

# Aktive Galaxien, Quasare, Schwarze Löcher

Vorlesung an der Universität Potsdam, SoSe 2005.

Dr. Knud Jahnke                      Astrophysikalisches Institut Potsdam,  
Potsdam-Babelsberg, An der Sternwarte 16  
Schwarzschild-Haus (AIP-Neubau), Raum 226  
Telefon: (0331) 7499 310  
email: [kjahnke@aip.de](mailto:kjahnke@aip.de)

Priv.-Doz. Lutz Wisotzki            Astrophysikalisches Institut Potsdam,  
Potsdam-Babelsberg, An der Sternwarte 16  
Schwarzschild-Haus (AIP-Neubau), Raum 223  
Telefon: (0331) 7499 532  
email: [lwisotzki@aip.de](mailto:lwisotzki@aip.de)

Webseite: <http://www.aip.de/~jahnke/lectures/gqs.05>

## Vorläufiges Inhaltsverzeichnis

1. Einführung & phänomenologischer Überblick
2. Schwarze Löcher
3. Akkretion & Akkretionsscheiben
4. Strahlungsprozesse, Jets
5. AGN-Surveys: Ziele, Methoden, Resultate / Multifrequenzstudien
6. Quantitative Spektroskopie von AGN
7. Strukturbestimmung
8. Kosmologische Evolution von Kernaktivität in Galaxien
9. AGN-Muttergalaxien und -Umgebungen; Großräumige Verteilung

## “Aktive Teilnahme”

**Regelmäßige Teilnahme**, aber keine Anwesenheitsliste

**HörerInnen-Vorträge:** Kurzer Vortrag, ca. 10 Minuten, zu Teilthema; Vertiefung, Randthema oder speziellen Aspekt aufarbeiten und darstellen (Folie, Powerpoint)

*Aufwand:* überschaubar, bei  $\geq$  einer Woche Vorlaufzeit

*Material:* selbständig recherchieren im WWW, evtl. AIP-Bibliothek

*mögliche Themen:*

- Was ist die Eddington Akkretionsrate? (zu “Schwarze Löcher / Akkretion”)
- Inverse Comptonstreuung (zu “Strahlungsprozesse”)
- Klassifikation von Radiogalaxien (zu “Jets”)
- Wie funktionieren Röntgenteleskope? (zu “AGN-Surveys”)
- Was sind Lichteomessungen? (zu “Strukturbestimmung”)
- Was ist eine Leuchtkraftfunktion? (zu “Evolution”)
- Sternspektren vs. Galaxienspektren (zu “AGN-Muttergalaxien”)
- Massenbestimmung mit dem 3. Keplerschen Gesetz (zu “AGN-Muttergalaxien”)
- ...

## Vortragsthemen (Vorschläge)

- Eddington Leuchtkraft: aus Ära vor AGN, Akkretion bei Sternen, Eddington accretion, Eddington luminosity, Kräftegleichgewicht, radiales Verhalten der Beschleunigungen
- Inverse Comptonstreuung: inverse Compton scattering, Compton scattering, Thomson scattering, Voraussetzungen, Energiebereich
- Klassifikation von Radiogalaxien: Fanaroff-Riley (FR) Typ I/II, steep-spectrum, flat-spectrum radio galaxies (ssrg, fsrg), Bilder, Morphologien, physikalischer Hintergrund bekannt? Core, jets, lobes
- Wie funktionieren Röntgenteleskope: Chandra, XMM/Newton, ASCA, Constellation-X, Grundprinzip, Unterschied zu optischen Teleskopen, Abbildung, Größe der Photonen-Zählraten?
- Was sind Lichtecho-Messungen: Reverberation-Mapping, Prinzip, benötigt veränderliche AGN-Quelle, Beispiele, Strukturbestimmung (Brad M. Peterson), daraus resultierende Größen für Akkretionsscheibe, Broad Line Region, Narrow Line Region?
- Was ist eine Leuchtkraftfunktion: Luminosity function, Schechterfunktion, charakteristische Leuchtkraft/Magnitude,  $L^*$ ,  $M^*$ , Leuchtkraftfunktion von Galaxien und Quasaren heute
- Sternspektren vs. Galaxienspektren: O, B,..., K-Stern-Spektren, Initial mass function, Überlagerung von Einzelsternen, leuchtkraftgewichtet, Galaxienspektrum, Vergleich mit "typischem" Sternspektrum
- Massenbestimmung mit dem 3. Keplerschen Gesetz: Doppelsterne, Spiralgalaxien, Rotationskurve

I'm scanning all my radars  
well she said she's from a quasar  
forty thousand million light-years away

She's just a cosmic girl  
from another galaxy  
my heart's in zero gravity

*Jamiroquai*, Cosmic girl,  
Travelling without moving, 1999

# 1. Einführung und Überblick

## Historische Einordnung

Entdeckung und Identifikation von aktiven Galaxienkernen über hauptsächlich vier Phänomene:

**Emissionslinienkerne in Galaxien:** Erstmals 1930er Jahre (C. Seyfert) spektroskopische Entdeckung breiter ( $>1000$  km/s)  $H\alpha$  und  $H\beta$ -Emissionslinien in Zentralregionen einiger weniger naher Galaxien, z.B. NGC 4151. Inzwischen werden (meist schwache) aktive Kerne in  $\sim 10\%$  der nahen großen Galaxien gefunden.

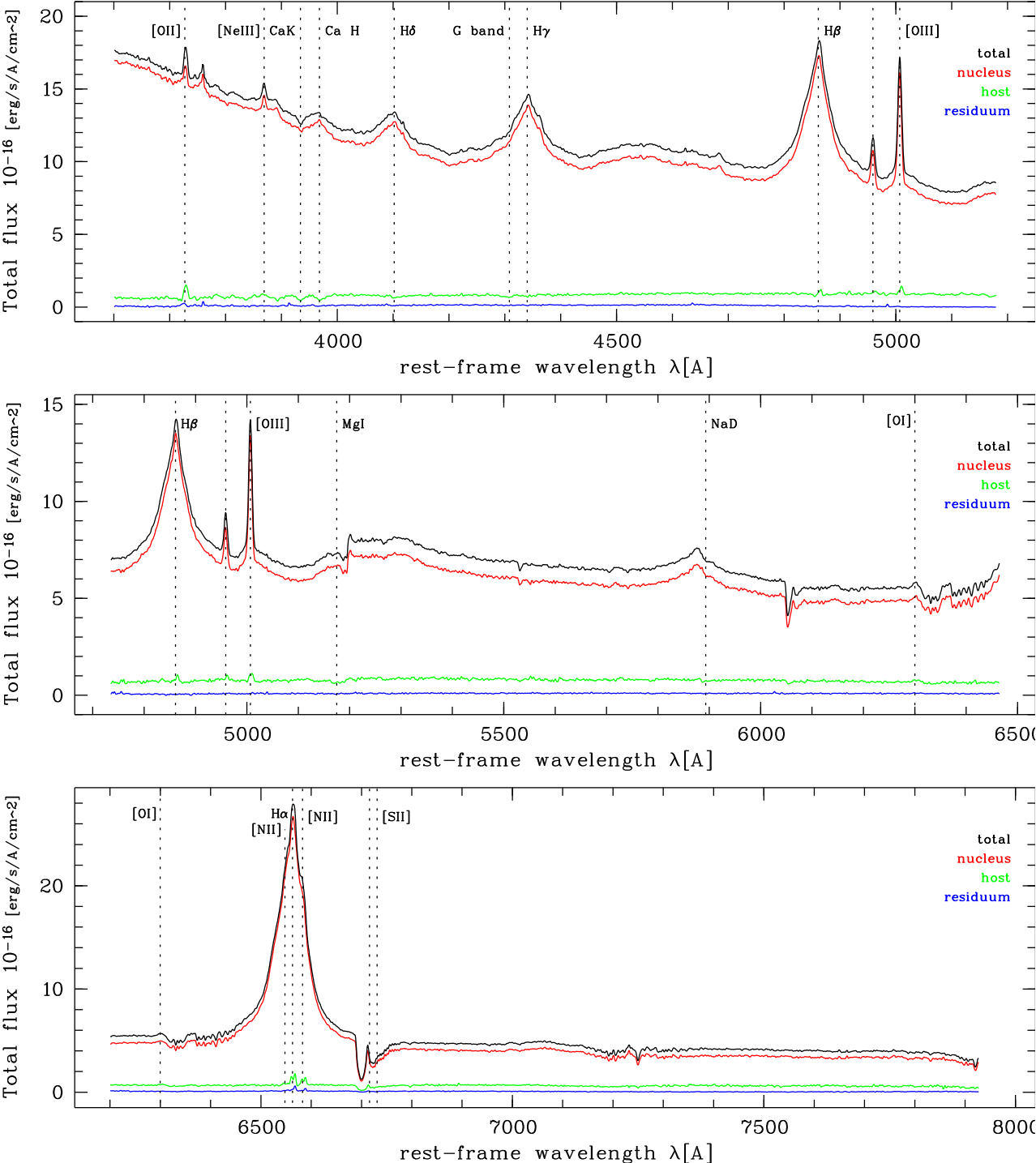
**Radiogalaxien:** Mit Entwicklung der Radioastronomie in 50er Jahren (speziell Interferometrie  $\rightarrow$  genauere Positionen): Ausgedehnte Radioquellen, Strukturen aus Kern + Jet(s) + Halo (*lobes*), ausnahmslos in großen elliptischen Galaxien gelegen.

