

# STUDENTENSKRIPT

---

## EINFUEHRUNG IN DIE ASTRONOMIE III

EXTRAGALAKTISCHE ASTRONOMIE UND KOSMOLOGIE - DAS PROJEKT CURTIS

---

GESCHRIEBEN VON DEN  
VORLESUNGSBESUCHER/INNEN IM WINTERSEMESTER 2013/14

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einleitung und geschichtlicher Überblick</b>	<b>1</b>
<b>2 Spiralgalaxien</b>	<b>5</b>
2.1 Allgemeines . . . . .	5
2.2 Morphologie und Klassifikation von Spiralgalaxien . . . . .	5
2.3 Radiale Helligkeitsverteilung . . . . .	18
2.4 Stellare Populationen . . . . .	20
2.5 HI Gas in Spiralgalaxien . . . . .	22
2.6 Molekulares Gas . . . . .	23
2.7 Gasinhalt in Spiralgalaxien . . . . .	25
2.8 Staub und Magnetfelder . . . . .	26
2.9 Spiralarme . . . . .	27
2.10 Rotation von Spiralgalaxien . . . . .	31
<b>3 Elliptische Galaxien</b>	<b>43</b>
3.1 Morphologische Klassifikation . . . . .	43
3.2 Helligkeitsprofil . . . . .	44
3.3 Zusammensetzung elliptischer Galaxien . . . . .	45
3.4 Strukturen . . . . .	45
3.5 Dynamik von elliptischen Galaxien . . . . .	47
3.6 Skalierungsrelationen von elliptischen Galaxien . . . . .	49
3.7 Sternpopulation . . . . .	51
3.8 Gas in elliptischen Galaxien . . . . .	52
<b>4 Aktive Galaxienkerne (AGNs)</b>	<b>56</b>
4.1 Geschichte zur AGN-Entdeckung . . . . .	56
4.2 Radiative Prozesse . . . . .	57
4.3 Energieverteilung . . . . .	59
4.4 Broad and Narrow Line Regions . . . . .	60
4.5 Klassifizierung von AGNs . . . . .	61
4.6 Die Host Galaxie . . . . .	62
4.7 Verschiedene Arten von AGNs . . . . .	62
<b>5 Zwerggalaxien</b>	<b>69</b>
5.1 Geschichte . . . . .	69
5.2 Zwerggalaxien als kosmologische Bausteine . . . . .	70
5.3 Allgemeine Einteilung von Zwerggalaxien . . . . .	72
5.4 Zwerg-elliptische Galaxien . . . . .	73
5.5 Zwerg-irreguläre Galaxien dIrrs . . . . .	78
5.6 Blue Compact Dwarf Galaxies (BCDs) . . . . .	80
5.7 Tidal Tail Galaxien . . . . .	81
5.8 Starburst-Zwerggalaxien . . . . .	82
5.9 Phänomene in Zwerggalaxien . . . . .	83
5.10 Intrinsische Eigenschaften: stellare Populationen, Metallizität und Sternentstehung . . . . .	87
5.11 Gezeitenströme bei Satellitengalaxien . . . . .	97

5.12	Akkretion von Satellitengalaxien . . . . .	99
5.13	Satellitengalaxien der Milchstraße . . . . .	101
5.14	Das M31-System . . . . .	108
<b>6</b>	<b>Interaktion von Galaxien</b>	<b>112</b>
6.1	Galaktische Winde . . . . .	112
6.2	Intergalaktisches Gas . . . . .	116
6.3	Wechselwirkende Galaxien . . . . .	120
6.4	Galaxy Mergers (Galaxienverschmelzungen) . . . . .	127
<b>7</b>	<b>Galaxiengruppen und Haufen</b>	<b>138</b>
7.1	Galaxiengruppen . . . . .	143
7.2	Galaxienhaufen . . . . .	155
7.3	Galaxies in Clusters (tba) . . . . .	173
7.4	Gravitational Lensing . . . . .	173
7.5	Gravitational Lensing Arcs . . . . .	178
<b>8</b>	<b>Kosmologie und das frühe Universum</b>	<b>180</b>
8.1	Erste Theorien . . . . .	180
8.2	Eine kurze Geschichte des Universums . . . . .	181
8.3	Die Geometrie des Raumes . . . . .	182
8.4	Kosmodynamik: Weltmodelle des Universums . . . . .	187
8.5	Inflation . . . . .	188
8.6	Schicksalsmomente des frühen Universums . . . . .	189
8.7	Die primordiale Nukleosynthese . . . . .	192
8.8	Die kosmische Hintergrundstrahlung (CMB) . . . . .	194
8.9	Untersuchung von Anisotropien . . . . .	197
8.10	Die Entstehung von Strukturen . . . . .	204
8.11	Das expandierende Universum . . . . .	207
8.12	Die kosmischen Parameter . . . . .	212

# 1 Einleitung und geschichtlicher Überblick

Schon seit der Frühzeit interessierte sich der Mensch für den Himmel und jene leuchtenden Objekte, die man jede Nacht, nachdem die Sonne untergegangen ist, beobachten kann. Dienten die Himmelskörper anfänglich zur Orientierung in Jahr und bei Reisen, entwickelte man mit der Zeit ein tieferes Interesse und Verständnis darüber, um welche Objekte es sich überhaupt handeln könnte und wie weit diese von uns entfernt sind.

Wir machen in unserer Darstellung der Astronomie einen großen Geschichtlichen Sprung und landen dort, wo mittlerweile von Johannes Kepler längst geklärt wurde, wie sich die Planeten um die Sonne bewegen und viele andere bereits als wissenschaftliche Fakten anerkannt wurden. Lassen wir den Weg dahin beiseite und widmen uns den großen Fragestellungen der Vorlesung „Einführung in die Astronomie III“: Galaxien, AGNs, Cluster und vieles mehr.

## Geschichtlicher Überblick

**Charles Messier** (1730-1817) zählt bei der Beobachtung von Galaxien zu den Vorkämpfern. Er konnte am Himmel Flecken entdecken, die eindeutig keine einzelnen Sterne waren, dennoch waren seine Beobachtungsmöglichkeiten noch nicht so weit ausgereift um Galaxien und Nebel unterscheiden zu können. Auf der Suche nach Kometen entdeckte Messier 1758 das erste Objekt im **Messier Katalog**, M1. 1771 wurde die erste Fassung des Messier Katalogs mit 45 Einträgen veröffentlicht, wobei hier Galaxien, Nebel und Sternhaufen gelistet waren, ohne eine genauere Unterscheidung in ihrer Art zu berücksichtigen. Schon einige Jahre später konnte die Anzahl der Objekte erweitert werden; in der letzten Fassung, die im Jahr 1784 publiziert wurde, befanden sich 103 Objekte. Der Katalog wurde im 20. Jahrhundert mit den Entdeckungen von Méchain, M104-109 sowie M110, ergänzt.



**Abbildung 1:** Charles Messier



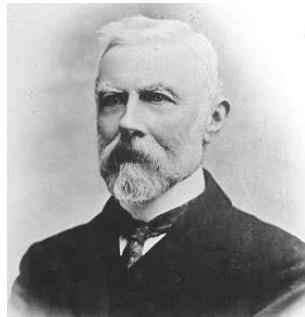
**Abbildung 2:** M31, Andromedagalaxie

Neben Charles Messier spielte **William Herschel** (1738-1822) eine wichtige Rolle bei der Erforschung von Galaxien und Nebeln. Nachdem er im Jahre 1781 den Planeten Uranus entdeckt hatte, wurde er zu einem Mitglied der *Royal Society of London* und widmete sich weiterhin der Beobachtung des Nachthimmels. Mit besseren Teleskopen ausgestattet als Messier, gelang es ihm durch seine gezielten Suche (1782-1802) weitere Objekte festzustellen. Außerdem konnte er durch die bessere Auflösung nun erstmals die „Nebel“ in einzelne Sterne auflösen. Seiner Meinung nach würde es sich bei allen Objekten um Sternhaufen handeln, er konnte damals noch nicht erkennen, dass die beobachteten Objekte durchaus verschiedene Eigenschaften besitzen, um sie in verschiedene Kategorien einzurordnen.

Die Beobachtungen von Herschel wurden erst Jahre später in einem neuen Katalog aufgelistet und publiziert. Es war die Aufgabe von **Johan Ludvig Emil Dreyer** (1852-1926) im Jahr 1888 einen neuen Katalog mit dem Namen **New General Catalogue of Nebulae and Clusters of Stars** (NGC) zu erstellen. Der Katalog enthält 7840 Objekte.



**Abbildung 3:** William  
Her-  
schel



**Abbildung 4:** Johan Ludvig Emil Dreyer

Weitere Kataloge, die entstanden um astronomische Objekte aufzulisten, sind der erste und der zweite **Index-Katalog**. Im ersten Index-Katalog (IC I) werden jene Objekte gelistet, die zwischen 1888, also dem Jahr in dem der NGC publiziert wurde, und 1895 entdeckt wurden. Im IC II werden Objekte aufgelistet, die zwischen 1895 und 1908 beobachtet wurden. Insgesamt sind im Index-Katalog ca. 5500 Objekte enthalten.

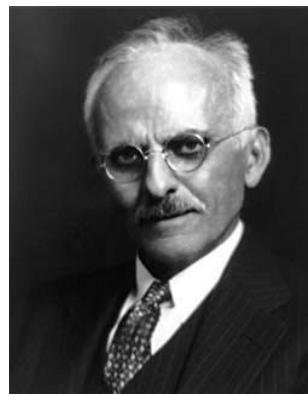
Es gibt noch zahlreiche andere Kataloge, in welchen Himmelsobjekte aufgelistet sind. Diese Aufzählung stellt demnach keineswegs den Anspruch auf Vollständigkeit, sondern soll viel eher einen kurzen Einblick in die Entstehung derartiger Kataloge geben und zeigen, in welch kurzer Zeit das Wissen über die Anzahl und Art von Galaxien und Nebel zugenommen hat.

Lassen wir nun die Anfänge der Galaxienbeobachtung hinter uns und widmen wir uns einem weiteren wichtigen Thema, der sogenannten **Great Debate**, welche im April 1920 an der *National Academy of Science in Washington* zwischen **Heber Curtis** und **Harlow Shapley** stattgefunden hat. Thema der Diskussion waren die Nebel, die laut Shapley alle als Teile der Milchstraße angesehen werden müssen, während Curtis der Meinung war, dass es sich bei den Nebeln um Objekte handelt, die sich in einer Entfernung zwischen 150-3000kpc befinden - und vor allem außerhalb unserer eigenen Galaxie. Beide Wissenschaftler hatten verschiedene plausible Argumente für ihre Annahmen, die im Folgenden kurz umrissen werden sollen:

**Shapley** hatte die Vorstellung, dass die Milchstraße viel größer sei, als bis zu jenem Zeitpunkt von den meisten Astronomen angenommen wurde. Außerdem wurde von ihm die Sonne nicht als Zentrum angesehen; Gasnebel am Nachthimmel, welche eine Spiralform aufweisten, erachtete er als Teil einer einzigen großen „Galaxie“.

Ein weiteres Argument, welches laut Shapley angeführt werden konnte, war, dass sich die Andromeda-Galaxie mit Sicherheit innerhalb der Milchstraße befinden müsste. Einerseits, weil sie ansonsten  $10^8$  Lichtjahre entfernt sein müsste, eine Distanz, die damals von vielen Astronomen nicht in Erwägung gezogen wurde bzw. kaum vorstellbar war, andererseits, weil eine Nova in dieser Galaxie beobachtet wurde, die den Kern überstrahlte. Dies war laut Shapley nur dadurch möglich, dass sich M31 nicht weit von uns entfernt befindet, da ansonsten die Explosion als unrealistisch energiereich sein musste.

Die Theorie von Shapley wurde von **Adriaan van Maanen** unterstützt. Dieser war der Meinung, eine Rotation der Pinwheel-Galaxie erkannt zu haben. Würde diese Galaxie aber außerhalb der Milchstraße liegen, so würde sich der äußere Bereich dieser Galaxie mit Überlichtgeschwindigkeit bewegen.



**Abbildung 5:** Heber Curtis



**Abbildung 6:** Harlow Shapley

**Curtis** war zunächst der Meinung, dass die Milchstraße um vieles kleiner sei, als es von Shapley postuliert worden war. Er war der Vertreter der Meinung, dass es sich bei

den Spiralnebeln, die beobachtet wurden, um separate und eigenständige Objekte handeln müsste, die sich in einer weiten Entfernung befänden und mit unserer Milchstraße vergleichbar wären.

Er hat außerdem gezeigt, dass in der Andromedagalaxie mehr Novae zu beobachten sind, als die eine vorhin erwähnte. Seiner Meinung nach wäre es fraglich, warum sich in einem Teil der Galaxie, würde man Andromeda zur Milchstraße zählen, mehr Novae ereignen, als in den anderen Teilen. Dies sah er als Argument dafür, Andromeda als eine eigenständige Galaxie darzustellen.

Er war des Weiteren nicht von den Messungen von van Maanen überzeugt und konnte seine eigene Theorie auch noch durch Messungen der Spektraltypen verschiedener Sterne untermauern.

Abschließend sollten noch die massiven beobachteten Dopplerverschiebungen seine Ansicht untermauern, genauso wie jene Objekte, die den Gaswolken in der Milchstraße ähnlich waren, welche Curtis in anderen Galaxien beobachten konnte.

**Edwin Hubble** brachte eine abschließende Klärung dieser Diskussion. Er berechnete mit Hilfe der Cepheiden den Abstand zur Andromedagalaxie und legte damit endgültig den Grundstein für die extragalaktische Astronomie.



**Abbildung 7:** Edwin Hubble

## 2 Spiralgalaxien

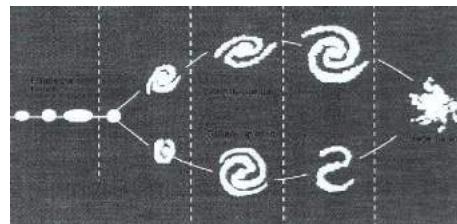
### 2.1 Allgemeines

Spiralgalaxien sind Ansammlungen von Sternen bzw. Sternhaufen in einem größeren Konglomerat, in dem sie sich scheibenförmig anordnen. Neben den Spiralgalaxien unterscheidet man zwischen elliptischen Galaxien und Zwerggalaxien. Dieses Kapitel wird sich jedoch ausschließlich auf Spiralgalaxien beziehen. Bekannte Beispiele von Spiralgalaxien sind unsere eigene Milchstraße (MWG) oder die Andromeda Galaxie (M31). Die charakteristische Helligkeit von Spiralgalaxien beträgt ca. -20 mag.

### 2.2 Morphologie und Klassifikation von Spiralgalaxien

Spiralgalaxien können sich in unterschiedlichsten Ausprägungen zeigen. Beispielsweise gibt es Spiralen, die sehr prägnante und große Arme zeigen, aber auch andere, deren Arme fast nicht erkennbar sind. Man unterscheidet ebenso zwischen der Größe des Bulges, dem Vorhandensein von Balken und einigen weiteren Merkmalen. Der erste Astronom, der Galaxien klassifizierte, war **Edwin Hubble** 1929.

Hubble unterschied zwischen elliptischen Galaxien (in Abb. 8 ganz links zu sehen), Spiralgalaxien (die beiden Äste oben und unten) und Irregulären Galaxien (rechts). Man darf keinesfalls annehmen, dass die Verbindungslien und/oder die Reihenfolge eine zeitliche Entwicklung darstellen. Sie dienen lediglich der Klassifikation.



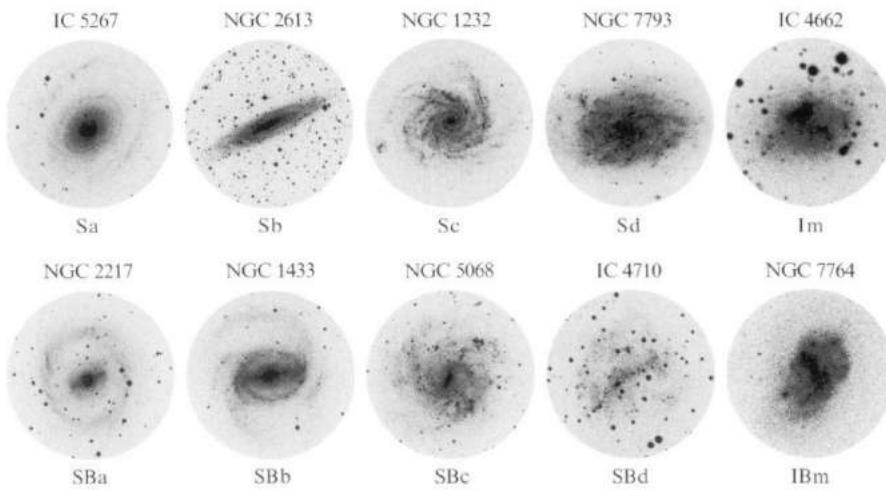
**Abbildung 8:** Galaxienklassifikation nach Hubble

Der obere Ast der Abbildung enthält Spiralgalaxien, welche keinen Balken aufweisen. Die drei Untertypen entstehen durch das Helligkeitsverhältnis von Bulge zu Scheibe. Sie werden von links nach rechts Sa, Sb und Sc bezeichnet. Der untere Ast wiederum enthält Spiralgalaxien, welche sehr wohl einen Balken aufweisen. Wieder entstehen aus dem Helligkeitsverhältnis zwischen Bulge und Scheibe weitere Untertypen (SBa, SBb, SBc). S steht für „spiral“, B für „bulk“ (Balken). (s. auch Kapitel ‘Balkengalaxien’ und ‘Bulges’ (nachfolgend))

Der Balken hat einen durchschnittlichen Durchmesser zwischen 1 – 4 kpc und rotiert starr. Seine Enden rotieren mit der selben Geschwindigkeit, wie die angrenzende Scheibe. An seinen Enden herrscht meist heftige Sternentstehung (zu sehen im H-Alpha), da sich das Gas dort aufgrund von dynamischen Prozessen anhäuft. Wenn man eine Galaxie zu

lange belichtet, so wird der Balken überstrahlt. Es empfiehlt sich daher (sofern man den Balken beobachten möchte), schwächer zu belichten.

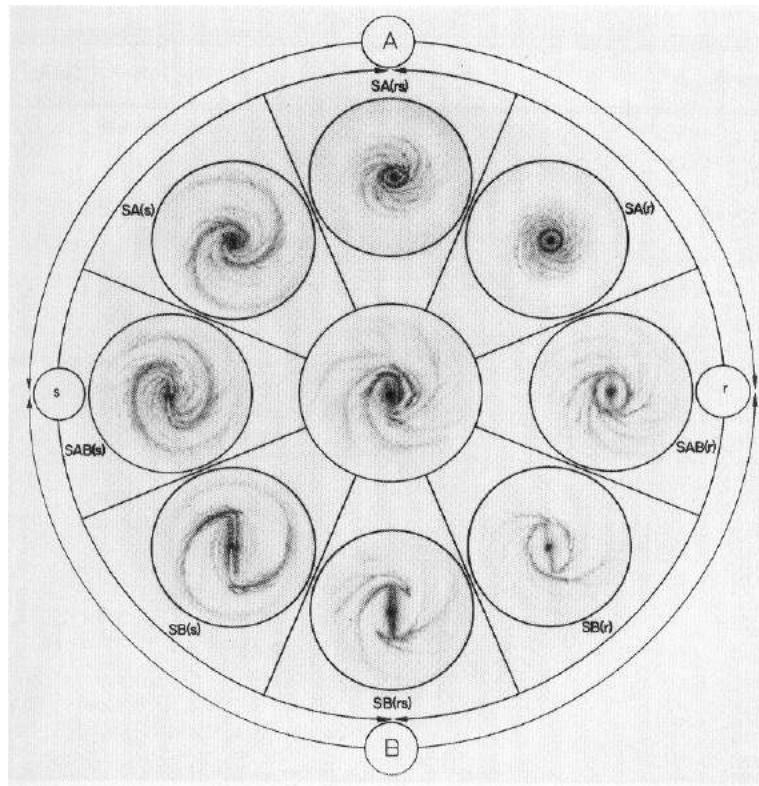
Es gibt auch Übergangstypen zwischen Ellipsen und Spiralen, genannt S0. Dieser Typ erscheint linsenförmig und hat keine Spiralarme, aber einen riesigen Bulge. Das bekannteste Beispiel für so einen Übergangstyp ist die Sombrero Galaxie. S0 Galaxien sind jedoch aufgrund ihrer hohen inneren Dynamik (große Geschwindigkeitsdispersion) eher der Kategorie der Ellipsengalaxien zuzuordnen.



**Abbildung 9:** Beispiele zu einigen Galaxientypen (Anm.: Im = irreguläre Galaxien)

Eine detailliertere Klassifikation von Spiralgalaxien lieferte **Gérard-Henri de Vaucouleur** im Jahre 1959. Er führte die zusätzlichen Informationen A (Windungsstärke der Arme), s (prägnante Spiralarme) und r (rings) ein (siehe Abb. 10).

Des weiteren führte **Johannes van de Bergh** im Jahre 1976 die zusätzliche Unterscheidung ein, ob eine Galaxie „anämisches“ (mit geringem Gasgehalt) ist oder nicht (s. Abb. 11).



**Abbildung 10:** de Vaucouleur Schema zur Klassifikation von Galaxien



**Abbildung 11:** Die untere Spiralgalaxie ist „edge on“ zu sehen, die obere „face on“

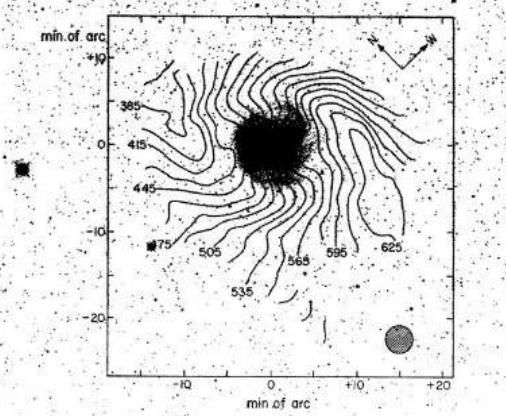
### 2.2.1 Balkengalaxien

Ein bei Spiralgalaxien häufig auftretendes Phänomen sind Balken im zentralen Bereich. Hubble unterschied bei seiner Galaxienklassifikation Balkenspiralgalaxien von Spiralgalaxien ohne Balken. Zu Hubbles Zeit war allerdings bei nur bei recht wenigen Galaxien ein Balken bekannt. In den letzten Jahrzehnten hat sich jedoch gezeigt, dass der Anteil von Balkenspiralgalaxien bei über 50 Prozent liegt. Mit besseren Beobachtungsmethoden konnten auch kürzere Balken entdeckt werden, die sonst häufig von einem hellen Bulge überstrahlt wurde. Auch bei unserer Milchstraße wurde mittlerweile ein Balken im Zentralbereich festgestellt.



**Abbildung 12:** Die Balkenspiralgalaxie M83

Balken in Spiralgalaxien lassen sich aus dem Spiderdiagramm herauslesen. Wenn die Linien mit gleicher Geschwindigkeit in Zentrumsnähe nicht senkrecht auf der Verbindungsgeraden der Extremwerte der Geschwindigkeit stehen, deutet das auf einen Balken hin (siehe Abb. 13).



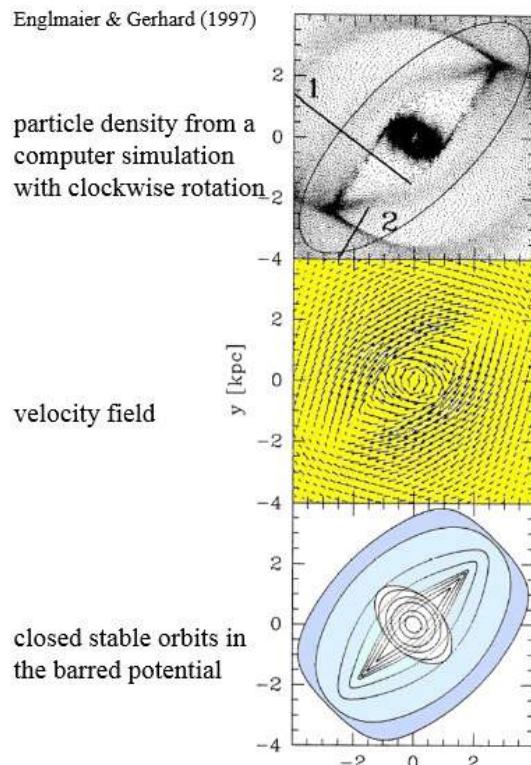
*Figure 7* The velocity field of M83 derived from H I aperture synthesis observations shows a strong variation of the position angle of the kinematical major axis with distance from the center. The underlying optical picture from the Palomar Sky Survey shows that the horizontal axis of the figure corresponds approximately to the major axis of the optical image of the galaxy. The distortions in the velocity field are interpreted as a result of a severe warping of the outer parts of the plane of the galaxy (Rogstad et al. 1974).

**Abbildung 13:** Spiderdiagramm der Gasscheibe von M83

Wie die Spiralarme scheinen Balken ein Phänomen in der Galaxienentwicklung zu sein, bei dem es eine zeitliche Entwicklung gibt. Bei hohen Rotverschiebungen findet sich ein deutlich geringerer Anteil an Balken als im Lokalen Universum. Man geht davon aus, dass Balken erst durch eine Wechselwirkung von außen entstehen und sich dann selbst verstärken.

Der entsprechende Mechanismus ist folgender (vgl. dazu Abb. 14):

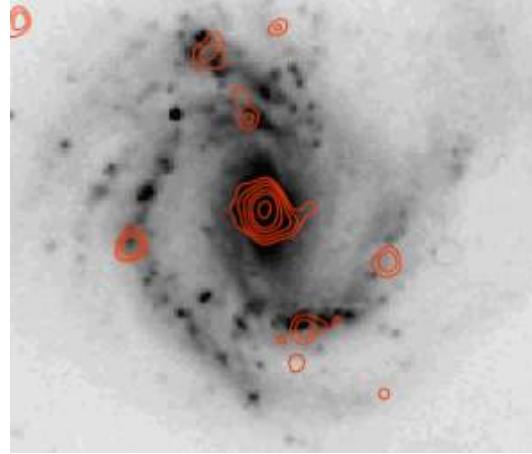
In der Front der Bewegung des Balkens wird das Gas konzentriert, es staut sich. Aufgrund dissipativer Effekte kühlt es dort und transportiert Drehimpuls nach außen und fällt dadurch mit höherer Geschwindigkeit in Richtung Zentrum. Der Balken weist dadurch eine konstante Winkelgeschwindigkeit auf und bleibt bestehen. Am äußeren Ende des Balkens befindet sich dieser in Korotation mit der Scheibe und kann nicht weiter wachsen. An dieser besonders dichten Stelle setzen dann die differentiell rotierenden Spiralarme an. In diesen Bereichen kann man auch häufig besonders viele Sternentstehungsgebiete beobachten. Das zeigt sich auch bei Aufnahmen im Röntgenlicht (vgl. Abb. 15)!



**Abbildung 14:** Teilchendichte, Geschwindigkeitsfeld und mögliche Orbits um einen Balken

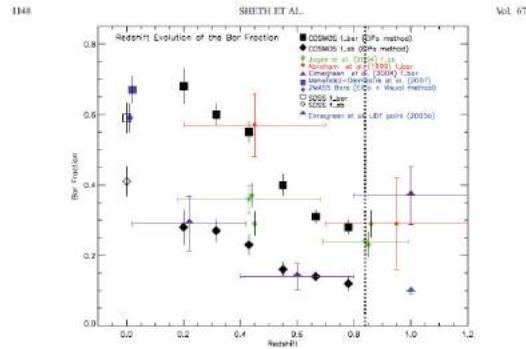


**Abbildung 15:** Aufnahmen von NGC 4303 im Optischen

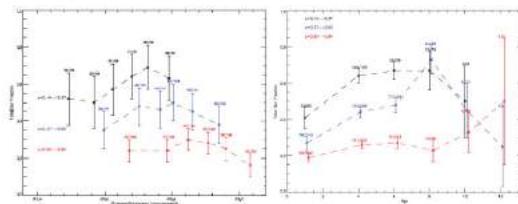


**Abbildung 16:** Aufnahmen von NGC 4303 im Röntgenlicht.

Wie schon gesagt, ist festzustellen, dass Balken im lokalen Universum häufiger sind als bei hohen Rotverschiebungen (Abb.5) Bis zu einer Rotverschiebung  $z=1$  konnte ist dieser Trend gefunden werden. Eine Korrelation mit der Oberflächenhelligkeit und dem Halblichtradius scheint dagegen nicht zu bestehen (Abb.6).



**Abbildung 17:** Anteil der Balkenspiralgalaxien bei verschiedenen Rotverschiebungen



**Abbildung 18:** Anteil der Balkenspiralgalaxien in Abhängigkeit von Oberflächenhelligkeit (l.) und Halblichtradius (r.) jeweils bei verschiedenen Rotverschiebungen

Kurz noch ein Wort zur stellaren Kinematik. Für die Sterne gilt, dass Masse, Leuchtkraft und Geschwindigkeitsdispersion über das Masse-Leuchtkraft-Verhältnis und das Virial-Theorem in Verbindung stehen.

### 2.2.2 Bulges

Bulges, die sphärischen Zentralbereiche einer Spiralgalaxie, sind ebenfalls eine wichtige Komponente ebenjener. In der Hubble-Klassifikation ist das Verhältnis von Bulge- zu Scheibenkomponente das wichtigste Einordnungskriterium bei Spiralgalaxien. Die Sternpopulation im Bulge ist in der Regel alt (bis zu  $12 \cdot 10^9$  Jahre), Sternentstehung findet nicht statt. In manchen Aspekten kann man den Bulge mit einer elliptischen Galaxie vergleichen.



**Abbildung 19:** Die Galaxie NGC 891, die beinahe senkrecht zum Beobachter liegt. Sie hat etwa das Erscheinungsbild unserer Milchstraße.

Aufgrund der alten Sternpopulation im Bulge unterscheidet sich dieser auch in der Farbe deutlich von der Scheibenkomponente. Während dort die jungen, blauen Sterne das Spektrum dominieren, sind die leuchtkräftigsten Sterne im Bulge meist ältere, rote Riesensterne (siehe Abb. 20). Beim Übergang von der Scheibe zum Bulge unterscheidet man zwei Typen von Spiralgalaxien. Bei Typ 2 (zu dem unsere Milchstraße gehört) wird die Scheibenkomponente in Richtung Zentrum deutlich schwächer, während sie sich bei Typ 1 mit exponentiell ansteigender Helligkeit bis ins Zentrum fortsetzt (vgl. Abb. 21).

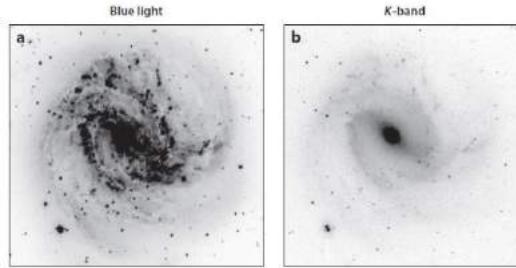


Figure 8  
M83 (a) in blue light and (b) in the K-band. The bar is much more obvious in the near-IR. (Unpublished images by O.-K. Park and K.C. Freeman).

**Abbildung 20:** Die Galaxie M83 im blauen (l.) und im roten(r.) Filter

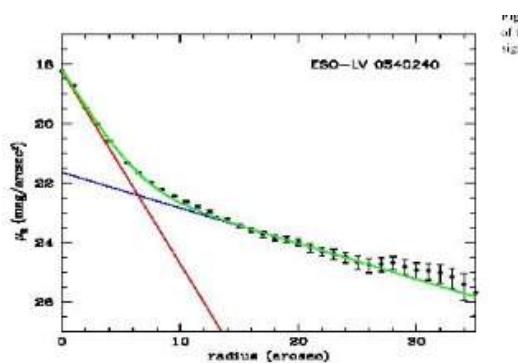


Fig. 3. Bulge-disk decompositions. The exponential bulge and disk fits plus the total profiles are shown.

**Abbildung 21:** Oberflächenhelligkeit einer Spiralgalaxie vom Typ 1 in Abhängigkeit vom Abstand zum Zentrum. Bulge-(rot) und Scheibenanteil (blau) sind ebenfalls eingetragen.

Natürlicherweise korreliert die Bulge-Größe gut mit dem Hubbletyp der Galaxie, denn so wurde die Sequenz ja einst definiert. Bei früheren Typen (Sa, Sb) hat der Bulge einen hohen Anteil an der Gesamthelligkeit der Galaxie, bei den späteren Typen (Sc, Sd, Sm) einen niedrigeren (s. Abb. ??).

Eine Frage, die sich stellt, ist, inwiefern die Bulges von Spiralgalaxien mit elliptischen Galaxien vergleichbar sind, gibt es doch mit den S0-Galaxien einen kontinuierlichen Übergang zwischen diesen Formen. Ebenso wie elliptische Galaxien haben Bulges in der Regel eine triaxiale Form. Ein typisches Verhältnis der Achsen ist beispielsweise 1 : 0,95 : 0,7 (vgl. Abb. 22).

Die Triaxialität ist in der Regel allerdings weniger ausgeprägt als bei elliptischen Galaxien, die Rotationsabplattung ist der dominantere Effekt. Während bei Bulges die Rotation die Geschwindigkeitsverteilung der Sterne dominiert, gibt es bei elliptischen Galaxien mehr ungeordnete Bewegung (vgl. Abb. ??)

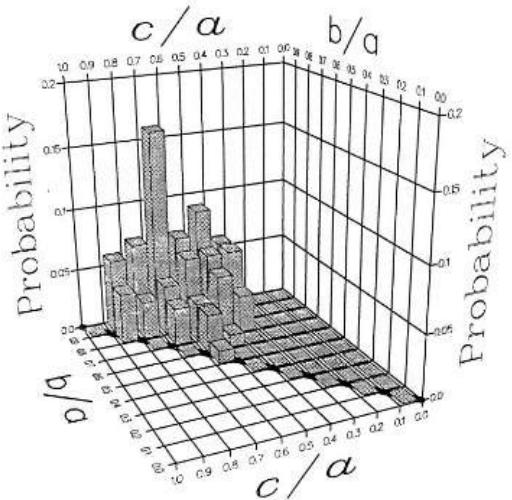


Fig. 3. The distribution function of the intrinsic axial ratios of bulges derived by Bertola et al. (1991) on the assumption that disks are circular.

**Abbildung 22:** Anteile von Bulges mit verschiedenen Achsenverhältnissen

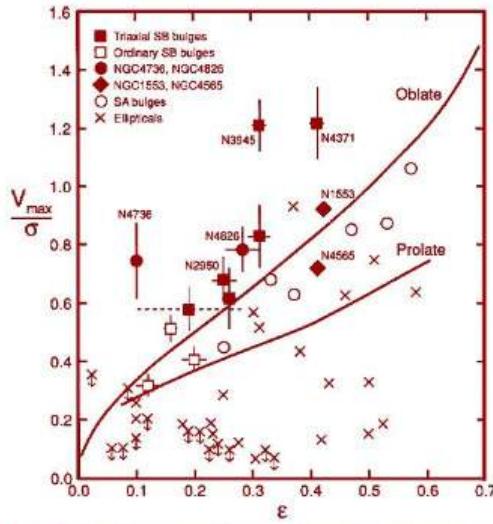
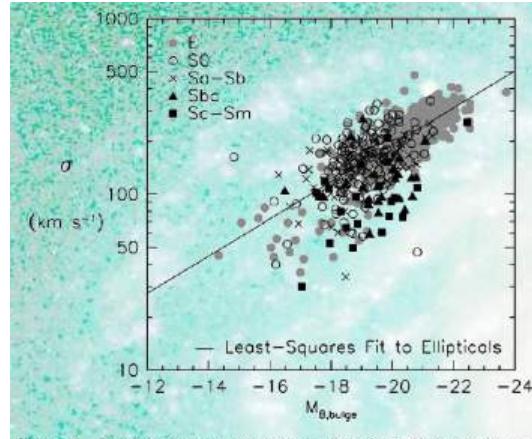


Figure 17 The relative dynamical importance of rotation and random motions as a function of observed ellipticity for various kinds of stellar systems. Here  $V_{\max}/\sigma$  is the ratio of maximum rotation velocity to mean velocity dispersion interior to the half-light radius and  $\epsilon = 1 - \text{axial ratio}$ . The "oblate" line describes oblate-spheroidal systems that have isotropic velocity dispersions and that are flattened only by rotation; it is a consequence of the tensor virial theorem (Binney & Tremaine 1987). The "prolate" line is one example of how prolate spheroids can rotate more slowly for a given  $\epsilon$  because they are flattened partly by velocity dispersion anisotropy. This figure is updated from Kormendy (1993).

**Abbildung 23:** Verhältnis von Maximalgeschwindigkeit und Geschwindigkeitsdispersion als Maß für den Anteil an Rotationsbewegung bei Bulges und E-Galaxien, dargestellt in Abhängigkeit der Elliptizität

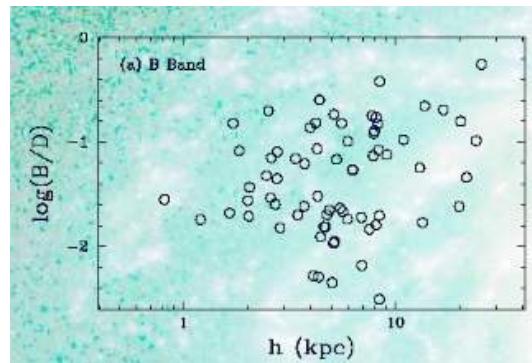
Spiralgalaxien folgen (ebenso wie S0- und elliptische Galaxien) einer weiteren Korrelati-

on: Je heller der Bulge ist, desto höher ist die Geschwindigkeitsdispersion (s. Abb. 24). Ein Zusammenhang zwischen Bulge-Disk-Verhältnis, also Hubble-Typ, und Skalenlänge der Scheibe scheint dagegen nicht zu bestehen (s. Abb. 25)



**Figure 18** Correlation between central velocity dispersion and bulge absolute magnitude for all galaxies of the indicated Hubble types that have velocity dispersion tabulated in Hypercat. The straight line is a least-squares fit to the ellipticals. Updated from Kormendy & Illingworth (1983); this figure is from Kormendy & Cornell (2004)

**Abbildung 24:** Geschwindigkeitsdispersion in Abhängigkeit der absoluten Helligkeit des Bulges bei verschiedenen Galaxientypen

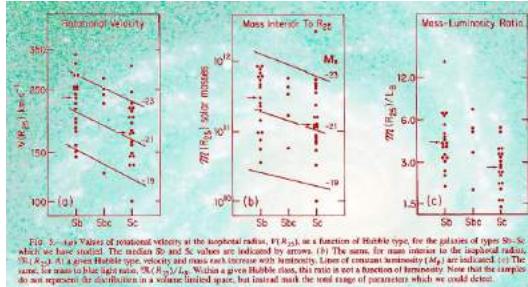


**Abbildung 25:** Skalenradius verschiedener Galaxien in Abhängigkeit zum Bulge-Disk-Verhältnis

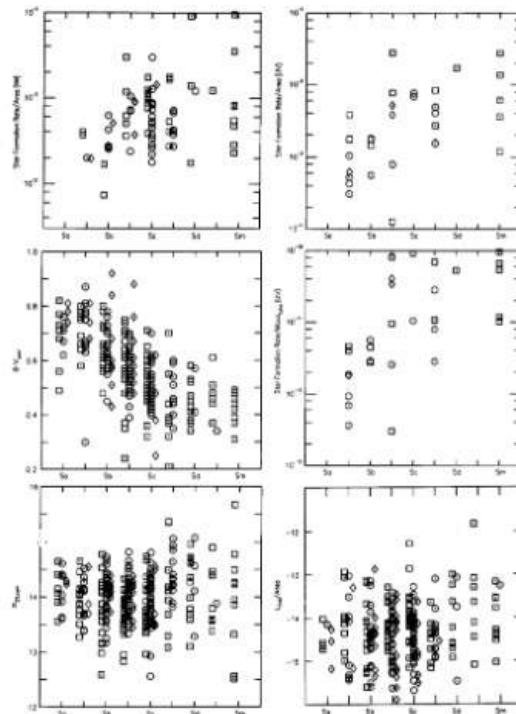
### 2.2.3 Weitere Korrelationen zwischen morphologischem Typ und Struktur bei Spiralgalaxien

Neben den schon erwähnten Zusammenhängen gibt es noch weitere Korrelationen zwischen verschiedenen Parametern von Spiralgalaxien und ihrem Hubble-Typ. Frühere Typen weisen beispielsweise im Schnitt eine höhere Rotationsgeschwindigkeit, eine höhere Massenkonzentration zum Zentrum hin und ein etwas höheres Masse-Leuchtkraft-Verhältnis auf (vgl Abb. 26). Die UV-Leuchtkraft und die Sternentstehungsrate pro

Oberfläche und auch pro Masse steigen dagegen für spätere Typen leicht an. Die Farbe der Galaxien geht bei späteren Typen mehr ins Blaue, während Fluss im Infrarot und die Helligkeit innerhalb der Kontur von 25 Magnituden vom Hubble-Typ unabhängig zu sein scheinen (vgl. Abb. 27)



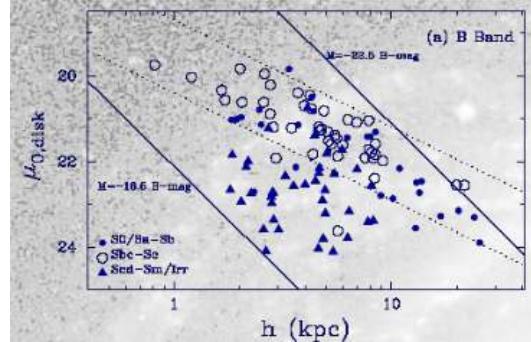
**Abbildung 26:** Rotationsgeschwindigkeit (l.), Masse innerhalb von R25(m.) und M-L Ratio (r.) in Abhängigkeit vom morphologischen Typ



**Abbildung 27:** Sternentstehungsrate pro Fläche, beobachtet im Optischen (o.l.), UV-Leuchtkraft (o.r.), B-V-Farbindex (m.l.), Sternentstehungsrate pro Masse, beobachtet im UV (m.r), Helligkeit innerhalb von 25m (u.l.) und Fluss im Infrarot (u.r.), jeweils in Abhängigkeit vom morphologischen Typ

Des Weiteren existiert eine Abhängigkeit zwischen Scheibengröße und Zentralhelligkeit:

Größere Scheiben haben oft kleinere Zentralhelligkeiten (s. Abb. 28). Die Helligkeit einer Spiralgalaxie ist umso größer, je größer die Kontur mit einer Helligkeit von 25 mag ist (s. Abb. 29).



**Abbildung 28:** Zentralhelligkeit von S-Galaxien in Abhängigkeit der Scheibengröße

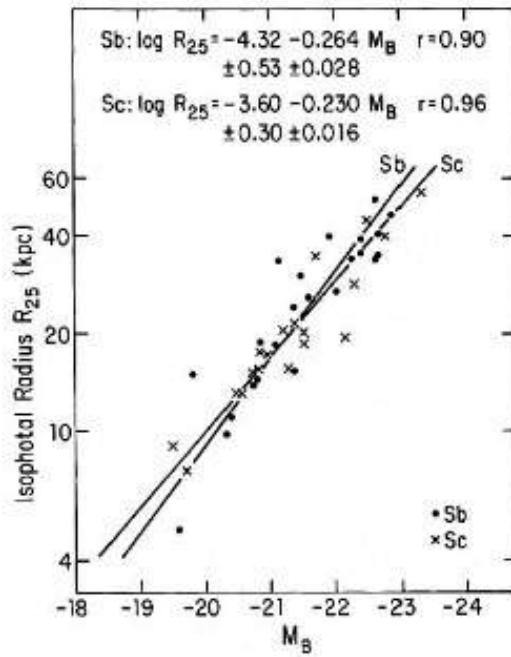


FIG. 7.—Correlation of isophotal radius,  $R_{25}$ , with  $M_B$ , for both Sb and Sc galaxies. Note that the relation is independent of Hubble type.

**Abbildung 29:** Radius der 25-mag-Isophote in Abhängigkeit der absoluten Helligkeit

## 2.3 Radiale Helligkeitsverteilung

Bei face on Spiralen kann man nach außen hin einen exponentiellen Helligkeitsabfall feststellen (Freeman 1970). In der nachstehenden Grafik (Abb. 30) sind links Typ 1 und rechts Typ 2 Helligkeitsprofile dargestellt (x-Achse: Entfernung zum Zentrum, y-Achse: Helligkeit). Der Helligkeitsanstieg bei kleinem  $R$  ist auf den Bulge zurückzuführen. Der Helligkeitsabfall bei  $R=1,5$  im rechten Diagramm (Typ 2) ist auf Extinktion zurückzuführen („ring of mass depression“). Unsere Milchstraße (MWG) zeigt ein charakteristisches Typ 2 Profil.

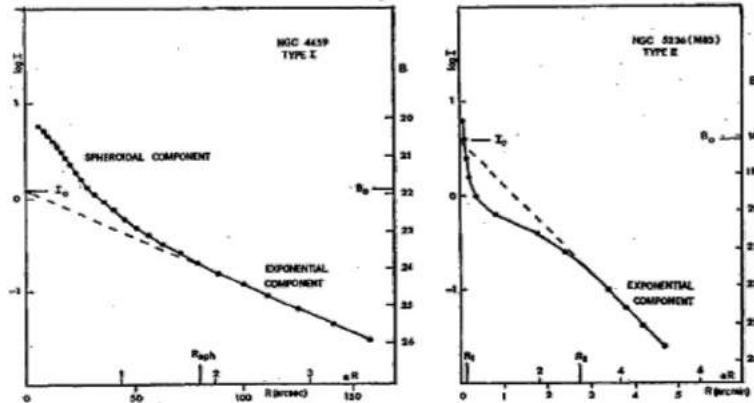
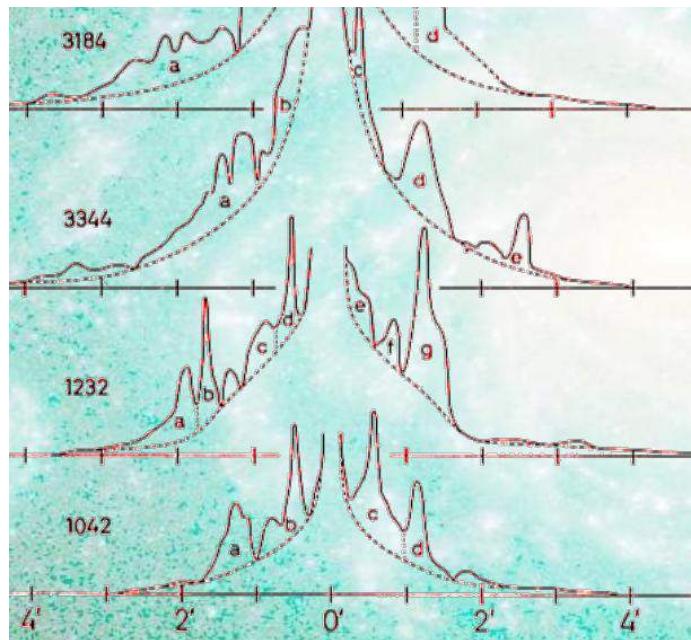


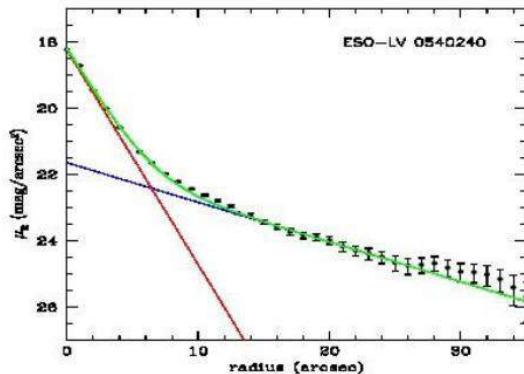
FIG. 1.—Radial luminosity distributions for NGC 4459 and M83.  $I$  is the surface brightness. Ordinates are  $\log I$  and  $I$  in  $B$ -mag per square second of arc.  $R$  is distance from the nucleus along the major axis; the dimensionless radius  $aR$  is also shown.  $I_0$ ,  $B_0$  are the surface-brightness scale for the exponential disk, uncorrected for inclination and galactic absorption.  $R_s$ ,  $K_s$ , and  $R_{\text{eph}}$  are defined in § III. *Filled circles*, observed points.

Abbildung 30

Wenn die Helligkeit unserer Milchstraße in alle Richtungen untersucht wird, so zeigen sich Peaks, die durch die Spiralarme hervorgerufen werden. Die strichlierten Linien in Abb. 31 entsprechen dem radialen, exponentiellen Helligkeitsabfall. Der große Peak in der Mitte wird durch den Bulge hervorgerufen.



**Abbildung 31**



**Abbildung 32:** Teilung der Komponenten in Bulge und Scheibe (wird „decomposition“ genannt)

Im Folgenden finden sich Formeln, die die radiale Helligkeitsverteilung beschreiben.  $I$  ist die Intensität,  $I_0$  ist die Intensität bei einem Skalenradius (Skalenlänge)  $r_D = 1/\alpha$ . Auch die Helligkeit des Bulges folgt einem Exponentialgesetz.  $r_e$  ist der Effektivradius. Innerhalb dieses Radius ist die Hälfte der Gesamtleuchtkraft der Galaxie eingeschlossen.

Galactic Disks:

$$I_D(r) = I_0 \cdot e^{-r/r_D} = I_0 \cdot e^{-\alpha \cdot r} \quad (2.1)$$

Surface brightness:

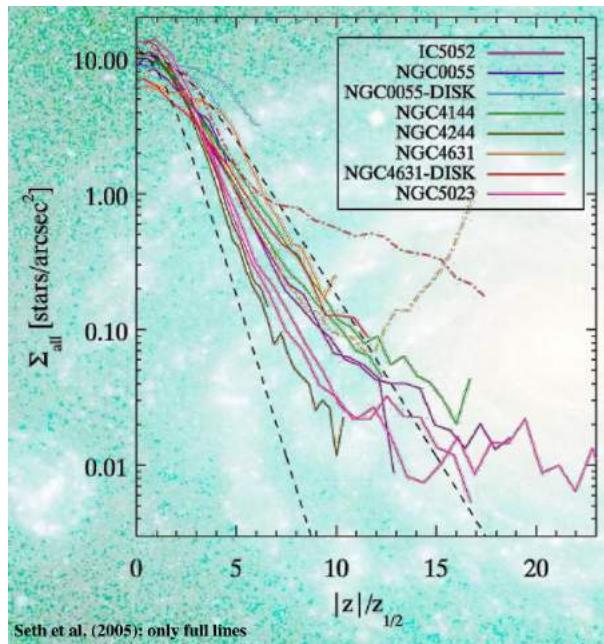
$$\mu_D(r) = \mu + 1,082(\alpha \cdot r) \quad (2.2)$$

de Vaucouer's Law:

$$I_B(r) = I_e \exp \left( -7,7678 \left[ (r/r_e^{1/4}) - 1 \right] \right) \quad (2.3)$$

mit  $L(r < r_e) = \frac{1}{2} \cdot L_{tot}$

Neben der radialen Helligkeitsverteilungen bei face on- Galaxien kann man auch bei edge on Galaxien solch eine Untersuchung durchführen (Abb. 33). Hier wird jedoch die vertikale Helligkeitsverteilung (und dadurch auch die Dichteverteilung) untersucht. Die Gleichungen und Diagramme, die diese Verteilungen beschreiben, ähneln denen der radialen Verteilung sehr stark. Die wichtigen Formeln sind: Poisson Gleichung, Hydrostatisches Gleichgewicht, Skalenhöhe.



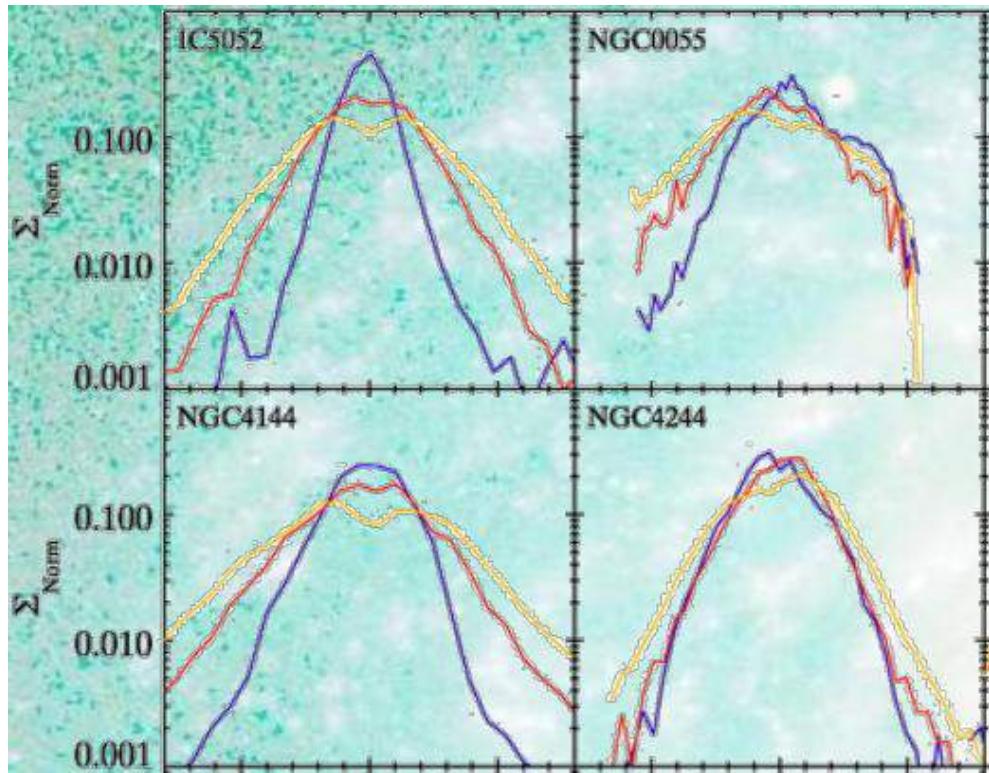
**Abbildung 33**

Die vertikale Helligkeitsverteilung nimmt exponentiell ab. Abb. 33 zeigt auf der x- Achse die Höhe aus der Scheibe (bei  $z = 0$  befindet man sich inmitten der Scheibe), die y-Achse zeigt die logarithmische Dichteverteilung (Summe über die Sterne pro  $arcsec^2$ ). Es gibt große Unsicherheiten in der vertikalen Achse, da bisher (2014) noch keine genaueren Messungen möglich waren.

## 2.4 Stellare Populationen

In Abbildung 34 sind die einzelnen Sternkomponenten in 4 verschiedenen Galaxien aufgetragen. Wieder sind die Achsen gleich wie bei der vorigen Grafik (Abb. 33) über

vertikale Helligkeitsverteilungen (lediglich der Nullpunkt befindet sich nun in der Mitte, sodass man die Sternkomponenten in beide Richtungen aus der Scheibe heraus betrachten kann). Die Hauptreihensterne und jungen Sterne (blau) sind sehr konzentriert in der dünnen Scheibe. Dies kann man dadurch erklären, dass sie astronomisch gesehen erst vor kurzer Zeit entstanden sind und sich noch nicht allzu weit von der zentralen Ebene (dünne Scheibe) entfernen konnten. Sterne verlassen die dünne Scheibe aufgrund ihrer Eigenbewegungen im Laufe der Zeit. AGB Sterne (rot) und RGB Sterne stellen eine sichtlich breitere Komponente als Hauptreihensterne. Diese Sternkomponenten sind alt und bilden zu großen Teilen die dicke Scheibe. Bei einigen Kurven ist eine Abflachung in der Mitte zu erkennen. Dieser Helligkeitsabfall ist auf Extinktion zurückzuführen.



**Abbildung 34:** Seth et al. 2005

Stellare Populationen wurden erstmals von **Walter Baade** beschrieben. Er unterschied zwischen 2 Populationen (Pop I und Pop II) in der Milchstraße. Pop I ist dabei die (blaue) Scheibenkomponente und Pop II die (rote) Bulgekomponente.

Die sogenannte „stellar population analysis“ versucht, die einzelnen Sternkomponenten in Galaxien zu erfassen. Es ist meist schwierig, dies zu bestimmen, da helle O/B Assoziationen die leuchtschwächeren Komponenten oft überstrahlen. Die stellar population analysis gibt Aufschluss über die Besetzung der IMF (initial mass function). Für Sterne mit geringer Masse ist dies schwierig zu bestimmen. Der Turnoff-Punkt der Main

sequence des HRD (Hertzsprung Russel Diagramm) bestimmt die Temperatur des gesamten Systems.

Die „age / metallicity degeneracy“ beschreibt ein schwieriges Problem in der Astronomie. Wenn man ein Spektrum einer Galaxie aufnimmt, so kann man nicht bestimmen, ob gewisse Konfigurationen durch Alterseffekte oder Metallizitätseffekte entstehen. Das Spektrum sieht in beiden Fällen gleich aus. Eine Faustregel besagt: Erhöhe das Alter um den Faktor 3 und senke die Metallizität um den Faktor 2, so erhältst du das gleiche Spektrum.

Im Folgenden sind Aufnahmen von M83 in verschiedenen Wellenlängenbereichen zu finden (Abb. 35). UV – Aufnahmen ähneln jenen von optischen Aufnahmen. Sie zeigen vor allem O- und B-Assoziationen, Sternentstehungsgebiete und die Spiralarme kommen hervorragend zur Geltung.

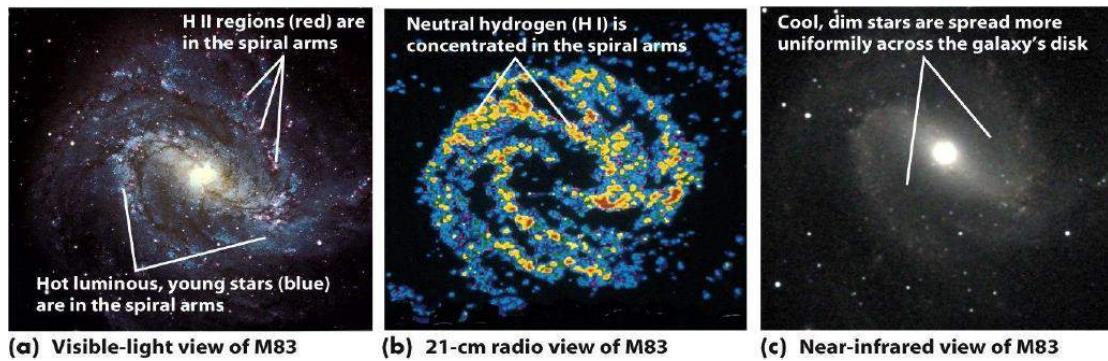


Abbildung 35

## 2.5 HI Gas in Spiralgalaxien

Neben der Sternkomponente weisen Spiralgalaxien auch ausgeprägte Gaskomponenten auf. Ob Staub, molekulares Gas, neutrales Gas oder heißes Gas, alles ist dort anzutreffen. Im Folgenden wird das neutrale Wasserstoffgas HI behandelt.

HI (kühles Gas) erstreckt sich oft über riesige Gebiete (20 – 25 kpc sind nicht selten). Diese Gebiete weisen keine regelmäßige Struktur auf. Im Folgenden (Abb. 36) findet sich ein Vergleich zwischen der HI Verteilung und dem optischen Bild von NGC2403 (Maßstab 1:1). Das Gas ist flockenartig verteilt (keine Spiralstruktur erkennbar).



**Abbildung 36:** Vergleich der HI-Verteilung und optischem Bild von NGC2403 im Maßstab 1:1

HI Gas ist auch dort, wo Sternentstehung stattfindet. Bei dichteren Regionen funktioniert die thermische Kühlung besser und das Gas kann kontrahieren. Wenn die Dichte um den Faktor 3 erhöht wird, so ist die Kühlung bereits eine Größenordnung effektiver. Allgemein gilt, dass bei größeren Scheiben auch mehr HI Gas vorhanden ist (auch hier gibt es Ausnahmen).

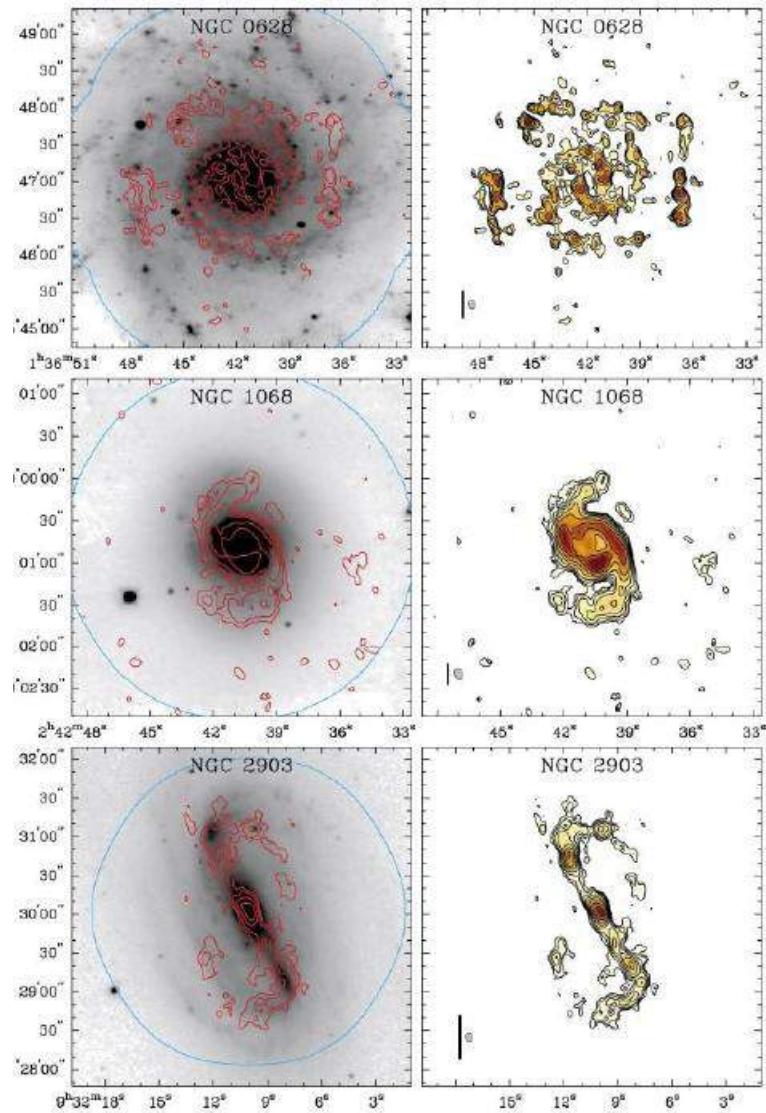
Im Außenraum einer Galaxie herrscht eine zu geringe Dichte, um nennenswerte Sternentstehung zu ermöglichen. Es kann jedoch sein, dass kleinere Gebiete sehr wohl Sternentstehung zeigen! Es ist noch nicht genau geklärt, warum dies sein kann. Man nimmt an, dass womöglich einfallende Gaswolken die Dichte erhöhen und so die Kühlung triggern.

## 2.6 Molekulares Gas

Ein Indikator für Sternentstehung ist H-Alpha Strahlung. Wenn man also Sternentstehungsregionen beobachten möchte, muss man eine Karte der H-Alpha Strahlung anfertigen. Es zeigt sich jedoch, dass CO-Moleküle die selben Ergebnisse liefern und zusätzlich leichter zu messen sind. Aufgrund dieser Tatsache hat es sich in der Astronomie eingebürgert, CO Verteilungen zu erfassen.

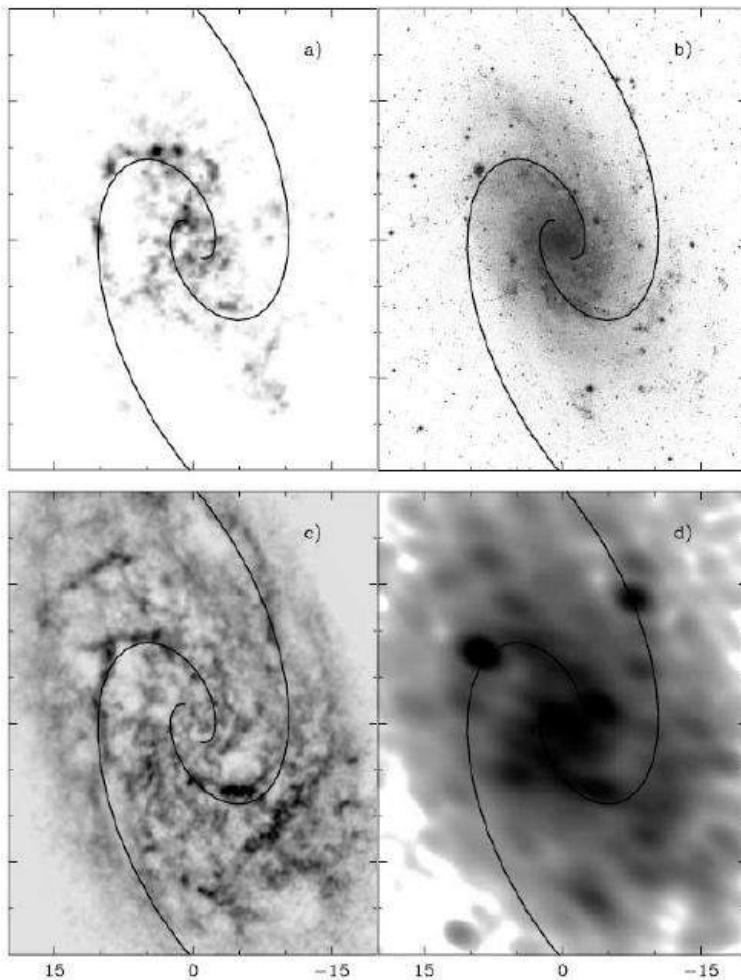
In Abbildung 37 sind 3 Spiralgalaxien und deren CO Verteilung (rechte Seite) gezeigt. Die klumpigen Gebiete im oberen Bild entsprechen genau den Sternentstehungsgebieten. Im untersten Bild ist ein Balken zu erkennen, an dessen Enden heftige Sternentstehung stattfindet.

Allgemein: Molekulares Gas ist radial konzentrierter als die HI Verteilung.



**Abbildung 37:** H-Alpha-Strahlung (links) vs. CO-Verteilung (rechts)

## 2.7 Gasinhalt in Spiralgalaxien



**Abbildung 38:** Gasverteilungen in M33 (Typ: SA(s)cd).

Abbildung 37 zeigt die Gasverteilung in der Spiralgalaxie M33.

*Bild a):*

CO Verteilung - Man erkennt, dass diese nicht so ausgeprägt ist wie die Sternkomponente.

*Bild b):*

optische Aufnahme

*Bild c):*

fernes Infrarot - Die Sternentstehungsgebiete sind (wie bei der CO Verteilung) deutlich

zu erkennen und Strukturen werden hervorgehoben.

*Bild d):*

Infrarot Aufnahme - Besonders heiße Regionen treten hervor.

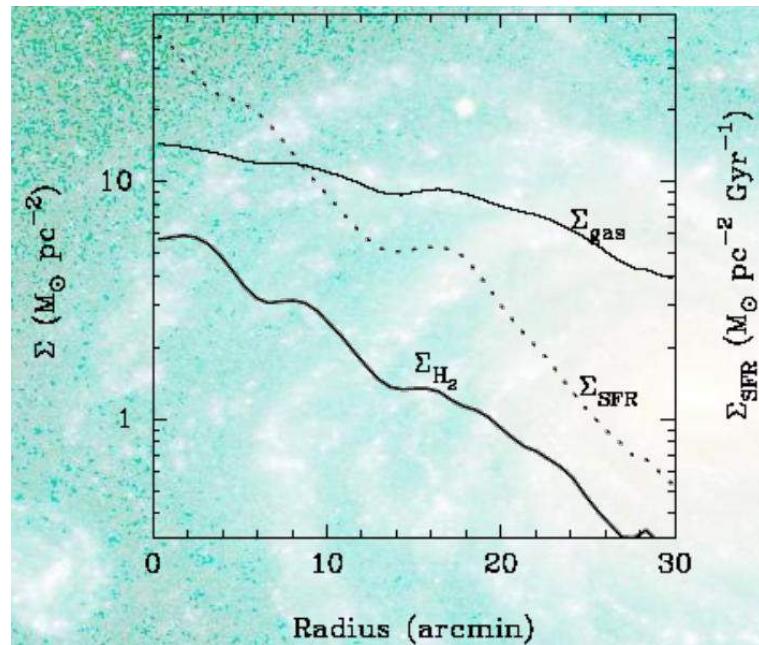


Fig. 3.— Radial profile of molecular gas surface density,  $\Sigma_{H_2}$  (heavy solid line), the total gas surface density,  $\Sigma_{\text{gas}}$  (light solid line), and the star formation rate per unit area,  $\Sigma_{\text{SFR}}$  (dotted line).

**Abbildung 39:** Gas – Flächendichte in Abhängigkeit vom Radius

Abbildung 39 zeigt die Gas-Flächendichte einer Galaxie in Abhängigkeit von ihrem Radius. Das gepunktete Profil entspricht der Sternentstehungsrate, diese korreliert mit dem Profil des  $H_2$ , aber nicht mit dem gesamten Gasprofil, da dort auch heißes Gas mit inbegriffen ist.

Späte Typen können nicht viel molekulares Gas bilden, obwohl viel Gas darin enthalten ist. Dadurch ist auch die Sternentstehungsrate nicht wesentlich höher als bei frühen Typen, sondern ungefähr gleich. Je später der Hubble Typ einer Galaxie, desto mehr Gas und desto weniger molekulares Gas enthält diese. Weiters entwickeln sich späte Typen (Sc, Sd) langsamer als frühe Typen (Sa, Sb).

## 2.8 Staub und Magnetfelder

Natürlich enthalten Spiralgalaxien auch Staub. Seine Verteilung stimmt zu einem großen Teilen mit jener des Gases überein und ist im IR sichtbar. Aufgrund der Extinktion des Staubs kann man auf den Blickwinkel schließen, den man auf eine Galaxie hat (oft ist

es schwierig zu erkennen, ob man sie von oben oder unten sieht).

Durch magnetische Felder lässt sich interstellares Gas in Galaxien finden. Beispielsweise zeigt die Andromeda Galaxie (M31) einen ringförmigen inneren Aufbau. Des weiteren enthüllen die Magnetfeldlinien den Verlauf von Spiralarmen.

## 2.9 Spiralarme

Ein Ausschnitt der Whirlpool Galaxie (das Zentrum befindet sich in der linken unteren Ecke, Abb. 40) zeigt eine klare Armstruktur inklusive HII – Regionen (rote Flecken) und ausgedehnten Staubfilamenten. Die Aufnahme ist eine Überlagerung vom Optischen und H – Alpha.

Spiralarme weisen eine 1- bis 4-fache Dichte gegenüber den restlichen Gebieten der Galaxie auf. Wegen dieser hohen Dichte (effektive Kühlung) kann eine hohe Sternentstehungsrate in den Armen gewährleistet werden. Der Helligkeitsunterschied zwischen den Armen und deren Lücken liegt ungefähr im Bereich von 2 Größenordnungen.

