

Aktive Galaktische Kerne

26. April 2007

Laura Baudis, lbaudis@physik.rwth-aachen.de
Physikalisches Institut Ib, RWTH Aachen

Inhalt

- Einführung
- Kurze Geschichte der AGNs
- Quasare; Synchrotronstrahlung und Radioemission
- Zoologie der AGNs
- Die zentrale Maschine und Akkretion
- Massenabschätzung des SBH (supermassive black hole)
- Die 'Host' Galaxie
- Einheitliches Modell der AGNs

- Literatur:
- Schneider, Kapitel 5; Carroll, Ostlie, Kapitel 28; Weigert, Wendker, Wisotzki, Kapitel 11.6; Unsöld, Baschek, Kapitel 12.3

Aktive Galaktische Kerne

- Licht von normalen Galaxien im Optischen/IR dominiert von Sternen (+Gas/Staub) -> thermische Strahlung; Spektrum kommt durch Überlagerung von \sim Planckspektren zustande (mit relativ kleinem T-Bereich)

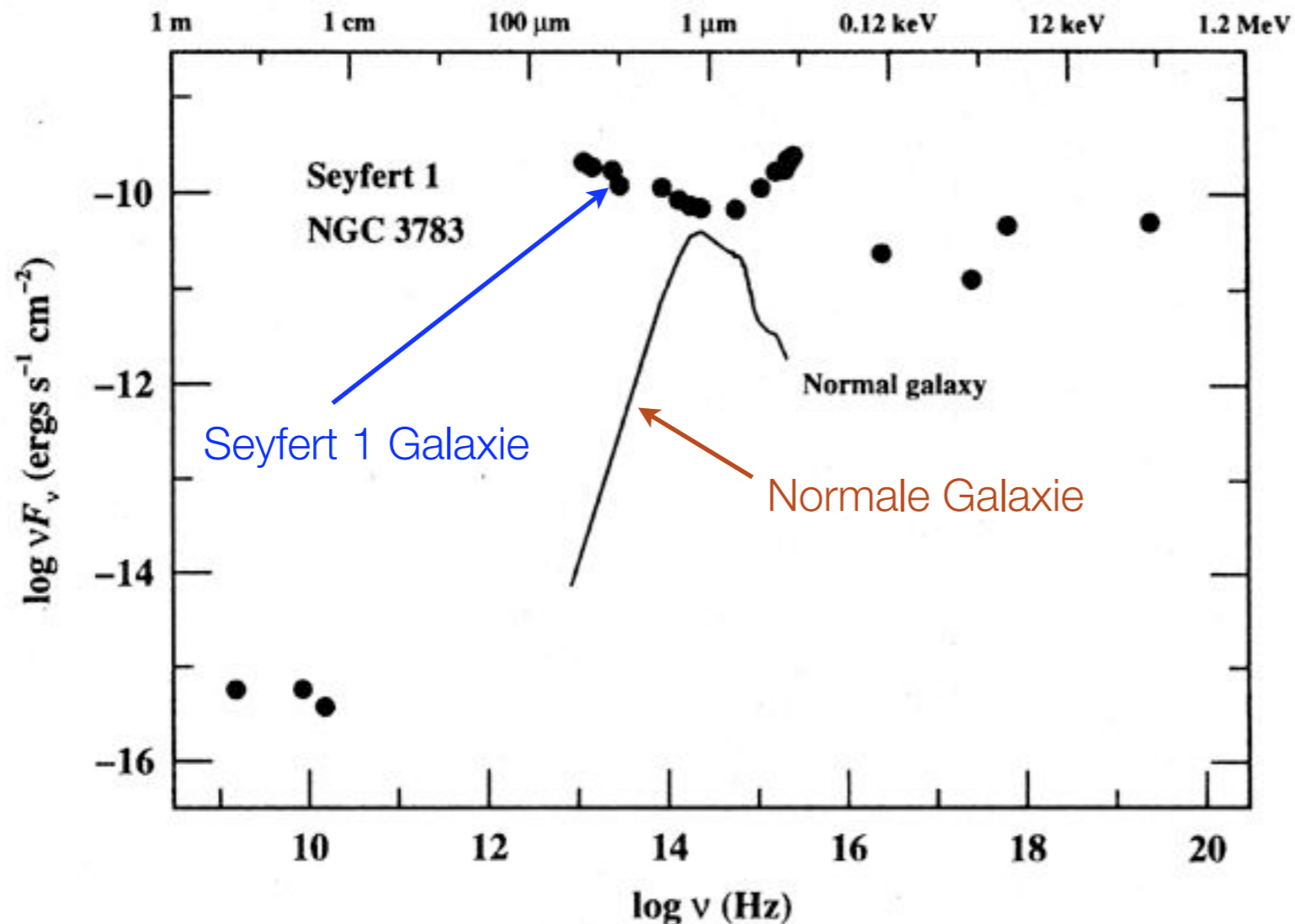
-> Strahlung von normalen Galaxien konzentriert im Bereich zwischen $\sim 5000 \text{ \AA}$ und $\sim 20000 \text{ \AA}$.
- Kerne von aktiven Galaxien (AGNs) zeigen Emission über viel breiteren Spektralbereich, von Radio-Wellenlängen bis hin zur Gamma Strahlung
- Einige der AGNs gehören zu den leuchtkräftigsten Quellen im Universum (zB Quasare), sie sind bis zu sehr großen Rotverschiebungen ($z \sim 6.4 \rightarrow$ als das Universum $\sim 800 \times 10^6$ Jahre alt war!) beobachtet worden
- Die Leuchtkraft von Quasaren kann das Tausendfache der von normalen Galaxien überschreiten; diese Leuchtkraft kommt aus einem sehr kleinen Raumgebiet ($r \leq 1 \text{ pc}$).
- Prozesse in AGNs gehören zu den energetischsten in der Astrophysik und sind zum Teil noch nicht gut verstanden