**Quasare:** Zunächst als quasi-punktförmige Gegenstücke zu einzelnen Radioquellen entdeckt, mit erheblichen Rotverschiebungen (frühe 60er Jahre). Später hauptsächlich als extrem blaue „UV-Exzeß-Objekte“ gefunden, auch wenn keine starke Radiostrahlung nachweisbar ist.

**Extragalaktische Röntgenquellen:** Entdeckung der „Röntgenhintergrundstrahlung“ in 60er Jahren, mit Physik-Nobelpreis 2002 geehrt. Heutige Deutung: mindestens 80 % des Röntgenhintergrunds wird durch aktive Galaxienkerne bei hohen Rotverschiebungen erzeugt.

Diese vier Aspekte sind auch heute die Hauptansätze für systematische Durchmusterungen (*surveys*) nach aktiven Galaxienkernen.

Optisches Spektrum von HE 1503+0228 ( $z = 0.135$ ), K. Jahnke/L. Wisotzki



Gemitteltetes UV-optisches Spektrum (oben), K-Korrektur für verschiedene Filter (unten)

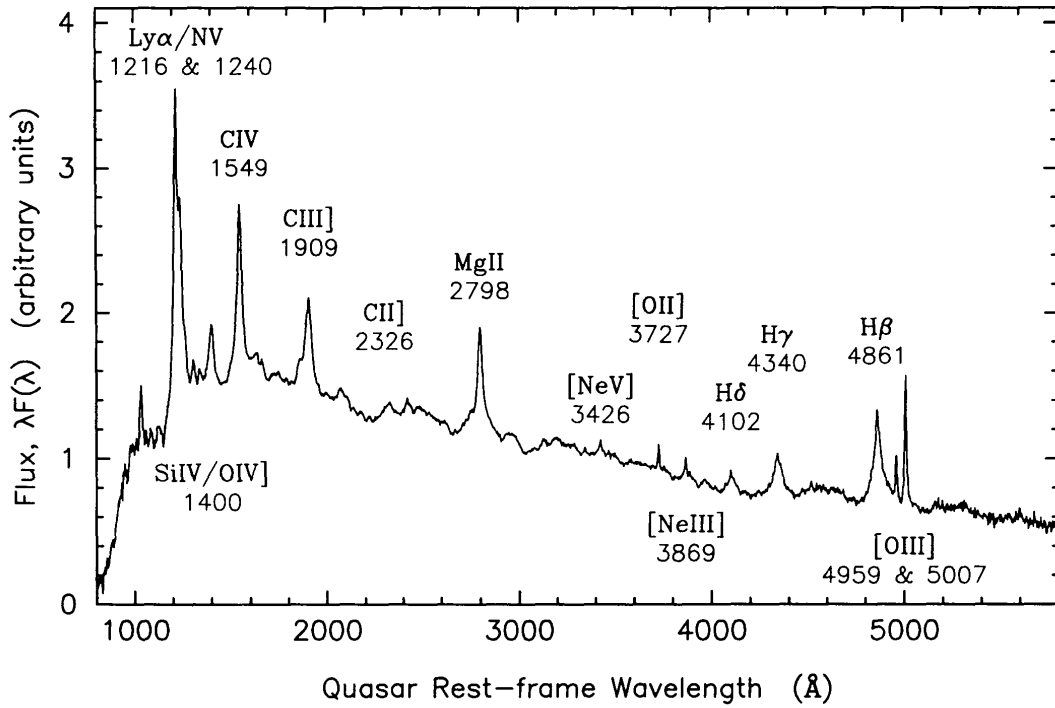
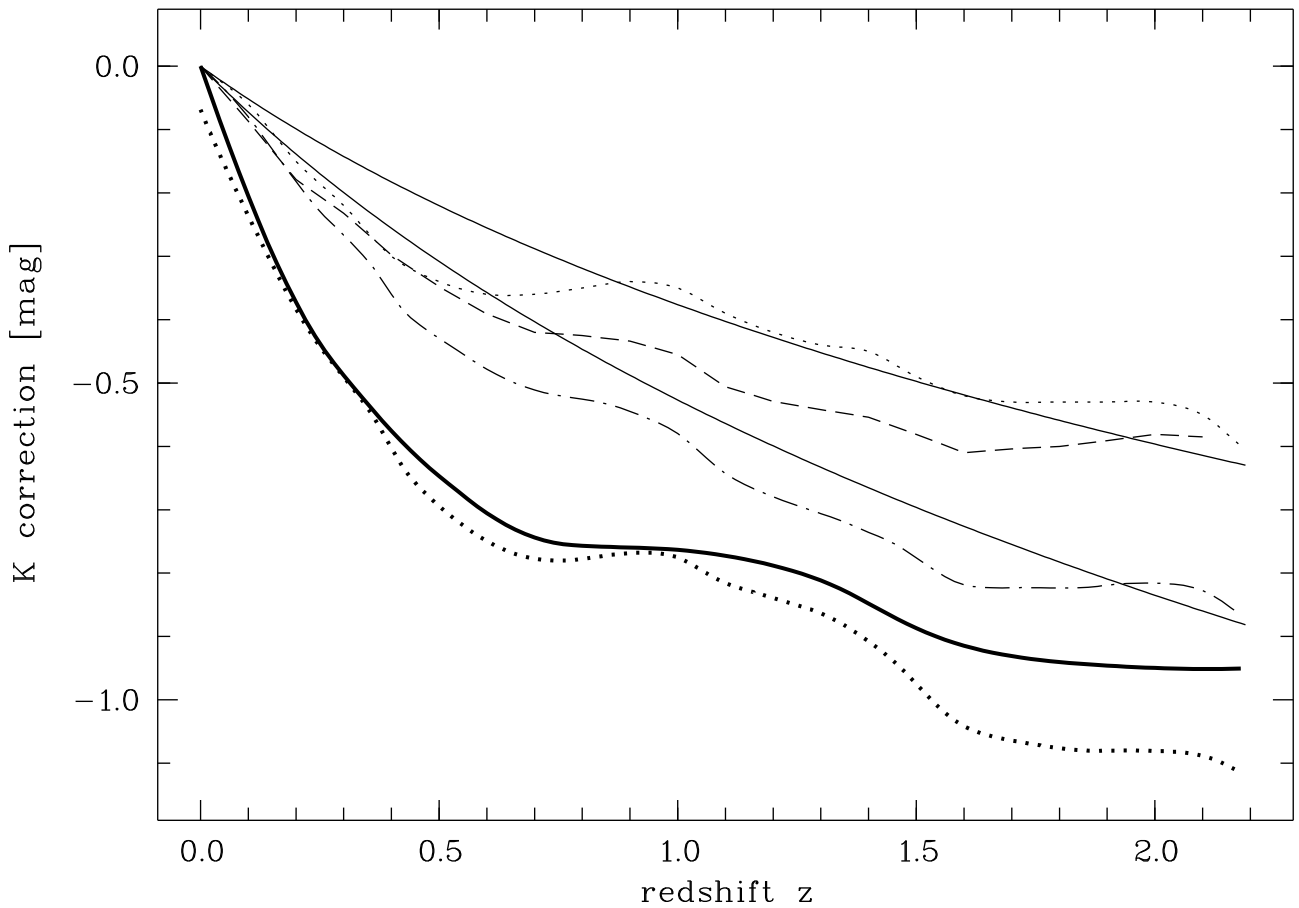
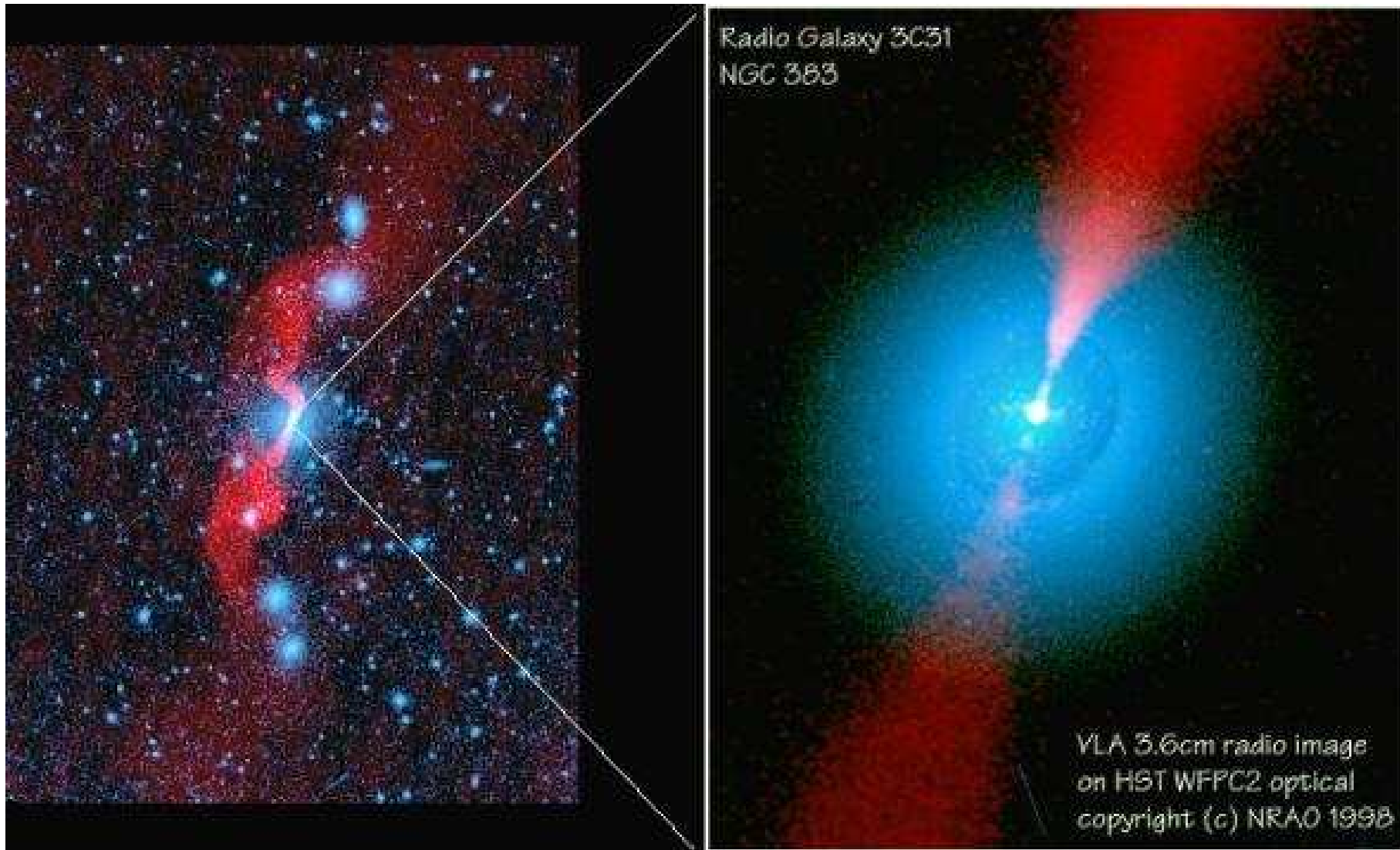