Man unterscheidet zwei Arten von Spiralarmen:

- Grand Design Spirals: (meist) 2 sehr ausgeprägte Arme
- Flocculent Spirals: flockige, kaum unterscheidbare Arme

Wenn Galaxien Ringe aufweisen, so setzen die Spiralarme meist eng anliegend daran an (siehe Abb. ??).



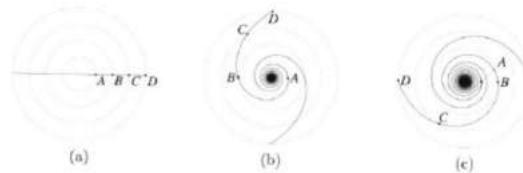
**Abbildung 40:** Whirlpoolgalaxie



**Abbildung 41:** Ringe in Spiralgalaxien

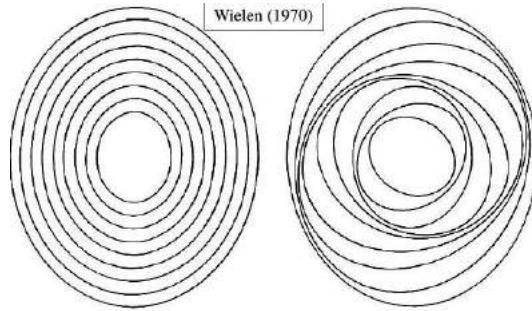
### 2.9.1 Theorien zur Bildung der Spiralarme

Die Frage nach der Bildung der Arme ist noch heute ein großes Problem in der Astronomie. Es gibt viele Theorien, jedoch ist keine davon völlig komplett. Eine erhebliche Herausforderung stellt das sogenannte „**winding problem**“ dar. Hierbei entstehen die Arme durch die Drehbewegung der Galaxie und werden aufgewickelt (siehe Abb. 42). Dieser Vorgang ist jedoch besonders auf längere Zeitskalen gesehen fatal, da die Spiralen immer enger würden. Die Theorie stimmt also nicht mit den tatsächlichen Beobachtungen überein.



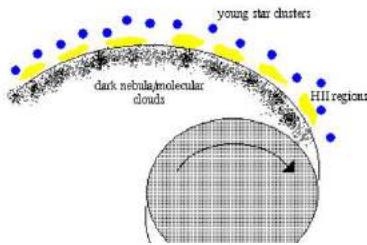
**Abbildung 42:** Winding problem

Eine andere Theorie der Armentstehung beschäftigt sich mit Dichtewellen, die dadurch hervorgerufen werden, dass elliptische Bereiche der Galaxie differentiell zueinander rotieren (Abb. 43). Diese Dichtewellen bewirken eine Kompression und Kühlung des ISM. Sternentstehung (s. Abb. 44) wäre die Folge.



**Abbildung 43:** Dichtewellen bei differentieller Rotation

The spiral pattern collects gas and dust as it sweeps across the Galaxy disk. The gas is compressed into forming stars which develop first as HII regions then young clusters.

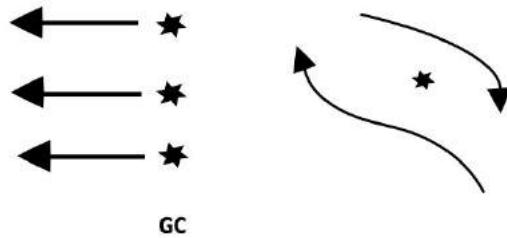


**Abbildung 44:** Sternentstehung durch Kompression und Kühlung des ISM infolge von Dichtewellen

Die sogenannte „Linblad Resonanz“ besagt, dass es Resonanzen der Bahnen individueller Sterne innerhalb der Galaxie mit großräumigen Strukturen (Spiralarme, Balken, nahen Begleitern) geben kann. Innerhalb dieser resonanten Gebiete bleibt die Struktur stabil. Solche Resonanzen wurden jedoch nicht beobachtet und widersprechen damit der Theorie.

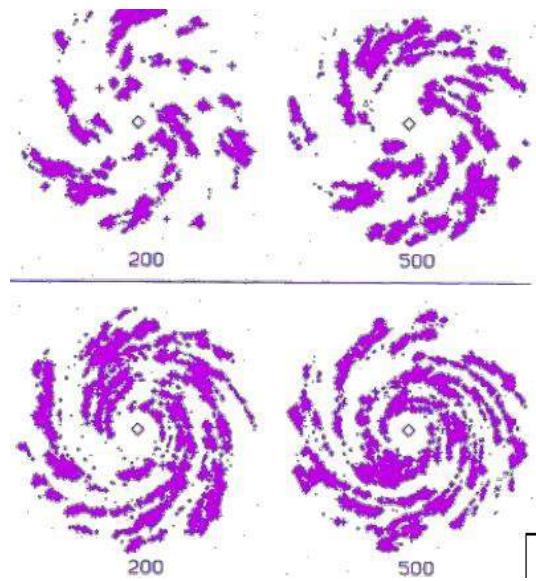
**Die sogenannte „Linblad Resonanz“** besagt, dass es Resonanzen der Bahnen individueller Sterne innerhalb der Galaxie mit großräumigen Strukturen (Spiralarme, Balken, nahen Begleitern) geben kann. Innerhalb dieser resonanten Gebiete bleibt die Struktur stabil. Solche Resonanzen wurden jedoch nicht beobachtet und widersprechen damit den Beobachtungen.

„**Swing amplification**“ ist die zweite Theorie. Dabei werden Sterne durch Störungen von ihrer Bahn abgebracht und verursachen so Verdichtungen, die sich selbst verstärken (s. Abb. 45). Hierfür benötigt man jedoch eine Anfangsstörung (z.B. Vorbeiflug einer anderen Galaxie). Durch diesen Vorgang entstehen immer geradzahlige Moden (von 2, 4 usw.), wie sie häufig in der Natur beobachtet werden (vgl. Gezeitenwechselwirkung zwischen Erde und Mond). Man hat bis heute auch noch keine Spiralgalaxie gefunden, die beispielsweise 3 prägnante Arme aufweist.



**Abbildung 45:** Swing amplification

**Die dritte Theorie** besagt, dass Verdichtungen durch **Superbubbles** (Supernova – getriebene Blasen) entstehen können (Stochastic Self Propagating Star Formation, SSPSF). Diese Theorie ist jedoch unrealistisch, da es keine Korrelation mit entsprechenden Beobachtungen gibt. Sogar bei Simulationen (Gerola und Seiden 1979) müssen einige zusätzliche Bedingungen erfüllt sein, um auch nur ansatzweise Spiralarme erzeugen zu können (s. Abb. 46).



**Abbildung 46:** Verdichtungen durch Superbubbles

**Die vierte Theorie** besagt, dass Spiralarme durch eine **Gezeitenstörung** (Vorbeiflug einer anderen Galaxie) entstehen können. Diese Theorie setzt jedoch das „Aufwickeln“ voraus, wodurch sie unbrauchbar wird.

## 2.10 Rotation von Spiralgalaxien

### 2.10.1 Allgemeines

In diesem Kapitel wird näher auf die Rotation von Spiralen und deren Messbarkeit eingegangen. Hier werden unter anderm Begriffe wie „Spider Diagramm“, „Rotationskurve“ und „Tully Fisher Relation“ behandelt. Spiralgalaxien drehen sich aus dem einfachen Grund der Drehimpulserhaltung. Wenn ein großes Gebiet eine anfangs fast verschwindend geringe Eigendrehung aufweist, so wird es sich nach einer Kontraktion schneller drehen (vgl. Eiskunstläufer).

### 2.10.2 Scheibenrotation

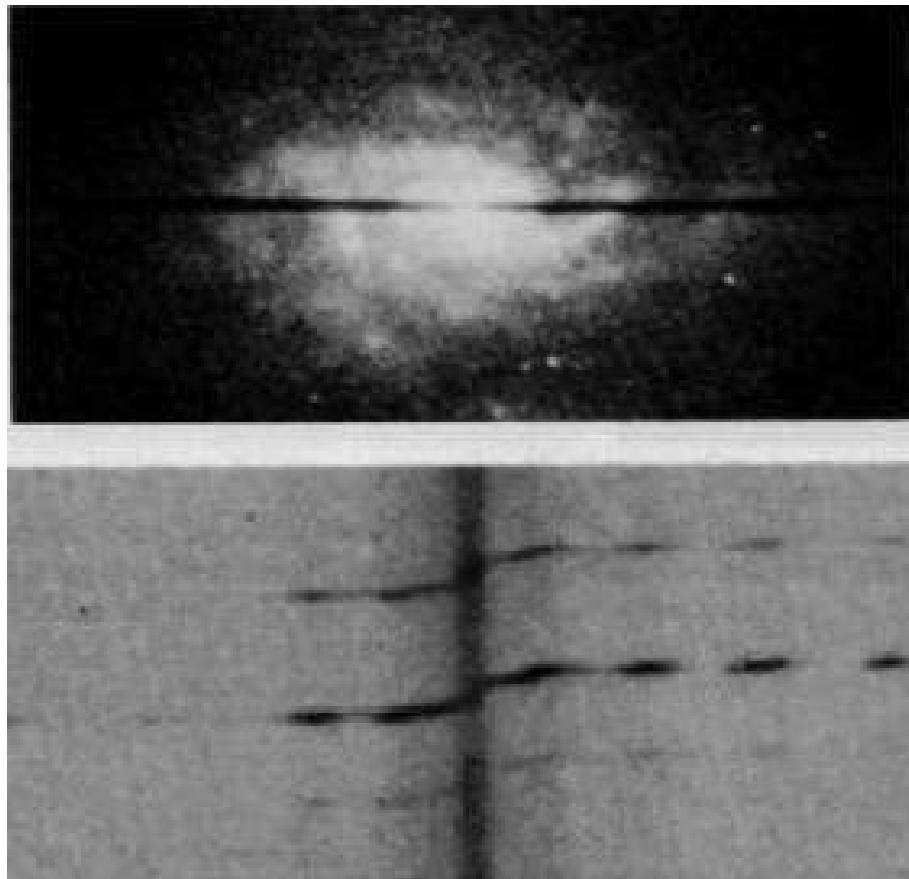


Abbildung 47

Die Rotation von Spiralgalaxien ist nur messbar, wenn die Galaxie nicht face on steht (was bedeutet das die Inklination  $90^\circ$  beträgt, bei edge on hingegen  $0^\circ$ ). Es wird eine schmale Blende verwendet, sodass man nur einen Ausschnitt der Galaxie misst (in Abb. 47 der schwarze Streifen). Durch die Rotverschiebung bzw. Blauverschiebung der

Spektrallinien lassen sich radiale Geschwindigkeitsprofile feststellen. Die Geschwindigkeit in der Mitte entspricht der System-Eigengeschwindigkeit. Die schmalen Linien in der Grafik sind H-Alpha und H-Beta Linien.

Abb. 48 ist zu entnehmen, dass die Eigengeschwindigkeit der Galaxie ungefähr bei 4750 km/s liegt. Wenn man diese Geschwindigkeitsprofile „von der Seite“ integriert, so erhält man ein Helligkeitsprofil (Abb. 49). Aus dem starken Abfall auf beiden Seiten lässt sich die Rotationsgeschwindigkeit feststellen. Um die Rotationsgeschwindigkeit bestimmen zu können, muss die Inklination bekannt sein.

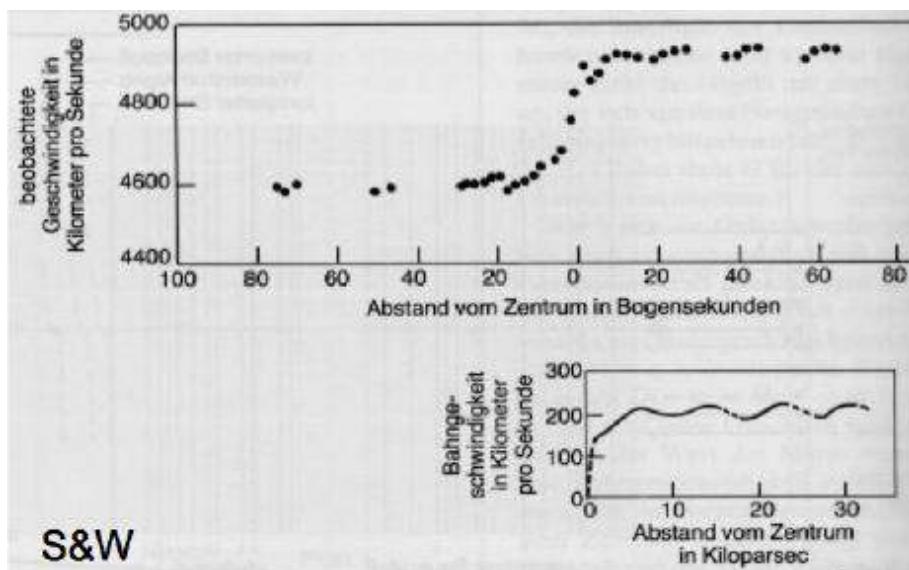
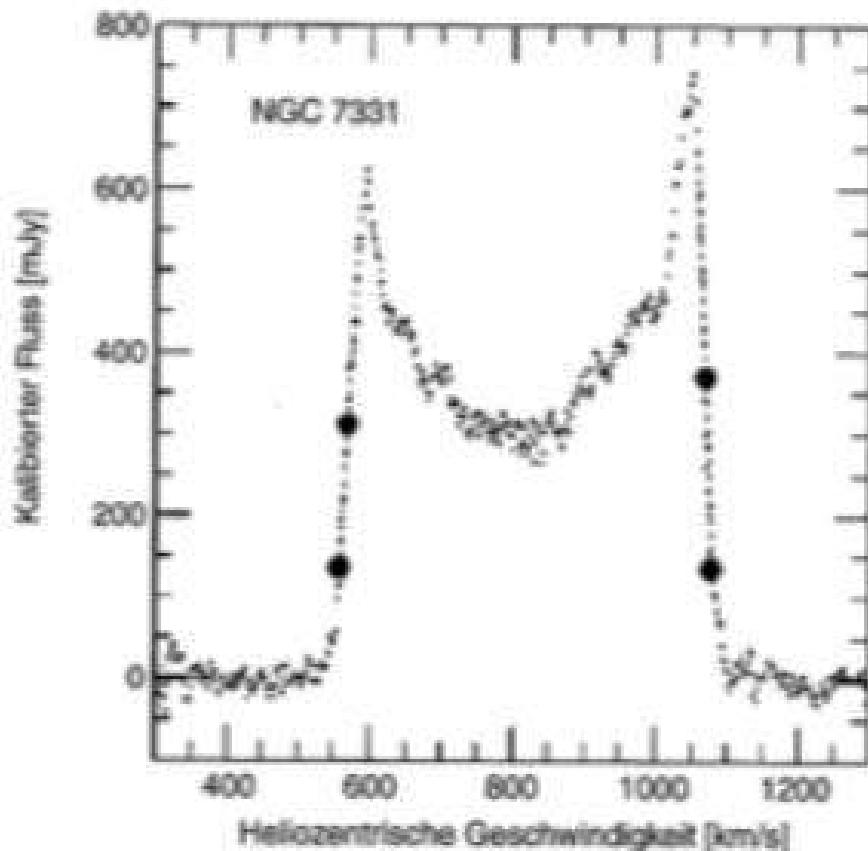


Abbildung 48



**Abb. 3.20.** 21 cm-Profil der Galaxie NGC 7331. Bei jeweils 20% und 50% des Flussmaximums sind Punkte eingezeichnet; diese sind relevant zur Bestimmung der Linienspreite und der daraus resultierenden Rotationsgeschwindigkeit

**Abbildung 49**

#### Allgemeine Informationen über HI und H-Alpha:

Die HI Linie entsteht durch einen Spinflip des Elektrons im neutralen Atom. Die dabei frei werdende Strahlung hat eine charakteristische Wellenlänge von 21cm. Im Gegensatz dazu ist H-Alpha Strahlung der Übergang des Elektrons von n=3 auf n=2. Die dabei frei werdende Strahlung hat eine Wellenlänge von 650nm (Rot).

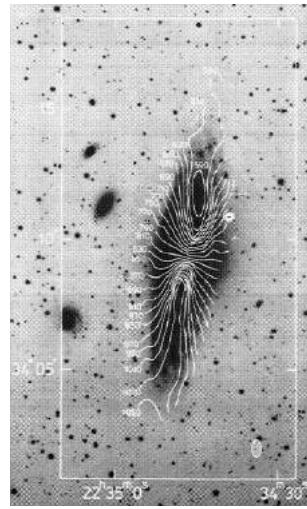
In Abbildung 50 von NGC4569 ist auf den ersten Blick nicht zu erkennen, in welche Richtung sich die Galaxie dreht bzw. ob man sie von oben oder von unten betrachtet. Wenn man jedoch auf die Staubverteilung achtet (Staub absorbiert das dahinter liegende Material), ist dieses Problem zu lösen. In diesem Fall sieht man von unten auf die Scheibe.



**Abbildung 50**

### 2.10.3 Geschwindigkeitsfelder und Spider Diagramme

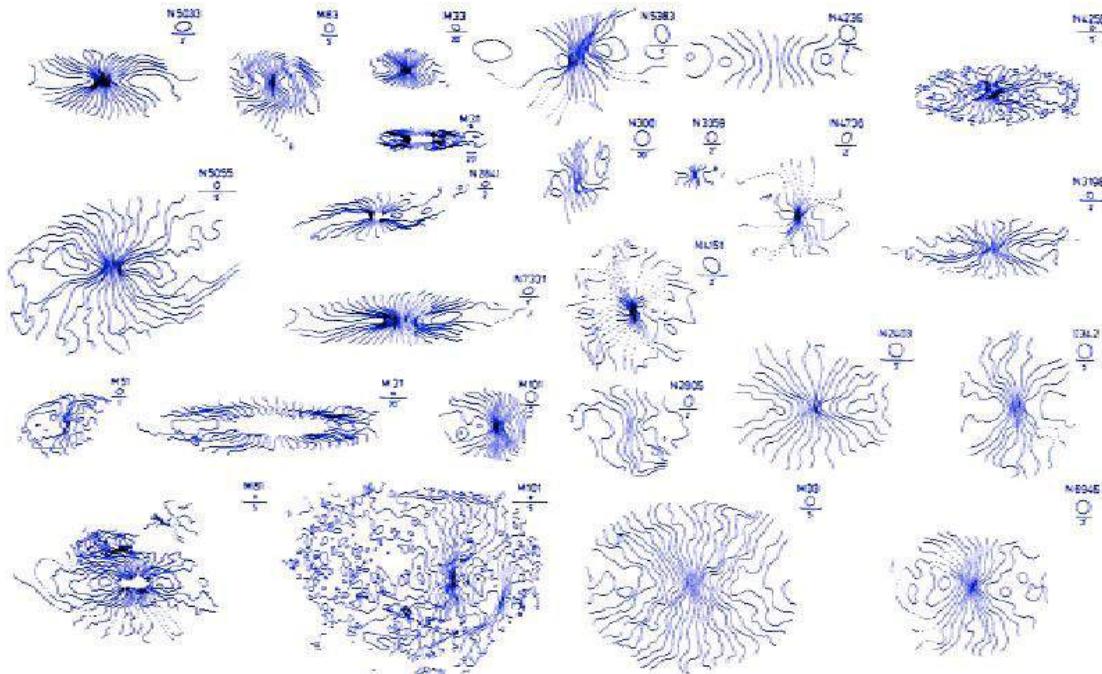
In Abbildung 51 sind die Geschwindigkeitsfelder einer Spiralgalaxie aufgetragen. Die allgemeine Form ähnelt der einer Spinne – daher der Name „Spider Diagramm“. Jede Fläche (getrennt durch die weißen Linien) entspricht einer spezifischen Geschwindigkeit, mit welcher sich dieses Gebiet auf uns zu oder von uns weg bewegt. Es ist zu erkennen, dass sich die äußeren Gebiete schneller bewegen als innere Gebiete.



**Abbildung 51**

Nicht immer zeigen solche Geschwindigkeitsfelder eindeutige Drehbewegungen (Abb. 52). Hier spricht man von Irregulären Galaxien. Diese entstehen meist durch Merger Prozesse

(Verschmelzung von Galaxien). Auch Zwerggalaxien zeigen oft irreguläre Strukturen und keine reguläre Rotation (es gibt jedoch Ausnahmen).

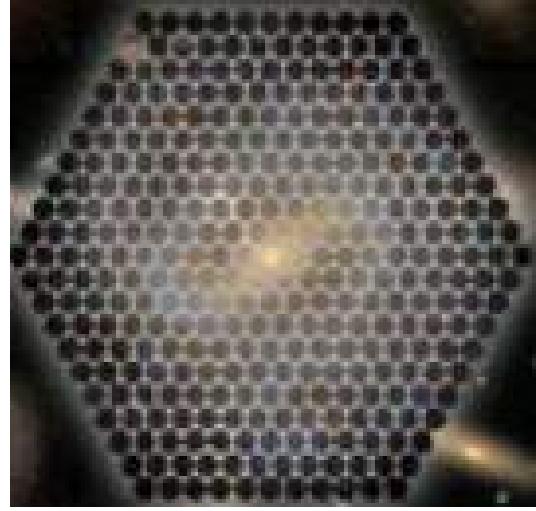


**Abbildung 52**

Wenn eine Galaxie nur langsam rotiert ( $30 - 40 \text{ km/s}$ ), so ist eine Bestimmung der Rotationsgeschwindigkeit aufgrund der diese Bewegung überlagernde thermischen Geschwindigkeit (ca.  $10 - 20 \text{ km/s}$ ) überaus schwierig. Wenn eine unregelmäßige Rotation vorliegt, so schlägt sich dies auch im entsprechenden Spider Diagramm nieder (es ist dann asymmetrisch).

Aus solchen Rotationskurven konnte man bestimmen, wie viel Masse nötig ist, um die jeweiligen Rotationen zu stützen. Es zeigt sich (wie bei MWG), dass ein Halo aus Dunkler Materie nötig ist, welcher für die zusätzlich nötige Kraft nach innen sorgt. Dunkle Materie sammelt sich nicht im Zentrum, da es keine Wechselwirkung der Dunkle-Materie-Teilchen untereinander gibt.

Neueste Surveys wie beispielsweise das CALIFA Survey sind dazu in der Lage, mehrere Spektren aus verschiedenen Teilbereichen einer Galaxie zu entnehmen (Abb. 53). Jeder Teilbereich wird separat spektroskopiert und liefert die Daten für ein Rotationsprofil. Diese Daten werden dann zusammengefügt und liefern ein Gesamtprofil. Durch diese Vorgehensweise wird die Genauigkeit der Messungen enorm erhöht.



**Abbildung 53**

#### 2.10.4 Rotationskurven

Rotationskurven sind ein wichtiges Werkzeug um einen Einblick in die Kinematik von Spiralgalaxien zu bekommen. Die Messung der Rotationsgeschwindigkeit erfolgt durch den Dopplereffekt im optischen oder Millimeterbereich (Radiowellen). Dabei wird die Rotverschiebung von Sternen sowie von HI Gas gemessen.

Umkreist nun ein Stern ein galaktisches Zentrum in großem Abstand, so sollte das Potential dem einer Punktmasse entsprechen, vorausgesetzt, die Gravitation ist die einzige wirkende Kraft, beziehungsweise alle anderen sind vernachlässigbar. Dieses Verhalten erwartet man, bei annähernd großem Radius, für eine Galaxie, wenn lediglich die leuchtende Materie, wie Sterne und Gas, zur Gesamtmasse beitragen. Beobachtungen (Abb.: ??) haben jedoch gezeigt, dass die meisten Rotationskurven nicht nach diesem Gesetz mit wachsendem Radius abfallen, sondern eher flach sind oder leicht ansteigen.

$$v_c^2 = v_{c,b}^2(R) + v_{c,d}^2(R) + v_{c,h}^2(R) \quad (2.4)$$

Diese Rotationskurven lassen darauf schließen, dass sich mehr Masse in Galaxien befindet, als man sehen kann. Einige Experten haben Statistiken zusammengestellt, um Galaxien nach ihren Formen und Rotationskurven zu katalogisieren. Sie haben festgestellt, dass die Helligkeit von Galaxien im Zusammenhang mit der Geschwindigkeitsfunktion stehen könnte. So weisen die meisten hellen Typen eine leicht abfallende Rotationskurve auf, mittlere eine flache und dunklere Galaxien eine ansteigende.

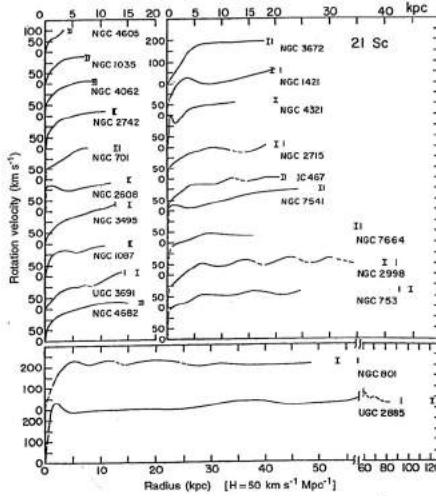


Fig. 3.3. As in Fig. 3.1, but for Sc galaxies

**Abbildung 54:** Rotationskurven einiger Sc Galaxien. Ausschlaggebende Charakteristik dieser Kurven sind die Applatungen bei größer Distanz vom Zentrum.

## 2.10.5 Massenverteilung

Von gemessenen den Rotationskurven lässt sich die Massenverteilung ableiten. Nimmt man, aufgrund des annähernd flachen Verlaufs der Rotationskurven die Rotationsgeschwindigkeit als konstant an, dann gilt:

$$v(r) = \text{const} \quad (2.5)$$

$$\rho(r) \propto r^2 \quad (2.6)$$

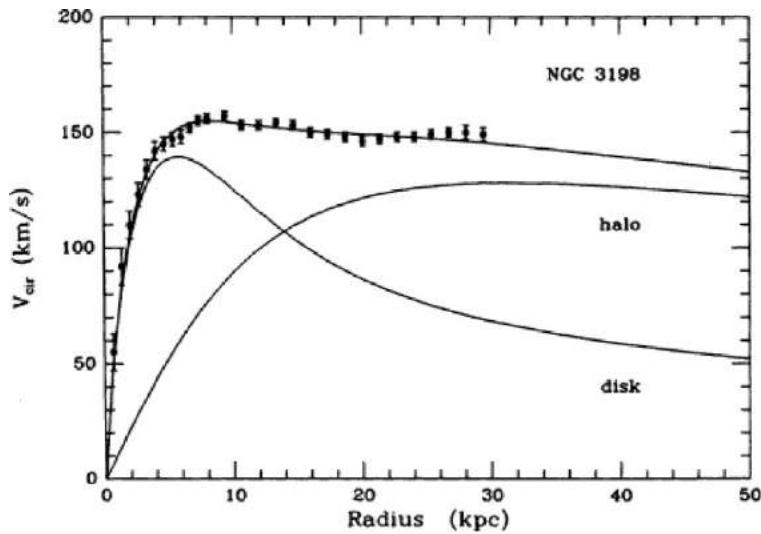
$$\frac{M(r)}{r^2} \propto \frac{v^2(r)}{r} \quad (2.7)$$

$$M(r) \propto r \quad (2.8)$$

Das Masse-Leuchtkraft Verhältnis nimmt bei größeren Radien Werte an, die mit herkömmlicher baryonischer Materie nicht erreicht werden können.

$$\frac{M}{L_B} \geq 30 \frac{M_\odot}{L_{B,\odot}} \quad (\text{für Spiralgalaxien}) \quad \frac{M}{L_B} \simeq 5 \frac{M_\odot}{L_{B,\odot}} \quad (\text{für Sterne und Gas})$$

Daher muss eine weitere Komponente ausschlaggebend sein, die dunkle Materie. (Abb. 55)



**Abbildung 55:** Rotationskurve von NGC 3198. Die Punkte entsprechen den Beobachteten Werten, die obere durchgehende Linie ist die dazu gefittete Funktion. Aus den anderen Linien kann man die Massenverteilung, der herkömmlichen baryonischen Materie (disk) sowie die der dunklen Materie (halo), auslesen.

### 2.10.6 Tully Fisher Relation

Die Tully-Fisher-Beziehung beschreibt einen Zusammenhang der Rotationsgeschwindigkeit von Spiralgalaxien mit ihrer Leuchtkraft, die 1977 von Brent Tully und Richard Fisher veröffentlicht wurde. Man kann aus der Verschiebung ihrer Spektrallinien und der daraus folgenden Rotationsgeschwindigkeit auf ihre Leuchtkraft, und damit bei bekannter Helligkeit auf ihre Entfernung schließen. Die Tully-Fisher-Beziehung lautet:

$$L \propto v_{\text{rot}}^4 \quad (2.9)$$

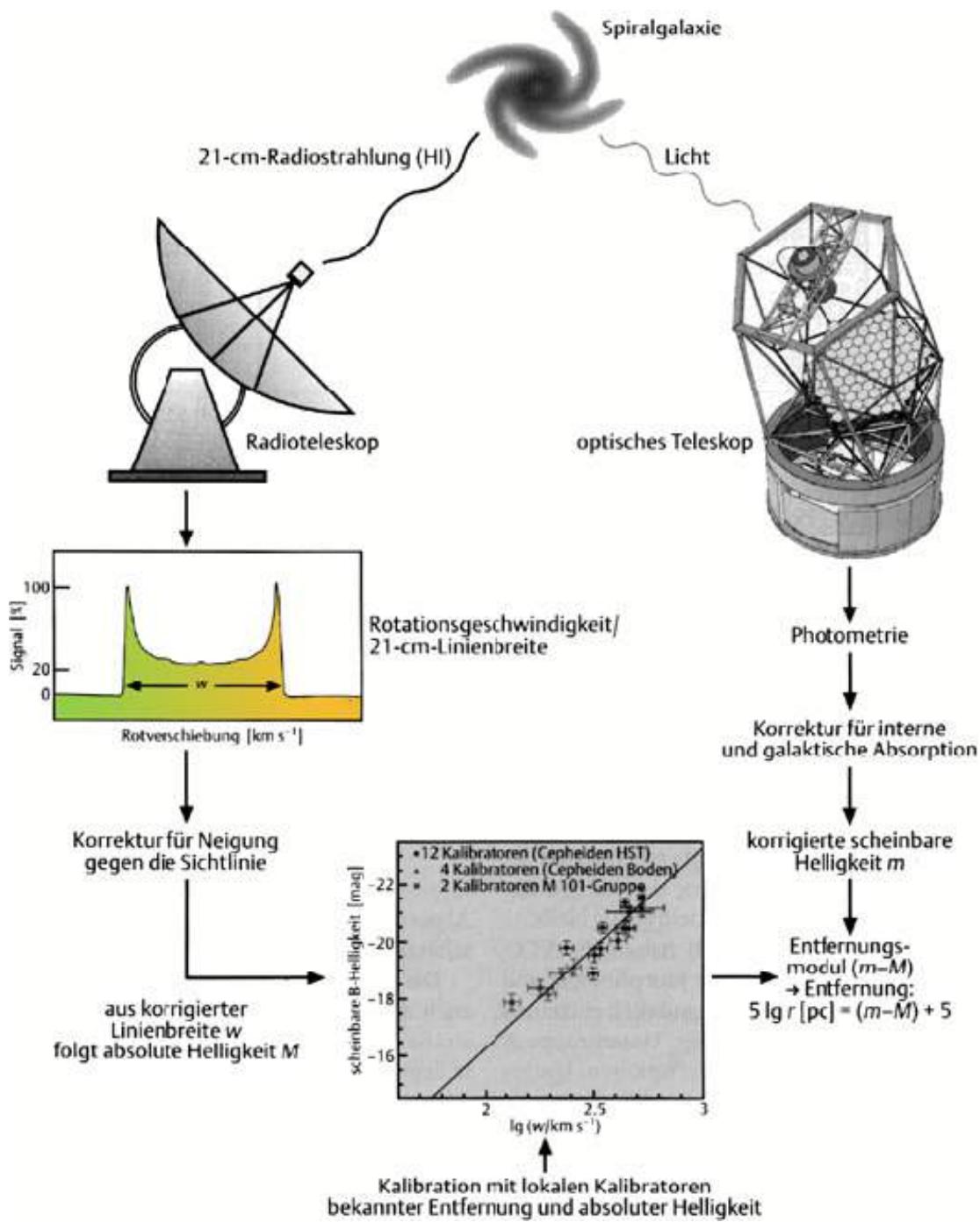
Dieser Zusammenhang besagt, dass die Leuchtkraft einer Spiralgalaxie proportional zur vierten ihrer maximalen Rotationsgeschwindigkeit ist. Die maximale Rotationsgeschwindigkeit lässt sich aus der Verbreiterung der Spektrallinien errechnen. Zur Messung wird insbesondere die 21-cm-Linie im Radiospektrum des Wasserstoffs benutzt. (Abb.: ??)

Diese Berechnung beruht darauf, dass das Licht der Spiralarme, die sich auf uns zu bewegen, eine leichte Blauverschiebung erfährt, während das Licht der Arme, die sich von uns fort bewegen, eine Rotverschiebung aufweist (Dopplereffekt). Je schneller die Umdrehung, desto stärker sind diese Verschiebungen, und die Spektrallinien werden entsprechend breiter. Die Breite ist also ein Maß für die Drehgeschwindigkeit. Da die Gravitation als Zentripetalkraft wirkt steht die Rotationsgeschwindigkeit in direkter Relation zur Masse der Galaxie. Schließlich wird angenommen, dass Galaxien mit ähnlichen Massen eine vergleichbare absolute Leuchtkraft besitzen und diese Leuchtkraft proportional

zur Masse wächst. Aus dem Vergleich der errechneten absoluten mit der scheinbaren, beobachteten, Helligkeit ergibt sich die Entfernung zu der Galaxie durch

$$5 \log(r[pc]) = m - M + 5 \quad (2.10)$$

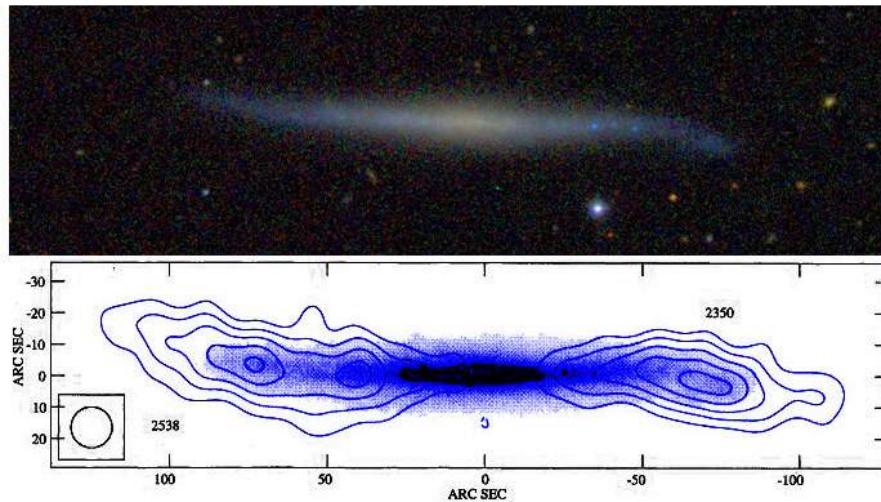
$$r[pc] = 5^{m-M+5} \quad (2.11)$$



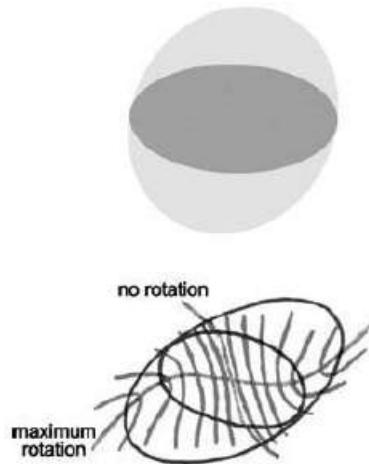
**Abbildung 56:** Schematische Darstellung zur Berechnung von Spiralgalaxien.  
Mit Hilfe 21 cm Linie wird die Absolute Helligkeit  $M$ , durch Photometrie die scheinbare Helligkeit  $m$  bestimmt.

### 2.10.7 Warped Disks

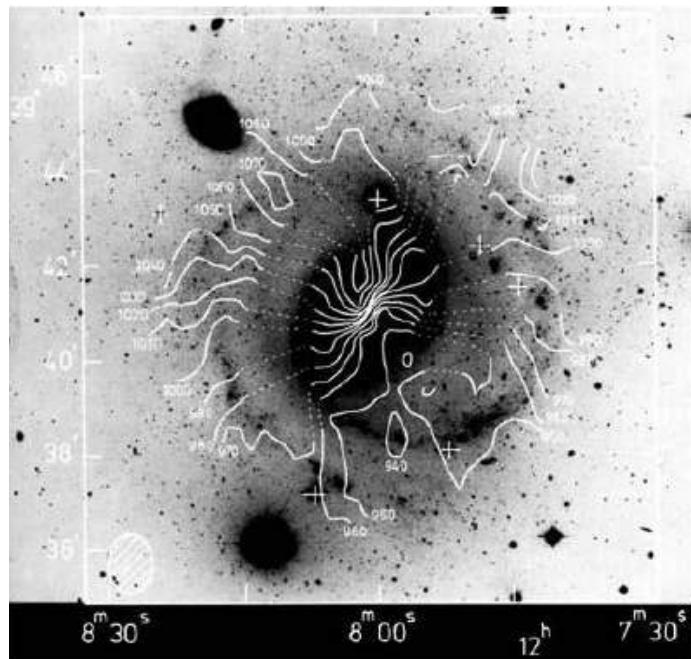
Die äußersten Regionen von Spiralgalaxien zeigen oft asymmetrische Verzerrungen als symmetrische Wölbungen hervor. In einigen "edge-on" Spiralgalaxien ist diese Wölbung direkt als eine Krümmung der äußersten Gasscheibe, teilweise auch der stellaren Scheibe, sichtbar.



**Abbildung 57:** B-Band Bild von UGC 7170 mit Geschwindigkeitskonturen des HI Gases. Diese Konturen markieren die Wölbung der Zerrung. Die Beschriftungen der Konturen sind in  $km\text{s}^{-1}$ .



**Abbildung 58:** Kriterien für die Erkennung von stark verzerrten Galaxien schematisch dargestellt



**Abbildung 59:** Beobachtungen der Galaxie NGC 4151.



**Abbildung 60:** Die Edge-on Spiralgalaxie ESO 510-G13.

### 3 Elliptische Galaxien

Der traditionelle Blick auf eine Elliptische Galaxie ist der einer leuchtenden Kugel ähnlich, ohne aufregende Farben. Mit tieferen Aufnahmen werden jedoch 'Merger'-Prozesse sichtbar, welche die Objekte viel interessanter erscheinen lassen.

Radien von Ellipsen liegen im Allgemeinen zwischen 1 und 10 kpc. Die Flächenhelligkeiten entsprechen etwa 18 bis 21 Magnituden pro Quadratgrad. Die sichtbare Masse in den elliptischen Galaxien reicht von ca.  $10^6$  Sonnenmassen bei den Zwerggalaxien bis hin zu ca.  $10^{12}$  Sonnenmassen bei den Riesengalaxien. Die massereichste Galaxie ist M87 (Vir A, NGC4486) in ca. 15 Mpc Entfernung. Elliptische Galaxien bestehen in der Hauptachse aus alten Sternen (helle Rote Riesen). Ellipsen weisen normale bis überhöhte Metallhäufigkeiten auf, mit abnehmender Leuchtkraft sinkt jedoch auch der Metallgehalt.

#### 3.1 Morphologische Klassifikation

Nach Hubble: Die elliptischen Galaxien E0 bis E7 haben rotationssymmetrische Gestalt ohne ausgeprägte Strukturen. Die Unterteilung erfolgt nach der scheinbaren Elliptizität von E0 (kreisförmig) bis E7 mit der stärksten Abplattung. Die wahre Abplattung ist im Allgemeinen größer als die scheinbare.

Elliptizität:

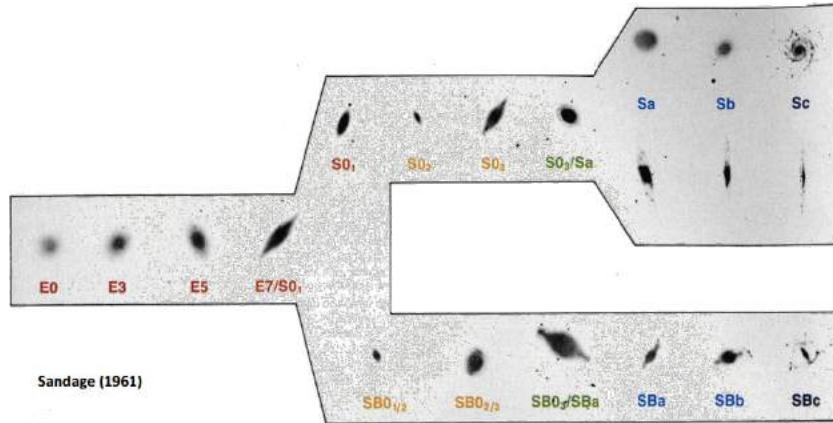
$$\epsilon = \frac{a - b}{a} \quad (3.1)$$

Wobei a die Hauptachse und b die Nebenachse bezeichnet. Von den elliptischen Galaxien führt ein stetiger Übergang über die linsenförmigen Galaxien S0, bei denen Andeutungen einer schmalen Scheibe und kreisförmige Absorptionsstrukturen zu finden sind, bis zu den Spiralgalaxien S. S0's besitzen außerdem einen dominanten Bulge.

#### Weitere Unterteilung (nach Sandage):

- **Normale Ellipsen:** Diese Klasse besteht aus Riesen-Ellipsen (gE's), aus solchen mittlerer Leuchtkraft (E's), und aus kompakten Ellipsen (cE's). Magnitude von -23 bis -15.
- **Zwergellipsen (dE's):** deutliche kleinere Flächenhelligkeiten und niedrigere Metallizitäten, metallarme Halopopulation, alte Sterne
- **cD Galaxien:** extrem Leuchtkräftig (Magnitude bis -25) und groß ( $R < 1\text{Mpc}$ ), nur nahe Zentren dichter Galaxienhaufen, Flächenhelligkeit nahe dem Zentrum ist sehr hoch, besitzen eine ausgedehnte diffuse Hülle und ein großes M/L-Verhältnis
- **Blaue kompakte Zwerggalaxie (BCD's):** deutlich blaue Farbe (B-V zwischen 0.0 und 0.3), enthalten relativ viel Gas, absolute Helligkeiten schwächer als -17 mag, Massen von höchstens  $10^9$  Sonnenmassen,

- **Zwergsphäroiden (dSph's):** sehr geringe Leuchtkraft und Flächenhelligkeit, Magnituden bis ca. -8, deshalb können sie bislang nur in der Lokalen Gruppe beobachtet werden, alte Sterne



**Abbildung 61:** Nach der Aufspaltung der Morphologie beschreibt der obere Ast die Veränderung bei Zunahme des Gasanteils, während der untere Ast weniger dominante bis ausgeprägte Balken zeigt.

### 3.2 Helligkeitsprofil

Das Helligkeitsprofil von normalen Ellipsen mittlerer Leuchtkraft (E's) und hoher Leuchtkraft (cD's) folgt über weite Bereiche dem de Vaucouleurs-Profil:

$$I(R) = I_e e^{-7,699 \left[ \left( \frac{R}{R_e} \right)^{1/4} - 1 \right]} \quad (3.2)$$

mit dem Effektivradius:  $\frac{1}{2} L_{tot} = \pi r_e^2 \cdot I_e$ . Wie schon bei den Spiralgalaxien, beschreibt  $r_e$  den Effektivradius, in dem die Leuchtkraft auf die Hälfte der Gesamtleuchtkraft abgefallen ist.

In Gebieten nahe des Zentrums ist dieses Helligkeitsgesetz jedoch nicht anzuwenden, da es gegen unendlich strebt, während die tatsächlich beobachtete Helligkeit abflacht. Hier lässt sich das King-Profil anwenden.

Das de Vaucouleurs-Profil passt sehr gut für normale Ellipsen, für Ellipsen mit besonders großer (oder kleiner) Leuchtkraft fällt das Profil außen hin langsamer (oder schneller) ab. Das Profil von cD's ist wesentlich ausgedehnter als ein de Vaucouleurs-Profil, es scheint, als seien sie eingebettet in einem Halo. Die Zwergellipsen und Zwergsphäroiden befinden sich auf einer anderen Sequenz. Bei ihnen steigt die Flächenhelligkeit mit steigender Leuchtkraft an, während sie für normale Ellipsen abfällt.

### 3.3 Zusammensetzung elliptischer Galaxien

Außer den blauen kompakten Zwergen sind Ellipsen rot im Optischen, das deutet auf eine alte Sternpopulation hin. Es wurde mittlerweile auch schon Staub und Gas in Ellipsen gefunden, allerdings in geringeren Anteilen als in Spiralgalaxien. In einigen Ellipsen wurde heißes Gas (ca.  $10^7\text{K}$ ) aufgrund seiner Röntgenemission entdeckt. Außerdem fand man H $\alpha$ -Emissionslinien von warmem Gas ( $10^4\text{K}$ ) und kaltes Gas (100K) in HI und CO-Molekülllinien. Viele normale Ellipsen enthalten sichtbaren Staub, der sich teilweise als Staubscheibe zeigt. Die Metallizität steigt nach innen an.

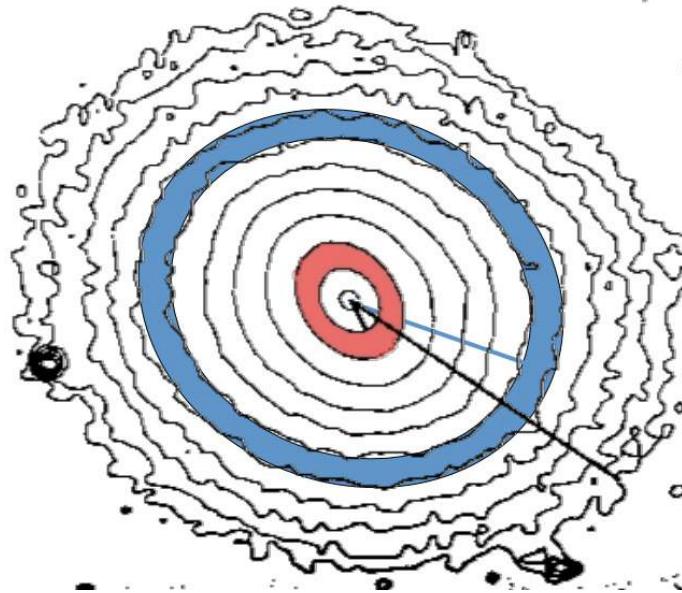
Diese Zusammensetzung, die deutlich anders ist, als die der Spiralgalaxien, muss in einem Modell der Entstehung und Entwicklung erklärt werden.

### 3.4 Strukturen

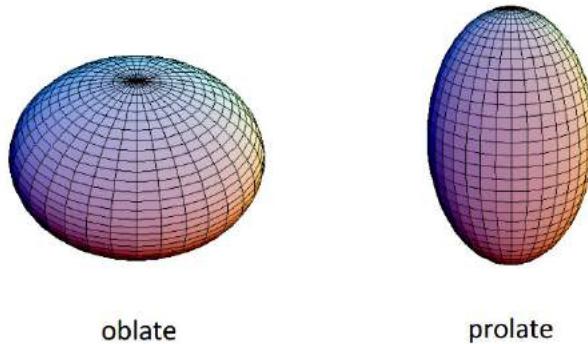
Für viele normale Ellipsen gilt, dass die Isophoten (Kurven gleicher Flächenhelligkeit) tatsächlich durch Ellipsen approximiert werden können. Die Isophoten können innerhalb einer Galaxie verschiedene Form und Ausrichtung ihrer großen Halbachsen aufweisen. Viele Ellipsen weisen einen Isophotentwist auf: Die Orientierung der großen Halbachse ändert sich mit dem Radius, wodurch die verschiedenen Ellipsen in der Struktur gegeneinander verdreht werden.

Oft sind die Galaxien nicht einmal axialsymmetrisch. Es wird vermutet, dass möglicherweise Ellipsen keine Sphäroide sind, sondern triaxiale Systeme darstellen. So kommt es zur Unterteilung in oblate (flachgedrückte) und prolate (zigarrenförmige) Ellipsen.

Die Lichtverteilung von Ellipsen scheint zunächst einfach zu sein, bei näherer Betrachtung erscheint ihre Kinematik jedoch sehr komplex (Staub- und Sternscheiben).



**Abbildung 62:** Isophoten einer elliptischen Galaxie



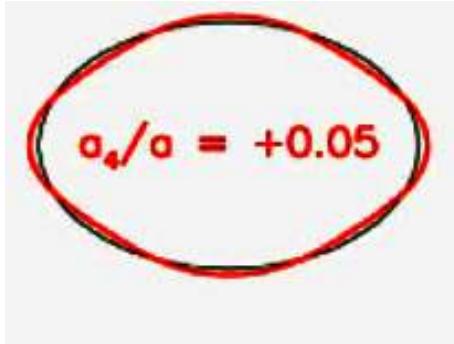
**Abbildung 63:** Formen elliptischer Galaxien

**Boxiness und Diskiness** Der Boxiness-Parameter beschreibt die Abweichung der Isophoten von einer Ellipse. Der Wert  $a_4$  beschreibt die Abweichung von einer Ellipse.

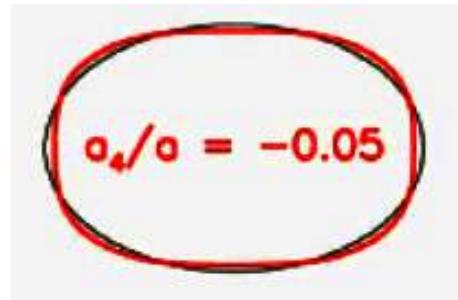
Boxy:  $\frac{a_4}{a} = 0.0$  bzw.  $-0.05$

Disky:  $\frac{a_4}{a} = 0.0$  bzw.  $-0.05$

Meist findet man jedoch  $\frac{a_4}{a}$  betragsmäßig bei ungefähr 0,01, es gibt meist also kaum eine Abweichung von der elliptischen Form.



**Abbildung 64:** Disky



**Abbildung 65:** Boxy

**Korrelationen von  $a_4$  mit Eigenschaften der Ellipsen** Der Parameter  $a_4$  korreliert mit anderen Eigenschaften:

- **Disky Ellipsen ( $a_4 < 0$ ):** zum Teil rotationsabgeplattet, kleineres M/L-Verhältnis, schwache Radiostrahler, 70% aller Ellipsen sind Diskies
- **Boxies:** Abplattung hingegen entsteht durch die anisotrope Verteilung der Sternorbits, größeres M/L Verhältnis, breite Verteilung in der Radio-Leuchtkraft; besitzen oft Kerne, die sich entgegen der allgemeinen Rotationsrichtung drehen (counter rotating cores)

**Zentrale Region** Auch die Zentralprofile der elliptischen Galaxien lassen sich in zwei Familien einteilen. Zum einen gibt es so genannte Cuspy Cores, bei denen das Dichteprofil zum Zentrum hin abnimmt, und zum anderen die Powerlaw Cores, bei denen das Dichteprofil nach Innen hin konstant verläuft. Somit erscheinen Powerlaws im Zentrum wesentlich heller als Cuspies.

### 3.5 Dynamik von elliptischen Galaxien

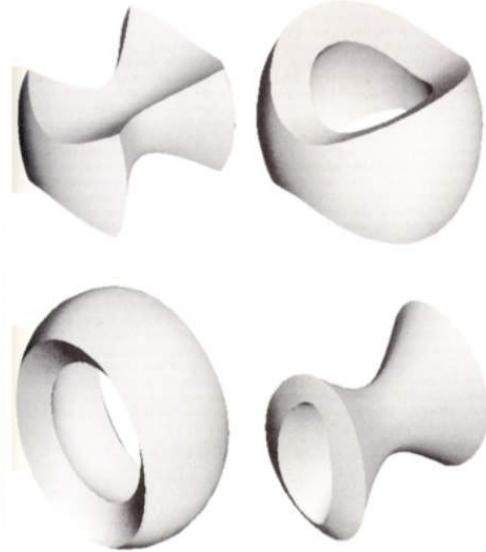
Warum sind Ellipsen abgeplattet? Eine einfache Erklärung wäre: Rotationsabplattung. Trifft das zu, so müsste die Rotationsgeschwindigkeit durch die Dopplerverschiebung der Absorptionslinien messbar sein und in der Größenordnung der Geschwindigkeitsdispersion der Sterne liegen. Doch man findet, dass die Rotationsgeschwindigkeit deutlich geringer ist, als die Geschwindigkeitsdispersion der Sterne. Leuchtkräftige Ellipsen sind daher nicht rotationsabgeplattet! Die Form der Ellipsen wird durch ihren inneren Druck bestimmt.

#### 3.5.1 Stellare Orbits

Formgebend für Ellipsen sind die Orbits der darin befindlichen Sterne. Im Allgemeinen sind die Bahnen nicht geschlossen und die Sterne 'taumeln' durch die Galaxie. Jedoch, auch nach vielen orbitalen Durchläufen, wird der Stern nicht jeden beliebigen Ort in der

Galaxie durchlaufen haben. Abhängig von der Form des Volumens, das alle Positionen des Sterns entlang seiner Umlaufbahn enthält, definiert man drei Haupttypen von Bahnen in einer dreiachsigen Galaxie: (s. Abb. ??

- Box-Orbits
- Kurz Achsige Schleifen (short axis tubes)
- Lang Achsige Schleifen (long axis tubes)



**Abbildung 66:** Haupttypen von Sternenbahnen in elliptischen Galaxien

### 3.5.2 Messung der Kinematik

Im Gegensatz zu rotierenden Spiralgalaxien mit Emissionslinien, muss die interne Kinematik (Geschwindigkeitsdispersion) von elliptischen Galaxien an einer Verbreiterung der Absorptionslinien gemessen werden.

In Elliptischen Galaxien, die nicht rotationsgestützt sind, überschreitet die Stern-Geschwindigkeits-Dispersion  $\sigma$  die Rotationsgeschwindigkeit  $v$ .

Ob die Struktur einer Galaxie (oder ein Teil davon) durch Rotation entstanden sind zeigt der Anisotropie-Parameter.

$$\left(\frac{v}{\sigma}\right)^* = \frac{v/\sigma}{\sqrt{\frac{1-b/a}{b/a}}} = \frac{(v/\sigma)_{observed}}{(v/\sigma)_{rot.flattened}} \quad (3.3)$$

Spiralgalaxien, Bulges, diskys und massearme E's folgen dieser Beziehung, während boxy und massereiche E's stärkere Anisotropien zeigen.

Daraus kann man schließen, dass sowohl massearme Ellipsen, als auch Bulges durch ihre Rotation geformt werden, massereiche Ellipsen nicht.

Damit lässt sich auch eine Ähnlichkeit zwischen S0-Galaxien und diskys E's zeigen. Anisotropie korreliert mit  $a_4/a$  besser als die Leuchtkraft!

### 3.5.3 Minor Axis Rotation

Etwa 10% aller elliptischen Galaxien rotieren um die kleinere (minor) Halbachse und weisen damit eine prolate Kinematik auf.

### 3.5.4 Entgegengesetzt rotierende und entkoppelte Kerne

In manchen Galaxien kommt es auch vor, dass die Rotationsrichtung des Kerns nicht der der äußeren Bereiche entspricht oder sogar entgegengesetzt läuft. Diese Zustände nennt man entkoppelte oder entgegengesetzt rotierende Kerne. Die Geschwindigkeitsdispersion ist dabei unverändert. Solche Kerne zeigen, dass Ellipsengalaxien nicht durch den Kollaps einer rotierenden Gassphäre entstehen können, sondern sich durch Merging-Prozesse bilden.

Hohe Rotationsgeschwindigkeiten und hohe Geschwindigkeitsdispersion in den Kernregionen einiger naher E- und S0-Galaxien dienen als Indikatoren für massive Schwarze Löcher ( $M \approx 10^6 \dots 10^8 M_\odot$ ) in deren Zentrum.

## 3.6 Skalierungsrelationen von elliptischen Galaxien

**Faber-Jackson-Relation** Die stellare Geschwindigkeitsdispersion  $\sigma$  von E-Galaxien hängt mit der Leuchtkraft im Verhältnis:

$$L \approx \sigma^4 \quad (3.4)$$

zusammen.

Die Leuchtkraft ist also proportional zur Geschwindigkeitsdispersion hoch vier. Wie die Tully-Fisher-Relation für Spiralgalaxien ist die Faber-Jackson Relation anwendbar als Entfernungsindikator.

**Fundamental Plane** Das Produkt aus dem Virial-Gleichgewicht und der mittleren Oberflächenhelligkeit ergibt eine Gleichung

$$r_e = \left( \frac{c}{2\pi} \right) \left( \frac{M}{L} \right)^{-1} \sigma_0^2 \Sigma_e^{-1} \quad (3.5)$$

mit der folgende maßgebliche Parameter für Ellippen in Zusammenhang gebracht werden können:

- $r_e$  ... Effektivradius (Radius, in dem die eingeschlossene Helligkeit auf die Hälfte der Gesamthelligkeit gefallen ist)
- $I_e$  (oder  $\Sigma_e$ ) ... mittlere Oberflächenhelligkeit innerhalb des Effektivradius
- $\sigma_0$  ... zentrale Geschwindigkeitsdispersion
- $L$  ... Leuchtkraft

- M ... Masse
- c ... Parameter, der alle unbekannten Details zur Struktur der Galaxie umfasst

Weder M, L noch c variieren innerhalb einer Galaxie stark, daher sind die Ausdrücke in den Klammern ungefähr konstant. Somit erhalten wir aus der Ellipse eine Ebene, die nur von den drei globalen Parametern ( $r_e$ ,  $\Sigma_e$ ,  $\sigma_0^2$ ) abhängig ist.

Die beobachtete Fundamental-Plane-Relation

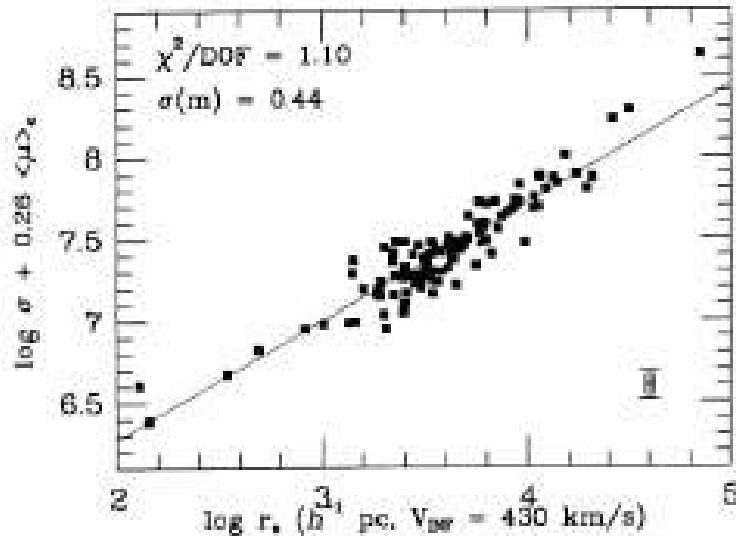
$$r_e \propto \sigma_0^{1,4} \Sigma_e^{-0,85} \quad (3.6)$$

entspricht den Erwartungen, falls gilt:

$$\left(\frac{2\pi}{c}\right) \left(\frac{M}{L}\right) \propto M^{0,2} \propto L^{0,25} \quad (3.7)$$

In einem bestimmten Winkel geplottet, kann nun aus zwei der gegebenen globalen Parametern der dritte ermittelt werden.

Trägt man die drei Parameter  $r_e$ ,  $\sigma_0$  und  $I_e$  in einem sogenannten ‘‘Drei-Parameter-Raumäuf, so findet man, dass sich die Messpunkte mehr oder weniger in einer Ebene, der sogenannten **Fundamental Plane** befinden, siehe Abb. ??.



**Abbildung 67:** Fundamental Plane

**$D_n - \sigma$  - Relation** Die  $D_n - \sigma$  - Relation verbindet den Durchmesser einer elliptischen Galaxie - mit durchschnittlicher Oberflächenhelligkeit  $I_n$  (welche 20.75mag/arcsec<sup>2</sup> im B-Band ist) - mit der Geschwindigkeitsdispersion.

$$D_n \approx \sigma^{1,4} I_e^{0,05}$$

$$D_n/Kpc = 2,05 \cdot (\sigma/100km s^{-1})^{1,33}$$

**Farben-Helligkeits-Diagramme für Ellipsen** Frühe Galaxientypen haben eine homogene Farbverteilung (Red-Sequence). Galaxien mit ähnlichem Alter und einer ähnlichen Metallizität weisen auch eine ähnliche Helligkeit und Farbverteilung auf.

## 3.7 Sternpopulation

### 3.7.1 Synthese

Unter der Annahme bestimmter, temporärer Sternbildungsgesetze wird versucht, Galaxienspektren zu reproduzieren, indem man verschiedene Sternmengen und -typen in ein Modell einbringt. Dies ist dadurch möglich, dass das Spektrum der Galaxien der Summe der einzelnen Sternspektren entspricht. Durch solche Modelle lassen sich auch Vorhersagen über die zeitliche Entwicklung der Sterne und somit der gesamten Galaxie treffen. Wichtige Anhaltspunkte für die Modelle sind IMF, obere und untere Massengrenzen und Metallizität.

### 3.7.2 Alter, Metallizität und Degeneration

**Worthey's "3/2-Regel":** Wenn das Alter um das Dreifache steigt, nimmt gleichzeitig die Metallizität um die Hälfte ab.

Sowohl ein höheres Alter, als auch eine höhere Metallizität lassen die integrierten Farben rötlicher werden und verursachen stärkere Metall-Absorptionslinien (d.h. Spektrum wird von K- und M-Giganten dominiert.). Absorptionslinien helfen bei der Bestimmung von Alter (Balmerlinien), Metallizität (Fe-Linien) und chemischer Zusammensetzung (Mg/Fe) der Galaxien.

### 3.7.3 Mg- $\sigma$ -Relation

Die Geschwindigkeitsdispersion ist ein Indikator für die Potenzial-Tiefe  $\sigma^2 \approx GM/r_e$ , während die Mg (Magnesium)-Absorption ein Indikator für die durchschnittliche Metallizität der Sterne ist.

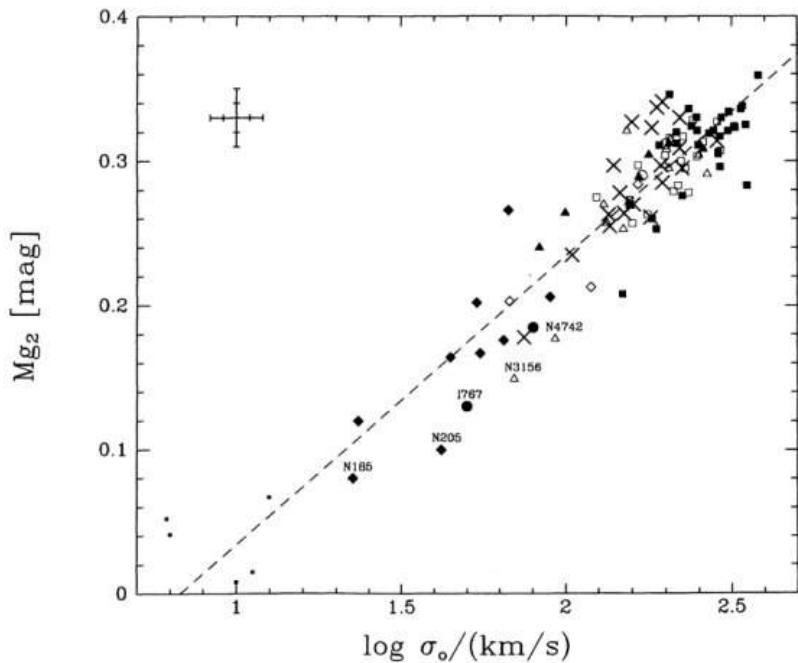
Durch ein niedrigeres Potenzial kann ein größerer Anteil des Gases zu Sternen verarbeitet werden, bevor es durch SNe weggeblasen wird. Je höher das Verhältnis von Sternmasse zur Gasmasse ist, desto höher ist auch der Metallgehalt des Gases und letztendlich der Sterne.

Eine mögliche Entartung der Alter-Metallizität-Relation kann durch die Beobachtung einer altersbedingten und einer metallizitätsbedingten Absorptionslinie (z.B. H und Mg/Fe) behoben werden.

Frühere Modelle bestanden nur aus den beiden Parametern Alter und Metallizität. Für neuere Modelle von Sternpopulationen in elliptischen Galaxien werden drei Parameter

verwendet: Alter, [Fe/H] und  $[\alpha/\text{Fe}]$ . Diese Modelle liefern wesentlich genauere Beschreibungen, insbesondere für alte Sternpopulationen.

Elliptische Galaxien (so wie Bulges in Spiralen) zeigen ein rotes, von roten Riesen dominiertes Spektrum. Sie besitzen keine jungen Sternpopulationen und sind über 5 Gyrs alt. Die Unterschiede zwischen den einzelnen Ellipsen sind nicht groß und zumeist von Metallizitäts- Unterschieden geprägt, die auf verschiedene Galaxien-Alter hinweisen. Besonders Mg ist (verglichen mit Fe) in Übermaßen in elliptischen Galaxien enthalten.



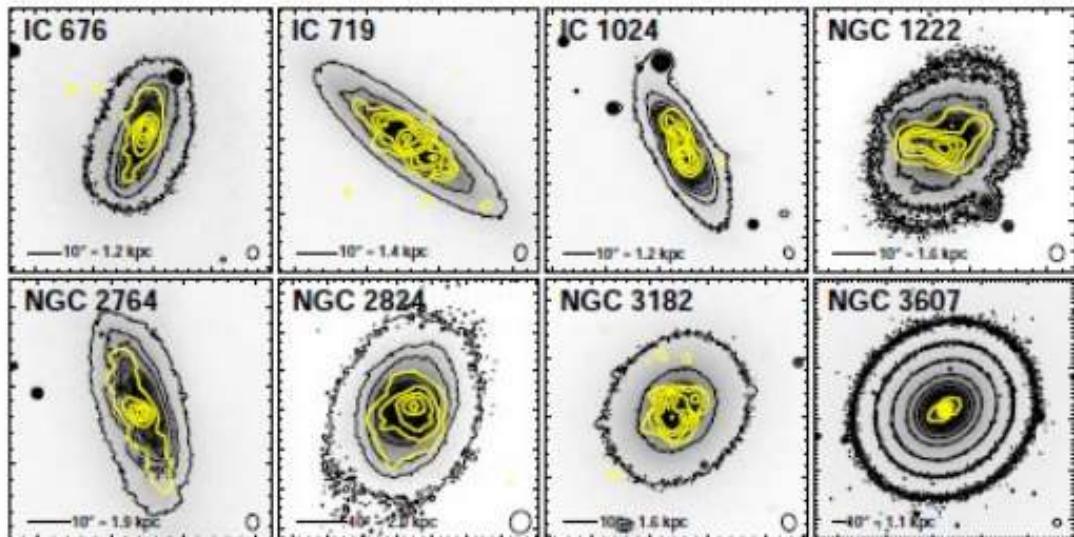
**Abbildung 68:** Mg- $\sigma$ -Relation

### 3.8 Gas in elliptischen Galaxien

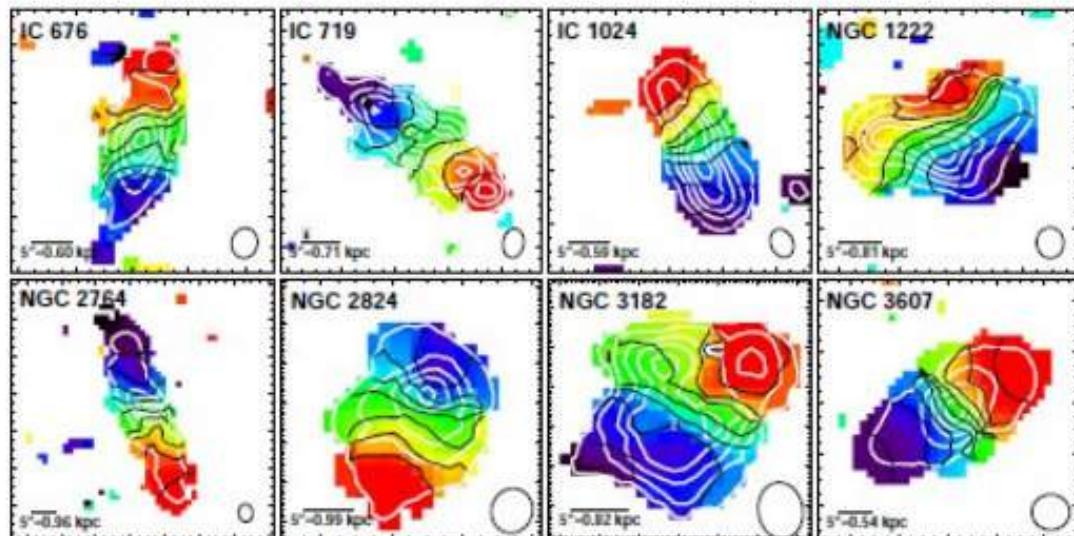
In vielen elliptischen Galaxien sind Staubstreifen, Scheiben und Ringe sichtbar. Ihre Struktur ist flockig und verdickt. Staubstreifen (dust lanes) weisen oft Anzeichen starker Störungen (perturbations) wie "warpsäuf und reichen weit über die optisch sichtbare Galaxie hinaus.

Staub existiert auch in Wolken, Streifen oder (in ca. 80% der E's) in Scheiben, mit einer Helligkeit von  $M_D \approx 10^4 \text{--} 10^7 M_\odot$  innerhalb von 1 kpc.