<http://imagine.gsfc.nasa.gov>

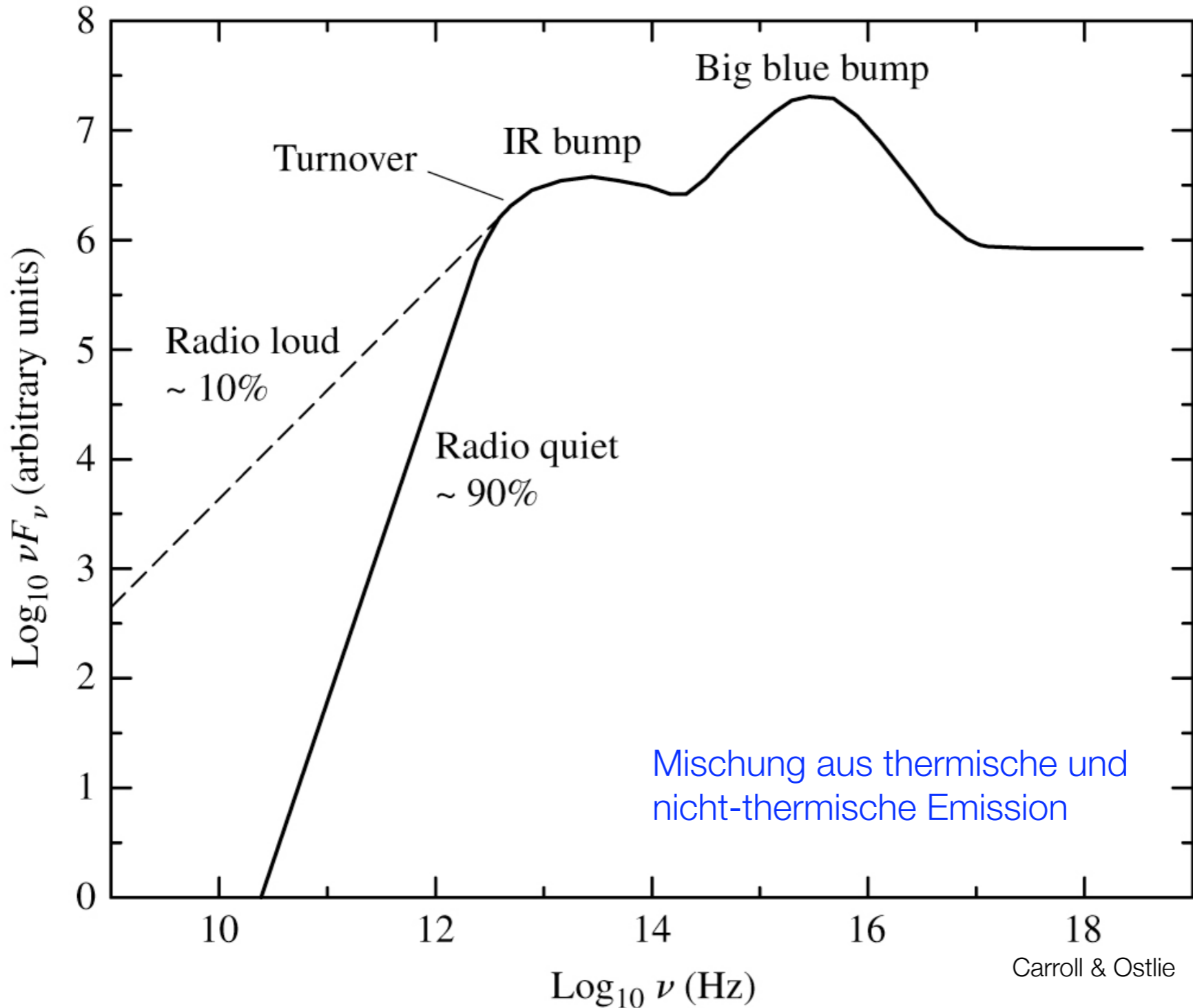
Aktive Galaktische Kerne

- Energieverteilung einer Seyfert 1 Galaxie (NGC 3783) (Punkte) und Vergleich zu einer normalen Galaxie.
 - Normale Galaxie: Spektrum ist in einem schmalen Band im Optischen konzentriert
 - Seyfert Galaxie: emittiert Strahlung über zehn Dekaden in der Wellenlänge



Aktive Galaktische Kerne

Kontinuum, das für viele AGNs beobachtet wird



Kurze Geschichte der AGNs

- Edward A. Fath (1880-1959): 1908 → beobachtete starke Emissionslinien in NGC 1068
- Carl K. Seyfert (1911-1960): einige Galaxien haben Kern mit extrem hoher Flächenhelligkeit; das Spektrum einiger dieser Seyfert Galaxien ist dominiert von Emissionslinien hoher Anregung; einige dieser Linien sind extrem breit (bis zu ~ 8500 km/s als volle Breite der Linienflügel); die Linien des Wasserstoffs sind öfters breiter als andere
- L. Woltjer (1959): Kerne der Seyferts nicht aufgelöst, daraus folgerte er $r \leq 100$ pc; falls Gas, welches Linie emittiert, gravitativ gebunden ist, muss gelten

$$\frac{GM}{r} \simeq v^2$$

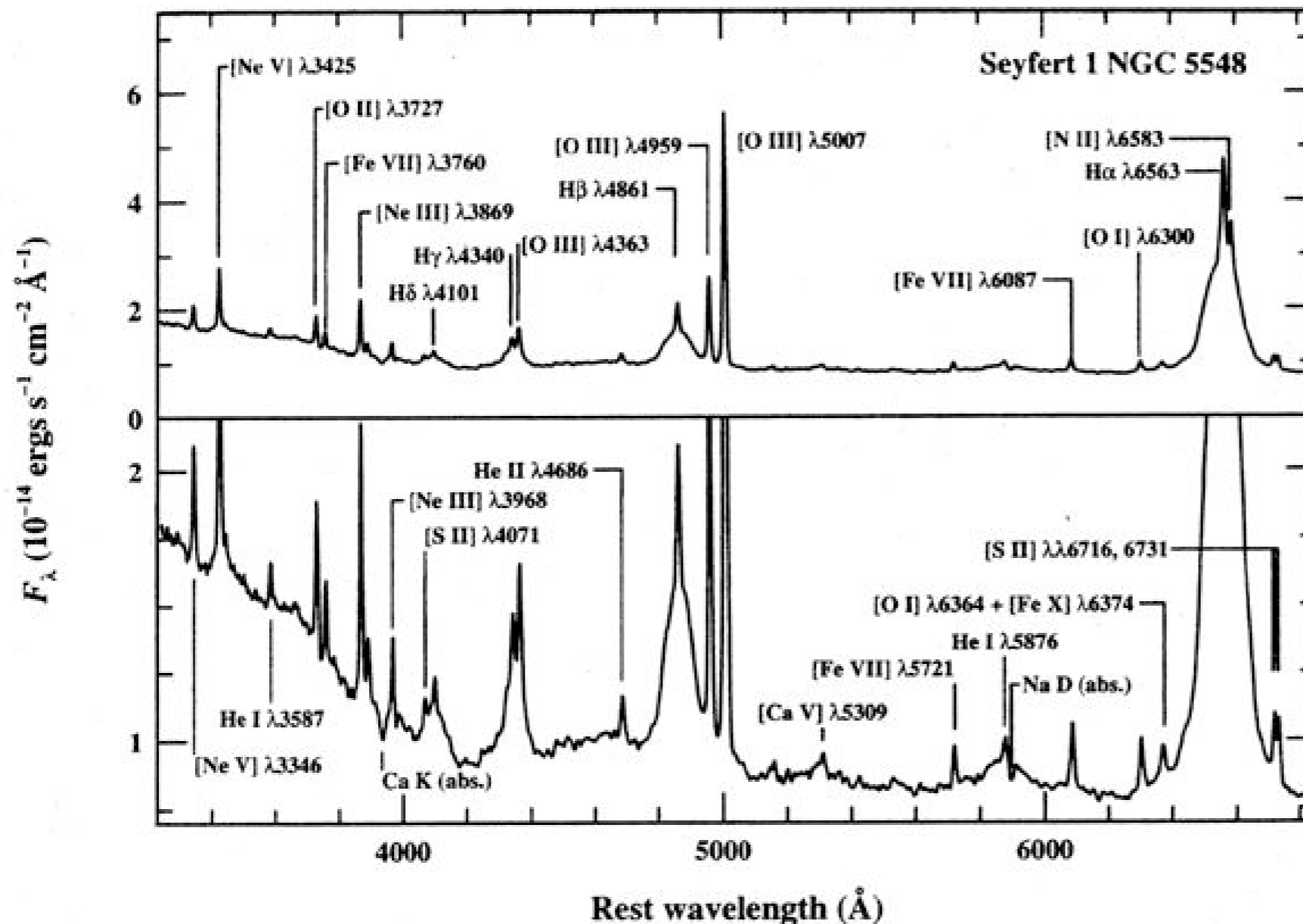
- typische Werte für v erhält man aus der Linienbreite, $v \sim 1000$ km/s; mit $r \leq 100$ pc folgt:

$$M \geq 10^{10} \left(\frac{r}{100 \text{ pc}} \right) M_{\odot}$$

=> entweder $r \sim 100$ pc => enorme Massenkonzentration im Zentrum dieser Galaxien; oder r viel kleiner als obere Schranke => enorme Energiedichte innerhalb des AGN

Kurze Geschichte der AGNs

- Optisches Spektrum der Seyfert 1 Galaxie (NGC 5548), ein Prototyp der Seyfert Typ 1 Galaxien
- Spektrum: dominiert von vielen breiten Emissionslinien (Balmer Linien) und weniger breiten Linien ([OIII] Linien bei 5007 Å und 4959 Å)