FIG. 2.—Composite spectrum plotted as  $\lambda F(\lambda)$  vs. rest-frame wavelength with the principal emission features identified. The flux scale is in arbitrary units.

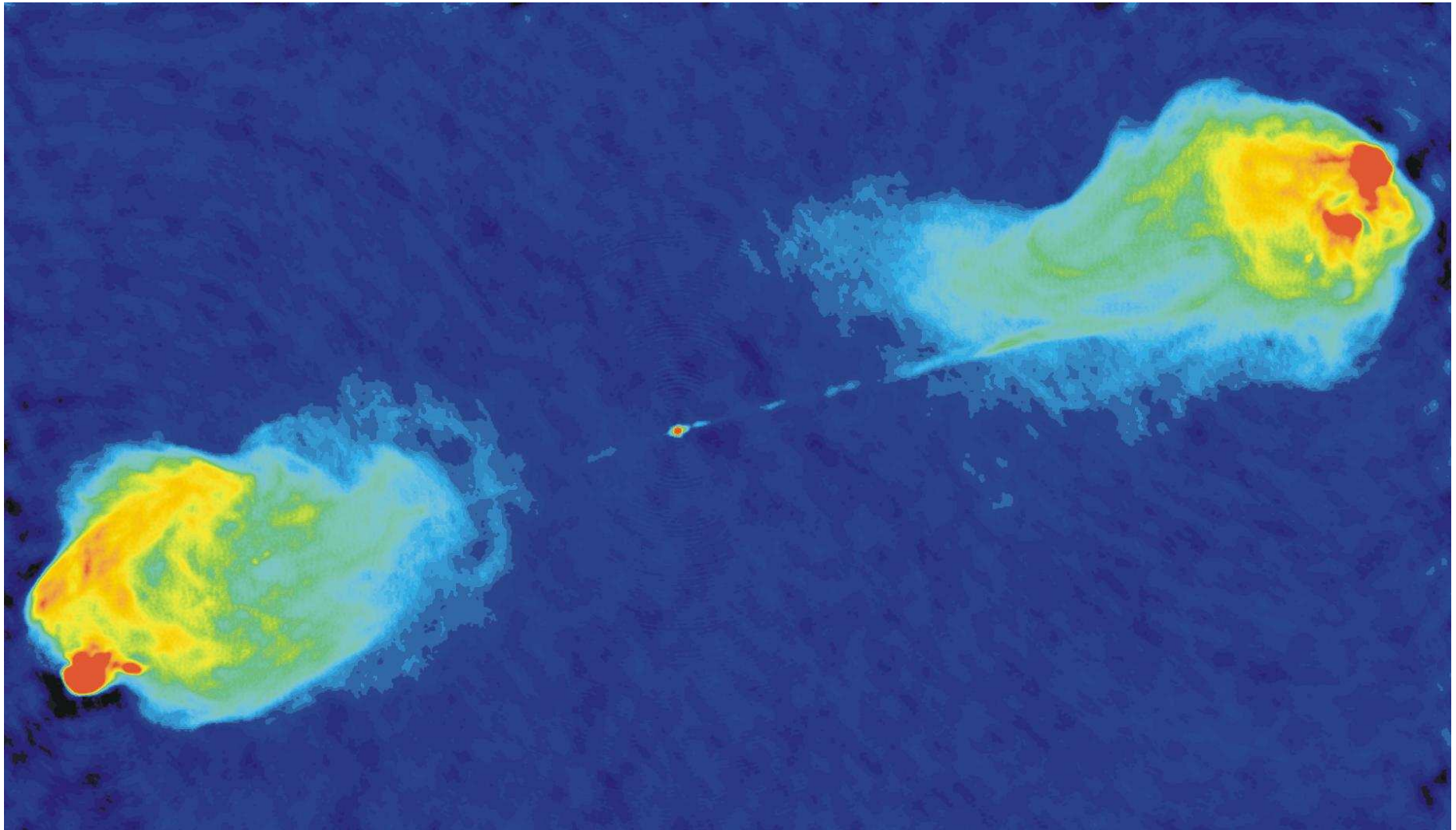


Radiogalaxie 3C31 (NRAO/AUI). Rot: radio, blau: optisch. Jetlänge 300 kpc

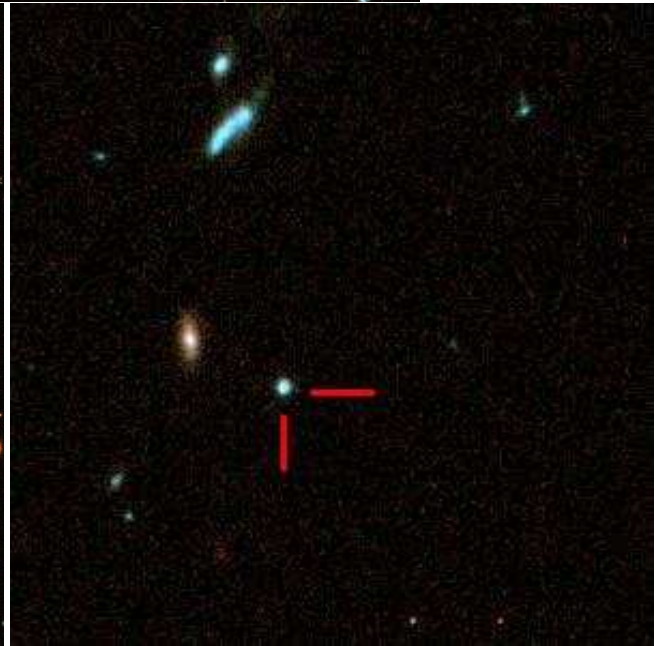




Radiogalaxie Cygnus A (NRAO/AUI)

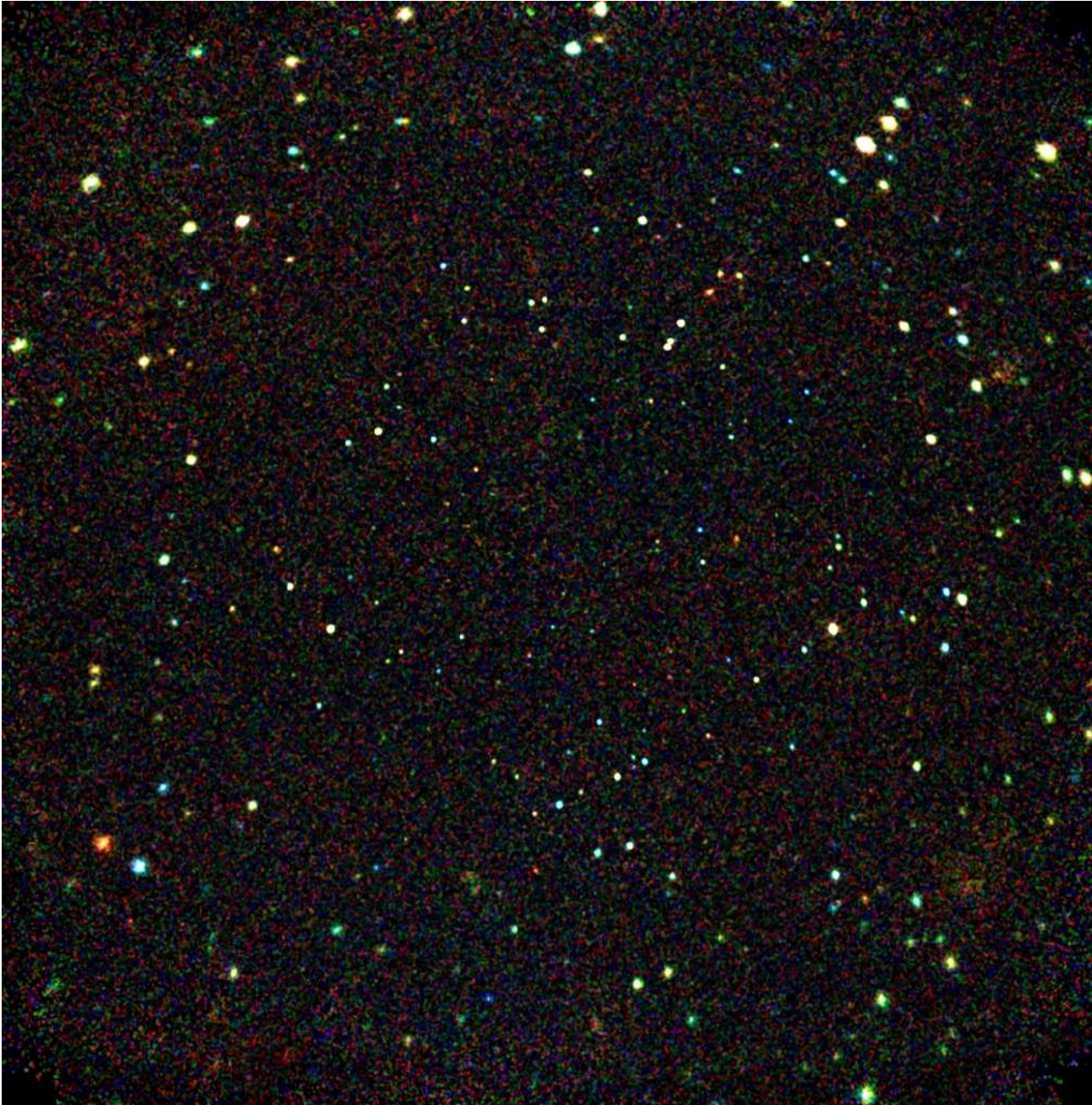


QSO im CDFS, GEMS/COMBO-17 05696,  $z = 2.386$  (Rix et al./Wolf et al.)





CDFS-Feld (CHANDRA, NASA/JHU/AUI/R. Giacconi et al.)



# Phänomenologische Übersicht

Ausprägung von „Kernaktivität“ auf sehr unterschiedlichen Niveaus möglich. Charakteristische Phänomene, deren Auftreten als *hinreichend* für Anwesenheit eines aktiven Kerns gewertet werden kann:

*Breite Emissionslinien:* Linienbreiten zwischen  $\sim 1000$  und  $\sim 20\,000$  km/s (FWHM). Phänomen existiert i.allg. nur für erlaubte Linien (z.B. Rekombinationslinien wie  $H\alpha$ ). Verbotene Linien (z.B.  $[O\ III] \lambda 5007$ ) sind nahezu immer schmal (FWHM  $\lesssim 500$  km/s).

