



## Allgemeine Regeln

- Die Bearbeitungszeit der Klausur beträgt *eine Stunde* (60 Minuten).
- Außer eines Taschenrechners sind *keine Hilfsmittel* erlaubt.
- *Alle Fragen sind zu bearbeiten.*
- Die maximal erreichbare Punktzahl beträgt **50 Punkte**.
- Schreiben Sie *ausschließlich* in die schwarz umrahmten Kästen. Am Ende der Klausur befindet sich zusätzlicher Raum, sollte der vorgegebene Platz nicht ausreichen.

## Nützliche Konstanten und Formeln

|                            |  |
|----------------------------|--|
| Astronomische Einheit      | $1 \text{ AU} = 150 \times 10^6 \text{ km} = 1.5 \times 10^{11} \text{ m}$ |
| Parsec                     | $1 \text{ pc} = 206265 \text{ AU}$   |
| Jahreslänge                | $1 \text{ Jahr} = 365.25 \text{ Tage}$                                     |
| Tageslänge                 | $1 \text{ Tag} = 86400 \text{ s}$  |
| Stefan-Boltzmann Konstante | $\sigma_{\text{SB}} = 5.7 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$  |
| Gravitationskonstante      | $G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$      |
| Sonnenmasse                | $M_{\odot} = 2 \times 10^{30} \text{ kg}$                                  |
| Sonnenleuchtkraft          | $L_{\odot} = 3.9 \times 10^{26} \text{ J s}^{-1}$                          |
| Lichtgeschwindigkeit       | $c = 300000 \text{ km s}^{-1}$   |

---

Bitte füllen Sie die folgende Information *in Druckbuchstaben* aus und vergessen Sie später nicht, Ihre Matrikelnummer auf den Kopf jeder einzelnen Seite der Klausur zu schreiben!

Name:

---

Matrikelnummer:

---

Studienfach:

---

Semesterzahl:

---

**Frage 1: Normale Galaxien**

- a) Beschreiben Sie, wie die Stärke und die Richtung von Magnetfeldern in Spiralgalaxien gemessen werden kann. .... (3 Punkte)

*Lösung:*

Mit Hilfe von Radiobeobachtungen der Synchrotronstrahlung von Spiralgalaxien {1}. Die Polarisationsrichtung der Strahlung ist ein Mass für die Richtung der Magnetfelder {1}, aus der Spektralform kann die Stärke bestimmt werden {1}.

*Gesamt vergeben: 3*

- b) Warum ist der Nachweis von molekularem Wasserstoff so schwierig? Wie wird daher normalerweise die Masse von Molekülwolken gemessen? .... (4 Punkte)

*Lösung:*

Molekularer Wasserstoff hat aus Symmetriegründen kein permanentes Dipolmoment {1}. Er weist daher keine starken Emissionslinien auf {1}. Daher wird die Masse von Molekülwolken normalerweise mit Hilfe von CO-Linien gemessen {1}, wobei ein an Wolken in der Milchstrasse geeichter Umrechnungsfaktor für die in einer Wolke vorhandene Menge an CO und an H<sub>2</sub> benutzt wird {1}.