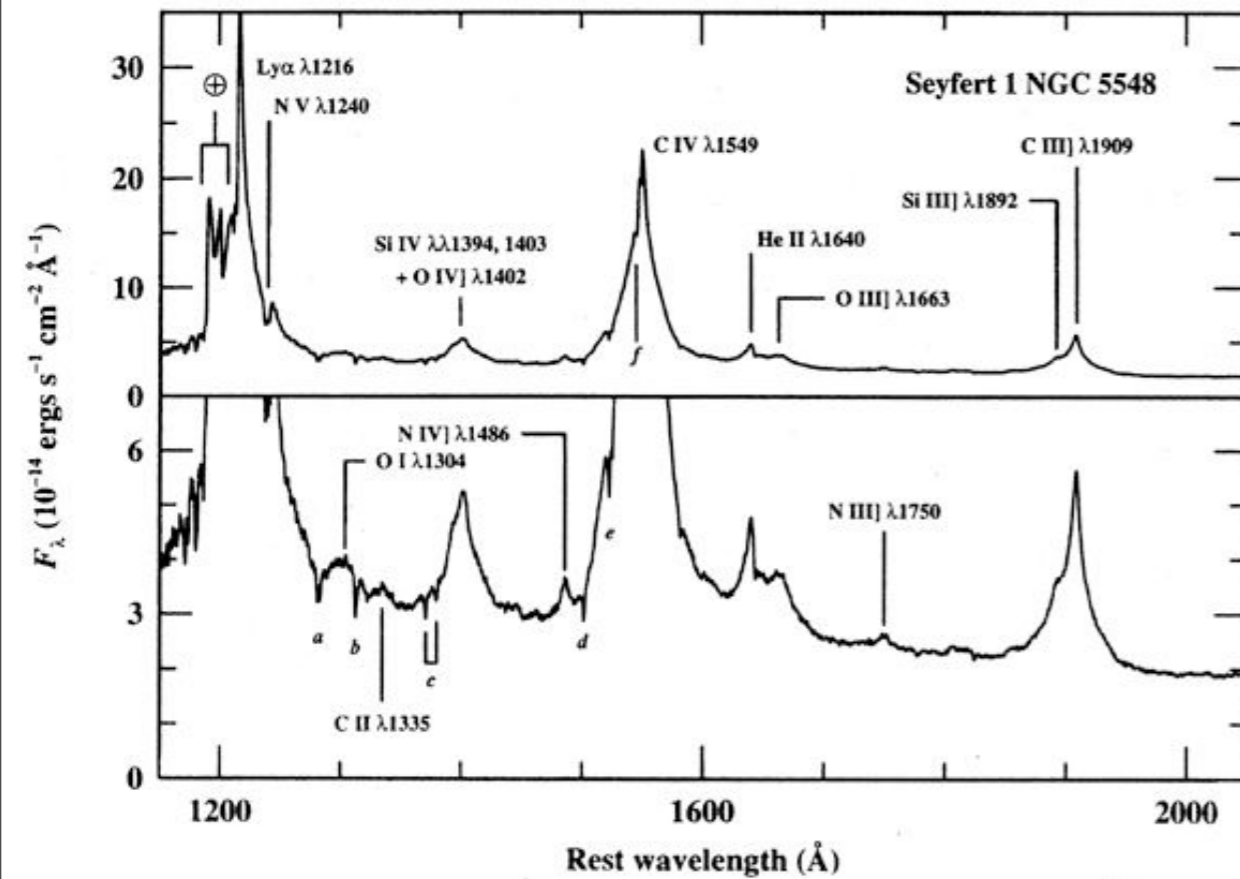
breite Linien:
~ 5900 km/s (FWHM)

schmalere Linien:
~ 400 km/s (FWHM)

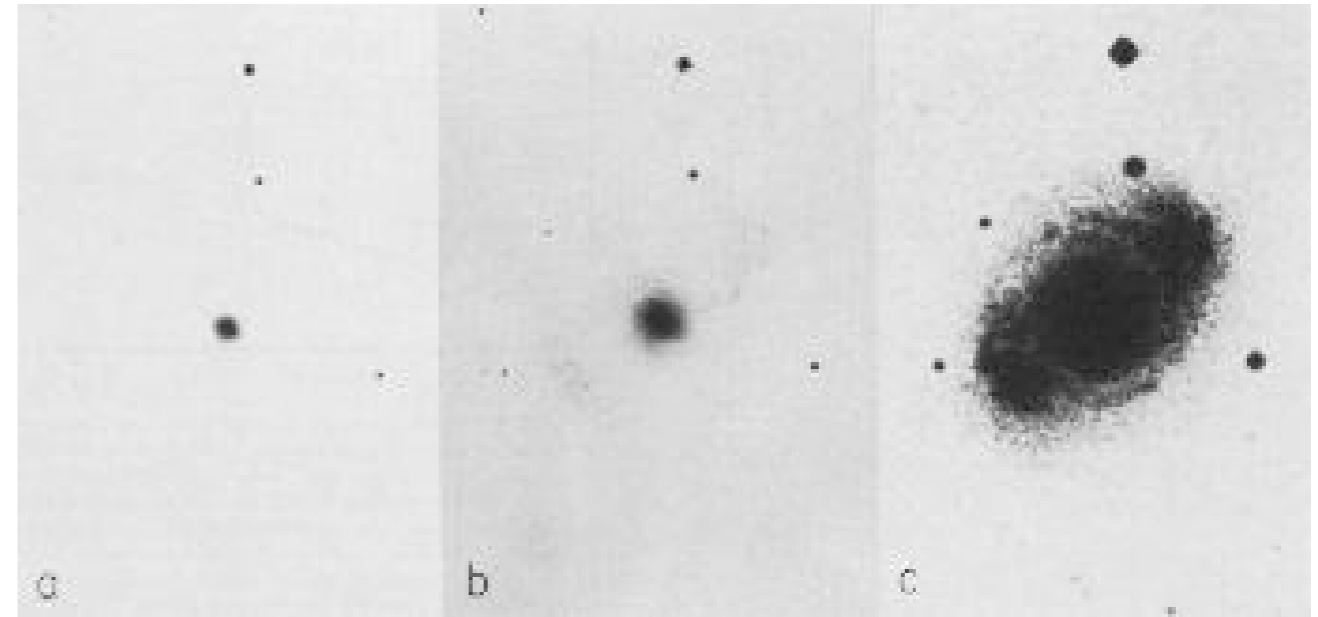
< 4000 Å
-> 'small blue bump'

Überlagerung von
Emissionslinien von Fe II
und des Balmer Kontinuums

Kurze Geschichte der AGNs



UV Spektrum der Seyfert 1 Galaxie NGC 5548
 Stärksten breiten Emissionslinien: Ly α bei 1216 \AA



3 Aufnahmen der Seyfert Galaxie NGC 4151
 mit nach rechts zunehmender Belichtungszeit
 kurze Belichtung: Quelle punktförmig
 längere Belichtung: Quelle ist Galaxie!

Kurze Geschichte der AGNs

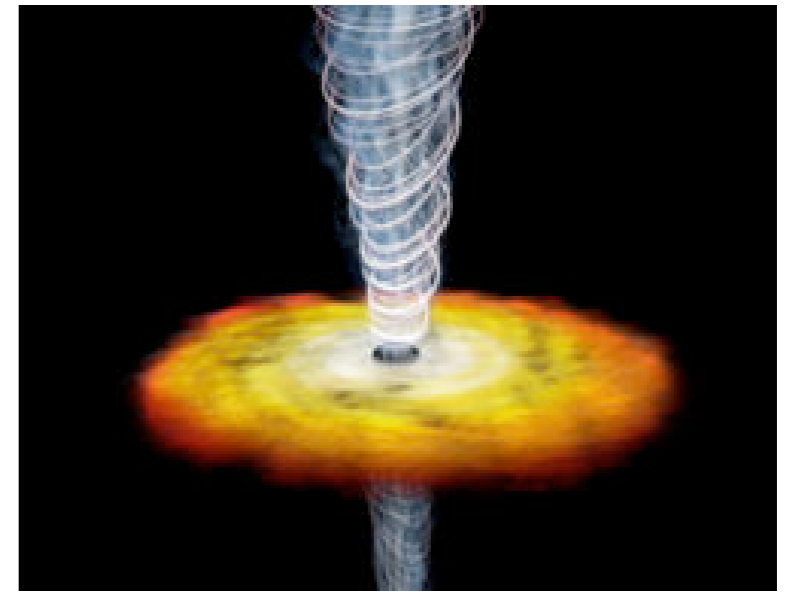
- **3C und 3CR Kataloge (1961):** Durchmusterung des nördliche Himmel ($\delta > -22^\circ$) bei 158 MHz und 178 MHz, Flusslimit $S_{\min} = 9 \text{ Jy}$ ($1 \text{ Jy} = 10^{-23} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$); Identifikation vieler 3C-Quellen mit Galaxien, aber für einige von ihnen kein offensichtliches optisches Gegenstück (oder nur eine sehr schwache optische Quelle)
- **Matthews und Sandage (1963):** 3C48 ist punktförmige (stellar-like) Quelle mit $m = 16 \text{ mag}$; komplexes Spektrum, bestehend aus blauem Kontinuum und starken, breiten Emissionslinien, die aber keinem atomaren Übergang zuzuordnen waren, somit nicht identifizierbar!
- **Schmidt (1963):** Identifikation von 3C273 mit punktförmiger optischer Quelle; Identifikation der Emissionslinien mit der Balmer-Serie des Wasserstoffs, aber mit extrem hoher Rotverschiebung $z = 0.158$
 - Gültigkeit des Hubble-Gesetzes ($v = H_0 \times D$, mit $H_0 = 100 h \text{ km/s/Mpc}$, $h \approx 0.71$) vorausgesetzt, war diese bis dahin mit Abstand weitest entfernte Quelle, $D \sim 500 h^{-1} \text{ Mpc}$
 - absolute Magnitude der Quelle ist dann $M_B = -25.3 + 5 \log(h) \Rightarrow$ dies ist etwa 100 mal heller als normale Spiralgalaxien
- nach besserer Bestimmung der Positionen der Radioquellen sind in kurzer Folge dann viele solcher Quasare (quasi-stellar radio source, quasars) identifiziert worden

