



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	$c = 300000 \text{ km s}^{-1}$
Hubble-Parameter	$H_0 = 71 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$

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: Die Radiogalaxie Cygnus A

Die Radiogalaxie Cygnus A hat eine Radio-Flussdichte von $2.18 \times 10^{-27} \text{ J cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ Hz}^{-1}$ bei einer Frequenz von 10^3 MHz . Die Rotverschiebung der Galaxie ist $z = \Delta\lambda/\lambda = 0.057$.

- a) Bei welcher Frequenz wird die beobachtete Strahlung im Ruhesystem der Quelle ausgesandt? (1 Punkt)

Lösung:

GEAENDERT Es ist $\Delta\lambda/\lambda = \Delta\nu/\nu$. Daher ist $\Delta\nu = 0.057 \cdot 1 \text{ GHz} = 0.057 \text{ GHz} \Rightarrow \nu_{\text{emitted}} = 1.057 \text{ GHz}$ {1}

Gesamt vergeben: 1

- b) Was ist die Entfernung der Quelle? (Angabe in Mpc) (1 Punkt)

Lösung:

Hubble im lokalen Universum: $cz \sim H_0 D \Rightarrow D = cz/H_0 = (300000 \cdot 0.057/71) \text{ Mpc} = 240.8 \text{ Mpc}$ {1}

Gesamt vergeben: 1

- c) Bestimmen Sie Radioleuchtkraft von Cygnus A unter der Annahme, dass das Radiospektrum der Quelle flach ist ($F_\nu \propto \nu^0$) und dass die Breite des Radiobandes $\Delta\nu = 10^4 \text{ Hz}$ ist. (2 Punkte)

Lösung:

$L = 4\pi D^2 S \Delta\nu = 1.52 \cdot 10^{32} \text{ W}$ {2}

Gesamt vergeben: 2

- d) Was ist die *minimale* Menge an Wasserstoff, die notwendig wäre, Cygnus A für 10^8 Jahre bei dieser Leuchtkraft strahlen zu lassen, was ist realistisch, wenn Sie Akkretion als Erzeugungsmechanismus annehmen? (4 Punkte)

Lösung:

Abgestrahlte Energie in 10^8 Jahren: $(86400 \cdot 365.25 \cdot 10^8) \text{ s} \cdot 1.52 \cdot 10^{32} \text{ W} = 4.8 \cdot 10^{47} \text{ J}$. {2}

Fusion produziert $\sim 6 \cdot 10^{11} \text{ J g}^{-1} \Rightarrow$ benötigte Menge: $8 \times 10^{35} \text{ g} = 400M_\odot$. {1}

Fusion ist 0.7 % effektiv, Gravitation kann 10 % erreichen. \Rightarrow benötigte Menge für Akkretion: $\sim 0.07 \cdot 400M_\odot = 28M_\odot$. {1}

Gesamt vergeben: 4

- e) In Cygnus A werden zwei Jets beobachtet, deren Helligkeit sich um den Faktor $R = 12$ unterscheidet. Was ist die Ursache für dieses Phänomen? (2 Punkte)

Lösung:

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

Siehe auch <http://www.pnas.org/content/92/25/11371.full.pdf> für eine Diskussion der Jets von Cygnus A.

Gesamt vergeben: 2

- f) Ein AGN Jet mit einem Winkel θ 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 Potenzgesetzspektrum aus: $F(\nu_{\text{obs}}) \propto \nu^\alpha$ mit einem Spektralindex α . Um welchen Faktor unterscheidet sich der beobachtete Fluss gegenüber dem im Ruhesystem ausgesendeten Fluss für $\beta = 0.5$ und $\alpha = -0.5$ maximal? (6 Punkte)

Hinweise:

- 1) Der relativistische Dopplerfaktor ist definiert als

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

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

- 2) Der relativistische Dopplerfaktor bestimmt die beobachtete Helligkeit des "Blobs" durch

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

Lösung:

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

$$D_{\text{max}} = D(\theta = 0) \sim 1.73 \quad \{3\} \tag{s1.1}$$

Der Fluss ändert sich damit maximal um den Faktor $1.73^{3.5} \sim 6.8 \{3\}$.

