~

# Astronomisches Praktikum: Quasare

Versuch 2

Jan Röder & Julia Lienert

## Inhaltsverzeichnis

# 1 Einleitung

Quasare sind die leuchtkräftigsten Objekte im Universum. Nachdem zu Beginn nur Radioquellen bekannt waren, die im optischen aber trotzdem (wie Sterne) punktförmig waren, nannte man sie zunächst “Radiosterne”. Erst mit der Bestimmung ihrer Rotverschiebung wurde klar, dass diese Objekte nur zum Schein stellarer Natur waren, da sie nicht mehr innerhalb der Milchstraße liegen konnten. Danach wurden sie auch “QSOs”, also quasi-stellar objects genannt, mehr dazu in 2.3.
In diesem Versuch werden die Leuchtkraftentfernung zweier Quasare berechnet und außerdem das Phänomen der scheinbaren Überlichtgeschwindigkeit untersucht.

# 2 Die Leuchtkraftentfernung

Die Leuchtkraftentfernung ist definiert als:

$$D_L = \frac{c}{H_0 q_0^2} \left( q_0 z + (q_0 - 1) \left[ \sqrt{1 + 2 q_0 z} - 1 \right] \right) \tag{1}$$

Mit

$$H_0 = 50\,\mathrm{km\,s^{-1}\,Mpc^{-1}}$$
$$q_0 = 0.5$$

Und

$$z(\mathrm{S5\ 0014{+}81}) = 3.4$$
$$V(\mathrm{S5\ 0014{+}81}) = 16\,\mathrm{mag}$$
$$z(\mathrm{3C\ 273}) = 0.158$$

## 2.1 Aufgabe 1

Für die Leuchtkraftentfernung von S5 0014+81 setzt man die gegebene Rotverschiebung in Formel 1 ein. Man erhält $D_L \simeq 27600\,\mathrm{Mpc}$.
Die absolute Helligkeit berechnet sich nach dem Entfernungsmodul:

$$M = V - 5 \log \left( \frac{D_L}{10\,\mathrm{pc}} \right) \tag{2}$$

Damit ergeben sich M $= -31.21\,\mathrm{mag}$. Die Umrechnung in Sonnenleuchtkräfte erfolgt mit

$$\frac{L}{L_\odot} = 10^{-0.4\,(M - M_\odot)} = 2.59 \cdot 10^{14} \tag{3}$$

Eine normale Galaxie hat eine absolute Helligkeit von $-20\,\mathrm{mag}$, bzw. $8.55 \cdot 10^9\,\mathrm{L_\odot}$. Ein Quasar ist also rund $10^5$ mal heller als eine normale Galaxie.

## 2.2 Aufgabe 2

Wenn die Helligkeitsschwankungen in der Größenordnung eines Jahres liegt, und sich das Licht auch durch das vorhandene Medium mit etwa $c$ ausbreitet, dann ist die Größe in etwa gegeben durch $x = ct$. Setzt man ein Jahr ein, so ist die emittierende Region folglich ungefähr ein Lichtjahr groß (fast 63200 AE oder gut 0.3 pc). Eine typische Galaxie misst ca. 100000 Lichtjahre im Durchmesser, das Sonnensystem ca. 65 AE. Die emittierende Region liegt also, was die Größenordnungen betrifft, zwar 6 unterhalb einer Galaxie, aber 3 oberhalb des Sonnensystems.

## 2.3 Aufgabe 3

Es ist nicht möglich, innerhalb eines Lichtjahres durch normale Sterne eine solche Leuchtkraft zu erzeugen. Selbst wenn ein Sternhaufen in dem sehr kleinen emittierenden Gebiet Platz hätte, wäre dieser sehr instabil und würde innerhalb kurzer Zeit zu einem massereichen schwarzen Loch kollabieren. Außerdem könnte er unmöglich Millionen von Sternen auf so engem Raum enthalten.
Das einzige bekannte Objekt, das eine derartige Energiequelle darstellen kann, ist ein aktiver Galaxienkern (AGN). Im Zentrum befindet sich ein schwarzes Loch, eingeschlossen in einen Molekültorus, welcher eine Akkretionsscheibe speist. Wenn Materie auf das schwarze Loch zufällt, heizt sie sich auf, und gravitative Bindungsenergie wird umgesetzt in Strahlungsenergie (Radio- bis Röntgenstrahlung).
Nur 10% der AGNs sind radiolaut; man nennt diesen Anteil der AGNs oder QSOs (quasistellar objects) Quasare (quasi-stellar radio source).
Während man Quasare im optischen Bereich mit einer punktförmigen Quelle am Himmel identifiziert, teilt sich die Struktur im Radiobereich in eine kompakte, zentrale Quelle sowie meist zwei keulenförmige Jets auf.

## 2.4 Aufgabe 4

Die Radiokarte im Anhang enthält mehrere Momentaufnahmen des Quasars 3C 273 und eines Knotens, der sich vom Rest der Quelle entfernt. Die Geschwindigkeit dieses Knotens hat einen Anteil in südlicher und einen in westlicher Richtung:

$$v_S = 0.225\,\frac{\mathrm{mas}}{\mathrm{yr}}$$
$$v_W = 0.901\,\frac{\mathrm{mas}}{\mathrm{yr}}$$

Daraus ergibt sich die Gesamtwinkelgeschwindigkeit von $\mathrm{v_{SW}} = 0.929\,\mathrm{mas/yr}$ bzw. $\mathrm{v_{SW}} = 2.58 \cdot 10^{-7}\,{}^\circ/\mathrm{yr}$.