Grundlegende Eigenschaften von Quasaren

- Identifikation einer Radioquelle mit punktförmiger optischer Quelle
- Fluss der Quelle variiert, und zwar bei (fast) allen Frequenzen
- optisches Spektrum blau, zB $U-B < 0$
- breite Emissionslinien
- Linien von Übergängen mit hoher Ionisationsenergie
- hohe Rotverschiebung
- Emission von Röntgenstrahlung
- Das Kontinuumsspektrum ist oftmals stückweise durch ein Potenz-Gesetz beschreibbar:

$$S_\nu \propto \nu^{-\alpha}$$

- $\alpha = 0$ flaches Spektrum
- $\alpha = 1$: gleiche Energie im Spektrum pro logarithmischem Frequenzintervall

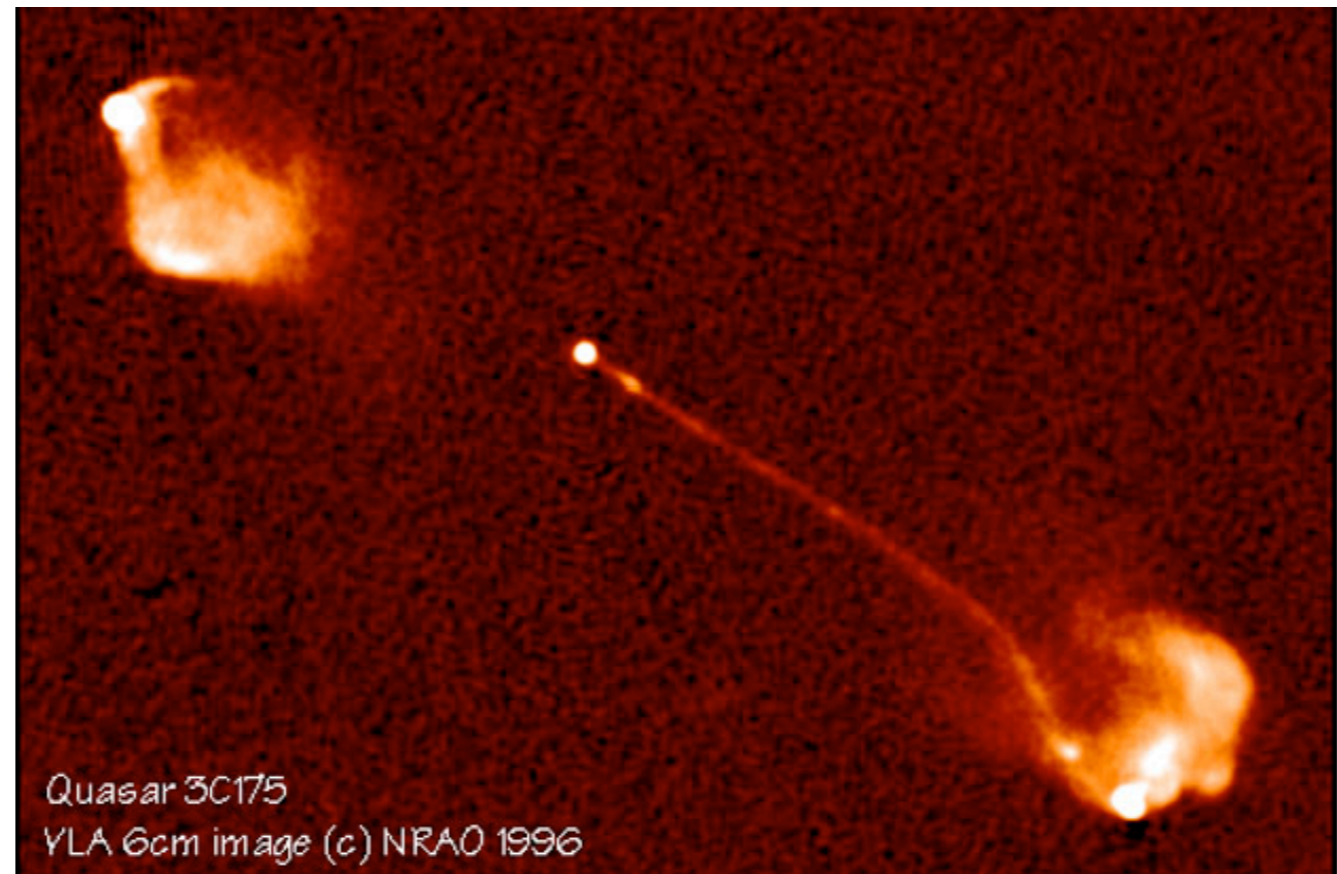


Quasare als Radioquellen

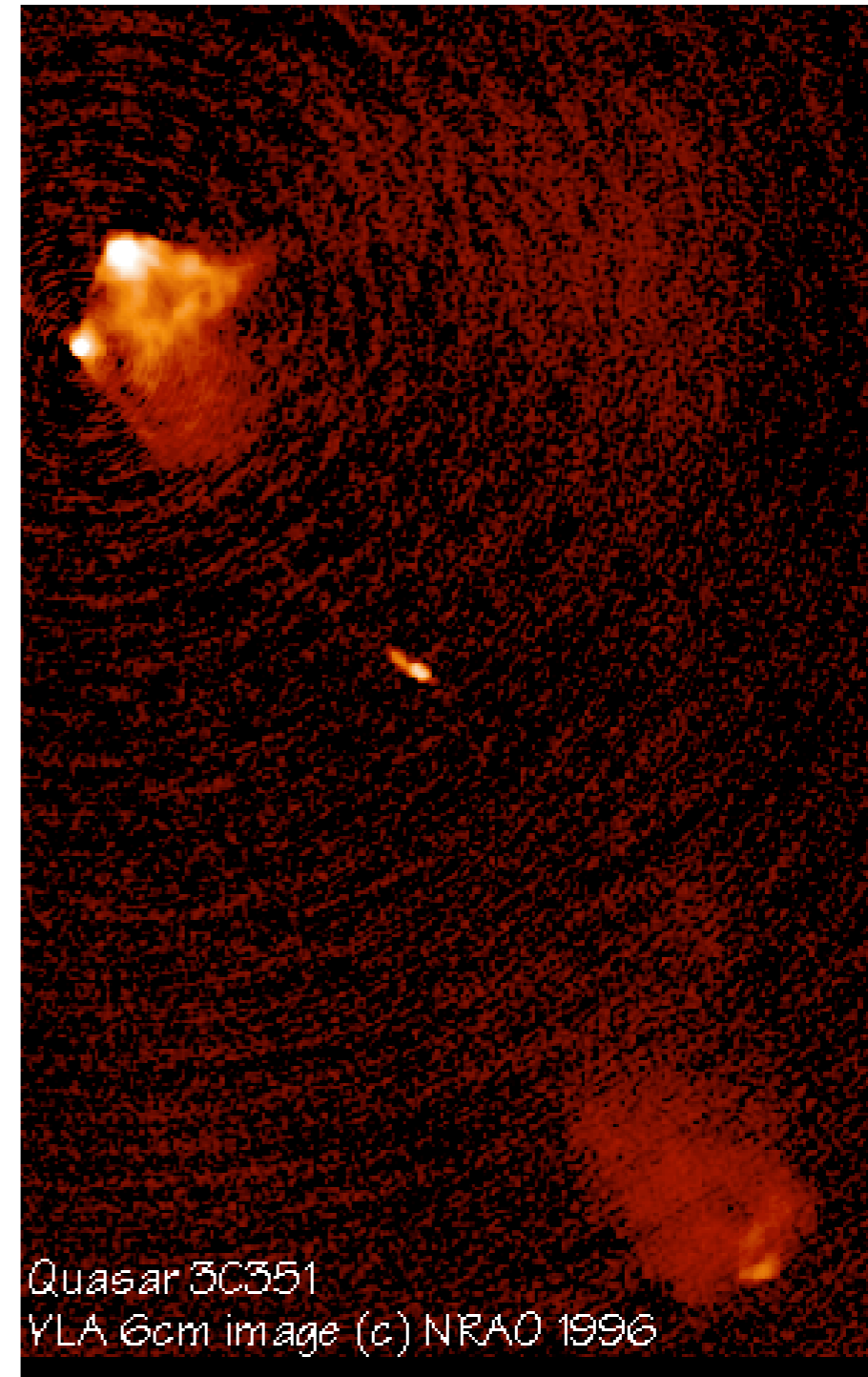
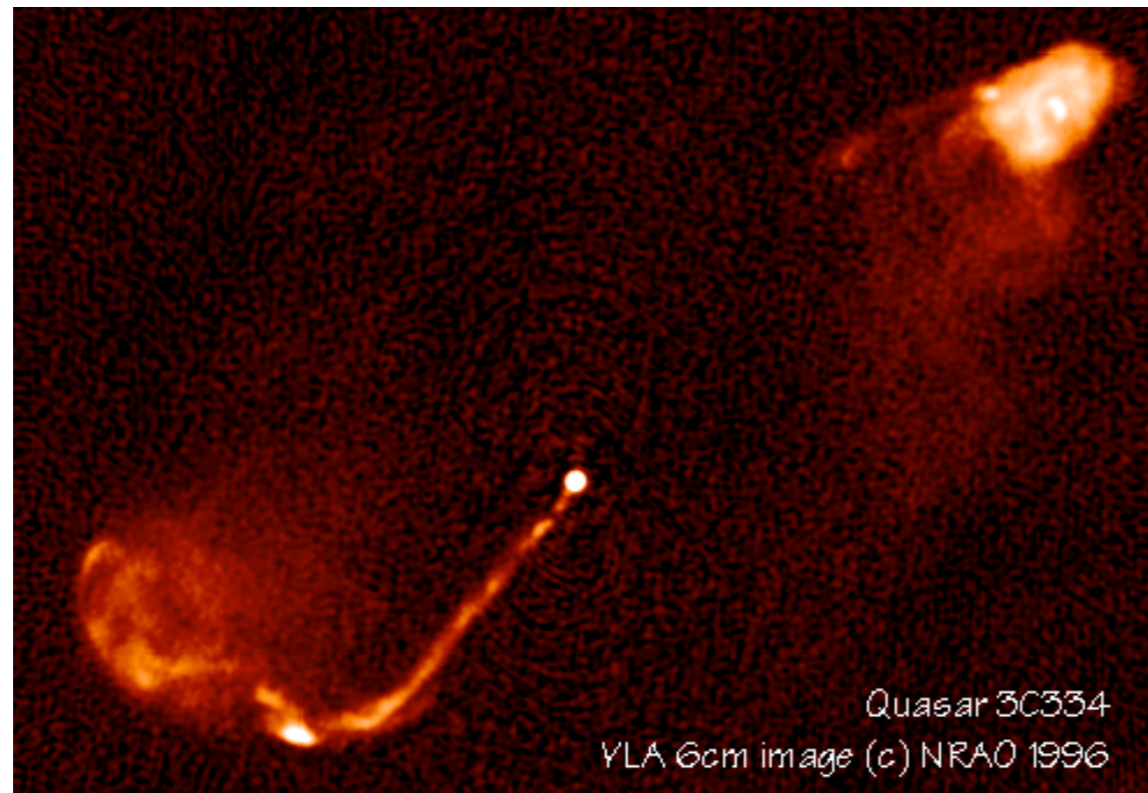
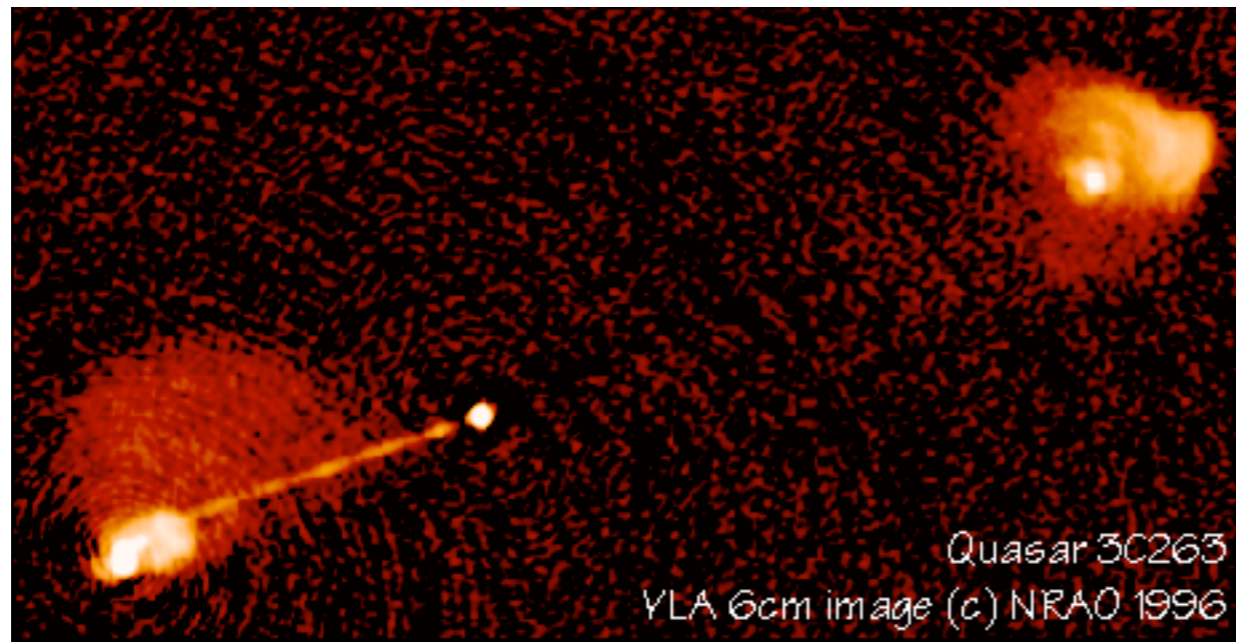
- Die Morphologie von Quasaren im Radiobereich ist oftmals komplex, bestehend aus ausgedehnter und kompakter Quelle
- Ausgedehnte Quellen: meistens Doppelquelle, in Form zweier Radiokeulen ('radio lobes'), mehr oder weniger symmetrisch mit der optischen Achse plaziert
- Die Gesamtausdehnung im Radiobereich kann bis zu 1 Mpc betragen
- Der optische Quasar koinzidiert mit kompakter Radioquelle, Größe $\ll 1''$, teilweise nicht einmal mit VLBI aufgelöst (≤ 1 mas)

Radiokarte bei $\lambda = 6$ cm für die 3C175
Radioquelle

