

## Q12 \* Astrophysik \* Galaxien und ihre Entfernungsbestimmung

Die Entfernungsbestimmung „naher“ Galaxien gelang erstmals 1923 dem Astronom Edwin Hubble mit Hilfe von Cepheiden. Die Astronomin Henrietta Leavitt hatte 1912 an 25 so genannten  $\delta$ -Cepheiden (speziellen Pulsationsveränderlichen) in der Kleinen Magellanwolke (KMW) erkannt, dass deren Pulsationsperiode  $p$  fest mit der scheinbaren Helligkeit verknüpft ist. Da alle Sterne der KMW etwa gleich weit entfernt sind, hängt die absolute Helligkeit und damit die Leuchtkraft dieser  $\delta$ -Cepheiden nur von der Pulsationsdauer  $p$  ab.



Kleine Magellansche Wolke (KMW)

Es gilt die mittlere absolute Helligkeit bzw. Leuchtkraft die Perioden-Helligkeits-Beziehung bzw. die Perioden-Leuchtkraft-Beziehung

$$\overline{M} \approx -1,67 - 2,54 \cdot \lg\left(\frac{p}{1d}\right) \quad \text{bzw.} \quad \overline{L}^* \approx 3,9 \cdot 10^2 \cdot \left(\frac{p}{1d}\right)$$

Da die  $\delta$ -Cepheiden bei einer Periodendauer von einigen Tagen eine sehr große (berechenbare) Leuchtkraft haben, sind sie zur Bestimmung großer Entfernungen bis hin zu etwa 12 Millionen Lichtjahren geeignet.



Andromeda-Galaxie (M31)

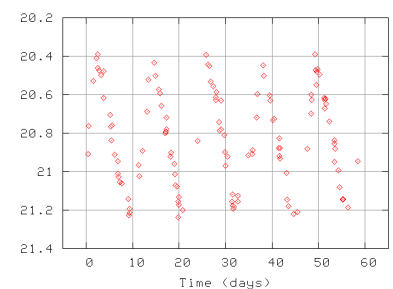
1923 beobachtete Hubble einen  $\delta$ -Cepheiden und bestimmte durch Messungen dessen zugehörige Lichtkurve. Damit konnte er zeigen, dass der Andromedanebel mehr als eine Million Lichtjahre entfernt ist und deshalb kein Objekt innerhalb unserer Milchstraße sein kann.

### 1. Aufgabe

Das Bild zeigt die Lichtkurve eines  $\delta$ -Cepheiden einer nahen Galaxie. Ermitteln Sie aus der Lichtkurve die Periodenlänge und die mittlere scheinbare Helligkeit und schätzen Sie dann die Entfernung dieser Galaxie ab.

Für größere Entfernungen benötigt man „hellere Standardkerzen“. Hierzu benutzt man die absolute Helligkeit einer Supernova Ia, die immer in etwa den gleichen Wert von  $m = -19,6 \pm 0,2$  Größenordnungen hat.

Lichtkurve eines  $\delta$ -Cepheiden in M31



### 2. Aufgabe

- Die Supernova in der Galaxie NGC 4526 aus dem Jahr 1994 erreichte eine scheinbare Helligkeit von 11,8. Wie weit ist die Galaxie NGC 4526 entfernt?
- Große Teleskope erkennen noch Objekte 22. Größe, moderne Astrofotografie reicht bis zur 25. Größe, was etwa einer Kerzenflamme auf dem Mond entspricht. Bis zu welchem Abstand kann man mit einem großen Teleskop die Entfernung von Galaxien mit Hilfe von Supernovae des Typs Ia abschätzen?

### Galaxienflucht und Hubblekonstante

Das Spektrum einer Galaxie enthält neben dem Kontinuum insbesondere Fraunhoferlinien H und K des einfach ionisierten Kalziums, die von den Sternen der Galaxie stammen. Hubble bestimmte viele Galaxienentfernungen und zusätzlich auch die jeweilige Radialgeschwindigkeit. Dabei stellte er fest, dass nur wenige nahe Galaxien (wie z.B. Andromeda M31) sich unserer Milchstraße nähern. Alle weiter entfernten Galaxien aber weisen eine Rotverschiebung der Fraunhoferschen Linien auf. Dabei gilt ein linearer Zusammenhang zwischen der Radialgeschwindigkeit  $v_{\text{rad}}$  und der Entfernung  $r$ .

Je weiter die Galaxie entfernt ist, umso größer ist die Radialgeschwindigkeit.

Der Proportionalitätsfaktor heißt Hubble-Konstante  $H_0$ , auch wenn  $H_0$  sich in astronomischen Zeitskalen ändert.