*Gesamt vergeben: 4*

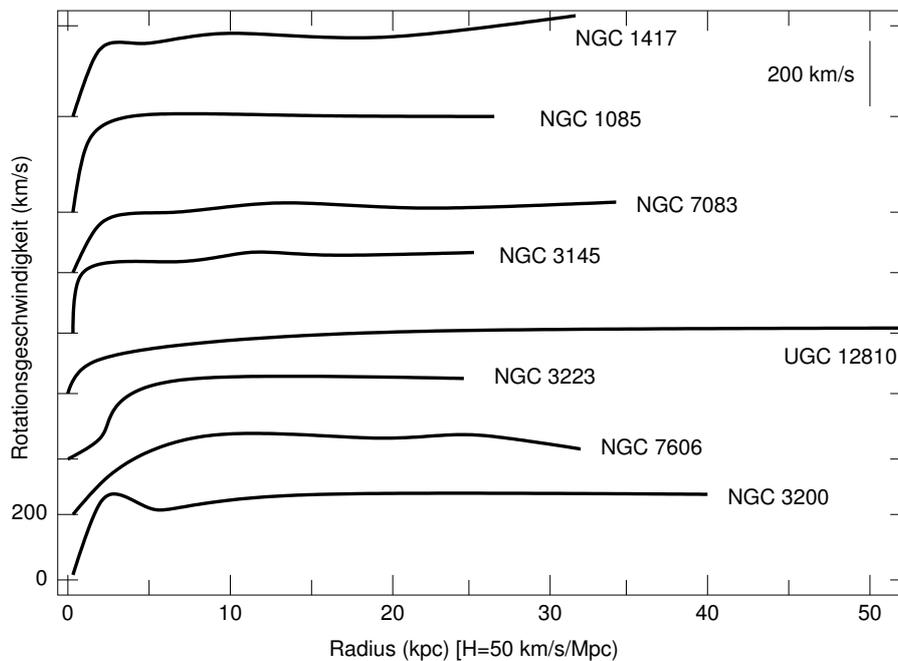
- c) Was ist der Magellan'sche Strom und was ist seine Ursache? .... (2 Punkte)

*Lösung:*

Der Magellan'sche Strom ist eine Ansammlung von Gas und Sternen, die die Milchstrasse und die Magellan'schen Wolken miteinander verbindet {1}. Er ist durch Wechselwirkung dieser Galaxien verursacht {1}.

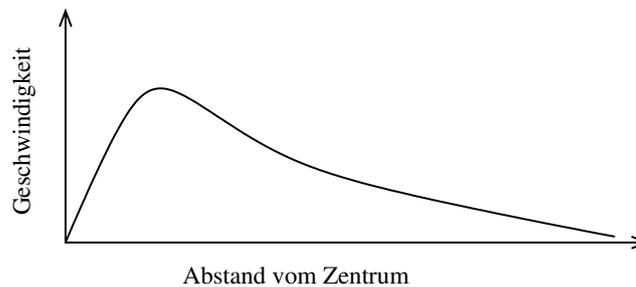
*Gesamt vergeben: 2*

- d) Die folgende Abbildung von Combes et al. (Fig. 3.2) zeigt (inklinationskorrigierte) Rotationskurven einiger Sb-Galaxien.



1. Skizzieren Sie eine Rotationskurve für eine Spiralgalaxie, die nur sichtbare Materie enthält. (3 Punkte)

Lösung:



Achsen {1}, Anstieg {1},  $r^{-1/2}$ -Abfall {1}.

Gesamt vergeben: 3

2. Bestimmen Sie unter Annahme eines typischen Masse-zu-Leuchtkraftverhältnisses für Spiralgalaxien die Leuchtkraft von NGC 3145. .... (6 Punkte)

Lösung:

Aus der Rotationskurve liest man eine Rotationsgeschwindigkeit von ca. 250 km/s ( $= 2.5 \times 10^5 \text{ m s}^{-1}$ , {1}) bei einem Abstand vom Zentrum von 25 kpc ( $= 25 \times 10^3 \cdot 206265 \cdot 1.5 \times 10^{11} \text{ m} = 7.7 \times 10^{20} \text{ m}$ , {1}) ab. Damit ergibt sich eine Masse von

$$\frac{GM(\leq r)}{r^2} = \frac{v_{\text{rot}}^2(r)}{r} \implies M = \frac{rv^2}{G} = 7.2 \times 10^{41} \text{ kg} = 3.6 \times 10^{11} M_{\odot} \quad (\text{s1.1})$$

Dies ist die gesamte gravitierende Masse der Galaxie {2}.

Bei einem typischen Masse-zu-Leuchtkraft-Verhältnis von  $M/L = 15$  {1} ist damit die Leuchtkraft der Galaxie  $2.4 \times 10^{10} L_{\odot}$  {1}.

