

# Galaxien

Astronomisches Praktikum

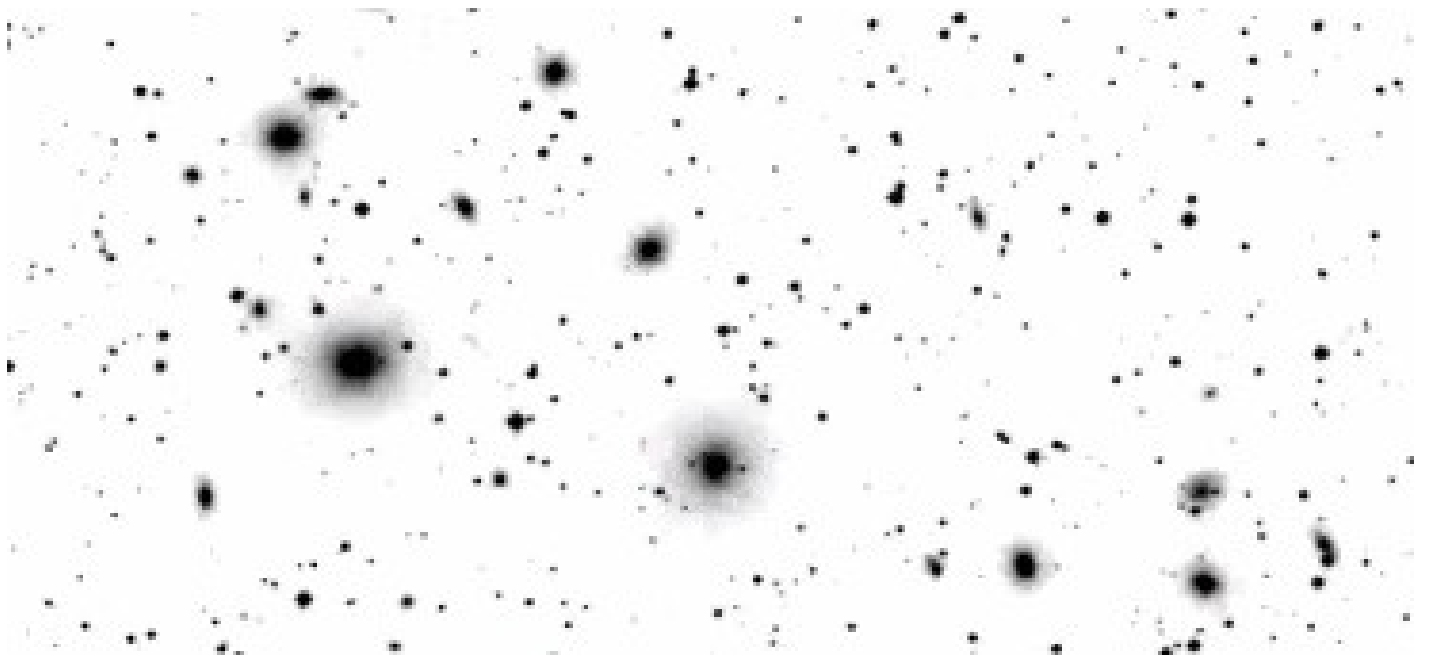
## ABSTRACT

In dieser Praktikumseinheit haben wir Galaxien im Virgo-Haufen und in Abell 1060 untersucht. Dafür haben wir zwei alte Aufnahmen des UK-Schmidt-Teleskops verwendet (J2137 für den Virgo-Haufen und J7742 für Abell 1060).

## 1. Die Aufnahmen

Die Aufnahmen befinden sich auf Glasplatten. Es handelt sich um ein Fotonegativ, das heißt die hellen Stellen (in dem Fall Galaxien) sind dunkel und die dunklen Stellen sind durchsichtig. Auf diese Art und Weise können ganz besonders scharfe Bilder dargestellt werden. Dadurch passen große hochauflösende Himmelsausschnitte auf im Vergleich dazu kleine Bilder.