## Gas distribution



## Velocity fields

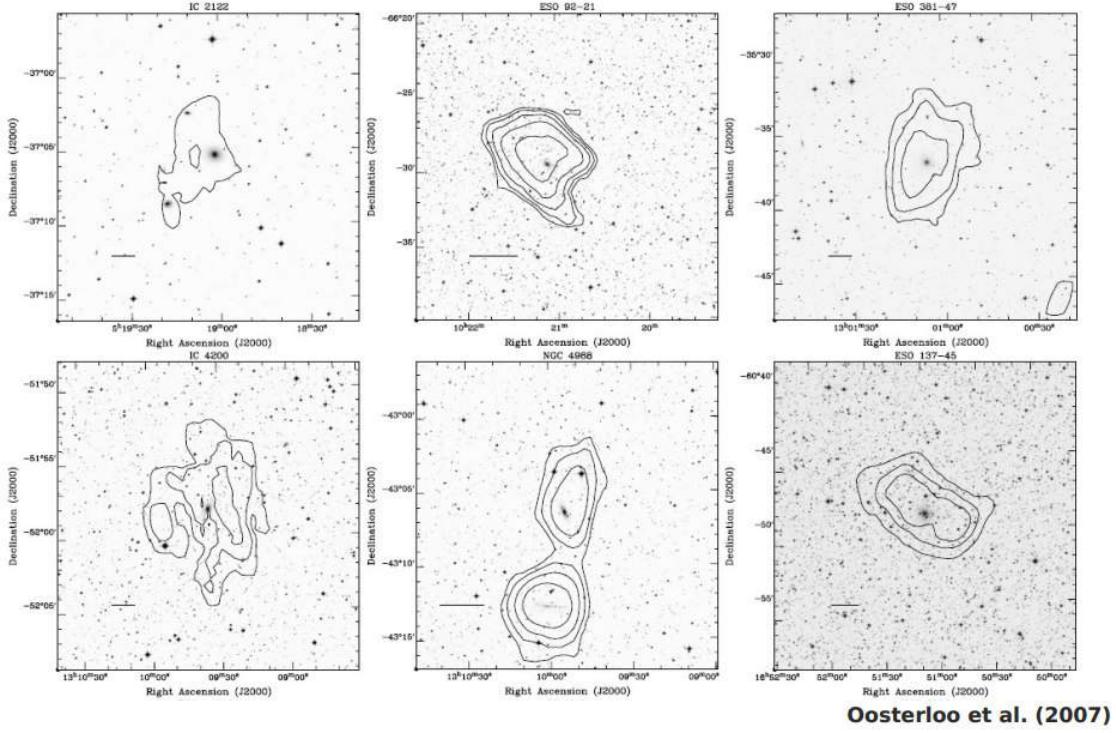


• Alatalo et al. 2012

Abbildung 69: Gas in elliptischen Galaxien

**Molekulares Gas** CO-Emissionslinien werden nur in einer kleinen Anzahl von Elliptiken detektiert. Das molekulare Gas rotiert oft sehr schnell und in großen Scheiben (1-10 kpc) mit einer Masse von circa  $10^7 \text{--} 10^9$  Sonnenmassen. Dieses hohe Drehmoment könnte darauf hinweisen, dass das Gas von außerhalb kommt.

**HI-Gas** Pro Galaxie lassen sich etwa  $10^8 \cdots 10^{10} M_\odot$  finden (was etwa dem Gehalt der Milchstraße entspricht), von dem allerdings nur 1% aus früheren Populationen stammt.



**Abbildung 70:** HI-Gas in elliptischen Galaxien

**Ionisiertes Gas** In vielen elliptischen Galaxien findet man vor allem ionisierten Wasserstoff ( $M_{HII} \approx 10^3 \cdots 10^5 M_\odot$ ), der zum Zentrum hin konzentriert ist. Dieses Gas hat eine andere Kinematik, als die stellare Komponente.

An den gasreichsten Stellen findet auch Sternentstehung statt, außerdem sind hier die Emissionslinien verbreitert (Unterschied zu AGN's).

**Heißes Gas** Massereiche E's sind oft von einer Röntgen-Corona umgeben, die wesentlich weiter ausgedehnt ist, als die sichtbare Galaxie. Für diese Emission sind das interstellare Gas und einzelne Punktquellen verantwortlich, die Röntgenstrahlung entsteht hier durch thermische Bremsstrahlung von dünnem, heißem Gas.

Verteilung von Röntgengas:

- $T \approx 10^7 K$
- $ne \approx 10^{-1} \cdots 10^{-4} cm^{-3}$
- $M_{Gas} \approx 10^8 \cdots 10^{10} M_{odot}$

- $L_x \approx 10^{40} \dots 10^{42}$  ergs/s
- $t_{cool} \approx 10^8 \dots 10^9$  years

**Massenbestimmung** Unter Annahme eines hydrostatischen Gleichgewichts kann durch folgende Formel die bindende Masse ermittelt werden:

$$M(r) = -r \cdot T(r) \frac{k}{G \mu m_H} \left( \frac{d \cdot \log(\rho)}{d \cdot \log(r)} + \frac{d \cdot \log(T)}{d \cdot \log(r)} + \frac{P_{nth}}{P} \frac{d \cdot \log(P_{nth})}{d \cdot \log(r)} \right) \quad (3.8)$$

## 4 Aktive Galaxienkerne (AGNs)

Was ist ein AGN?

Für den Großteil der Galaxien gilt, dass das beobachtete Licht von Gas und Sternen der Galaxie dominiert wird. Jedoch, ein kleiner Teil von Galaxien, besitzt eine zusätzliche Komponente in ihrer SED (spectral energy distribution).

Diese Komponente kommt von einer kleinen Region, welche aktiver galaktischer Kern, kurz AGN (eigentlich Englisch für active galactic nucleus), heißt. An sich sind mit AGN, bzw. aktiver galaktischer Kern, die Phänomene im Kern, bzw. in der Kernregion einer Galaxie gemeint, welche nicht ausschließlich Sternen zugeordnet werden kann.

### 4.1 Geschichte zur AGN-Entdeckung

Ein kurzer Überblick über die Geschichte der AGN-Entdeckung:

- das erste optische Spektrum einer aktiven Galaxie hat man am Lick Observatorium durch E.A. Fath im Jahr 1908 erhalten; man entdeckte starke Emissionslinien in NGC 1608 (M77)

Seyfert-Galaxien 1943: Karl Seyfert, ein amerikanischer Astronom, untersucht Spiralgalaxien mit einem Stern-ähnlichem Kern und starken Emissionslinien in ihrem Spektrum. Er bemerkt, dass es viele ähnlicher dieser Galaxien gibt und bildet eine Klasse daraus, die Seyfert-Galaxien (auf diese wird später noch eingegangen)

1963: Thomas Matthews und Allan Sandage haben eine sehr breite und starke Emissionslinie bei einer unbekannten Wellenlänge in 3C 48 gefunden. Die erste Radioquelle mit einer Stern-ähnlicher optischen Quelle wurde gefunden

1963: Marteen Schmidt untersucht das Spektrum von der dichten Radio Quelle 3C 273 und bemerkt, dass die starken Emissionslinien von diesem Objekt Balmer Linien sind, mit einer Rotverschiebung von 16%. Zu diesem Zeitpunkt war ein Objekt mit einer Rotverschiebung von 0,158 das am weit entferntesten bekannte Objekt.

1964: Zel'dovich und Novikov schlagen vor, dass massereiche Schwarze Löcher eine Rolle dabei spielen könnten

1960s-1970s: Astronomen entdecken eine Vielzahl an Quasaren, Radio-Galaxien und andere aktive Galaxien und finden dabei heraus, dass viele dieser Quellen in ihrer Helligkeit über einem Zeitraum von Tagen bis zu Jahren variieren

1978: Die NASA startet das Einstein Observatorium. Der erste Bild-Röntgenstrahlen Satellit, welcher herausfindet, dass praktisch alle Seyfert-Galaxien und ein paar Quasare leuchtende Röntgenquellen sind

1980s: Radioastronomen finden heraus, dass es typisch für Radioquellen ist, einen Jet zu haben, der von einem kompakten Kern ausgeht und in Lappen von Radioemission, weit entfernt von der optischen Galaxie sich auflöst

1990s: Das neue Compton Gamma Ray Observatory der NASA findet einige Quasare und aktive Galaxien, die Quellen von Gammastrahlung sind, welche in Zeiträumen von Tagen variieren

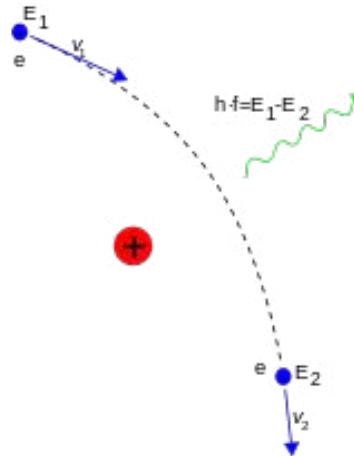
1995: Radioastronomen von Harvard und Japan benutzen VLBI (very long base interferometry) um die Rotationsgeschwindigkeiten von Radioemissionslinien in den molekularen Wolken, nahe dem Kern von NGC 4258 zu messen. Dabei findet man heraus, dass diese Wolken ein Schwarzes Loch mit einer Masse von  $35M_{\odot}$  umkreisen

## 4.2 Radiative Prozesse

AGNs strahlen in vielen verschiedenen Wellenlängenbereichen, nicht nur im optischen Bereich. Daraus kann geschlossen werden, dass viele Prozesse zur Strahlung beitragen. Aber welche Prozesse sind es genau, und wie funktionieren sie?

Strahlung wird durch elementare Prozesse wie Synchrotron- und Bremsstrahlung produziert und dann durch anderen Prozessen wie Streuung, Absorption und Re-Emission modifiziert. Einige dieser Prozesse werden hier beschrieben.

- Bremsstrahlung: Diese Strahlung kommt dadurch zustande, dass ein geladenes Teilchen (z.B. ein Elektron) durch ein anderes geladenes Teilchen (z.B. ein Atomkern) abgelenkt wird. Das abgelenkte Teilchen verliert an kinetischer Energie, die wegen der Energieerhaltung in Photonen umgewandelt wird.

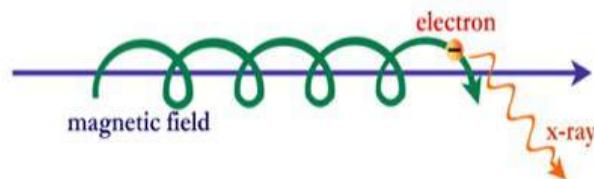


**Abbildung 71:** Eine schematische Darstellung der Bremsstrahlung.

Grundsätzlich bedeutet ‘‘Bremsstrahlung’’ jegliche Strahlung, die durch Beschleunigung eines geladenen Teilchens verursacht wird, aber in diesem Fall ist die Ablenkung aufgrund eines **elektrischen** Feldes gemeint, im Gegensatz zur

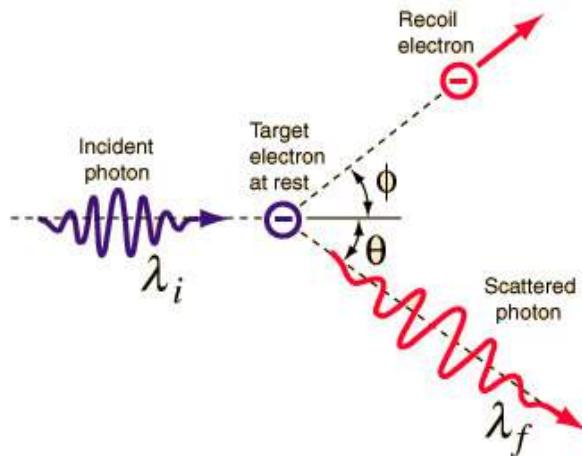
- Synchrotronstrahlung: Diese Strahlung entsteht dadurch, dass geladene Teilchen durch ein **magnetisches** Feld beschleunigt werden. Die Lorentzkraft wirkt auf

das Teilchen und es bewegt sich auf einer korkenzieherähnlichen Bahn entlang der magnetischen Feldlinie.



**Abbildung 72:** Eine schematische Darstellung der Synchrotronstrahlung

- Componstreuung: Ein Photon trifft auf ein ruhendes Elektron. Es wird Energie vom Photon auf das Elektron übertragen und das Elektron bekommt einen Impuls. Die Ausbreitungsrichtung des Photons ändert sich. Die Energie des Photons nimmt auch ab und mir ihr nimmt die Wellenlänge zu.



**Abbildung 73:** Eine schematische Darstellung der Comptonstreuung.

Wenn sich das Elektron vor dem Zusammenstoß mit dem Photon auch bewegt, dann kann es auch sein, dass Energie andersherum übertragen wird, also vom Elektron auf das Photon. Dieser Fall wird als ‘inverse Comptonstreuung’ bezeichnet. Wenn die Energie des einfallenden Photons viel kleiner als  $mc^2$  ist, dann kann der Impuls, der auf das Elektron übertragen wird, vernachlässigt werden. Dieser Fall wird auch als

- Thompsonstreuung bezeichnet

### 4.3 Energieverteilung

Wie schon vorher besprochen strahlen AGNs in verschiedenen Wellenlängenbereichen. Die Strahlung wird aufgrund ihrer Quelle weiter unterteilt.

Strahlung, die wegen Teilchen verursacht wird, dessen Geschwindigkeiten mit einer Maxwell-Verteilung beschrieben werden können, wird als **thermische Emission** bezeichnet.

**Nichtthermische Emission** wird daher durch Teilchen verursacht, dessen Geschwindigkeiten nicht durch Maxwell-Verteilungen, sondern z.B. durch Potenzgesetze beschrieben werden (z.B. Synchrotronstrahlung).

**Primäre Emission** wird direkt durch den AGN verursacht, z.B. durch thermische Emission der Akkretionsscheibe. **Sekundäre Emission** ist primäre Emission, die absorbiert und wieder emittiert wird.

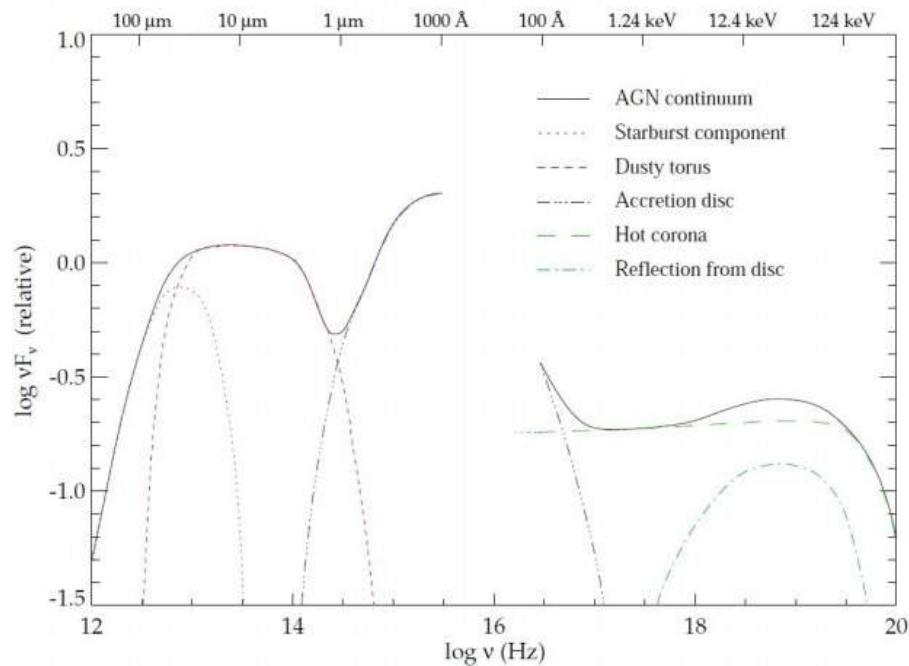


Abbildung 74: Die Energieverteilung eines AGNs

Wodurch kommt diese Verteilung zustande, und was sind ihre wichtigsten Merkmale? Ein wichtiges Merkmal ist der Spalt zwischen 100 und 912 Å. Dieser Spalt wird als **EUV (Extreme Ultraviolet) Gap** bezeichnet und entsteht dadurch, dass Strahlung dieser Wellenlänge durch das neutrale Wasserstoff der Milchstraße absorbiert wird.

Das Hauptmerkmal ist der sogenannte **Big Blue Bump** ca. zwischen 1 μm und 100 Å. Die Tatsache, dass dieser Bereich so leuchtstark ist, deutet darauf hin, dass diese Emission primär ist und durch die  $10^5 K$  heiße Akkretionsscheibe verursacht wird.

Der sogenannte **Infrared Bump** befindet sich links von ca. 1 μm und wird wahrscheinlich durch thermische Emission von warmem ( $T < 2000 K$ ) Staub verursacht. Bei hö-

heren Temperaturen sublimieren die Staubkörner und gehen direkt vom festen Zustand in Gas über. Des passiert innerhalb des Sublimationsradius ( $1pc$  in Seyfert-Galaxien, ein paar  $pc$  in Quasaren). Staubkörner in dieser Region bestehen eher aus Graphit als Silikate und haben eine höher Sublimationstemperatur. Der Staub weiter außen wird durch UV/optische Strahlung vom Zentrum erhitzt und strahlt ab.

Der Tiefpunkt zwischen Big Blue Bump und Infrared Bump ( $1 - 1,5\mu m$ ) ist die sogenannte **Near-Infrared Inflection**.

Ganz links befindet sich der **Submillimeter Break**: im Submillimeterbereich fällt die Leuchtkraft stark ab. Dies kommt durch Synchrotronselfabsorption zustande: beschleunigte geladene Teilchen emittieren Strahlung, absorbieren die Strahlung aber dann wieder.

Ab  $0,1keV$  befindet sich der **Hochenergiebereich** (Röntgen- und Gammastrahlung). Diese Strahlung wird nach Energie unterteilt:

- $0,1 - 2keV$ : weiche Röntgenstrahlung
- $2 - 100keV$ : harte Röntgenstrahlung
- $> 100keV$ : Gammastrahlung

Wodurch Röntgen- und Gammastrahlung in AGNs zustande kommen ist noch nicht eindeutig bestimmt. Es gibt aber Erklärungsansätze: Röntgenstrahlung könnte durch inverse Comptonstreuung zustande kommen. UV bzw. optische Strahlung aus der Akretionsscheibe könnte durch Elektronen die sich in einem Corona um der Scheibe befinden energetisiert werden.

Der **Radiobereich** (ab  $1mm$ ) kommt nicht aus thermischer Emission und trägt nur wenig zur bolometrischen Helligkeit bei.

#### 4.4 Broad and Narrow Line Regions

Die **BLR** und **NLR** sind aus verschiedenen Gründen nützlich.

Die BLR erlaubt einen Einblick in den Zentralbereich des AGNs. Zum einen werden Bewegungen in der BLR höchstwahrscheinlich durch dem Zusammenspiel von Gravitations- und Druckkräften bestimmt. Zum anderen wird in der BLR Energie der unmittelbaren Umgebung des schwarzen Lochs abgestrahlt, die nicht direkt beobachtbar ist.

Die breiten Emissionslinien wurden **dopplerverbreitert**, also werden ihre Breiten in Geschwindigkeitseinheiten angegeben. Diese Geschwindigkeit kann Werte zwischen 500 und mehr als  $10000kms^{-1}$  annehmen, ein Standardwert ist jedoch ca.  $5000kms^{-1}$ . Verbotene Linien werden aufgrund der hohen Teilchendichte unterdrückt. Da die durchschnittliche Zeit zwischen zwei Kollisionen viel kürze ist als die durchschnittliche Lebensdauer eines Atoms mit angeregten, verbotenen Übergängen - Energiezustände werden durch Kollision abgeregelt, bevor es zu einem verbotenem Übergang kommen könnte. Linien mit mittlerer spontaner Übergangswahrscheinlichkeit werden als halbverboten bezeichnet. Aus der Tatsache, dass halbverbotene Linien vorhanden sind und verbotene nicht kann auf die Dichte des BLRs geschlossen werden: ca.  $3 \cdot 10^9 cm^{-3}$ .

Dopplerverbreiterung kommt durch verschiedene Mechanismen zustande - wenn die Ursachen nur thermisch wären, würde dies eine Gastemperatur von über  $10^9 K$  und somit komplett ionisierte Teilchen bedeuten. Gemeinsame Plasmabewegung ist noch erforderlich - es bewegen sich nicht nur die einzelnen Teilchen, sondern auch ganze emittierende Teilchenwolken, dessen Eigenbewegung auch zur Dopplerverbreiterung beiträgt.

Die NLR stellt den größten räumlichen Bereich dar, wo die ionisierende Strahlung der Quelle alle anderen Strahlungsquellen überragt. Weiteres ist der NLR die einzige Komponente des AGNs, die im optischen aufzulösen ist. Anhand der Dynamik der NLR kann erforscht werden, wie AGNs mit Materie versorgt werden.

In der NLR ist die Teilchendichte geringer (ca.  $3 \cdot 10^3 cm^{-3}$ ), also kommt es eher zu verbotenen Übergängen. Die Linien sind schmäler (zwischen 200 und  $900 km s^{-1}$ , typischerweise  $350 - 400 km s^{-1}$ ). Aus Linienverhältnissen kann auf eine Temperatur von ca.  $16000 K$  geschlossen werden. Der Radius beträgt ca.  $100 pc$ . Morphologisch nimmt die NLR die Form zweier Kegel, die normal auf die Scheibe der Galaxie stehen.

Um nochmal kurz zusammenzufassen: in der unmittelbaren Umgebung des schwarzen Lochs herrschen hohe Teilchendichten und hohe Temperaturen. Deshalb wirkt die Dopplerverbreiterung viel stärker und die Emissionslinien sind breit. Es gibt keine verbotenen Linien, weil Teilchen durch Kollisionen Energie verlieren und keine Möglichkeit haben, verbotene Übergänge zu betreiben. Weiter vom schwarzen Loch entfernt nimmt jedoch die Teilchendichte und die Temperatur ab. Hier wirkt die Dopplerverbreiterung nicht so stark und die Emissionslinien sind schmäler.

## 4.5 Klassifizierung von AGNs

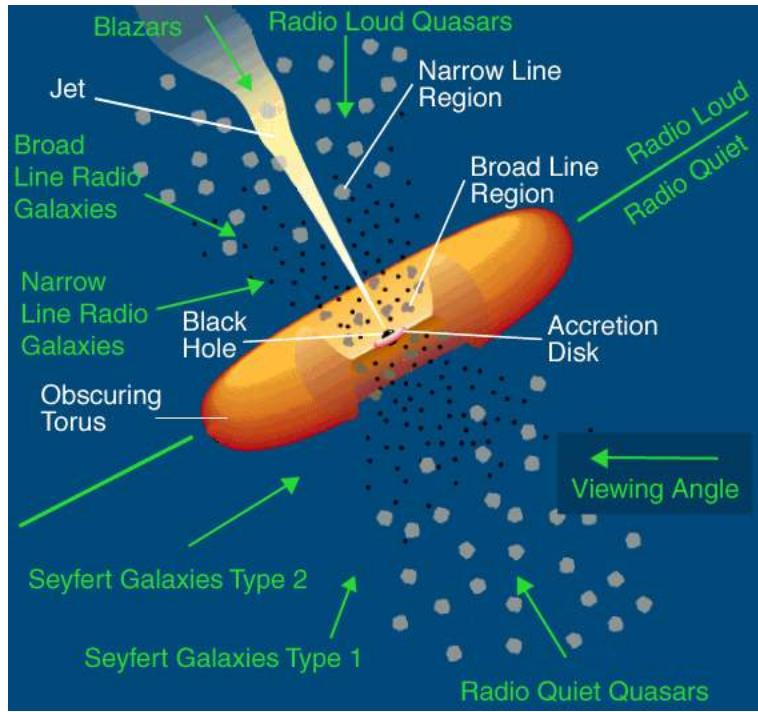
Wie werden AGNs klassifiziert? Es gibt zwei Hauptmerkmale, die die optischen Charakteristiken eines AGNs bestimmen: **Orientierung** und **intrinsische Helligkeit** (also die Akkretionsrate).

Die zwei größten Unterklassen von AGNs nach der Helligkeit sind Seyfert-Galaxien und Quasare. Seyfert-Galaxien sind durch eine absolute Helligkeit im B-Filter größer als  $-21,5$  ausgezeichnet, also sind sie für die Verhältnisse der AGNs leuchtschwach.

AGNs werden grundsätzlich nach Orientierung in Typ 1 und Typ 2 gegliedert. Bei AGNs sind die Narrow Line Region (NLR) unabhängig von der Orientierung sichtbar, da sie räumlich ausgedehnt sind, aber die Broad Line Region (BLR) befinden sich in der unmittelbaren Umgebung des schwarzen Lochs und es kann sein, dass sie durch den Torus versteckt werden. Daher:

- Bei Typ 1 AGNs sind sowohl die NLR als auch die BLR zu sehen. Die Sicht auf die BLR wird durch den Torus nicht genommen.
- Bei Typ 2 AGNs wird die Sicht durch den Torus genommen - nur die NLRs sind sichtbar. Auf die NLR und BLR wird weiter unten näher eingegangen.

Die verschiedenen Orientierungen werden in dieser Grafik zusammengefasst.



**Abbildung 75:** Eine Zusammenfassung der Klassifizierung von AGNs.

## 4.6 Die Host Galaxie

AGNs werden betrachtet als zentrale ‘Maschine’ in Galaxien, gespeist durch Akkretion auf das massereiche schwarze Loch.

Lange Zeit war nicht klar, ob auch QSOs in einer Galaxie beheimatet sind. Eine Abbildung der Host Galaxie wurde erst mit dem Hubble Space Telescope möglich. Dabei stellte sich heraus, dass die Host Galaxie von QSOs oftmals stark durch Gezeitenwechselwirkung oder durch Verschmelzungsprozesse gestört sind. Diese Störung des Gravitationspotentials werden als essentiell angesehen, damit Gas die Drehimpulsbarriere überwindet und ins Zentrum gelangt; gleichzeitig scheinen solche Störungen auch die Sternentstehungsrate enorm ansteigen zu lassen (Starburst Galaxie): AGN Aktivität und Starbursts hängen deshalb häufig zusammen.

Eine Studie von 1980 besagt zudem noch, dass radio-ruhige QSOs und Seyfert-Galaxien meistens in Scheibensysteme gefunden werden, während radio-lauter QSOs häufig in elliptischen Galaxien gefunden werden.

## 4.7 Verschiedene Arten von AGNs

Zum Abschluss werden noch verschiedene Arten von AGNs kurz dargestellt (Übungsaufgabe 5A, vielen Dank an die Gruppe Sulzenauer und Hafner für die Erlaubnis, ihre Unterlagen zu benutzen).

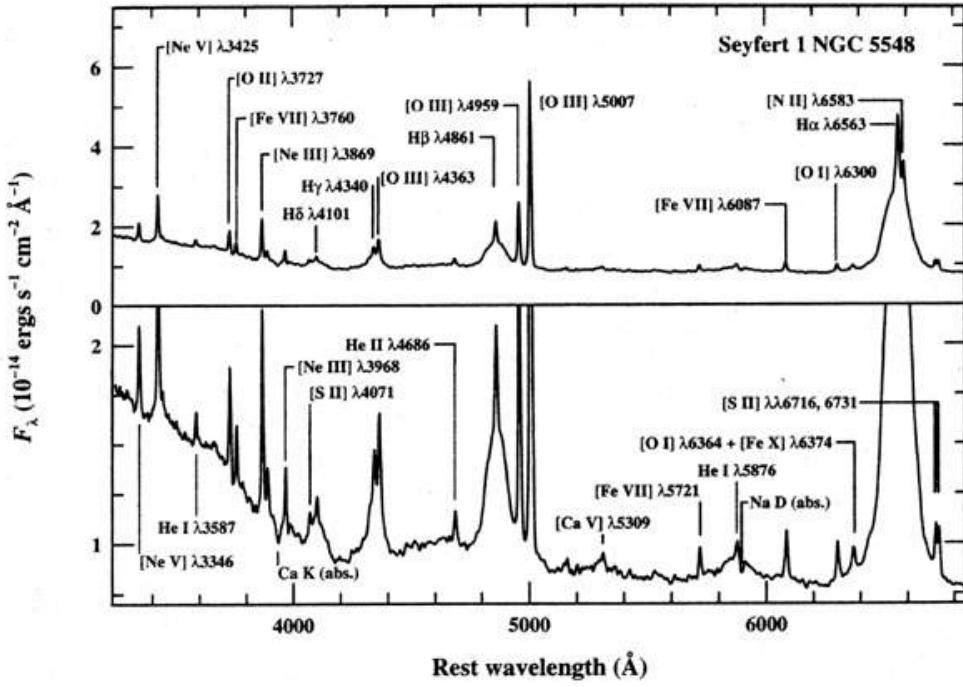
#### 4.7.1 Seyfert-Galaxien

Seyfert-Galaxien sind leuchtschwächer AGNs mit einer Leuchtkraft von  $M_B > -21,51$ . Dies ist ein allgemein akzeptiertes Kriterium, um Seyfert-Galaxien von Quasaren zu unterscheiden. Eine Seyfert-Galaxie hat einen Quasar-ähnlichen Kern, wobei die Host-Galaxie eindeutig erkennbar ist. Beobachtet man eine Seyfert-Galaxie direkt durch ein großes Teleskop, sieht diese wie eine in normaler Entfernung liegende Spiralgalaxie aus. Der einzige Unterschied besteht darin, dass sie einen überblendenden Stern im Zentrum hat. Die Definition hat sich soweit geändert, dass Seyfert-Galaxien nun spektroskopisch durch das Auftreten von starken, hoch-ionisierten Emissionslinien identifiziert werden. Morphologische Untersuchungen zeigen, dass nicht alle Seyfert-Galaxien Spiralgalaxien sind.

Bei den Seyfert-Galaxien kann man wieder in zwei Unterklassen unterscheiden. Sie zeichnen sich durch die Anwesenheit oder dem Fehlen von "breiten Linien" aus.

**Typ 1 Seyfert-Galaxien:** Dieser Typ der Seyfert-Galaxien hat zwei Gruppen von Emissionslinien. Eine Gruppe von Linien ist charakteristisch für ionisiertes Gas mit niedriger Dichte (Elektronendichte  $n_e \approx 10^3 - 10^6 \text{ cm}^{-3}$ ) mit Breiten von mehreren hundert Kilometer pro Sekunde und werden als "schmale Linie" bezeichnet. Von der zweiten Gruppe, "breite Linien", sieht man nur die erlaubten Linien. Diese Linien haben eine Breite von bis zu  $10^4 \text{ km s}^{-1}$ ; das Fehlen der breiten verbotenen Linien zeigt, dass das Gas der breiten Linien eine hohe Dichte aufweist ( $n_e \approx 10^9 \text{ cm}^{-3}$  oder höher). Außerdem hat die BLR eine Größe von  $0,01 \text{ pc} < r < 1 \text{ pc}$ .

**Typ 2 Seyfert-Galaxien:** Der einzige Unterschied zu Typ 1 besteht darin, dass die breiten Linien im Typ 2 Spektrum fehlen.



**Abbildung 76:** Das optische Spektrum von der Seyfert 1 Galaxie NGC 1275.

Die vertikale Skala ist im unteren Feld vergrößert dargestellt, um die schwächeren Linien besser zu erkennen. Das Spektrum ist dominiert von vielen sehr breiten Emissionslinien, wie z.B. den Balmer Linien, und weniger breiten Emissionslinien, wie z.B. den verbotenen [OIII] Linien bis 5007 Å und 4959 Å. Die Halbwertsbreite von den breiten Linien liegt bei ungefähr  $5900 \text{ km s}^{-1}$  und die Breite der schmalen Linien liegt bei ca.  $400 \text{ km s}^{-1}$ . Unterhalb von etwa 4000 Å steigt die spektrale Energieverteilung an; dort beginnt der ‘‘small blue bump’’, eine Überlagerung von Emissionslinien des einfach ionisierten Eisens (FeII) und des Balmer Kontinuums.

Zusätzlich zu den starken Emissionslinien, werden schwache Absorptionslinien aufgrund der ‘‘late-type’’ Riesensterne in der Host-Galaxie auch beobachtet, sowohl im Spektrum von Typ 1, also auch von Typ 2.

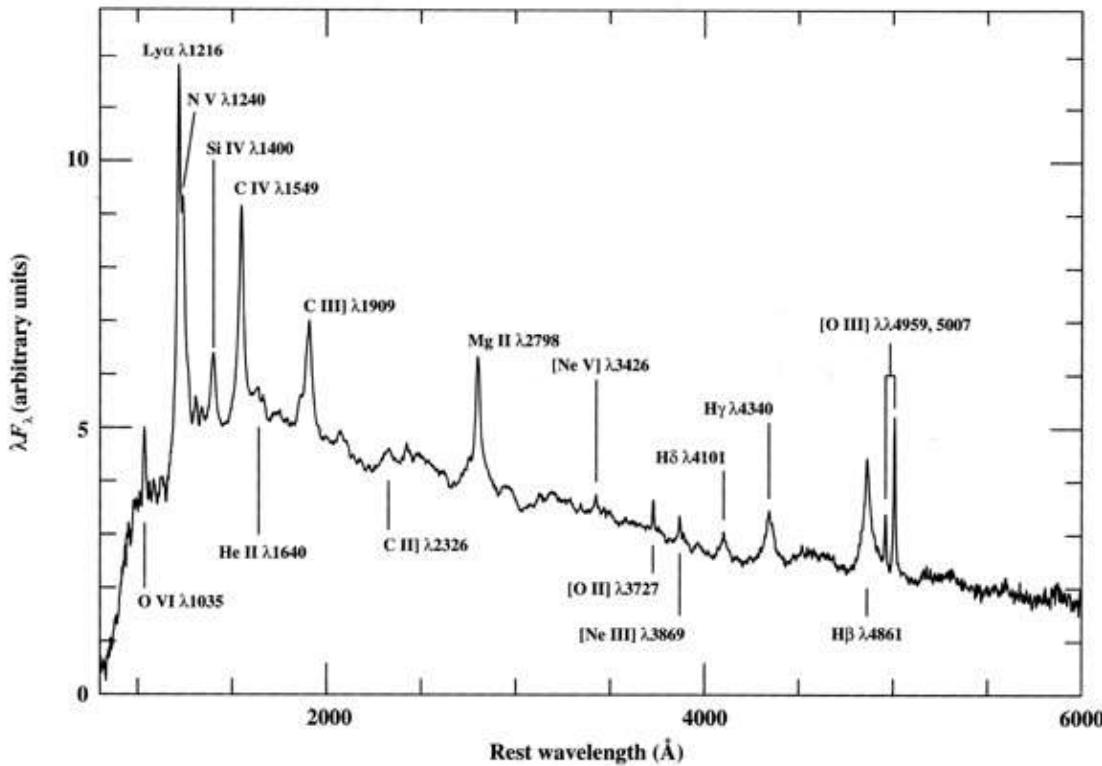
Von unserem Erscheinungsperspektive aus beobachtet man einen Staub-/Molekulartorus, der den AGN umrundet.

#### 4.7.2 Quasare und QSOs

Quasare (‘‘QUAsi StellAr Radio Source’’) sind die leuchtkräftigste Unterklasse der AGNs mit einer Kernleuchtkraft von  $M_B < -21,5$ . Ein kleiner Teil (5 – 10%) dieser Quellen sind laute Radioquellen, die ursprünglich als Quasare definiert wurden. Die anderen 90%, also die radio-ruhigen, nennt man QSO, bzw. ‘‘Quasi Stellar Objects’’. Viele die-

ser Quellen sind von einem sogenannten “quasar fuzz“ umgeben; dieser ist das Licht der Galaxie, welche den Quasar umgibt.

Das Spektrum eines Quasars ist ungefähr gleich dem einer Seyfert-Galaxie, mit Ausnahme, dass die schmalen Linien im Allgemeinen schwächer im Vergleich zu den breiten Linien sind.



**Abbildung 77:** Ein QSO Spektrum welches aus durchschnittlich 700 QSO Spektren gebildet wurde. Wichtige Emissionslinien sind eingetragen.

### Grundlegende Eigenschaften von Quasaren

- Identifikation einer Radioquelle mit punktförmiger optischer Quelle
- Fluss der Quelle variiert und zwar bei (fast) allen Frequenzen
- optisches Spektrum blau, z.B.  $U - B < 0$
- breite Emissionslinien, Linien von Übergängen mit hoher Ionisationsenergie
- hohe Rotverschiebung
- Emission von Röntgenstrahlung

## **QSO Statistiken**

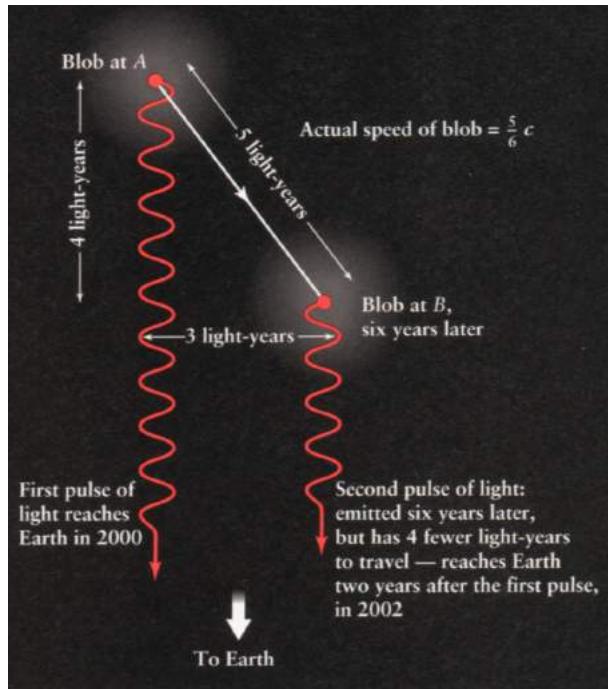
- Helligkeit:  $L_{quasar} \approx 10^{45-49} ergs^{-1}$
- Schwankungen im kompletten elektromagnetischem Spektrum
- Synchrotron Jets dehnen sich in einem Bereich von  $0,1pc$  bis  $1Mpc$  aus
- ca.  $10^4$  Quasare sind bekannt, 10% davon sind radio-laut, aber viele Untersuchungen suchen nach weiteren Quasaren
- Rotverschiebung:  $z = 0,1...5,8$ , höchste Raumdichte liegt bei  $z = 2...3$
- heute haben wir ungefähr  $10^{-5} \frac{\text{Quasare}}{\text{Galaxie}}$  und  $z = 2 : 10^{-2} \frac{\text{Quasare}}{\text{Galaxie}}$
- Falls ein Quasare lange lebt, bildet nur eine aus 100 Galaxien ein Quasar ( $\rightarrow 1\%$  von allen Galaxien besitzen ein schwarzes Loch)
- Falls ein Quasar kurz lebt:  $\Delta t_{QSO} \approx 10^7 y$ , dann waren alle leuchtenden Galaxien aktiv und alle besitzen ein Schwarzes Loch

## **Radioeigenschaften von Quasaren: Jets**

Jets, so erscheint es, beginnen im Zentrum und weiten sich zu ein Lappen aus und das meist mit einer Geschwindigkeit naher der Lichtgeschwindigkeit. Wobei sie eine Größe von ein paar hundert  $kpc$  oder sogar  $Mpc$  erreichen. Außerdem transportieren sie Energie und Teilchen von der kompakten Quelle zu äußeren Regionen. Manchmal kann man nur ein Jet sehen, da der entgegen gerichtete Jet viel schwächer ist.

## **Radio Kontinuum: Bewegung mit Überlichtgeschwindigkeit**

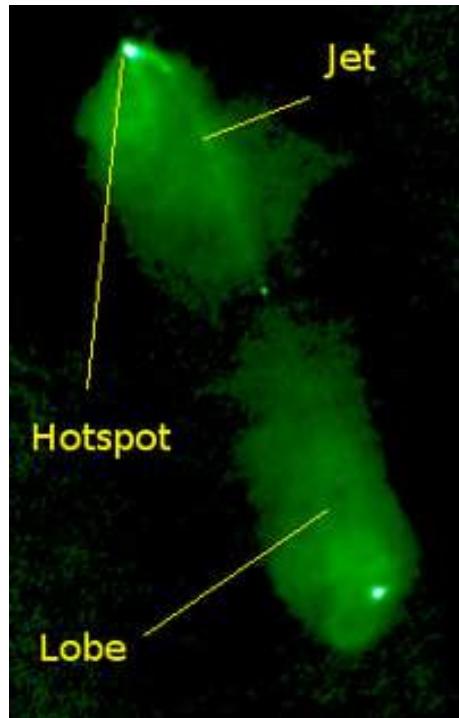
Jets die sich mit naher Lichtgeschwindigkeit bewegen (ca. 70% oder mehr) und in einem Winkelbereich ( $-90^\circ, 90^\circ$ ) auf den Beobachter zu bewegen, kann es zu einer scheinbaren Überlichtgeschwindigkeit kommen. Das ist dadurch zu erklären, dass das Licht des Jets, der immer näher kommt, weniger Zeit benötigt um zum Beobachter zu gelangen. Dadurch sieht es so aus, als bewege sich der Jet in transversaler Richtung mit Überlichtgeschwindigkeit.



**Abbildung 78:** Das Bild soll nochmal den Effekt veranschaulichen

#### 4.7.3 Radiogalaxien

Die Muttergalaxie ist meist eine große elliptische Galaxie. Radiogalaxien sind, wie es der Name verrät, starke Radioquellen ( $L_{radio} > 10^8 L_\odot$ ). Weiter wichtige Merkmale sind die Jets und Lobes:



**Abbildung 79:** Jet, Hotspot und Lobe einer Radiogalaxie

#### 4.7.4 Low-Ionization Nuclear Emission Line Region (LINER)

Diese AGNs sind ähnlich wie Seyfert 2-Galaxien mit einer zusätzlichen Emissionslinien von schwach ionisierten Elementen wie z.B. OI oder NII. Hostgalaxien von LINER-Regionen sind oft Spiralgalaxien wie z.B. Messier 94 oder Messier 104.

#### 4.7.5 Broad Absorption Line (BAL) QSO

Manche QSOs weisen breite Absorptionslinien auf. Shocks und Winde naher des schwarzen Lochs setzen Energie frei. Typisch sind auch stark verbreiterte Emissionslinien stark ionisierter Atome wie z.B. CIV, OVI oder SiIV.

#### 4.7.6 BL Lac

Diese AGNs sind durch ihren kontinuierlichen und hohen Strahlungsfluss über der ganzen Energieverteilung charakterisiert. Es werden kaum bis keine Absorptions- bzw. Emissionslinien beobachtet. Dies wird dadurch erklärt, dass BL Lac-Objekte entlang des Jets beobachtet werden (siehe Skizze oben). Der Jet dominiert das Spektrum: Die Strahlung ist stark polarisiert, stark durch Radiostrahlung dominiert und variiert in ihrer Kraft mit einer Periodendauer von einigen Tagen. BL Lac-Objekte sind nach dem prototypischen Objekt BL Lacertae benannt.

## 5 Zwerggalaxien

### 5.1 Geschichte

1925 suchte Edwin Hubble nach Cepheiden um sein Modell des expandierenden Kosmos zu untermauern. Er untersuchte dabei den schwachen Nebel NGC6822. Später sollte sich herausstellen, dass es sich dabei um eine Zwerggalaxie gehandelt hatte.

Dieses Ergebnis kommt aus der Annahme, dass über die Helligkeit von Cepheiden die Distanz bestimmt werden kann. Hubble errechnete die Distanzen zu M31 und NGC6822 und stellte Erstaunliches fest. Beide Galaxien sind viele hundert kpc von der Sonne entfernt, obwohl ihrer völlig unterschiedlichen Größen und Helligkeiten. Denn die Leuchtkraft von NGC6822 liegt um den Faktor 0.0025 unterhalb der von M31.

Zu Hubbles Zeit lag die allgemeine Ansicht vor, dass die Helligkeitsverteilung von Nebeln mit hoher Radialgeschwindigkeit (später als Galaxien verstanden), normalverteilt (Gauß-Kurve) sei.



**Abbildung 80:** Optische Fotografie von M31



**Abbildung 81:** Im Vergleich zu M31 erscheint NGC6833 viel kleiner und bedeutend leuchtschwächer. Optische Aufnahme des DSS.

- Geringe Masse:  $10^6 \dots 10^{10} M_\odot$  (bei  $10^{10} M_\odot$  tritt der Übergang zu „normalen“

Galaxien ein.)

- Niedrige Rotation:  $1 \dots 100 \text{ km s}^{-1}$
- Schwache Leuchtkraft:  $10^6 \dots 10^{10} L_\odot$
- Spektrum aus niedrige Flächenhelligkeit (ultra leuchtschwache Zwerggalaxien) bis hoher Flächenhelligkeit (BCDGs)
- Niedrige Metallizität:  $1/3 \dots 1/50 Z_\odot$
- Spektrum von gasarmen (dEs, dSphs) zu gasreichen Objekten (alle anderen)
- Sehr Zahlreich (s. Leuchtkraftfunktion)
- Dominiert von Dunkler Materie (?)

## 5.2 Zwerggalaxien als kosmologische Bausteine

Die großen Unterschiede, die Zwerggalaxien in ihrer Zusammensetzung und Morphologie aufweisen, sind ein Indiz für unterschiedliche Evolutionsmechanismen, die Galaxien im frühen Universum vollzogen haben mussten. Aus diesem Grund sind Zwerggalaxien ein wichtiges Puzzleteil im Verständnis der modernen Kosmologie.

Ein wichtiger Grundpfeiler unseres Bildes des Universums ist das **Cold Dark Matter paradigm**. Mit dessen Hilfe möchten verstanden werden, wie sich Galaxien gebildet haben und in ihrer fortwährenden Evolution beeinflusst werden. Dunkle Materie sammelt sich hierbei in anisotropen Halos und Subhalos um die entstehenden Sterne, die später leuchtende Galaxienketten ausbilden. Im Laufe der Jahrtausende verschmelzen die massereichsten DMHalos zu modernen Riesengalaxien, masseärmere Substrukturen bleiben großteils als Zwerggalaxien erhalten. Dieser Prozess wird auch hierarchische Strukturbildung genannt und ist ein hoch favorisiertes Modell der Kosmologie. Allgemein können dabei größere Strukturen durch kleinere „Bausteine“ aus gebundener Materie zusammengesetzt werden; dabei handelt es sich um einen „bottom-up“ Prozess der Strukturbildung. Tatsächlich wird dieses Modell weitgehend durch Beobachtungen verifiziert. Um ein Beispiel zu nennen: Aus den gewonnenen Daten vieler Beobachtungsstunden, die das Hubble Space Telescope zur Vollendung der GOODS und UDF Surveys unternommen hat, manifestiert sich der oben beschriebene Mechanismus der Galaxienbildung.

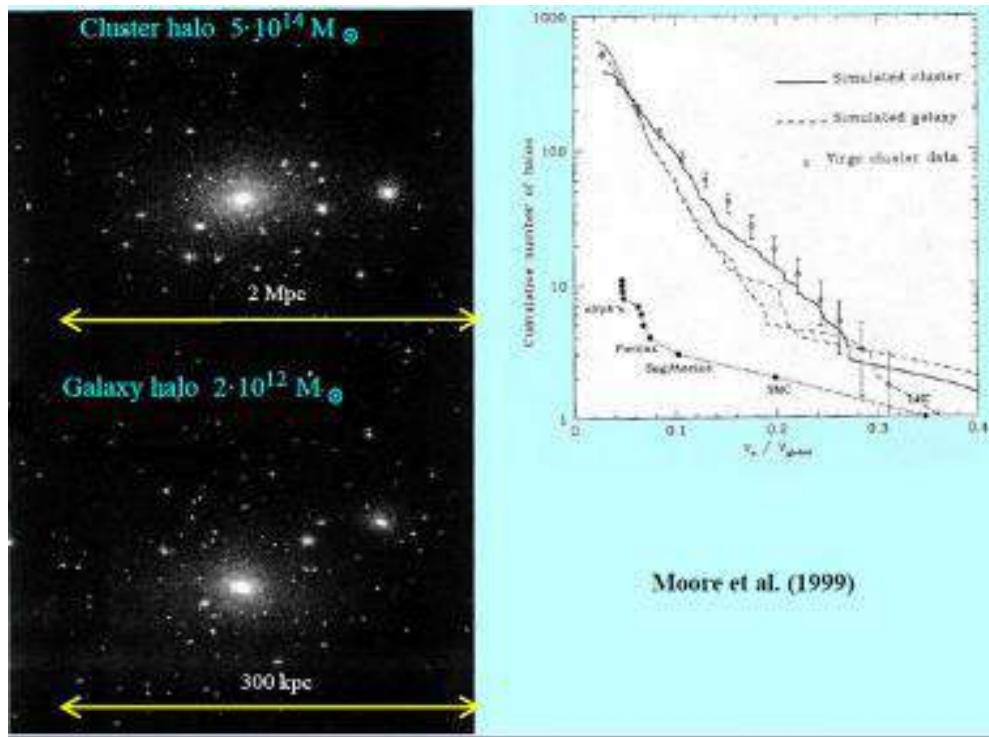


**Abbildung 82:** Teil des Hubble Ultra Deep Field (HUDF), ein sehr tiefer Schnitt durch das kosmische Volumen. Es offenbart Galaxien unterschiedlichster Entwicklungsstufe. (HST/NASA/ESA)

Viele der frühen Galaxien weisen sehr hohe Sternentstehungsraten auf, weswegen die Galaxien sehr hell und damit auch bei hohen Rotverschiebungen beobachtbar werden. Daten die sodann aus den SEDs gewonnen werden können zeigen, dass viele dieser frühen Galaxien Zwerngalaxien sind, die intensiven Starburst (relativ zu früheren Raten deutlich erhöhte Sternentstehung) durchleben. Effektiv zeigt sich ein Trend zu Zwerngalaxie-Morphologien im frühen Zustand des Universums, der stärker ist als der heutige.

Weiters sagt das  $\Lambda$  CDM Modell skalen-invariante Strukturen voraus, wodurch Mergerevents zu einem wichtigen Prozess zur Erklärung heutiger Strukturen herhalten müssen. Dadurch wird ein Exponentialgesetz der Galaxienmassenverteilung begünstigt. Dabei sind Zwerngalaxien die anzahlreichste Gruppe, wobei immer noch 10% der Masse in Substrukturen (u.a. Zwerngalaxien) gebunden bleibt.

Nun zeigt sich, dass wenn Skaleninvarianz gefordert wird, nicht ausreichend Zwerngalaxien auf kleineren Skalen ( $< 1 \text{ Mpc}$ ) gefunden werden können. Eine Diskrepanz zwischen Modell und Beobachtung kristallisiert sich heraus und wird „*Missing Dwarf Problem*“ betitelt.



**Abbildung 83:** Links sind Strukturen auf zwei verschiedenen räumlichen Skalen dargestellt. Hervorgehoben sei die Ähnlichkeit beider Bilder, obwohl ihrer ungleichen Skalierung. Rechts findet sich das Potenzgesetz, welches zur Massenverteilung von Galaxien herangezogen wird. Horizontal sind relative Rotationsgeschwindigkeiten, aus denen die Masse abgeleitet werden kann aufgetragen, vertikal sind die Beträgen von Anzahlbins eingezeichnet. Die Funktion ist also die kumulierte Anzahl bei gewissen Massen. (Moore et al. 1999)

### 5.3 Allgemeine Einteilung von Zwerggalaxien

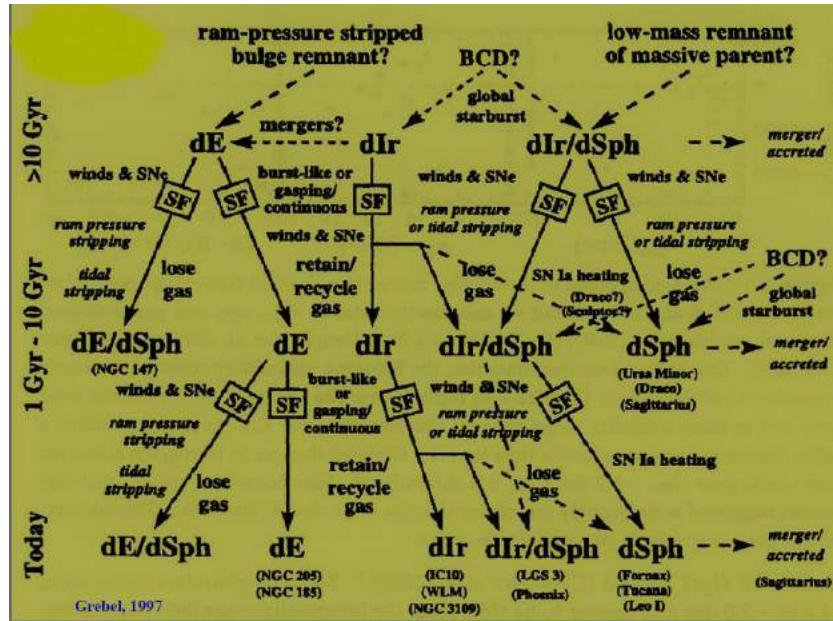
Aufgrund der mannigfaltigen Erscheinungsformen von Zwerggalaxien ist eine Einteilung in Gruppen erforderlich. Da die Morphologie oftmals von der Entstehungsgeschichte diktiert wird, hilft Klassifikation beim Verständnis der Phänomenologie.

Grundsätzlich können fünf Hauptgruppen von Zwerggalaxien unterschieden werden:

1. Zwerg-elliptische Galaxien: dEs, dSphs, dS0s
2. Zwerg-irreguläre Galaxien dIrrs
3. Blue Compact Dwarfs: BCDs
4. Tidal Tail Galaxien (Gezeiten-Zwerggalaxien)

## 5. Ultrakompakte Zwerggalaxien: UCDGs

Jeder Typus ist durch genuine Eigenschaften geprägt, die Resultat evolutionärer Vorgänge in der Geschichte der Wechselwirkungen in der Zwerggalaxie selbst und mit ihrer Umgebungen ist. Zwei Typen kommen in gehäufter Weise als Satellitengalaxien vor, also unmittelbar in der Umgebung der Milchstraße; das sind dIrrs und dSphs.



**Abbildung 84:** Die Entwicklung von unterschiedlichen Zwerggalaxien. Die zeitliche Unterteilung findet von oben nach unten statt, die morphologische auf der x-Achse.

## 5.4 Zerg-elliptische Galaxien

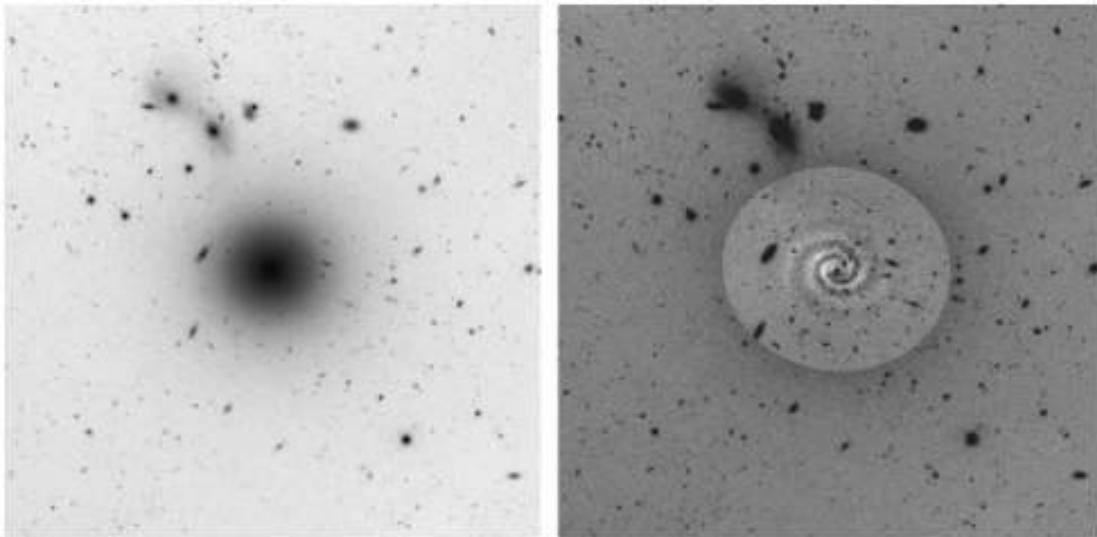
Dwarf Elliptical Galaxies (dEs) sind kleine elliptische Galaxien, die häufig in Galaxiengruppen und Haufen als Begleiter von größeren Galaxien vorkommen. Die absolute Helligkeit von dEs befindet sich im Bereich zwischen -13 bis -19 Magnituden. Sie besitzen  $10^7$  bis  $10^9$  Sonnenmassen. dEs haben eine gleichförmige Sternverteilung und bleiben mit ihren zentralen Dichten um den Faktor 100 unter denen von Kugelsternhaufen. Die Population der dEs bestehen aus intermediären und alten Sternen mit einer mittleren Metallhäufigkeit  $\epsilon \approx 1/30$  des solaren Wertes.

Dwarf Ellipticals zeigen manchmal auch Spiralstrukturen in ihrem Inneren. Diese sind jedoch nur durch spezielle, spektroskopische Verfahren sichtbar, wie zum Beispiel NGC 3328 im Virgo-Cluster (s. Abb. ??).

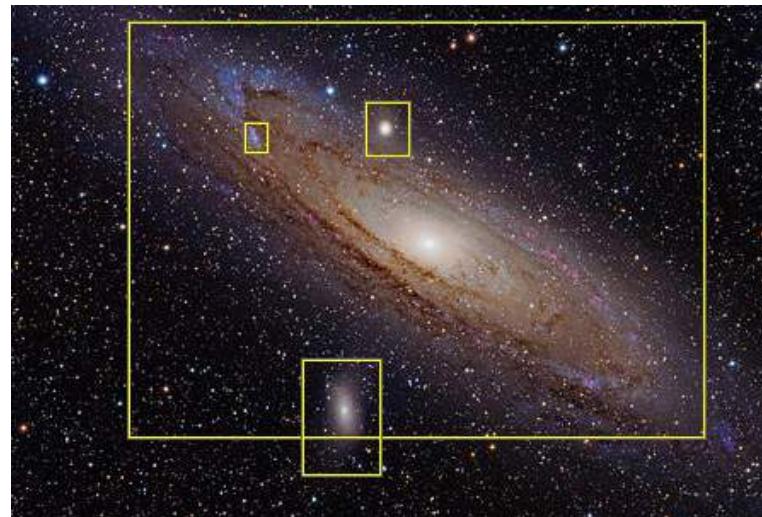
In elliptischen Zwerggalaxien gibt es eine hohe Oberflächenhelligkeit und ihre Helligkeitsverteilung verläuft exponentiell rötlich. Morphologisch sind sie wie gEs (giant Ellipticals). Sie besitzen kein Gas, ihr Metallizitäts-Verhältnis zur Sonne beträgt 1/3 bis

1 und ihre Sternentstehung ist abgeschlossen.

Abb. ?? zeigt die Andromeda-Galaxie (M31) mit 3 dEs als Begleiter



**Abbildung 85:** Links sieht man ein falschfarbenes, optisches schwarz-weiß Bild von NGC 3328, rechts wurden einzelne Wellenlängenbereiche entfernt, um in das Innere der Galaxie sehen zu können.



**Abbildung 86:** großes Rechteck: M31; kleines rechteck oben: NGC 206; kleines Rechteck oben: M32; kleines Rechteck unten: M110

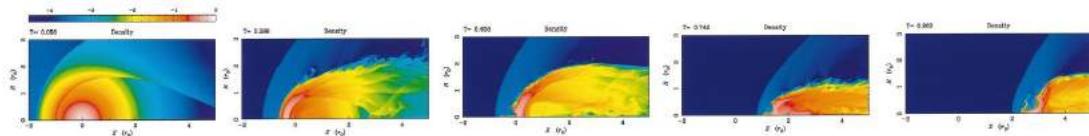
### 5.4.1 Dwarf Ellipticals Evolution

Es stellen sich folgende Probleme:

1. Entwickeln sich dEs aus gasreichen DGs (Zwerggalaxien)?
2. Können galaktische Winde das gesamte Gas aus einer Galaxie entfernen? (Die Galaxieevolution muss die Gas-/Astrophysikalischen Prozesse genau erklären!)
3. Welche anderen Prozesse machen aus gasreichen DGs dEs?, Wie können sich DGs aus Clustern entwickeln?, Durch ram-pressure gedehnte (stripped) dIrrs welche in Cluster einfallen: Wo beobachtet man die Umwandlung?
4. Die Entwicklung von DGs in unterschiedlichen Umgebungen.

Grundsätzlich gilt: dEs sind ram-pressure stripped in wenig dichtem intergalaktischen Medium. Folgende Bildreihe zeigt die zeitliche Evolution von dEs im ISM und dem Einfluss durch ram-pressure stripping anhand eines Modells.

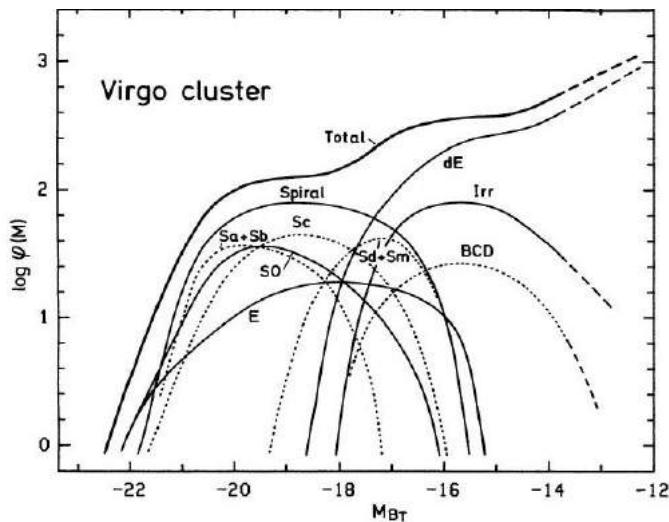
Man erkennt, wie die Galaxie, speziell das darin enthaltene Gas, in die Länge gezogen wird (Abb. ??):



**Abbildung 87:** Links: Aufnahmen eines Modells mit  $10^7$  Sonnenmassen als Kernmasse,  $n = 10^{-4} \text{ cm}^{-3}$  als Dichte des ISM und einer relativen Geschwindigkeit von 1000 km/s als Funktion der vergangenen Zeit von (von links nach rechts)  $5.61 \cdot 10^6$ ;  $2.86 \cdot 10^7$ ;  $4.58 \cdot 10^7$ ;  $7.42 \cdot 10^7$ ;  $9.63 \cdot 10^7$  Jahren.

### 5.4.2 Dwarf Ellipticals dominate in Clusters

dEs sind die am häufigsten vorkommenden Galaxien. Folgende Grafik (Abb. ??) als Beispiel für den Virgo-Cluster veranschaulicht dies. Auf der x-Achse ist die absolute Helligkeit und auf der y-Achse die normierte Häufigkeit aufgetragen. Die dicke Linie, markiert mit „Total“ zeigt alle Galaxien aufsummiert und wie man erkennt, kommen die dEs zwar bei sehr großen Helligkeiten nicht vor, jedoch bei geringeren umso mehr.



**Abbildung 88:** Galaxienhäufigkeiten im Virgo-Cluster

Wie unterscheidet man zwischen “aus Clustern geborenen dEs“, “ram-pressure stripped dIrrs“ und “einfallenden dIrrs“?

#### Probleme:

Entstehung von dIrrs in Clustern?

Woher kommt das Gas in Cluster dEs?

Wo entwickeln sich dEs?

**Bei dEs, die aus Dichtefluktuationen in Clustern entstanden...**

...findet die Entwicklung in den Clustern...

sphärisch,

mit hohen Z-Werten,

auf Kreisorbites statt.

Sie gibt auch Hinweise auf die morphologische Verteilung in den Clustern.

**Bei dEs, entstanden aus ram-pressure stripping und einfallenden dIrrs:**

zeigen höhere Dichten bei größeren Entfernungen zum Cluster-Zentrum

sind abgeflacht,

haben geringere Z-Werte

bewegen sich schnell auf exzentrischen Bahnen.

#### 5.4.3 Zwerg-sphäroidale Galaxien dSphs

Die erste bedeutende Gruppe von Satellitengalaxien, die um die Milchstraße zu finden sind, sind Zwerg-sphäroidale Galaxien. Sie sind gasfrei und reine Sternsysteme. Außerdem haben dSphs eine sehr geringe Metallizität.

Generell haben sie sehr viel Ähnlichkeit mit Kugelsternhaufen. Bei Helligkeiten, die denen von Kugelsternhaufen entsprechen, sind sie ausgedehnter – mit Durchmessern von wenigen kpc. Außerdem zeigen Zwerp-sphäroidale Galaxien flachere Helligkeitsverteilungen. Ihre Elliptizität ist jedoch meist höher als bei den doch sehr sphärischen Kugelsternhaufen.

Bis heute wurden erst 22 dSphs in Michstraßennähe entdeckt, sehr viel weniger als durch Modelle hervorgesagt wären. Dabei ist jedoch zu bedenken, dass es bei Beobachtungen einen Auswahlleffekt aufgrund der sehr schwachen Leuchtkräfte gibt. Die leuchtärmsten dSphs sind bei absoluten Helligkeiten von  $M_V$  größer als -8 zu finden (sog. „faint dSphs“)! Über einen Radius von circa 250 kpc hinaus ist es kaum möglich dSphs zu beobachten. Einer dieser extrem schwachen Zwerge, eben bei einer Entfernung von 250, ist Leo I (siehe Abb. ??).



**Abbildung 89:** Optische Aufnahme von Leo I (rechter Lichtfleck). Erst in den 1990ern wurden Beobachtungen ermöglicht, da zuvor der helle Stern Regulus (links), das Licht von Leo I in den Detektoren überdeckte.



**Abbildung 90:** Etwas elliptischer erscheint Ursa Minor dSph.



**Abbildung 91:** Ein weiteres Beispiel für Zwerg-sphäroidale Galaxien ist Fornax dSph. Sie hat eine absolute Helligkeit von  $M_V = -13.5$ , und liegt 135 kpc von der Sonne entfernt.

## 5.5 Zwerg-irreguläre Galaxien dIrrs

Zwerg-irreguläre Galaxien, oder in Kurzform dIrrs, sind geprägt durch reichliche Gasvorräte. Ihre irreguläre Gestalt röhrt von ausgedehnten HII-Regionen her, die oftmals verstreut in den Zwerggalaxien vorkommen. Ihre Sternkomponente wird im Infraroten von alten Sternen dominiert, die eine radial glatt abfallende stellare Flächenhelligkeit aufbauen. Außerdem sind die Sternmassen elliptisch verteilt und nicht scheibenförmig.

Wie auch Spiralgalaxien zeigen dIrrs sehr weitläufige HI-Ausdehnung, weit über den stellaren Anteil hinaus. Daraus resultiert auch die paradoxe Verteilung von jungen Sternhaufen, die nicht zum alten Sternanteil zu passen scheint.

Eben dieses Verhalten kann in der Großen Magellan'schen Wolke beobachtet werden.

Bleiben jedoch die großen HI-Gebiete ungestört, so kommt es nicht zu Sternenstehung und die Zwerggalaxie ist viel leuchtschwächer. Dieses Phänomen ist wiederum in SagDIG (siehe Abbildung ??) zu beobachten.

Weitere Vertreter dieser Galaxienklasse sind folgende Satellitengalaxien (eine Auswahl): Kleine Magellan'sche Wolke, Sagittarius Dwarf Irregular Galaxy (SagDIG), Carina II, Leo A und IC 10.



**Abbildung 92:** IC10



**Abbildung 93:** SagDIG



**Abbildung 94:** Leo A - alle drei (HST/NASA/ESA, National Observatory of Japan)

## 5.6 Blue Compact Dwarf Galaxies (BCDs)

„Blue compact dwarf“-Galaxien sind Zwerggalaxien mit großen Haufen von jungen, heißen, massiven Sternen und großen Gaswolken. Heiße, massive Sterne erscheinen bläulich, siehe Herzsprung-Russell-Diagramm (HRD), was wiederum den Namen „blue compact dwarf“ erklärt. Ihre absolute Helligkeit beträgt zwischen -14 bis -17 Magnituden bei einer durchschnittlichen Masse von  $10^9$  Sonnenmassen.

Die meisten BCD Galaxien sind auch als Zwerp-Irreguläre (dIrr) beziehungsweise Zwerp-Lentikulare (Klasse S0) klassifiziert und besitzen keine einheitliche Struktur. Erklären lässt sich das durch die hohe Sternentstehungsrate (SFR).

Wenn neue Sterne geformt werden, kühlen Galaxien langsam aus, was wiederum zu weiteren Sternentstehungen führt (Sterne entstehen aus relativ kühlen Staub-Gas-Wolken). Dieser ständige Prozess verändert laufend die Struktur der BCD Galaxien.

Abb.95 zeigt die Geschichte der SFR (Star Formation Rate) in der BCD Galaxie NGC 1705 als Beispiel für späte Zwerggalaxien und deren SFR.

Sie beschreibt die Sternentstehung pro eintausend Sonnenmassen pro Jahr pro Quadratkiloparsec als Funktion der Zeit oder anders gesagt: die Entwicklung der Sternentstehungsrate in den vergangenen Milliarden Jahren. Man erkennt, dass die höchsten Sternentstehungsraten jetzt beobachtbar sind und wir aktuell BCD Galaxien in ihrer aktivsten Phase erleben.

Abb. 96 zeigt ein optisches Bild dieser Galaxie.

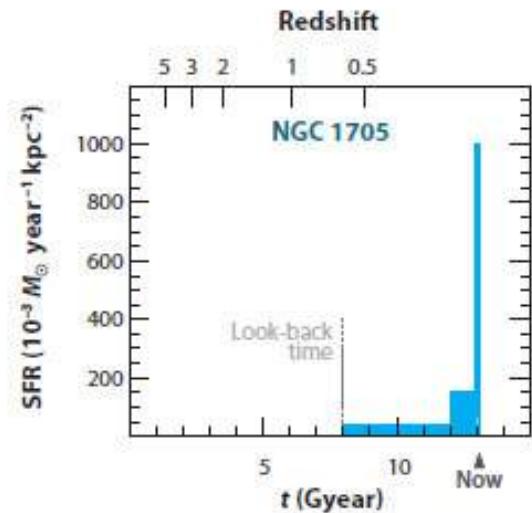


Abbildung 95: Geschichte der SFR von NGC 1705

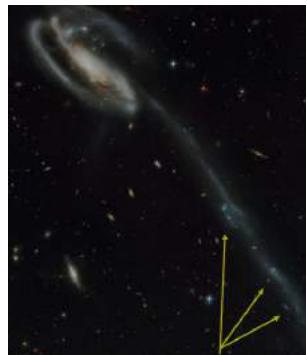


Abbildung 96: Optisches Bild von NGC 1705

## 5.7 Tidal Tail Galaxien

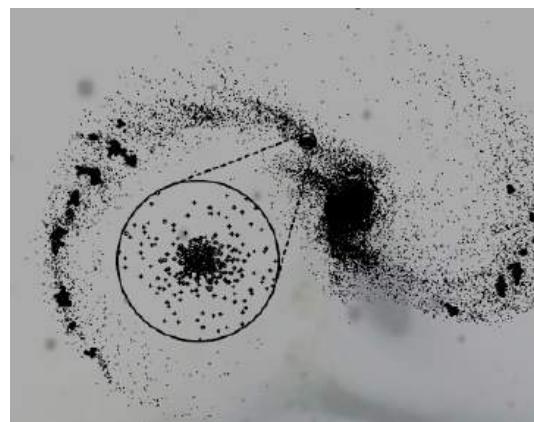
Tidal Tail Galaxies verdanken ihren Namen durch Schweifähnliche Strukturen, hervorgerufen durch Gezeitenkräfte. Diese entstehen durch andere Galaxien, welche sich in unmittelbarer Nähe befinden. Tidal Tail Galaxien unterscheiden sich somit nur aufgrund ihrer Form von anderen Galaxien.

Oftmals findet in diesen Schweifen Sternentstehung statt, wie in Abb. ?? zu sehen. Die gelben Pfeile deuten auf eben diese Sternentstehungsgebiete.