Gesamt vergeben: 6

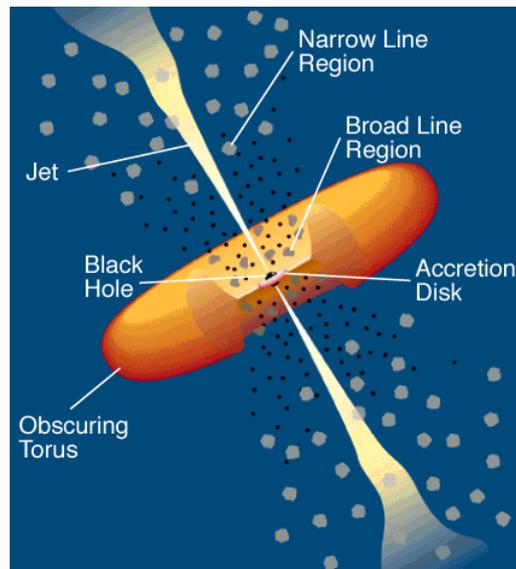
..... Gesamt erreichbar: 18

## Frage 2: Aktive Galaxien

- a) Beschreiben Sie das Standardmodell zum Aufbau von aktiven Galaxienkernen und fertigen Sie eine Skizze der wesentlichen Komponenten an. Erklären Sie auch den Unterschied zwischen verschiedenen AGN Klassen und der Unterscheidung zwischen Typ 1 und Typ 2 AGN (8 Punkte).

*Lösung:*

Komponenten: Schwarzes Loch, Akkretionsscheibe, Broad Line Region, Narrow Line Region, Torus, Jet {3}.



Credit: C.M. Urry and P. Padovani

{2}

Die unterschiedlichen AGN Typen erklären sich im wesentlichen durch eine Variation der Orientierung des Systems (Typ 1/2: kleiner/grosser Sichtwinkel zur Symmetrieachse) {1}, der Leuchtkraft {1} und der An- oder Abwesenheit von Jets (radio laut/leise) {1}.

*Gesamt vergeben: 8*

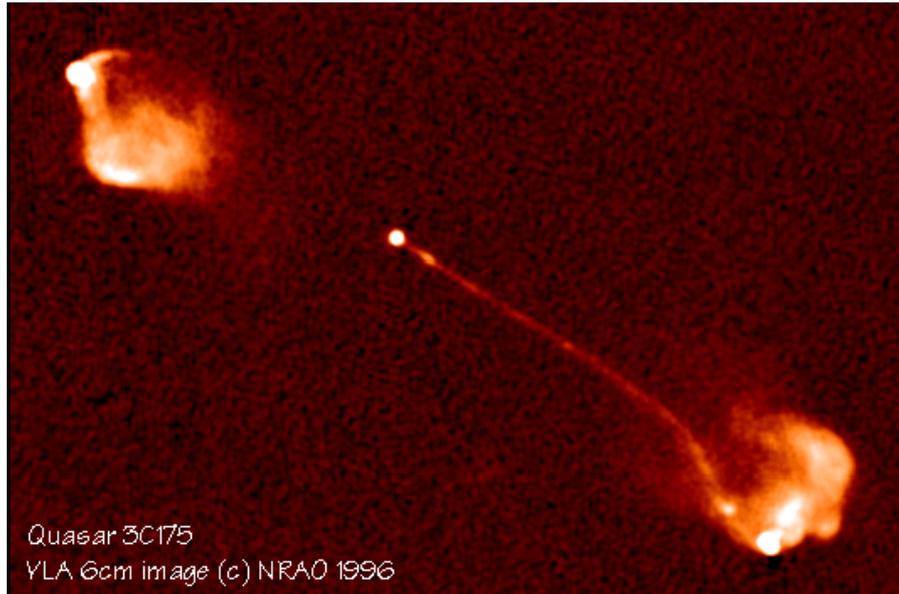
- b) Nennen Sie mindestens zwei Klassifikationsmerkmale extragalaktischer Radioquellen (2 Punkte).