Die Aufnahmen sind auf Leuchttischen gelegen, das sind Tische, die eine Lichtquelle in der durchsichtigen Tischplatte Leuchtquellen eingebaut haben. Dadurch schaut es so aus, als würde der Himmel leuchten und nur die Galaxien sind schwarz.



**Abb. 1:** So sieht eine Photoplate in Originalgröße aus. Jeder Punkt entspricht einer Galaxie. Beispiel von (1)

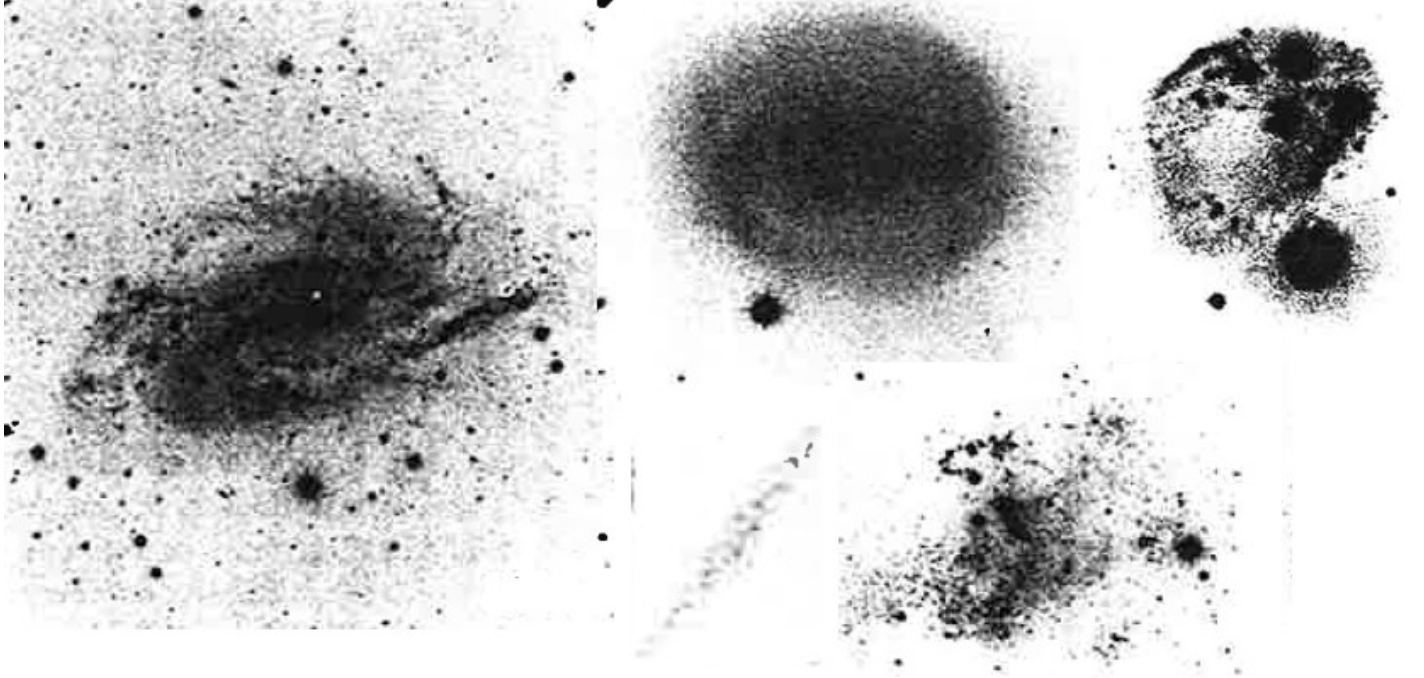
Die Galaxien sind auf der Aufnahme so klein, dass sie nur wie schwarze Punkte aussehen. Um Details zu erkennen, muss man eine Lupe auf die Stelle der Fotoplate mit der Galaxie halten. Praktischerweise sind im Glas der Lupe zwei Koordinatenachsen eingezeichnet. Wenn man die Lupe so dreht, dass eine Koordinatenachse entlang der großen und eine entlang der kleinen Halbachse verläuft, kann man die Galaxien bequem vermessen.