**Abbildung 97:** Tidal Tail Galaxie Arp188

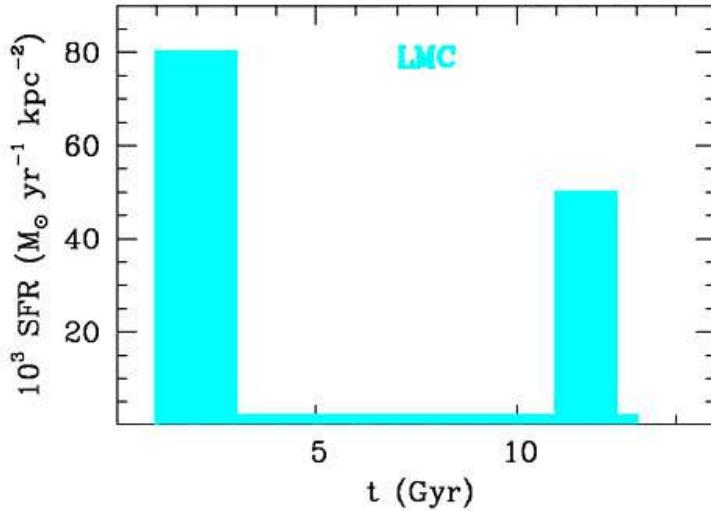
Numerische Simulationen ergeben, dass sich Masse in Zentralregionen, aber auch in Klumpenform in den Schweifen sammelt. Sind die Massen groß genug, spricht man von einer so genannten “Tidal Tail Zwerggalaxie“ (s. Abb. 98).



**Abbildung 98:** Ergebnis einer numerischen Simulation. Man erkennt die Zentralregion sowie die zwei, durch Gezeitenkräfte gestreckten Spiralen.

## 5.8 Starburst-Zwerggalaxien

Starburst Zwerggalaxien zeichnen sich durch ihre hohe SFR aus. Diese besitzt jedoch keinen kontinuierlichen, zeitlichen Verlauf, sondern tritt zeitlich begrenzt auf, wie untenstehende Grafik der Großen Magellanschen Wolke zeigt.



**Abbildung 99:** Zu sehen ist die Sternentstehungsrate als Funktion der Zeit. Man erkennt eine hohe SFR in der Zeit von ein bis drei Milliarden Jahre nach dem Urknall. Danach folgt eine sehr ruhige Phase mit geringer, gefolgt von einer weiteren mit sehr hoher Sternentstehungsrate 11 bis 12,5 Milliarden Jahre nach dem Urknall.

Die Phasen intensiver Sternentstehung sind zu stark um über die gesamte Lebensdauer der Galaxie aufrecht zu bleiben. Aus diesem Grund weisen alle Starburst Galaxien ähnliche SFR-zu-Zeit Charakteristika auf.

### Definition eines Starbursts:

$$\frac{\Psi(t_G)}{\Psi(t_0)} \geq 10 \dots 100 \quad (5.1)$$

$\Psi(t_0)$  beschreibt die SFR einer Galaxie zum jetzigen Zeitpunkt,  $\Psi(t_G)$  die SFR zu einem vorhergehenden.  $\Psi(t_0)$  muss somit mindestens eine Größenordnung größer sein als  $\Psi(t_G)$ .

$$\frac{M_{HI}}{\Psi(t_0)} = \tau_{SFR} \ll \tau_{Galaxy} < \tau_{Hubble} \quad (5.2)$$

Die Zeit  $\tau_{SFR}$  errechnet sich durch die Masse des HI-Gases durch die momentane SFR. Diese Zeit ist um vieles kürzer als das Alter der Galaxie und somit auch kleiner als die Hubble-Zeit ( Alter des Universums)

## 5.9 Phänomene in Zwerggalaxien

### 5.9.1 Dwarf Galaxies' Galactic Winds

Galaktische Winde bestehen aus heißen, metallreichen Supernova-Überresten und kühlerem Gas und Staub. Sie treten als bipolarer Ausfluss  $90^\circ$  gegenüber der Galaktischen

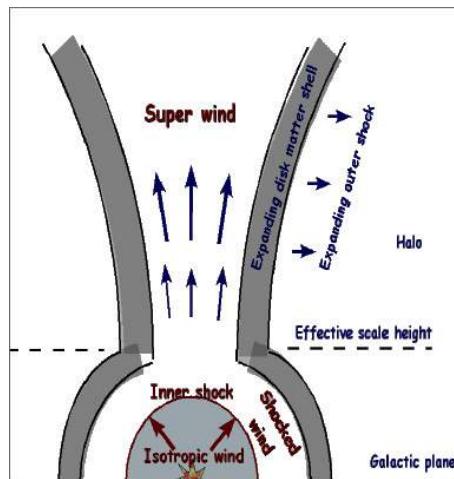
Ebene (Galactic plane) auf, da hier das galaktische Potenzial leichter überwunden werden kann. In der galaktischen Ebene hingegen ist die Materiedichte zu groß, um einen Ausfluss aus der Galaxie zu ermöglichen.

Abb. 100 veranschaulicht diesen Sachverhalt:

Die Supernova-Überreste folgen dem Dichtegradienten hin zu geringen Dichten außerhalb der Galaktischen Ebene. Auf deren Weg wird kühleres Gas und Staub mitbefördert. Wurde die Galaxie verlassen, expandiert der galaktische Wind in alle Richtungen.

Der gesamte Masseverlust ist bei Zwerp-Irregulären Galaxien (dIrrs) kleiner als eine Sonnenmasse!

In galaktischen Winden ist der Sauerstoff und Eisenanteil besonders hoch!



**Abbildung 100:** Zwerpgalaxien-Wind

### 5.9.2 Gas Infall

Man stellt sich die Frage, was die hohe SFR in Starburst Dwarf Galaxies verursacht und betrachtet dafür den Einfall von externem Gas in die Galaxie.

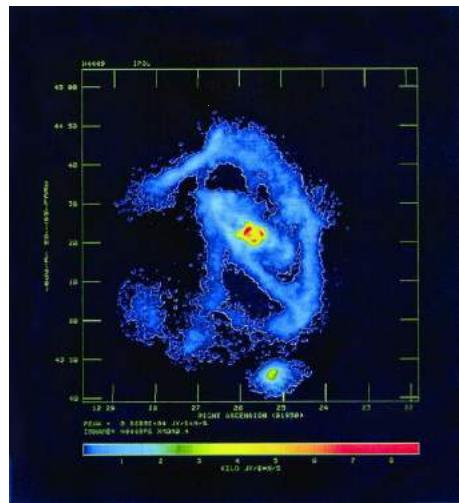
Stoßen Galaxien mit Staubwolken zusammen, entstehen Dichtefronten. Dies kann zu Sternentstehung in der Galaxie führen.

Nachgewiesen wurde das in NGC 4449 (optisches Bild in Abb. 101). Große Gaswolken erzeugten Starbursts, die in Abb. 101 Bild als bläuliche und rote Verdichtungen erscheinen.



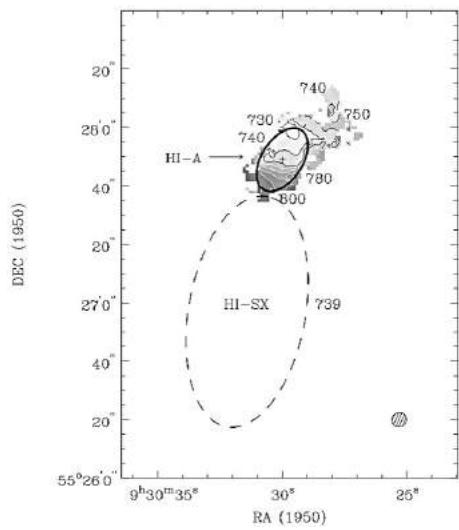
**Abbildung 101:** NGC 4449, optisch

Abb. 102 zeigt ebenfalls NGC 4449, allerdings im Röntgenbereich. Die x und y-Achse beschreiben lediglich die Position der Galaxie, wohingegen die Färbung die spektrale Flussdichte wiedergibt. Blau sind Gebiete mit geringer Sterndichte, rot sind Gebiete mit hoher Sterndichte. Es zeigt sich die chaotische Struktur der Galaxie, in der durch Gaswolken verursachte Starbursts nachgewiesen wurden.

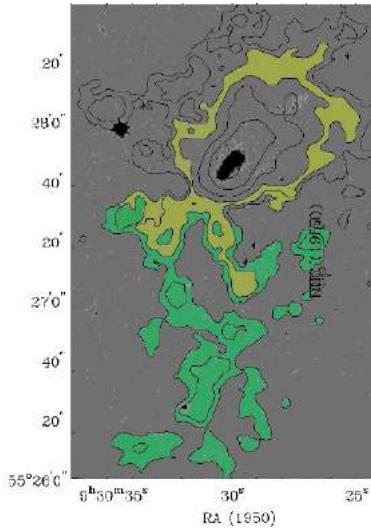


**Abbildung 102:** NGC 4449, Röntgenbereich

Die Galaxie I Zw 18 (Abb. 103) hat eine große HI Wolke (atomarer Wasserstoff) als Begleiter, welche jedoch nicht kinematisch gebunden ist. Gas Einfall auf I Zw 18 wird vermutet.



**Abbildung 103:** Die große, gestrichelte Ellipse stellt die Galaxie I Zw 18 dar, welche sich mit einer Radialgeschwindigkeit von 739 km/s von uns weg bewegt. Die kleinere Ellipse oberhalb von I Zw 18 stellt die HI-Wolke dar. Diese besitzt aufgrund ihrer Eigenrotation mehrere Geschwindigkeitsfelder von 730 bis 800 km/s. Man erkennt, dass diese HI-Wolke kinematisch nicht an I Zw 18 gebunden ist.



**Abbildung 104:** Wichtig sind hier lediglich die gelben sowie grünen Markierungen. Der große, schwarze Fleck, welcher von dem gelben Ring umgeben ist, stellt das Zentrum der HI-Wolke dar und die grünen Gebiete die Galaxie I Zw 18. Bei diesen eingefärbten Bereichen handelt es sich um Gas. Gelb für Gas, welches von der HI-Wolke stammt und grün für ursprüngliches Gas von I Zw 18. Man erkennt, wie von der HI-Wolke Gas auf I Zw 18 übertragen wird

## 5.10 Intrinsische Eigenschaften: stellare Populationen, Metallizität und Sternentstehung

Satellitengalaxien sind ein wichtiges Forschungsgebiet. Aus ihrem inneren Aufbau, der Sternverteilung, Alter und Metallizität, Gasgehalt und Sternentstehungsgeschichte, ist eine Vielzahl an Parametern - aus ihrer unmittelbaren Umgebung, und im frühen und jungen Universum - abzulesen. Die große Bandbreite ihres Erscheinungsformenspektrums zeigt die Komplexität, die in der Entwicklung des Universums steckt.

Der folgende Abschnitt versucht einige wichtige Parameter und Eigenschaften von Zwerg- und Satellitengalaxien zusammenzufassen.

### 5.10.1 Stellare Populationen

Einzelne Sterne, gebunden in Systemen wie Zwerggalaxien oder Kugelsternhaufen, können in Gruppen - oder anders ausgedrückt: in *Populationen* - zusammengefasst werden. Populationen unterscheiden sich in verschiedensten Gesichtspunkten, sie haben jedoch einen wichtigen Parameter gemeinsam, nämlich ihr Alter.

Populationen zeigen nun gemeinsame Eigenschaften. Eine wichtige Frage in der Beschreibung von Sternensystemen ist das Auftreten von Sternentstehungsepisoden. Hier gibt es typischerweise eine Toleranzgrenze von  $\pm 2$  Gyrs. Besonders gut können jedoch Populationsalter bestimmt werden, wenn Sterne der Spektralklasse A vorliegen, die den

spektroskopisch gut bestimmmbaren Balmer-Sprung aufwesen. Gibt es A Sterne, so kann die Population kaum älter als 500 Myrs sein!

Das Sternalter beeinflusst die Position im Hertzsprung-Russell-Diagramm („HRDiagramm“), also ihre Leuchtkraft, Metallizität, Farbe und die Entwicklungsstufe. Es kann aber nicht alleine aus dem HR-Diagramm auf alle Eigenschaften geschlossen werden. Es existiert, speziell zwischen Alter und Metallizität, eine Entartung („Alter-Metallizitäts-Entartung“). Grund dafür ist die direkte Einwirkung der Metallizität auf die Farben der Sterne und damit auf die Sternposition im HR-Diagramm.

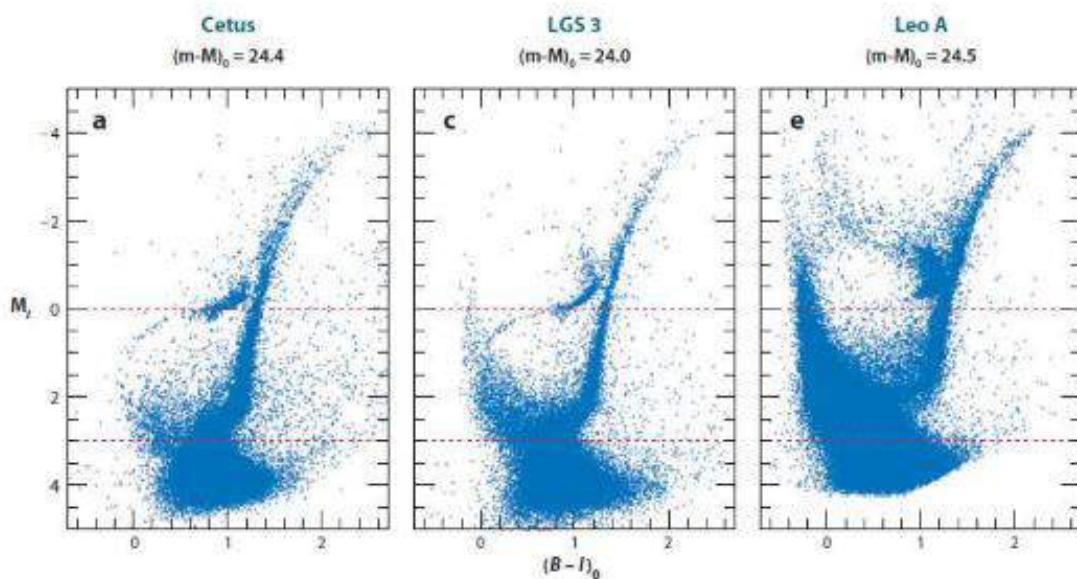
HR-Diagramme von dSphs und dIrrs Zwerggalaxien weisen grundlegende Unterschiede auf. Bei dSphs ist eine Lücke bei Sternen mit blauem Lichtanteil beobachtbar, während bei dIrrs dieser Abfall nicht nachweisbar ist. Der Grund für die Lücke liegt in der Sternentstehungsrate  $\Psi$  und dem seinerseits ursächlichen Gasgehalt in der Zwerggalaxie.

$$\Psi = \frac{M_{*,\text{tot}}}{\tau_{100} M_\odot} \quad (5.3)$$

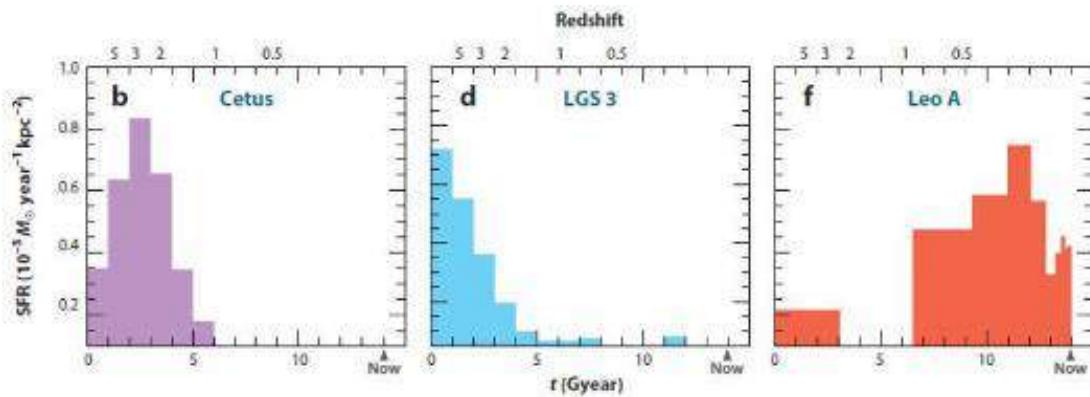
Folglich haben dSphs ihre Evolution großteils abgeschlossen, produzieren also kaum noch Sterne. dIrrs weisen dagegen Population von mittelschweren, bläulichen Sternen auf.

Die folgenden Diagramme (Abb. 105, 106) zeigen die HR-Diagramme von Cetus, Pisces (LGS 3) und Leo A.

In den Histogrammen ist die Sternentstehungsrate als Funktion der Zeit aufgetragen.

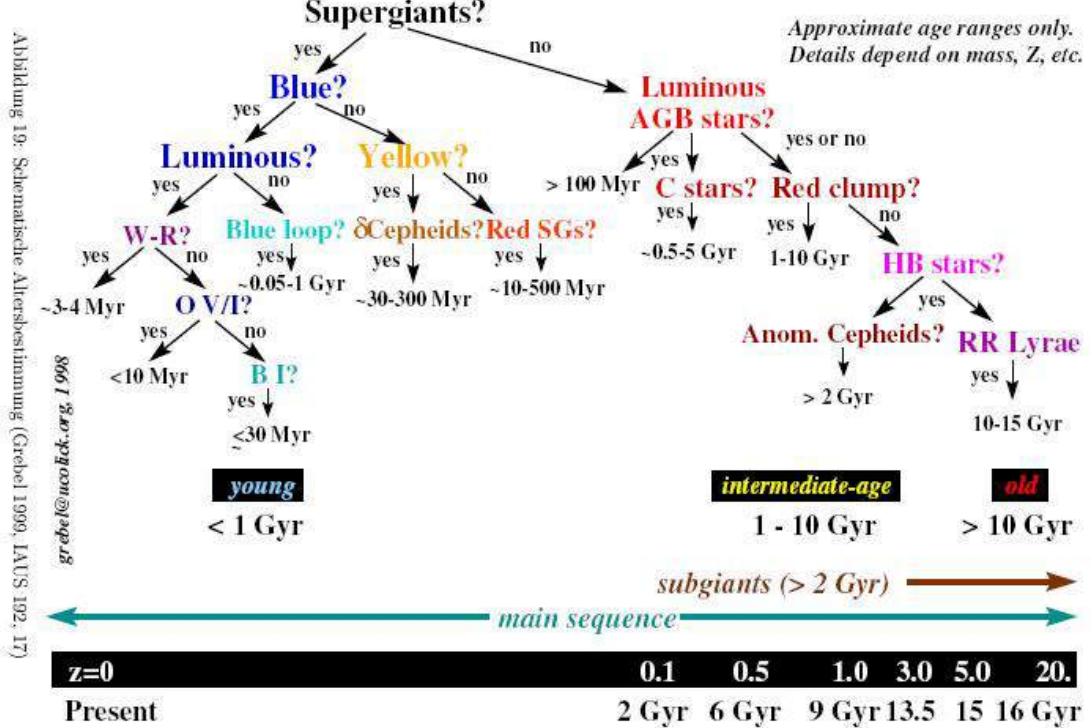


**Abbildung 105:** HR-Diagramme von Cetus, Pisces (LGS 3) und Leo A



**Abbildung 106:** Sternentstehungsraten aufgetragen gegen die Zeit. Cetus hat eine alte Komponente ( $>8$  Gyrs) an Sternen, die Sternentstehung hat sich auf dieses Zeitenfenster eng begrenzt. Ähnliches gilt für LGS 3. Anders ist die Verteilung in Leo A: hier dominieren jüngere Sterne über sehr alte. Leo A zeigt kontinuierlich hohe und durch zwei Peaks gekennzeichnete SF seit circa 7 Gyrs. Diese charakteristische Populationsverteilung spiegelt sich auch im HR-Diagramm nieder (stark besetzter Hauptreihenast). Leo A ist vom Typ dIrr, Cetus dagegen vom Typ dSph.

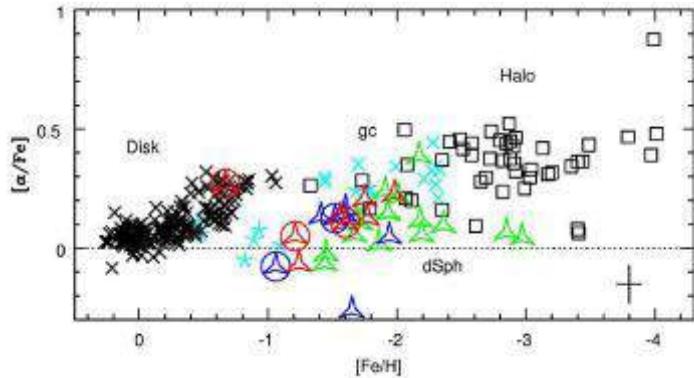
Nicht nur die Sternfarbe ist ein Indikator für das Populationsalter. Besser eignet sich das Abzählen von bestimmten Sterntypen um das Alter abzuschätzen. Dies wird in der folgenden Graphik (Abb. 107) verdeutlicht.



**Abbildung 107:** Populationsaltersbestimmung mithilfe von Sterntypen

Stellare Populationen sind weiters durch Elementenhäufigkeiten ausgezeichnet.  $\alpha$ -Elemente werden durch Kernkollaps-supernovae Typ II produziert. Diese SNe ereignen sich auf kleinen Zeitskalen und sind an die Sternenstehung gekoppelt. Eisenproduktion findet dagegen in alten Populationen statt, die SNe Typ Ia hervorbringen können. SNe Ia sind auf großen Zeitskalen zu finden. Diese zeitliche Diskrepanz überträgt sich in die Populationen und kann ebenso als schwacher Indikator für das Populationsalter herangezogen werden.

Neben dem Populationsalter kann mithilfe von Elementenhäufigkeiten auch die Abstammung, beziehungsweise die Genese von Sternen bestimmt werden. Die beobachtete Kopplung zwischen Halo- und dSph-Populationen weist auf einen Massenfluss zwischen den Komponenten hin. Satellitengalaxien scheinen sich am Halogas mit Elementen anzufüttern. Vice versa ist der Halo von Gezeitenströmen durchzogen, deren Ursprung oft zerrissene Satellitengalaxien sind.

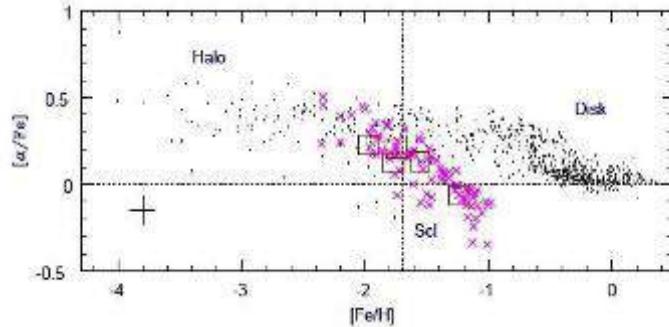


**Abbildung 108:** Normierte Elementenhäufigkeiten von  $\alpha$  – Elementen zu Eisen. Die Datenpunkte korrelieren zu unterschiedlichen Sternpopulationen in Satellitengalaxien und stellaren Komponenten der Milchstraße (Scheibe und Halo, sowie Kugelsternhaufen). Alle bunten Datenpunkte sind Populationen der Zwerggalaxien. Interessanterweise füllen die Sterne der Zwerge genau jene Lücke, die sich zwischen der galaktischen Scheibe und dem Halo erstreckt. Die Häufigkeiten von Eisen in Satellitengalaxien sind gleich jenen von Kugelsternhaufen,  $\alpha$  – Elemente sind in Kugelsternhaufen jedoch etwas häufiger.

### 5.10.2 Zeitskalen von Sternentstehungsepisoden aus Elementenhäufigkeiten

In „closed box“-Simulationen werden bei konstanten yields, Sauerstoff- und Eisendroduktionen von SN II, Eisenproduktion von SN Ia (Weißer Zwerg/Weißer Zwerg und Weißer Zwerg/Roter Riese - Interaktionen), die Elementenhäufigkeiten verglichen. Bei Datenpunkten aus diesen Simulationen, die  $\alpha$  – Element- mit Eisenhäufigkeit vergleichen, sind Alterseffekte festzustellen. So ist ein Altersbestimmung und der Gasverbrauch anhand bestimmter Vorläufersterne aus den Elementenhäufigkeiten möglich.

Da SNe II ein konstantes  $[O/Fe]$ -Verhältnis von circa 0.5 produzieren und das kontinuierlich auf kurzen Zeitskalen, und SNe Ia auf vergleichsweise langen Zeitskalen das ISM mit Eisen anreichern, ist die Sauerstoffproduktion unabhängig von dem stetig wachsenden Eisengehalt. Insgesamt nimmt jedoch das  $[O/Fe]$ -Verhältnis mit der Zeit ab. Hieraus ergibt sich ein möglicher Ansatzpunkt für die Altersbestimmung.



**Abbildung 109:** Relative Elementshäufigkeiten in der Milchstraße (Halo und Scheibe) sowie bei einer Satellitengalaxie. Der Versatz der rosa Datenpunkte lässt indirekt auf das Alter der Zwerggalaxie schließen.

Alleine aus den  $\alpha$ -Elementenhäufigkeiten lässt sich keine Altersbeziehung ableiten. Seltsamerweise scheinen Zwerggalaxien ihr ISM nur sehr ineffizient mit Metallen anzureichern. Daher kommt auch die Konstanz der  $\alpha$  – *Elemente*.

Anscheinend verlieren massearme Galaxien einen Großteil ihrer schweren Elemente an das IGM und ICM. Dieser Umstand ist leicht verständlich, da der Gravitationsdruck im Vergleich zu großen Galaxien nur sehr gering ausfällt und somit bei nur wenigen SNe das ganze Gas aus der Galaxie getrieben werden kann.

Trotzdem wird Sternentstehung in zwei Arten beobachtet: episodisch und kontinuierlich. Kontinuierliche Sternentstehung könnte mit Masseneinfall aus dem IGM und ICM, also mit der Akkretion von HVC („high velocity clouds“) zusammenhängen. Dabei fällt ständig HI-Gas in die Zwerggalaxie, die die Sternentstehung stimuliert.

Episodische Sternentstehung ist damit aber eher nicht zu erklären. Hier wird versucht das Problem mit „breathing“ zu lösen. Die Zwerggalaxie „atmet“ Gas aus, welches nach einer gewissen Zeitspanne durch Gravitation wieder kollabiert. Dieser Prozess wird von SNe und Sternwinden getrieben und soll sich zyklisch wiederholen.

„Breathing“ wird jedoch nicht favorisiert, da der Mechanismus sich auf zu wenigen Beobachtungen stützt und keine Metallanreicherung über längere Zeiträume befunden werden kann.

### 5.10.3 Radialer Metallizitätsgradient

Die radiale Metallizitätsverteilung in Satellitengalaxien zeigt zwei Effekte:

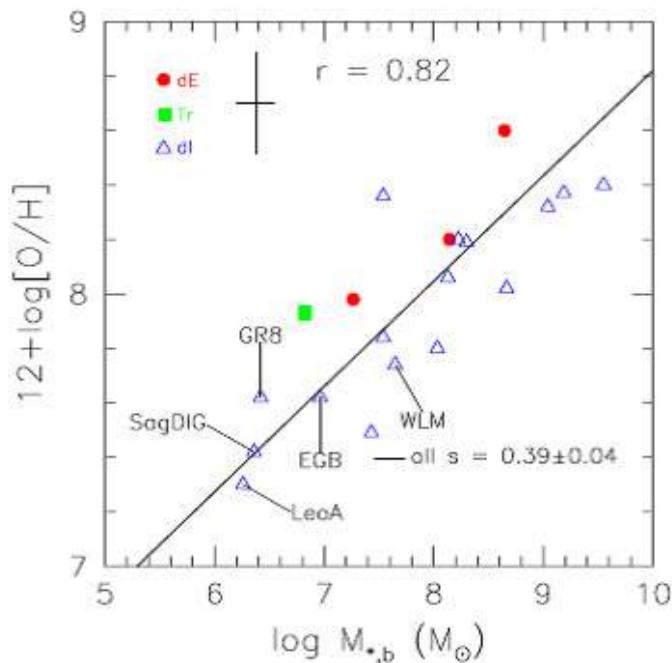
Fe/H : $r/r_c$  Kurven sind sehr flach (Zentrifugalkraft scheint die Elementanreicherung des Gases im Zentrum zu verhindern).

1. Unterschied zwischen dSphs und dIrrs: Irreguläre Typen haben einen deutlich geringeren [Fe/H]-Abfall bei großen Radien als elliptische Typen.

Generell sind die Kurven sehr konstant verglichen mit Riesengalaxien. (Venn et al., 2013) „Ultra faint dwarfs“ haben die kleinste Metallizität aller Zwerggalaxien; sie ist so gering wie die der Halo-Objekte. Es darf spekuliert werden, dass Satellitengalaxien einen wichtigen Beitrag zum Aufbau des Halos leisten. (Kirby et al., 2008, ApJ, 685)

Zwischen der Masse einer Galaxie und ihrem Sauerstoffgehalt (s. Abb. 110) ist ein klarer Zusammenhang erkennbar.

Generell gilt: Nicht nur die Häufigkeit von Sauerstoff in Galaxien steht in Verbindung mit der jeweiligen Masse. Plottet man die gesamte Metallizität gegen die Gesamtmasse, ergibt sich ein ähnlicher Verlauf.



**Abbildung 110:** Häufigkeit von Sauerstoff (O) in unterschiedlichen Galaxien gegen Sonnenmassen. Klein „r“ bezeichnet den Korrelationskoeffizienten (je näher dieser bei 1 liegt, desto besser korrelieren die Datenpunkte an eine vorgegebene Linie).

#### 5.10.4 „The population box“

Die „population box“ ist ein graphisches Werkzeug, um einen Überblick über die „star formation history“ (SFH) und die Geschichte der Zwerggalaxien überhaupt zu bekommen. In einem dreidimensionalen, kartesischen Koordinatensystem sind die Achsen so gewählt, dass die Sternpopulationen in ihrer Gesamtheit möglichst einprägsam beschrieben werden. Die Parameter der Achsenbezeichnung sind: Alter, Metallizität ([Fe/H]) und Sternentstehungsrate.

Aus den beobachteten Populationen werden diese Parameter ermittelt und die Sterne in die Box eingetragen. Schlussendlich entsteht ein „Gebirgszug“, dessen Kontinuität, Krümmung und Position die SFH der Galaxie wiedergibt.

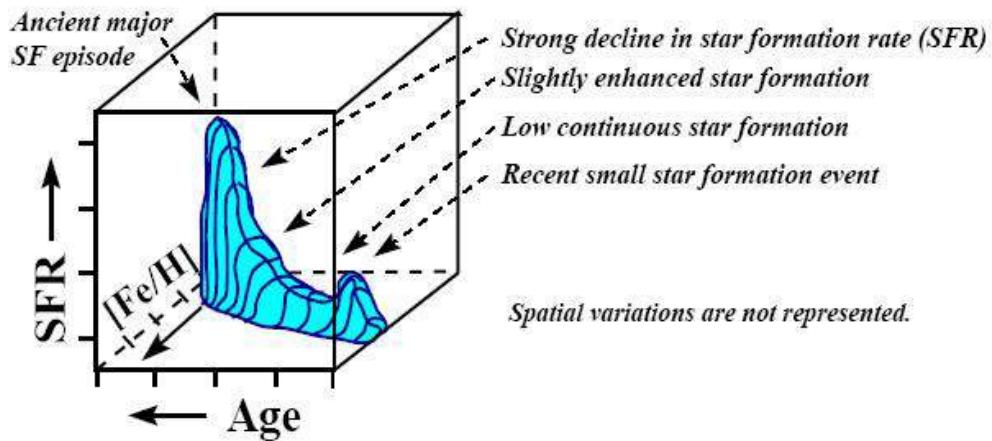
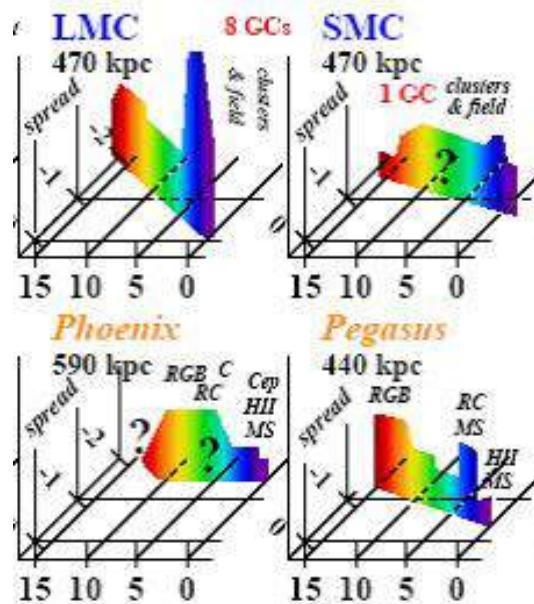


Figure 4: A sample population box for a fictitious galaxy.

**Abbildung 111:** „Population box“ einer fiktiven Galaxie mit Beschriftung



**Abbildung 112:** Boxen für Satellitengalaxien der Milchstraße. LMC zeigt stark erhöhte Sternentstehung in letzter Zeit, SMC produziert hingegen kontinuierlich Sterne. Phoenix ist ein Übergangstypus von dIrr zu dSph. Generell zeigen dIrrs stärkere Elementanreicherung und kurz zurückliegende Sternentstehung. (Graphik: Eva Grebel)

Aus den „population boxes“ kann beispielsweise erkannt werden, dass umso näher Satellitengalaxien an der Milchstraße liegen, desto geringer ihre Sternentstehungsrate ausfällt. Außerdem hat Sternentstehung keinen signifikanten Einfluss auf die Metallanreicherung. Daher kann der „breathing“-Mechanismus eher als Sonderfall betrachtet werden. Viel wahrscheinlicher ist, dass primordiales Gas ( $z \approx 10^{-2}$ ) von außen einfällt und die Metallizität des angereicherten Gases herabsetzt.

### 5.10.5 Gas in Zwerggalaxien

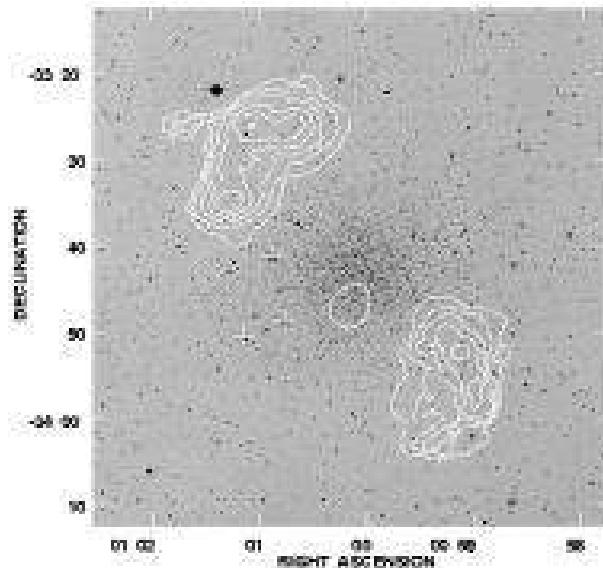
Wie schon vorhin muss wieder die Phänomenologie der zwei Typen – dIrrs und dSphs – herhalten, um die Prozesse in Zwerggalaxien zu erklären, die mit Gasen im Zusammenhang stehen.

dSphs sind nahezu gasfrei, können jedoch über Gaseinfall aus dem umgebenden Medium wieder angereichert werden.

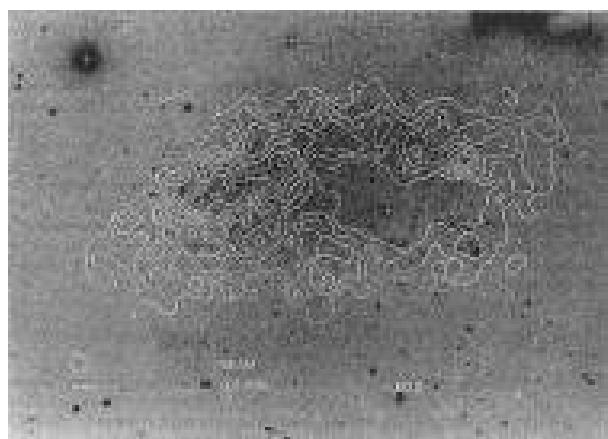
Sculptor DG ist umgeben von zwei Gaslobes, deren Isophoten kaum mit denen der optischen im Einklang sind. Geschwindigkeits zeigen, dass das HI-Gas ausströmt. (Carignan et al., 1988)

Bei NGC 205 wird hingegen eine flockenartige innere Struktur des Gases beobachtet, das an eine HCV ankkoppelt. In das System fällt offensichtlich Gas aus dem IGM ein und triggert in der Galaxie die Sternentstehung. (Welsh et al., 1998)

Generell sind Satellitengalaxien vielen dynamischen Kräften unterworfen, deren Auswirkungen sich auch in der Gasverteilung zeigen. Da Zwerggalaxien sehr massearm sind ( $10^6 \dots 10^{10} M_{\odot}$ ), ist es ein Leichtes Gas aus dem Potentialtopf zu treiben. Dabei verlieren die Zwerge oft ihr gesamtes Gasreservoir. Dadurch bricht die Sternentstehung ein und die Zwerggalaxie durchläuft einen Übergang von dIrr zu dSph. Außerdem kann Gas durch „ram pressure stripping“ (RPS) und Gezeitenkräfte verloren gehen.



**Abbildung 113:** Gasverteilung (Isophoten) in der Zwerggalaxie Sculptor (dSph), sie verliert Gas in zwei Lobes



**Abbildung 114:** Gasverteilung (Isophoten) in der Zwerggalaxie Leo A (dIrr). Im Gegensatz zu Sculptor hat sie große Gasvorräte

## 5.11 Gezeitenströme bei Satellitengalaxien

Satellitengalaxien, die ihrer Zentralgalaxie zu nahe kommen, erfahren tief greifende Deformationen. Aufgrund von Prozessen, die in Kapitel ??? beschrieben werden, bilden sich Gezeitenströme hauptsächlich entlang der Trajektorie der Zwerggalaxie, während diese fortschreitend im Potential der massereicheren Galaxie zerrieben wird. Kinematisch sind Gezeitenströme gut zu erkennen und legen Spuren zu ihrem Ausgangsort - zu der deformierten Satellitengalaxie.

Aus der Literatur sind viele Gezeitenströme bekannt. Um ein paar Beispiele zu nennen sind hier einige Ströme angeführt (die Distanzen sind heliozentrisch).

- Sagittarius Zwerg-elliptische Galaxie:  $D = 24 \text{ kpc}$
- Faint Bootes Stream:  $D \approx 60 \text{ kpc}$ ;  $M_V \approx -5.8 \text{ Mag}$
- Orphan (Ursa Minor II) Stream:  $D \approx 20 \text{ kpc}$ ;  $M_R \approx -7.5 \text{ Mag}$  (Belokurov et al. (2007) ApJ, 658)
- Hercules-Aquila Cloud:  $D \approx 15 \text{ kpc}$ ;  $M_V \approx -13 \text{ Mag}$

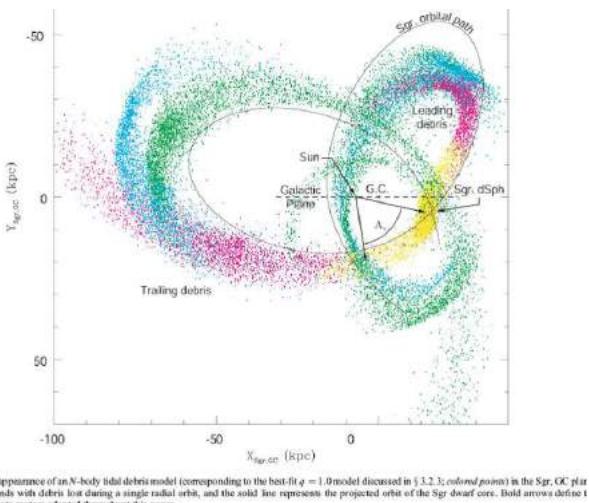
### 5.11.1 Sagittarius Zwerggalaxie SagDEG

Der Gezeitenstrom der Sagittarius Zwerg-elliptischen Galaxie ist eine Überdichte von Sternen, die sich polar und in Schleifen gewickelt über die Milchstraßenscheibe erhebt. Aufgrund der Kinematik kann vermutet werden, dass ein Minor-Merger-Event (s. Kapitel 6) der Strombildung vorausgegangen ist.

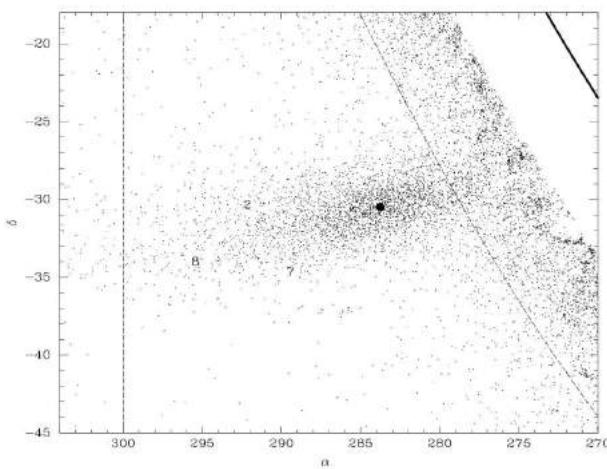
Der Sternstrom ist über  $360^\circ$  am Himmel verteilt und lässt sich durch seine Kinematik in unterschiedliche Epochen einteilen, er zeigt also zeitliche Variabilität. Südlich der Milchstraßenscheibe ist ein Knick auszumachen, dessen Ursprung eng mit den Magellan'schen Wolken zusammen zu hängen scheint. Die Ursache für diesen Strom ist wahrscheinlich eine Kollision des Sagittarius Stroms mit dem Magellan'schen Stroms.



**Abbildung 115:** Künstliche Darstellung des Stromes



**Abbildung 116:** Sternverteilung in der X-Y-Ebene um die Milchstraße. Verschiedene Stream-Epochen sind farblich hervorgehoben.



**Abbildung 117:** Zentralregion der Sgr Zwerggalaxie. Die Ziffern bezeichnen Aufenthaltsorte von Kugelsternhaufen. Der dicke, schwarze Kreis markiert die Position des Kugelsternhaufens M 54. ApJ preprint doi:10.1086/379504

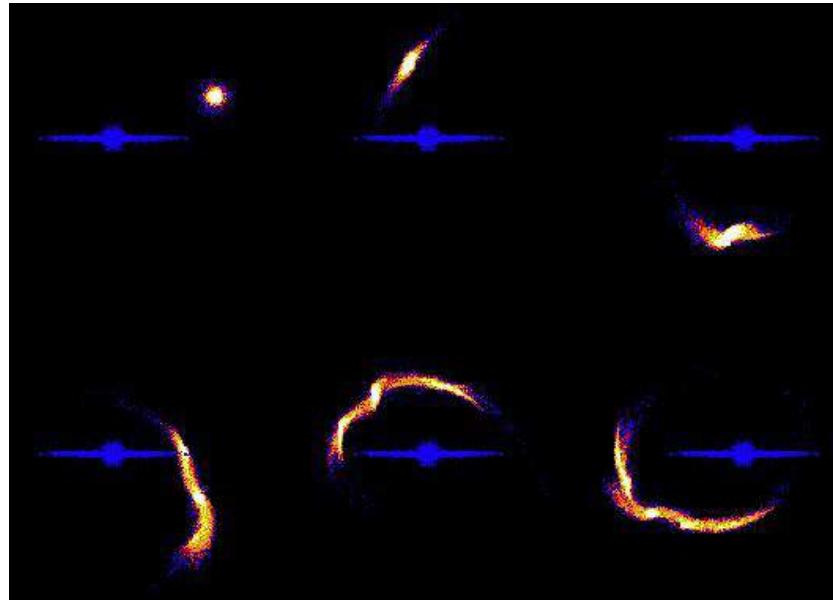
Der Kern der zerriebenen Satellitengalaxie befindet sich südlich (in galaktischen Koordinaten) des Milchstraßezentrums. Mit Hilfe des 2MASS Surveys kann die Überdichte, speziell an weit entwickelten Riesensternen, in dem komplexen Gezeitenstrom ausgemacht werden. Außerdem lassen Beobachtungen vermuten, dass die Satellitengalaxie ihr eigenes Kugelsternhaufensystem mitführt und sich fortschreitend mit dem der Mischstraße vermischt.

## 5.12 Akkretion von Satellitengalaxien

Zwerggalaxien und Satellitengalaxien sind ein wichtiger Teil der Kosmologie. Mit ihrer Hilfe soll erklärt werden, wie Galaxien anwachsen können, um die im lokalen Universum zahlreich beobachteten „gereiften“ Galaxien (wie die Milchstraße) erklären zu können. Im Prozess von galaktischem Kannibalismus könnten Satellitengalaxien aufgefangen und in die Zentralgalaxien integriert werden. Hierbei spricht man auch von Akkretion von Satellitengalaxien.

Computermodelle von kleinen, massearmen Zwerggalaxien, deren Orbits nahe an größeren Scheibengalaxien liegen, koinzidieren mit hoher Signifikanz mit den in der Natur beobachteten Systemen (s. „minor merger“).

Die vorbeiziehende Satellitengalaxie verliert Sterne an den Halo der größeren Scheibengalaxie und bildet schleifenförmige Gezeitenströme aus, dabei verbiegt und taumelt die Zwerggalaxie um ihre Figurennachse. Nach mehrmaligem Umlauf wird die Satellitengalaxie meist vollständig zerrieben, wobei kinematisch-unterscheidbare stellare Gezeitenströme im Halo der Zentralgalaxie zunehmend abgebaut werden.

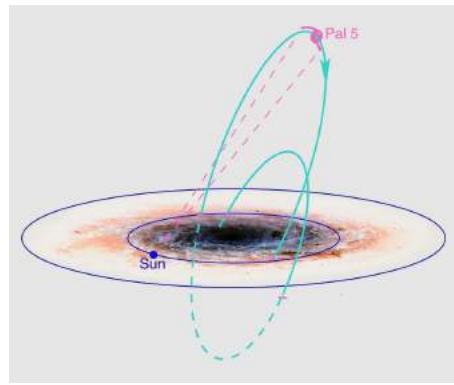


**Abbildung 118:** Numerische Simulation einer Annäherung einer Satellitengalaxie an eine größere Scheibengalaxie. Bereits nach dem zweiten Umlauf bildet der Satellit Gezeitenarme, die in ihrer Lineardimension die der Zentralgalaxie überragen. (Kathryn Johnston)

### 5.12.1 Phänomenologie

Vier Mechanismen, jene die folgen, können bei der Akkretion von Satellitengalaxien bei elliptischem Orbit beobachtet werden.

1. Streckung der Massen entlang der Trajektorie im Bereich des Perigalaktikon (kleinste Annäherung). Bei der größten Distanz, Apogalaktikon, setzt jedoch eine Stauung der Zwerggalaxie ein. Dies kommt durch Geschwindigkeitsdifferenzen des vorangehenden und nachziehenden Gebiets (der Zwerggalaxie) zustande.
2. Radiale Streckung durch das Gravitationsfeld der Zentralgalaxie.
3. Wirkung eines Drehmoments aufgrund der umlaufenden Masse.
4. Oszillierendes Äquipotential (=: Gezeitenradius), welches das Abströmen von Masse in die Gezeitenarme weiter unterstützt.



**Abbildung 119:** Schematische Darstellung der Trajektorie einer Satellitengalaxie, welche den Akkretionsprozessen unterworfen ist.

### 5.12.2 Gezeitenkraft auf Satellitengalaxien

Ebenso wie die Gezeitenkraft einen Wasserberg auf der mondzugewandten Seite der Erde erhebt, so wirkt auch auf eine ausgedehnte Zwerggalaxie – oder besser gesagt, auf deren Sterne und Gas/Staubkörper – eine Kraft mit differziellem Betrag. Die Kraft heißt Gezeitenkraft, oder in englischer Sprache „tidal force“. Formelmäßig kann die Gezeitenkraft wie folgt ausgedrückt werden.

$$F_{\text{tide}} \approx GM \frac{d}{D^3} \quad (5.4)$$

Zwerggalaxien die sich im Gravitationsfeld ausgehend von der Masse  $M$ , mit ihrem Zentrum in der Entfernung  $D$  bewegen, wirken Gezeitenkräfte  $F_{\text{tide}}$ .

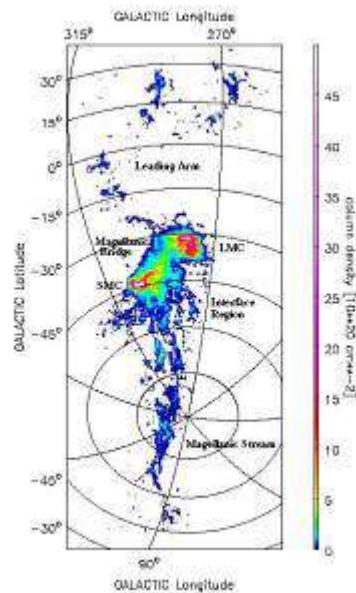
Da der Körper ausgedehnt ist, ergibt sich ein Spektrum von Kraftbeträgen, die von  $d$  abhängen und an verschiedenen Stellen im Körpervolumen ansetzen.

Dadurch wird ersichtlich, warum sich bei der Annäherung von Satellitengalaxien an die Zentralgalaxie ein lang gestreckter Schweif ausbildet. Im Grunde zerreibt die differentielle Rotation das einfallende Objekt, sobald die innere Gravitationsbarriere des Selbstdrucks überwunden ist.

Um auf die Analogie der Gezeitenkräfte im Erd-Mond-Wechselspiel zurückzukommen wird darauf hingewiesen, dass auch bei Satellitenakkretion eine „2-Mode“ im deformierten System auftritt. Der Mond erzeugt nicht nur auf der ihm zugewandten Seite einen Wasserberg, sondern auch auf der ihm abgekehrten Hemisphäre. Daraus folgt die Ausbildung eines Paares von voran- und hinterherlaufenden („leading“ and „trailing“) Gezeitenarmen, welche aus dem gestörten Satellitensystem heraustrreten. Es handelt sich um eine „2-Moden“ Deformation, die tangential in Bewegungsrichtung aus dem Massenzentrum ausrichtet.

Bei recht kleinen Entfernungen kommt es vor, dass der voranlaufende Gasarm seinerseits gestört, beziehungsweise unterdrückt wird. Der Grund liegt im zunehmend erwachsenen Staudruck (s. Kapitel ?????) an der der Zentralgalaxie zugewandten Seite.

Dieses Verhalten liegt unter anderem bei der LMC vor.



**Abbildung 120:** HI Radioaufnahme der Magellan'schen Wolken. Farbliche Bereiche korrespondieren mit der HI Säulendichte. Zu sehen sind der stark elongierte „trailing arm“ und der deformierte „leading arm“. (Brüns et al. 2004)

### 5.13 Satellitengalaxien der Milchstraße

Satellitengalaxien sind galaktische Körper (meist Zwerggalaxien), die gravitativ an das Milchstraßensystem gebunden sind. Auch wenn nicht endgültig geklärt ist, ob ein Objekt wirklich gravitativ gebunden ist, kann es als Satellitengalaxie bezeichnet werden, sobald ein Drehmoment – wie im Fall der Magellan'schen Wolken – auf die Zwerggalaxien einwirkt und dabei die Trajektorie verbiegt.

Im folgenden Abschnitt werden Beispiele für Satellitengalaxien gegeben.

### 5.13.1 Das Magellan'sche-Wolken-System

Seit Urzeiten sind der Menschheit zwei diffuse Nebelflecken abseits des Milchstraßenbands gut vertraut: die Magellan'schen Wolken. Aufgrund ihrer scheinbaren Größe können beide Nebel mit bloßem Auge ersehen werden, vorausgesetzt der Beobachter befindet sich südlich des Äquators.

So wurde ihrer auch der portugiesischen Seefahrer Ferdinand Magellan gewahr, dessen Namen sie in der westlichen Welt fortan trugen. Schon Magellan erkannte den strukturierten Charakter der Wolken, die aus Sternen, Dunkelwolken und Subnebeln zu bestehen schienen.



**Abbildung 121:** Magellan'sche Wolken am Nachhimmel über den „VLT Auxiliary Telescopes“ am Paranal Observatory in Chile. (ESO/Y. Beletsky)

Bei den zwei Nebelflecken handelt es sich tatsächlich um irreguläre Zwerggalaxien (dIrr), die in kleiner Distanz die Milchstraße passieren. Der optisch sichtbare Teil dieser Satellitengalaxien ist nur die Spitze des Eisbergs. Bei Untersuchung im Radiobereich, beispielsweise bei der 21cm Wellenlänge des HI, zeigt sich ein vollkommen anderes Bild. Die Zwerge sind umgeben von Gas, welches in seiner lang gezogenen Gestalt nahezu 90° des Himmels abdeckt. Dieser Komplex wird auch als „Magellan'sches System“ bezeichnet.

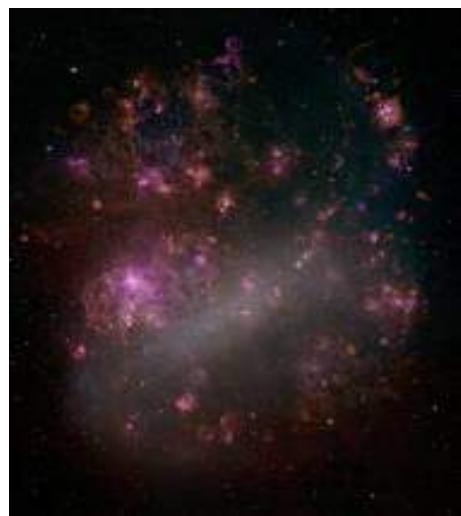
**Die Große Magellan'sche Wolke LMC** ist im Magellan'schen System die massereichste und - wie ihr Name impliziert – größere Satellitengalaxie. Sie liegt in einer Entfernung von 58 kpc von der Sonne und weist einen Durchmesser von 5-10 kpc auf. Die Sternkomponente von LMC zeigt ein balkenähnliches Feature, das nicht im Massenzentrum liegt. Der „Balken“ ist in einen riesigen Hof aus HI-Gas eingebettet, welcher mit circa 150 km/s rotiert. Jedoch sollte LMC nicht als Scheibe, sondern eher als ellipsoidales Objekt verstanden werden.

Das ionisierende Licht junger Sternhaufen, die seit wenigen Millionen Jahren in dem Volumen von LMC verteilt auftauchen, bläst große HII-Regionen auf. Darunter ist auch eines der größten Sternentstehungsgebiete in der Lokalen Gruppe zu finden, 30 Doradus.

Die erhöhte Sternentstehungsrate ist durch verdichtete CO-Wolken zu erklären, welche mithilfe von Staudruck zusammengeschoben werden. 30 Doradus befindet sich an jenem Ende des Magellan'schen Systems, welches der Milchstraße am nächsten liegt. Da keine älteren Evolutionskomponenten beobachtet werden, muss davon ausgegangen werden, dass der Staudruck erst momentan – also in den letzten 200-300 Millionen Jahren – kritische Werte erlangt hat.

Die heute beobachtete räumliche Annäherung des Systems scheint sich somit zum ersten, maximal zweiten Mal ereignet zu haben. Ferner wird erwartet, dass die Zwerngalaxien, nach ihrem Rendezvous mit Milchstraße, in den intergalaktischen Raum abdriften werden.

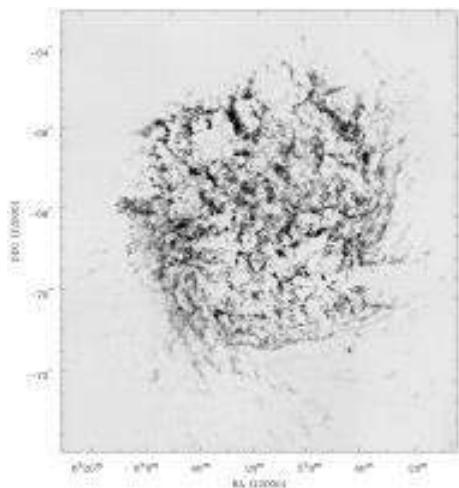
Die Abbildungen 122 bis 124 zeigen Aufnahmen der Großen Magellan'schen Wolke LMC in verschiedenen Wellenlängenbereichen (NOAO/AURA/NSF/S.Points, C.Smith und MCELS team; Spitzer Space Telescope/NASA; ApJ, 503:674–688, 1998):



**Abbildung 122:** optisch (zeigt die ausgedehnten HII-Regionen)

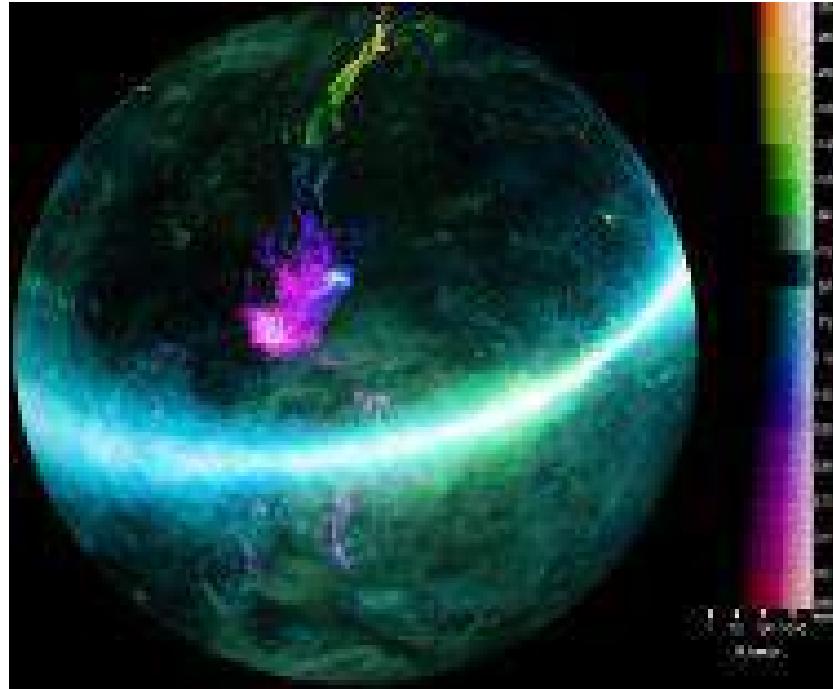


**Abbildung 123:** infrarot (Sternbalken und große Gaswolken)



**Abbildung 124:** 21cm (neutraler Wasserstoff)

### 5.13.2 Magellan'scher Strom



**Abbildung 125:** Magellan'scher Strom und Milchstraßenscheibe. Die Radialgeschwindigkeit ist farbcodiert.

**Als Magellan'schen Strom** bezeichnet man jene langgezogene Struktur, die die Große Magellan'schen Wolke (LMC) und Kleine Magellan'schen Wolke (SML) bilden; diese lässt deutlich auf Gezeitenwechselwirkung mit der Milchstraße schließen.

Der Strom wird hauptsächlich durch Gasteilchen gebildet, welche in Wechselwirkung mit dem Milchstraßenfeld aus dem Magellan'schen System gerissen werden und kollektiv eine Gasbrücke zwischen den Zwerggalaxien bilden. Beobachtbar ist der Strom in HI.

Von dem Strom ausgehend wird eine 2-Mode geformt (siehe Gezeitenkräfte), die am LMC-Ende gestört ist. Hier wirkt der Staudruck des IGM, ausgehend von der Milchstraße, und unterbricht den Fluss des zugewandten Gezeitenarmes. Jener Effekt macht sich zusätzlich durch intensive, aktuelle Sternentstehung in Gebiet 30 Dor bemerkbar, welches am Ansatzpunkt des unterdrückten Gezeitenarmes ansetzt.

Stark abgebremste Gaswolken des Magellan'schen Stromes können auf die Milchstraßenscheibe fallen (siehe HVC), wobei der Einfall der Magellan'schen Wolken, als Ganzes, unwahrscheinlich ist.

### 5.13.3 Räumliche Verteilung der Satellitengalaxien

Neben dem Magellan'schen System existieren noch viele weitere Satellitengalaxien, die an die Milchstraße gebunden sind. In folgender Abb. 126 sind einige mit ihren grundlegenden Eigenschaften aufgelistet und in einem dreidimensionalen Koordinatensystem eingetragen.

Name	$\alpha$ (J2000)	$\delta$ (J2000)	$l$ [°]	$b$ [°]	type	$M_B$ [mag]	$V_\odot$ [km/s]	$\cos \theta$	$D_{LG}$ [Mpc]
Milky Way	17 <sup>h</sup> 45 <sup>m</sup> 7 <sup>s</sup>	-29°00'	0.00	0.00	Sb/Sc	-20.5	16	-0.052	0.440
Sagittarius	19 <sup>h</sup> 00 <sup>m</sup> 0 <sup>s</sup>	-30°30'	6.00	-15.00	dSph	-13.0	140	0.068	0.448
LMC	05 <sup>h</sup> 23 <sup>m</sup> 6 <sup>s</sup>	-69°45'	280.46	-32.89	Ir III-IV	-18.5	278	-0.793	0.469
SMC	00 <sup>h</sup> 52 <sup>m</sup> 6 <sup>s</sup>	-72°48'	302.80	-44.30	Ir IV-V	-17.4	158	-0.571	0.468
Ursa Minor	15 <sup>h</sup> 08 <sup>m</sup> 8 <sup>s</sup>	67°12'	104.95	44.80	dSph	-7.8	-261	0.643	0.419
Draco	17 <sup>h</sup> 20 <sup>m</sup> 0 <sup>s</sup>	57°50'	86.37	34.72	dSph	-8.9	-277	0.775	0.413
Sextans	10 <sup>h</sup> 13 <sup>m</sup> 0 <sup>s</sup>	-01°37'	243.50	42.27	dSph	-8.0	230	-0.689	0.497
Sculptor	00 <sup>h</sup> 59 <sup>m</sup> 9 <sup>s</sup>	-33°42'	287.54	-83.16	dSph	-10.0	110	-0.046	0.426
Carina	06 <sup>h</sup> 41 <sup>m</sup> 6 <sup>s</sup>	-50°58'	260.11	-22.22	dSph	-10.2	228	-0.874	0.502
Fornax	02 <sup>h</sup> 40 <sup>m</sup> 0 <sup>s</sup>	-34°27'	237.29	-65.65	dSph	-11.9	45	-0.270	0.437
Leo II	11 <sup>h</sup> 13 <sup>m</sup> 5 <sup>s</sup>	22°10'	220.17	67.23	dSph	-8.9	90	-0.298	0.561
Phoenix	01 <sup>h</sup> 49 <sup>m</sup> 0 <sup>s</sup>	-44°52'	272.49	-68.82	dIr/dSph	-8.9	56	-0.295	0.591
NGC 6822	19 <sup>h</sup> 44 <sup>m</sup> 9 <sup>s</sup>	-14°48'	25.34	-18.39	dIr	-15.8	-58	0.382	0.653

Abbildung 126: Satellitengalaxien im Milchstraßensystem

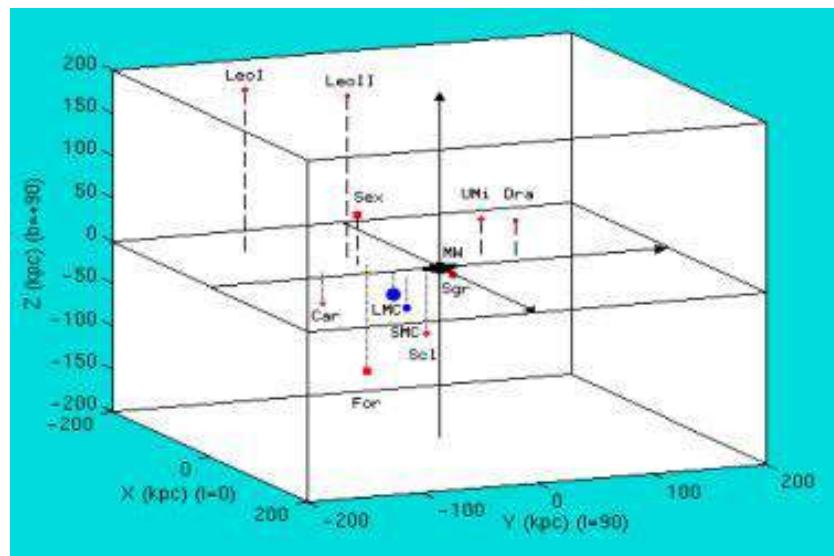
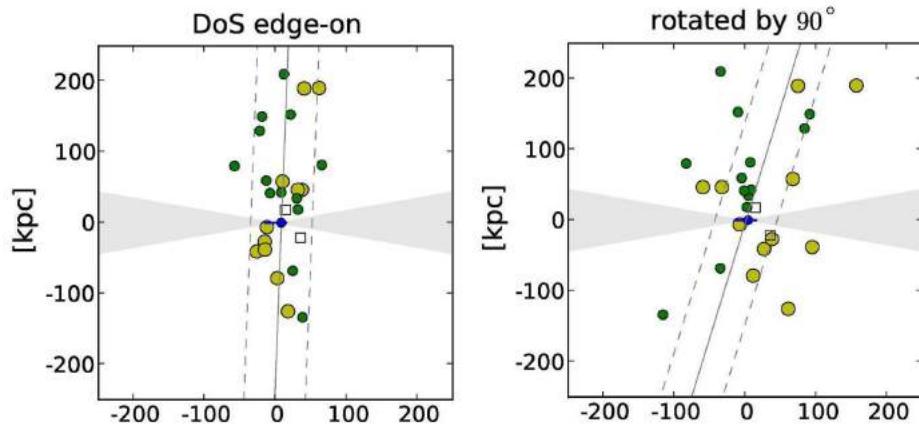


Abbildung 127: Verteilung von bedeutenden Satellitengalaxien um die Milchstraße

#### 5.13.4 Scheibenstruktur der Lokalen Zwerggalaxienverteilung

Viele der lokalen Zwerg- und Satellitengalaxien scheinen nicht isotrop verteilt zu sein. Tatsächlich wird mit großer Signifikanz eine Scheibenstruktur in der dreidimensionalen Verteilung der nahen Zwerggalaxien beobachtet.

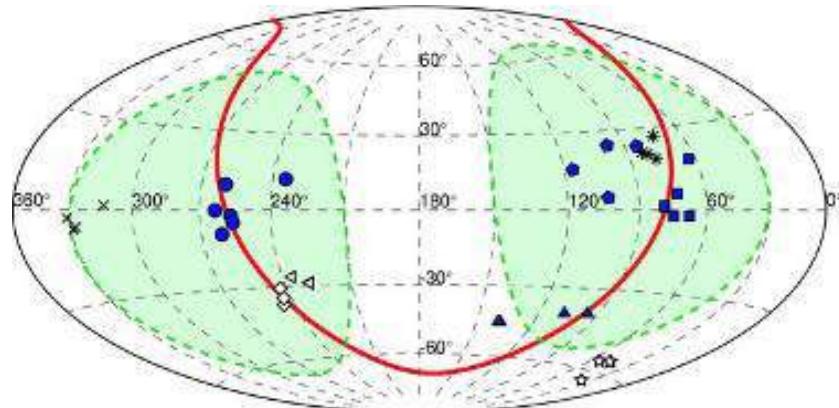


**Abbildung 128:** X-Y-Position von nahen Zwerggalaxien. (Kroupa et al. (2010) A&A, 523)

Um das Rätsel der Anisotropie in der Verteilung zu lösen, wurde das Modell des Gruppeneinfalls diskutiert. Hierbei bewegen sich die Zwerggalaxien als Gruppe in den DMHalo der Milchstraße.

Die These wird auch dadurch unterstützt, dass auch M31 eine ringförmige Verteilung von Zwerggalaxien aufweist.

Interessanterweise besteht eine starke Korrelation zwischen den Rotationsachsen der dSphs in der Lokalen Gruppe. Somit ist die Möglichkeit einer weit in der Vergangenheit stattgefundenen Produktion einiger „Tidal Dwarfs“ mittels Gezeitenkräften abgetrennter Materiekklumpen, die sich zu Zwerggalaxien entwickelt haben, nicht auszuschließen. Dieses Szenario würde die Ringstruktur teilweise erklären.



**Abbildung 129:** Projizierte Position einiger Zwerggalaxienassoziationen in supergalaktischen Koordinaten. Deutlich ist die Ringstruktur – durch die rote Linie gefüllt – sichtbar. (Manuel Metz et al. 2009 ApJ 697 269)

Allgemein wird die „group infall“ Hypothese als zu unwahrscheinlich angesehen.

## 5.14 Das M31-System



**Abbildung 130:** M31 mit Satellitengalaxien M 32 und NGC 205 (LRGB)

Die lokale Galaxiengruppe besitzt zwei Massenzentren: M31 und die Milchstraße. M31 ist die nächstgelegene, größere Spiralgalaxie, deren Masse ausreichend groß ist, um Satellitengalaxien anhäufen zu können. Daher kommt es, dass etwa 35 Satellitengalaxien bei M31 zu finden sind (Yniguez et al., 2014, Mon. Not. R. Astron. Soc.). M33 ist Teil des M31-Systems.

Die planare Struktur, der die Anordnung von Milchstraßenzwergen folgen, ist auch im

M31-System zu finden, wobei die Scheibenwinkel andere Beträge aufweisen und sogar orthogonal zueinander stehen. Dieser Umstand lässt den Rückschluss auf eine Kopplung der beiden Satellitengalaxiensysteme zu (Conn et al., 2013, ApJ). Außerdem müssen einige der nahen Satellitengalaxie weder M31 noch der Milchstraße, sondern der Lokalen Gruppe als Ganzes zugeordnet werden.

