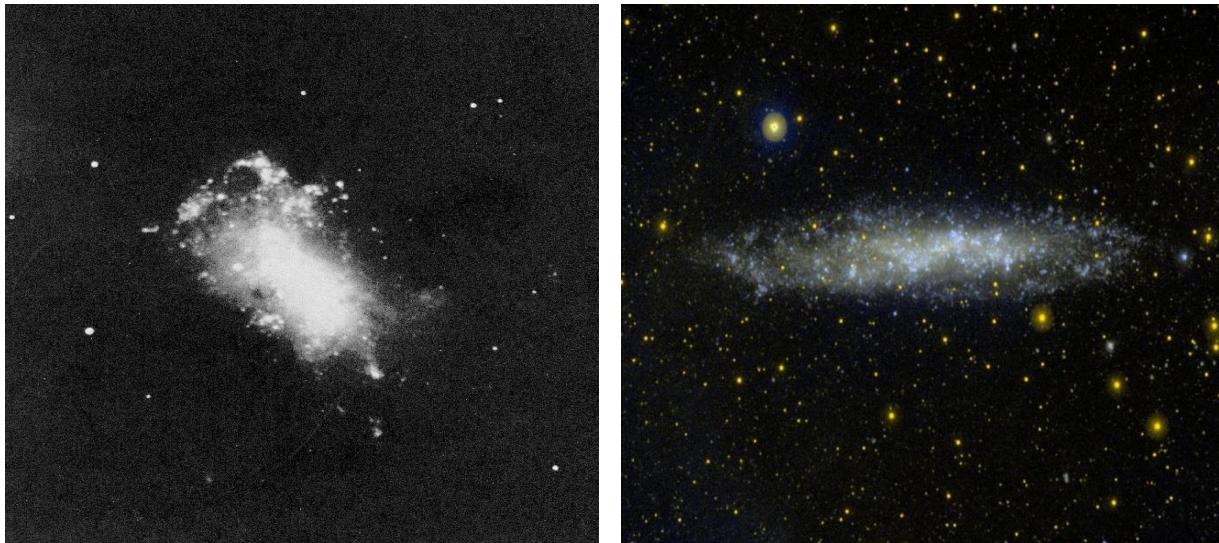
## Zwerggalaxien



In Zwerggalaxien findet Sternentstehung statt, aber nur selten. Dadurch gibt es auch mehr alte Sterne mit hohen Populationen, als junge Sterne mit niedrigen Populationen. Es existieren zwar HII-Regionen, aber nur selten Spiralarme. Bei Zwerggalaxien machen die Wechselwirkungen mit größeren Galaxien und mit dem intergalaktischen Medium einen großen Unterschied.

### Mögliche Unterteilung

Dem aufmerksamen Leser wird aufgefallen sein, dass die Zwerggalaxien beim Überblick über die Galaxiearten gar nicht erwähnt wurden. Das liegt daran, dass keine einheitliche Unterteilung von Zwerggalaxien existiert. Stattdessen erfindet jeder Autor seine eigene Unterteilung (nachstehend einige Beispiele dazu).



**Abb.9.11.: Der Unterschied zwischen elliptischen und sphärischen Zwerggalaxien**

Aufgrund ihrer geringen Größe, wissen wir hauptsächlich über Zwerggalaxien in der lokalen Gruppe, also der Ansammlung von Galaxien, in der sich auch unsere Milchstraße befindet, Bescheid. In dieser Region befinden sich vor allem drei Typen von Zwerggalaxien: Die elliptischen Zwerggalaxien ähneln sehr stark den elliptischen Galaxien nur, dass sie kleiner sind. Sie haben nur einige Millionen Sonnenmassen. Die sphärischen Zwerggalaxien ähneln den elliptischen Zwerggalaxien, nur, dass sie noch ein bisschen kleiner sind und ausschließlich in der Nähe von großen Spiralgalaxien vorkommen. Die unregelmäßigen Zwerggalaxien sind alle Zwerggalaxien, die man aufgrund der Form nicht zuordnen kann. Sie sind gasreich, wodurch es auch oft zur Sternentstehung kommt. Eine weitere Form von Zwerggalaxien, die vor allem im frühen Universum oft vorkamen, sind die blauen Zwerggalaxien. Sie erhalten ihren Namen von ihrer blauen Farbe. Die blauen Zwerggalaxien besitzen ausgedehnte Spiralarme und viel dunkle Materie. In ihnen kommt es besonders oft zur Sternentstehung. Die Leuchtkraft ist ungefähr 76-mal so hoch wie die Masse, das ist ungewöhnlich hoch im Vergleich zur Masse. Im frühen Universum waren die blauen Zwerggalaxien die häufigste Galaxieform, allerdings in unregelmäßigen Formen (weder Spiral- noch elliptische Galaxien). Sie sind schwer zu sehen, ihre größtmögliche Helligkeit ist 30mag. Durch zahlreiche Zusammenstöße entstehen viele junge Sterne. Man weiß nicht, ob und wie die heutigen Zwerggalaxien aus den blauen Zwerggalaxien hervorgegangen sind.