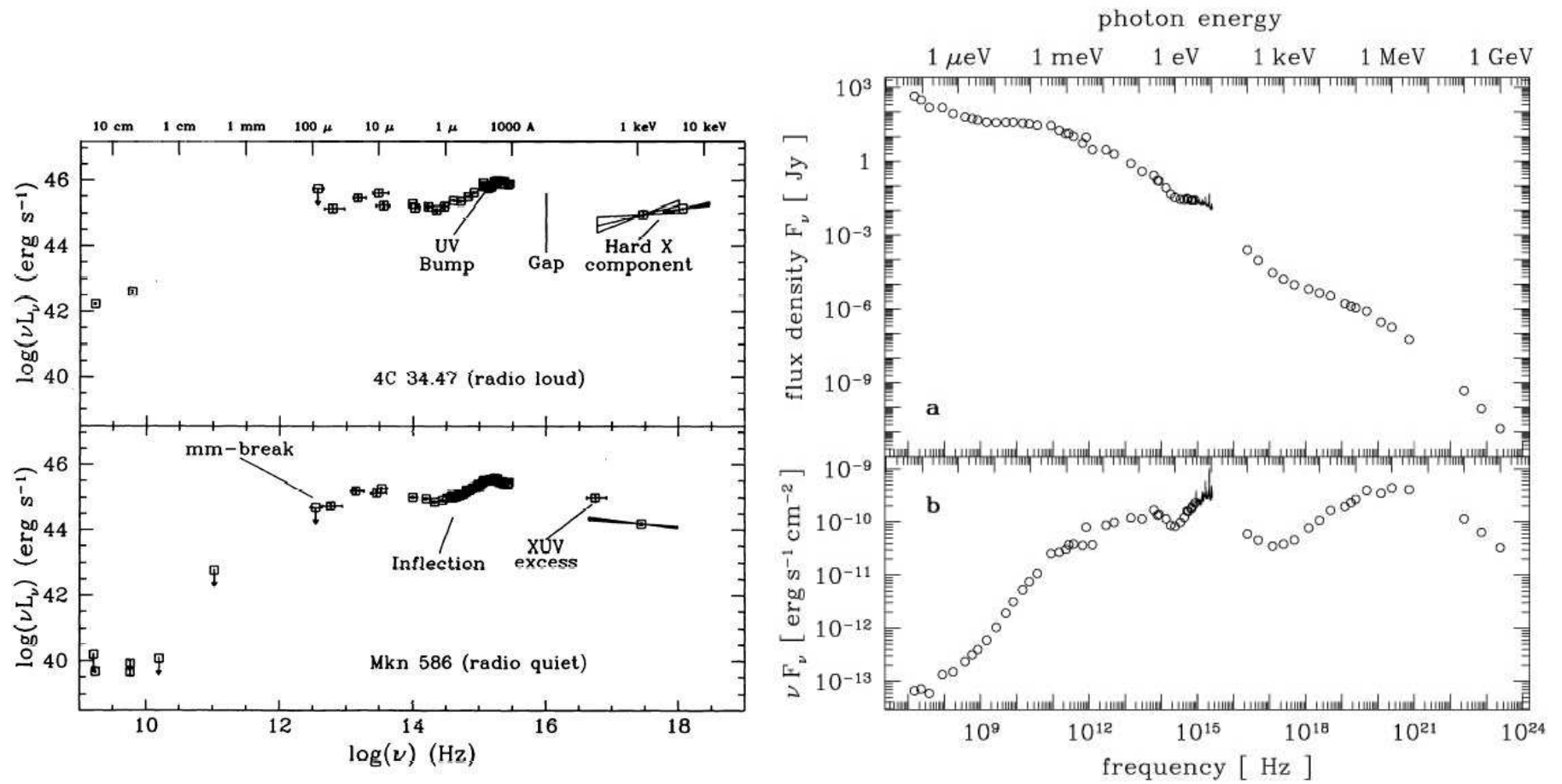
*Form des kontinuierlichen Spektrums:* Noch nicht einmal grob durch Schwarzkörper darstellbar; überspannt etliche Oktaven, stückweise durch Potenzgesetz approximierbar ( $F_\nu \propto \nu^\alpha$ ).

*Variabilität:* Abstrahlung durch aktive Kerne nicht zeitkonstant; Variation auf allen Zeitskalen, Jahrhunderte bis Stunden (evtl noch kürzer). Hinweis auf kleine Quellendimensionen und relativistische Prozesse.

*Radioemission:* Flächenhelligkeit im Radiobereich (Strahlungstemperatur) um Größenordnungen über dem für schwarze Körper möglichen. Starke Polarisation  $\rightarrow$  Synchrotronstrahlung hochrelativistischer Jets. Allerdings nur  $< 10\%$  der aktiven Galaxienkerne „radio-laut“.

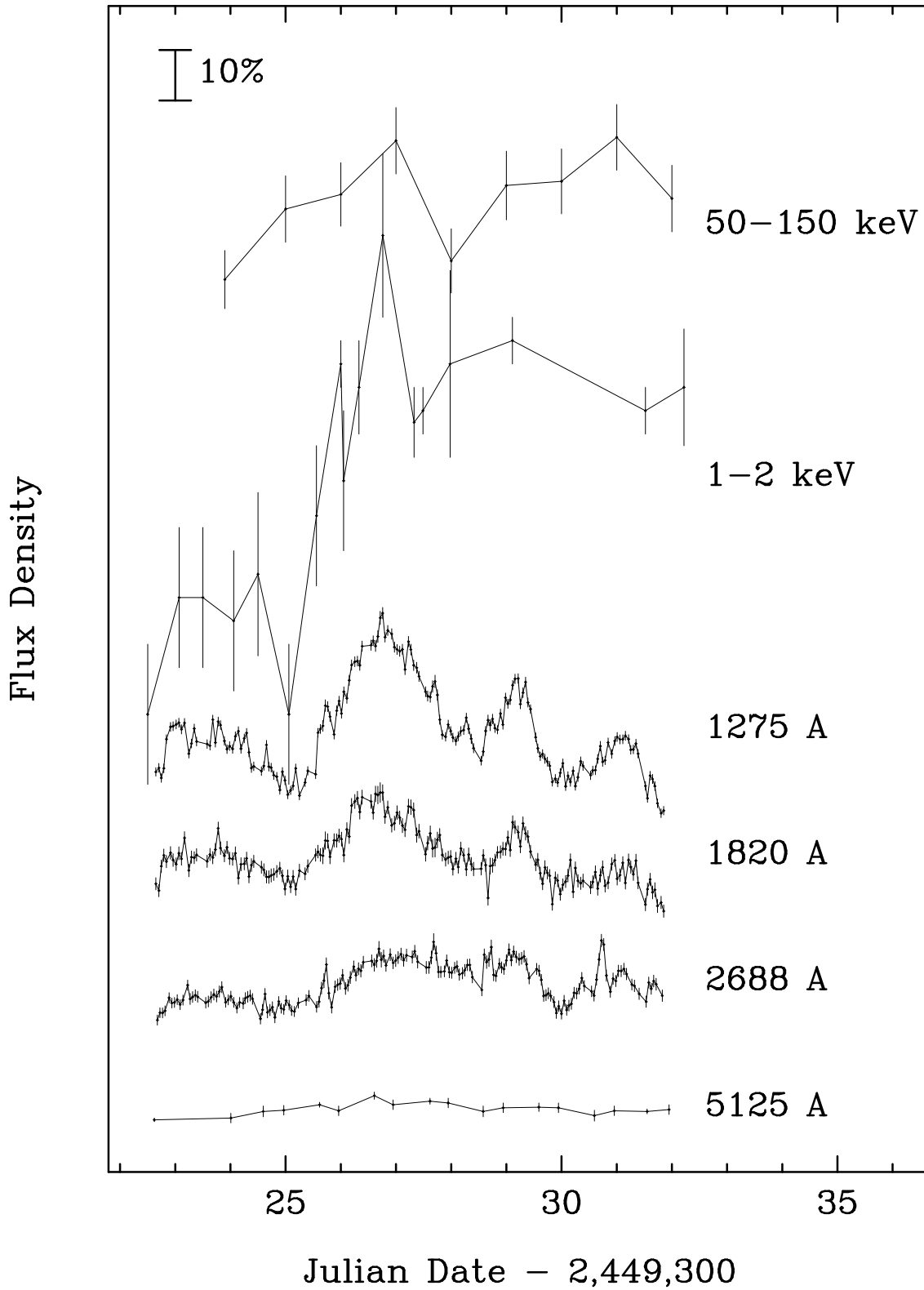
Keins dieser Phänomene ist ein *notwendiges* Kriterium für Kernaktivität, d.h. es gibt AGN ohne breite Emissionslinien, ohne Radio- oder Röntgenemission, usw. Wohl aber kann man notwendige physikalische Bedingungen für Kernaktivität formulieren – u.a. Thema dieser Vorlesung.