*Satellite galaxies around the Milky Way and M31*

Name	$d_{\text{M31}}$ [kpc]	$L_V$ [ $L_\odot$ ]	Discovered	Name	$d_{\text{MW}}$ [kpc]	$L_V$ [ $L_\odot$ ]	Discovered
M31	-	$2.6 \times 10^{10}$	-	Milky Way	-	$2.0 \times 10^{10}$	-
M32	$23^{+43}_{-17}$	$2.9 \times 10^8$	1749	LMC	$49 \pm 3$	$2.2 \times 10^8$	-
M33	$209^{+7}_{-5}$	$2.8 \times 10^9$	1764	SMC	$78 \pm 4$	$5.9 \times 10^8$	-
NGC205	$42^{+27}_{-35}$	$3.7 \times 10^8$	1783	Sculptor	$79 \pm 4$	$7.1 \times 10^8$	1937
NGC185	$185^{+16}_{-10}$	$1.8 \times 10^8$	1787	Fornax	$140 \pm 8$	$1.5 \times 10^7$	1938
NGC147	$120^{+11}_{-10}$	$1.4 \times 10^8$	1829	Leo I	$254 \pm 30$	$4.9 \times 10^6$	1950
IC10	$252^{+11}_{-5}$	$8.6 \times 10^7$	1888	Leo II	$208 \pm 12$	$9.4 \times 10^6$	1950
AndI	$71^{+34}_{-13}$	$4.5 \times 10^9$	1971	Ursa Minor	$68 \pm 3$	$2.8 \times 10^5$	1954
AndII	$198^{+11}_{-10}$	$9.4 \times 10^9$	1974	Draco	$76 \pm 5$	$2.8 \times 10^5$	1954
AndIII	$88^{+27}_{-10}$	$1.0 \times 10^9$	1974	Carina	$103 \pm 5$	$4.9 \times 10^5$	1977
Pisces	$208^{+14}_{-2}$	$9.4 \times 10^5$	1976	Sextans	$89 \pm 4$	$5.4 \times 10^5$	1990
AndV	$115^{+8}_{-4}$	$7.1 \times 10^5$	1998	Sagittarius	$20 \pm 4$	$8.6 \times 10^7$	1994
AndVI	$269^{+5}_{-3}$	$3.4 \times 10^9$	1999				
AndVII	$210^{+5}_{-6}$	$1.8 \times 10^7$	1999				
AndIX	$186^{+20}_{-57}$	$1. \times 10^6$	2004	Ursa Major I	$105 \pm 10$	$1.4 \times 10^4$	2005
AndX	$126^{+34}_{-18}$	$1.5 \times 10^5$	2006	Boötes I	$64 \pm 6$	$2.8 \times 10^4$	2006
AndXI	$103^{+24}_{-5}$	$4.9 \times 10^4$	2006	Hercules	$145 \pm 13$	$3.7 \times 10^4$	2006
AndXII	$178^{+35}_{-72}$	$3.1 \times 10^4$	2006	Canes Ven. I	$230 \pm 20$	$2.4 \times 10^5$	2006
AndXIII	$116^{+58}_{-1}$	$4.1 \times 10^4$	2006				
AndXIV	$161^{+59}_{-2}$	$1.8 \times 10^5$	2007				
AndXV	$178^{+21}_{-20}$	$4.9 \times 10^3$	2007				
AndXVI	$321^{+27}_{-39}$	$4.1 \times 10^5$	2007				
AndXVII	$70^{+24}_{-22}$	$2.1 \times 10^5$	2008				
AndXIX	$114^{+33}_{-3}$	$4.5 \times 10^5$	2008				
AndXX	$130^{+21}_{-4}$	$2.8 \times 10^5$	2008				
AndXXI	$134^{+11}_{-5}$	$7.8 \times 10^4$	2009				
AndXXII	$270^{+21}_{-54}$	$5.4 \times 10^4$	2009				
AndXXIII	$129^{+6}_{-2}$	$1.0 \times 10^6$	2011				
AndXXIV	$166^{+22}_{-25}$	$9.4 \times 10^4$	2011				
AndXXV	$93^{+48}_{-8}$	$6.5 \times 10^5$	2011				
AndXXVI	$104^{+116}_{-2}$	$5.9 \times 10^4$	2011				
AndXXVII	$478^{+44}_{-426}$	$1.2 \times 10^5$	2011				
AndXXXVIII	$999^{+17}_{-2}$	$2.1 \times 10^5$	2011				
AndXXIX	$188^{+35}_{-1}$	$1.8 \times 10^5$	2011				

**Abbildung 131:** Satellitengalaxien im M31-System, verglichen mit jenen um die Milchstraße. Hydrostatische Modelle weisen darauf hin, dass die Milchstraße deutlich höhere Zwerggalaxiendichte – bei Radien größer als 100 kpc - aufweisen sollte, als bis zum heutigen Tage beobachtet wird. (Yniguez et. al., 2014, Mon. Not. R. Astron. Soc.)

### 5.14.1 Auswahl an bedeutenden Satellitengalaxien im M31-System

**Die Zwerg-elliptische Galaxie NGC 205** ist der zweithellste Begleiter der Andromeda Galaxie und zeigt erhöhte Sternentstehung nahe des Zentrums, deutlich in Abb. 132 durch bläuliche Verfärbung erkennbar. Historisch scheint NGC 205 permanent Metalle zu bilden und ihr ISM damit anzureichern. Ansonsten wird die Satellitengalaxie von einer sehr alten Sternpopulation dominiert, deren kumulatives Licht eine deutliche Deformation in den Isophoten aufweist. Zurückzuführen ist dieser Umstand auf die Interaktion mit der sehr nahe gelegenen Galaxie M31. So kann auch die anhaltende Sternenstehung erklärt werden: Gas fließt aus der Umgebung von M31 zu NGC 205 ab, während die Zwerggalaxie enge Orbits um die massereiche Andromedagalaxie ausführt.



**Abbildung 132:** NGC 205. Bild von SDSS (Filter: UGRIZ). (Baade, W. 1951.  
Publ. Univ. Mich. Obs. 10: 7)

**M32 oder NGC 221** ist eine äußerst sphärische und kompakte Zwerggalaxie, 22' entfernt vom Zentrum von M31 und liegt hinter der galaktischen Scheibe. M32 beherbergt ein Schwarzes Loch im Zentrum mit  $10^8 M_{\odot}$ . Chemisch ist die Zwerggalaxie mit einer sehr alten und vielen jüngeren, metallreichereren Populationen durchmischt. Insgesamt erscheint M32 eher zur Gruppe der elliptischen Galaxien zu gehören als zu dSphs. Es wird angenommen, dass M32 die Scheibe von M31 durchschlagen hat und dabei ihre die äußeren Massenschichten mitsamt Kugelsternhaufen verloren gegangen sind.



**Abbildung 133:** NGC 221. Bild Francione Fabrizio.

**NGC 147 und NGC 185** sind dSphs und bilden ein physikalisches Paar. Obwohl sie zur Gruppe der sphäroidalen Zwerggalaxien gehören, zeigen beide Sternentstehungsraaten, die eher in dIrrs erwartet werden.



**Abbildung 134:** NGC 147 (2MASS Aufnahme) und NGC 185 (BVR)

Weitere Satellitengalaxien im M31-System sind And VII und And VI.



**Abbildung 135:** And VII und And VI

## 6 Interaktion von Galaxien

### 6.1 Galaktische Winde

#### 6.1.1 Einführung

Die Frage nach der Entstehung galaktischer Winde (GW) beschäftigt Wissenschaftler seit ihrer ersten Beobachtung vor knapp 50 Jahren in M82. Allerdings konnten nur erstaunlich wenig Winde eindeutig mit AGN und Starbursts in Verbindung gebracht werden.

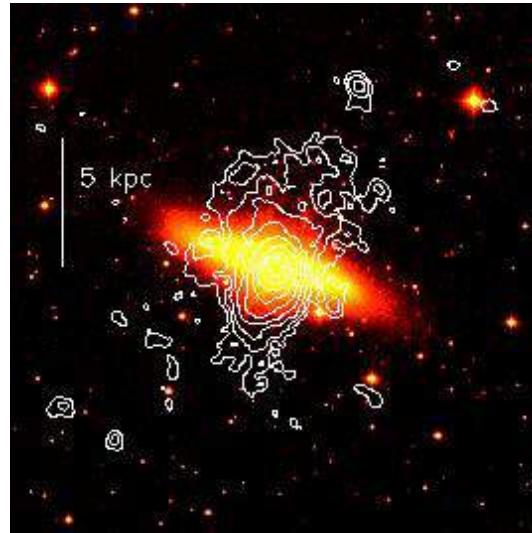
#### 6.1.2 Grundlegende Physik galaktischer Winde

**Starburst getriebene Winde** Starburst getriebene Winde werden von der mechanisch auf das Gas wirkenden Energie der Supernovae (SNe) und stellaren Winde (SW) angetrieben, die durch die höhere Sternentstehungsrate vermehrt auftreten. Um die Sternrevolution mit Modellen beschreiben zu können, müssen oft wahre Parameterschlachten geführt werden.



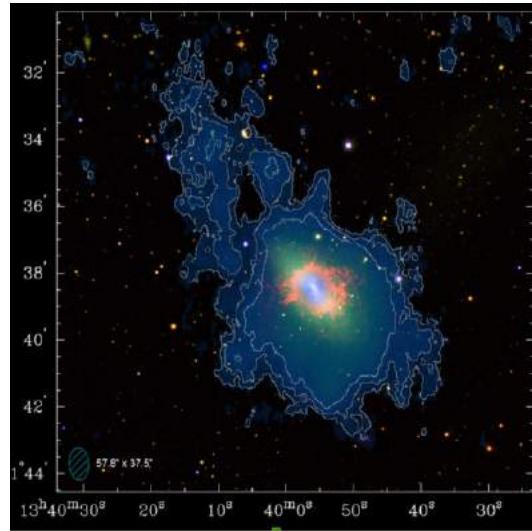
Abbildung 136

Dazu zählen eine Variation an Massenlimits für die IMF, eine Variation (lokal/global) der Metallizität in einer Galaxie sowie auch Veränderungen der Sternformationsrate (SFR) über die Zeit. Dadurch wurde es möglich die Winde(Massenverlust) von Wolf-Rayet (W-R) Sternen so zu modellieren, dass sie auf die Beobachtungen zutreffen. Allerdings wird häufig auf ausreichend genaue theoretische und empirisch gewonnene Daten zurückgegriffen.



**Abbildung 137**

Die Winde von OB Sternen dominieren bis ungefähr 3Myr nach dem Starburst. Von 3-6Myr dominiert der Massenverlust durch die W-R Sterne. Ab 6 Myr sind die SNe die stärkste treibende Kraft in einer Starburst Galaxie, erst wenn die letzten Sterne ( $\approx 8M_{\odot}$ ) nach ungefähr 40Myr kollabieren endet die Wirkung des Starburst auf das ISM allmählich. Allerdings muss auch der Strahlungsdruck der Starburst-Sterne und der der SNe nicht vernachlässigt werden, da er in dichten Gasen einen großen Anteil an der treibenden Kraft haben kann (siehe HII-Regionen). Üblicherweise sind SW nur in Starbursts relevant, die eine hohe Zahl an massereichen Sternen ( $> 60M_{\odot}$ ) produzieren, wobei das nur für die ersten 10 Myr nach dem Starburst gilt. Der Hauptgrund für GW sind daher die SNe. Aufgrund der nicht homogen auf die Scheibe verteilten Gasmasse, welche den Starburst ausgelöst hat, sind auch die SFR nicht global zu betrachten. Dadurch entstehen Ansammlungen von jungen Sternpopulationen. Diese Ansammlungen interagieren anfangs sehr schnell durch SW und später durch SNe. Diese Interaktion mit dem umgebenden Gas und die räumliche Inhomogenität der Sternzahl erzeugen sehr schnell Superbubbles, Chimneys und HI-Löcher die von einer hohen Metallizität ( $Z > Z_{\odot}$ ), Temperatur und einer durch die extremen Bedingungen hervorgerufenen hohen Ionisation des Gases ausgezeichnet sind. Wie viel Energie auf das umgebende Material Druck und Aufheizung bewirken kann, ist allerdings sehr stark von den Eigenschaften der Umgebung abhängig. Ist die treibende Kraft in einem Chimney groß genug so wird das Material, welches sich in einer größeren galaktischen Höhe befindet, so stark beschleunigt, dass es so hohe Fluchtgeschwindigkeiten erreicht, dass das Gas zu geringen Teilen dem Gravitationspotential der Galaxie entkommen kann. In Zwerg-elliptischen Galaxien (DEs, NGC 5253 folgende Abb) können die treibenden Kräfte sogar so groß werden, dass das gesamte Gasmaterial der Galaxie herausgepresst und in das IGM übergeführt wird.



**Abbildung 138**

**AGN betriebene Winde** Nicht nur Starbursts können Galaxie intern so hohe Energien freisetzen, dass es zu einem GW kommen kann. Es ist überaus wahrscheinlich, dass sich im Zentrum jeder Galaxie ein supermassereiches schwarzes Loch (SMBH) befindet, welches üblicherweise nur sehr langsam Masse akkretieren kann da der Dehimpuls des einkommenden Materials erst abtransportiert werden muss. Wenn allerdings Wolken aus dem IGM in das Zentrum der Galaxie fallen kann die Massenakkretion sogar ungefähr  $100M_{\odot}/yr$  betragen. Leuchtschwache AGN haben typischerweise Akkretionsraten größer als  $0.001M_{\odot}/yr$ , Seyfert Galaxien von ungefähr  $1M_{\odot}/yr$  und Quasare sogar  $100M_{\odot}/yr$ . Ein Großteil der im Akkretionsprozess freigesetzten Energie kann GW antreiben. Strahlung kann beispielsweise durch Elektronen-Streuung, Ionisation, Streuung und Absorption an Staub einen hohen Druck aufbauen. Wobei die Elektronen-Streuung vernachlässigbar ist, da ein Elektronengas optisch sehr dünn ist. Wichtiger ist der Prozess der Streuung und Absorption an Staub, welcher allerdings falls er sich zu nahe an der Quelle befindet aufgebrochen und somit sublimiert wird. Wenn es eine sehr hohe Ionisation gibt spielt der Staub sogar eine dominante Rolle da er dann eine höhere Absorptionsrate aufweist als die Atome, bei geringerer Ionisation in leuchtschwachen AGN und low-ionization nuclear emission-line regions (LINER) nimmt er keine tragende Rolle ein, da in diesen Gebieten die Absorption von Atomen dominiert. Es finden sich Gebiete in denen Compton-Heizung sehr effektiv ist und das umgebende stark ionisierte Material immens aufheizt. Bei sehr hohen Temperaturen ( $10^6 - 10^7 K$ ) und extremer Ionisation stellt sich ein Gleichgewicht zwischen Compton-Kühlung und Compton-Heizung ein. In diesen Gebieten kann die Schallgeschwindigkeit die Rotationsgeschwindigkeit übersteigen und somit zu einer Fluchtgeschwindigkeit des Gases führen, die ausreicht um dem Potential zu entkommen. Diese exotischen Bedingungen sind aber nur sehr nahe der Quelle zu finden und somit könnte diese Art von Wind seinen Ursprung in direkter Umgebung des AGN haben. Im Gegensatz zu Starburst GW sind die Compton-geheizten

AGN GW entlang der kleinen Halbachse der Akkretionsscheibe orientiert und stehen nicht notgedrungen senkrecht auf die galaktische Scheibe. Nicht nur die in Form von Strahlung freigesetzte Energie spielt eine entscheidende Rolle, auch Magnetfelder (MF) sind nicht zu vernachlässigen. Numerische Simulationen zeigen, dass in einer schwach magnetisierten Akkretionsscheibe (ausgelöst durch ein wenig magnetisiertes SMBH) können durch Änderungen der Distanz und Rotationsgeschwindigkeiten MF bedingte Turbulenzen auftreten. Diese entstehen durch die Zugkräfte die ein MF auf ein Teilchen ausübt falls dieses eine Beugung des MF hervorruft. Durch diesen Effekt bildet eine Akkretionsscheibe Koronae aus. Diese Koronae können durch die Zentrifugalkraft weiter angetrieben werden sodass das Material einer Korona aus der Galaxie entkommen kann. Dieser Effekt könnte die Ursache für die Jets sein, die Quasare ausbilden. Diese Jets heizen das umgebende ISM und falls sie dieses durchdringen haben ebenfalls das IGM. Wie stark der Effekt ist hängt sowohl von den Quellbedingungen (bspw. Ausrichtung und Stärke des Ausflusses) als auch von den Umgebungsbedingungen (bspw. Dichte und Verteilung des AGN umgebenden ISM) ab. Jets in leuchtschwachen AGN sind entweder nicht vorhanden oder kaum relativistisch und nur wenig orientiert.

**Entwicklung der Wind betriebenen Bubbles** Analog zu den SW getriebenen Bubbles, Superbubbles und Chimneys treiben Starburst und AGN Winde das nicht gestörte ISM weg. Anfangs gibt es eine Phase der ungebremsten Expansion, da der Druck des Windes und der Strahlung den Gegendruck des Gases bei weitem übersteigt. In dieser adiabatischen Expansionsphase kühlt das Gas nur kaum durch Abstrahlen. Dort wo das Gas auf das ISM trifft entsteht eine Schockfront die von der Ionisation des Umgebungsmaterials ausgezeichnet ist, diese Schockfront breitet sich anfangs ungehemmt aus und schiebt das ISM wie ein Schneepflug vor sich her. Wenn genug ISM geballt wurde steigt der Gegendruck und die Front kann nicht mehr ungehindert vorankommen. Dieser Effekt zieht sich solange bis die Schockfront komplett zum Erliegen gekommen ist und eine Blase entstanden ist. Die Blasen die durch AGN und Starbursts entstehen sind aufgrund der um einiges höheren Energien der Winde auch um ein Vielfaches ausgedehnter als die Bubbles die von HII-Regionen gebildet werden. Diese Effekte sind von der Stärke des Starburst und AGN sowie der Dichte und Verteilung des ISM abhängig. Da diese Bubbles die Ausdehnung und die ungehinderte Expansionsphase die einer typischen HII-Region um ein Vielfaches übersteigen bilden sich sehr große Chimneys aus. Selbst bei HII-Regionen können diese Material in das Halo transportieren, welches allerdings typischerweise wieder auf die Scheibe zurückfällt. Bei den Chimneys von AGN und Starbursts kann es allerdings leicht passieren, dass Gas aus der Galaxie hinausgetrieben wird. Für die Gebiete in denen eine Flucht aus der Galaxie unmöglich ist kann man eine grobe dennoch ausreichend genaue Einteilung finden:

1. energy injection zone (Gebiet in dem die Masse/Energie in das ISM abgegeben wird)
2. free-flowing supersonic outflow (ungebremster Wind/Energiefluss)
3. shock zone (Region in der das abgegebene Material das ISM trifft und ionisiert)

4. thin,dense shocked shell(dünne Schale mit großer Dichte)
5. undisturbed ISM

## 6.2 Intergalaktisches Gas

### 6.2.1 HI im IGM

**Hochgeschwindigkeitswolken** Oort äußerte 1956 die Vermutung, dass es Wolken aus neutralem, atomaren Wasserstoff (HI) geben könnte, die sich mit hohen Radialgeschwindigkeiten relativ zu galaktischen HI bewegen könnten. 1963 konnte man durch die Verschiebung der 21cm Linie Wolken nachweisen, dass das gemessene Gas nicht in Einklang mit der Galaxienrotation ist. Dies war der Nachweis von HVC, nach und nach wurde versucht ihnen typische Radialgeschwindigkeiten zu zuweisen, was allerdings Probleme mit sich bringt. Einerseits ist der festgelegte Bereich [-100,-70],[70,100]km/s physikalisch nicht begründbar, andererseits gibt es Bereiche am Himmel, die trotz einer solchen Geschwindigkeit noch mit der Rotation der Galaxie in Einklang gebracht werden können. Wakker legte daher 1991 eine Definition fest die dieses Problem umging. Er legte fest, dass eine Wolke eine Hochgeschwindigkeitswolke ist wenn diese Geschwindigkeiten aufweist, die der galaktischen Rotation in diesem Bereich um 50km/s übersteigt. Es gibt eine große Variation an Dichte und Ausdehnung der HVC. Der Ursprung mancher HVCs konnte schon früh geklärt werden, wie die des Magellanschen Stroms (MS). Dieser wurde entweder durch Gezeitenkräfte (entweder MWG < – > MC oder LMC < – > SMC) oder einer Wechselwirkung mit dem IGM aus den beiden MC herausgerissen. Selbiges gilt auch für den Leading Arm. Allerdings kann man bei vielen HVCs keine eindeutige Herkunft und Entstehungsgeschichte nachweisen. Es gibt mehrere Theorien zu deren Ursprung. Unter anderem gab es die Überlegung, dass SN-Explosionen diese HVC auswarf und diese nun zurückfallen (sog. Galactic Fountain folgende Abbildung in II.1.a). Eine andere war jene, dass es einen Ring aus HI in 90 kpc Entfernung gibt. Beide waren mit den Beobachtungen nicht in Einklang zu bringen und daher unbefriedigend. Oort selbst vermutete, dass die HVC aus primordialen Gas bestehen könnte welches von der Bildung der lokalen Gruppe übrig geblieben ist. Dieses Gas werde nun von der MWG akkretiert und würde beim auftreffen auf die MWG deren Gas durch einen Schock aufheizen. Nach der Abkühlung und Bremsung würden die Wolken als HVC in Erscheinung treten.

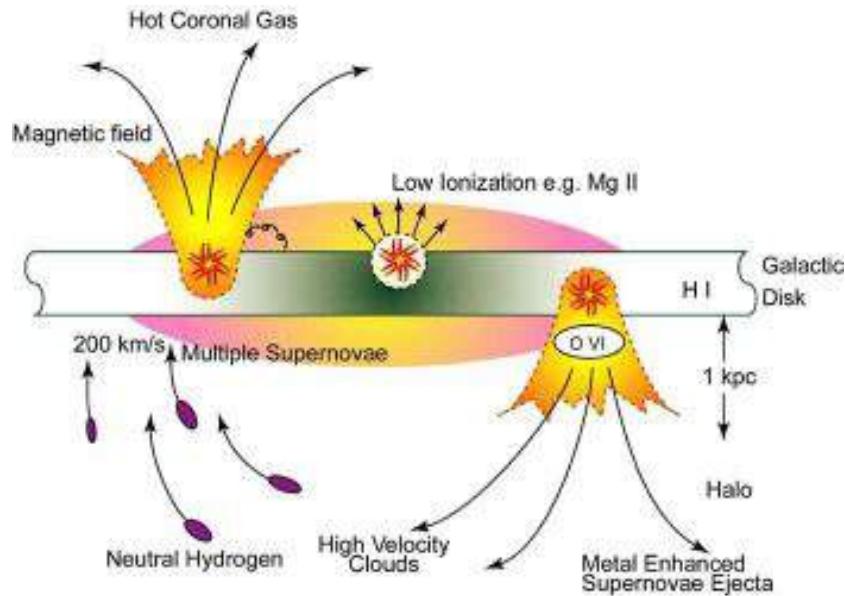
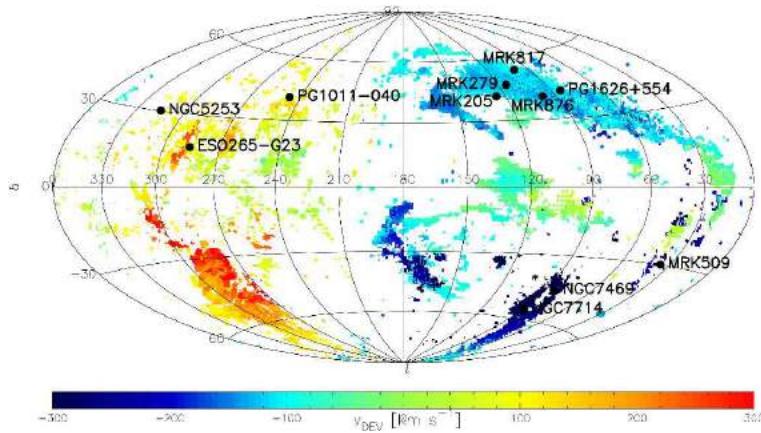


Abbildung 139

**Kompakte Hochgeschwindigkeitswolken (CHVC)** Der am breitesten akzeptierte Vorschlag ist der, dass die beobachteten HVCs die von dem Cold Dark Matter Modell (CDM) vorhergesagten, jedoch bisher unentdeckten Dunkle Materie Mini Halos (DMMH) sind. Diese sollten über die lokale Gruppe verteilt sein und laut Vorhersagen der Strukturbildung nach und nach mit den Galaxien verschmelzen. Braun und Burton vermuten, dass die beobachteten HVCs aus Gas bestehen welches nahe an der MWG zu finden ist. Daher suchten sie als Nachweis HVCs mit größeren Unterschieden in der Radialgeschwindigkeit als 50 km/s. Ein weiteres Auswahlkriterium war die räumliche Trennung von emittierenden Objekten, was gleichbedeutend mit dem Fehlen einer stellaren Komponente und ionisiertem Gas ist. Diese Wolken bezeichnen die beiden als compact high velocity clouds (CHVC). Auf die Identität von DMMHs und CHVCs schließen sie aufgrund der in Bezug auf die lokale Gruppe gesehen geringeren Relativgeschwindigkeiten als im Bezugssystem der MWG. Dies lässt sie vermuten, dass die räumliche Verteilung als auch die Kinematik der CHVCs mit der lokalen Gruppe assoziiert sind. Ihre Entfernung sind typischerweise in der Größenordnung von 1Mpc, woraus im Mittel ein Durchmesser von 15kpc und eine HI Masse von  $10^7 M_{\odot}$  resultieren. Damit wären CHVCs in der ganzen lokalen Gruppe verteilte Objekte, die in Bezug auf die Masse den Zwerggalaxien entsprächen. Die Beobachtung weist auf eine Inhomogenität in der Verteilung der CHVCs auf. Detailuntersuchungen einzelner Objekte zeigen, dass sich die meisten CHVCs aus zwei Komponenten zusammensetzen. Eine Komponente ist der äußere Teil der Wolke, welcher aus warmen allerdings dennoch neutralen atomaren Gas zusammensetzt (Warmes neutrales Medium WNM). Der innere Teil der Wolke besteht aus kaltem neutralen Gas (Kaltes neutrales Medium CNM). Durch die genauere Messung konnten mittels des thermischen Drucks die Distanzen der Objekte

festgelegt werden, sie betragen zwischen 150 und 850kpc. Die CHVCs könnten durch ihre Eigengravitation nicht zusammengehalten werden, daher muss ein stabilisierender Außendruck vorausgesetzt werden. Simulationen liefern die Ergebnisse, dass die CHVCs sich am besten mit dem Modell von sich um die Galaxie bewegenden CHVCs vereinen lässt. Allerdings sollten die Abstände, laut den Forschern die die Simulation durchgeführt haben, eher im Bereich von 150kpc liegen. Die Struktur der CHVCs sowie deren Säulendichte ( $\approx 5 \cdot 10^{19} \text{ HI/cm}^2$ ) stimmen mit den Beobachtungen überein. Eine Sternkomponenten konnten in CHVCs allerdings nicht nachgewiesen werden, trotz der mit Zwerggalaxien vergleichbaren Masse. Die Distanzmessung der CHVCs ist bis heute ein großes Problem.



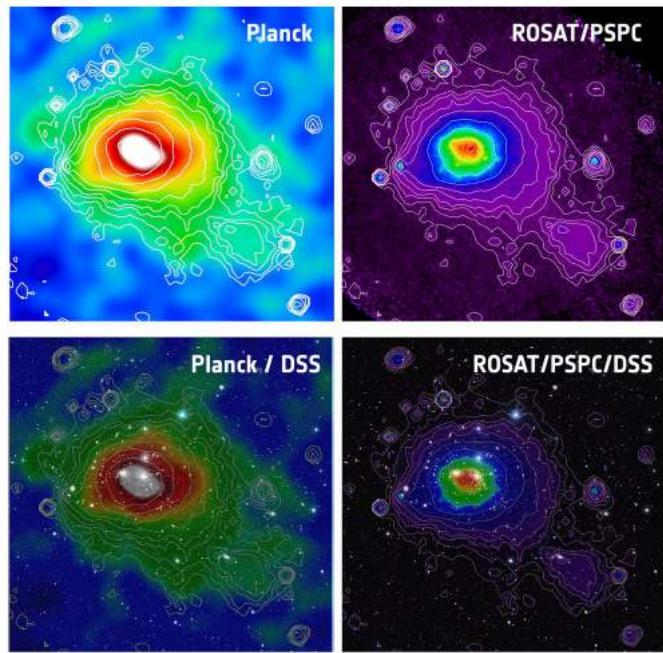
**Abbildung 140**

**Assoziierte HI Wolken** Diese Wolken sind im Gravitationspotential der Galaxie gebunden. Sie bestehen aus nicht ionisierten atomaren Gas mit nicht allzu hoher Temperatur. Sie rotieren allerdings nicht mit der Host Galaxie mit sondern sind von ihrer Kinematik als getrennt zu betrachten.

### 6.2.2 Ionisiertes IGM

**Intracluster Medium** Als ICM bezeichnet man das Gas im Zentrum eines Galaxien-clusters. Dieses Gas setzt sich aus zwei Komponenten zusammen. Einerseits besteht es aus dem primordialen Gas, welches noch nie in Sterne umgewandelt wurde, beziehungsweise in keiner Galaxie gebunden war. Andererseits besitzt das ICM eine Gaskomponente, die solare wenn nicht sogar eine höhere Metallizität besitzt. Dieses Gas wurde aus den Galaxien entweder durch Gezeitenkräfte herausgestreift oder durch Galaktische Winde herausgeschleudert. Insgesamt besitzt das ICM im Mittel etwa ein Drittel der solaren Metallizität. Das ICM ist ein sehr heißes Gas, seine Temperatur liegt zwischen  $10^6$  und  $10^7$  K. Es liegen hohe Ionisationsgrade von schweren Elementen vor, welche in Folge von Rekombination im Röntgenbereich strahlen. Atome können allerdings auch Röntgenphotonen emittieren wenn ein inneres Elektron von einem freien Elektron aus dem Atom

“geschlagen“ und von einem anderen in einem höheren Orbital sitzenden Elektrons ersetzt wird und die Energiedifferenz abgesorbt wird, wodurch die Photonen nur gewisse Energien haben kann. Der entscheidende Grund für die Röntgenemission des ICM ist allerdings die Bremsstrahlung hochenergetischer Elektronen. Durch die starke Ionisation liegt eine große Anzahl an freien Elektronen vor, diese bewegen sich aufgrund der hohen Temperatur des Gases mit hohen Geschwindigkeiten und haben daher hohe Energien. An diesen Elektronen werden niederenergetische Photonen der kosmischen Hintergrundstrahlung (CMB) gestreut, welche dadurch einen Teil der Energie des Elektrons aufnehmen und abgelenkt werden. Dadurch lässt sich eine Verschiebung der kosmischen Hintergrundstrahlung in den höher energetischen Bereich. Dies ist der sogenannte Inverse Compton Effekt, mithilfe dieses Effekts hebt sich das ICM von dem CMB ab und lässt sich so erleichtert beobachten. Diese Abhebung von dem kosmischen Hintergrund wird der Sunyaev Zeldovic Effekt (SZE) genannt. Der SZE erleichtert das Auffinden von Galaxieclustern.



**Abbildung 141**

**Warmes-Heißes IGM (WHIGM)** Als WHIGM wird die Komponente des IGM genannt, die sehr heiß ist und eine starke Ionisation aufweist. Es liegen Temperaturen von  $10^5$  bis  $10^7$  K vor. Allerdings besitzen diese Gebiete ebenfalls sehr geringe Dichten und dominieren daher keine Beobachtungen, sondern wären vielmehr als ein flächendeckendes in Filamenten angeordnetes Rauschen zu beobachten, wobei die nötigen Beobachtungsmöglichkeiten noch nicht zur Verfügung stehen. Durch die geringe Dichte  $1.10m^{-3}$  kann die hohe Temperatur auch keinen hohen Druck hervorrufen. Das WHIGM

lässt sich aufgrund der hohen Ionisationsgrade der schweren Elemente und den damit verbundenen Linienemissionen beziehungsweise Linienabsorptionen nachweisen. Die Linienemissionen sind durch technische Beschränkungen derzeit nicht beobachtbar, daher muss man auf die Absorption zurückgreifen. Die Linienabsorptionen sind aufgrund der Doppler Verschiebung sehr breit. Man kann es im UV sowie auch in der weichen Röntgenstrahlung beobachten. Als Beispiel sei Sauerstoff genannt, er liegt zu 80% als OVII und nur zu 20% als OVI vor. Die durch das Standard Modell der Kosmologie (SCM) vorhergesagten 5% detektierbare Materie (70% Dunkle Energie, 25% Dunkle Materie) sind nur zur Hälfte detektierbar. Ein Teil dieser Materie ist das oben genannte WHIM. Die 2.5% vermissten Baryonen sind ein wichtiger Schritt um großskalige Strukturen zu verstehen und diese in Folge beschreiben zu können. Allerdings macht das WHIM nur 10% der vermissten Baryonen aus, daher nur 5% der gesamten baryonschen Materie. Eine andere Möglichkeit nach der vermissten Masse zu suchen ist nach breiten Lyman-Alpha Absorptionslinien Ausschau zu halten. Die WHIM Temperaturen lassen zwar hauptsächlich ionisierten Wasserstoff zu, allerdings ist der Rest des Wasserstoffs in Form von HI durch seine Absorption im UV Band sichtbar. Diese Linien müssen aufgrund der Doppler Verschiebung sehr breit sein. Dieser sogenannte Lyman-Alpha-Wald (LAF) wird auch bei der Untersuchung von Quasar Umgebungen verwendet, allerdings sollten die vom Quasar stammenden Linien nicht so breit sein wie die gefundenen. Zusätzlich nimmt die Breite der Linien mit zunehmenden Abstand zu, was ein zusätzliches Indiz für die indirekte Beobachtung des WHIM ist. Die durch Beobachtung von AGN gefundenen Flächendichten lassen allerdings wieder nur auf einen Anteil von 10 % der vermissten Materie schließen. Die restlichen 80% der vermissten Baryonen Masse sollten durch das Röntgenband auffindbar werden. Allerdings wurden bisher keine eindeutigen Beweise im Röntgenband gefunden. Daher müssen weitere Beobachtungen gemacht sowie neue Beobachtungsmöglichkeiten geschaffen werden. Dadurch erwartet man ein besseres Verständnis der chemischen Zusammensetzung, der Ionisationsverhältnisse sowie der physikalischen Bedingungen im IGM.

## 6.3 Wechselwirkende Galaxien

### 6.3.1 Einführung

Über lange Zeit des 20. Jahrhunderts wurden Galaxien, nachdem man ihre Distanzen näherungsweise bestimmen konnte, als isolierte Objekte angesehen. Diese sollten sich laut der damaligen Meinung in kompletter Abgeschiedenheit weiterentwickeln. Die Entwicklung wurde als von den Anfangsbedingungen determiniert angesehen. Doch als die Galaxienkataloge immer reicher wurden, wurden immer mehr Beispiele von paarweise auftretenden Galaxien gefunden. Weiters konnte man Galaxien erkennen deren gesamte Scheibe gebeugt war, ebenso wurden Galaxien mit langgestreckten Armen gefunden. Diese Galaxien hatten einen sehr starken Blaustich, was auf eine erhöhte SFR deutete. Einige der gefundenen Galaxienpaare waren so stark gestört, dass man diese nur als mit einander verschmelzende Galaxien interpretieren konnte. Durch den Durchbruch der Computer konnten Simulationen zu den Interaktionen von Galaxien Passagen durchge-

führt werden und die Astrophysiker fanden eine Erklärung der deformierten Galaxien in Gravitations-Wechselwirkungen und Verschmelzungsprozessen. Durch diese Studien wurde ein anderes Licht auf die Galaxienentwicklung geworfen und das Bild der Galaxien als isolierte Inseln wurde zunehmend verdrängt. Das neu entstandene Bild war geprägt von in Cluster angesammelten Galaxien welche über die Zeit miteinander interagieren beziehungsweise verschmelzen. Durch diese Wechselwirkung werden die Bedingungen in den Galaxien so stark verändert, dass diese in einer Explosion der SFR oder auch in der Erzeugung von AGN resultieren. Neben dieser Veränderungen in der Stern und Gas komponente gibt es auch die Möglichkeit, dass die interagierenden Galaxien ihre Gestalt ändern können und somit das Verschmelzen eine mögliche Erklärung für die Entstehung großer elliptischer Galaxien ist. Durch Simulationen des frühen Universums und der kosmischen Strukturbildung wurde festgestellt, dass die Galaxien damals vermehrter Wechselwirkung ausgesetzt waren und beinahe jede Galaxie einst in Wechselwirkung mit einer anderen stand. Durch das zunehmende Verständnis der Interaktionen drängte sich das Bild von durch Wechselwirkung dominierten galaktischen Entwicklungsprozessen in die Astrophysik.

### 6.3.2 Auswirkung galaktischer Interaktionen

**Dynamik der Interaktion** Die galaktischen Interaktionen sind von Gravitations effekten dominiert. Erst vermutete man, dass die besonders dünnen Gas Brücken und Gezeitenarme nur durch Magnetfelder erzeugt werden können. Doch schon einfache Computersimulationen konnten deren Ursprung in der von Gravitation getriebenen Gezeitenwirkung auf die rotierenden Arme zeigen. Daher stammt der Name Tidal Tails (Gezeitenarme). Um die Entwicklung dieser Arme zu verstehen muss man sich die Gezeiten kräfte ins Gedächtnis rufen. Diese sind differentielle Gravitationskräfte von miteinander in Wechselwirkung stehenden massereichen Objekten. Diese dehnen die jeweiligen Interaktionspartner radial, wie auch der Mond unseren Ozean in eine leicht ellipsoide Form bringt und somit die Gezeiten der Meere verursacht. Durch diese Beugung der Galaxien gepaart mit deren Rotation werden die äußersten Komponenten der Galaxie abgestreift. Die Arme, die am weitesten von den Wechselwirkungszentren entfernt sind, werden von der Galaxie in langen dünnen Armen ausgeworfen und ermöglichen somit den Abtransport von Drehimpuls. Dieser Abtransport ist essentiell für Merger, da diese ansonsten nie verschmelzen würden sondern nur in Orbits um den jeweiligen Massenmittelpunkt gefangen werden würden. Die Arme in der Richtung des „Störenfrieds“ werden ebenfalls aus der Galaxie gezogen und bewegen sich in Richtung des jeweiligen Störers. Abhängig von den physikalischen Bedingungen in den Galaxien kann der in der Regel kürzere, dicke Arm in Richtung der interagierenden Galaxie eine Gasbrücke ausbilden, welche in der Begleitgalaxie mündet. Dort wird durch den Einfall des Gases die SFR oder auch ein AGN angetrieben werden und es kann zu den dadurch hervorgerufenen innergalaktischen Störungen kommen. Durch den starken Kontakt zwischen den Gezeitenkräften und der Rotation, sowie deren Richtung und auch die Lage der Scheibe, falls eine vorhanden ist, ist die Interaktion zweier oder mehrerer Galaxien sehr stark von der Geometrie der Begegnung abhängig. Daher ist die Entstehung von Gasbrücken keine Notwendigkeit.

Bei Begegnungen zweier Galaxien gleicher Rotationsrichtung (engl. prograde encounter) sind die Gezeitenarme sowie Gasbrücken, falls deren Entstehung möglich ist, besonders stark ausgeprägt. In Systemen einer entgegengesetzten Rotationsorientierung (engl. retrograde encounter) ist die Entstehung von Gezeitenarmen hingegen gehemmt. In den Gezeitenarmen und Gasbrücken kann es durch Dichtefluktuationen zur Sternenformation kommen, wenn diese Verklumpungen massereich und kompakt genug sind so können sich auch Zwerggalaxien bilden. Da die Begegnungen über Milliarden Jahre verlaufen, kann man immer nur individuelle Momentaufnahmen betrachten und sich aus der Summe der gemachten Beobachtungen ein Bild über die Prozesse bei einem Transit oder einer Verschmelzung machen. Alle Prozesse miteinander in ein kohärentes physikalisches Modell zu überführen ist aufgrund der nicht bekannten Anfangsbedingungen äußerst schwierig. Nur in Simulationen kann überprüft werden ob das universelle Modell der Interaktionen mit der Summe an Beobachtungen im Einklang steht. Diese sind iterative Simulationen von N-Körpern ( $N \approx 10^7$ ), bei denen ein Körper tausende von Sternen und deren Eigenschaften (Geschwindigkeit, Distanz zum Zentrum, Distanz zum Interaktionspartner, etc.) repräsentiert und durch schrittweises voranschreiten in der Zeit (iterativ) die Wirkung jedes einzelnen Körpers auf die anderen berechnet wird. Diese Simulationen prograder Wechselwirkungen zeigen nach der ersten Passage neben der Entstehung ausgeprägter Arme auch eine starke Galaxien-interne Reaktion. Die Störung der Galaxie kann sich in stark ausgeprägten Armen sowie der Entwicklung eines zentralen Balkens äußern. Der Balken der MWG könnte durch so eine Störung ausgelöst worden sein. Ob nun stark ausgeprägte Arme oder ein massiver Balken im Zentrum entsteht hängt sehr stark mit der inneren Struktur der gestörten Galaxie zusammen. Wenn die stellare Komponente die zentrale Massenverteilung dominiert ist es wahrscheinlich, dass die Gravitation die Störung in der Bildung eines Balkens verarbeitet. Falls die zentrale Region Galaxie allerdings vom DM Halo oder dem Bulge dominiert wird, ist die Scheibe gegenüber Balkenbildung beinahe „immun“ und es ist wahrscheinlicher, dass sich ausgeprägte Spiralarme ausbilden. Die Gezeitenarme sind ein Teil der Verschmelzungsprozesse, da diese Teile des Drehimpuls der Galaxienorbits abtransportieren und so eine Annäherung der Galaxien ermöglichen. Natürlich wird die im Orbit „gespeicherte“ Energie nicht nur durch die Arme abtransportiert, sondern auf das gesamte Sternensystem übertragen. Allerdings ist die Effizienz dieser Prozesse nur ein prozentualer Anteil an der gesamten nötigen Energieübertragung, die es möglich macht, dass die Galaxien in nur wenigen Umläufen miteinander verschmelzen können. Der Rest der Energie wird zu großen Teilen über die ebenfalls interagierenden DM Halos abtransportiert, worauf in einem anderen Kapitel näher eingegangen wird. Auch Magnetfelder könnten eine Rolle beim Drehimpulstransport spielen, wobei deren Einfluss wie auch auf stellarer Ebene die Grenzen der Simulationen ausreizt oder sogar überschreitet. Daher bleibt der Einfluss von Magnetfeldern bis jetzt nur eine Hypothese. Weitere relevante Interaktionen und deren Produkte wie Starbursts, AGN und Merger-Remnants werden ebenfalls in anderen Kapiteln des Skripts näher erläutert.

**Satellitengalaxien und Massenakkretion der Hosts** Minor-Merger sind stetig auftretende Ereignisse. Sie involvieren eine große Host Galaxie (HG) und eine Zwerggalaxie (DG), wobei auch mehrere dieser DG zu einem Zeitpunkt verschlungen werden können. Diese werden bei einer Passage auf einen Orbit gezwungen, ehe sie mit der HG verschmelzen. Über den Prozess der Verschmelzung wird an dieser Stelle nichts erläutert, vielmehr wird auf die Prozesse vor der Verschmelzung eingegangen. Diese DG werden sobald sie sich auf einem Orbit befinden als Satelliten Galaxien (SG) bezeichnet. Auf diese wirken beim Umkreisen der HG Gezeitenkräfte. Diese bewirken einerseits eine Streckung der SG, wobei es ähnlich der Interaktion zweier großer Galaxien dazu kommen kann, dass die SG einen Teil ihrer Stern und Gaskomponente in das IGM abgeben, welches nicht von der HG aufgenommen wird. Weiters können die wirkenden Kräfte, abhängig von der Größe und Masse der SG, Gas aus deren äußeren Teilen abstreifen und als in der Galaxie mündenden Strom akkretieren. Ein Beispiel hierfür ist der Magellansche Strom (MS), der aus der kleinen und großen Magellanschen Wolke (SMC/LMC) heraus getrieben wurde. Dieser Strom könnte der Ursprung einiger junger Globular Cluster sein, die wir in der MWG auffinden können. Ein weiteres Beispiel ist die Sagittarus DG welche in jüngster Zeit durch die uns gegenüberliegende galaktische Ebene penetriert ist und somit beinahe vollständig zerstört wurde. Bisher wurden 14 SG um die MWG entdeckt. Weitere Beispiele sind NGC 205 und M32 welche unsere Nachbargalaxie Andromeda umkreisen. Im Gegensatz zu Major Mergern, bleiben Satelliten Galaxien aufgrund des Masseverhältnisses sehr lange auf Orbits ehe diese mit der HG verschmelzen. Die Gezeitenkräfte können allerdings auch so enorm sein, dass die SG nicht einmal mit der HG verschmelzen muss, sondern schon während des Orbits das Material nach und nach verlieren und welches in Folge als Strom von der HG akkretiert wird. Da der tidal radius, der Radius der SG ab dem das Material abgestreift und als Strom akkretiert wird, proportional zu  $(\rho_{SG}/\rho_{HG})^{(1/3)}$  ist werden ausgedehnte Begleiter von der Galaxie schon während des Orbits aufgelöst während kompakte Begleiter durchaus bis in die Galaxie gelangen können. Das von den Galaxien abgestreifte Material wird entlang eines Stroms über das Halo der HG verteilt. Dieser Strom ist von der Kinematik des Halo entkoppelt. Es wurde postuliert, dass sich das Halo der MWG nicht auf einmal geformt hat, sondern vielmehr aus SGs gespeist wurde. Die Anzahl der SGs die für die Reproduktion der Halo-Leuchtkraft ( $\approx 10^9 L_\odot$ ) nötig sind ist in der Größenordnung von Hundert. Allerdings konnte bisher nicht festgestellt werden ob diese Theorie mit dem Aufbau und der Entwicklung der MWG konsistent ist. Zwar konnte man Substrukturen und junge Sterne erkennen, doch ist das alleine kein Beweis. Weitere Belege für die Nährung des Halos durch SGs ist der sich über  $30^\circ$  erstreckende abgestreifte Strom der Sagittarus SG. Falls die einfallende SG die im Orbit wirkenden Gezeitenkräfte überlebt und halbwegs massereich ist, so kann sie einen starken Einfluss auf die Kinematik, AGN und die SFR an der Stelle des Auftreffens haben. Nähere Informationen hierzu sind im Kapitel Minor Merger zu finden.

Daten/Galaxien	SMC	LMC	MS (i.d.F Ausdehnung statt Durchmesser)
Masse [ $M_\odot$ ]	$7 \cdot 10^9$	$10^{10}$	HI $4.87 \cdot 10^8$
Distanz [kpc]	61	50	50
v-Dispersion [km/s]			$\pm 400$

**Ring Galaxien(RG)** RG zeichnen sich durch eine oder mehrere ringförmige Scheiben aus Sternen und Gas oder nur einer der jeweiligen Komponenten aus. Ihr Ursprung war lange Zeit fraglich und warf große Fragen auf, da die Gestalt der RG nicht mit der klassischen isolierten Galaxien Entwicklung in Einklang zu bringen war. Erst Lynds und Toomre (1976) und Theys und Spiegel (1977) vermuteten deren Ursprung in einer Kollision zwischen zwei Galaxien. Dieser Spezialfall einer Kollision kommt zu Stande, wenn eine Scheiben Galaxie von einer senkrecht zur Scheibe einfallenden kleinen Galaxie in der Nähe Zentrums durchstoßen wird.

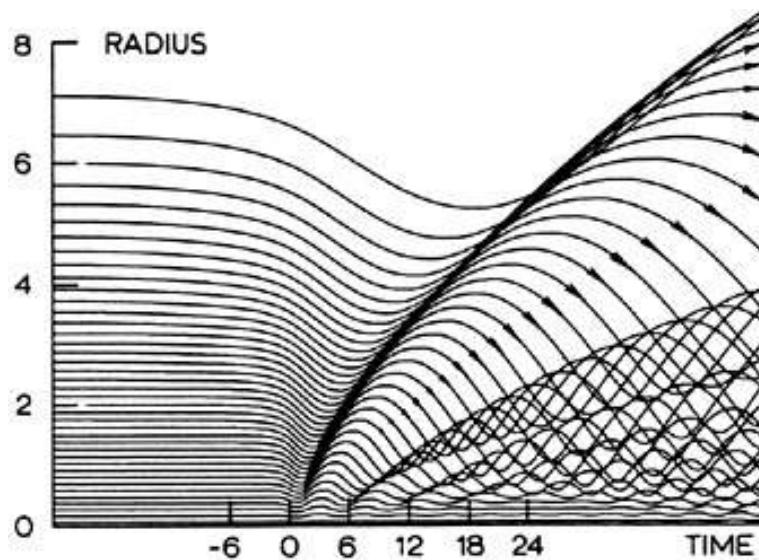


Abbildung 142

Die dadurch entstehenden gravitativen Störungen zwingen die Sterne auf stark oszillierende Bahnen, diese werden als epizyklische Oszillationen bezeichnet. Die Periode steigt über den Großteil der Scheibe mit dem Radius an. In einer flachen Rotationskurve ist die Frequenz proportional zu  $v/r$  sodass die Periode proportional zu  $r$  skaliert. In Folge bewegen sich die weiter außen liegenden Sterne weiterhin nach innen, während die inneren liegenden schon nach außen wandern. Dadurch kommt es zu einer Anhäufung von Sternen entlang eines Rings um das Zentrum der durchstoßenen Galaxie. An anderen Stellen dieser Galaxie dehnen sich die Orbits aus, verringern somit die Anzahldichte und erzeugen dadurch beinahe leere Gebiete. Die Ballung der Sterne breitet sich über die Zeit als Dichtewelle nach außen hin aus. Im Bild auf der vorherigen Seite wird dies gut illustriert. Weiters zeigt es, dass der innerste Ring hauptsächlich durch von innen nach außen wandernde Sterne erzeugt wird. Die dabei gefundenen nach außen gerichteten Geschwindigkeiten von Sternen und HII Regionen sind ein gutes Indiz für das gesamte Material in dieser Region. Der zweite Ring wird sowohl von nach außen abwandernden als auch von nach innen wandernden Sternen erzeugt, deren Oszillationen kreuzen sich in einer scharf abgegrenzten Region hoher Dichte. Die Gebiete in denen sich die Orbits überschneiden weiten sich in den weiter außen liegenden Ringen immer mehr aus und

resultieren somit in einer Überlappung der erzeugten Ringe. Allerdings könnte diese Ver-  
mischung gepaart mit der geringeren Anzahldichte in einer Ununterscheidbarkeit oder  
gar Unsichtbarkeit zu resultieren. Bevor die kleine Galaxie durch die Scheibe dringt, zieht  
diese die Scheibe aus der galaktischen Ebene. Allerdings werden weiter außen liegende  
Sterne später in z-Richtung beschleunigt. Nachdem die Begleitgalaxie durch die Schei-  
be gestoßen ist tritt der selbe Effekt auch in die anderen Richtung auf. Dies resultiert  
darin, dass sich die weiter innen gelegenen Sterne wieder nach unten bewegen während  
die außen liegenden Sterne noch nach oben wandern. Dieser Effekt kann von großer Be-  
deutung sein wenn sich ein massereicher Begleiter mit einer niedrigen Geschwindigkeit  
durch die Scheibe bewegt. Dieser Effekt erzeugt dann eine signifikant in Einfallsrichtung  
des Begleiters gebogene äußere Scheibe.

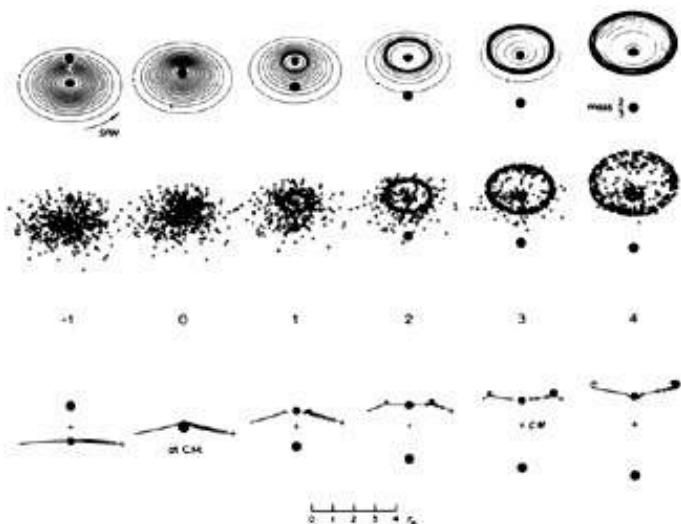


Abbildung 143

### 6.3.3 Gezeitenwechselwirkung

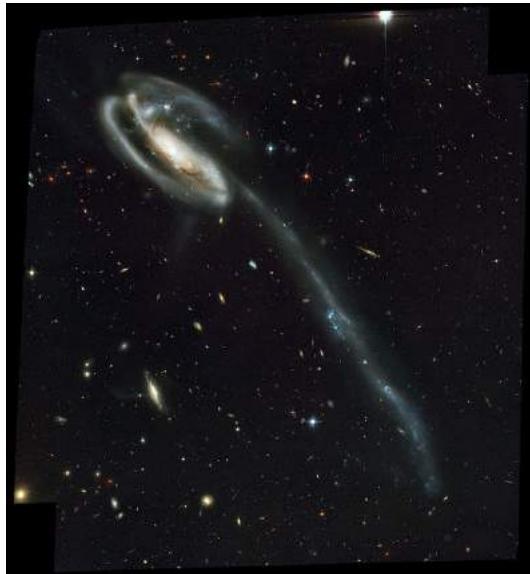
Man bezeichnet dieses Phänomen meist auch als **GALAKTISCHE GEZEITEN**, und versteht darunter Gezeitenkräfte, die auf Objekte innerhalb des Gravitationsfeldes einer Galaxie wirken.

Dabei werden die Galaktischen Gezeiten auf dieselbe Weise verursacht, wie die Gezeiten bei Planeten: Befindet sich ein Körper im Gravitationsfeld eines anderen (größeren) Körpers, wird seine Bahn stark von diesem Gravitationsfeld beeinflusst, wobei die gravitative Anziehung mit geringerer Entfernung ansteigt.

Bei zwei wechselwirkenden Galaxien geschieht dies auf sehr viel größeren Skalen, die Galaktischen Gezeiten reichen sehr viel weiter und der Prozess nimmt sehr viel mehr Zeit in Anspruch. Die Gezeitenkräfte können eine **Ausdehnung**, ein **Abflachen**, ein **Auseinanderreißen** (teilweise oder vollständig) oder einen **gestörten Orbit** der Ga-

laxie verursachen. Je schneller die Galaxie rotiert, desto stärker wird sie verformt.

Beispiel:



**Abbildung 144:** Der Schweif der Tadpole Galaxie entstammt einer Kollision mit einer kleineren Galaxie

Grundsätzlich kann man sagen, dass, wenn zwei Galaxien aneinander vorbeilaufen, die verursachten Störungen geringer sind, wenn die Umlaufbahnen der beiden Galaxien in entgegengesetzte Richtungen verlaufen. In diesem Fall überlebt die Galaxienstruktur, was bei corotierenden Galaxien nicht gegeben ist.

### Interaktion zwischen großen Galaxien

Normalerweise sind die Gezeitenkräfte auf die direkte Umgebung der Galaxie beschränkt. Doch wenn sich zwei große Galaxien nahe kommen und aneinander vorbei laufen, beziehungsweise kollidieren, werden die beiden sehr großen Gezeitenkräften unterworfen.

#### 6.3.4 Interaktionen mit einer Satellitengalaxie

Da die Gezeiteneffekte in der unmittelbaren Umgebung der Galaxie am stärksten sind, sind Satellitengalaxien besonders davon betroffen. Das lässt sich auch in großem Maßstab beobachten: Man kann erkennen, dass innere Struktur und Bewegungen einer Zwerg-Satellitengalaxie stark beeinflusst werden (was zu Rotation anregt), oder auch, dass es zu einer ungewöhnlichen Masse-Leuchtkraft-Verteilung kommt. Es kann aber auch Tidal

Stripping auftreten. (Unter Tidal Stripping versteht man den Effekt, dass die größere Galaxie Sterne und anderes stellares Material aus der kleineren Galaxie zieht.) Dabei spielt das Größenverhältnis zwischen Haupt- und Satellitengalaxie eine große Rolle:

- a) Satellitengalaxie  $\ll$  Hauptgalaxie: Die entstehenden Auswurfschweife sind eher symmetrisch und folgen einer ähnlichen Bahn wie die Satellitengalaxie.
- b) Satellitengalaxie  $> \frac{1}{1000}$  der Hauptgalaxie: Die Schweife werden auch von der Gravitation der Satellitengalaxie beeinflusst, woraus deren Asymmetrie resultiert, und sie in unterschiedliche Richtungen beschleunigt werden.

Beobachtetes Beispiel: Man nimmt an, dass die Zwerggalaxie M32 (=Satelliten-galaxie der Andromeda Galaxie) ihre Spiralarme durch Tidal Stripping verloren hat und ihre Sternentstehung aufgrund von Gezeitenwechselwirkung intensiviert wurde.

### 6.3.5 Interaktionen innerhalb der Galaxie

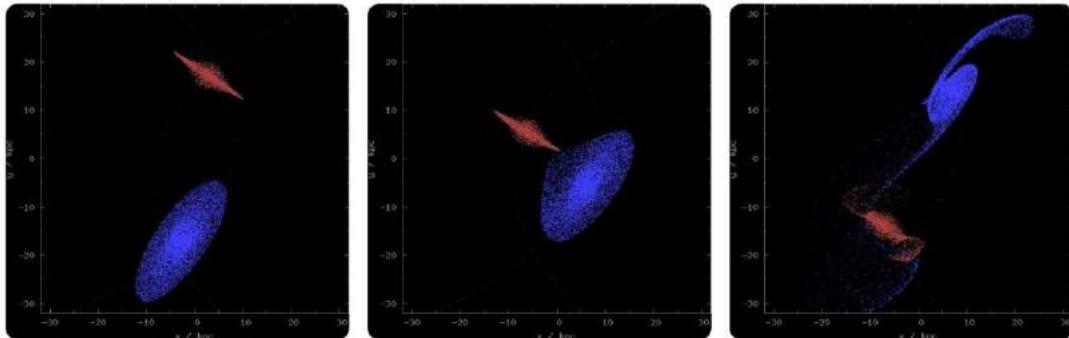
Die Galaktischen Gezeiten haben vor allem relevante Auswirkungen auf die äußeren Regionen in der Galaxie. Denn weiter Innen dominiert die Gravitation des Sterns in seinem eigenen System, und nur Vorbeiläufe anderer Sterne können seine Dynamik erwähnenswert stören. Aber an den äußeren Rändern ist die Sterngravitation schwach und die Galaktischen Gezeiten können signifikant werden.

Beobachtetes Beispiel: Man vermutet, dass Galaktische Gezeiten dafür verantwortlich sind, dass zur Oortschen Wolke zugehörige Objekte aus ihrer Bahn geschleudert werden und als Kometen ins innere Sonnensystem gelangen.

## 6.4 Galaxy Mergers (Galaxienverschmelzungen)

Wenn Galaxien kollidieren, kann dies zur Verschmelzung der Galaxien führen. Die genauen Effekte der Verschmelzungsprozesse hängen von mehreren Faktoren ab, wie dem **Kollisionswinkel**, den **Geschwindigkeiten**, der relativen **Größe** und der **Zusammensetzung**. Aus der Verschmelzungsrate lassen sich Schlüsse über die Evolution der Galaxien und deren Wachstum ziehen.

### 6.4.1 Ablauf des Verschmelzungsprozesses



**Abbildung 145:** Simulation zweier sich begegnender Galaxien

**1. Pre-Collision (Annäherungsphase):** Siehe linkes Bild.

- Annäherungsgeschwindigkeiten: von **unter 100 km/s** bis zu über **1.000 km/s** → wenn die Kernregionen zweier Galaxien kollidieren: Geschwindigkeiten von **3.000 km/s und mehr**
- Veränderungen in den inneren Strukturen beider Galaxien → es können bereits Gas- und Sternbrücken zwischen den Galaxien bestehen
- parabolischer Bahnverlauf der Galaxienkerne

**2. Impact (Einschlag):** Siehe mittiges Bild.

- Durchstreifen an den Rändern
- noch kein Aufeinandertreffen der Galaxienkerne
- Verformung der Galaxien und Materialaustausch → an ihrem nächstgelegenen Punkt zueinander wirkt die Gezeitenkraft des jeweils anderen Kollisionspartners auf jede Galaxie am stärksten → Ausbildung von Gezeitenarmen an den sich auf ihnen zueinander abgewandten Seiten
- Schocks und Strömungen in den Galaxienscheiben führen zur Verdichtung von interstellarer Materie

**3. Gravitational Response (Selbsgravitation und Pause):** Siehe rechtes Bild.

- Veränderung der äußeren Formen als auch des inneren Geschehens
- starke Verlagerung der Massenverhältnisse möglich
- zunächst findet Entfernung der Galaxien voneinander statt
- durch Selbstgravitation der Galaxienscheiben können Spiralarme und/oder Balken erzeugt oder verstärkt werden → mögliche Rückantwort auf die vorangegangenen Verdichtungsprozesse

- Verformung stark abhängig von inneren Strukturen der Galaxien und ihren Bahnverläufen zueinander
- beim Auseinanderdriften gelangen Kollisionspartner in die Pausenphase → abhängig von Massen- und Geschwindigkeitsverhältnissen, ob später Verschmelzung oder endgültiges Auseinanderdriften einsetzt

#### 4. Merging (Verschmelzungsphase):

- immer kreisförmigere und engere Bahnen der Galaxien → häufige Zusammenstöße der Gaswolken
- Bildung einer Gaswolke im Zentrum (hoher Druck!)
- Gaswolke wird instabil und fällt zusammen → es entstehen extrem viele Sterne: **Starburst**
- Großteil des Gases wegen der gewaltigen Energien der neuen Sterne aus dem Sternensystem hinaus geblasen → viele Sterne, wenig Gas verbleiben → es können lange keine oder fast keine neuen Sterne mehr entstehen
- die neu gebildete Galaxie vor allem aus gemeinsam alternden Sternen
- bei **Verschmelzung größerer Galaxien** entstehen meist elliptische Galaxien

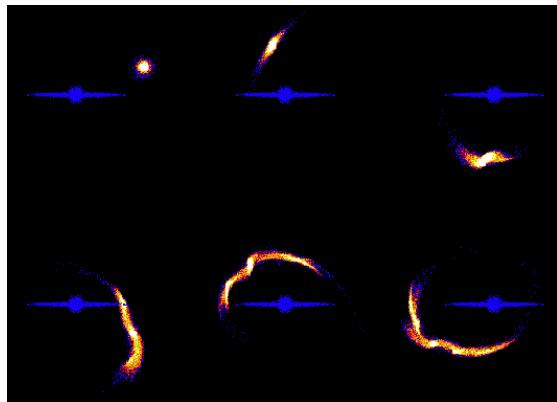
#### 5. Beruhigungsphase (engl. Relaxation):

- nach Vereinigung mehrere Rotationsperioden, bis sich Gleichgewicht eingestellt hat
- langwieriger Prozess → in Galaxienzentren zwar nur etwa hundert Millionen Jahre, in den äußeren Bereichen jedoch mehrere Milliarden Jahre

Man unterscheidet zwischen Minor und Major Mergern. [Wie im Namen schon erkennbar gilt hier die Größe als Unterscheidungskriterium.]

##### 6.4.2 Minor Merger

Von Minor Mergern ist die Rede, wenn eine große Galaxie mit einer oder mehreren deutlich kleineren Galaxie/n verschmilzt. Minor Merger sind weitaus **häufiger** als Major Merger und den Modellen, wie auch den Beobachtungen zufolge, waren Minor Merger in den Anfängen des Universums noch zahlreicher. Wie in Abbildung 4 sichtbar bewirkt die Störung der großen Galaxie eine Veränderung in der Dynamik der kleinen Galaxie: **Verdickung, Warps** und **Gezeitenströme** sind die Folge. Durch die Gezeitenreibung, die auf die kleine Galaxie wirkt, bleibt sie schließlich in der Scheibe der großen Galaxie stecken und wandert ins Zentrum.



**Abbildung 146:** Simulation eines Minor Mergers

### Beobachtungen

Allein in der Umgebung unserer Milchstraße gibt es vielerlei zu beobachten. Unter den vielen zur Milchstraße zugehörigen Satellitengalaxien sind die **Große und die Kleine Magellansche Wolke** die massereichsten Vertreter.

Möglicherweise befindet sich die Milchstraße im Minor-Merger-Prozess mit den Magellanschen Wolken, der Magellansche Strom wäre dann auf die Galaktischen Gezeiten der Milchstraße zurückzuführen. Und auch von der **Canis Major Zwerggalaxie** glaubt man, dass sie mit der Milchstraße verschmelzen wird. Auch bei der **Sagittarius Zwerggalaxie** kann man ihrer Bahnkurve zufolge daraus schließen, dass sie innerhalb der nächsten 100 Millionen Jahre durch die Milchstraße laufen wird.

Wie vorher schon erwähnt, lässt auch die **Andromeda Galaxie** einen Minor Merger mit der elliptischen Zwerggalaxie **M32** vermuten. Aber nicht nur mit dieser, sondern auch mit **NGC 205** scheint die Andromeda Galaxie in Interaktion zu stehen.

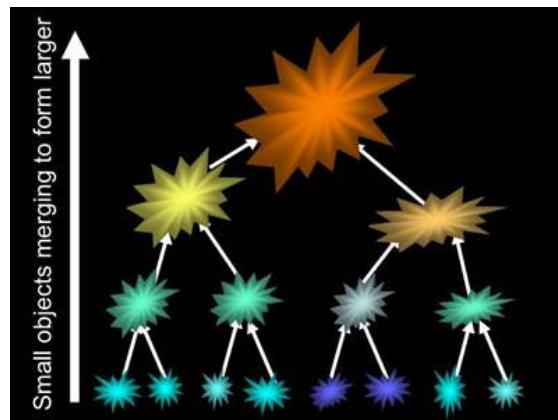
Durch Minor Merger kann es auch zur **Verdickung der Scheibe** von der Hauptgalaxie kommen, und diese Verdickung lässt sich auch beobachten. Nicht jedoch in der Sonnenumgebung, die beobachtete Scheibe ist dünn, was zu einem ungeklärten Widerspruch führt. Die Scheibenverdickung kommt durch den Energietransfer, der durch die nahe Begegnung der Galaxien verursacht wird, zustande. Für den Energietransfer gilt folgende Formel:

$$\Delta E = \frac{4G^2 M_2^2 M_1}{3b^4 v^2} r_h^2 \quad (6.1)$$

Wobei  $M_2$  und  $M_1$  die Massen der Galaxien,  $r_h$  den Skalenradius (Maß für die Größe der Galaxie) und  $v$  die Geschwindigkeit zueinander.  $b$  ist der Stoßparameter bei der Kollision.

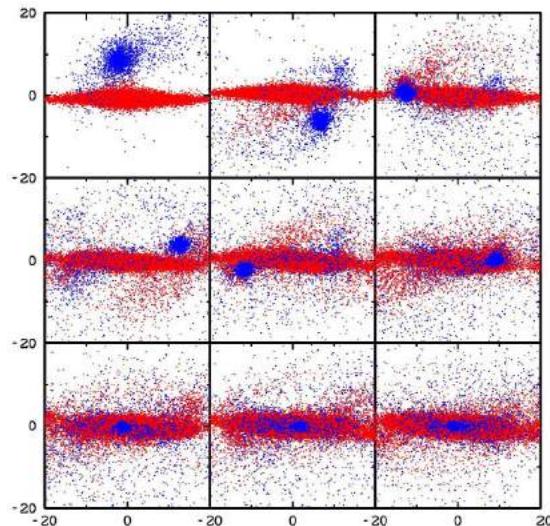
## Hierarchical Merging/Clustering und CDM Szenario

Hinter den Minor Mergern steht daher auch die Theorie des **Hierarchical Merging**: Diese besagt, dass die größere Strukturen aus dem kontinuierlichen Verschmelzungsprozessen kleinerer Strukturen entstanden sind und die Strukturen, so wie wir sie heute im Universum sehen, gemäß dem **ColdDarkMatter Szenario** gebildet wurden. Das CDM Szenario stellt die Erwartung, dass die Merging-Rate mit dem Alter des Universums abnimmt.



**Abbildung 147:** Hierarchical Merging - Aus kleinen Strukturen entstehen Große.

## Diskrepanzen der Theorien



**Abbildung 148:** Simulation eines Minor Mergers

Obwohl die beobachtete Struktur des Universums mit diesen Theorien übereinstimmt, ergeben sich gewisse Ungereimtheiten. So stimmt beispielsweise die gesamte akkretierte Masse der Satellitengalaxien, die den Berechnungen zufolge des CDM Szenarios  $m_{acc}6 \cdot 10^9 M_\odot$  beträgt, nicht mit den Beobachtungen zusammen. Auch werden Fragen bezüglich Aufheizung der Scheibe, ausgelöste Sternentstehung, Bulge-Entwicklung, Zeitskalen und Struktureffekte von Störungen aufgeworfen, die noch nicht erklärbar sind.

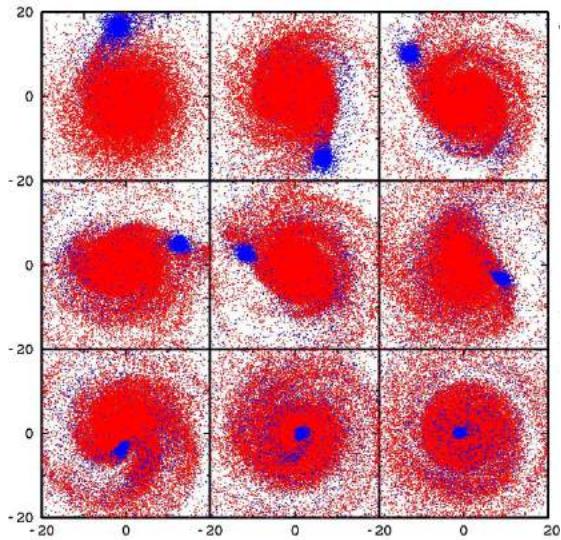
### **Hierarchical Merging erklärt Galaxienhaufen und Superhaufen**

Diese Gebilde sind ebenfalls durch Mergings kleinerer Komponenten aufgebaut: Die Galaxiengruppen bestehen aus Mergern von einzelnen Galaxien. Die Gruppen zusammen formen dann größere Gruppen und Haufen, und diese wiederum zusammengenommen bilden großskalige Filamente, Walls und Superhaufen.

### **Zur Veranschaulichung noch 2 Computer Modelle**

Eine Satellitengalaxie mit einer anfänglichen Masse von  $10^9 M_\odot$ , die zu Beginn der Simulation 18 kpc von der Hauptgalaxie entfernt ist, bewegt sich anfänglich mit einer Geschwindigkeit von 200 km/s in einem Neigungswinkel von 20 Grad auf die Hauptgalaxie zu. Es folgt eine radiale **Einwärtsbewegung** der Satellitengalaxie und **nach 1,5 Gyrs** fällt sie in die Äquatorialebene. Durch die Störung des Satelliten kommt es zu einem **Massenverlust von etwa 80 %**.

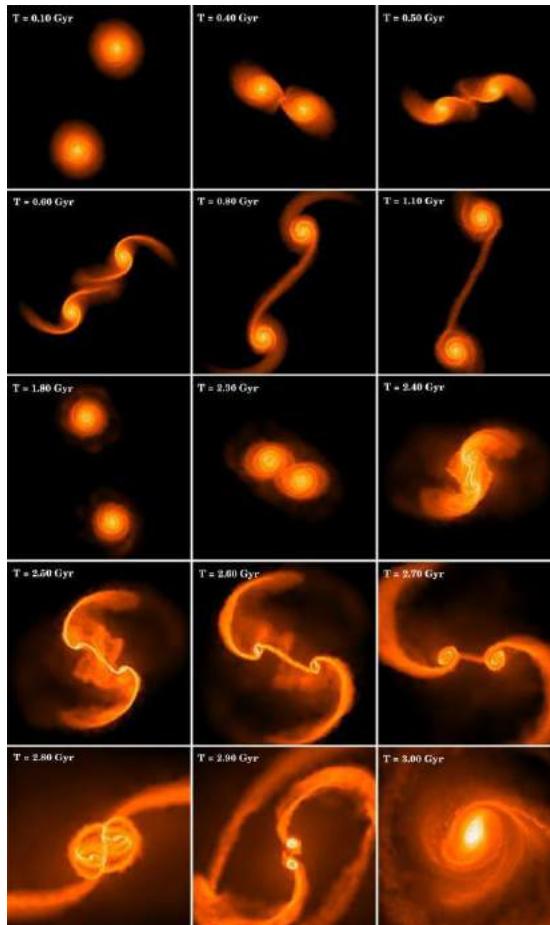
Hier sieht man wie sich die Satellitengalaxie spiralförmig nach innen bewegt und dabei Sterne von ihr abgestreift werden, was Tidal Streams (Gezeitenströmen) auslösen könnte. 20 % der ursprünglichen Masse bilden eine gebundene Einheit im Zentrum der Hauptgalaxie.