Die stärksten Komponenten sind die beiden
Radio-Lobes. Der rechte Lobe ist mit dem
kompakten Kern durch einen langen und
sehr dünnen Jet verbunden, auf der
Gegenseite ist kein Jet erkennbar



Quasare als Radioquellen



Synchrotron Strahlung

- Das Radiospektrum folgt (stückweise) einem Potenzgesetz mit $\alpha \sim 0.7$ für ausgedehnte Komponenten, $\alpha \sim 0$ für kompakte Komponente (Kern)
- Die Radiostrahlung ist polarisiert, ausgedehnte Radioquelle erreicht Polarisationsgrad von bis zu 30% oder mehr

-> beides zusammen wird so interpretiert, dass Radiostrahlung durch Synchrotron-Emission relativistischer Elektronen zustandekommt: Elektronen vollführen helikale Bewegung im Magnetfeld, werden daher permanent beschleunigt, beschleunigte Ladungen strahlen

- Falls die Energie des Elektrons $E = \gamma m_e c^2$ ist, so ist die charakteristische Frequenz der Emission

$$\nu_c = \frac{3\gamma^2 eB}{4\pi m_e c} \sim 4.2 \times 10^6 \gamma^2 \left(\frac{B}{1G} \right) \text{Hz}$$

- B = Magnetfeldstärke, e = Elektronenladung, m_e = Masse des Elektrons, $m_e c^2 = 511 \text{ keV}$
- Strahlung bei cm-Wellenlängen ($\nu \sim 1 \text{ GHz}$) verlangt bei Magnetfeldern der Stärke $B \sim 10^{-4} \text{ G}$ etwa $\gamma \sim 10^5$

=> Elektronen müssen hoch-relativistisch sein!