*Lösung:*

Zum Beispiel: Spektrum (steil, flach, peaked), Morphologie (kompakt, ausgedehnt), Leuchtkraft {2}.

*Gesamt vergeben: 2*

c) Die folgende Abbildung zeigt eine VLA Aufnahme der Radiogalaxie 3C 175.



Credit & Copyright: Alan Bridle (NRAO Charlottesville) VLA, NRAO, NSF

Klassifizieren Sie diese Quelle nach dem Schema von Fanaroff & Riley (1974) und begründen Sie Ihre Klassifikation ..... (2 Punkte).

*Lösung:*

Es handelt sich um eine FR II Quelle {1}. Merkmale: Deutliche Hotspots; Jet sichtbar, Counterjet unsichtbar; Helligkeit steigt im Aussenbereich (Lobes) {1}.

*Gesamt vergeben: 2*

d) Warum sind viele AGN Jets einseitig? ..... (2 Punkte)

*Lösung:*

Relativistisches Beaming verstärkt die Helligkeit des Jets (in Bewegungsrichtung) und verringert die Helligkeit des Counterjets (oft bis unter die Nachweisgrenze) {2}.

*Gesamt vergeben: 2*

e) Ein AGN Jet mit einem Winkel  $\theta$  zu unserer Sichtlinie stosse einen "Blob" aus, der sich entlang der Jetachse mit der Geschwindigkeit  $\beta = v/c$  bewege. Im Ruhesystems des Blobs sende er ein Power-Law Spektrum aus:  $F(\nu_{\text{obs}}) \propto \nu^\alpha$  mit einem Spektralindex  $\alpha$ .

Um welchen Faktor unterscheidet sich der beobachtet Fluss gegenüber dem im Ruhesystem ausgesendeten Fluss für  $\beta = 0.5$  und  $\alpha = -0.5$  maximal?

Hinweise:

1) Der relativistische Doppler Faktor ist definiert als

$$D = \frac{1}{\gamma(1 - \beta \cos \theta)} = \frac{\sqrt{1 - \beta^2}}{1 - \beta \cos \theta}$$

mit  $\gamma = (1 - \beta^2)^{-0.5}$ .

2) Der relativistische Doppler Faktor bestimmt die beobachtete Helligkeit des “Blobs” durch

$$F(\nu_{\text{obs}}) = \mathcal{D}^{3-\alpha} F(\nu_{\text{em}}) \quad . \quad (2.1)$$

..... (2 Punkte)

*Lösung:*

Für  $\beta = 0.5$  und  $\alpha = -0.5$  folgt

$$\mathcal{D}_{\text{max}} = \mathcal{D}(\theta = 0) \sim 1.73 \quad .$$

{1}

Der Fluss ändert sich damit maximal um den Faktor  $1.73^{3.5} \sim 6.8$  {1}.

*Gesamt vergeben: 2*

..... Gesamt erreichbar: 16

### Frage 3: Kosmologie

a) Was ist die Tully-Fisher-Relation und wofür wird sie benutzt? ..... (3 Punkte)

*Lösung:*

Die Tully-Fisher-Relation ist eine Beziehung zwischen der Breite der 21 cm-Linie und der Leuchtkraft von Spiralgalaxien {2}. Sie wird zur Entfernungsbestimmung benutzt {1}.

*Gesamt vergeben: 3*

b) Warum ist die Bestimmung der Entfernung zur grossen Magellan’schen Wolke für die Kosmologie von so grosser Bedeutung? ..... (2 Punkte)

*Lösung:*

Die Grosse Magellan’sche Wolke wird für die Kalibration vieler sekundärer Entfernungsindikatoren wie z.B. der Cepheiden benutzt {1}. Fehler in der Entfernungsbestimmung zur LMC haben daher eine direkte Auswirkung auf die Genauigkeit der Entfernungsskala im gesamten Universum {1}.