Die Koordinaten kann man mit einem normalen Lineal messen, weil seitlich auf der Aufnahme die Himmelskoordinaten beschriftet waren.

## 2. Durchmesser der Galaxien

Um den Durchmesser der Galaxien zu bestimmen, messen wir zuerst die große Halbachse in Millimeter auf der Abbildung. Durch Multiplikation mit dem Maßstab der Abbildung (67"/mm) erhalten wir die Werte in Bogensekunden.

Die Messwerte in unserer Gruppe waren sehr unterschiedlich, weil die Galaxie keine scharfe Grenze hat, sondern die Sterne nach außen immer weiter auseinander sind. Mit der Lupe sieht man innen einen durchgängig schwarzen Fleck, nach außen wird dieser immer stärker zerrissen, bis man nur noch schwarze Punkte sieht. Diese Eigenschaft bezeichnet man als diffus.



**Abb. 2:** Beispiele für diffuse Galaxien aus (2)

Um trotzdem eine klar definierte Grenze angeben zu können, wird der Wert  $D_{25}$  definiert: Man fasst alle Pixel mit der Größe einer Quadratbogensekunde, die durchschnittlich eine Helligkeit von mindestens 25 Magnituden haben, zusammen und nimmt von diesem Gebiet den Durchmesser. Dieser Wert war bei allen Galaxien deutlich größer als der von uns gemessene Durchmesser.

Um vom Durchmesser in Bogensekunden auf den Durchmesser in Kiloparsec zu kommen, muss man die Entfernung des Virgoaufens kennen (die Entfernungen innerhalb des Virgoaufens sind im Verhältnis zur Distanz zwischen Milchstraße und Virgohaufen vernachlässigbar).

Die Entfernung erhält man, indem man die Helligkeit der Cepheiden in der Galaxie misst. Die absolute Helligkeit der Cepheiden ist immer gleich, die relative Helligkeit hängt von der Entfernung ab. Durch Subtraktion der relativen Helligkeit von der absoluten Helligkeit erhält man das Entfernungsmodul, beim Virgohaufen 31,5 Magnituden.

Aus dem Entfernungsmodul kann man die Entfernung mit der Formel

$$m - M = 5 \log \left( \frac{r}{10 \text{ pc}} \right) \quad (1)$$

berechnen. Umformen nach  $r$  ergibt:

$$r = 10 \text{ pc} \times 10^{0.2(m-M)} \quad (2)$$

Einsetzen von 31,5 statt  $m-M$  ergibt 19,95 Megaparsec.

Wenn man den Winkel in Bogenmaß umrechnet, genügt es diesen mit dem Radius zu multiplizieren um die große Halbachse in Megaparsec zu erhalten.

NGC	$d_1$ [mm]	$d_2$ [mm]	$d_{\odot}$ [mm]	$d_{\odot}$ ["]	$d_{\odot}$ [']	$D_{25}$ [']	$D_{25}$ [kpc]
4486	2.5	2.5	2.5	167.5	2.7	7.2	16.2
4473	2	2	2	134	2.2	4.5	12.9
4552	1.5	1.4	1.45	97.15	1.6	4.2	9.4
4461	2.3	2.5	2.4	160.8	2.68	3.7	15.6
4501	5	5	5	335	5.6	6.9	32.4
4321	4.5	5	4.75	318.25	5.3	6.9	30.8
4371	2.4	2.5	2.45	164.15	2.7	3.9	15.9
4548	4.1	4.3	4.2	281.4	4.69	5.4	27.3
4284	2.4	2.4	2.4	160.8	2.68	15.6	3.1

**Tab. 1:** Große Halbachsen: Unsere Messungen und die Angabe im Vergleich.

- Die Spalte NGC gibt die Katalognummern der Galaxien im New-General-Catalogue an.
- $d$  steht für den Durchmesser entlang der großen Halbachse. Die Zahlen stehen für die unterschiedlichen Messungen der Gruppenmitglieder und  $\odot$  für den Durchschnitt.
- $D_{25}$  steht für den Durchmesser innerhalb der die Intensität mindestens  $25^m/\text{arcsec}^2$  ist.