**Abbildung 149**

#### 6.4.3 Major Merger

Wenn zwei Scheibengalaxien von ähnlicher Größe miteinander wechselwirken und verschmelzen, so spricht man von Major Mergern. Eine Vereinfachung der Galaxien als zwei Massenpunkte ist diesem Fall nicht zweckdienlich, da zwei Massenpunkte nicht miteinander verschmelzen, sondern aneinander vorbei fliegen würden. Galaxien sind **ausgedehnte Gebilde** und deshalb fähig, miteinander zu verschmelzen.



**Abbildung 150:** Simulation eines Major Mergers

**Drehimpuls und Energie** Die Gezeitenwechselwirkung auf die Galaxien ist sehr stark und verursacht **Drehimpulsübertragung**. Der Drehimpuls wird in die äußeren Bereiche transportiert, was dazu führt, dass die inneren Teile der Galaxien an Drehimpuls verlieren und sich näher kommen, und die äußeren Teile sehr viel Drehimpuls haben, weswegen sie sich loslösen, weg fliegen und somit Drehimpuls abführen. Die Massenzentren kommen einander immer näher. Damit diese aber miteinander verschmelzen, muss **Energie dissipieren**. Denn in unserem System herrscht Drehimpulserhaltung und deswegen ist es nicht möglich, dass auch die Energie erhalten bleibt: Über Gas kann Energie abgegeben werden. Auch bei Minor Mergern wird Energie abgegeben, nämlich durch Aufheizung der Scheibe.

### Rotationsrichtung des Störers

Wird eine rotierende Galaxie gestört, dann haben der Störer selbst und dessen Bahn

einen erheblichen Einfluss auf den Verschmelzungsprozess. Abhängig davon, ob die Rotationsrichtung des Störers **gegenläufig** (engl.: retrograde) oder in dieselbe Richtung (engl.: prograde) ist, ergeben sich Zeitunterschiede. So hat der Störer wenig Zeit zu stören, wenn er gegenläufig der Rotationsrichtung rotiert. Die Galaxienstruktur wird dabei nicht so stark verändert. Hingegen bei einem Störer dessen Rotationrichtung rechtläufig ist, bleibt mehr Zeit Masse aus der Galaxie herauszuziehen, und die Galaxienstruktur wird stark gestört. Wobei diese Betrachtungsweise in Wahrheit zu sehr vereinfacht ist, da sich die Umlaufbahnen der beiden Galaxien äußerst selten in einer Ebene befinden.

### Die Superantenne NGC 7252

Hier ist ein spektakulärer Merging-Prozess im Gange: Es sind Auswürfe von fast 100 kpc beobachtbar. Die innere Spiralstruktur scheint jedoch erhalten zu bleiben, weil die Gezeitenkraft keine so große Auswirkung auf den inneren Bereich (hoher Gravitationsdruck!) hat. Obgleich die **Struktur kaum verändert** wird, steigt die Sterndichte im Inneren.

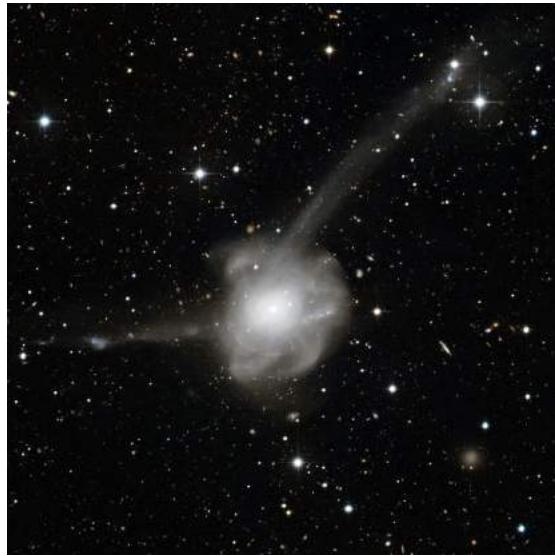


Abbildung 151: NGC 7252

### Und nach dem Verschmelzungsprozess?

Es ist fragwürdig, was nach einem Merger nun wirklich übrig bleibt. Gerade am vorherigen Beispiel erkennt man, dass das Endprodukt zweier verschmelzender Galaxien nicht immer eine elliptische Galaxie sein muss, es kann auch eine Spiralgalaxie übrig bleiben. Die Bildung einer elliptischen Galaxie ist aber wohl häufiger, da durch den Verschmelzungsprozess viel Sternentstehung und kaum Gas im Inneren bleiben, was charakteristisch für elliptische Galaxien ist.

## Super-Star Cluster

Diese bilden sich während des Merging-Prozesses in den **dichtesten Regionen**. Sie enthalten sehr viele, junge, massereiche Sterne und ionisieren das umliegende HII-Gas. Die Masse eines solchen Super-Star Clusters liegt zwischen  $10^4$  und  $10^6 M_{\odot}$ . Man geht davon aus, dass jeder Kugelsternhaufen bei seiner Entstehung solch ein Super-Star Cluster ist.

### 6.4.4 Doppelkerne als Merger-Überreste

Durch Merging können **zwei schwarze Löcher** im Zentralbereich [der neuen Galaxie] zusammen kommen.

Beobachtungen im Röntgenbereich lassen bei dieser Galaxie zwei helle Leuchtquellen erkennen, die nichts anderes als zwei schwarze Löcher sein können.

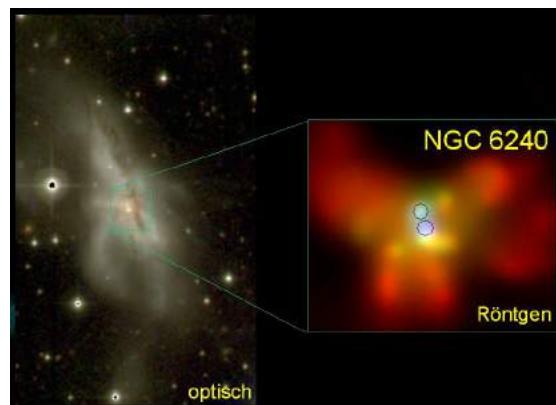


Abbildung 152: NGC 6240

Wenn sich zwei Schwarze Löcher näher kommen, muss man das relativistisch betrachten: Schwarze Löcher verursachen **Raumkrümmung**. (Raumkrümmung beschreibt die Bewegung von beschleunigten Teilchen im Raum.) Kommen nun zwei Raumkrümmungen so dicht zusammen, dann wird **Drehimpuls** nach außen hin abgeführt und es werden Gravitationswellen produziert. Gravitationswellen sind Wellen in der Raumzeit, die durch eine Veränderung von Masse und/oder Energie verursacht werden. Sie durchqueren den Raum und dabei strecken und stauchen sie diesen. Ihre Existenz wurde von der Relativitätstheorie vorhergesagt, aber direkt konnte man sie bisher nicht nachweisen. Jedenfalls führen **Gravitationswellen** von ihrer Quelle Energie ab. Bei unserer Zwei-Schwarze-Löcher-Konstellation führt dies zu einem Näherrücken jener und schließlich zu deren Verschmelzen. Es resultiert ein neues, massereicheres Schwarzes Loch.

#### 6.4.5 ULIRG [Ultra-luminous Infrared Galaxies]

Als ultra-leuchtkräftige Infrarotgalaxien bezeichnet man Galaxien mit Leuchtkräften über  $10^{12} L_\odot$ , die mehr Energie im **Infraroten** abgeben, als in allen anderen Wellenlängen zusammen. Die Energiequelle ihrer Infrarotstrahlung ist auf eine Kombination von **Starbursts** und eines **AGN** im Zentrum zurückzuführen. Neben der außergewöhnlich hohen Infrarotabstrahlung ist auch **heißer Staub** charakteristisch für ULIRGs. Mit heißen Staub ist hier nur gemeint, dass der Staub heiß im Gegensatz zu normalem Staub ist. Dieser Staub ist für die hohe Extinktion verantwortlich, weshalb ULIRGs im optischen Bereich nicht signifikant sind und deren Existenz lange Zeit unbekannt war. **Alle ULIRGs sind Merging-Galaxien!** Sie sind in einem vorangeschrittenen Stadium des Verschmelzungsprozesses. Nach der Phase als ULIRG folgt dann die Entwicklung zum Quasar und schlussendlich wird eine elliptische Galaxie daraus.

#### Beispiel: Antennen-Galaxien – NGC 4038 und NGC 4039

Nicht zu verwechseln mit der Superantenne [NGC 7252]! Die Antennen-Galaxien befinden sich in einem starken Wechselwirkungsprozess miteinander und fallen in die Kategorie der ULIRG's. Man erkennt ein in heißen Staub eingebettetes großes Sternentstehungsgebiet, ganz nach Definition der ULIRGs.



Abbildung 153: Antennen-Galaxien

#### 6.4.6 Stern- und Galaxienentstehung in Gezeitenarmen

Nicht nur Sternentstehungsgebiete formen sich durch Merging-Prozesse, es können sich sogar Galaxien in den Gezeitenarmen bilden. Es ist bekannt, dass durch Verdichtung des zurückfallenden Gases in den Armen Sternentstehung ausgelöst wird. Doch es wurden auch **sehr helle Knoten** in den Tidal Tails detektiert, die Massen bis zu  $10^8 M_\odot$

aufweisen und in denen Galaxien entstehen.

### Tadpole-Galaxie (UGC 10214)

Möglicherweise werden in den hellen Knoten in den Gezeitenarmen der Tadpole-Galaxie Zwerggalaxien produziert. Mit der Theorie, dass pro Merger circa fünf Zwerggalaxien in den Tidal Tails gebildet werden, wäre die Frage nach der Entstehung von Zwerggalaxien beantwortet. Jedoch ist diese Annahme umstritten. Aber N-Körperrechnungen zeigen, dass es so funktionieren könnte. Leider sind diese Körperrechnungen nicht so aussagekräftig, dass damit irgendetwas bewiesen wäre, da man bei diesen Rechnungen nur wenige Teilchen betrachtet und die berechneten Situationen somit nur teilweise realistisch sind.

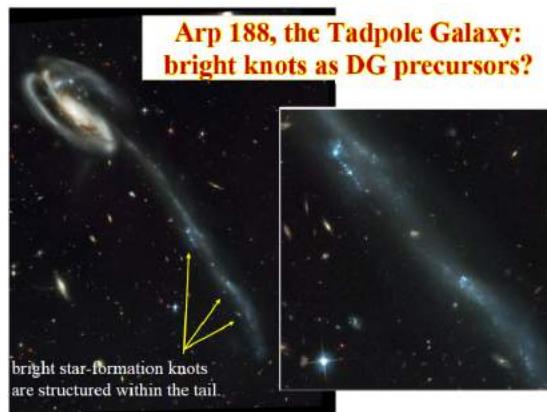


Abbildung 154: Tadpole Galaxy

#### 6.4.7 Harassment

Als Harassment [Belästigung] wird eine Störung bezeichnet, bei welcher man den Störer nicht mehr sieht. Bei dieser Variante von Begegnung fand keine Verschmelzung statt, sondern der Störer ist an der betrachteten Galaxie vorbei geflogen und hat seine Spuren hinterlassen. Es kann zwar auch beobachtet werden, dass Drehimpuls umverteilt wurde und Energie verloren ging, doch bei Weitem nicht in solch einem starken Ausmaß, sodass ein Merging möglich gewesen wäre.

## 7 Galaxiengruppen und Haufen

Einer der wichtigsten Galaxienhaufen ist der Virgo Cluster (gelbe Schrift). Dieser befindet sich zu unserer Milchstraße so nah, dass man ihn als Haufen zunächst nicht erkennen konnte. Erst durch Messungen von Radialgeschwindigkeiten wurde entdeckt, dass der Virgo Cluster eine Struktur bildet, die gebunden ist.

Andere wichtige Galaxienhaufen sind der Fornax Cluster und der Eridanus Cluster (ebenfalls in gelber Schrift). Die blau gepunkteten Linien sollen andeuten, dass diese Clusters nur von der südlichen Hemisphäre aus beobachtet werden können. Während

die blau-durchzogenen Linien Clusters verbinden, die von der nördlichen Hemisphäre beobachtet werden können. Die anderen Galaxien in der Grafik befindet sich in einer Gruppe. Im lokalen Universum sind etwa 60 % aller Galaxien in einer Gruppen gebunden. Aus der hierarchischen Strukturbildung leitet sich ab, dass sich zunächst kleinere Strukturen bilden, daraus resultiert wiederum der Aufbau von Feldgalaxien bis hin zu Galaxiengruppen und schlussendlich zu Galaxienhaufen.

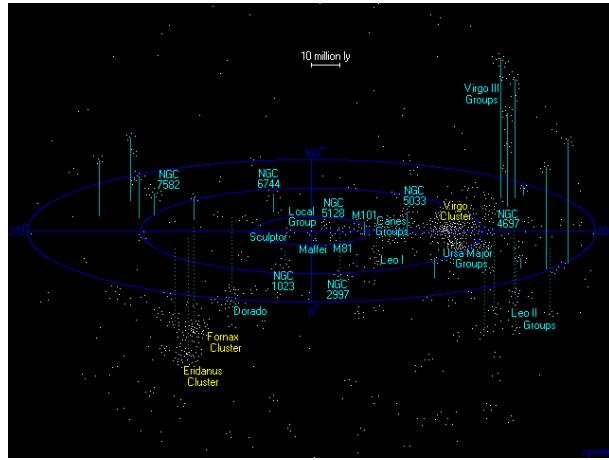
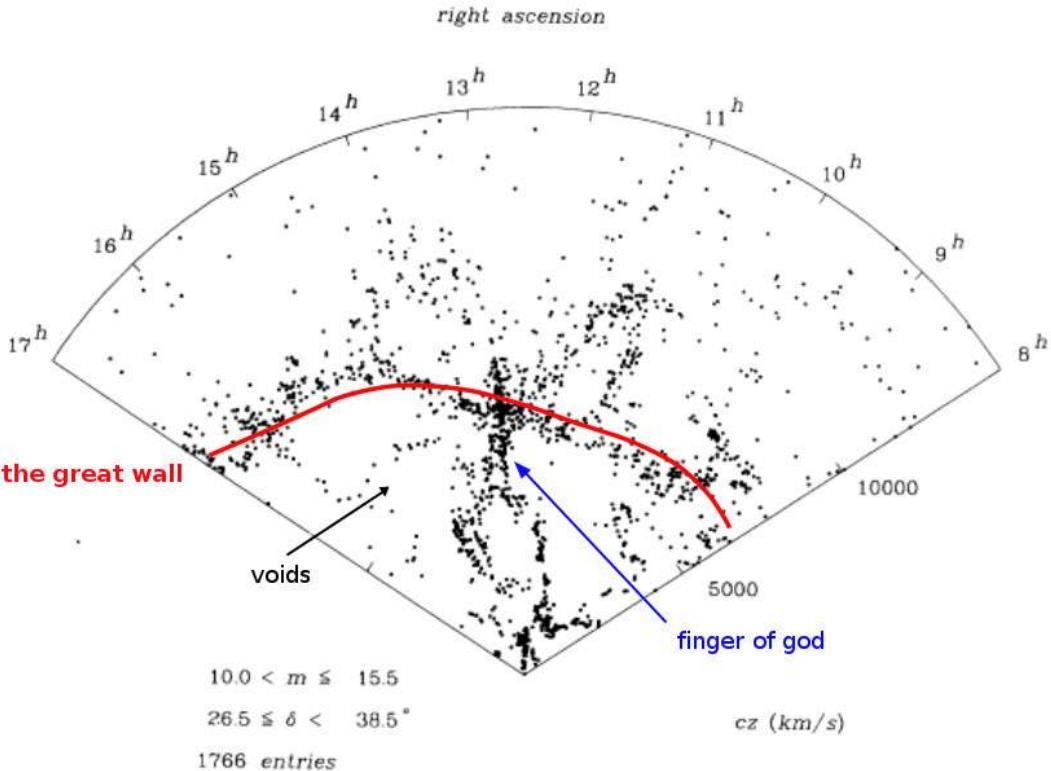


Abbildung 155

#### 7.0.8 CfA Redshift Survey

CfA (Center for Astrophysics) Redshift Survey erlaubt die Darstellung von großräumigen Strukturen um das lokale Universum.



**Abbildung 156:** Cone Diagramm

Dieses Cone Diagramm zeigt die dreidimensionale Verteilung von insgesamt 1766 Galaxien, die eine scheinbare Helligkeit im Bereich von  $15.5 \text{ mag}$  aufweisen (also eher hellere Galaxien im Vergleich). Der Deklinationsbereich von  $25.6 \leq \delta < 38.5$  ist auf die Deklinationsachse projiziert (daher das zweidimensionale Diagramm) und die Rektaszension ist von  $8^h$  bis  $17^h$  aufgetragen.

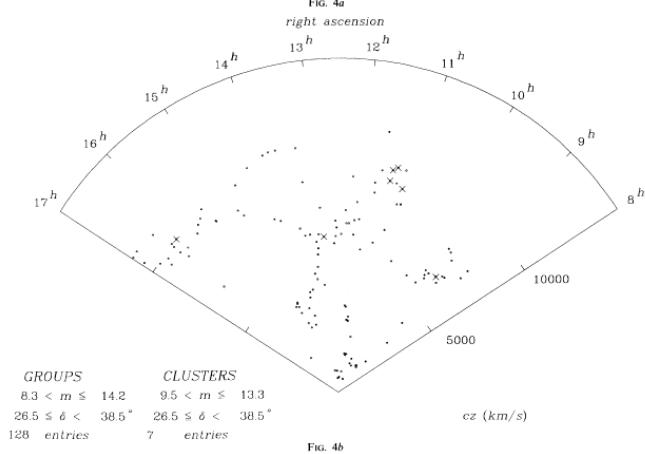
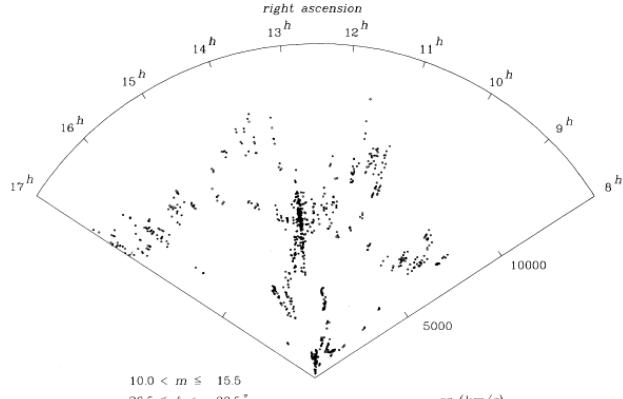
Die Achse rechts gibt die Entfernung an. Entfernungen werden normalerweise entweder in Mpc oder in Rotverschiebungen angegeben. In diesem Fall wurde die Rotverschiebung mit der Lichtgeschwindigkeit  $c$  multipliziert. Daher wurde die Radialgeschwindigkeit als Achse gegenüber der Rektaszension aufgetragen.

Aus dieser Verteilung ist ersichtlich, dass die Galaxien nicht stochastisch verteilt sind. Vielmehr kommen deutlich dichtere Strukturen hervor, aber auch Leergebiete, sogenannte (*voids*). Die Existenz der Struktur wie *the great wall* deutet auf gewisse Anfangsbedingungen bei der Entstehung des Universums hin.

*The Great Wall* ist ein Supercluster mit einer Ausdehnung von 60 Mpc mal 180 Mpc und einer Dicke von ca. 6 Mpc. Mit  $10^{16} M_{\odot}$  bildet der *Coma-Hercules Supercluster* den Großteil dieser Wand.

Ein weiteres Filament *finger of god* (welches mehr wie ein Strichmännchen aussieht) ist keine reale Struktur, sondern resultiert durch Messfehler. Grund dafür sind die Pekuliargeschwindigkeiten der Galaxien, die einen Anteil bei der gemessenen Radialgeschwindigkeit bilden und dadurch zu solchen Ausprägungen führen.

RAMELLA, GELLER, AND HUCHRA



**Abbildung 157:** Eine andere Darstellung zeigt Oben die Galaxien zusammengefasst als Galaxiengruppen mit 778 Einträgen. Unten sind nun die Verteilungen für 128 Galaxiengruppen sowie für sieben Galaxienhaufen (mit x gekennzeichnet) dargestellt.

### 7.0.9 Hierarchical Clustering

Es folgt nun die erste Überlegung wie Galaxienhaufen überhaupt definiert bzw. wie Strukturen beschrieben werden können, ohne dass Radialgeschwindigkeiten bekannt sind. In diesem Fall kann das Modell Hierarchical Clustering verwendet werden.

Dieses Schema wird anhand des folgenden Beispiels erklärt:

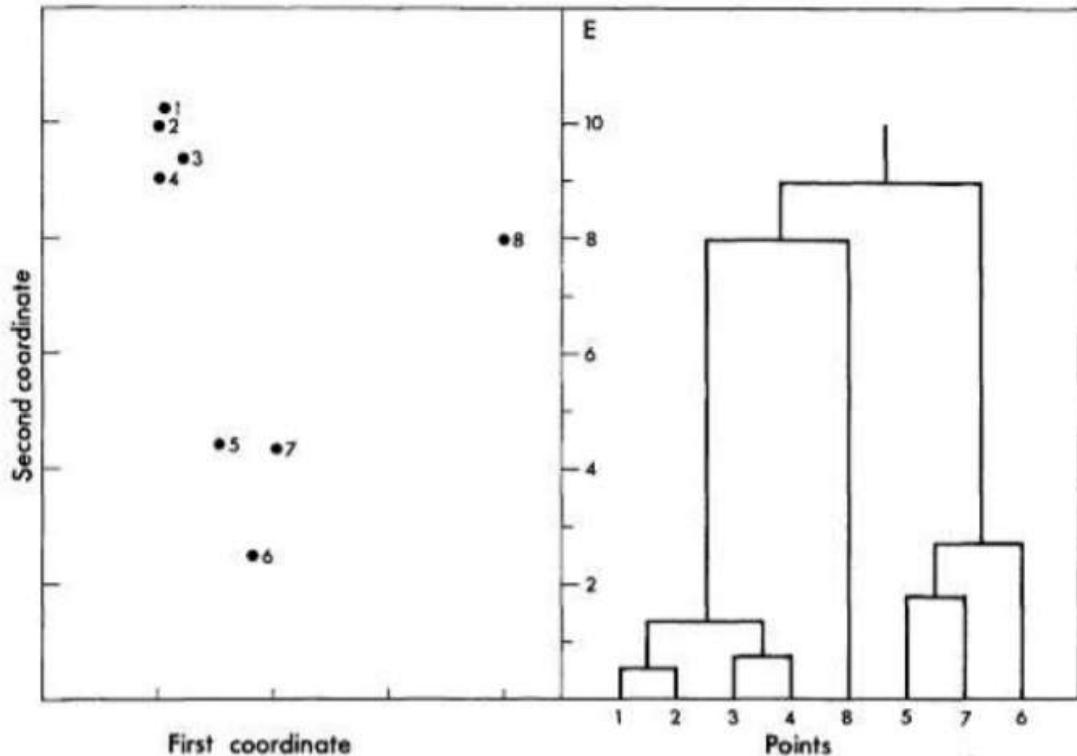


Abbildung 158

Gegeben ist die Verteilung von acht Galaxien. Für jedes Objekt gibt es eine räumliche Koordinate. Im folgenden fassen wir immer zwei Punkte zusammen, die sich am nächsten sind. Zwei zusammengefasste Punkte werden wie ein Punkt behandelt. Es wird solange zusammengefasst bis nur noch ein Punkt übrig bleibt.

**1** und **2** liegen näher beieinander als z.B. **2** und **3**. **2** und **4** sind noch weiter voneinander entfernt. Deswegen wird **1** und **2** zusammengefasst  $\Rightarrow \{1, 2\}$

**3** und **4** liegen ebenfalls näher beieinander als z.B. **3** und **2**. Deswegen wird **3** und **4** zusammengefasst  $\Rightarrow \{3, 4\}$

**5** und **7** liegen näher zusammen als z.B. **7** und **6**.  $\Rightarrow \{5, 7\}$

Punkt **1**  $\cup$  **2** und Punkt **3**  $\cup$  **4** liegen wieder am nächsten zusammen.  $\Rightarrow$   $(\mathbf{1} \cup \mathbf{2}) \cup (\mathbf{3} \cup \mathbf{4})$

**5**  $\cup$  **7** liegt wiederum am nächsten zu **6**  $\Rightarrow$   $(\mathbf{5} \cup \mathbf{7}) \cup \mathbf{6}$

Punkt  $(\mathbf{1} \cup \mathbf{2}) \cup (\mathbf{3} \cup \mathbf{4})$  liegt am nächsten zu **8**  $\Rightarrow$   $((\mathbf{1} \cup \mathbf{2}) \cup (\mathbf{3} \cup \mathbf{4})) \cup \mathbf{8}$

Somit bleibt nur noch  $((\mathbf{1} \cup \mathbf{2}) \cup (\mathbf{3} \cup \mathbf{4})) \cup \mathbf{8} \cup ((\mathbf{5} \cup \mathbf{7}) \cup \mathbf{6})$

Die Höhe zur nächsten Hierachiestufe ergibt sich immer aus der bereits bestehenden Entfernung zweier Punkte. Diese ist umso höher je weiter die Punkte auseinander entfernt waren.

## 7.1 Galaxiengruppen

Diese Methode wandte auch Brent Tully (Nearby Groups of Galaxies, 1987) an. Allerdings mit der Einbeziehung von physikalischen Kriterien, die definieren wie solche Strukturen entstehen können.

Als Kriterium könnte bspw. die Anziehungskraft in Erwägung gezogen werden. Diese ist umgekehrt proportional zum Quadrat des Abstandes zweier Punkte. Dafür wäre aber die Kenntnis der Massen von Objekten erforderlich, was sich in der Astronomie generell als schwierig unterbreitet. Deswegen hilft man sich mit der Leuchtkraft aus.

Für seine Studie konnte Tully bereits Rotverschiebung messen und hatte dadurch die dreidimensionale Verteilung von Objekten. Um Festzustellen, ob nun eine Galaxie Mitglied einer höheren Struktur ist, verwendete er als Kriterium die Dichte mit:

$$\rho = \frac{L}{R_{ij}^3} \quad (7.1)$$

Als Grenzwert definierte er weiters:

$$\rho > 10^9 \frac{M_\odot}{Mpc^3} \quad (7.2)$$

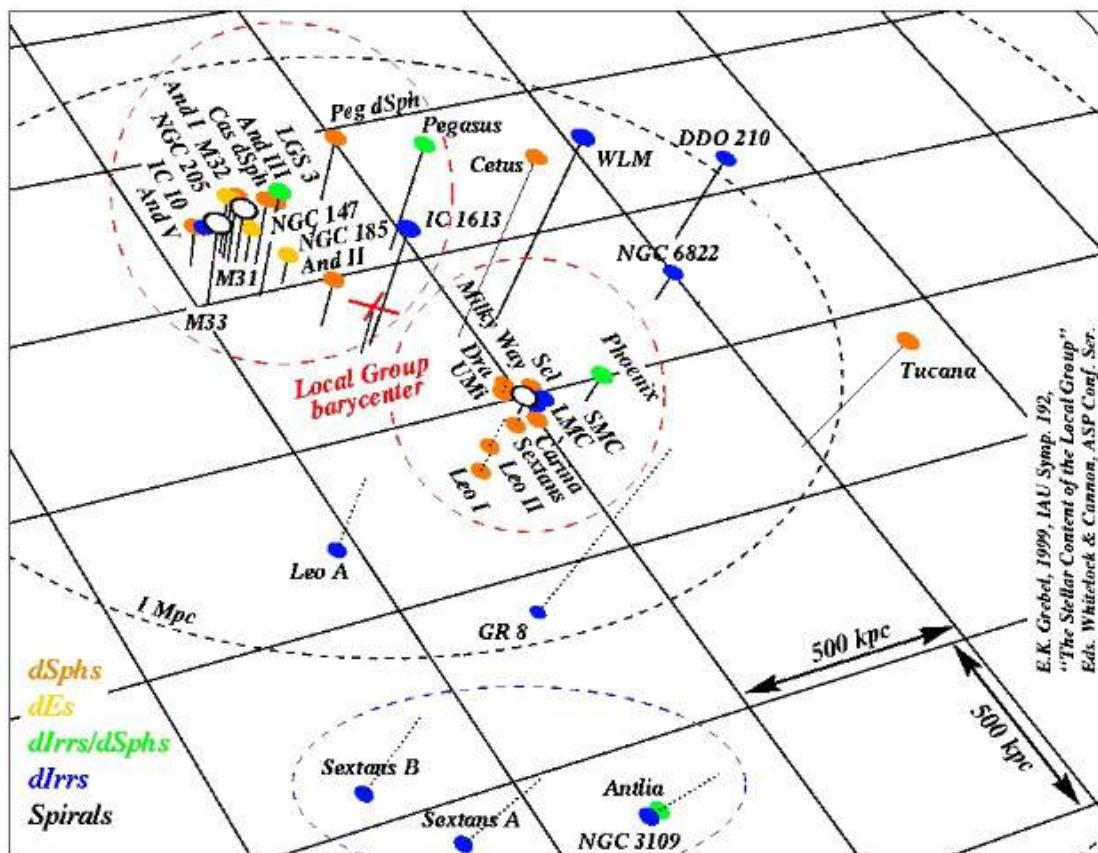
Das bedeutet jede Struktur die über diesen Grenzwert liegt wird als Gruppe definiert.

Mit dieser Dichtegrenze bestehen dann virialisierte Gebiete und diese sind somit vom allgemeinen Hubble-Flow entkoppelt. Das heißt, durch die Anziehungskraft untereinander besteht ein Umkehrradius für die Objekte.

### 7.1.1 Die Lokale Gruppe

In der folgenden Darstellung ist die Nachbarschaft der Milchstraße eingezeichnet. Innerhalb von ca. 1 Mpc sind in etwa 35 Galaxien bekannt. Diese Galaxienkonzentration wird als Lokale Gruppe (Local Group) bezeichnet. Der Schwerpunkt der Local Group liegt zwischen den Spiralgalaxien M31 (Andromeda) und der Milchstraße. Der gravitative Einflussbereich von M31 bzw. der Milchstraße ist gekennzeichnet durch die rot gestrichelten Kreise. Das heißt, innerhalb dieses Kreises sind jeweils die anderen Galaxien an M31 bzw. der Milchstraße gebunden.

Andere Galaxien wie z.B. NGC 6822 oder Tucana sind nicht an einer dieser Spiralgalaxien gebunden, aber trotzdem Mitglieder der Local Group.



**Abbildung 159:** Schematische Verteilung der Galaxien in der Lokalen Gruppe, mit der Milchstraße im Zentrum

Was passiert im Laufe der Entwicklung mit den Galaxien in einer Gruppe? Wie bereits erwähnt entkoppeln sich die Galaxien vom Hubble-Flow, die Gravitation überwiegt. Die Galaxien kommen sich immer näher, bis sie schließlich verschmelzen, sogenanntes *mergen*. In den nächsten 4 Mrd. Jahren wird auch die Milchstraße mit M31 zu einer

spheroidalen elliptischen Galaxie mergen.

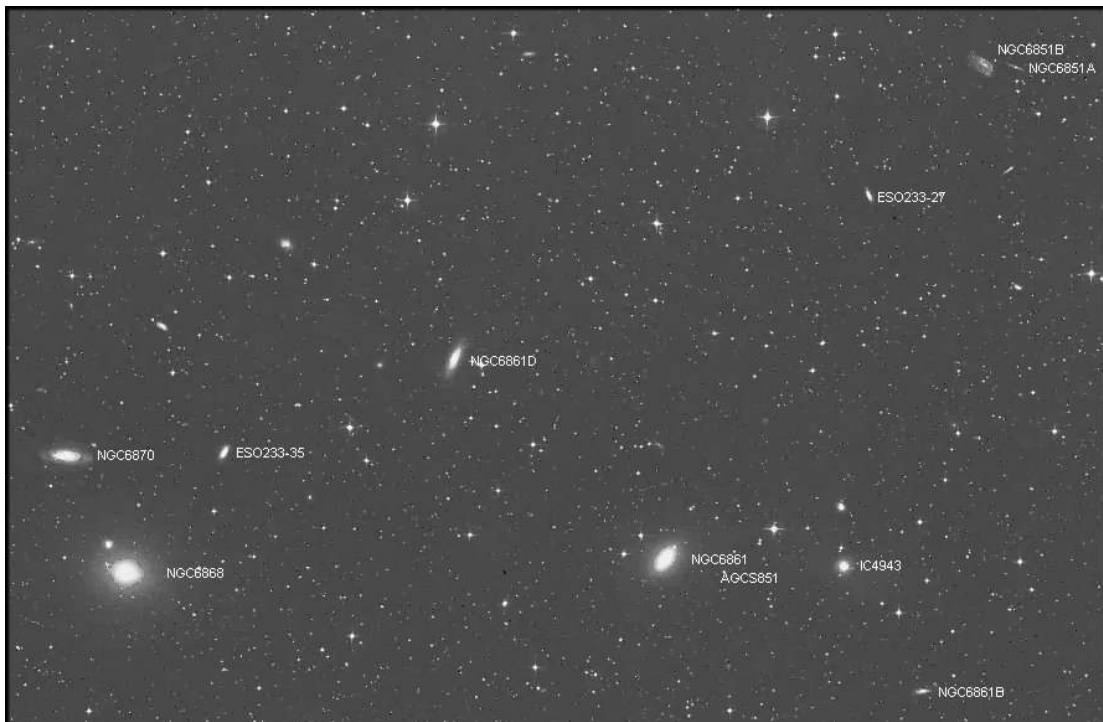
### 7.1.2 Arten von Gruppen

Es werden drei Arten von Gruppen unterschieden. Loose Groups (LG), Compact Groups (CG) und Fossil Groups (FG). Die Definition erfolgt über die Anzahl der Mitglieder und die räumliche Verteilung. Die Local Group zählt zu den Loose Groups.

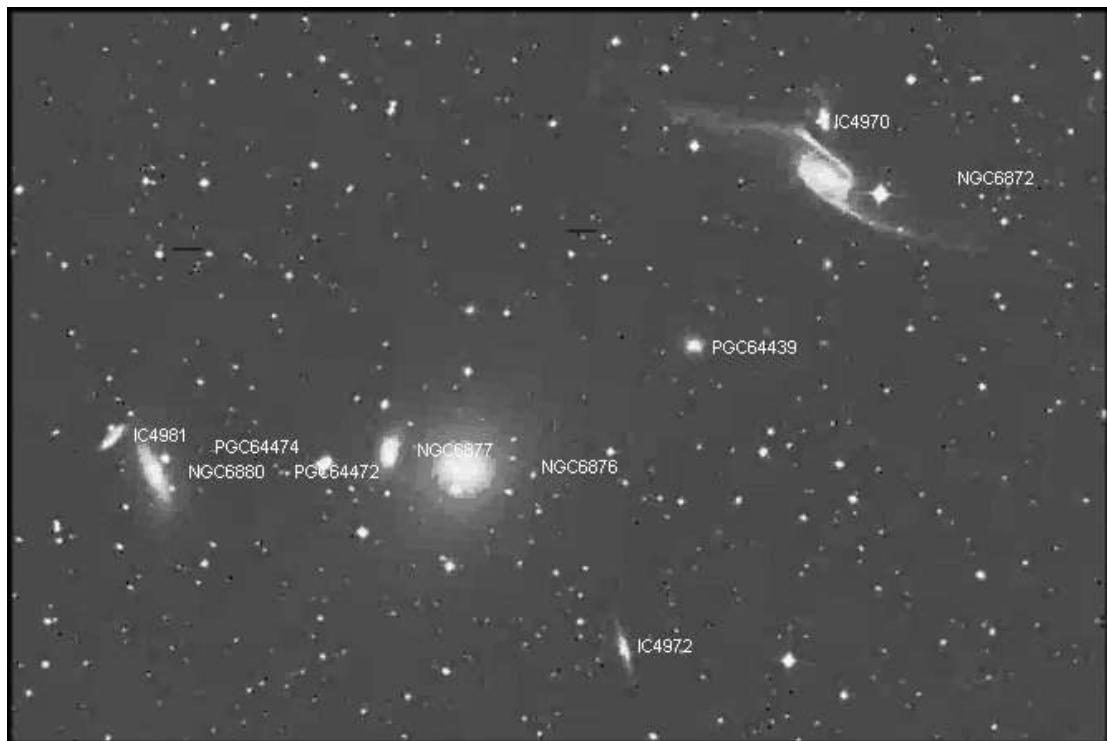
#### Loose Groups

Loose Groups zählen in gewissermaßen zu den Standard-Gruppen. LGs werden meist nur als Gruppe bezeichnet. Eine Gruppe besteht im Prinzip aus ca. 20 bis 500 Galaxien in einem bestimmten Volumen. Alles was darüber geht wird als Haufen (Cluster) bezeichnet.

Zwei Beispiele für eine Loose Group sind Telescopium und Pavo jeweils mit ihren zwei Hauptvertretern.



**Abbildung 160:** Telescopium (NGC6861 & 6868)



**Abbildung 161:** Pavo (NGC6872 & 6876)



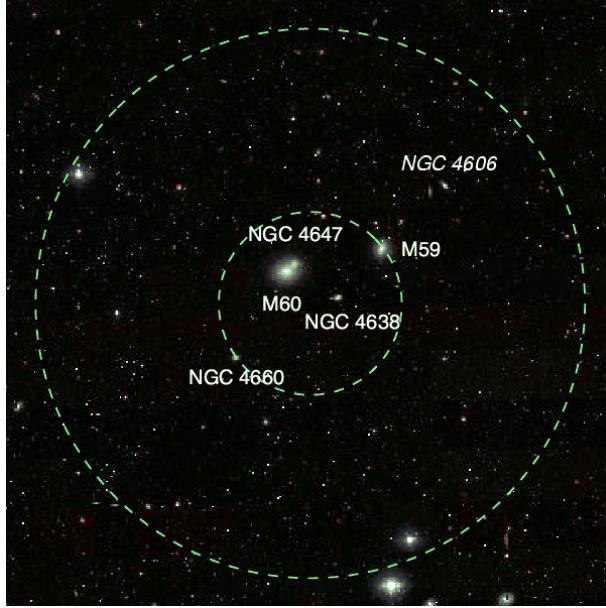
**Abbildung 162:** Ausschnitt aus Pavo. Man erkennt deutlich, dass die Spiralarme von NGC 6872 durch die Wechselwirkung mit IC 4970 auseinander gezogen wurden. Die erste Begegnung reichte bereits aus, um Sterne aus dieser Galaxie zu lösen.

## Compact Groups

Compact Groups zeichnen sich vor allem dadurch aus, dass in ihnen nur eine geringe Anzahl an großen und hellen Galaxien vorhanden sind. Paul Hickson stellte 1982 erstmals einen Katalog für solche Galaxiengruppen auf. Die Existenz solcher Gruppen war früher umstritten. Zum einen war das Argument, dass solche Anordnungen rein durch Projektionseffekte entstehen. Das bedeutet solche Anordnungen erscheinen nur Aufgrund der Sichtlinie als Gruppe. Das andere Argument war, falls es tatsächlich solche Galaxien gäbe, die so nah beieinander stünden, so müssten sie relativ rasch miteinander verschmelzen. Heute wissen wir, dass viele Compact Groups wirklich existieren. Röntgenbeobachtungen zeigen, dass heißes Plasma zwischen den Galaxien gravitativ gebunden ist und somit ein gemeinsames Gravitationspotential vorliegt.

Für eine Compact Group stellte Hickson folgende Kriterien auf:

- **number criterium:** Es müssen mindestens 4 Galaxien vorhanden sein.  $N_{gal} \geq 4$ . Wobei es sich nicht um Zwerggalaxien handeln darf.
- **magnitude criterium:** Die scheinbare Helligkeit einer Galaxie ist nicht um mehr als 3 mag schwächer als die hellste Galaxie in einer Compact Group.
- **compacity criterium:** Für die Leuchtkraft aller Galaxien zusammengefasst gilt für die Oberflächenhelligkeit  $m_g < 26 \text{ mag}/\text{arcsec}^2$
- **isolation criterium:** Compact Groups sind räumlich isoliert, d.h. in der näheren Umgebung gibt es keine weiteren Galaxien.

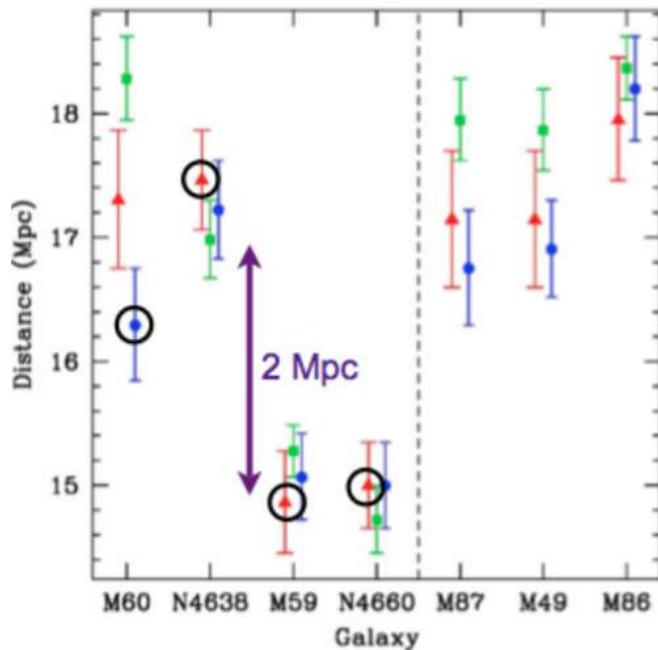


**Abbildung 163:** isolation criterium: Zwischen dem äußeren und inneren Ring befindet sich eine Isolationszone. Innerhalb diesen Bereiches dürfen sich keine Galaxien befinden, die sich um bis zu 3 mag von der hellsten Galaxie unterscheiden. Der äußere Ring ist um den Faktor 3 größer als der Innere. Zu beachten ist, dass NGC 4606 sich im Hintergrund befindet und kein Mitglied dieser Gruppe ist.

Als zusätzliches Kriterium wurde später noch hinzugefügt, dass die Radialgeschwindigkeiten innerhalb von 1000 km/s übereinstimmen müssen.

Da sich die Galaxien nicht nur entlang der Sichtlinie bewegen, sondern auch tangential dazu, vollführen sie sogenannte Pekuliarbewegungen. Im lokalem Universum macht es einen Unterschied wie man Entfernungen von Objekten bestimmt, während bei großen Entfernungen die Pekuliarbewegungen keine Rolle mehr spielen. Für die wahre Entfernung braucht man eigentlich zwei unabhängige Entfernungsmessungen. Zum einen die Radialgeschwindigkeit über die Spektroskopie oder z.b. mit der Methode Surface Brightness Fluctuation (SBF).

Gary Mamon verwendete diese Methode um die wahre Entfernung von Galaxien zu bestimmen. Dadurch erkannte er, dass teilweise Galaxien 2 Mpc voneinander entfernt sind.

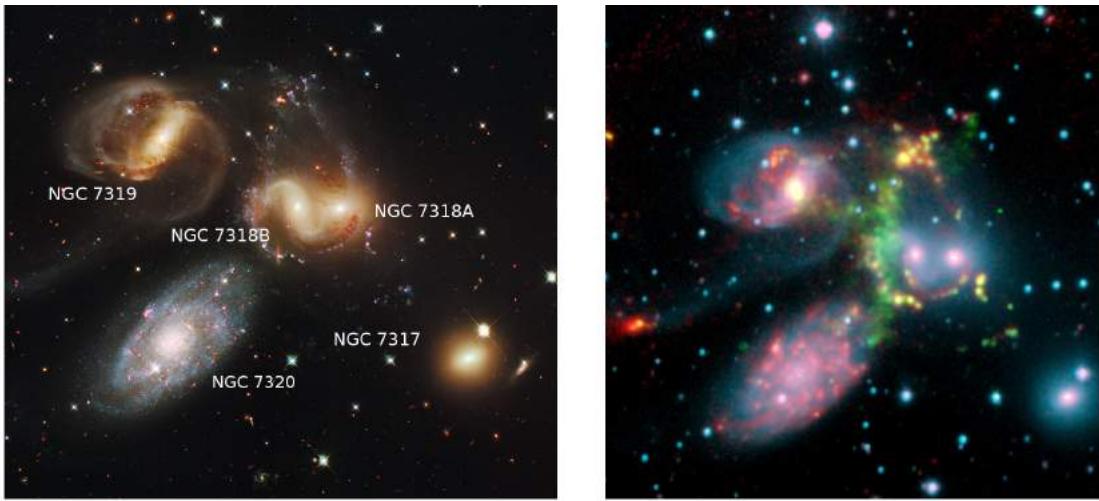


**Abbildung 164:** SBF Distanzen für 4 ellipticals in M 60 CG (links)

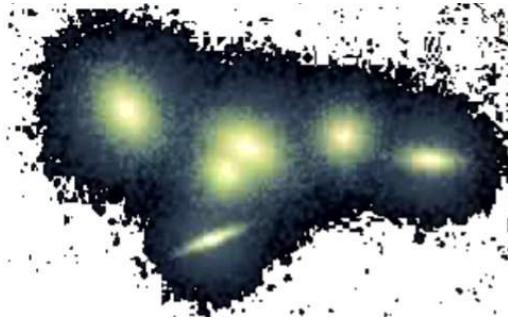
Für ihn war dies damals der Beweis, dass CGs doch nicht existieren, sondern nur durch Projektionseffekte entstehen. Andererseits ergab sich später wie bereits gesagt, durch die Röntgenstrahlmessungen wiederum dann doch, dass diese Galaxien ein gemeinsames Gravitationspotential haben.

Die *Millennium Simulation* brachte für Mamon die Lösung dieses Problems. Diese Simulation lieferte für verschiedene Zeitabschnitte eine Verteilung von Objekten. Letztendlich entdeckte Mamon unter der Verwendung der Hickson Kriterien rund 350 CGs und wandelte sich von einem Gegner in einen Verfechter der Theorie über Gruppengalaxien.

Hier noch ein Beispiel für eine Compact Group, das Stephans Quintett:



**Abbildung 165:** Stephans Quintett. (Rechts) NGC 7230 wurde ursprünglich zu Stephans Quintett gerechnet. Es handelt sich jedoch um eine Vordergrundgalaxie und wird heute nicht mehr dazu gezählt. (Links) Untersuchungen von Spitzer im Ferninfrarot zeigen in verschiedenen Farben verschiedene Temperaturkomponenten des Staubes im Stephans Quintett. Der Staub ist nicht nur in den Galaxien sondern auch zwischen diesen zu sehen, im Intergalaktischen Raum zwischen den Galaxien im gemeinsamen Gravitationspotential der Gruppe.



**Abbildung 166:** Im Röntgenbereich ist in Blau das von der Röntgenstrahlung emittiertes Plasma ( $1 - 100 \cdot 10^6 K$ ) zu sehen. Dieses Intragroup Medium besteht aus ionisiertem Plasma, welches zwischen den Galaxien verteilt ist.

Ein anderes Beispiel, das Seyferts Sextett:



**Abbildung 167:** Auch hier täuscht der Name. Nicht zum Sextett gehört die Spiralgalaxie in der Mitte. Der diffus aussehende Arm unten rechts ist ein Gezeitenarm. In dieser Gruppe sind also nur vier Galaxien vorhanden.

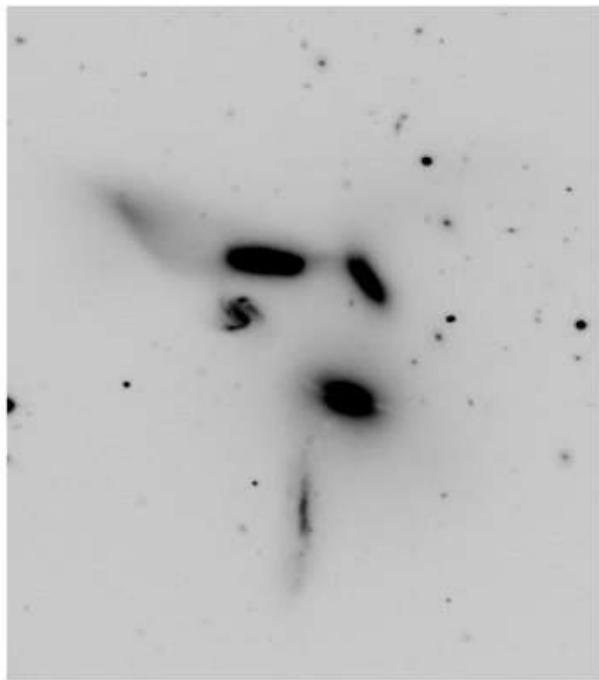
### Fossil Group

Wichtige Indikatoren für solche Gruppen sind Riesenellipsen mit einem sehr ausgedünnten x-ray Halo, deren Halo-Masse sowie Röntgenleuchtkraft ca. 100 mal größer ist, als von typisch elliptischen Galaxien. Früher hat man angenommen, dass solche Gruppen Überreste von CG-Verschmelzungen sind.

Inzwischen ist man jedoch der Meinung, dass Fossil Groups eventuell Überreste von Strukturen sind, die am Anfang der Entwicklung des Universums kollabierten.

### 7.1.3 Intragroup Light

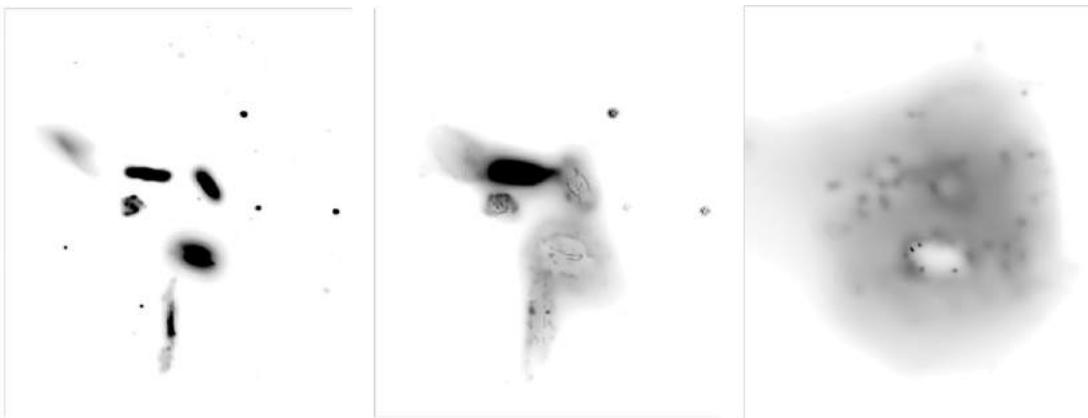
Neben der Röntgenmessung gibt es auch noch eine andere Methode um Gruppen zu detektieren. Zwischen den Galaxien findet man im Optischen Licht diffus aussehende Komponenten, die mit einer Oberflächenhelligkeit von ca.  $28 \text{ mag}/\text{arcsec}^2$  zwar sehr schwach sind aber trotzdem genügen um zu zeigen, dass sie eine gebundene Struktur darstellen. Dieses Licht resultiert aus Sterne und Sternhaufen, die während der Wechselwirkungen zwischen den Galaxien herausgerissen wurden.



**Abbildung 168:** Seyferts Sextett im Intragroup Light

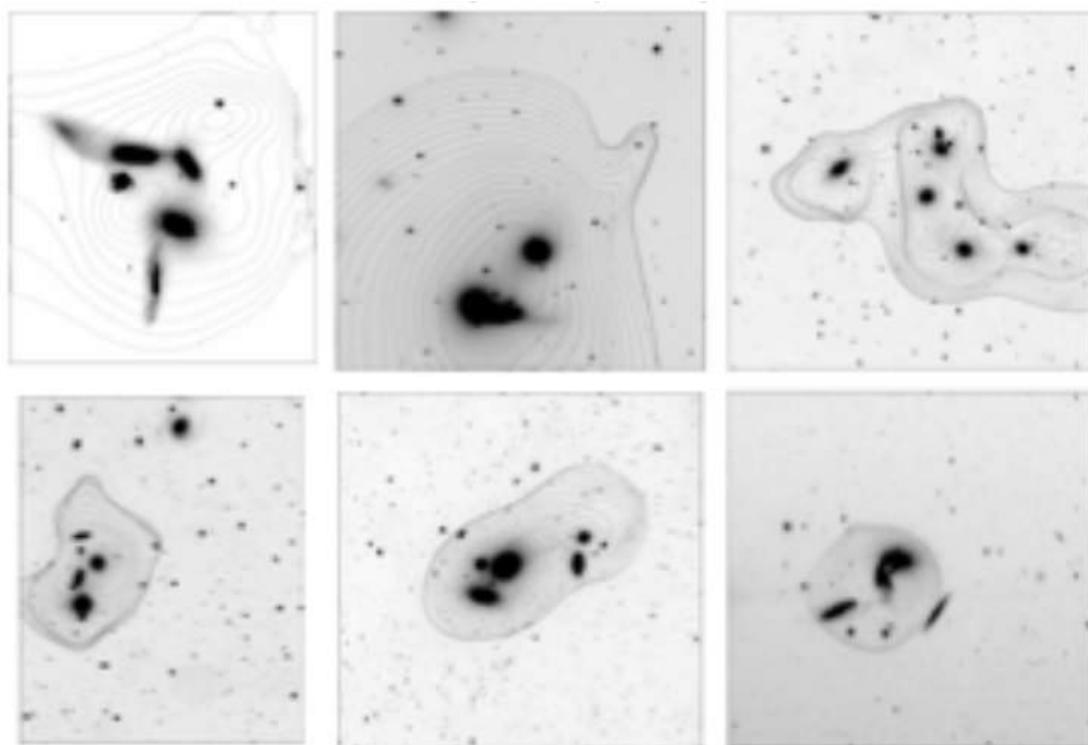
Falls die Anzahl der Sterne und das Verhalten deren Verteilungen bekannt sind, dann lässt sich die Entwicklung die Gruppe studieren. (Dynamical Indicator for Interaction). Dazu benötigt man eine bestimmte Methode, die Wavelet Analyse. Mit dieser Methode hat man die Möglichkeit verschiedene hierarchische Strukturen zu trennen bzw. charakteristische Größen hervorzuheben.

In der folgenden Abbildung sind Links zuerst die großräumigen Strukturen (noise und sky). In der Mitte sind nun die sog. extended Sources zu sehen. Hier lassen sich sehr gut die Galaxien mit ihren Halos identifizieren. Rechts sind dann die kompakten inneren Regionen der Galaxien aufgelöst (point sources).



**Abbildung 169:** Wavelet Analyse von Seyferts Sextett

Hier nun noch ein weiters Beispiel:



**Abbildung 170:** Wavelet Analyse von sechs verschiedenen Compact Groups

Die Konturen indizieren das Intragroup Light, welches in verschiedenen Oberflächenheligkeiten unterteilt ist. Zum einen erkennt man, dass dieses Licht über die gesamte Gruppe verteilt ist. Zum anderen, dass die Ausdehnungen relativ verschieden ausgeprägt sind. Durch das Aussehen dieser Konturen lässt sich nun feststellen, wie lange

Strukturen/Gruppen schon vorhanden sind.

Die Gesamtleuchtkraft des Intragroup Light kann varieren zwischen 15% und 50%. (Es gibt Fälle bei denen das Intragroup Light in einem ähnlichen Helligkeitsbereich geht wie die Galaxie selbst. Aber auch, dass eine Gruppe überhaupt kein Intragroup Light zeigt).

Über die Helligkeit des IGL lässt sich nun das Alter bestimmen. Je länger eine Gruppe schon besteht, desto größer ist die Chance, dass sie miteinander wechsel gewirkt haben und dadurch Sterne herausgerissen wurden. Generell gilt je heller desto älter ist eine Gruppe.

Weiters lässt sich sagen, je runder die Konturen sind desto länger hat die Gruppe Zeit gehabt zu virialisieren bzw. zu relaxieren.

## 7.2 Galaxienhaufen

Eine der ersten Untersuchungen von Galaxienhaufen (Clusters) stammt von Abell und Zwicky.

Abell führte 1958 folgende Definition für einen Haufen ein, wobei die projizierte Anzahl-dichte von Galaxien als Umgebung gegeben ist:

Es existieren mindestens 50 Galaxien, deren Helligkeiten jeweils der Helligkeit der dritt hellsten Galaxie entsprechen oder um bis zu 2 mag schwächer sind und sich innerhalb des Radius  $R_A \approx 3\text{Mpc}$  ( $H_0 = 50$ ) (Abell-Radius) befinden. Aus heutiger Sicht weiß man, dass für solche Gebiete dieser Radius eher 2 Mpc entspricht.

Der Abell-Katalog mit 2712 Haufen beinhaltet folgende Punkte:

- Positionen
- Die scheinbaren Helligkeiten der zehn hellsten Galaxien
- Entfernungsklassen ( $z \leq 20$ ) abgeschätzt durch die scheinbaren Helligkeiten
- Reichheit (richness class). Je nach Anzahl der Objekte die sich in einem Cluster befinden, gibt es eine bestimmte richness class.

Richness	0-1	2-3	4	5
Anzahl	30-79	80-199	200-299	>300

Zwicky (1961) führte eine ähnliche Definition für einen Galaxienhaufen ein. Das Kriterium lautet: Es gibt mindestens 50 Galaxien, die sich innerhalb des Intervalls  $[m_1, m_1 + 3]$  befinden.  $m_1$  ist hier aber die scheinbare Helligkeit der hellsten Galaxie in einer bestimmten Umgebung.

Im Vergleich sind Zwicks Kriterien wesentlich lockerer als Abells, daher ist sein Katalog auch wesentlich größer. Diese beiden Kataloge wurde damals nur für die nördliche Hemisphäre erstellt. Später wurde auch von West und Frandsen 1981 ein Katalog für die Südliche erstellt. 1989 wurde der Abell-Katalog mit Hilfe von Corwin und Olowin zu einem all-sky Katalog erweitert, der sogenannte ACO-Katalog.

Ähnlich wie für Galaxien versuchte man auch eine Systematik für Galaxienhaufen zu schaffen. Generell wird zwischen Regulären und Irregulären Galaxienhaufen unterschieden.

Eigenschaft	regulär	→	irregulär
Typklasse	früh	mittel	spät
Zwicky	kompakt	mittelkompakt	offen
Bautz-Morgan	I, I-II, II	(II), II-III	(II-III), III
Rood-Sastry	cd, B, (L,C)	(L), (C), (F)	(F), I
Symmetrie	sphärisch	(elliptisch)	keine
Konzentration	stark zentral	mäßig	keine
Galaxieninhalt	E/S0, kaum S	überwiegend S0, wenig S	viele S, Irr
Anzahl ( $\leq m_1 + 7$ )	> 1000	1000 (100)	100 - 1000
Masse	$10^{10} M_\odot$	$10^{11} \dots 10^{15} M_\odot$	$10^{12} \dots 10^{14} M_\odot$
Substruktur	keine	2 oder mehr Kerne	Mehrfaichkernsysteme
Dispersion $\sigma_v$	$> 1000 \text{ km s}^{-1}$	$1000 \text{ (100) km s}^{-1}$	$100 \text{ - } 1000 \text{ km s}^{-1}$
Dichteprofil	steil	mittel	flach
Radioemission	55%	50%	25%
Röntgenemission	33%	5%	8%
Beispiele	Coma	A194	Virgo, Hercules

Gehren (USM)

Abbildung 171: Systematik von Gehren (USM)

### 7.2.1 Der Virgo Haufen

Der Virgo Haufen ist ein sehr junger Haufen, der gerade dabei ist zu entstehen. Er besteht aus ca. 2000 Galaxien (ca. 90 Prozent davon sind Zwerggalaxien) und ist Teil des Virgo Supercluster. Die Entfernung beträgt ca. 16 Mpc und ist der größte und nähreste Cluster zur Local Group. Es wird vermutet, dass sich die Local Group sogar am Rand des Virgohaufens befindet. Die Gesamtmasse wird auf  $10^{15} M_\odot$  geschätzt. Sowohl Spiral- als auch elliptische Galaxien sind vertreten, wobei die Es mehr im Zentrum zu finden sind. Die elliptische Galaxie M87, welche sich im Zentrum befindet, bildet die dominierende Galaxie. Die Geschwindigkeitsverteilung variiert stark in Abhängigkeit der Typen. Die späten Typen haben eine Geschwindigkeitsdispersion von  $\sigma = 990 \text{ km/s}$ . Die frühen Typen eine Geschwindigkeitsdispersion von  $\sigma = 550 \text{ km/s}$ .



**Abbildung 172:** Der Virgo Haufen.

Die folgenden Diagramme sind aus dem Virgo Cluster Catalog entnommen. Die Grafik Links zeigt die großräumige Verteilung der gesamten Virgostruktur. Um M87 befindet sich eine hohe Dichteanhäufung. Weiters sieht man eine Überdichte um M49. Früher wurde diese Ansammlungen als Cluster interpretiert (deswegen die Bezeichnung M87 bzw. M49 Cluster). Rechts indiziert die Symbolgröße jeweils die Helligkeitsunterschiede der Galaxien relativ zu den Anderen.

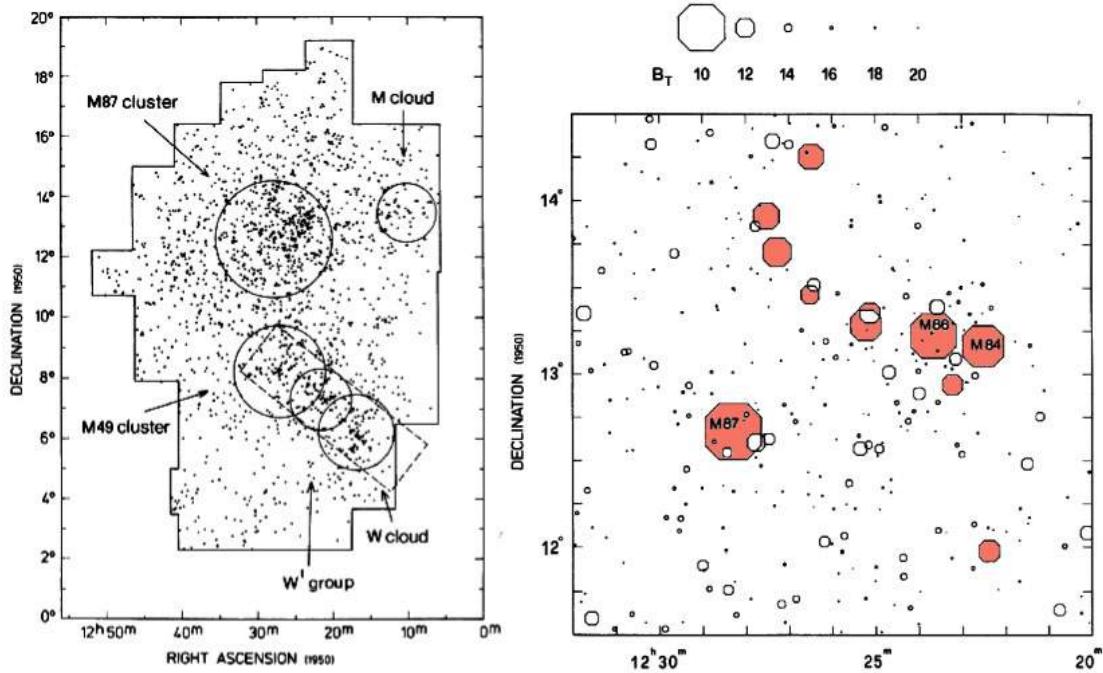


Abbildung 173

Um Festzustellen ob eine Galaxie Mitglied einer gebunden Einheit ist, muss zunächst gelten dass die gravitative Bindung größer ist als die kinetische Energie der einzelnen Objekte  $E_{kin} < E_{pot}$ . Für die potentielle Energie im Abstand R vom Haufenzentrum gilt:

$$\varepsilon = \frac{GM(R)}{R} \quad (7.3)$$

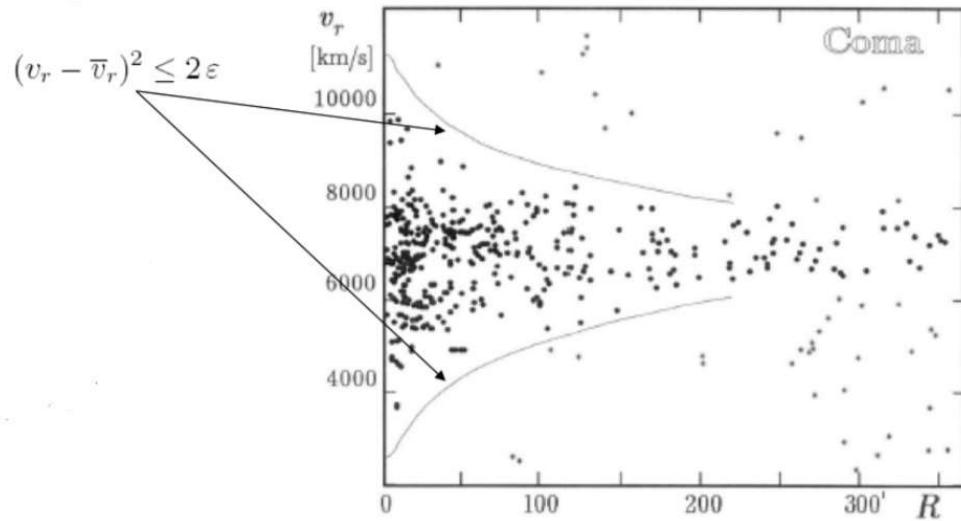
$M(R)$  ist die Masse innerhalb des Radius R. Als grobe Abschätzung für die kinetische Energie wird folgendes eingeführt:

$$\frac{1}{2}(v_r - \bar{v}_r)^2 \quad (7.4)$$

$\bar{v}_r$  entspricht hier der Systemgeschwindigkeit. Die Individualgeschwindigkeiten ergeben sich jeweils aus der Differenz der Systemgeschwindigkeit und entsprechen dann der kinetischen Komponente der einzelnen Objekte. Für ein virialisiertes System gilt also:

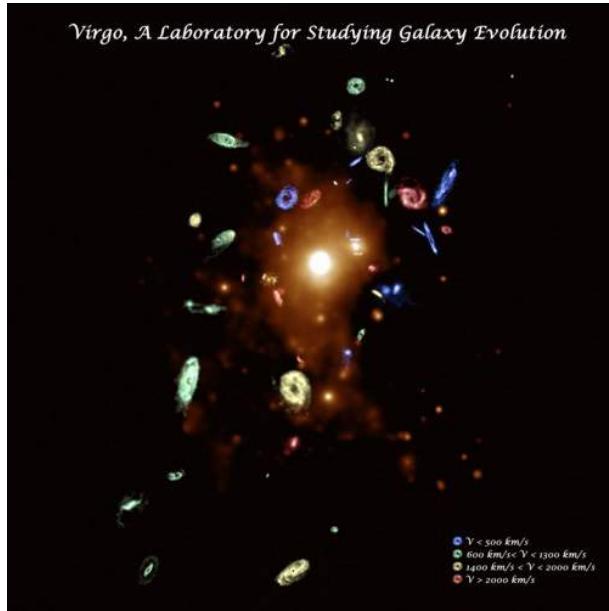
$$(v_r - \bar{v}_r)^2 < 2\varepsilon \quad (7.5)$$

Für diese Bedingung erhält man ein Parabelgesetz. Die Parabeln in der folgenden Grafik zeigen die Grenzen an, innerhalb dessen Galaxien Mitglieder von Clusters sind.



**Abbildung 174:** Im Zentrum kann die Relativgeschwindigkeit sehr groß sein, bis zu 200 km/s Differenz. Während sie in den äußeren Bereichen geringer ist.

Galaxien haben natürlich immer unterschiedliche Relativgeschwindigkeiten. Bei relaxierten Haufen gilt die Systemgeschwindigkeit im Zentrum.



**Abbildung 175:** Diese Abbildung zeigt, welche Geschwindigkeitskomponenten die einzelnen Galaxien haben. Blau kennzeichnet kleine Relativgeschwindigkeit während rot die hohen zeigt. Diese Grafik soll verdeutlichen, dass man die Mitgliedschaft einer Galaxie nur durch die dreidimensionale Verteilung des Haufens bestimmen kann.

Die Gesamtmasse eines Galaxienhaufens lässt sich über die Geschwindigkeitsdispersion ableiten. Sie ist eine Eigenschaft, die durch das Gesamtpotential verursacht wird. Je größer der Gravitationstopf ist, desto schneller können sich in diesem Objekte bewegen, ohne dass sie auseinander fliegen. Je kleiner, desto geringer müssen die Bewegungen der Objekte sein um gebunden zu bleiben. Reiche Galaxienhaufen weisen eine so große Masse auf, sodass Geschwindigkeitsdispersionen von rund 1000 km/s auftreten können. Bei Gruppen ist dieser Wert um einiges geringer. Er liegt bei 200 - 500 km/s. Für Compact Groups ist es sogar noch weniger.

### 7.2.2 Coma Cluster

Der Coma Cluster befindet sich etwa 68 Mpc entfernt und besteht aus ca 1000 Galaxien, hat einen Durchmesser von ca. 6Mpc, eine Gesamtmasse von ca.  $10^{15} M_{\odot}$  und eine Geschwindigkeitsdispersion  $\sigma = 977$  km/s. Im Gegensatz zum Virgo Cluster ist dieser Haufen relativ kompakt und regulär. Das Zentrum ist dominiert von zwei E-Galaxien, NGC 4874 und NGC 4889. In der Umgebung des Zentrums befinden sich hauptsächlich große Es. In den äußeren Bereichen befinden sich wiederum mehr Spiralgalaxien. Es wird geschätzt, dass ca. 90 Prozent Dunkle Materie vorhanden ist. In Zentrumsnähe befindet sich eine starke Röntgenquelle mit der Röntgen Leuchtkraft  $L_x = 2.610^{44}$  ergs/s. Die stärkste vorhandene Röntgenquelle wird Coma X-1 genannt.



**Abbildung 176:** Der Coma Haufen. Dieses Bild zeigt eine Echtfarbenaufnahme des Coma Haufens. Die gelben Objekte stellen elliptische Galaxien dar. Die Blauen Spiralgalaxien mit heißen Sternentstehungsgebieten.

### 7.2.3 Hercules Haufen

Dieser Haufen ist ca. 150 Mpc entfernt und besteht aus vielen Spiralgalaxien. Er ist deswegen interessant da die meisten Galaxienhaufen eigentlich durch elliptische Galaxien dominiert sind. Dieser Haufen ist ein typisches Beispiel für einen irregulären, offenen Haufen. Mit der Annahme dass sich Galaxienhaufen hierachisch bilden, besteht die Vermutung, dass solche Haufen den Prototyp für die ersten Galaxienhaufen sind, die sich bei hohen Rotverschiebungen zeigen.