Der Wert von  $H_0$  wurde in den letzten Jahren immer genauer ermittelt. Heute nimmt man  $72 \pm 8 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$  an.

**Hubblebeziehung:**  $v_{\text{rad}} = H_0 \cdot r$  mit  $72 \pm 8 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$

### 3. Aufgabe

Im Spektrum einer hellen Galaxie des Galaxienhaufens Ursa Mayor II beobachtet man eine Rotverschiebung

$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = 0,13$ . Ermitteln Sie daraus mit der Hubblebeziehung die Entfernung des Galaxienhaufens.

## Galaxienhaufen

Unsere Milchstraße bildet zusammen mit etwa 40 weiteren Galaxien die so genannte „Lokale Gruppe“.

Mit weiteren Gruppen bilden wir den Virgo-Superhaufen, in dessen Zentrum der Virgo-Haufen liegt.

Der Virgo-Superhaufen enthält etwa 1300 Galaxien. Es gibt viele dieser Superhaufen, die sich schaum- oder wabenartig im Raum verteilen. Die Galaxien gruppieren sich in Haufen um riesige Leerräume und bilden auf diese Art die Wände der Waben.



## Quasare (Quasistellare Objekte)

1963 entdeckte man auf Fotoplatten Objekte, die punktförmig wie Sterne aussehen aber ein Spektrum mit schwachem Kontinuum und breiten Emissionslinien besitzen, wie man es bei keinem Stern kennt. Zusätzlich zeigen Quasare Rotverschiebungen mit Werten, die bisweilen sogar größer als 1 sind.

(Hinweis: Hier gilt für  $z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda}$  nicht mehr  $\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{v_{rad}}{c}$ , sondern es muss relativistisch gerechnet werden.)

Große Rotverschiebung  $z$  bedeutet sehr große Entfernung, und deshalb handelt es sich bei Quasaren um extrem leuchtkräftige Objekte, die 1000-mal heller als eine große Galaxie leuchten. Die Leuchtkraft der Quasare ändert sich häufig in Zeiträumen von nur Wochen oder Tagen, d.h. die Ausdehnung dieser Quasare kann höchstens Lichttage betragen.

Heute vermutet man, dass Quasare supermassereiche Schwarze Löcher im Zentrum von Galaxien sind. Stürzt Materie über eine Akkretionsscheibe in dieses Schwarze Loch, so wird ein großer Teil der Gravitationsenergie in Form von Strahlung frei. Besitzt die Akkretionsscheibe ein starkes Magnetfeld, so treten senkrecht zu dieser Materieströme – so genannte Jets – mit relativistischer Geschwindigkeit in den Weltraum (siehe Bild). Diese Jets lassen sich im Radiowellenbereich beobachten.

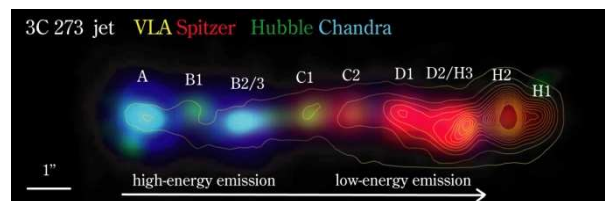


## Aufgabe

Der Jet des Quasars 3C 273 wurde in unterschiedlichen Wellenlängenbereichen von mehreren Teleskopen aufgenommen.

Ermittelte Daten von 3C 273:

$m = 12,9$  mag, Rotverschiebung  $z = 0,158$



- Wie weit ist 3C 273 entfernt? Rechnen Sie nichtrelativistisch! (Ergebnis: 0,66 Gpc bzw. 2,1 GLj)  
Die relativistische Rechnung liefert 0,61 Gpc. Wie groß ist der prozentuale Fehler? (Ergebnis: 8%)
- Wie groß ist bei Verwendung der relativistischen Entfernungsberechnung die absolute Helligkeit dieses Quasars? Bestimmen Sie die Leuchtkraft von 3C 273 in Vielfachen der Sonnenleuchtkraft!  
(Ergebnis: - 26 Mag;  $2 \cdot 10^{12} L_{\odot}$ )

## Zusammenfassung astronomischer Entfernungsbestimmungen

Methode	Entfernung	Anwendungsbereich
Radar	bis 5 Lh	Sonnensystem
Parallaxe	bis 300 Lj	nahe Sterne, Erstellen des HRD
Spektrum	bis 1,5 kLj	ferne Sterne in unserer Milchstraße
$\delta$ -Cepheiden	bis 45 kLj	ferne Sterne in unserer Milchstraße, Galaxien der lokalen Gruppe
Supernovae Ia	45 kLj bis 300 MLj	Galaxien der lokalen Gruppe und weitere Galaxien
Hubblegesetz	300 MLj bis 10 Mrd.Lj	fernere Universum