### 3. Galaxientypen

Für die Bestimmung des Galaxientyps benötigt man neben der großen Halbachse auch die kleine Halbachse, weil bei den elliptischen Galaxien die Untertypen von der Exzentrizität abhängen. Die Scheibengalaxien (das sind die Spiral- und Balkenspiralgalaxien) sind wegen der Zentrifugalkraft näherungsweise kreisförmig, die Exzentrizität kommt fast ausschließlich durch den Neigungswinkel im Verhältnis zur Milchstraße zu Stande.

Den Neigungswinkel  $i$  kann man aus der großen Halbachse  $a$  und der kleinen Halbachse  $b$  mit der Formel  $i = \arccos(b/a)$  berechnen.

Wenn der Winkel  $0^\circ$  ist, sieht man die gesamte Scheibe von oben, deshalb bezeichnet man diese Position als face on. Die beiden Halbachsen sind dann näherungsweise gleich groß und der Umriss der Galaxie ist ungefähr kreisförmig.

Wenn der Winkel  $90^\circ$  ist, sieht man nur die Dicke der Scheibe, deshalb bezeichnet man diese Position als edge on. Die kleine Halbachse ist dann viel kürzer als die große Halbachse und die Galaxie sieht aus wie ein Strich.

NGC	$a_1$ [mm]	$b_1$ [mm]	$a_2$ [mm]	$b_2$ [mm]	$a_{\odot}$ [mm]	$b_{\odot}$ [mm]	Typ	$i$ [°]	$m$ [mag]
4254	4	3	4	3	4	3	Sb	41.4	10.5
4267	1	1	1.2	1.4	1.1	1.2	E1		12.6
4294	2.4	0.5	2.4	0.5	2.4	0.5	Sa	78.0	13.0
4298	2.5	1	2.3	1	2.4	1	Sa	65.4	12.5
4321	5	4	5	4.2	5	4.1	Sc	34.9	10.8
4371	2.5	1.2	2.5	1.2	2.5	1.2	SB0	61.3	12.1
4388	5.5	0.7	5	0.6	5.25	0.65	SBa	82.9	12.2
4406	3.5	3	3.4	2.7	3.45	2.85	E2		10.9
4421	2	1.3	1.8	1	1.9	1.15	S0	52.8	-
4429	4	1.3	4	1.5	4	1.4	S0	69.5	11.7
4458	1	1.1	1	0.9	1	1	E0		12.9
4461	3	1	3	0.7	3	0.85	S0	73.5	12.4
4473	2.5	1.5	2.5	1.4	2.5	1.45	E5		11.7
4486	4.5	4.5	3.5	3.5	4.5	3.5	E0		10.7
4501	5.3	2.5	5.2	2.5	5.25	2.5	Sb	61.3	10.9
4503	2	1	2.5	0.9	2.25	0.95	S0	65.0	12.8
4523	1.5	1.3	2.5	1.6	2	1.45	Sc/Irr	43.5	-
4548	4.5	3.5	4.5	3.5	4.5	3.5	SBb	38.9	11.9
4552	2.1	2	2	2	2.05	2	S0	12.7	11.3
4567	1.8	1.2	1.8	1	1.8	1.1	Sa	52.3	-
4569	8.5	2.5	8	2.5	8.25	2.5	Sb	72.4	11.2
4608	1.8	1.5	1.8	1.5	1.8	1.5	Sba	33.6	-
4621	2.5	1.5	2.3	1.4	2.4	1.45	E5		-

**Tab. 2:** Unsere Messung der beiden Halbachsen, der Helligkeit und der Neigung. Man erkennt, dass die großen Halbachsen bei den Elliptischen und den S0-Galaxien zwischen 1 und 4,5, bei den Spiralgalaxien hingegen zwischen 2 und 8,25

schwanken.