=> es müssen sehr effiziente Teilchenbeschleunigungsprozesse existieren!

Synchrotron Strahlung

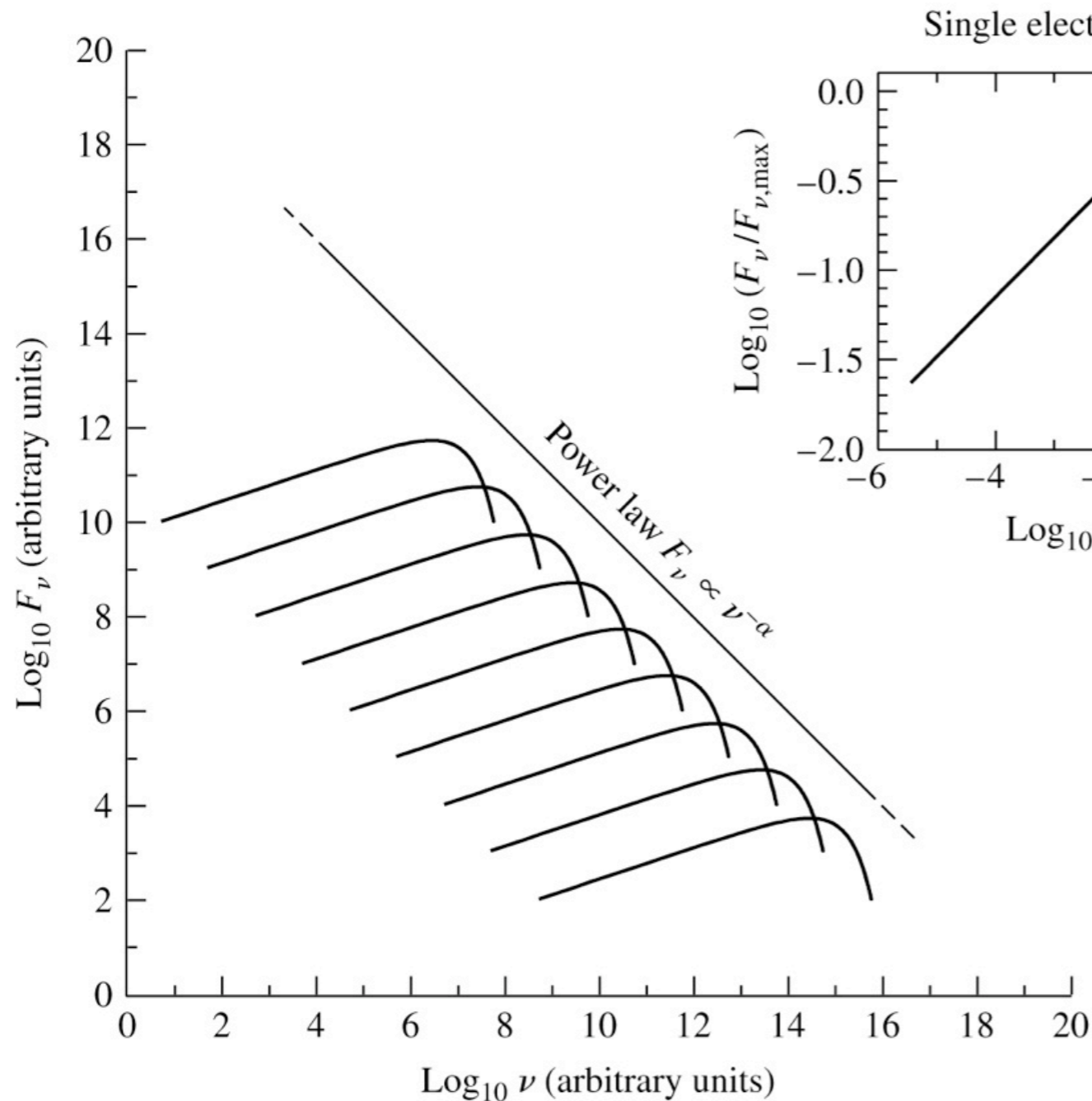
- Die Synchrotron Strahlung ist linear polarisiert, der Polarisationsgrad hängt von der Komplexität des Magnetfeldes ab
- Potenzgesetz der Strahlung wird erzeugt, wenn relativistische Elektronen ebenfalls Potenzgesetz besitzen; falls

$$N(E)dE \propto E^{-s} dE \Rightarrow \alpha = \frac{s-1}{2}$$

$$\alpha = 0.7 \leftrightarrow s = 2.4$$

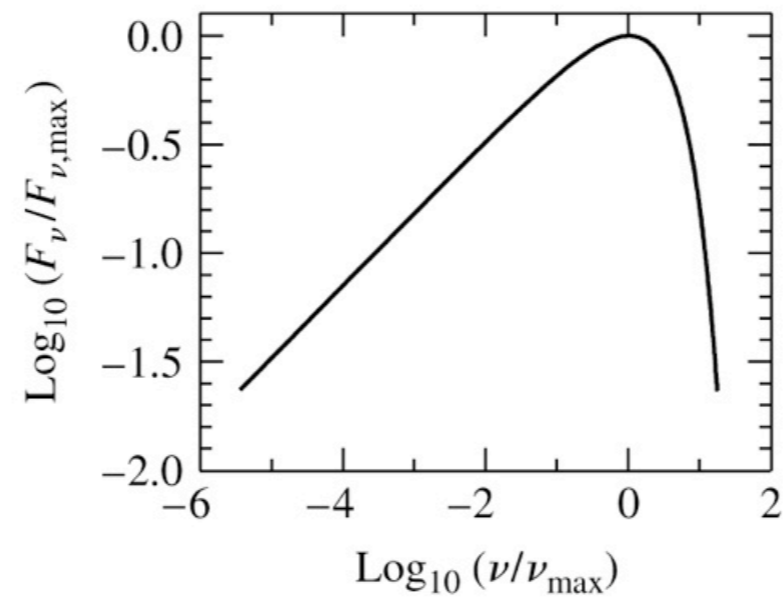
- Die Elektronenverteilung $N(E) \propto E^{-2.4}$ ist sehr ähnlich der Verteilung der kosmischen Strahlung in unserer Galaxis - vielleicht gleiche Ursache, gleicher oder ähnlicher Mechanismus zur Erzeugung dieses Energiespektrums?
- Für niedrige Frequenzen ist Synchrotron Spektrum selbstabsorbiert; Spektrum wird flacher und kann sogar für kleine ν ansteigen
- Im Grenzfall großer optischer Tiefe bzgl. Selbstabsorption
$$S_\nu \propto \nu^{2.5} \text{ für } \nu \rightarrow 0$$
- Ausgedehnte Radiokomponente optisch dünn für cm-Wellenlängen, $\alpha \sim 0.7$. Kompakte Komponente (Kern) ist oft optisch dick, selbstabsorbiert $\alpha \sim 0$, oder gar 'invertiert', < 0