**Abbildung 177:** Der Hercules Haufen

#### 7.2.4 Die wichtigsten Eigenschaften

Hier eine kurze Zusammenfassung der Wichtigsten Eigenschaften von Clustern:

- Durchschnittle Größe:  $R \approx 10 \text{ Mpc}$
- totale optische Leuchtkraft  $L \approx 10^{13} L_\odot$
- viriale Masse  $M \approx 10^{15} M_\odot$
- Geschwindigkeitsdispersion  $\sigma \approx 1000 \text{ km/s}$
- Crossing time  $t \approx R/\sigma \approx 10^9 \text{ years } \frac{R/\text{Mpc}}{\sigma/1000 \text{ km/s}}$

Für solche Größenordnungen ist das Massen-zu-Leuchtkraft-Verhältnis größer, als zum Beispiel für eine Spiral- oder elliptische Galaxie, bei denen dieses Verhältnis zwischen 3-10 liegt. Das heißt bei größeren Strukturen nimmt die M/L Ratio zu, was auf Dunkle Materie zurückzuführen ist (macht ca. 90 % für einen Häufen aus).

Weiters noch eine Tabelle für die wichtigsten Skalen:

Strukturen	Skalen
field galaxies	< 0.1 Mpc
pairs, triplets	$\approx 1.5$ Mpc
groups	
associations	
clouds	
clusters	> 10 Mpc
super clusters und voids	$\approx 50$ Mpc

### 7.2.5 Morphologische Verteilung

In der unten stehenden Grafik ist Anzahl der Galaxien (Spiral-, irreguläre- elliptische, S0 und Dwarf elliptical Galaxien sind jeweils zusammengefasst und mit einem Quadratgrad normiert) gegen die Entfernung vom Zentrum aufgetragen. Dwarf-elliptical treten am häufigsten auf, und wie bereits erwähnt, dominieren die sogenannten Earlytype Galaxy, E und S0-Galaxien, während Spiralgalaxien untergeordnet sind.

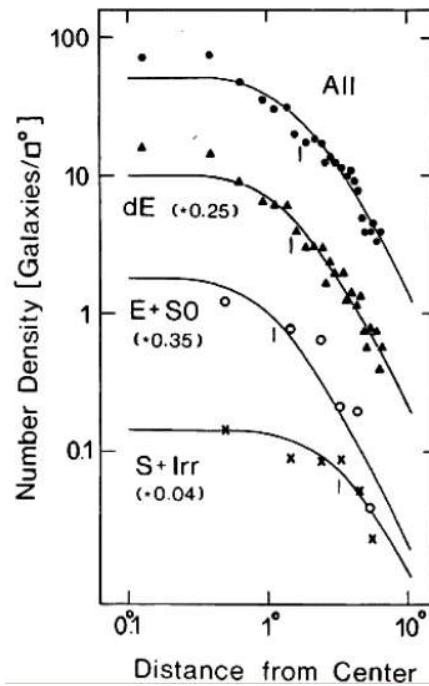
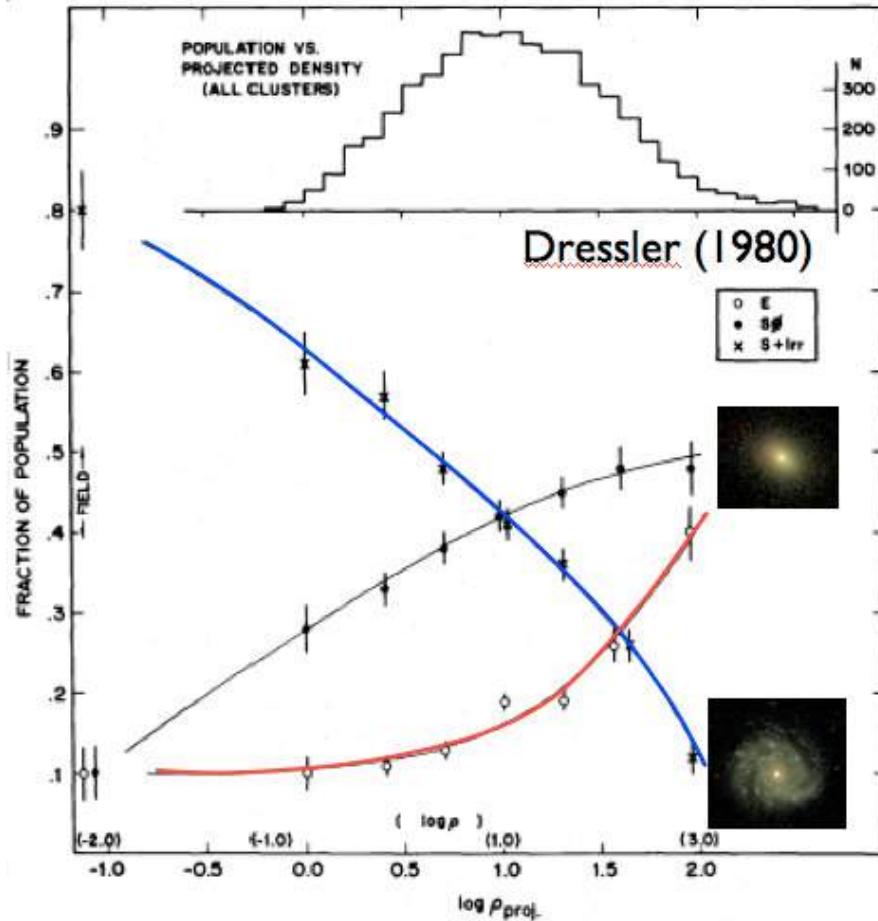


Abbildung 178: Morphologische Verteilung für den Virgo-Haufen

### Density Relation

In der nächsten Grafik ist entlang der x-Achse die projizierte Galaxiendichte aufgetragen (Anzahl der Galaxien pro Quadratgrad). Man erkennt, dass Spiralgalaxien im isolierten Feld mit ca. 70 % bis 80% dominieren, während elliptische bzw. S0 Galaxien weniger vertreten sind. Mit zunehmender Galaxiendichte verändert sich die Anzahl der Spiralgalaxie fast linear zu einem deutlich geringeren Wert. Während die Es und S0 Galaxien an

Häufigkeit von ca. 50 % zunehmen. Im Zentrum von Galaxienhaufen sind daher Early-types Galaxien mehr vertreten, am Rand bei niedrigerer Dichte, sinkt der Anteil dieser Es und S0 Galaxien, für die Spiralgalaxien steigt er hingegen.



**Abbildung 179:** Density Relation

Es stellt sich nun die Frage, wie die Density Relation zu Stande kommt. Zwei grundlegend verschiedene Szenarien können diesen Umstand beschreiben.

- 1) Eine Hypothese besagt, dass der Typ der Galaxie von den Anfangsbedingungen (bei hoher Rotverschiebung, kurz nach dem Urknall) abhängt. Am Anfang der Strukturbildung bestehen bereits Unterschiede in der Dichteverteilung, dadurch sind in gewissermaßen schon Haufen vorhanden. Im Haufen befinden sich dadurch auch andere Anfangsbedingungen als im Feld, was die unterschiedliche Häufigkeit von Spiral und elliptische Galaxien erklärt.
- 2) Die relativen Häufigkeiten der verschiedenen Galaxientypen war ursprünglich über-

all gleich. Der höhere Ellipsenanteil in Haufen ist auf Verschmelzungsprozesse zwischen Spiralgalaxien zurückzuführen.

Welche Antwort zutrifft, hängt von der Galaxienentstehungszeitskala und Haufenbildungszeitskala ab.

Wenn die Zeitskala für die Galaxienbildung sehr lang im Vergleich zur Haufenbildungszeitskala ist, so wäre Szenario 1 denkbar  $\tau_G \gg \tau_H \rightarrow$  Szenario 1

Umgekehrt verhält es sich wenn die Zeitskala für die Haufenbildung deutlich größer ist  $\tau_G \ll \tau_h \rightarrow$  Szenario 2

Bei ungefähr gleicher Zeitskala sind beide Szenarien möglich  $\tau_G \approx \tau_H$

Es gibt auch die Annahme, dass sich der Typ von Galaxien immer wieder ändern kann. Aus dem Zusammenfall von Gaswolken, durch die Rotation und den Drehimpuls kollabieren diese. Daraus bilden sich dann Scheibengalaxien. Durch Verschmelzungsprozesse werden diese dann wiederum zu elliptischen Galaxien transformiert. Das restliche Gas, das sich zwischen den Galaxien befindet, kann sich wiederum in der Scheibe ansammeln. Falls es in dieser Scheibe dann zur Sternentstehung kommt, erhält man wieder eine Scheibengalaxie.

Dieses Konzept funktioniert nur dort, wo Dunkle Materie-Halos in Ruhe sind, also im Feld. Im Haufen selbst besteht allerdings eine Wechselwirkung zwischen den Dunkle-Materie-Halos und bilden einen großen Galaxienhaufen-Halo. Das Gas von den einzelnen Objekten geht dabei verloren bzw. ist nicht mehr an die einzelnen Objekte gebunden. Dadurch kann sich auch kein Gas mehr an den einzelnen Objekten ansammeln. Das bedeutet für Galaxienhaufen also folgendes. Sobald eine Verschmelzung zu einer elliptischen Galaxie stattgefunden hat, gibt es keine neue Scheibenbildung mehr. Die elliptischen Galaxien bleiben übrig und dominieren dadurch.

Eine Überlegung noch. Wie sich die Morphologie rein durch den Abstand vom Zentrum weg verhält, soll noch mit folgender Grafik gezeigt werden. Dieser ist für die jeweiligen Typen weniger eindeutig als für die Funktion der Galaxiendichte.

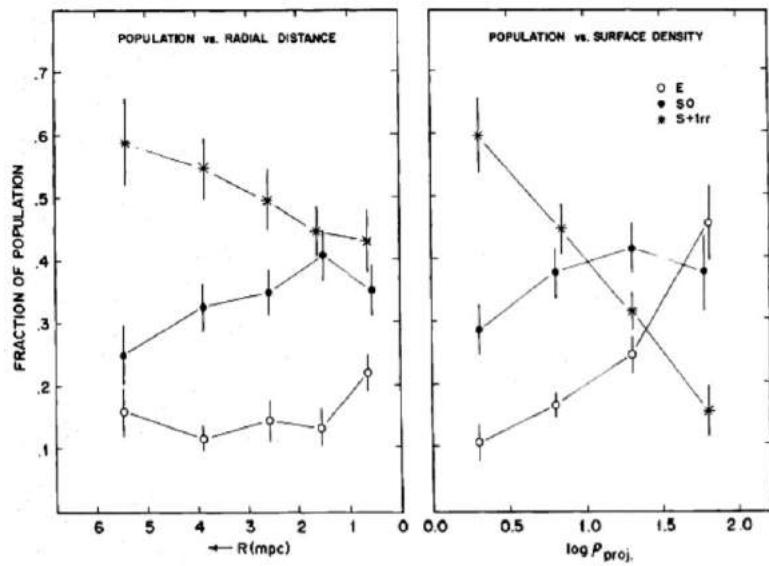
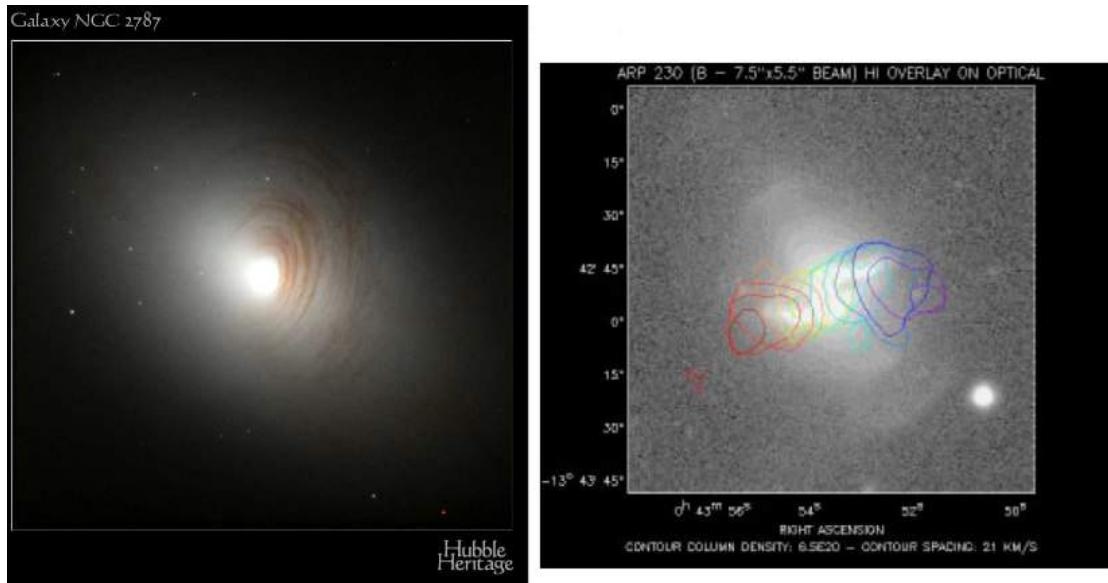


Abbildung 180

### 7.2.6 Elliptische Galaxien als Produkt von Verschmelzungsprozessen und Kannibalismus

Den Begriff Kannibalismus verwendet man für elliptische Galaxien, die sich im Zentrum von Galaxienhaufen befinden und im Laufe ihres Daseins schon mehrere Verschmelzungsprozesse eingegangen sind. Kannibalismus bezeichnet also multiple Verschmelzungsprozesse. In manchen Fällen befinden sich Shell-Strukturen um elliptische Galaxien. Diese Strukturen sind wichtige Indizien für Verschmelzungen.

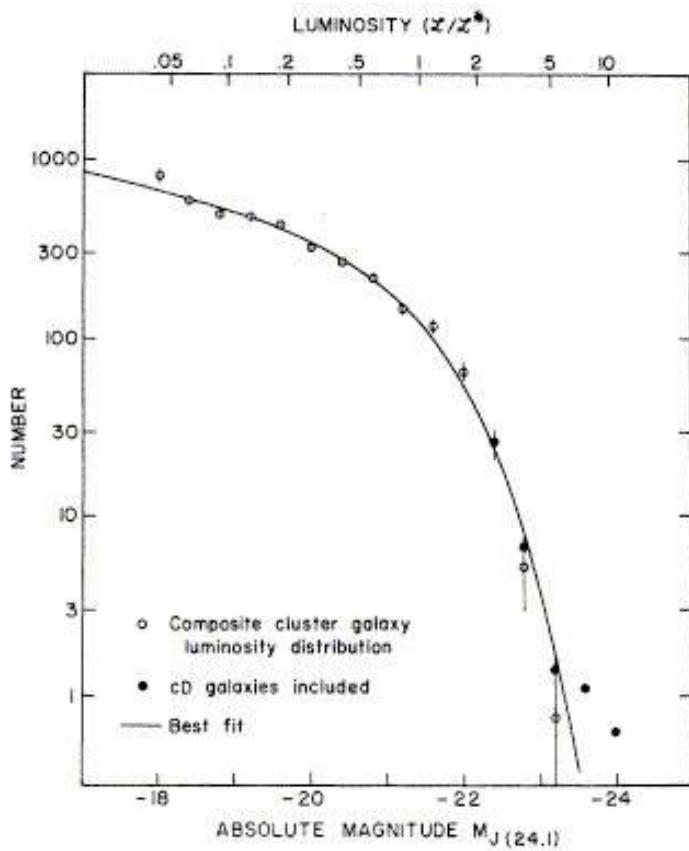


**Abbildung 181:** (Links) Shell-Strukturen umgeben NGC 2787. (Rechts) Konturen von Radiobeobachtungen die atomares Gas zeigen.

Weitere Eigenschaften die auf Verschmelzungen zurück zu führen sind z.B. double Nucleus, Staubringe, Jets und kinematisch entkoppelte Komponenten. Häufig zeigen boxy Es (durch ihre Isophoten) solche Eigenschaften. So gibt es Grund für die Behauptung, dass boxy Es Resultate aus Verschmelzungsprozessen sind.

### 7.2.7 Die Leuchtkraftfunktion (Luminosity Function)

Die Leuchtkraftfunktion gibt die Anzahl von Objekten pro Helligkeitsintervall an.



**Abbildung 182**

Die Schlechter-Funktion ist eine Fittingfunktion (eine Kombination aus Potenz- und Exponentialfunktion) für eine solche Verteilung:

$$\varphi\left(\frac{L}{L_*}\right) = \varphi^* \left(\frac{L}{L_*}\right)^a \exp\left(-\frac{L}{L_*}\right) \quad (7.6)$$

$L_*$  ist die charakteristische Leuchtkraft und dient als Normierungskonstante:

$$L_* \approx 10^{10} L_{B,\odot} * h^{-2}$$

$$h = \frac{H_0}{100 \frac{km/s}{Mpc}}$$

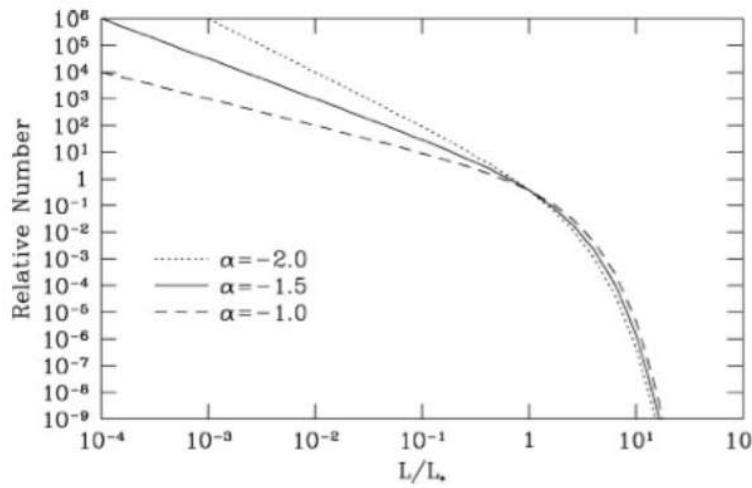
$L_{B,\odot}$  entspricht der Sonnenleuchtkraft im B-Band. Weiters gibt es noch zwei weitere Normierungsfaktoren:

$$\varphi_* \approx 0.01 Mpc^{-3} h^3$$

$$a \approx -1 \dots -1.3$$

$\varphi_*$  beschreibt die Anzahldichte für die charakteristische Leuchtkraft und  $a$  den Slope für den linearen Anteil.

$\varphi_* \left( \frac{L}{L_*} \right)$  gibt die mittlere Anzahl der Galaxie pro Volumen und pro Leuchtkraftintervall an.



**Abbildung 183:** Luminosity function. Die Veränderung des Slopes wirkt sich nur bei schwächeren Leuchtkräften aus.  $L_*$  befindet sich beim sogenannten Knie der Funktion.

Um zu berechnen wie die Leuchtkraft im Universum verteilt ist, kann die Formel für die mittlere Leuchtkraft pro Volumen, also die Leuchtkraftdichte verwendet werden:

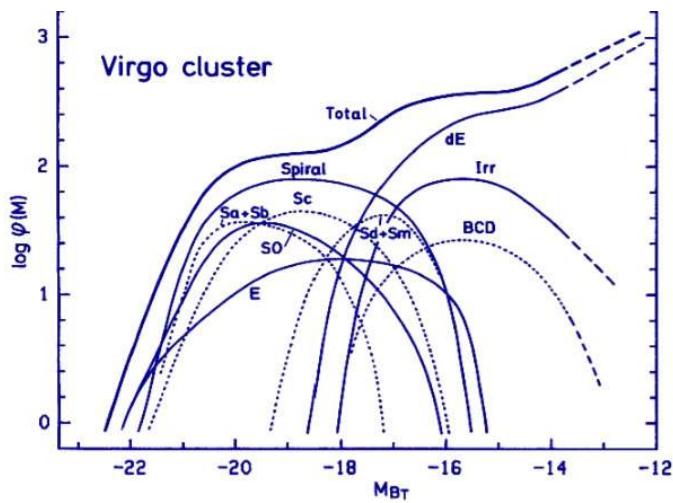
$$j = \int_0^\infty L \varphi_* \left( \frac{L}{L_*} \right) d \left( \frac{L}{L_*} \right) \Rightarrow j \approx 10^8 L_\odot / Mpc^{-3} \quad (7.7)$$

Mit der Annahme dass  $M/L \approx 10$  kann aus der Leuchtkraftdichte auf die Massendichte geschlossen werden

$$p_* \approx 10^9 M_\odot / Mpc^{-3} \quad (7.8)$$

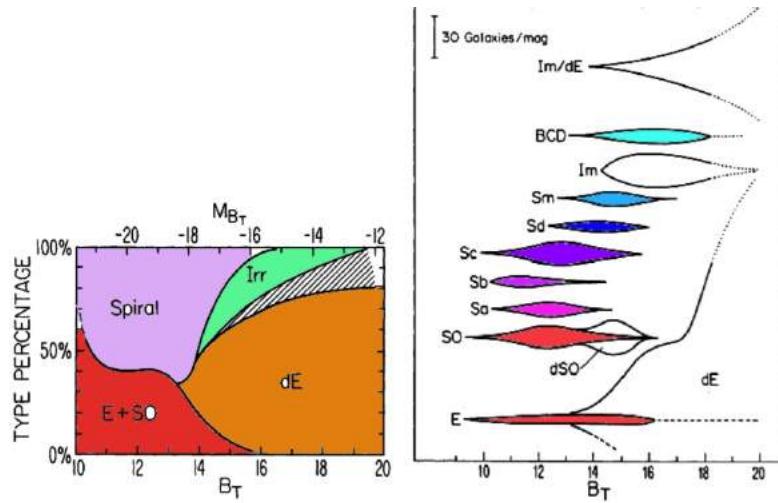
Man kann das auch wie folgt interpretieren: Der Anteil aller Sterne, die sich im Universum befinden, macht nur vier Promille aus.

Für Galaxienhaufen erhält man die Schechter-Funktion nur, wenn man alle Galaxientypen zusammen betrachtet. Die einzelnen Galaxientypen folgen hingegen keiner Schechter-Funktion, sie folgen eher einer Gaußfunktion.



**Abbildung 184:** Leuchtkraft Funktion für individuelle Galaxientypen sowie die Leuchtkraft über alle Galaxientypen

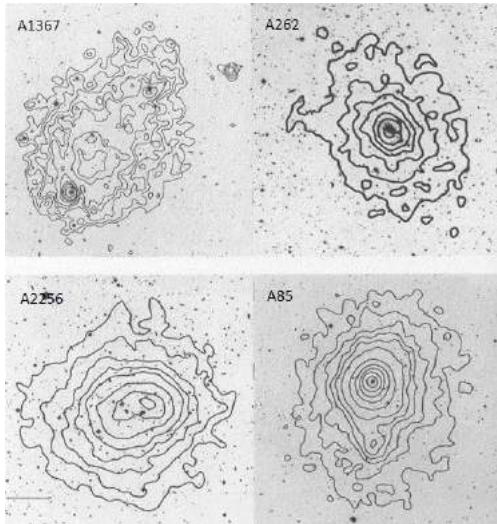
Die zwei folgenden Darstellungen zeigen nun noch, wie sich der Anteil verschiedener Typen je nach Helligkeit verändert. Die leuchtkräftigsten Galaxien sind hauptsächlich elliptische Galaxien. Bei schwächeren Helligkeiten überwiegen die Dwarf ellipticals.



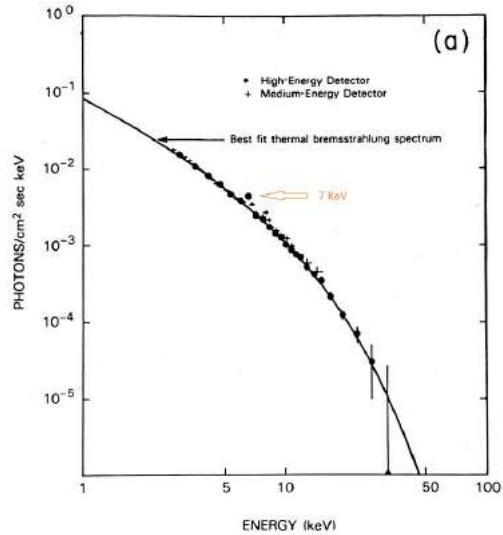
**Abbildung 185**

### 7.2.8 X-Ray Emissionen aus Clustern

Cluster sind starke Röntgenquellen (Maximum im Zentrum). Schon 1970 findet man Galaxienhaufen mit dem Röntgensatellit "Uhuru". Weitere wichtige Röntgensatelliten sind: Einstein, ROSAT, XMM-Newton (ESA), Chandra (NASA), eRosita (2014?)



**Abbildung 186:** Cluster X-Ray Isophoten [1]



**Abbildung 187:** Coma Röntgen Spektrum [2]

Es gibt 2 Mechanismen durch die Röntgenstrahlung in Clustern erzeugt wird: (das war schon mal eine Testfrage!!!)

### 1) Bremsstrahlung

Heißes dünnes Plasma (zwischen  $10^6$  und  $10^8$  K mit einer Dichte von  $\sim 10^{-3}$  atoms/cm<sup>3</sup>) - das sogenannte Intra Cluster Medium (ICM) - strahlt thermische Bremsstrahlung in Form von Licht im Röntgenspektrum ab. [3] Bremsstrahlung ist elektromagnetische Strahlung welche durch den Energieverlust eines geladenen Teilchens (meist Elektron) erzeugt wird wenn es mit einem anderen geladenen Teilchen (meist Atomkern) zusammenstößt. Die kinetische Energie bleibt in Form eines Photons erhalten. Bremsstrahlung welche von Plasma emittiert wird, wird auch als Frei-Frei Strahlung bezeichnet, weil die Strahlung von geladenen Teilchen erzeugt wird, die vor und nach dem bremsen/beschleunigen frei sind. [4]

### 2) Linienemission

Röntgenstrahlung kann auch durch Linienübergänge entstehen. (Elektronen springen auf andere Bahn und emittieren Quanten) V.A. sichtbar in der FeK-Linie bei 7 keV. (siehe Grafik vom Coma Cluster - Flux der X-Ray Photonen gegen Energie der Photonen) Dadurch kann man auch gleich sehen welche Metalle in einem Cluster vorkommen.

Das ICM hat eine Leuchtkraft von  $10^{43\ldots45}$  erg/s.

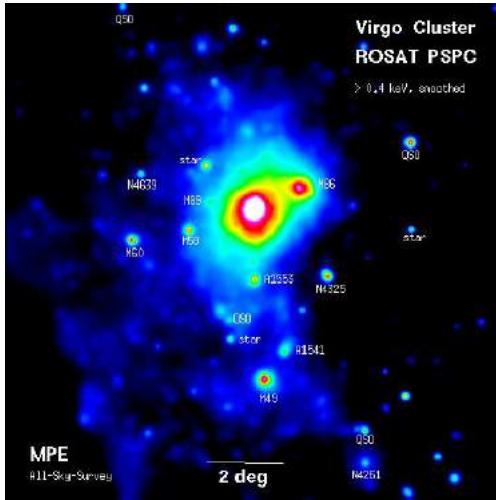
Aufteilung der Masse eines Clusters:

- Masse(Sterne)  $\sim 3\%$

- Masse(Gas)  $\sim 15\%$
- Rest: Dunkle Materie

### 7.2.9 Intra-Cluster Gas

Zwischen den Galaxien liegt das Intra-Cluster Gas.



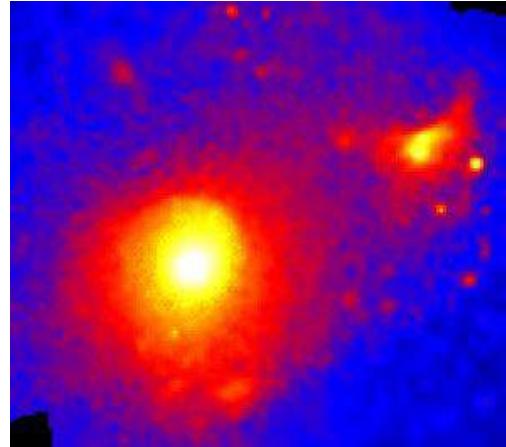
**Abbildung 188:** Virgo ROSAT  
Virgo Daten:

- $T_{IGM} \sim 10^7 \text{ K}$
- $n_{IGM} \sim 10^{-4...-3} \text{ cm}^{-3}$
- $Z_{IGM} \sim 0.2...0.4 Z_\odot$

Im Röntgenbereich sieht man gut die Substrukturen. Virgo ist erst im Aufbau, da er noch sehr massearm ist. (auch im Coma Cluster gibt es Hinweise darauf dass er noch Veränderungen unterworfen ist). Man kann noch nicht genau sagen wann sich die Haufen gebildet haben und wann sie sich mit Gas gefüllt haben (weil die Cluster weit entfernt sind und wenig Gas enthalten das emittiert). Man nimmt an, dass sie sich aus dunkler Materie bilden und die baryonische Masse später hineinfällt. Cluster saugen ihre Umgebung auf.

Über die Röntgenspektroskopie kann man Aussagen über die Metallizität des Gases machen, also darüber wie viele schwere Elemente es gibt.

Das Gas kühlt hauptsächlich durch Bremsstrahlung (wegen der hohen Stoßrate/Coulombstöße) und nicht so sehr durch die Elektronenübergänge. Die Kühlung ist  $\propto T^{(frac{1}{2})}$  ab einer Temperatur von  $10^{5...6} \text{ K}$ .



**Abbildung 189:** Virgo zentriert auf M87 falschfarben ROSAT

### 7.3 Galaxies in Clusters (tba)

### 7.4 Gravitational Lensing

#### 7.4.1 Warum der Begriff "Lensing" und was kann man sich darunter vorstellen?

Durch die Gravitation eines Clusters wird das Licht wie an einer Linse "gebrochen" bzw. abgelenkt. Lensing wird rund um Sterne, Galaxien und Cluster beobachtet. Umso größer die Masse des (ablenkenden) Objekts umso größer die Ablenkung des Lichts. Nachdem Cluster eine große Masse aufweisen, können sie sogar das Licht von hinter ihnen liegenden Objekten zum Beobachter hin ablenken.

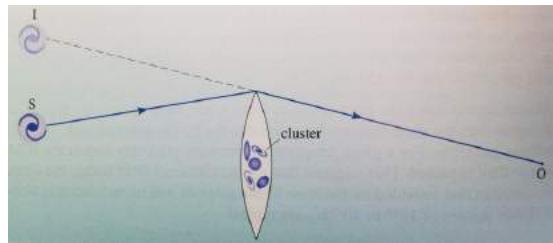


Abbildung 190: schematische Darstellung einer Gravitationslinse [1]

Das Licht der Galaxie S wird abgelenkt wenn es (nahe) an einem Cluster vorbeigeht. Dadurch scheint es an der Stelle I eine deformierte Version der Galaxie S zu geben. Abhängig von der Masseverteilung im Cluster können mehrere Versionen der Galaxie an verschiedenen Stellen zu sehen sein (was meistens der Fall ist). [1]

#### 7.4.2 Wer hats gefunden?

Viele wichtige Resultate haben ihren Ursprung in Einsteins Formel für die gravitative Ablenkung von Lichtstrahlen durch die Sonne (General Theory of Relativity - 1915). [2] Während einer totalen Sonnenfinsternis im Jahr 1919 wurden während einer Expedition - angeführt von Arthur Eddington - Fotos vom Himmel um die Sonne aufgenommen. Es zeigte sich, dass das Licht von Sternen nahe der Sonne genau wie in Einsteins Theorie abgelenkt wird.

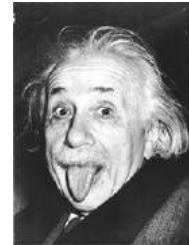
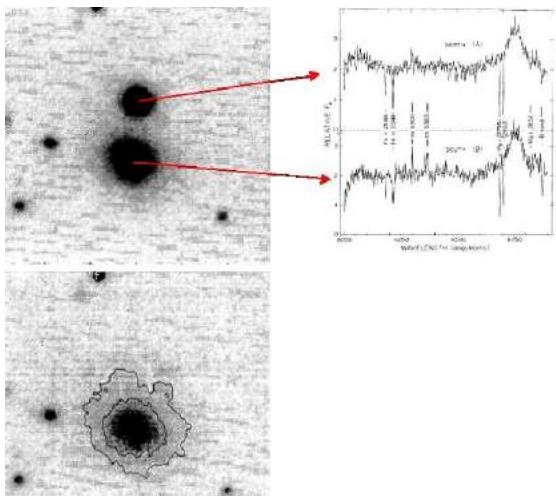


Abbildung 191

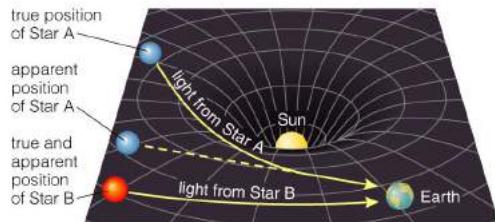
Zuerst dachte man eigentlich, dass der Effekt zu klein ist um ihn bei anderen Objekten als Sternen beobachten zu können. Durch Zufall fand man den Lensing Effekt bei einem Quasar. Eine Aufnahme zeigt zwei Quasare welche sehr nahe beieinander liegen, dasselbe Spektrum und dieselbe Rotverschiebung aufweisen - was schon einzeln und erst recht in der Kombination viel zu unwahrscheinlich wäre. In einer anderen Wellenlänge zeigte sich, dass es sich eigentlich nur um ein Objekt

handelt.



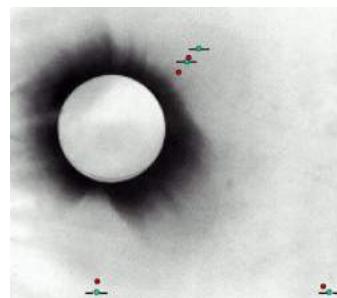
**Abbildung 192:** Quasar verdoppelt durch Linse

Masse krümmt den Raum. Bewegte Masse und Licht muss der Krümmung folgen.



© 2006 Pearson Education, Inc., publishing as Addison Wesley

**Abbildung 193:** Krümmung des Raums



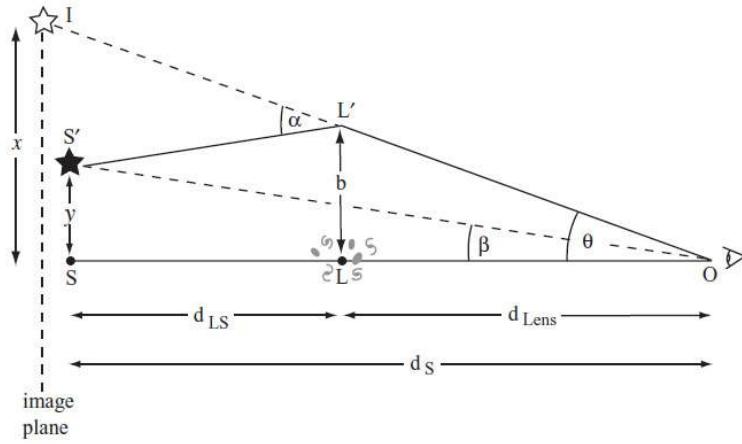
**Abbildung 194:** Objekte bei Sonnenfinsternis

grün: beobachtet, rot: tatsächl. (umso näher der Stern, desto stärker der Effekt)

### 7.4.3 Theorie der Gravitationslinsen

#### Winkel und Formeln

In der folgenden Betrachtung geht man von einer kompakten Masse aus, welche als Linse dient und daher als Punktmasse angesehen werden kann. Wenn die Linse eine Galaxie oder ein Cluster ist müsste man mit einem Lensing Potential rechnen.



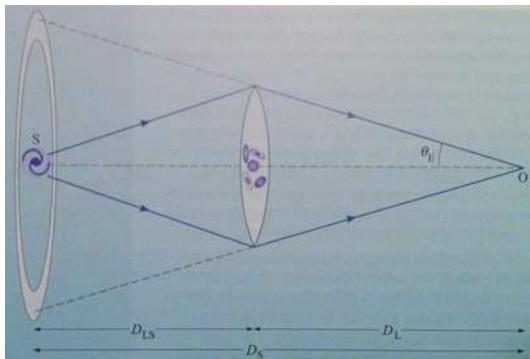
**Abbildung 195:** Ablenkung des Lichts [3]

Einstein sagte voraus, dass Licht welches im Abstand  $b$  an einer Masse  $M$  vorbeigeht um einen Winkel  $\alpha$  abgelenkt wird. ( $R_s$  bezeichnet den Schwarzschild-Radius) [3]

$$\alpha = \frac{4GM}{c^2 b} = \frac{2R_s}{b} \quad (<< 1) \quad (7.9)$$

#### Idealfall: Einstein Ring

Objekt, Beobachter und Linse liegen auf einer Linie. Ein Stern, welcher sich genau hinter der Linse befindet ( $\beta = 0$ ) wird als ein Ring aus Licht mit dem Einstein Radius  $\theta_E$  gesehen.



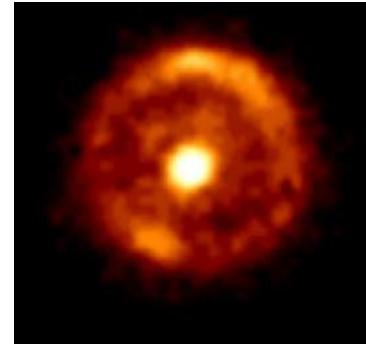
**Abbildung 196:** Einstein Radius [1]

bei kleiner Ablenkung ist:

$$S'I = \alpha d_{LS} = \theta_E d_S \quad (7.10)$$

mit  $b = \theta d_{Lens}$  (wenn  $d_s \gg b$ ) und ein paar Tricks ist außerdem:

$$\frac{4GM}{c^2 d_{Lens} \theta_E} d_{LS} = \theta_E d_S \quad (7.11)$$



**Abbildung 197:** Einstein Ring (HST)

$\theta_E$  ist der Einstein Radius. Für ihn folgt:

$$\theta_E = \left( \frac{4GM}{c^2} \frac{d_{LS}}{d_{Lens} d_S} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (7.12)$$

$$\theta_E = 0.64 * 10^{-3} \text{ asec} \left( \frac{M}{M_\odot} \right)^{\frac{1}{2}} \left( \frac{d_{Lens}}{10 \text{ kpc}} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (7.13)$$

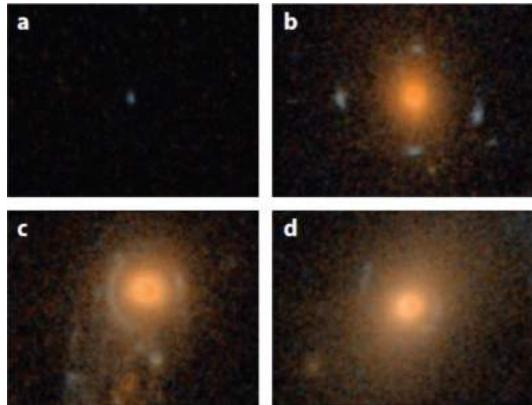
### Normalfall

Wenn  $\beta > 0$ , ist das Bild mit  $\theta_+$  weiter weg von der Linse ( $\theta_+ > \beta$ ) und liegt außerhalb des Einstein Radius:  $\theta_+ > \theta_E$ . Genau solche außenliegenden Bilder wurden außerhalb der Sonnenfinsternis beobachtet. Ein Bild mit  $\theta_-$  ist invertiert und liegt innerhalb des Einstein Radius auf der gegenüberliegenden Seite der Linse.

Für  $\beta$  gilt:

$$\beta(\theta) = \theta - \frac{4GM}{c^2\theta} \frac{d_{LS}}{d_{Lens} d_S} \quad (7.14)$$

Oft zu beobachten ist Lensing von Sternen des Milchstraßen-Bulge durch Sterne der Scheibe. Die Bilder  $\theta_+$  und  $\theta_-$  liegen dann so nahe zusammen, dass man sie nicht getrennt sehen kann. Der Stern scheint jedoch heller zu werden (Microlensing).



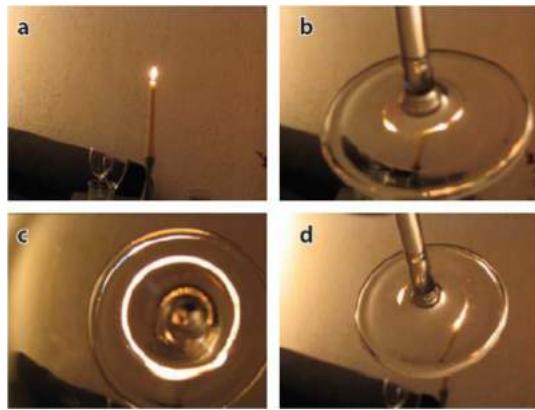
Die Grafiken zeigen Beispiele der häufigsten Lensing-Systeme in der Größenordnung von Galaxien.

- a) Quelle im Hintergrund
- b) "Quad"
- c) (unvollständiger) Einstein Ring
- d) "Double"

Was davon man sieht hängt ab von der Elliptizität der Masseverteilung des ablenkenden Objekts und von der Ausrichtung von Quelle und ablenkendem Objekt.

**Abbildung 198:** Treu 2010 ARA&A, 48

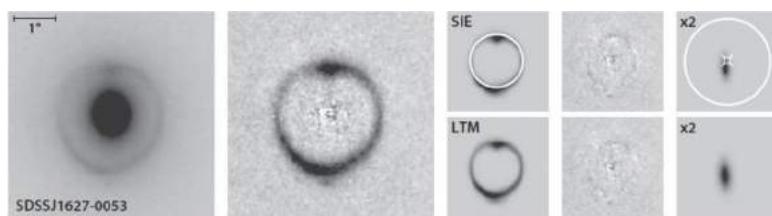
Beim nächsten Candlelight-Dinner bietet sich der folgende astronomisch wertvolle Versuch an:



Der Fuß von einem Weinglas erzeugt ähnliche Bilder wie eine Gravitationslinse. Quelle ist eine etwas entfernt stehende Kerze. Genau wie oben sieht man:

- a) Quelle im Hintergrund
- b) "Quad"
- c) (unvollständiger) Einstein Ring
- d) "Double"

**Abbildung 199:** Treu 2010 ARA&A, 48

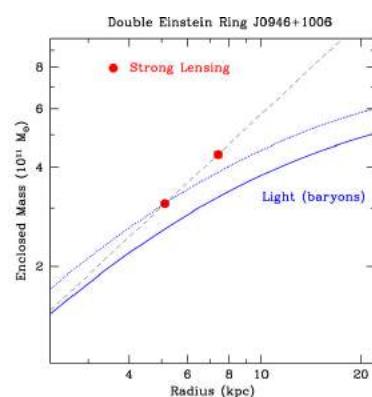


**Abbildung 200:** Treu 2010 ARA&A, 48

Hier sieht man in den beiden linken Bildern die Daten bevor und nachdem die Linsen-Galaxie abgezogen wurde. In den kleinen Bildern rechts sieht das Ergebnis der Rekonstruktion der Quelle. Oben für ein "Single Isothermal Ellipsoid"(SIE) Masse-Modell. Unten für ein "Light Traces Mass"(LTM) Modell. Die Quelle liegt so, dass ein "Double" und ein Einstein Ring entstehen.



**Abbildung 201:** HST - Treu  
2010 ARA&A,  
48

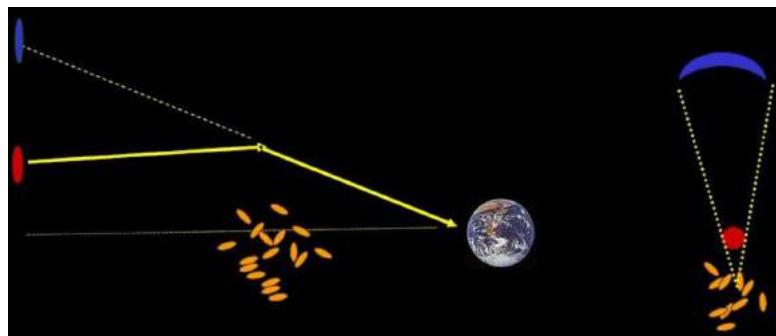


**Abbildung 202:** Treu 2010  
ARA&A, 48

Das Bild links zeigt einen Doppel-Einstein Ring entstanden durch die zusammengesetzte Linse SDSSJ0946 + 1006. Im Vordergrund sieht man die Haupt-Linse. Der helle Ring wird von der mittlere Galaxie geformt, der schwächere Ring vom Licht einer Hintergrundgalaxie, welches von den beiden vorderen Objekten abgelenkt wird.

Rechts sieht man das Enclosed Mass Profil - abgeleitet von den Einstein Radien der beiden Ringe. Die Masse steigt steiler mit zunehmendem Radius als das Licht, was auf einen größeren Anteil an Dunkler Materie hinweisen könnte. Auch ein "Maximum Bulge"(blau gepunktete Linie) kann die Masse am äußeren Einstein Radius nicht erklären. fehlt: Folie 16+17

## 7.5 Gravitational Lensing Arcs

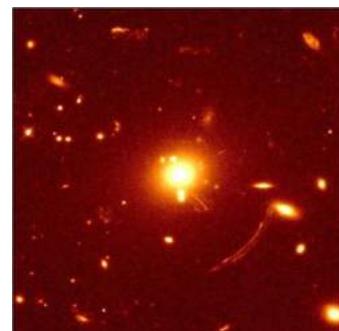


**Abbildung 203:** Arcs

Arcs werden durch Gravitationslinsen gebildet weil das Bild der Quelle in einer Richtung in die Länge gezogen wird, während die zweite Dimension erhalten bleibt.



**Abbildung 204:** PRC97-25



**Abbildung 205:** tangentiale und radiale Arcs in MS 2137.3-2353

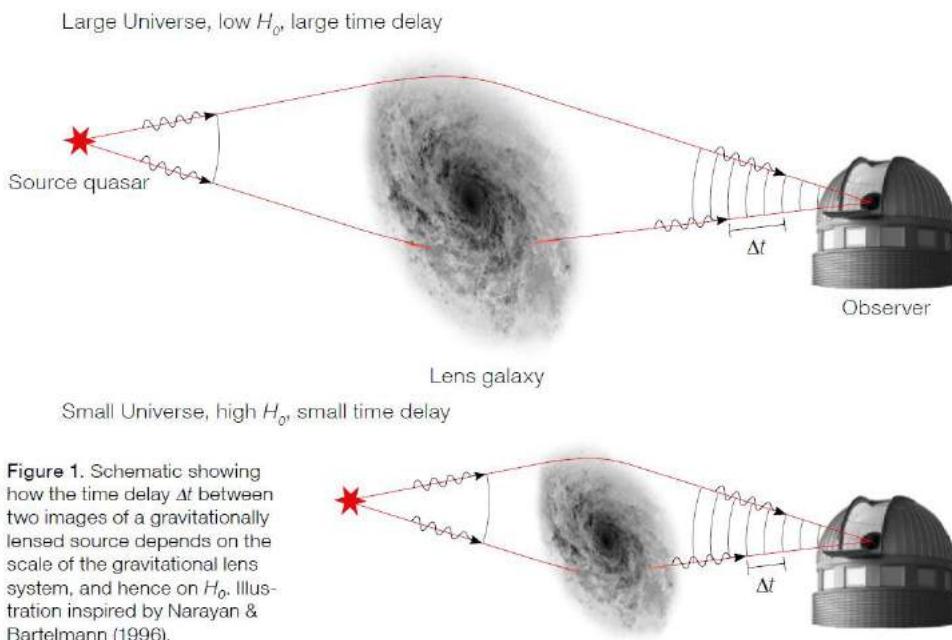
### 7.5.1 Gravitational Lensing Variability

t.b.a.

### 7.5.2 Gravitational Lensing Time Delay

Das Licht verschiedener Bilder erreicht uns über verschiedene Wege. Strahlen welche die Quelle zusammen verlassen haben, kommen nicht zugleich an. Ein stark abgelenkter Strahl hat einen längeren Weg und die Zeit vergeht langsamer tief im Gravitationspotential. Wenn z.B. das Licht eines Quasars durch eine im Zentrum konzentrierte Galaxie abgelenkt wird, kommt es am schnellsten zu den Bildern, die am weitesten weg vom Zentrum sind. Diese Strahlen wurden am wenigsten abgelenkt und haben am wenigsten Zeit im Gravitationspotential verbracht. [3]

$$\Delta t = (1 + z_L) \left( \frac{1}{2c} \frac{d_{Lens} d_s}{d_{LS}} \alpha^2 - \frac{2}{c^2} \int ds \phi(s) \right) \quad (7.15)$$



**Abbildung 206:** Time Delay [4]

Die zeitliche Verzögerung ist direkt abhängig von der Größe des Linsensystems, welche wiederum von der Expansionsrate des Universums abhängt, also der Hubble-Konstante  $H_0$ . [4]

## 8 Kosmologie und das frühe Universum

### 8.1 Erste Theorien

#### 8.1.1 Steady-State Theorie

In den 50er und 60er Jahren war die sogenannte „Steady State Theory“ (Theorie des statischen Universums) von Hoyle, Bondi und Gold als Theorie verbreitet, für die die Aussage grundlegend ist, dass „das Universum zu allen Zeiten gleich ist“ - sprich isotrop und homogen in Raum und Zeit. Für diese Theorie ist der Gedanke relevant, dass das Universum expandiert und trotzdem in seiner Dichte gleich bleibt (Materie müsste also irgendwo spontan erzeugt werden). So wären jedoch an Galaxien keine Entwicklungseffekte beobachtbar, womit sich bereits erste Probleme dieses Ansatzes ergaben. Die Theorie war jedoch bald zu Nachbearbeitungen und kuriosen Erklärungsversuchen der Beobachtungen gezwungen. Etwa dass die kosmische Hintergrundstrahlung aus reflektierter Sternenemission resultiert.

Auch Einstein vertrat mit der Einführung einer kosmologischen Konstante in seine Relativitätstheorie die Steady-State Theorie. Doch auch die Einführung dieser Konstante war eine Nachbearbeitung - sie musste in die Theorie eingefügt werden um zu erklären, weshalb das Universum nicht kollabiert.

Ein weiterer Kritikpunkt ist schon sehr alt:

#### Olber'sches Paradoxon

Bereits 300 Jahre vor Hoyle, Bondi und Gold wurde bereits von Olbers die Feststellung gemacht, dass es kein statisches Universum geben kann. Er stellte die These auf, dass in einem unendlichen, statischen Universum mit konstanter Sterndichte jede Sichtlinie von der Erde aus, irgendwann auf einen Stern treffen müsste. Laut dieser Aussage müsste jedoch der Nachthimmel so hell sein, wie die Sonnenscheibe - somit wurde bereits auf Probleme der Steady State Theory hingewiesen.

Aus heutiger Sicht ist die Steady-State-Theorie nicht mehr zu halten. Sie wurde durch die Big-Bang-Theorie des dynamischen Universums abgelöst.

#### 8.1.2 Big-Bang Theorie

Im Jahr 1922 berechnete Alexander Friedmann, ein russischer Kosmologe, dass das Universum vielleicht doch expandiert, was im Kontrast zum Modell des statischen Universums stand. 1924 fand Edwin Hubble ein Indiz für Friedmanns Theorie durch Beobachtung der Variation der kosmologischen Rotverschiebung.

Georges Lemaitre, ein belgischer Physiker, schlug als erster vor, dass die gesamte Masse des Universums zu einem Zeitpunkt in einer kleinen, extrem dichten, heißen Masse unter enormen Druck vereinigt war. Er nannte dies „hypothesis of the primeval atom“ (primeval bedeutet urzeitlich; also ein Art Üratom“). Diese Hypothese wurde das Grundgerüst für die Urknall-Theorie. Fred Hoyle, ein Gegner der Urknalltheorie, benutzte den Terminus „big bang als Erster, um sich über Lemaitres Hypothese lustig zu machen.“

Für die Richtigkeit der „Big Bang Theory“ werden die Vier folgenden fundamentalen empirischen Fakten als Beleg angeführt

- Hubble-Expansion
- Primordiale Nukleosynthese
- Kosmische Hintergrundstrahlung
- Strukturbildung

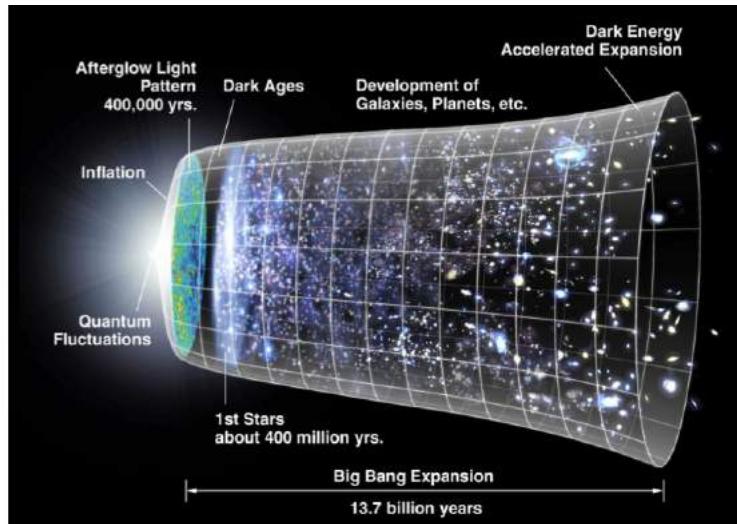
## 8.2 Eine kurze Geschichte des Universums

Uns ist bis jetzt bekannt, dass Sekundenbruchteile nach dem singulären Ursprung (Big Bang) bereits Elementarteilchen entstanden. Diese damaligen Strukturen sind quasi „eingrätigt“ in unser Universum. Als Bedingung für die permanente Expansion unseres Universums muss sein Ursprung als Singularität von Raum und Zeit gesehen werden.

In kürzesten Zeitskalen nach dem Urknall und unter ernormen Temperaturen entstanden eine Reihe unterschiedlicher Elementarteilchen (Siehe unten). Aus heutigen Beobachtungen sind die ersten Dichteblüftuationen (aus der kosmischen Hintergrundstrahlung) bekannt, denen die Phase der Inflation vorausging, welche eine sehr rasche Expansion des Urknalls beschreibt. Die Inflation ist die Voraussetzung zur Bildung der Strukturen wie sie uns im heutigen Universum bekannt sind.

Auf die Phase der Inflation folgten die sogenannten „Dark Ages“. Über diese Phase des Universums gibt es keine Informationen, da zu dieser Zeit keine Strahlung emittiert wurde und so heute gemessen werden könnte. In jener Ära gab es nämlich noch keine leuchtenden Objekte wie Sterne etwa. Es besteht jedoch die Hoffnung zukünftig über Gravitationswellen oder die 21 cm Linie des Wasserstoffs (Projekt Lofa) etwas über diese Phase zu erfahren.

Nach etwa 400 Millionen Jahren entstanden die ersten Sterne und die Strukturbildung des Universums begann; darauf folgte die Galaxienbildung.



**Abbildung 207:** Populäre Betrachtung der kosmologischen Entwicklung des Universums

### 8.3 Die Geometrie des Raumes

#### 8.3.1 Die Einstein'schen Feldgleichungen

Gravitation ist die beherrschende Kraft in den großen Skalen des Universums. Sie wird durch die allgemeine Relativitätstheorie beschrieben und nach ihr kann der Raum selbst auch gekrümmt sein. Die Einstein'schen Feldgleichungen lauten in Tensorschreibweise:

$$R_{\alpha\beta} - \frac{1}{2}g_{\alpha\beta}R = 8\pi GT_{\alpha\beta} \quad (8.1)$$

Dabei beschreibt der Riccitetensor  $R_{\alpha\beta}$  die Krümmung der Raumes,  $T_{\alpha\beta}$  die Energieerhaltung und  $g_{\alpha\beta}$  ist der Metriktensor. Der mathematische Advokat unter den Lesern, sei an dieser Stelle an die Sternwartebibliothek verwiesen.

#### 8.3.2 Das kosmologische Prinzip

Das kosmologische Prinzip besagt folgendes:

„Das Universum ist isotrop und homogen auf räumlichen Skalen“

Diese Aussage erschließt sich aus folgenden Kenntnissen:

**Isotropie:** Isotropie beschreibt die Tatsache, dass eine Eigenschaft unabhängig von der Richtung ist - hier die Erscheinung des Universums. In jede Richtung, in die wir blicken, finden wir quasi überall Objekte, die wir beschreiben können. Dieser Satz gilt selbstverständlich nicht auf verhältnismäßig kleinen Skalen - hier beobachten wir sehr wohl Inhomogenitäten: Menschen, Planeten, Sterne und Galaxien. Die Galaxien verteilen sich allerdings homogen auf großen Skalen.

**Homogenität oder das kopernikanische Prinzip:** Da Isotropie an jeder Stelle im Universum gegeben ist, ergibt sich daraus, dass das Universum homogen ist. Das heißt, es stellt sich einem Beobachter unabhängig von dem Punkt des Raumes, in dem er sich befindet, immer gleich dar. Da wir im großen Maßstab alle Bestandteile des Universums mitteln, ist diese Homogenität belegbar und es ergibt sich das kosmologische Prinzip.

### 8.3.3 Friedmann'sche Gleichungen

Setzt man für die Einstein'schen Feldgleichung das kopernikanische Prinzip an, so erhält man als Lösung die sogenannte Robertson-Walker-Metrik. Setzt man diese Lösung wieder in die Feldgleichungen rück ein, so ergibt sich daraus die Friedmann'sche Gleichung:

$$\left(\frac{\dot{R}}{R}\right)^2 + \frac{kc^2}{R^2} = \frac{8\pi G}{3}\rho \quad (8.2)$$

Diese Gleichung ist eine Bewegungsgleichung für die Ausdehnung des Universums. R wird Skalenradius genannt, k ist der Krümmungsfaktor und  $\rho$  ist die totale Energiedichte des Universums. Der Skalenradius R ist ein Maß für die relative Ausdehnung des Universums. Diese Gleichung beschreibt also, ob sich das Universum ausdehnt oder kollabiert. [Quelle A]

In den Friedmann'schen Gleichungen steckt eine weitere wichtige Größe - die Hubble-Konstante H.

$$H_0(t) = \frac{\dot{R}}{R} \quad (8.3)$$

Die Hubblekonstante ist die zeitliche Ableitung des Skalenradius R (Maß für die Größe des Universums) und ändert sich mit der Zeit (in vorhergehenden Epochen hatte die Hubblekonstante einen anderen Wert als heute und der Name Konstante ist insofern irreführend). Der Index 0 steht für den Zustand im heutigen Zeitpunkt. Sie ist die Rate der Expansion des Universums.

Damit direkt in Verknüpfung steht der Dezelerationsparameter  $q_0$ :

$$q_0(t) = -\frac{\ddot{R}R}{\dot{R}^2} \quad (8.4)$$

Der Accelerationsparameter beschreibt wie schnell sich das Universum ausdehnt. Da mittlerweile belegt ist, dass das Universum expandiert (Nobelpreis 2011) wird er anstatt als Dezelerationsparameter als Accelerationsparameter aufgefasst.

Wir können nun die Frage stellen, wie groß die Dichte des Universums sein müsste, damit das Universum gerade noch in sich selbst kollabiert. Dazu betrachten wir den

Energiegehalt der Expansion T und des gegenwirkenden Gravitationspotentials U im Kugelvolumen des Universums. [Quelle B]

$$E = T + U \quad (8.5)$$

$$E = \frac{m\dot{R}^2}{2} - \frac{4\pi G m \rho R^2}{3} \quad (8.6)$$

Durch Ausdrücken von  $\dot{R}^2$  nach Gleichung 8.3 mit der Hubblekonstante erhält man für die Gesamtenergie

$$E = mR^2 \left( \frac{H_0^2}{2} - \frac{4\pi G \rho}{3} \right) \quad (8.7)$$

Für  $E = 0$  gleichen sich die waltenden Kräfte genau aus. Dieser statische Fall ergibt sich für die sogenannte kritische Dichte:

$$\rho_c = \frac{3H_0^2}{8\pi G} \quad (8.8)$$

Der Wert von  $\rho_c$  gibt Auskunft, ab welcher Dichte das Universum kollabieren würde. Aufbauend auf dieser kritischen Dichte definiert man sich weitere Parameter  $\Omega$ , die sich auf verschiedene Massen- und Energieformen im Universum beziehen [Quelle C].

- $\Omega_M$  beschreibt die Dichte von Materie im Universum. Dieser Dichteparameter setzt sich fast nur aus der dunklen Materiedichte zusammen, da baryonische Materie nach heutigen Modellen nur wenige Prozent der Universumszusammensetzung ausmacht.

$$\Omega_M = \frac{8\pi G \rho_{m,0}}{3H_0^2} = \frac{\rho_{m,0}}{\rho_c} \quad (8.9)$$

- $\Omega_\Lambda$  beschreibt die dunkle Energiedichte mit einer Größe für die dunkle Energie  $\Lambda$ .  $\Lambda$  wurde auch von Einstein für das statische Universum verwendet (siehe oben) und er nannte diese große kosmologische Konstante.

$$\Omega_\Lambda = \frac{\Lambda c^2}{3H_0^2} \quad (8.10)$$

- $\Omega_K$  beschreibt die Dichte durch Krümmung. Für das flache Universum ist der dieser Parameter 0 ( $k = 0$ ).

$$-\Omega_k = \frac{k c^2}{R_0^2 H_0^2} \quad (8.11)$$

- Weitere Dichteparameter, wie  $\Omega_b$  für die Baryondichte (Teil von  $\Omega_M$ ), oder  $\Omega_{rad}$  für die Strahlungsdichte, welche vor allem kurz nach dem Urknall dominierend war, können definiert werden.

Man definiert diese Dichteparameter so, dass ihre Summe immer 1 ergibt.

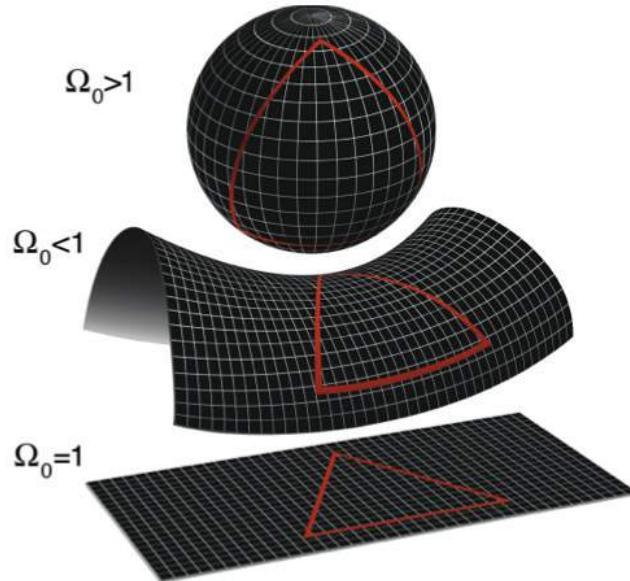
$$1 = \Omega_M + \Omega_\Lambda + \Omega_K + \dots \quad (8.12)$$

Zu beachten ist noch, dass diese Omegas nicht konstant sind, sondern Funktionen von der Zeit. Mit  $\Omega_0$  ist in den folgenden Zusammenstellungen die Summe  $\Omega_0 = \Omega_M + \Omega_\Lambda$  der Dichteparameter von Materie und dunkler Energie zum heutigen Zeitpunkt gemeint.

### 8.3.4 Verschiedene Modelle

Um das Universum zu visualisieren werden eigentlich zusätzliche Dimensionen benötigt. Man unterscheidet 3 Arten von Modellen, die alle von der totalen Masse-Energie-Dichte  $\Omega_0$  abhängig sind:

- Das geschlossene Universum, sprich die Kugel. Hier ist  $\Omega_0 > 1$  und die Krümmung ist positiv. Damit ist  $\Omega_k$  negativ (siehe Formel) und die Summe aus  $\Omega_0$  und  $\Omega_k$  kann sich zu 1 ergeben.
- Die offenen Universen: Sattel ( $\Omega_0 < 1$ ,  $\Omega_k > 0$ ) und das flache Universum ( $\Omega_0 = 1$ )

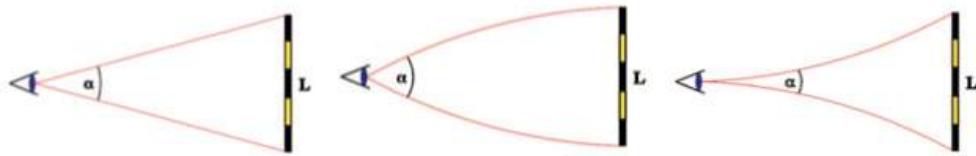


**Abbildung 208:** Die Abbildung zeigt verschiedene Geometrien des Raumes anschaulich. Die Kugel ist ein geschlossenes, Sattel und ebene Fläche sind offene Universen

Mathematisch dient folgendes Gedankenexperiment zur Vorstellung: Die Länge eines Meterstabes wird mithilfe des Winkels gemessen. Der Winkel verändert sich je nach Krümmung des Raumes: Bei einem offenen Universum ist der Winkel kleiner als bei

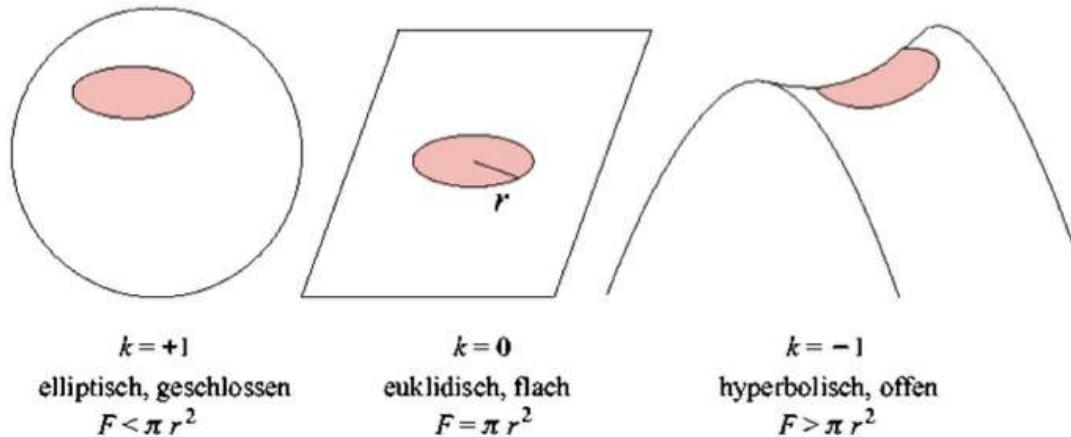
einem flachen.

Nur im Euklid'schen Raum ist die Winkelsumme im Dreieck  $180^\circ$ .



**Abbildung 209:** Die unterschiedliche Wahrnehmung von Winkeln: (1) flach, (2) Kugel, positiv gekrümmt, (3) Sattel, negativ gekrümmmt

Eine andere Veranschaulichung funktioniert über den Flächeninhalt von Kreisen. Auch dieser unterscheidet sich in den unterschiedlichen Geometrien.



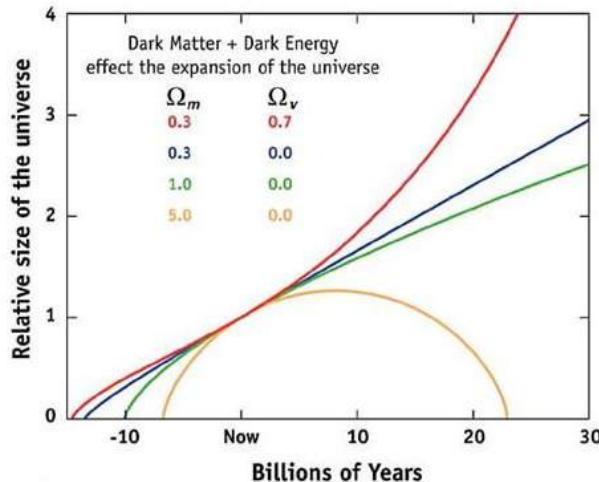
**Abbildung 210:** Der Flächeninhalt des roten Kreises wird im Bild als  $F$  bezeichnet

Wie wir später sehen werden, kann eine Untersuchung der kosmischen Hintergrundstrahlung mit Hilfe des Boomerang-Experiments Auskunft über die Struktur des Universums geben.

Nach den diesen Messungen ist das Universum wahrscheinlich flach, also muss gelten:

$$\Omega_K = 0 \quad , \quad 1 = \Omega_M + \Omega_\Lambda = \Omega_0 \quad (8.13)$$

## 8.4 Kosmodynamik: Weltmodelle des Universums



**Abbildung 211:** Modelle für die Expansion des Universums

Dieses Diagramm zeigt die Entwicklung des Universums unter verschiedenen Werten für die Dunkle Materie und die Dunkle Energie.

Laut den Werten für die **blaue** Kurve war der Big Bang vor 12 Millionen Jahren und das Universum dehnt sich (wie an der Kurve ersichtlich) weiter aus. Dieses Szenario kommt ohne dunkle Energie aus.

Die **grüne**, sowie **gelbe** Kurve sind von vornherein als wenig wahrscheinlich zu betrachten, da hier der Urknall als zu spät angesetzt wird, als man es errechnet. Außerdem ist es bei dem gemessenen Alter von Kugelsternhaufen äußerst unrealistisch - Manche Haufen wären dann älter als das Universum selbst.

Laut **gelber** Kurve steht am Ende des Universums ein sogenannter „Big Crunch“ - Der Big Bang wäre in diesem Modell aber schon vor 8 Myr. gewesen. Das Universum wäre in diesem Fall kugelförmig gekrümmmt.

Heute ist bekannt, dass das Universum sich beschleunigt ausdehnt und so die **rote** Kurve als Realitätsnächste angesehen werden kann.

Über diese Weltmodelle hinaus können auch exotischere Vorstellungen, wie ein oszillierendes Universum, als Lösungen der Friedmann-Gleichungen gefunden werden.

## 8.5 Inflation

### 8.5.1 Probleme der Big-Bang Theorie

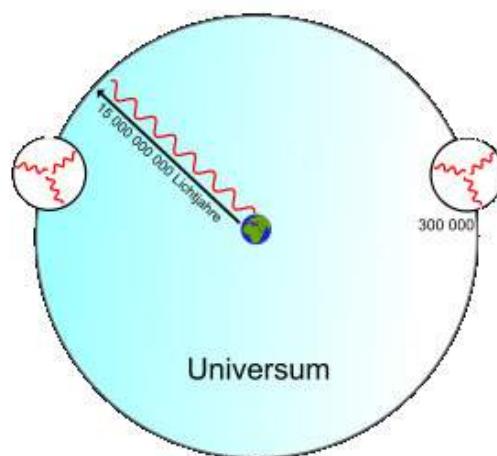
#### Das Horizontproblem:

Auf größeren Skalen können im Rahmen der Untersuchung der kosmischen Hintergrundstrahlung Gebiete betrachtet werden, die zur Zeit der Emission kausal getrennt waren. Daraus ergibt sich die Frage, wie die heute beobachtete Isotropie (Kopernikanisches Prinzip, Schwarzkörperspektrum der Hintergrundstrahlung - siehe unten). Zustande gekommen ist, wenn Objekte 1 Millionen Jahre nach dem Big Bang nicht kausal zusammenhingen, sprich, die Naturgesetze nicht greifen konnten. (Siehe auch Abb. ??)