## 2.5 Aufgabe 5

Mit

$$x = D_L\,\tan(\alpha)$$

erhält man eine Geschwindigkeit von $v_{SW} = 14.438\,c$. $D_L$ wurde wieder mit der gegebenen Rotverschiebung sowie Formel 1 berechnet, und zwar zu $D_L \simeq 982.1\,\mathrm{Mpc}$.

# 3 Scheinbare Überlichtgeschwindigkeit

## 3.1 Aufgabe 1

Die aus der Radiokarte gemessene Geschwindigkeit ist deutlich größer als die Lichtgeschwindigkeit, sie kann somit nicht die reale Geschwindigkeit sein. Der Knoten beginnt sich bei $t_1 = r_0/c$ von der Hauptradioquelle zu lösen. Bei einem Punkt A nach einer Zeit $t_0$ der Bewegung gibt es nun eine Zeitdifferenz zwischen dem Erreichen von A des Knotens und dem Zeitpunkt, zu dem der Beobachter dies mitbekommt. Für den Beobachter kommt der Kern zur Zeit $t_2 = t_0 + (t_0 - vt_0 \cos\theta)/c$ bei Punkt A an. Dabei ist $\Delta x = vt_0 \cos\theta$ die Strecke auf der Sichtlinie Beobachter-Hauptquelle. Der Beobachter misst zwischen dem Ablösen des Kerns und dem Erreichen von A die Zeitdifferenz $\Delta t = t_2 - t_1$. Dies kann man umformen:

$$\begin{aligned}
\Delta t &= t_2 - t_1 \\
&= t_0 + \frac{r_0 - vt_0 \cos\theta}{c} - \frac{r_0}{c} \\
&= t_0 - \frac{\Delta x}{c} \\
&= t_0 - \frac{v}{c} t_0 \cos\theta \\
&= t_0(1 - \beta\cos\theta)
\end{aligned}$$

Mit $\beta = v/c$.

## 3.2 Aufgabe 2

Da $v$ immer kleiner sein muss als $c$ muss $\beta \leq 1$ gelten. Es gibt allerdings eine Scheingeschwindigkeit:

$$\beta_{\text{Schein}} = \frac{\beta \sin\theta}{1 - \beta\cos\theta} \tag{4}$$

Für scheinbare Überlichtgeschwindigkeiten gilt also $\beta_{\text{Schein}} \geq 1$. Das bedeutet dann für $\beta$ und $\theta$:

$$\begin{aligned}
\frac{\beta \sin\theta}{1 - \beta\cos\theta} &\geq 1 \\
\sin\theta + \cos\theta &\geq \frac{1}{\beta} \\
\beta &\geq \frac{1}{\sin\theta + \cos\theta}
\end{aligned}$$

Der Minimalwert der rechten Seite ergibt sich beim Maximum des Nenners, dieses liegt bei $\theta = \pi/4$. Dann gilt $\beta \geq 1/\sqrt{2} \approx 0.707$.

### 3.3 Aufgabe 3

Will man für bestimmte Werte von $\beta$ denjenigen Winkel $\theta$ bestimmen, für den $\beta_{\text{Schein}}$ maximal wird, erhält man die Gleichung

$$\beta_{\text{Schein, max.}} = \frac{\beta}{\sqrt{1-\beta^2}} \tag{5}$$

da dann $\beta = \cos\theta$ und $\sin\theta = \sqrt{1-\beta^2}$.
Für $\beta = 0.99$ ergibt das $\beta_{\text{Schein, max.}} \approx 7$. Dieses Ergebnis liegt bereits in der Größenordnung unseres Ergebnisses. Um fast exakt auf unseren gemessenen Wert als $\beta_{\text{Schein, max.}}$ zu kommen, wäre $\beta \approx 0.9975$.

### 3.4 Aufgabe 4

Die Emission in Jets ist zwar symmetrisch, wir sehen jedoch nur den Teil, der (eher) in unsere Richtung zeigt, da Licht bei derart hohen Emissionsgeschwindigkeiten von Materie bevorzugt in die Emissionsrichtung abgegeben wird. Damit wird Licht des Jets, der vom Beobachter weg zeigt, quasi "von uns weg" emittiert.

## 4 Diskussion

Zunächst wurden Leuchtkraftentfernungen von zwei Quasaren bestimmt, basierend auf einer bestimmten Kosmologie. Durch Vergleich mit Referenzwerten bekam man ein gutes Gefühl für die Größenordnungen.
Der Versuch stellte außerdem heraus, wie durch geometrische Betrachtung von Bewegungen am Himmel scheinbar Geschwindigkeiten entstehen können, die ein Vielfaches der Lichtgeschwindigkeit betragen und wie man diese in reale und vor allem realistische Geschwindigkeiten umrechnet.