Synchrotron Strahlung



Carroll & Ostlie

Single electron spectrum



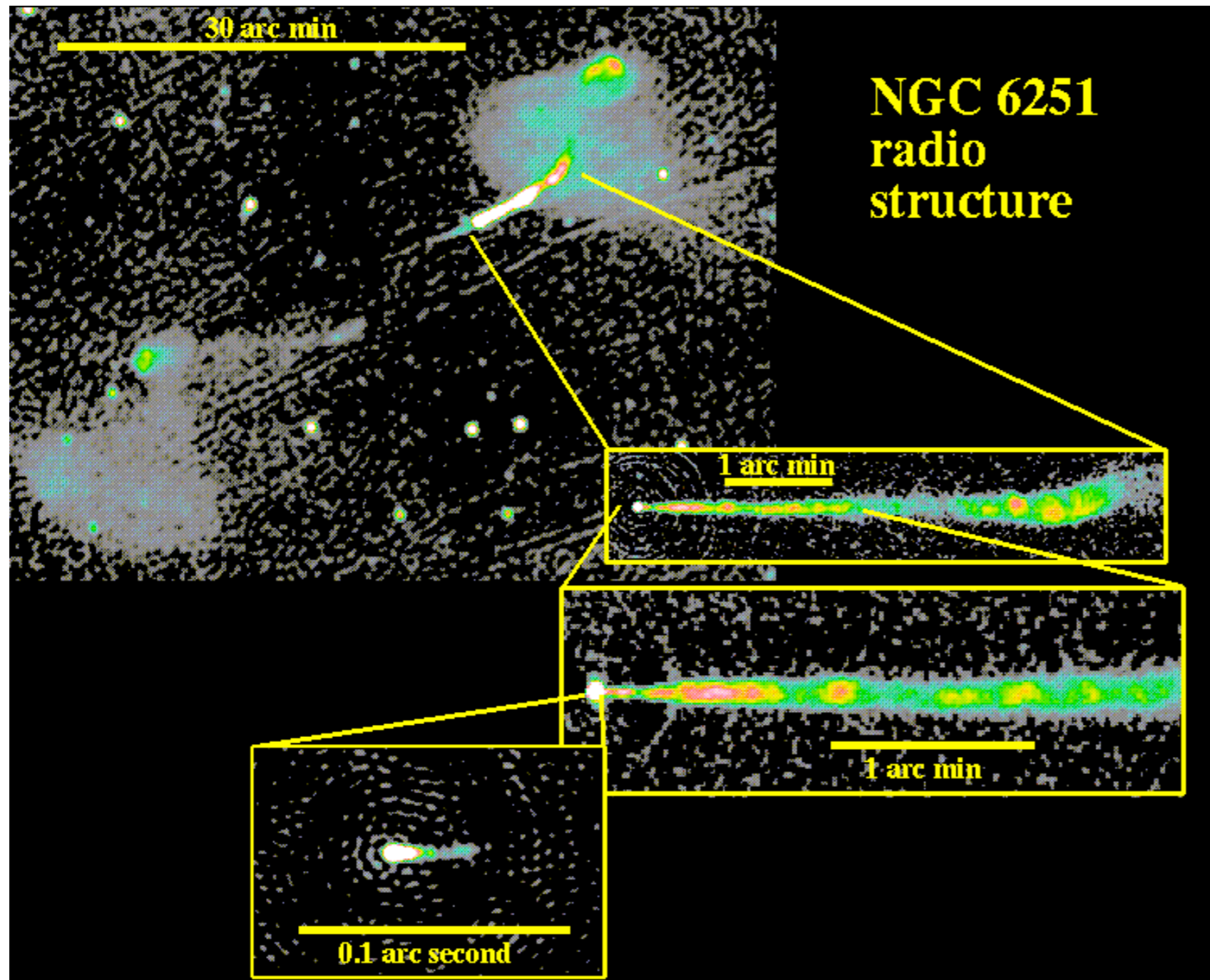
Spektrum der Synchrotron-Emission eines einzelnen relativistischen Elektrons
Maximum der Strahlung liegt bei $\sim \nu_c$

Die Überlagerung vieler solcher Spektren, entsprechend einer Energieverteilung der Elektronen wird zu einem Potenzspektrum, wenn die Verteilung der Elektronen in der Energie ein Potenzspektrum ist

Klassifikation der Radioquellen

- Ausgedehnte Radioquellen werden oft in zwei Klassen eingeteilt:
 - **Faranof-Riley Typ I (FR I)** → am hellsten nahe am Kern, mit abnehmender Flächenhelligkeit nach außen; typischerweise $L_\nu (1.4 \text{ GHz}) \leq 10^{32} \text{ erg s}^{-1} \text{ Hz}^{-1}$
 - **Faranof-Riley Typ II (FR II) Quellen** → Flächenhelligkeit nach außen hin zu; typischerweise $L_\nu (1.4 \text{ GHz}) \geq 10^{32} \text{ erg s}^{-1} \text{ Hz}^{-1}$
 - FR II Radioquellen besitzen oft Jets -> ausgedehnte, lineare Strukturen, die den kompakten Kern mit einem der radio-Lobes verbinden
 - Jets zeigen häufig Struktur und Knicke -> ihre Erscheinung deutet an, dass sie vom Kern ausgehend Energie zur Radiokeule transportieren
 - Jets sind nicht symmetrisch; oft nur ein Jet; wenn zwei Jets gesehen werden ist meistens einer (counter jet) viel schwächer als der andere
 - Die relative Stärke von Kern, Jet und ausgedehnten Komponenten variiert zwischen Quellen und innerhalb der gleichen Quelle mit der Frequenz (da unterschiedlicher Spektralindex)
- => Radiokataloge von AGNs zeigen Auswahleffekte; solche bei niedrigen Frequenzen selektieren bevorzugt Quellen mit steilem Spektrum, dh mit dominanten ausgedehnten Strukturen; solche bei hohen Frequenzen selektieren Kern-dominierte Quellen mit flachem Spektrum

Klassifikation der Radioquellen



Radiogalaxie NGC 6251 mit nach unten hin steigender Winkelauflösung

auf großen Skalen (kleine ν) dominieren die beiden Radio-Lobes

bei höheren Frequenzen sieht man deutlich den Kern und die Jets

der counter jet hat deutlich geringere Leuchtkraft als der Hauptjet

Breite Emissionslinien

- Das UV - optische Spektrum der Quasare zeichnet sich durch starke, breite Emissionslinien aus: Balmer-Serie, Ly α des Wasserstoffs, MgII, CIII, CIV - diese Linien erscheinen in allen QS-Spektren
- Erinnerung: die **Äquivalentbreite einer Linie** ist definiert durch:

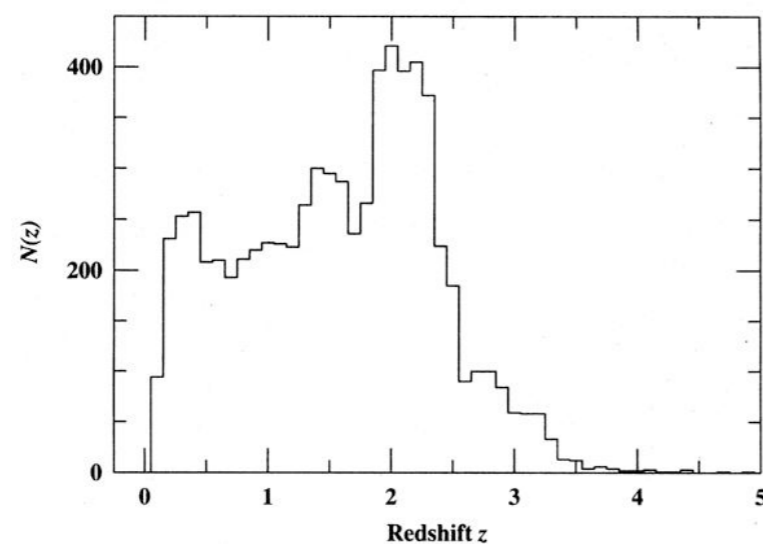
$$W_{\lambda} = \int d\lambda \frac{S_1(\lambda) - S_c(\lambda)}{S_c(\lambda)} \approx \frac{F_{line}}{S_c(\lambda_0)}$$

- mit $S_1(\lambda)$ = spektraler Fluss der Linie; $S_c(\lambda)$ = Fluss der Kontinuumsstrahlung, interpoliert über den λ -Bereich der Linie, λ_0 = Wellenlänge der Spektrallinie