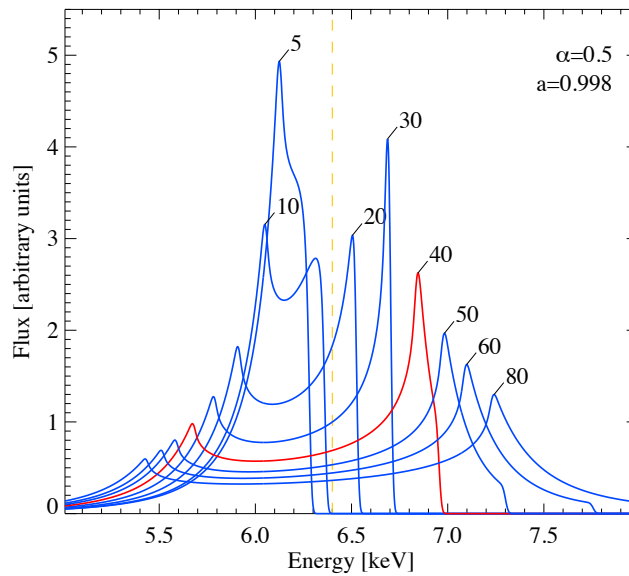
Gesamt vergeben: 6

..... **Gesamt erreichbar: 16**

Frage 2: Linienemission und -diagnostik

- a) Wie ändert sich die Form einer relativistisch verbreiterten Eisenlinie mit der Inklination? (Skizze!) (4 Punkte)

Lösung:



Gesamt vergeben: 0

b) Was lässt sich über die Eigenschaften der Broad Line Region aus der Tatsache schliessen, dass von dieser keine verbotenen Linien beobachtet werden? (3 Punkte)

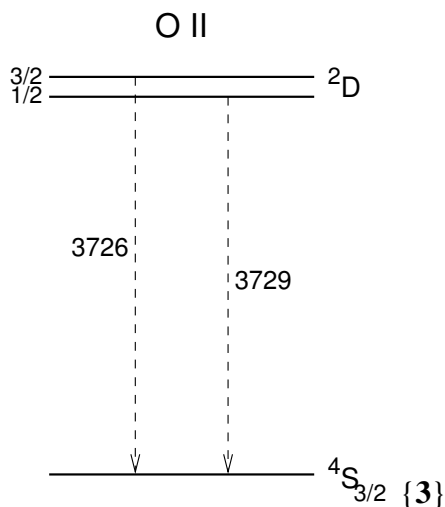
Lösung:

Verbotene Linien können nur von dünnen Plasmen beobachtet werden, da sie aufgrund der kleinen A-Koeffizienten in dichten Plasmen vor radiativer Abregung durch Stöße abgeregt werden. Die BLR hat daher Dichten oberhalb einigen 10^{10} cm^{-3} . {3}

Gesamt vergeben: 3

c) Skizzieren Sie das Energieschema eines Ions, das sich für die Messung der Plasmadichte eignet (3 Punkte).

Lösung:



Gesamt vergeben: 3

- d) Leiten Sie aus den Ratengleichungen eine Formel für die Dichte als Funktion des Verhältnisses der Intensitäten der von dem in der vorherigen Teilaufgabe behandelten Ion ausgesandten Emissionslinien ab. (8 Punkte)
 (Hinweis: $4\pi I_{21} = A_{21}n_2h\nu_{21}$, die kritische Dichte ist $n_{cr,i} = A_{i1}/C_{i1}$ und es gilt $(C_{12}/C_{21} = (g_2/g_1) \exp(-E_{21}/kT)$.)

Lösung:

Ratengleichungen {2}

$$n_1 n_e C_{12} = n_2 A_{21} + n_2 n_e C_{21} \tag{s2.1}$$

$$n_1 n_e C_{13} = n_3 A_{31} + n_3 n_e C_{31} \tag{s2.2}$$

und damit {1}

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{n_e C_{12}}{A_{21} + n_e C_{21}} = \frac{n_e}{A_{21} + n_e C_{21}} \frac{g_2}{g_1} C_{21} \exp(-E_{12}/kT) \tag{s2.3}$$

$$\frac{n_3}{n_1} = \frac{n_e C_{13}}{A_{31} + n_e C_{31}} = \frac{n_e}{A_{31} + n_e C_{31}} \frac{g_3}{g_1} C_{31} \exp(-E_{13}/kT) \tag{s2.4}$$

Wenn die Wolke optisch dünn ist {1}, dann gilt mit $4\pi I_{21} = A_{21}n_2h\nu_{21}$ für das Verhältnis der Linien {2}

$$\frac{I_{21}}{I_{31}} = \frac{A_{21}n_2h\nu_{21}/4\pi}{A_{31}n_3h\nu_{31}/4\pi} = \frac{A_{21}n_2}{A_{31}n_3} \tag{s2.5}$$

da $\nu_{21} \sim \nu_{31}$. Einsetzen von n_2/n_3 aus Eqs. (s2.3) und (s2.4)

$$= \frac{C_{21}}{C_{31}} \frac{g_2}{g_3} \frac{A_{21}}{A_{31}} \frac{A_{31} + n_e C_{31}}{A_{21} + n_e C_{21}} \exp(-E_{32}/kT) \tag{s2.6}$$

$$= \frac{g_2 C_{21}}{g_3 C_{31}} \frac{1 + n_e/n_{Cr,3}}{1 + n_e/n_{Cr,2}} \exp(-E_{32}/kT) \tag{s2.7}$$