Zusätzlich zum Horizont-Problem ergeben sich folgende Fragen:

- Wie entstand die heutige Struktur des Universums mit seinen Bestandteilen wenn das Universum anfangs vollständig homogen war und die Gravitation nicht greifen konnte? - sprich wie konnten primordiale Dichtefluktuationen entstehen?
- Warum ist das Universum flach? (Flatnessproblem)

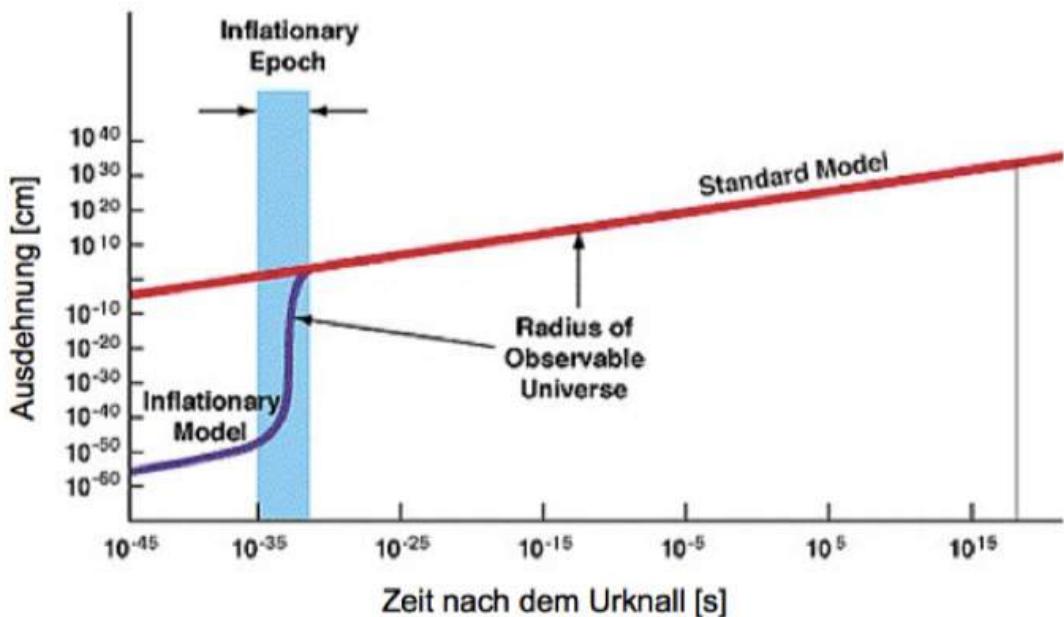
Diese Fragen können nicht mithilfe der Friedmann'schen Gleichung oder der Hubble-Expansion erklärt werden.



**Abbildung 212:** Das Horizontproblem. Von der Erde aus sehen wir in allen Richtungen eine isotrope Hintergrundstrahlung. Die Skalen sind für diese aber schon so groß, dass die Hintergrundstrahlung in der einen Richtung, keinen kausalen Zusammenhang mit jenen Bereichen in entgegengesetzter Sichtlinie haben kann. Information, wie etwa diese Isotropie des CMB, kann maximal mit  $c$  transportiert werden und hätte bei dem Alter des CMB erst die in den kleinen Kreisen liegenden Bereiche erreicht.

### 8.5.2 Theorie der Inflation

Um oben genannte Probleme zu erklären, wurde die sogenannte Phase der Inflation eingeführt - die „exponentiell wachsende Phase“.

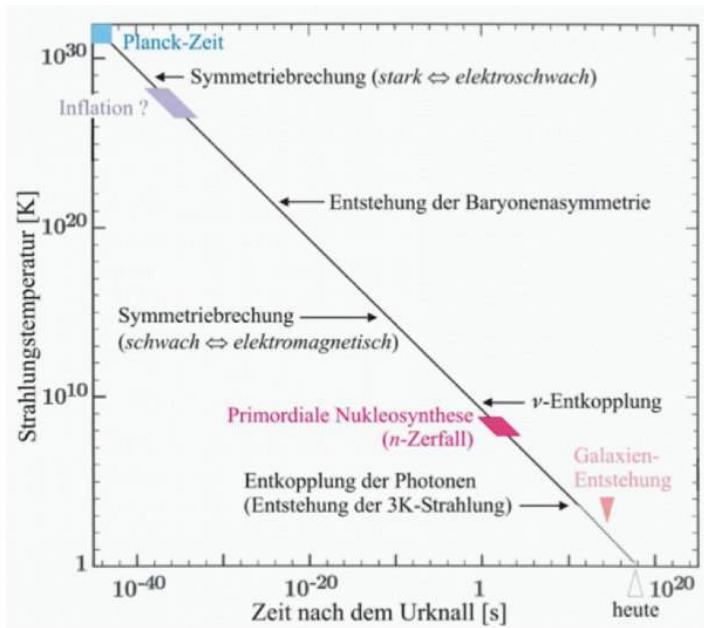


**Abbildung 213:** Das Diagramm zeigt die Ausdehnung des Universums mit der Zeit

$10^{-35}$  s nach dem Urknall soll sich das Universum schlagartig aufgebläht haben. Mit dieser Phase kann ebenfalls das Horizont-Problem gelöst werden, da durch die Inflationsphase anfangs alles so nah beieinander stand, dass alles im Universum kausal zusammenhing. Diese Expansionsphase könnte von den Higgs-Teilchen verursacht worden sein.

### 8.6 Schicksalsmomente des frühen Universums

Es folgt eine Zusammenstellung der wichtigsten Ereignisse und Zeitalter im frühen Universum:



**Abbildung 214:** Das Diagramm zeigt die Temperatur des Universums mit der Zeit. Während das Universum abkühlte, so erwartet man, ereigneten sich die unten beschriebenen Phänomene

Die Planck-Zeit ist definiert als die Größe, die durch die Unschärferelation gegeben ist. Es ist jene erste Epoche, in der das Universum noch so klein war, dass es quanenphysikalisch beschrieben werden musste und im Rahmen derer es unscharf war. Sie kann in die Strahlungstemperatur umgerechnet werden. Bei allem, was jenseits von  $10^{30}$  K liegt, greift die klassische Physik nicht mehr. Deshalb kann diese Phase und alles was während des oder vor dem Big Bang war, selbst nie richtig erforscht werden.

Bei den herrschenden hohen Temperaturen waren alle 4 Grundkräfte (starke, schwache, elektromagnetische Wechselwirkung und Gravitation) noch vereint. Es herrschte ein Zustand von enormer Symmetrie - in allen Richtungen sah es gleich aus. Jegliche Spiegel- und Rotationsoperationen führten auf dasselbe Bild. Nach der Abkoppelung der Gravitation entkoppelt sich am Punkt einer Symmetriebrechung die starke Wechselwirkung vom Rest der Kräfte (Siehe Abbildung ??). Daraus entstand ein Potentialfeld, sowie die Higgs-Teilchen und es folgte dem Standardmodell des Big-Bang zufolge die Inflation.

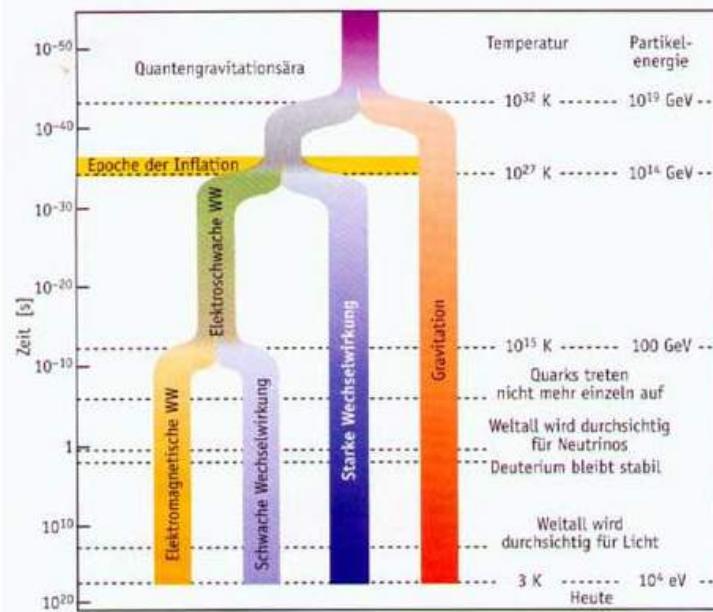
Nach der Inflation entstand die Asymmetrie zwischen Baryonen und Antibaryonen, und etwas später jene zwischen Elektronen und Positronen. Teilchen und Antiteilchen löschen einander aus, aber es blieben ein paar Teilchen übrig. Das Universum besteht aus Baryonen, doch es existieren offensichtlich keine Antibaryonen (das Verhältnis von Teilchen und Antiteilchen beträgt  $10^{-9}$ ). Die Suche nach dem Grund hierfür ist Teil der akutellen Forschung.

Nach dem Entstehen der Baryonenasymmetrie trennte sich die schwache Wechselwirkung von der elektromagnetischen Wechselwirkung.

Die Neutrinos waren noch im Gleichgewicht mit den anderen Teilchen - es konnte noch keine komplexere Materie entstehen. Irgendwann war das Universum so ausgedehnt, dass die Dichte sank. Es wurde kühler und die Neutrinos entkoppelten sich. Es setzte der Zerfall von Neutronen zu Protonen, Elektronen und unserem neuen Stargast dem Neutrino ein. Erste Elemente konnten entstehen. Die primordiale Nukleosynthese setzte ein.

Photonen, Baryonen und Leptonen waren nach wie vor im Gleichgewicht. Elektronen streuten mit den Photonen in einem solchen Ausmaß, dass die Photonen, sich nicht von der Gesamtmasse trennen konnten. Kaum wurden sie von einem Elektron emittiert, werden sie von dem Nächsten wieder absorbiert. Ab einer gewissen Temperatur konnten sich aber auch die Photonen schließlich entkoppeln. Diesen Moment nennt man Rekombination: Erstmals konnten leichte Elemente entstehen. Elektronen und Protonen verbanden sich zu Wasserstoff. Die ersten Lichtstrahlen die uns erreichen stammen aus der kosmischen Hintergrundstrahlung.

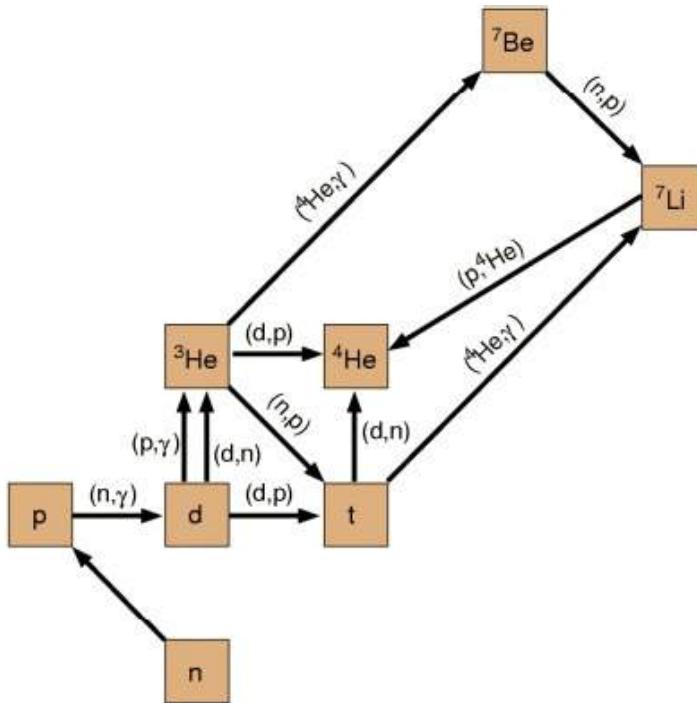
An dem Punkt der Photonen-Entkopplung wandelte sich das Universum von einem strahlungsdominierten Universum zu einem Materie-dominierten Universum. Heute dominiert die dunkle Energie - man spricht vom energiedominierten Universum.



**Abbildung 215:** Die Abbildung zeigt die Entwicklung des Universums mit genauem Blick auf die Symmetriebrüche der Grundkräfte

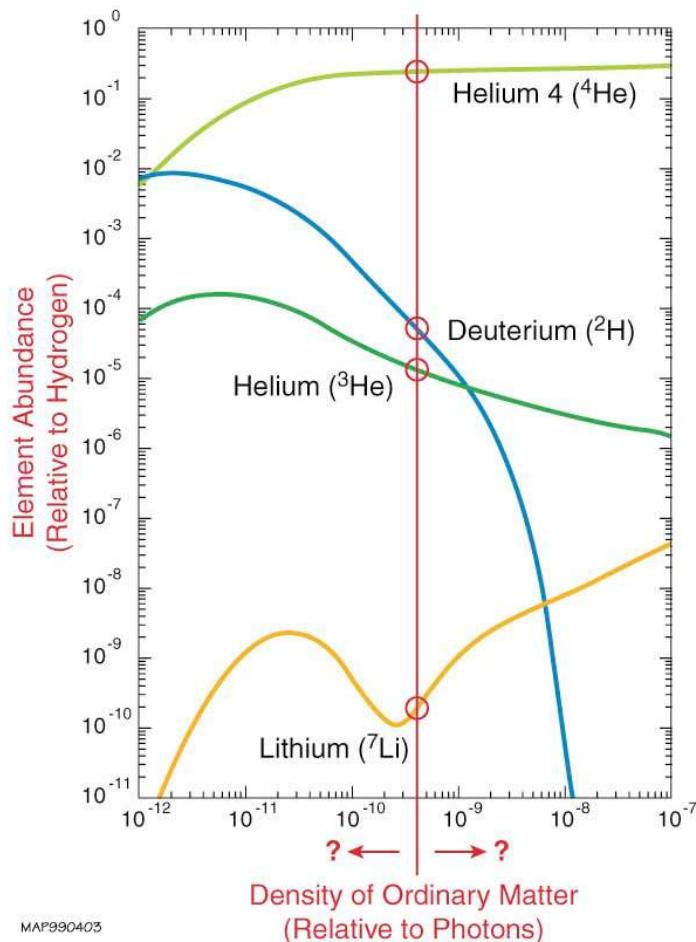
## 8.7 Die primordiale Nukleosynthese

Nachdem ab einer gewissen Temperatur der Zerfall des Neutrons zum Proton möglich wurde, setzte eine Kernreaktionskette ein, bei der eine gewisse Anzahl von primordialen Kernen entstehen konnte. Diese Ära setzt etwa 3 Minuten nach dem Big Bang ein. Die erlauchten Kerne, die entstehen konnten sind in Abb. ?? dargestellt.



**Abbildung 216:** Nuklidkarte zur primordialen Nukleosynthese

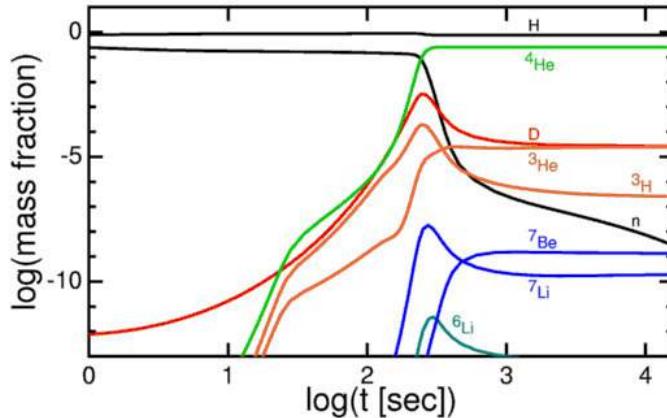
Schwerere Elemente als Beryllium konnten nicht entstehen, da dieser Kern gleich zerfällt, noch bevor er sich zu größeren Kernen aufbauen kann. Schwerere Elemente wurden erst durch Fusion in Sternen erzeugt (e.g. Kohlenstoff) - man spricht auch von der Beryllium-Barriere.



**Abbildung 217:** Theoretische Elementhäufigkeiten für verschiedene Materiedichten. Auf der horizontalen Achse ist die Dichte gewöhnlicher Materie, relativ zur Strahlungsdichte angegeben (Dieses Verhältnis wird oft auch als  $\eta$  bezeichnet) und auf der Vertikalen die Häufigkeit verschiedener Elemente relativ zu Wasserstoff.

Für verschiedene Materiedichten lassen sich aus den Zerfallsserien der primordialen Nukleosynthese gewisse Elementhäufigkeiten ableiten. In Abb. ?? sind diese Häufigkeiten gegen das Materie-Strahlungsverhältnis  $\eta$  aufgetragen. Dieses Verhältnis ließ sich mit WMAP relativ gut bestimmen. Die Strahlungsdichte erhält man aus der Hintergrundstrahlung und die Baryonendichte aus einer Extrapolation auf das homogene Universum von lokalen Häufigkeitsmessungen.  $\eta$  ist  $3.16 \cdot 10^{-10}$  und wurde in der Graphik durch einen vertikalen roten Strich gekennzeichnet.

Das Beeindruckende ist nun, dass die gemessenen Elementhäufigkeiten im Universum mit diesen theoretischen Häufigkeiten bei obigem Wert von  $\eta$  sehr genau übereinstimmen (rote Kreise im Diagramm zeigen gemessene Häufigkeiten an). Die theoretische Häufigkeit von He zu H von 0.234 zum Beispiel konnte sehr genau beobachtet werden. Die Nukleosynthese ist damit der beste Hinweis auf den Big Bang.



**Abbildung 218:** Die Graphik zeigt die zeitliche Entwicklung der Elementhäufigkeiten während der Nukleosynthese ein gewisses  $\eta$ . Auf der horizontalen Achse ist die Zeit, auf der vertikalen Achse ist der relative Massenanteil aufgetragen. Wie zu erkennen bleiben nach einer gewissen Zeit, die Elementhäufigkeiten konstant. Diese können wir dann messen und mit der Theorie vergleichen.

## 8.8 Die kosmische Hintergrundstrahlung (CMB)

### 8.8.1 Entdeckung

Aufbauend auf die Urknallhypothese und der Entdeckung der Expansion des Universums entwickelten die Wissenschaftler George Gamow, Ralph A. Alpher und Robert C. Herman in den Vierzigern eine Theorie eines heißen frühen Universums. Dieser zufolge müsste man noch Reste dieser Strahlung heute wahrnehmen.

Beobachtungen in der Astronomie sind auch immer ein Blick in die Vergangenheit, da das Licht selbst eine Zeit braucht um die Strecke zum Teleskop zurückzulegen. Je tiefer man ins Universum blickt, desto jünger werden die Sterne und Galaxien. Die Expansion des Universums lässt diese entfernten Objekte auch röter erscheinen, da wir uns relativ zu diesen entfernen. Könnte man auf diese Weise bis zum Urknall zurück sehen, wenn es ihn denn gab? Die Antwort ist nein, aber wir sehen etwas, das den besten Hinweis für die Theorie liefert.

Die kosmische Hintergrundstrahlung. Entdeckt wurde sie schließlich von Pencias und Wilson, die in den 60er Jahren an einer Funkantenne der Bell Laboratories gearbeitet haben. Eine häufig erzählte Anekdote berichtet von der zufälligen Entdeckung der Strahlung und der vergeblichen Suche einer irdischen Erklärung dieses 'Rauschens'. Letztlich war es kein technischer Fehler und auch kein Gefiederfabrikat, dass das Rauschen erzeugte, sondern ein Zeuge des Urknalls. **[Quelle 1]**

### 8.8.2 Eigenschaften

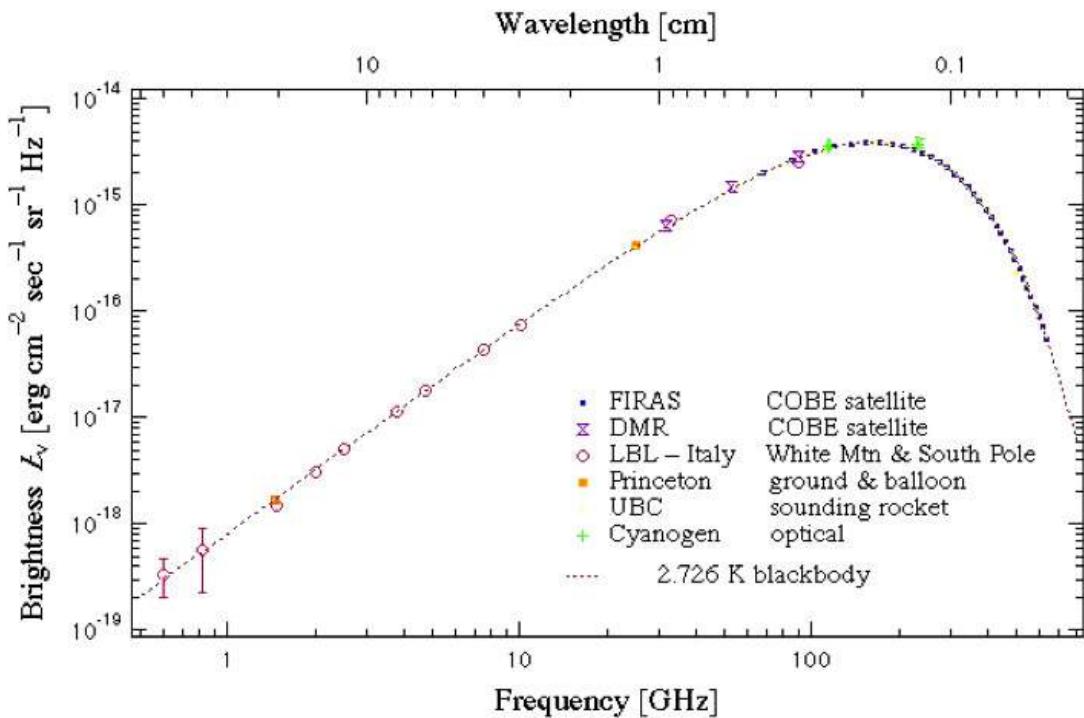
Sie ist eine in allen Richtungen gleichverteilte isotrope Mikrowellenstrahlung und entspricht damit den Vorhersagen von Gamov und seinen Freunden. Die Photonen haben sich in der Phase der Rekombination aus dem thermischen Gleichgewicht mit den Elektronen getrennt (Photonenentkopplung) und sind die ältesten Photonen, die wir detektieren können.

- Die Strahlung hat als Folge des thermischen Gleichgewichts vor der Rekombination das fast perfekte Intensitätsspektrum eines schwarzen Körpers mit einer Temperatur von 2,725 ( $\pm 0,002$ ) Kelvin [Quelle 2]. Die Übereinstimmung mit dem theoretischen Schwarzkörperspektrum übersteigt jede irdisch herstellbare Schwarzkörperstrahlung.

Sie folgt daher der Planck'schen Strahlungsformel (Hier in Form einer Strahlungsdichte):

$$\rho(\nu, T) = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1} \quad (8.14)$$

Der Verlauf der Leuchtkraft mit der Frequenz der Strahlung besitzt die folgende charakteristische Form:



**Abbildung 219:** Die Messpunkte in dieser Graphik sind die Ergebnisse verschiedener astronomischer Experimente, die in unterschiedlichen Frequenzbereichen arbeiten. Fügt man die Punkte durch eine Planck'sche Strahlungskurve bei einer Temperatur bei 2.726 Kelvin ein, erhält man das Bild.

- Die Hintergrundstrahlung besitzt die größte durch Expansion erzeugte Rotverschiebung. Sie beträgt ungefähr  $z \approx 1000$  [**Quelle 3**].
- Sie durchsetzt das gesamte Universum (fast) isotrop. Sie entspricht damit einer grundlegenden Energiedichte, die aufgrund der Expansion des Universums, auf besagte 2.725 K 'ausgedünnt' wurde.

### 8.8.3 Beobachtung

Mehrere Experimente untersuchen die kosmische Hintergrundstrahlung. Teleskope auf der Erde sind entweder in extremen Höhen (*Cosmic Background Imager - CBI* - in den Anden) oder auf der Antarktis (*South Pole Telescope - SPT* -). Dies ist notwendig, da dort die atmosphärischen Störfaktoren relativ gering ausfallen. Um atmosphärische Störungen noch weiter auszumerzen, verwendet man auch Ballonexperimente (z.B. *BOOMERANG*). Schließlich ist die beste Methode, die Verwendung von Sonden und Weltraumteleskopen (COBE, WMAP, Planck).

**Weltraumexperimente:**

- *Cosmic Background Explorer (COBE)* startete 1989 und war 4 Jahre unterwegs. Es war mit mehreren Messapparaturen zur Untersuchung der kosmischen Hintergrundstrahlung ausgestattet (*DIRBE*, *DMR*, *FIRAS* [Quelle 4]).
- Diese sehr erfolgreiche Mission wurde später durch die *Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP)* abgelöst, welches mit einer noch größeren Auflösung [FWHM (= Halbwertsbreite der Auflösungsfunktion) von 13 Bogensekunden] arbeitete.
- 2007 wurde schließlich auch noch *Planck* mit dem Infrarotexperiment *Herschel* ins All geschickt. Dieses konnte mit einer weiteren Auflösungssteigerung aufzeigen und den Sunjajew-Seldowitsch-Effekt (siehe unten) beobachten. Viele Daten sind noch nicht ausgewertet und man erhofft sich noch eine Ableitung der kosmologischen Konstanten.

Jegliche Experimente dieser Art benötigen auch eine zusätzliche Kühlleinrichtung, damit das Ergebnis nicht durch Wärmestrahlung verunreinigt wird. Meistens verwendet man flüssiges Helium, welches die Apparatur auf unter 3 Kelvin halten kann.

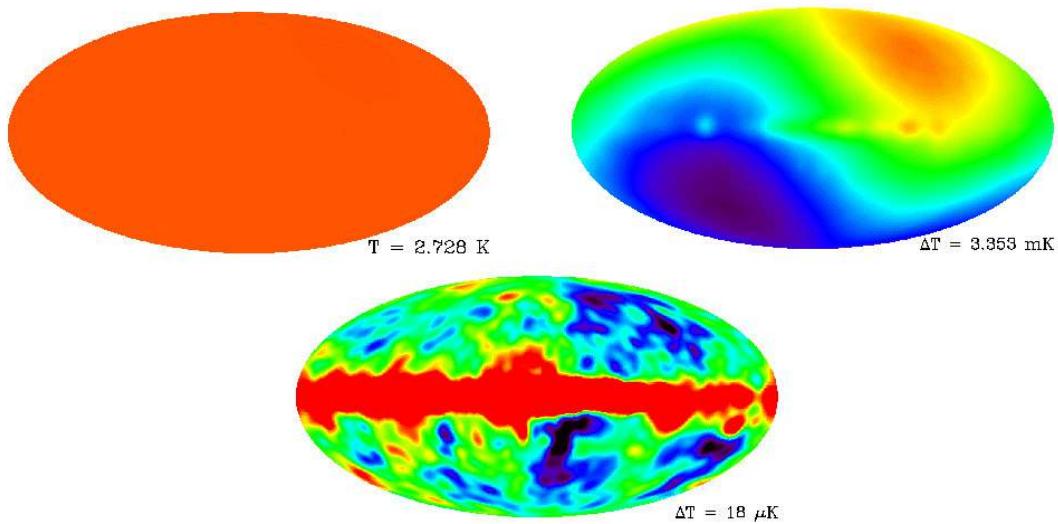
## 8.9 Untersuchung von Anisotropien

Wir haben gehört, dass die Hintergrundstrahlung komplett isotrop verteilt und eine Schwarzkörperstrahlung ist. Es gibt aber dennoch mehr oder wenige auffällige Anisotropien. Primäre Anisotropien nennen wir Schwankungen, die direkt auf Ereignisse und Zustände im frühen Universum zurückzuführen sind. Sekundäre Anisotropien sind durch Wechselwirkungen mit der Strahlung erst nach der Rekombination entstanden [Quelle 4]. Wir wollen mit diesen beginnen.

### 8.9.1 Sekundäre Anisotropien

Ohne besondere Auflösung erscheint die Hintergrundstrahlung isotrop.

- **Dipol:** Durch die Bewegung der Erde relativ zur Hauptmasse des Universums wird die Strahlung Doppler-verschoben. Es entsteht zweigeteiltes Bild, das als Dipol bezeichnet wird (Siehe Abbildung ?? rechts oben). Man erhält den Dipol bei einer Sensitivität im Millikelvinbereich.
- **Leuchten der Milchstraße:** Die Milchstraße strahlt im Infrarotbereich leicht. Dieser Effekt wird erst im  $\mu K$ - Bereich sichtbar (Abb. ?? unten).



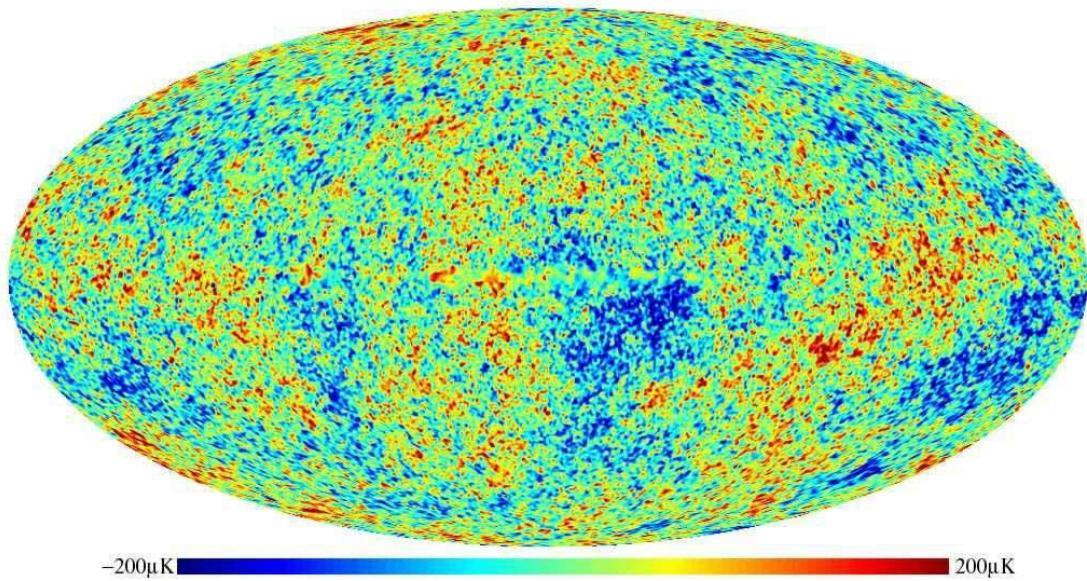
**Abbildung 220:** Die Kosmische Hintergrundstrahlung bei drei verschiedenen Empfindlichkeiten.

Hat man die Milchstraße und den Dipol herausgerechnet gibt es noch folgende Effekte zu beachten.

- **Sunjaev-Seldovitsch-Effekt:** Tritt die Hintergrundstrahlung jedoch durch das heiße Interclustermedium eines Galaxienhaufens hindurch, so wird sie von den schnellen Elektronen dort stark energetisiert. Wie geschieht das? Durch den inversen Comptoneffekt wird kinetische Energie von den Elektronen auf die Strahlung übertragen und ihre Frequenz steigt. Dadurch erscheint die Hintergrundstrahlung lokal etwas härter als man es aufgrund des Plankspektrums erwarten würde. Dies liefert im Übrigen einen Hinweis auf die Position eines Galaxienhaufens.
- **Weitere Effekte:** Gravitative Lichtablenkung, Thompsonstreuung mit anderen Photonen [Quelle 4]

### 8.9.2 Primäre Anisotropien

Trotz der genauen Annäherung an einen Schwarzkörperstrahler, haben die Wissenschaftler mit obigen Experimenten auch primäre Anisotropien in der Temperatur der Hintergrundstrahlung gefunden. Diese spielen sich im Mykrokelvinbereich ab - also sie sind sehr sehr klein. Dennoch haben sie große Bedeutung, da sie unsere Existenz erklären. Wäre das frühe Universum tatsächlich komplett thermodynamisch isotrop gewesen, dann hätten sich daraus keine Strukturen bilden können. Und eine Struktur, das ist zum Beispiel der/die werte Leser/in.



**Abbildung 221:** Das berühmte Bild zeigt die kosmische Hintergrundstrahlung bei einer Auflösung im Mykrokelvin-Bereich. Dipol und Milchstraße wurden herausgerechnet. Die roten Flecken zeigen Bereiche größerer Temperatur und geringerer Dichte, die blauen Flecken Bereiche geringerer Temperatur und höherer Dichte.  
**[Quelle 5]**

In Abb. ?? ist ein buntes Gemisch aus Regionen mit hoher und niedriger Dichte zu sehen. Aus den roten Bereichen bildeten sich später Voids, aus den blauen kalten Bereichen Galaxienhaufen.

### 8.9.3 Multipolentwicklung - für mathematisch Interessierte

Die Untersuchung der kosmischen Hintergrundstrahlung in Abb. ?? kann durch eine sogenannte Multipolentwicklung beschrieben werden. Eine genaue Erklärung dieser Methode würde den Rahmen dieses Skripts sprengen. Der von qualitativen Beschreibungen unbefriedigte Leser soll sich an Werke der höheren Mathematik wenden. Ich habe relevante Informationen etwa bei der VO 'Mathematische Methoden für Physiker II' gefunden.  
**[Quelle 6]**

Die Analyse der zahlreichen Anisotropien in der Hintergrundstrahlung kann sich als durchwegs kompliziert und rechenaufwendig herausstellen. Für einen Kosmologen ist es aber mühsam zu jedem Pixel in der Hintergrundstrahlung einen Temperaturwert zu haben - viel leichter wäre so etwas, wie eine Wahrscheinlichkeitsfunktion. Unter der Annahme, dass die Dichtefluktuationen zufällig platziert sind, kann man sie versuchen als Gausstatistik zu verstehen. Ein Weg zu einer Vereinfachung des Problems ist die sogenannte Multipolentwicklung der Hintergrundstrahlung.

Man stelle sich vor man säße im Zentrum einer Kugel. Die Kugeloberfläche sehe aus wie

Abb. ???. In allen Richtungen sieht man also die Hintergrundstrahlung. Von hier aus zeige ich mit einem Vektor  $\vec{n}$  auf einen Punkt in der Hintergrundstrahlung. An diesem Punkt messe ich nun die Temperatur  $T(\vec{n})$  und mittle sie über einen Temperaturmittelwert der Hintergrundstrahlung  $T_0$ .

$$\tau(\vec{n}) = \frac{T(\vec{n}) - T_0}{T_0} = \frac{\Delta T}{T_0} = \langle T \rangle \quad (8.15)$$

Das ist schon ein Mittelwert der Temperaturen. Zur kompletten Beschreibung der gewünschten Statistik, müssen wir aber noch einen Schritt weiter. Wir suchen jetzt etwas, das uns einen Zusammenhang zwischen zwei Punkten liefert.

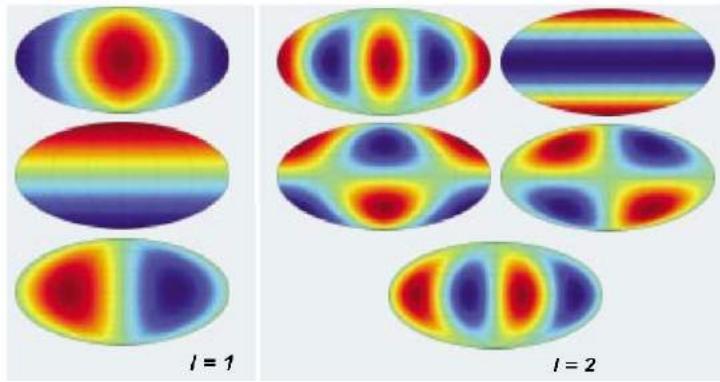
Dazu betrachtet man nun zwei Vektoren  $\vec{m}$  und  $\vec{n}$ . Man erstellt eine Korrelationsfunktion (Funktion verknüpft Punkte)  $C(\alpha)$ , die eine Funktion des eingeschlossenen Winkels ist. Zeigen die Vektoren auf nahe Punkte, so ist der eingeschlossene Winkel  $\alpha$  auch klein (gute Winkelauflösung). Auch hier wird wieder über die gesamte Hintergrundstrahlung gemittelt und man definiert:

$$C(\alpha) = \left\langle \frac{T(\vec{n})}{T_0} \frac{T(\vec{m})}{T_0} \right\rangle \quad (8.16)$$

Jetzt machen wir etwas Verrücktes - wir entwickeln die Temperaturfluktuationen  $\tau$  in Kugelflächenfunktionen  $Y_{lm}(\Theta, \vartheta)$ . Die Hintergrundstrahlung ummantelt uns ja wie eine Kugel. Das ist eine ähnliche Sache, wie die Entwicklung in Fourierreihen - in jetzigen Fall ist man aber im dreidimensionalen gekrümmten Raum. Mathematisch sieht das so aus:

$$\tau(\vec{n}) = \sum a_{lm} Y_{lm}(\vec{n}) = \sum a_{lm} Y_{lm}(\Theta, \vartheta) \quad (8.17)$$

$m$  ist nicht mehr der Vektor von oben, sondern ein Index, wie auch  $l$ , über den summiert wird. Wie bei der Fouriertransformation gibt es Koeffizienten  $a_{lm}$ . Damit haben wir schon etwas gewonnen, denn vorher hatte man für jeden Pixeläuf der Himmelskugel eine Zahl  $T(n)$ . Nun hat man die gleiche Information in einer diskreten Sammlung  $a_{lm}$  von Zahlen.



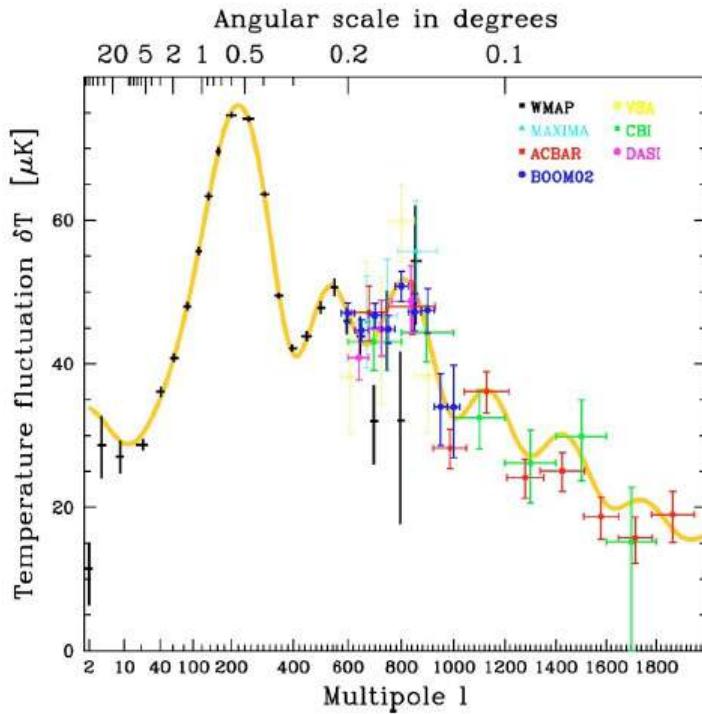
**Abbildung 222:** Die Abbildung versucht eine Visualisierung der Entwicklung nach Kugelflächenfunktionen bei verschiedenen  $l$  und mehreren Perspektiven.  $l = 1$  wird als Dipol bezeichnet,  $l = 2$  als Quadrupol. Bei noch größeren  $l$  spricht man vom Multipol. Mit zunehmendem  $l$  wird die Kugel bunter und die 'heissen' und 'kalten' Bereiche wechseln immer stärker.

Die weiteren Rechenschritte spare ich aus - jedenfalls kommt man über die Entwicklung in Kugelflächenfunktionen, das ist die sogenannte Multipolentwicklung, auf einen neuen Ausdruck für die Korrelationsfunktion. Dieser neue Ausdruck ist nun eine Funktion über die Entwicklungskoeffizienten  $a$ , welches die Sache wie gesagt einfacher macht:

$$C_l = \langle a_{lm} \rangle = \frac{1}{2l+1} \sum a_{lm} a_{lm}^* \quad (8.18)$$

Für verschiedene 'Multipolmomente'  $l$  erhält man so einen unterschiedlichen Wert für  $C$ . Diese Funktion wird auch als Leistungsspektrum bezeichnet. Sie gibt Aufschluss über einen Mittelwert der Temperaturfluktuationen bei einer gewissen Auflösung. Das Multipolmoment der Entwicklung entspricht in einer gewissen Weise der Winkelauflösung. Aus Abb. 222 kann man erkennen, dass bei größeren  $l$  die Kugelflächenfunktionen stärker oszillieren (Im Bild bunter wird) und kleinere Bereiche auf der Kugel 'auflösen'.

#### 8.9.4 Das Leistungsspektrum des CMB



**Abbildung 223:** Leistungsspektrum des CMB: Auf der vertikalen Achse ist mit  $C_l$  ein Maß für die Stärke der Temperaturfluktuationen und auf der horizontalen Achse das Multipolmoment  $l$  oder die Winkelauflösung aufgetragen.

Das Leistungsspektrum lässt sich in vielen Bereichen interpretieren. Die zugrundeliegenden Theorien sind reichlich komplex, darum hier nur ein kurzer Einblick:

##### Wolf-Sachs-Effekt:

Im Bereich von  $l = 1 - 100$  kann aus dem Leistungsspektrum der Wolf-Sachs-Effekt abgelesen werden. Die Dichtefluktuationen zur Zeit der Rekombination besaßen auch ein Gravitationspotential. Wenn Photonen nun von der natürlichen Materie entkoppeln wollten, mussten sie auch dieses Gravitationspotential überwinden. Das kostet Energie. Und da nach Planck  $E = h\nu$  gilt, entspricht der Energieverlust beim Verlassen des Potentials auch einem Verlust an Frequenz. Die Wellenlänge wird also größer und erscheint noch stärker rotverschoben.

Baryonische Materie allein reicht nicht aus, um diesen Effekt zu erklären. Man vermutet, dass sich dunkle Materie schon vor der baryonischen Materie zu größeren Verdichtungen zusammengetan und gravitativ auf die Photonen und die leuchtende Materie gewirkt hat.

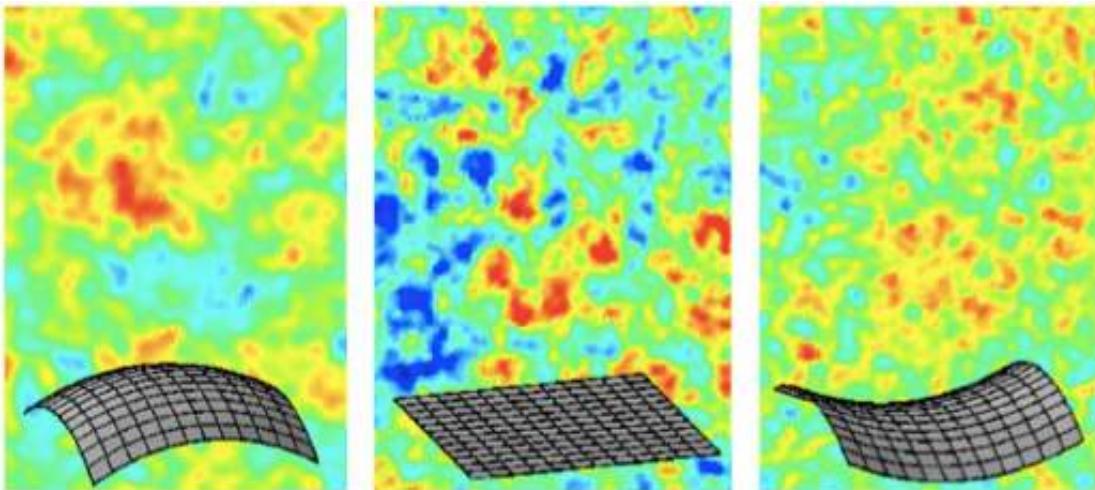
Auch Hinweise auf die dunkle Energie lassen sich aus dem Wolf-Sachs-Effekt ableiten. [Quelle 1]

### Akustische Oszillationen

Die Maxima und Minima in Abb. ?? werden durch diesen Effekt erklärt. Druck- und Temperaturschwankungen führen zu Schwingungen in den Gravitationspotentialen Kleine Strukturen von gleicher Größe schwangen in Phase. Dies setzt sich auf kleinere Strukturen weiter fort.

Die Maxima geben desweiteren Auskunft über verschiedene Sachverhalte [Quelle 7]:

- Lage des ersten Maximums - Geometrie des Raums (siehe Abb. 224)
- Lage des zweiten Maximums - Baryonendichte
- Lage des dritten Maximums - Strahlungs-Massenverhältnis



**Abbildung 224:** Für unterschiedliches Aussehen der kosmischen Hintergrundstrahlung leitet man unterschiedliche Geometrien des Raumes ab. Die beste Übereinstimmung der Beobachtung findet sich mit dem theoretischen Modell eines flachen Universums.

### Silk-Damping

Dieser Effekt erklärt das Abfallen des Leistungsspektrums zu besseren Auflösungen hin. Bei kleineren Strukturen erscheint die Hintergrundstrahlung also homogener. Solche kleinen Strukturen bei diesen hohen Auflösungen können nicht mehr so leicht kollabieren, wie Größere im linken Bereich von Abb. 223. Dunkle Materie ließ die baryonische Materie verklumpen. Kleinere Strukturen (Klumpen) bleiben nicht erhalten sondern fallen auch in das Potential der dunklen Materie.

Aktuelle Experimente lassen einen weiteren Bump auf sehr kleinen Multipolmomenten erahnen, der mit heutigen Theorien noch keine Erklärung gefunden hat aber für die Strukturbildung eine wichtige Rolle gespielt haben könnte.

## 8.10 Die Entstehung von Strukturen

### 8.10.1 Cold-Dark-Matter Modell

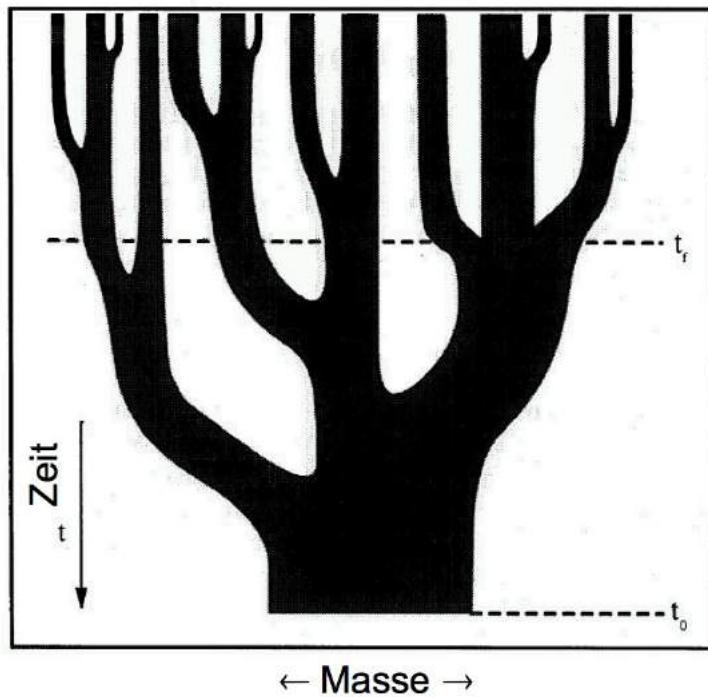
Wir haben bereits gesehen, dass sich aus den primordialen Dichtefluktuationen der Hintergrundstrahlung mit der Zeit die heute beobachtbaren Strukturen gebildet haben. Aus dem Studium des Leistungsspektrum ließ sich des Weiteren bereits ableiten, dass dunkle Materie dabei wohl eine wichtige Rolle gespielt haben könnte (Sachs-Wolf-Effekt, Silk-Damping). Tatsächlich lässt sich ohne die dunkle Materie die Strukturbildung nur schwer erklären, da Strukturen aus reiner baryonischer Materie von alleine zu langsam wachsen würden, um heutige Strukturen zu erklären.

Die dahinterliegende Theorie spricht von Cold Dark Matter (CDM), im Gegensatz zu einer bereits verworfenen Theorie, die Gleiche durch Neutrinos (Hot DM) erklären wollte.

### 8.10.2 Hierarchical Clustering

Man kann nun versuchen die Entwicklung aus den anfänglichen Strukturen mathematisch unter den beobachteten Bedingungen zu vorherzusagen. Dazu stellt man Systemgleichungen der Dichtefluktuationen  $\Delta = \delta\rho/\rho_0$  (so genannte Euler-Lagrange-Gleichungen). Unter Berücksichtigung der Friedmannschen Gleichungen erhält man so - oft recht komplizierte - mathematische Vorhersagen, die numerisch ausgewertet werden können. Interessant ist auch, dass man hierbei einen Wellenansatz für die Fluktuationen verwendet:  $\Delta = e^{i(\omega t+kx)}$

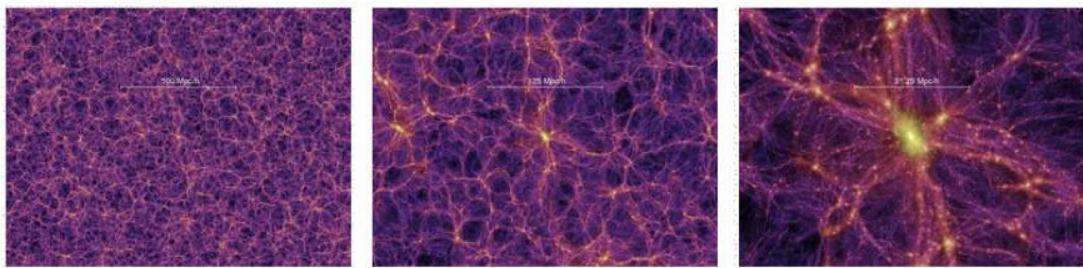
Das Ergebnis dieser mathematischen Überlegungen führt auf ein 'hierarchisches System der Massenanziehung' (Hierarchical Clustering). Wie aus Abb. 225 zu erkennen, gibt es am Anfang viele kleine Strukturen (die Äste des Baumes), die sich langsam miteinander vereinigten. Diese anfänglichen vielen kleinen Äste entsprechen den Dichtefluktuationen im frühen Universum. Mit der Zeit haben sie sich immer mehr zu größeren Strukturen zusammengezogen. Bis sich die heute (Zeitpunkt  $t_0$ ) beobachteten dicken 'Stämme' ausgebildet haben (im speziellen Galaxienhaufen). Zwischen diesen großen Strukturen bleiben immer größere Bereiche frei, die heutigen Voids.



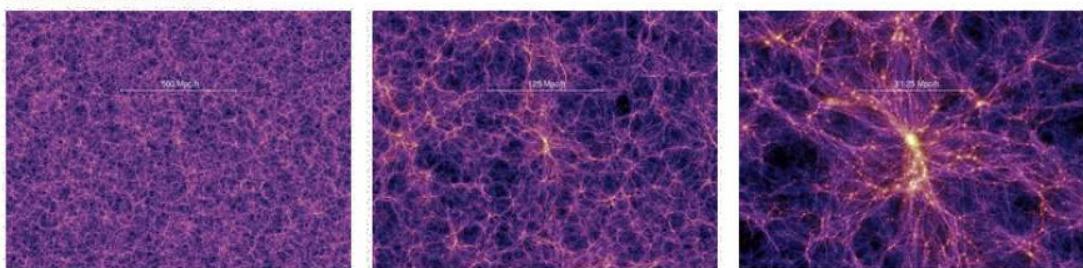
**Abbildung 225:** Zu erkennen ist ein baumartiges Gebilde. Es soll die Strukturbildung zu immer massereicheren Verklumpungen illustrieren

In aufwändigen Simulationen versucht man die Entwicklung der Strukturen immer besser zu verstehen. Der Millennium Run war eine numerische Simulation, die eine enorme Rechenleistung durch Zusammenschluss mehrerer Supercomputer gewährleistete. Ergebnisbilder aus der Simulation sind in der folgenden Abbildung dargestellt. Zu erkennen ist das Hierarchical Clustering von vielen kleinen Strukturen zu größeren Verklumpungen. Im nächsten Kapitel wird darauf noch intensiver eingegangen.

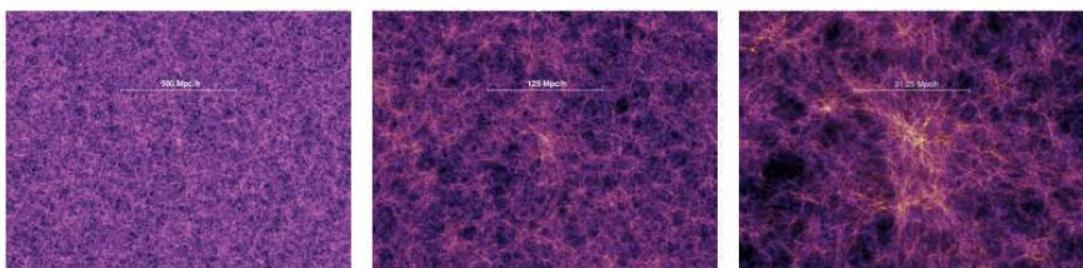
**Redshift z=0 (t = 13.6 Gyr)**



**Redshift z=1.4 (t = 4.7 Gyr)**



**Redshift z=5.7 (t = 1.0 Gyr)**



**Abbildung 226:** Die Bilder zeigen unterschiedliche Fortschritte in der Strukturentwicklung des Universums. Der Redshift nimmt von oben nach unten zu. Das heißt, dass die unteren Bilder jüngere Strukturen darstellen. Links ist eine großräumige Entwicklung zu sehen, Rechts ist eine einzelne Verklumpung herausgezoomt.

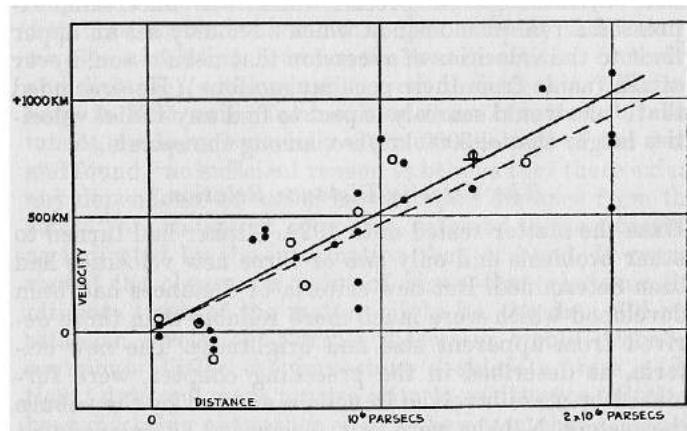
## 8.11 Das expandierende Universum

### 8.11.1 Das Hubblegesetz

Für lokale Distanzen gilt das Hubblegesetz:

$$v = H_0 D \quad (8.19)$$

Es sagt aus, dass sich mit steigender Entfernung  $D$ , die Objekte immer schneller von uns entfernen.



**Abbildung 227:** Das Hubblegesetz lässt sich aus den Beobachtungen der Rotverschiebung ableiten. So ein Diagramm mit Entfernung zu Rotverschiebung als Achsen nennt man Hubblediagramm.

### 8.11.2 Die kosmische Rotverschiebung

In diesem Abschnitt soll ein Zusammenhang zwischen Rotverschiebung  $z$  und Skalenradius  $R$  zu einer bestimmten Epoche  $t$  des Universums hergeleitet werden. Das wird nicht explizit in der Vorlesung behandelt, ist aber für das Verständnis späterer Themen hilfreich.

Die Rotverschiebung, etwa durch den Dopplereffekt, wird durch 8.20 definiert:

$$z + 1 = \frac{\lambda_{obs}}{\lambda_e} \quad (8.20)$$

Dabei beschreibt  $\lambda_{obs}$  bzw  $\lambda_e$ , die beobachtete beziehungsweise tatsächlich emittierte Wellenlänge. Die Rotverschiebung gibt damit das Verhältnis der Wellenlängenänderung  $d\lambda$  zur tatsächlichen Wellenlänge an, da nach 8.20 gilt ...

$$\begin{aligned} z &= \frac{\lambda_{obs}}{\lambda_e} - 1 \\ z &= \frac{\lambda_{obs}}{\lambda_e} - \frac{\lambda_e}{\lambda_e} \\ z &= \frac{\Delta\lambda}{\lambda_e} \\ dz &= \frac{d\lambda}{\lambda_e} \end{aligned}$$

Da  $c = f\lambda$  können wir das noch weiter umschreiben zu:

$$dz = \frac{d\lambda f_e}{c}$$

Die Änderung der Wellenlänge entspricht nach dem Dopplereffekt einer Geschwindigkeitsänderung des Emitters:

$$d\lambda = \frac{dv}{f_e}$$

Nach der Definition der Hubblekonstante können wir auch noch folgenden Zusammenhang herzaubern:

$$\begin{aligned} H &= \frac{\dot{R}}{R} \\ HR &= \frac{dR}{dt} \\ dt &= \frac{dR}{H_0 R} \end{aligned}$$

Nach dem Hubblegesetz gilt außerdem:

$$dv = H_0 dx \quad (8.21)$$

Schlussendlich erhält man für die kosmische Rotverschiebung:

$$dz = \frac{d\lambda f_e}{c} = \frac{dv}{c} = \frac{H_0 dx}{c}$$

Das Licht durchsetzt  $dx$  in der Zeit  $dt = dx/c$ :

$$dz = H_0 dt = H_0 \frac{dR}{H_0 R} = \frac{dR}{R}$$

Damit erhält man die Beziehung:

$$\frac{d\lambda}{\lambda} = \frac{dR}{R} \quad (8.22)$$

Durch Lösen dieser Differentialgleichung erhält man:

$$\lambda(t) = CR(t) \quad (8.23)$$

Die Konstante C kann über die Tatsache bestimmt werden, dass wir heute die Wellenlängen  $\lambda_{obs}$  beobachten und wir per Definition sagen, dass der Skalenradius R zum heutigen Zeitpunkt  $t_0$  1 beträgt.

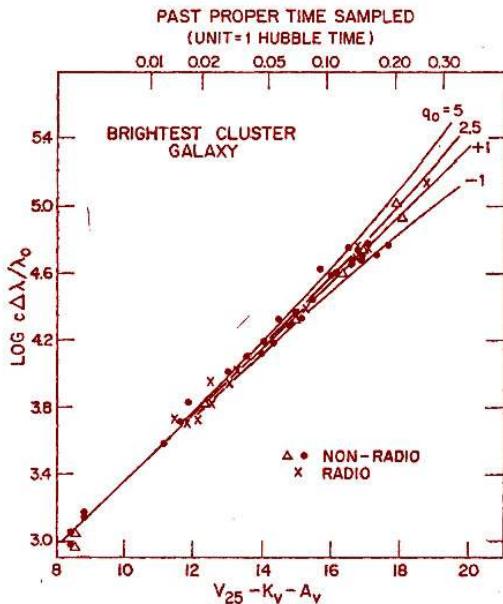
$$\begin{aligned}\lambda(t_0) &= CR(t_0) \\ \lambda_{obs} &= C\end{aligned}$$

Damit erhält man gemeinsam mit der Definition der Rotverschiebung 8.20 den Zusammenhang zwischen Rotverschiebung und Skalenradius des Universums:

$$z(t) + 1 = \frac{1}{R(t)} \quad (8.24)$$

### 8.11.3 Eine beschleunigte Ausdehnung

Aus der kosmischen Rotverschiebung ist der Skalenradius zu der Epoche, der dieses z entspricht, direkt ableitbar. Man kann nun versuchen aus der Rotverschiebung Informationen über das Expansionsverhalten des Universums zu gewinnen. Im Speziellen könnte man so die Größe des Accelerationsparameters bestimmen.



**Abbildung 228:** Die Graphik zeigt, wie aus den Beobachtungen der Rotverschiebung unterschiedliche Accelerations bzw. Dezelerationsparameter  $q$  ermittelt werden könnten. Auf der horizontalen Achse ist die Helligkeit, aus der direkt auf die Entfernung geschlossen werden kann und auf der vertikalen Achse eine zur Rotverschiebung proportionale Größe aufgetragen. Für kleine  $z$  zeichnet sich das lineare Hubble'sche Gesetz ab, für weiter entfernte Punkte könnte man jedoch auch eine beschleunigte Expansion beobachten. Aber allein aus weit entfernten Galaxienhaufen lässt sich kein eindeutiges Bild gewinnen.

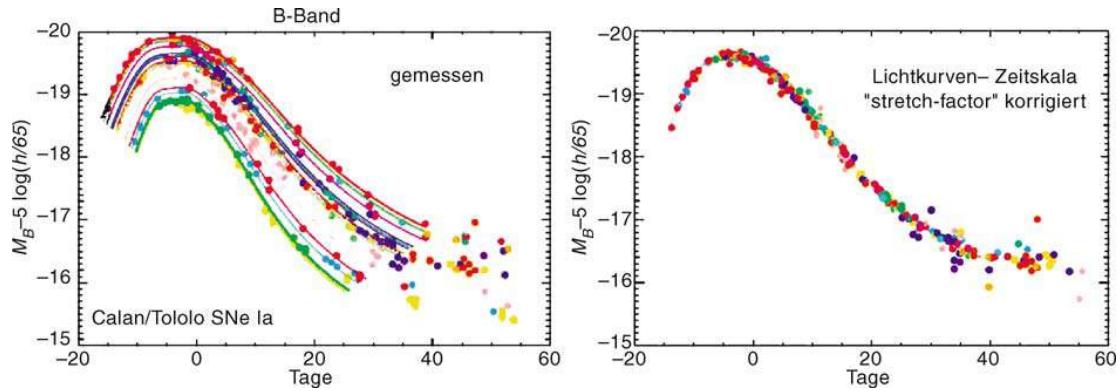
Will man  $z$  zuverlässig einer gewissen Entfernung zuordnen, so kann man sich des Entfernungsmoduls bedienen. Dafür benötigt man aber Lichtquellen, die immer dieselbe Intensität abstrahlen: sogenannte Standardkerzen. Des weiteren muss diese Intensität entsprechend groß sein, damit man sie auch noch für sehr weit entfernte Objekte beobachten kann.

Supernovae des Typs Ia scheinen beide Bedingungen zu erfüllen. Solche SN entstehen aus einem Doppelsternsystem aus Rotem Riesen und weißem Zwerg. Der Rote Riese gibt Materie an den weißen Zwerg ab, dessen Masse somit steigt. Ab der sogenannten Chandrasekhar'schen Grenzmasse von 1.4 Sonnenmassen hält der Zwerg dem Massendruck nicht mehr stand und kollabiert. Wir sehen eine Supernova.

Das heißt diese SN gibt es immer bei einer konstanten Masse von  $1.4 M_{\odot}$ . Die Helligkeitsfunktionen von unterschiedlichen Supernovae Typ Ia sollten sich daher kaum voneinander unterscheiden.

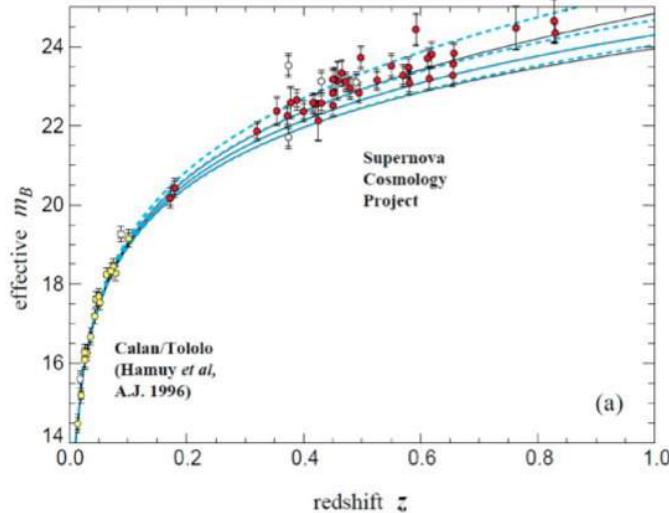
Jedoch tun sie dies doch. Es zeigt sich aber, dass es für unterschiedliche Helligkeitsmaxima auch einen eindeutigen Verlauf der Helligkeitskurve gibt. Durch Einbeziehen dieser Information und der Korrektur von etwaigen Extinktionen in der Heimatgalaxie, erhält

man tatsächlich kaum Abweichungen (Siehe Abb. ??).



**Abbildung 229:** Supernovae Ia als Standardkerzen. Links: Die gemessenen Leuchtkurven. Rechts: Die korrigierten Leuchtkurven.

Man erhält folgendes Hubble-Diagramm:



**Abbildung 230:** Die Supernovae erscheinen für große  $z$  leuchtstärker, als man dies nach dem linearen Hubblegesetz erwarten würde. Durch die Messpunkte wurden mehrere Fits gelegt, die für verschiedene kosmologische Parameter  $\Omega$  gelten würden. Es zeigt sich, dass jene Fits für ein flaches Universum mit einem  $\Omega_\Delta$ , welches relativ groß ist, am ehesten die Beobachtungen erklären können. Siehe Tabelle zum Schluss des Kapitels.

Die Kurve ist für große  $z$  eher flach, d.h. die Leuchtkraft und damit die Entfernung zu uns hat sich für diese großen  $z$ , also für diese frühen Epochen, kaum geändert. Für  $z$  kleiner 1 sind die Entfernungen zu den Objekten sehr viel unterschiedlicher nach kur-

zen Zeitschritten (die Kurve ist steil). Die Steigung der Kurve ist also ein Maß für die Geschwindigkeit der Expansion und der Betrag der Steigung ist heute größer als früher. Nach diesen Beobachtungen erhält man eine positiv beschleunigte Expansion des Universums. Es existiert also dunkle Energie, die den Raum expandieren lässt. Die einst von Einstein eingeführte kosmologische Konstante ist ungleich 0.

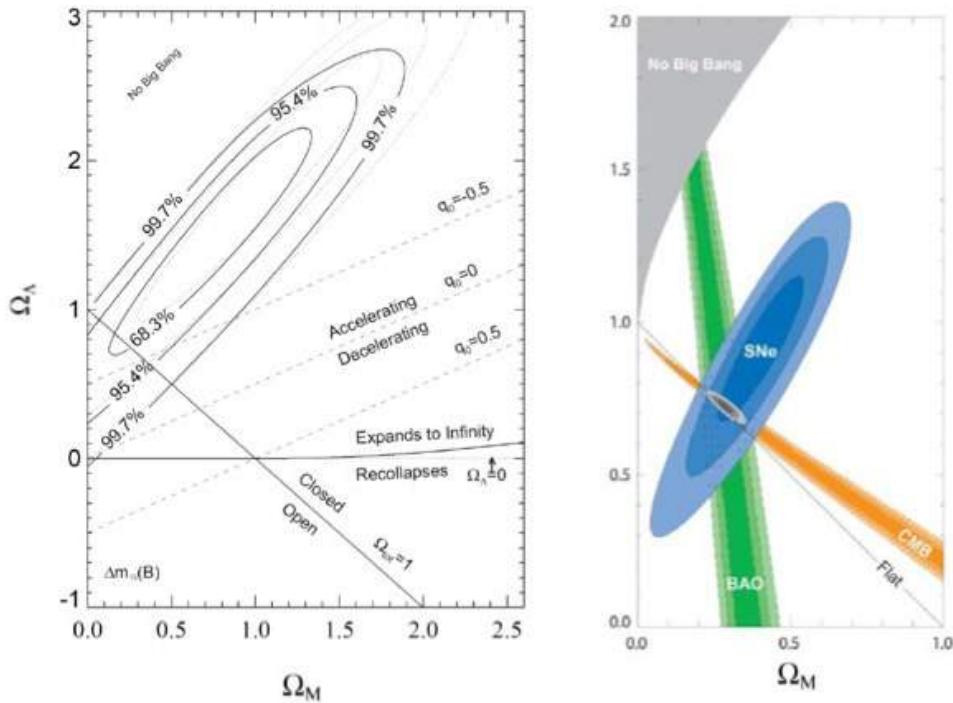
Es war nun notwenig auch das Entfernungsmodul für weit entfernte Objekte zu überarbeiten. Dieses hat nach diesen Beobachtungsergebnissen die Form:

$$m - M = 5 \log \frac{q_0 z + (q_0 - 1)(\sqrt{2q_0 z + 1} - 1)}{q_0^2} + A_g + A_i + k_e \quad (8.25)$$

Dabei ist  $A_g$  die Extinktion der Milchstraße und  $A_i$  die Extinktion der Heimatgalaxie.  $k_e$  beschreibt den Einfluss weiterer kosmischer evolutionärer Effekte.

## 8.12 Die kosmischen Parameter

Für unterschiedliche Zusammensetzungen des Universums aus dunkler Energie und Materie ergeben sich auch unterschiedliche Formen des Universums. Messungen von unterschiedlichen kosmischen Paramtern ( $\Omega_M$ ,  $\Omega_\Lambda$ ,  $H_0$ ,  $q_0$ ,  $k$ , ...) lassen somit Schlüsse über die Dynamik des Universums treffen. Die folgenden Diagramme sind sehr interessant.



**Abbildung 231:** Es ist die Massendichte zur Energiedichte aufgetragen. Zu erkennen ist, dass bei der Summe von den Omegas gleich 1, das Universum flach ist. Darunter bzw. darüber ist es geschlossen bzw. offen. Des weiteren kann man aus dem Diagramm die Expansion ablesen. Für große Energiedichten expandiert das Universum. Die elliptisch eingekreisen Bereiche zeigen jene Werte für die kosmischen Parameter an, die innerhalb der Beobachtungen liegen. Im rechten Diagramm wurde unterschiedliche Quellen verwendet und die Ergebnisse übereinander gelegt.

Aus unterschiedlichen Quellen (CMB, Supernovae, Elementdichten, etc.) versucht man die Messungen der Parameter zu vereinigen. Die Schnittpunkte der unterschiedlichen Messungen geben die Wahrscheinlichsten Werte für die Parameter an. Man spricht von '*Concordance Cosmology*'.

In der folgenden Tabelle sind die heute aktuellen Werte der kosmischen Parameter aufgeschrieben.

Maximum Likelihood  $\Lambda$ CDM Parameters<sup>a</sup>

Parameter	Symbol	WMAP Data	Combined Data <sup>b</sup>
Fit $\Lambda$ CDM Parameters			
Physical baryon density	$\Omega_b h^2$	0.02256	0.02240
Physical cold dark matter density	$\Omega_c h^2$	0.1142	0.1146
Dark energy density ( $w = -1$ )	$\Omega_\Lambda$	0.7185	0.7181
Curvature perturbations, $k_0 = 0.002 \text{ Mpc}^{-1}$	$10^9 \Delta_R^2$	2.40	2.43
Scalar spectral index	$n_s$	0.9710	0.9646
Reionization optical depth	$\tau$	0.0851	0.0800
Derived Parameters			
Age of the universe (Gyr)	$t_0$	13.76	13.75
Hubble parameter, $H_0 = 100 h \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$	$H_0$	69.7	69.7
Density fluctuations @ $8 h^{-1} \text{ Mpc}$	$\sigma_8$	0.820	0.817
Baryon density/critical density	$\Omega_b$	0.0464	0.0461
Cold dark matter density/critical density	$\Omega_c$	0.235	0.236
Redshift of matter-radiation equality	$z_{\text{eq}}$	3273	3280
Redshift of reionization	$z_{\text{reion}}$	10.36	9.97

**Abbildung 232:** Die aus heutiger Sicht wahrscheinlichsten Werte für die kosmischen Parameter.