Zwischen diesen Galaxien haben wir auch unterschieden als wir den Zusammenhang zwischen der Helligkeit der Galaxien und dem Logarithmus des Durchmessers aufgetragen haben.

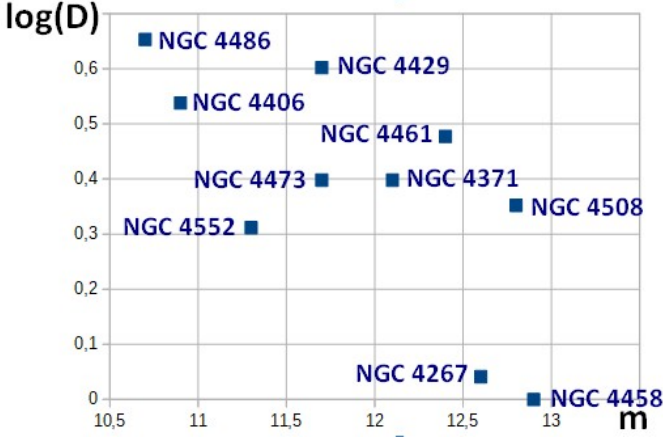


Abb. 3: Die Elliptischen und S0-Galaxien aus Tabelle 2.

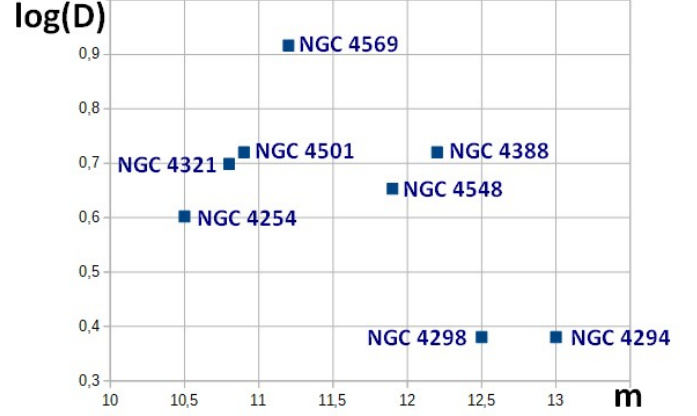


Abb. 4: Die Spiralgalaxien aus Tabelle 2.

#### 4. Flächenhelligkeit

Die Flächenhelligkeit einer Galaxie  $\sigma_G$  ist die durchschnittliche Helligkeit einer Galaxie pro Fläche, wobei man als Fläche einen Kreis mit dem Durchmesser  $D_{25}$  annimmt (bei Scheibengalaxien ist das eine gute Näherung, weil die Exzentrizität hauptsächlich durch die Neigung zu Stande kommt).

$$A = r^2 \pi = \left(\frac{D_{25}}{2}\right)^2 \pi \quad (3)$$

Da das Auge die Helligkeit logarithmisch wahrnimmt, ist die Magnitude logarithmisch definiert. Diese Definition führt auf den Rest der Formel

$$\sigma_G = m + 2.5 \log(A) \quad (4)$$

Die Helligkeit in diesem Bereich ist jedoch nicht ausschließlich auf die Galaxien zurückzuführen: In den Teilen des Himmels, wo sich keine sichtbaren Galaxien befinden, kommt man auf eine durchschnittliche Helligkeit von  $\sigma_H = 21.6 \frac{\text{mag}}{\text{arcmin}^2}$ . Diese Helligkeit wird von der kosmischen Hintergrundstrahlung und von Galaxien die auf der Aufnahme so klein sind, dass sie nicht als solche erkennbar sind, ausgelöst.

Da die Abstände der Sterne in der Galaxie sehr groß sind, geht fast die gesamte Helligkeit des Himmels durch die Galaxie durch, sodass man den Wert  $\sigma_H$  in guter Näherung vollständig von  $\sigma_G$  abgezogen werden kann.