{2}

Gesamt vergeben: 8

- e) Mit welchen Beobachtungsmethoden wird die Kinematik der Broad Line Region und ihr Ort bestimmt? Was ist ihre Ionisationsstruktur? (2 Punkte)

Lösung:

Bestimmung der Kinematik und des Ortes mit "Reverberation Mapping", d.h. durch Korrelation von Kontinuumsvariation und Variabilität der breiten Linien {1}. Dabei wird gefunden, dass Linien von Ionen mit höherem Ionisationspotential einen geringeren Lag haben, was einen Hinweis auf strukturierte Ionisation liefert {1}.

Gesamt vergeben: 2

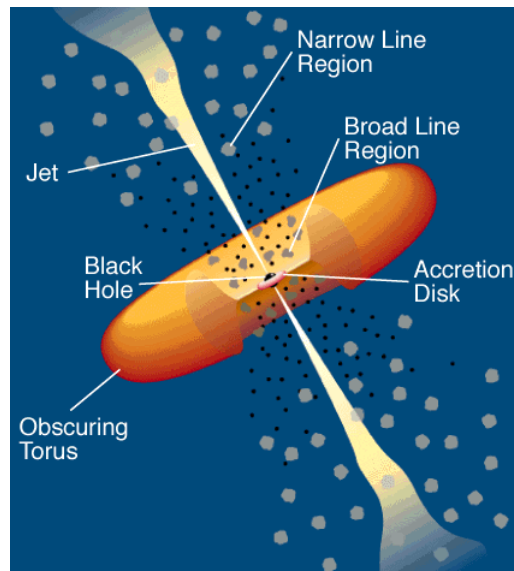
..... **Gesamt erreichbar: 20**

Frage 3: Standardmodell

- 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 (9 Punkte).

Lösung:

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



Credit: C.M. Urry and P. Padovani

{3}

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: 9

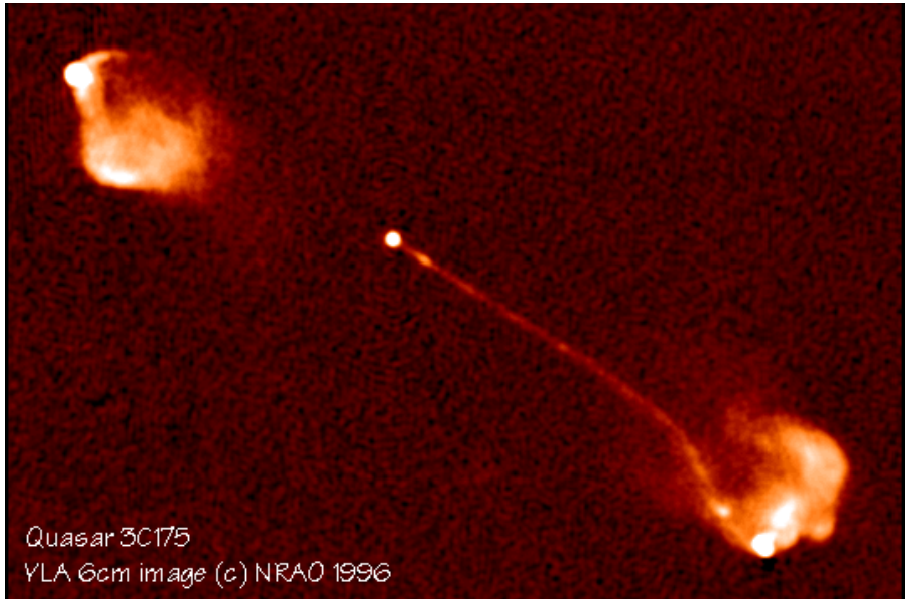
- b) Nennen Sie drei Klassifikationsmerkmale extragalaktischer Radioquellen (3 Punkte).

Lösung:

Spektrum (steil, flach, peaked), Morphologie (kompakt, ausgedehnt), Leuchtkraft {3}.

Gesamt vergeben: 3

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

..... **Gesamt erreichbar: 14**
..... **Gesamtpunktzahl Examen: 50**