Quasar SED, gemittelt (Elvis M., et al. 1994, ApJS, 95, 1) und 3C273



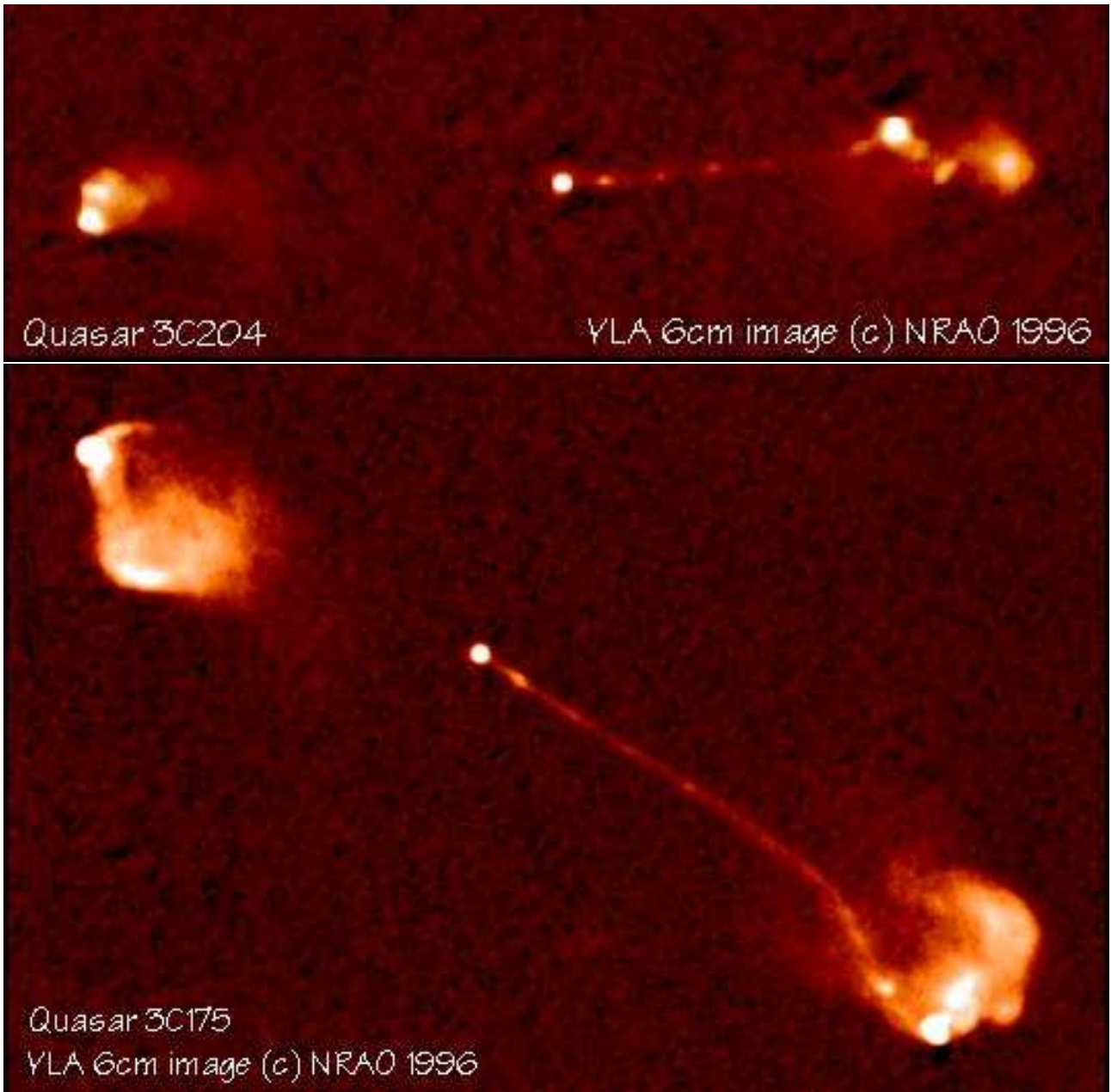
Kurzzeitvariabilität in NGC 4151 (Edelson et al. 1996, ApJ, 470, 364)

### NGC 4151





Radiolaute Quasare 3C204 und 3C175 (NRAO/AUI).  
Länge der Radiostrukturen 160/220 kpc



# Klassifikation von aktiven Galaxienkernen

**AGN:** Active Galactic Nuclei = Oberbegriff

**Aktive Galaxien:** Galaxien mit kurzzeitig stark erhöhter Leuchtkraft (meist Starbursts); nur  $\lesssim 10\%$  davon sind AGN.

**Seyfertgalaxien:** Sy 1  $\longleftrightarrow$  Sy 2; Sy 1.5 / 1.8 / 1.9  
je nach Vorkommen von breiten und schmalen Emissionslinien.

radio-laut (RLQ)  $\longleftrightarrow$  radio-leise (RQQ); radio-mittel?  
**Quasare (QSOs):** RLQ-Untertypen: steep-spectrum und flat-spectrum  
Quasare Typ 1  $\longleftrightarrow$  Typ 2 (?)

**Radiogalaxien (RG):** Fanaroff-Riley (FR) Typ I  $\longleftrightarrow$  FR II  
Broad / Narrow Lines (BLRG  $\longleftrightarrow$  NLRG)