Um den Anteil des Strahlungsflusses der Galaxie  $F_G$  am Strahlungsfluss des Himmels  $F_H$  zu berechnen, benutzt man die Formel

$$\frac{F_G}{F_H} = 10^{-0.4(\sigma_G - \sigma_H)} \quad (5)$$

Multiplikation mit 100 führt auf den Anteil in Prozent

NGC	m[mag]	$\sigma_G$ [mag/"]	$\sigma_G - \sigma_H$ [mag/"]	$F_G/F_H$ [%]
4486	10.7	23.6	2.0	15.6
4473	11.7	23.6	2.0	16.0
4552	11.3	23.0	1.4	26.6
4461	12.4	23.9	2.3	12.4
4501	10.9	23.7	2.1	14.2
4321	10.8	23.6	2.0	15.6
4371	12.1	23.7	2.1	14.7
4548	11.9	24.2	2.6	9.2
4284	13.0	24.1	2.5	10.1

**Tab. 3:** Die Werte für Helligkeit, Flächenhelligkeit und  $F_G/F_H$  in unserer Übungsgruppe. Man erkennt dass die Flächenhelligkeit der Galaxien zwischen 23 und 24.2 Magnituden schwankt und damit nur um 1.4 - 2.6 Magnituden heller als die Flächenhelligkeit des Himmels von 21.6 Magnituden ist. Das liegt daran, dass der Großteil der Galaxie auch innerhalb  $D_{25}$  sehr leuchtschwach ist und nur die verhältnismäßig kleine Fläche ganz in der Mitte hell ist.

Beispielsweise war die Galaxie NGC 4486 nur innerhalb eines Radius von 2,5mm hell genug um für uns mit freiem Auge erkennbar zu sein, der Wert  $D_{25}$  beträgt aber 7,2mm. Einsetzen in die Flächenformel ergibt, dass die für uns sichtbare Fläche weniger als ein Achtel der Gesamtfläche beträgt.

Außerdem kommt bei geneigten Galaxien hinzu, dass man schräg durch die Ebene durchschaut und dadurch mehr Sterne sieht, als wenn man von oben oder unten auf die Galaxie schaut. Die Rechnung berechnet aber die Helligkeit, wenn man von oben bzw. unten draufschauen würde, indem man die Helligkeit auf eine kreisförmige Scheibe verteilt. (Die Anzahl der Sterne die beim schräg durchschauen hintereinanderstehen und sich dadurch verdecken ist vernachlässigbar.)

## 5. Entfernungbestimmung

Galaxien eignen sich um auf einige unterschiedliche Arten die Entfernung abzuschätzen. Das ist dann nötig wenn der Galaxiehaufen so nah ist, dass die Eigenbewegung nicht vernachlässigbar im Vergleich zum Hubble-Lemaître-Gesetz ist und zu wenige Cepheiden im Galaxiehaufen vorhanden sind (wenn nicht mehrere Cepheiden mit ähnlicher Entfernung sichtbar sind, erkennt man nicht, ob und welche Cepheiden in Blickrichtung vor oder hinter dem Galaxiehaufen stehen.)

In großen Galaxiehaufen wie Virgo und Abell 1060 befinden sich so viele Galaxien, dass sich statistische Ausreißer wegwürzen und die Galaxien im Durchschnitt ungefähr gleich groß und hell sind. Dennoch ist es keine gute Idee, den Durchschnitt aller Galaxien des Haufens zu nehmen, denn mit zunehmender Entfernung werden immer größere und hellere Galaxien auf der Aufnahme so klein und leuchtschwach, dass sie nicht mehr als solche erkennbar sind und somit nicht in den Mittelwert einfließen.

Um dieses Problem zu umgehen, nimmt man nur die Top X Galaxien in den Durchschnitt auf (je höher die Anzahl X, desto genauer ist das Ergebnis). Man sollte immer für beide Haufen den selben Wert X nehmen, weil wenn man in einem Haufen mehr Galaxien nimmt, gehen in diesen Haufen die kleineren bzw. leuchtschwächeren Galaxien stärker ins Ergebnis ein.