*Gesamt vergeben: 2*

c) Zeigen Sie, dass für die Energiedichte der Strahlung

$$\rho \propto a^{-4} \quad (3.1)$$

gilt, wo  $a$  der auf die heutige Größe des Universums normierte Skalenfaktor ist. .... (2 Punkte)

*Lösung:*

Bei der Expansion des Universums bleibt die Photonenzahl erhalten, d.h. die Teilchendichte der Photonen ist  $\propto a^{-3}$  {1}. Ferner werden die Photonen rotverschoben, so dass Ihre Energie  $\propto a^{-1}$  sinkt. Damit sinkt die Energiedichte  $\propto a^{-4}$  {1}.

*Gesamt vergeben: 2*

- d) In der Vorlesung hatten wir durch Rotverschiebung des Schwarzkörperspektrums gezeigt, dass  $T(z) = (1+z)T_0$ , wo  $T_0$  die heutige Temperatur der 3K-Strahlung ist. Zeigen Sie, dass diese Beziehung auch aus Gl. 3.1 und dem Stefan-Boltzmann'schen Gesetz hergeleitet werden kann. Warum gilt diese Beziehung auch für Neutrinos? ..... (4 Punkte)

*Lösung:*

Für die Energiedichte aller relativistischer Teilchen (einschliesslich Neutrinos! {1}) gilt {1}

$$\rho = \sigma T^4 \quad (\text{s3.1})$$

wo  $\sigma$  eine Konstante ist. Da ferner mit Gl. 3.1

$$\rho R^4 = \rho_0 R_0^4 \quad \rho = \rho_0 \left(\frac{R_0}{R}\right)^4 \quad (\text{s3.2})$$

ergibt sich {1}

$$T = T_0 \left(\frac{R_0}{R}\right) \quad (\text{s3.3})$$

Wegen  $R_0/R = 1+z$  folgt die Behauptung {1}.

**Gesamt vergeben: 4**

- e) Leiten Sie mit Hilfe der Newton'schen Mechanik die Friedmann-Gleichung (Impulsform) her. (5 Punkte)

*Lösung:*

Wir betrachten die Bewegung eines Masselements  $m$  auf einer expandierenden Kugel der Masse  $M$ . Die Masse der Kugel {1}

$$M = \frac{4\pi}{3}(dR)^3 \rho(t) = \frac{4\pi}{3} d^3 \rho_0 \quad (\text{s3.4})$$

bleibt erhalten, für die Dichte gilt {1}

$$\rho(t) = \frac{\rho_0}{R(t)^3} \quad (\text{s3.5})$$

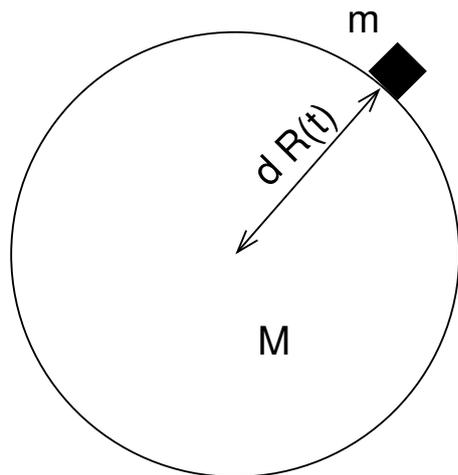
Die Kraft auf  $m$  ist {1}

$$m \frac{d^2}{dt^2}(dR(t)) = -\frac{GMm}{(dR(t))^2} = -\frac{4\pi G}{3} \frac{d\rho_0}{R^2(t)} m \quad (\text{s3.6})$$

Division durch  $m \cdot d$  ergibt dann die Impulsgleichung {2}

$$\ddot{R}(t) = -\frac{4\pi G}{3} \frac{\rho_0}{R(t)^2} = -\frac{4\pi G}{3} \rho(t) R(t) \quad (\text{s3.7})$$

**Gesamt vergeben: 5**



..... Gesamt erreichbar: 16  
 ..... Gesamtpunktzahl Examen: 50