**LINERs:** (Low Ionization Nuclear Emission Region galaxies)

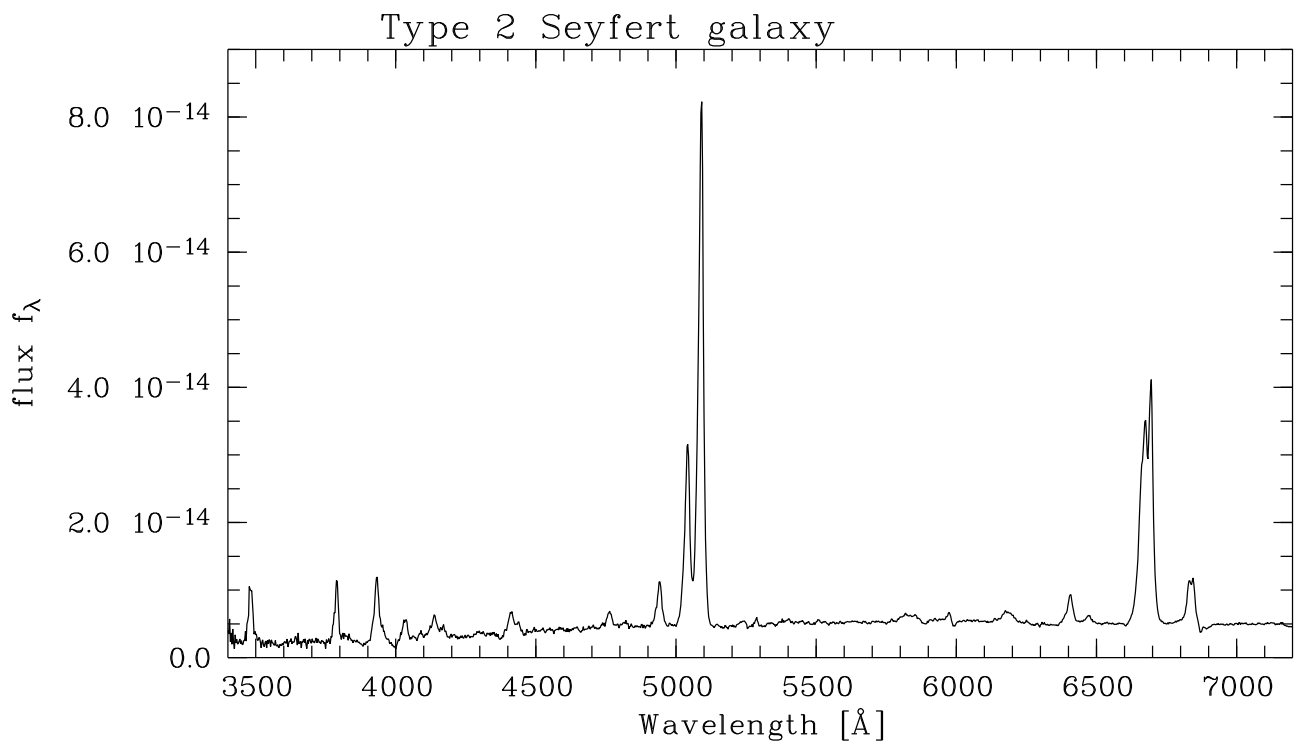
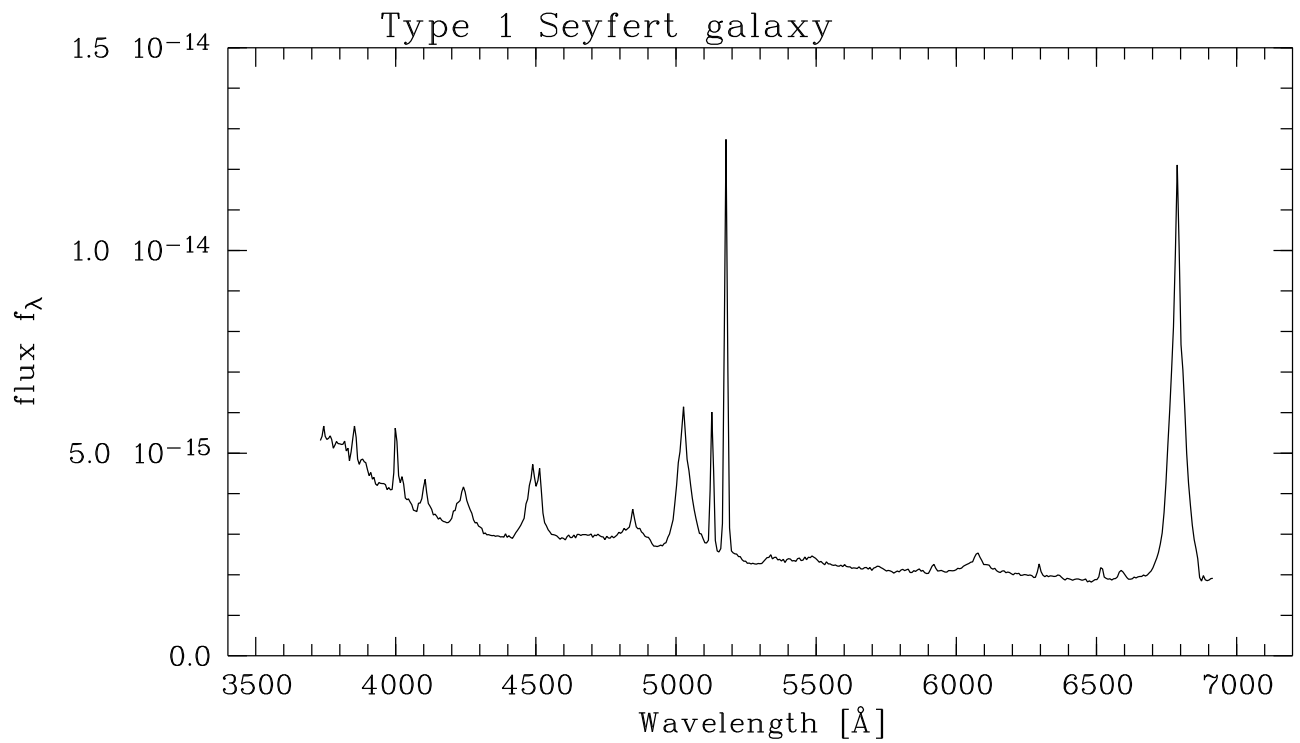
BL Lac-Objekte (nach Prototyp BL Lacertae), und Untertypen  
**Blazare:** Optically Violent Variables (OVVs)  
High Polarization QSOs (HPQs)

**BAL-Quasare:** (Broad Absorption Lines): etwa 10–20 % aller RQQ

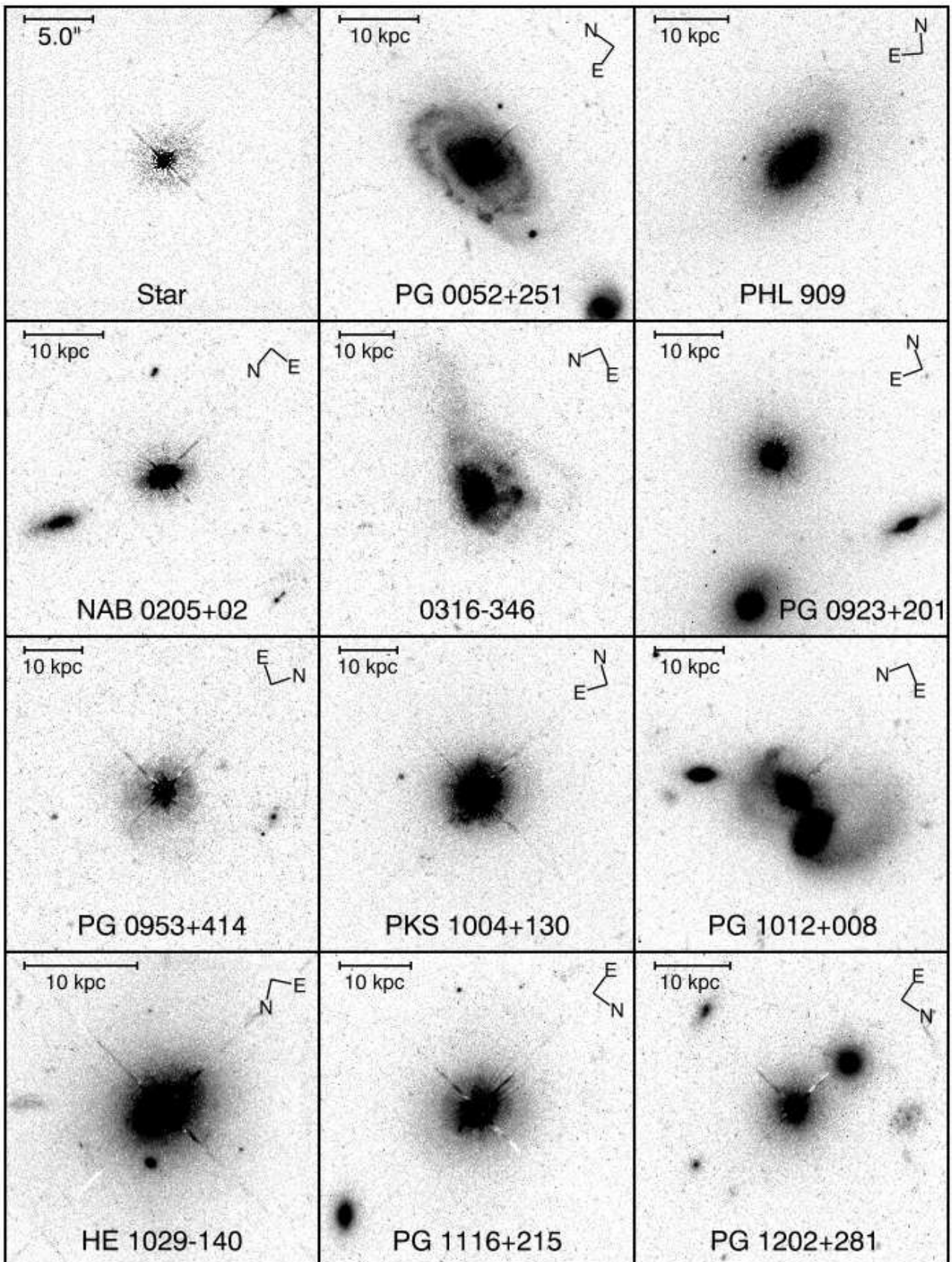
**ULIRGs:** (Ultra-Luminous Infra-Red Galaxies):  $\lesssim 30\text{--}50\%$  enthält AGN