Galaxie	$d_1$ [mm]	$d_2$ [mm]	Typ	m[mag]	$v_{rad}$ [m/s]
NGC 3285A	1	1	Sb	14	-
NGC 3285	1,2	1,4	Sa	13.2	3049
NGC 3285B	1	1	Sa	14	2868
NGC 3305	0.4	0.4	E0	14	4568
NGC 3307	0.5	0.5	S0	16	3616
NGC 3308	0.5	0.5	E1	13	3687
NGC 3309	1.2	1.1	E0	12.7	3801
NGC 3311	3.1	2.6	Sa	13	3575
IC 629B	0.3	0.3	E5	16	2461
NGC 3312	0.5	0.8	Sb	13.1	2512
NGC 3314	1.1	1	Sa	14	2635
NGC 3315	0.4	0.6	E6	15	4555
NGC 3316	0.5	0.5	S0	15	3752
IC 2597	0.8	0.8	E3	13	2738
NGC 3336	1.6	1.6	Sb	13	3689

**Tab. 4:** In dieser Tabelle haben wir unsere Messwerte der markantesten Galaxien aus Abell 1060 eingetragen, um die größten und hellsten herauszufinden. Für den Virgohaufen haben wir dafür die Tabelle aus dem Abschnitt Durchmesser der Galaxie verwendet.

NGC	$d_\odot$ [mm]	m[mag]
4458	1	12.9
4503	2.25	12.8
4267	1.1	12.6
$\odot 3$	1.45	12.8
4461	3	12.4
4429	4	11.7
$\odot 5$	2.27	12.48

NGC	$d_\odot$ [mm]	m[mag]
4294	2.4	13.0
4298	2.4	12.5
4388	5.25	12.2
$\odot 3$	3.35	12.6
4371	2.5	12.1
4548	4	11.9
$\odot 5$	3.31	12.3

**Tab. 5:** Die hellsten Elliptischen und S0-Galaxien im Virgohaufen

**Tab. 6:** Die hellsten Spiralgalaxien im Virgohaufen

NGC	$d_{\odot}[\text{mm}]$	$m[\text{mag}]$
3307	0.5	16
IC 629B	0.3	16
3315/3316	0.5	15
$\odot 3$	0.4	15.7
3305	0.4	14
$\odot 5$	0.45	15.2

**Tab. 7:** Die hellsten Elliptischen und S0-Galaxien in Abell 1060. In der Spalte NGC ist eine Galaxie nach dem Index-Katalog (IC) eingetragen, weil diese nicht im New General Catalogue vorkommt.

NGC	$d_{\odot}[\text{mm}]$	$m[\text{mag}]$
3285A	1	14
3285B	1	14
3285	1.3	13.2
$\odot 3$	1.1	13.7
3312	0.65	13.1
3336/3311	1.6/2.85	13
$\odot 5$	1.1/1.6	13.4

**Tab. 8:** Die hellsten Spiralgalaxien in Abell 1060

NGC 3315 und NGC 3316 sind innerhalb unserer Messgenauigkeit gleich hell. Um in beiden Galaxien nur die 3 hellsten Galaxien zu verwenden, ist der gemeinsame Helligkeitswert in den Durchschnitt der 3 hellsten Galaxien nur ein mal eingegangen (in den Durchschnitt der 5 hellsten Galaxien natürlich wieder zwei mal). Dasselbe gilt für die Helligkeit von NGC 3336 und 3311, die nur einmal in die 5 hellsten Spiralgalaxien eingeht.

Die absolute Entfernung erhält man indem man den Galaxienhaufen mit einem anderen vergleicht, dessen Entfernung schon mit Cepheiden oder dem Hubble-Lemaître-Gesetz bestimmt wurde.

In unserem Beispiel haben wir sowohl die Helligkeit als auch den Durchmesser und jeweils sowohl die Top 3 als auch die Top 5 verwendet um vier unterschiedliche Abschätzungen der Entfernung zu erhalten und die Genauigkeit dieser mit der Entfernung, die man mit dem Hubble-Lemaître-Gesetz erhält.