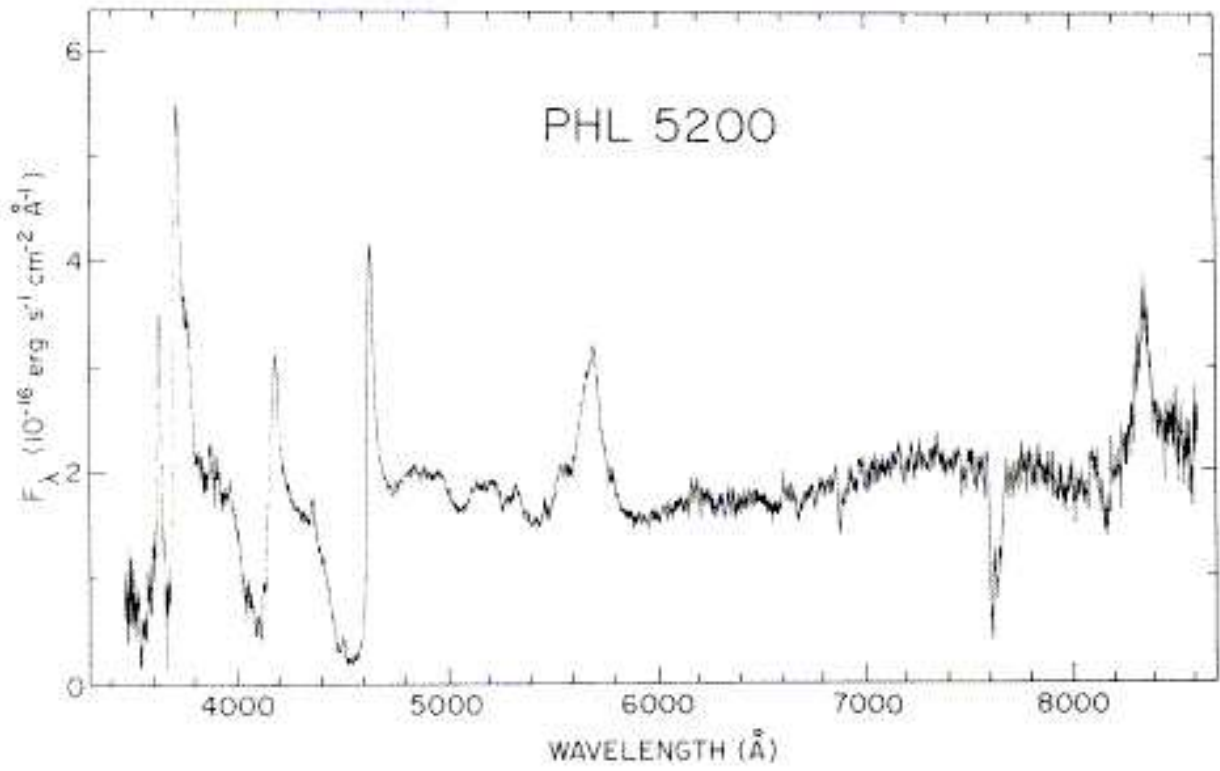
## Emissionslinien in Galaxienkernen



Quasare mit aufgelöster Wirtsgalaxie, HST (Bahcall et al. 1997)



## Broad Absorption Line (BAL) Quasar Spektrum



## Lineardimensionen

Für Feld-, Wald- & Wiesenquasar:

	metrische Ausdehnung	Winkelgröße bei	
		$z = 0.1$	$z = 2$
• Muttergalaxie	10 kpc	4''	1''
• Narrow Emission Line Region	1 kpc	0''4	0''1
• Broad Emission Line Region	1 pc	0''0004	0''0001
• Akkretionsscheibe	0.01 pc	4 $\mu$ as	1 $\mu$ as
• $R_S$ für $M = 10^9 M_\odot$	$10^{-4}$ pc	0.04 $\mu$ as	0.01 $\mu$ as

( $H_0 = 50$ ,  $\Omega_m = 1$ ,  $\Lambda = 0$ )

# Maße, Einheiten, Konventionen

*Strahlungsstrom:*

$$f_\lambda \text{ [erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ \AA}^{-1}] \text{ (cgs) bzw. [W m}^{-2} \text{ nm}^{-1}] \text{ (SI)}$$

$$f_\nu \text{ [erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ Hz}^{-1}]; 1 \text{ Jy} \equiv 10^{-23} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$$

$$f_\nu = f_\lambda \cdot \lambda^2 / c.$$

*Magnituden:*

Relative logarithmische Größe, verschiedene Nullpunkt-Systeme:

1. Vega-System (A0-Sterne haben in allen Bändern gleiche Mag.)  
Umrechnung von  $f_\lambda$  in Magnituden erfordert separate Nullpunkte für jedes Band; z.B. für Johnson-System (Strahlungsströme in cgs):

$$U = -2.5 \log f_{3600} - 21.29$$

$$B = -2.5 \log f_{4400} - 20.42$$

$$V = -2.5 \log f_{5550} - 21.17$$

2. AB-System: feste Umrechnungskonstante

$$m_{AB} = -2.5 \log f_\nu - 48.60$$

*Leuchtkraft & absolute Helligkeit:*

Def. Leuchtkraft:  $L = 4\pi d_L^2 \int f_\lambda d\lambda$  (bolometrische Größe)

Leuchtkraft pro Einheits-Frequenzband:  $\nu F_\nu = \lambda F_\lambda = 4\pi d_L^2 \lambda f_\lambda$

Häufig benutzt: 1 Sonnenleuchtkraft  $L_\odot = 3.85 \times 10^{33} \text{ erg s}^{-1}$ .

Absolute Helligkeiten:  $M_{V,\odot} = 4.8$ ;  $M_{\text{bol},\odot} = 4.72$ .

# Literatur zur Vorlesung

## Lehrbücher und Monographien

Bradley M. Peterson: **An Introduction into Active Galactic Nuclei**,  
Cambridge University Press, 1997.

*Weitgehend aus Beobachterperspektive geschriebenes Einführungswerk, guter Überblick, aus Platzgründen oft sehr oberflächlich in der Behandlung der physikalischen Prozesse.*

Julian H. Krolik: **Active Galactic Nuclei**,  
Princeton Series in Astrophysics, 1999.

*Anspruchsvolleres (und umfangreicheres) Lehrbuch eines bekannten AGN-Theoretikers; sehr gut vor allem bei der Behandlung von Strahlungsprozessen und Akkretionsscheibenphysik.*

Ajit K. Kembhavi und Jayant V. Narlikar: **Quasars and Active Galactic Nuclei**, Cambridge University Press, 1999.

*Umfassendes Lehrbuch, mit Überblick über die wichtigsten physikalischen Prozesse **und** einer sehr aktuellen Darstellung des Stands der Beobachtungen. Etwas störend am Ende: die Betrachtungen zur nichtkosmologischen Interpretation der Quasarrotverschiebung.*

Ian Robson: **Active Galactic Nuclei**  
Wiley-Praxis Series, 1996

*Sehr elementare Einführung; nicht ausreichend für das Niveau dieser Vorlesung*

R.D. Blandford, H. Netzer, L. Woltjer: **Active Galactic Nuclei**  
Lecture Notes, Saas-Fee Advanced Course 20, Springer-Verlag, 1990

*Fortgeschrittene Einführungstexte. Nicht mehr ganz aktuell, aber die Beiträge von Netzer und Blandford sind immer noch außerordentlich lesenswert.*

Daniel W. Weedman: **Quasar Astronomy**  
Cambridge University Press, 1986.

*Heroischer Versuch, ein sich rasend schnell entwickelndes Gebiet in einem Lehrbuch zu erfassen. Das meiste ist inzwischen überholt, aber das Kapitel über AGN-relevante Aspekte der Kosmologie ist ausgezeichnet, und die kosmologische Formelsammlung ist nach wie vor unerreicht.*

## Eric Weisstein's **World of Astronomy**

<http://scienceworld.wolfram.com/astronomy/> *Brauchbare aber noch wachsende Ressource als Nachschlagewerk. Ist noch nicht in allen Bereichen vollständig.*

## astro-ph: **Preprintserver**

<http://de.arxiv.org>

*Der offizielle Preprintserver für astronomische Artikel. Frei zugänglich.*