Die scheinbare Größe der Galaxien nimmt linear mit der Entfernung ab, folglich gilt die Formel

$$\frac{r_A}{r_V} = \frac{d_V}{d_A} \quad (6)$$

wobei A für Abell 1060, V für den Virgohaufen, d für den Mittelwert des Durchmesser der Top X Galaxien und r für den Abstand zwischen dem Sternhaufen und der Erde steht.

Das Entfernungsverhältnis erhält man aus der durchschnittlichen Helligkeit, indem man die Formel des Entfernungsmoduls nach dem Radius umformt

$$r = 10\text{pc} \times 10^{0.2(m-M)} \quad (7)$$

Die Subtraktion in der Potenz wird zu einer Division unten:

$$r = 10\text{pc} \times \frac{10^{0.2m}}{10^{0.2M}} \quad (8)$$

Um das Verhältnis der Entfernungen zu bekommen, muss man die beiden analogen Formeln für den Radius des Virgohaufens und den Radius von Abell 1060 durchdividieren. Dabei fällt nicht nur der Vorfaktor von 10 Parsec sondern auch der Faktor mit der absoluten Helligkeit, die ja im Durchschnitt näherungsweise gleich ist, weg. Nur der Radius und die scheinbare Helligkeit sind unterschiedlich.

$$\frac{r_A}{r_V} = \frac{10^{(0.2m_A)}}{10^{(0.2m_V)}} \quad (9)$$

Zum Schluß verwenden wir die aus der Rotverschiebung ermittelbare Radialgeschwindigkeit um die Entfernung laut Hubble-Lemaître-Gesetz zu bestimmen. Das Hubblegesetz lautet  $v_{rad} = rH_0$  wobei die Hubblekonstante  $H_0$  wegfällt, wenn man das Verhältnis der Distanzen berechnet.

$$\frac{r_A}{r_V} = \frac{v_A}{v_V} \quad (10)$$

Hubble-Lemaître-Gesetz	Magnituden					Durchmesser					$\odot$
	E+S0		S+SB		$\odot$	E+S0		S+SB		$\odot$	
	3	5	3	5	5	3	5	3	5	5	
3.71	1.2	1.2	1.08	1.08	1.14	3.2	5.04	5.04	2.36	3.7	2.42

**Tab. 9:** Die Entfernungsabschätzungen im Vergleich. Alle Angaben sind in Megaparsec.

Man erkennt, dass die Abschätzungen sehr weit vom tatsächlichen Wert laut Hubble-Lemaître-Gesetz entfernt sind. Das liegt daran, dass 3 bzw. 5 Galaxien zu wenig sind um statistische Ausreißer auszugleichen. Außerdem fällt auf, dass die Abschätzung über den Durchmesser noch besser als die Abschätzung über die Helligkeit ist.

Selbst der Mittelwert über jene Abschätzungen, die auf 5 Galaxien basieren ist bei der Leuchtkraft sehr ungenau. Beim Durchmesser ist dieser Wert nur um 10 Parsec kleiner als die Entfernung laut Hubble-Lemaître-Gesetz, wobei diese Ungenauigkeit auch aufgrund der Eigenbewegung der Galaxie beim Hubble-Lemaître-Gesetz zu Stande kommen kann.

## 6. Conclusio

Die verwendete Messmethode ist zwar veraltet, weil die modernen Aufnahmen alle im Computer gespeichert und analysiert werden. Dennoch ist die Methode für alte Aufnahmen praktisch. Die Halbachsen können mit Übung etwas genauer gemessen werden. Bei den Rechnungen kommen durch die vielen Näherungen dennoch einige Ungenauigkeiten hinzu.

## References

- [1] Sternwarte Eberfing, [http://www.sternwarte-eberfing.de/Aktuell/2016/Dezember/Dezember% 202016.html](http://www.sternwarte-eberfing.de/Aktuell/2016/Dezember/Dezember%202016.html)
- [2] Sandage, Alain: *Classification and Stellar Content of Galaxies Obtained from Direct Photography*