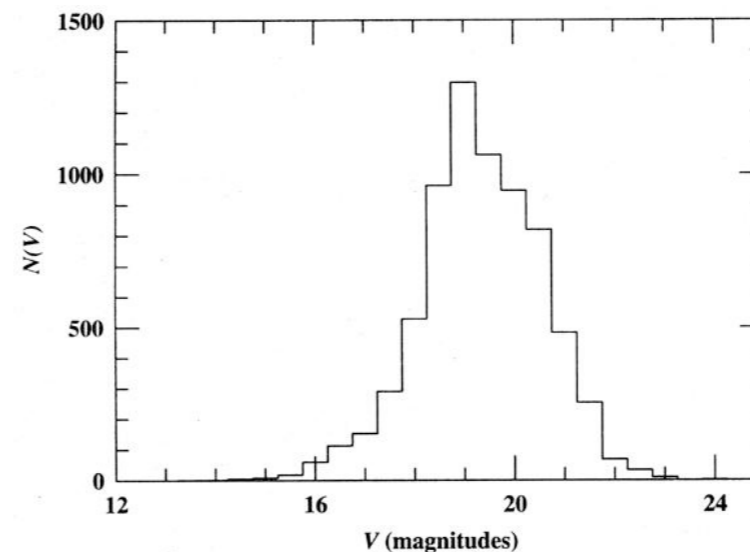
=> W_{λ} = Wellenlängen-Intervall, über das man Kontinuum integrieren müsste, um den gleichen Fluss wie den der Linie zu erhalten => **Äquivalentbreite = Maß für die Stärke einer Linie relativ zum Kontinuum**
- Breite der Linie wird folgendermassen charakterisiert: nach Subtraktion des Kontinuums wird die Breite bei der Hälfte der maximalen Linienintensität gemessen (FWHM); diese wird entweder in Å angegeben, oder in km/s wenn man Linienbreite als Doppler-Verbreiterung betrachtet
- Breite Emissionslinien in QSOs: FWHM ~ 10000 km/s, schmalere Emissionslinien von ~ mehrere 100 km/s (immer noch breit verglichen mit typischen v's in normalen Galaxien)

Rotverschiebung

- Quasar-Surveys sind stets Fluss-limitiert; zB haben Radio-Surveys $S_V > S_{lim}$
- Die optische Identifikation ergibt, dass Quasare eine sehr breite Rotverschiebungsverteilung besitzen; für Jahrzehnte waren QSOs die einzigen Quellen mit $z > 3$
- In 1993 Ausgabe des QSO-Katalogs von Hewitt & Burbidge: 7236 Quellen verzeichnet => zeigt die Breite der Rotverschiebungs- und Helligkeitsverteilung



Rotverschiebungsverteilung



Helligkeitsverteilung

- Die Leuchtkraftfunktion von Quasaren ist sehr breit - steil am Ende, flacher bei kleineren Leuchtkräften -> vgl. Galaxien: Schechter-Leuchtkraftfunktion fällt exponentiell ab für $L > L^*$, bei Quasaren ist der Abfall ein Potenzgesetz, also viel schwächer

Zoologie der AGNs

- **Quasare:** nur leuchtkräftigste Vertreter der AGN-Klasse (andere Beispiele sind Seyfert Galaxien)
- Allen AGNs gemeinsam: starke, nicht-thermische Emission im Kern einer Galaxie (host galaxy)
- **QUASARE:** die blaue Farbe der Quasare legte nahe, nach ihnen auch im Optischen zu suchen, dh nach punktförmigen Quellen mit blauer U-B Farbe
- Solche Farbexzess Suche war sehr erfolgreich, man fand viel mehr Quellen, als aufgrund Radio-Zählungen erwartet -> viele dieser Quellen sind radio-ruhig (dh keine starke Radiostrahlung), und auch:
 - blaue optische Energieverteilung (Suchkriterium!)
 - starke und breite Emissionslinien
 - hohe Rotverschiebung
- Diese Quellen verhalten sich wie Quasare, abgesehen von den Radioeigenschaften => "Radio-ruhige Quasare" oder quasi-stellar Objects QSO; Unterschied zwischen Radio-ruhigen und Radio-lauten Quasaren ist aber graduell; es gibt etwa 10 mal mehr radio-ruhige Quasare
- QSOs: leuchtkräftigste Vertreter der AGNs; ihre Kernleuchtkraft kann das Tausendfache von L^* -Galaxien erreichen, überstrahlen damit ihre host-Galaxien und erscheinen punktförmig
- Für QSO mit kleineren L hat das HST die host-Galaxien entdeckt und aufgelöst
- AGNs: aktive Kerne von (normalen ?) Galaxien

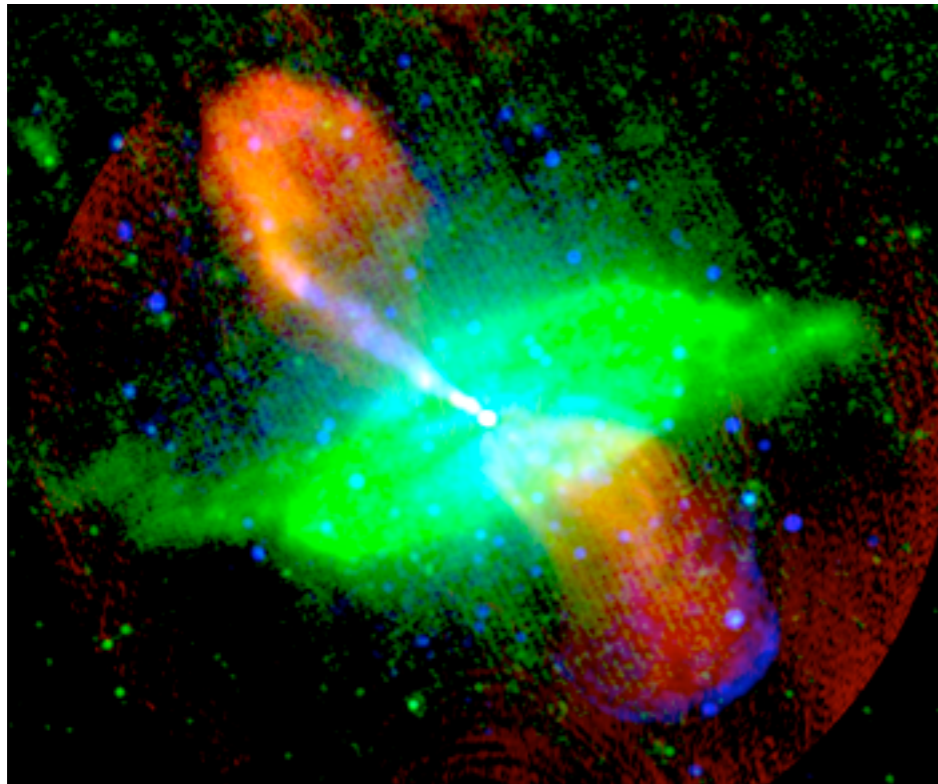
Seyfert Galaxien

- Seyfert Galaxien waren die zuerst bekannten AGNs; ihre Leuchtkraft ist wesentlich kleiner als diejenige von Quasaren
- Seyfert Galaxien sind Spiralgalaxien; man unterscheidet zwischen Typ 1 und Typ 2:
 - Seyfert 1: sowohl sehr breite, als auch schmalere Emissionslinien
 - Seyfert 2: nur die schmalen Linien (einige 100 km/s)
- es gibt Zwischenstufen (Seyfert 1.5, Seyfert 1.8) in denen sehr breite Linien zwar vorhanden sind, aber viel schwächer als in Seyfert 1
- Optisches Spektrum von Seyfert 1: sehr ähnlich dem von QSOs, es gibt fließender Übergang zwischen (radio-ruhigen) QSOs und Seyfert 1; formell werden sie getrennt bei $M_B = -21.5 + 5 \log(h)$
- Die Trennung von Seyfert 1 und QSOs ist historisch bedingt; nicht physikalisch, oft werden beide Typen zusammengefasst als Typ I AGNs



Radiogalaxien

- Radiogalaxien sind elliptische Galaxien mit nuklearer Aktivität
- Ähnlich wie bei Seyfert Galaxien unterscheidet man solche mit (BLRG - broad line radio galaxies) und ohne (NLRG - narrow line radio galaxies) breite Emissionslinien
- Im Prinzip kann man die beiden Typen von Radiogalaxien als Radio-laute Seyfert Typ 1 und Typ 2 betrachten
- Der Übergang von BLRG und Quasaren ist fließend, wiederum bedingt durch optische Leuchtkraft



Radiogalaxie Centaurus A

radio (rot)

24 μm IR (grün)

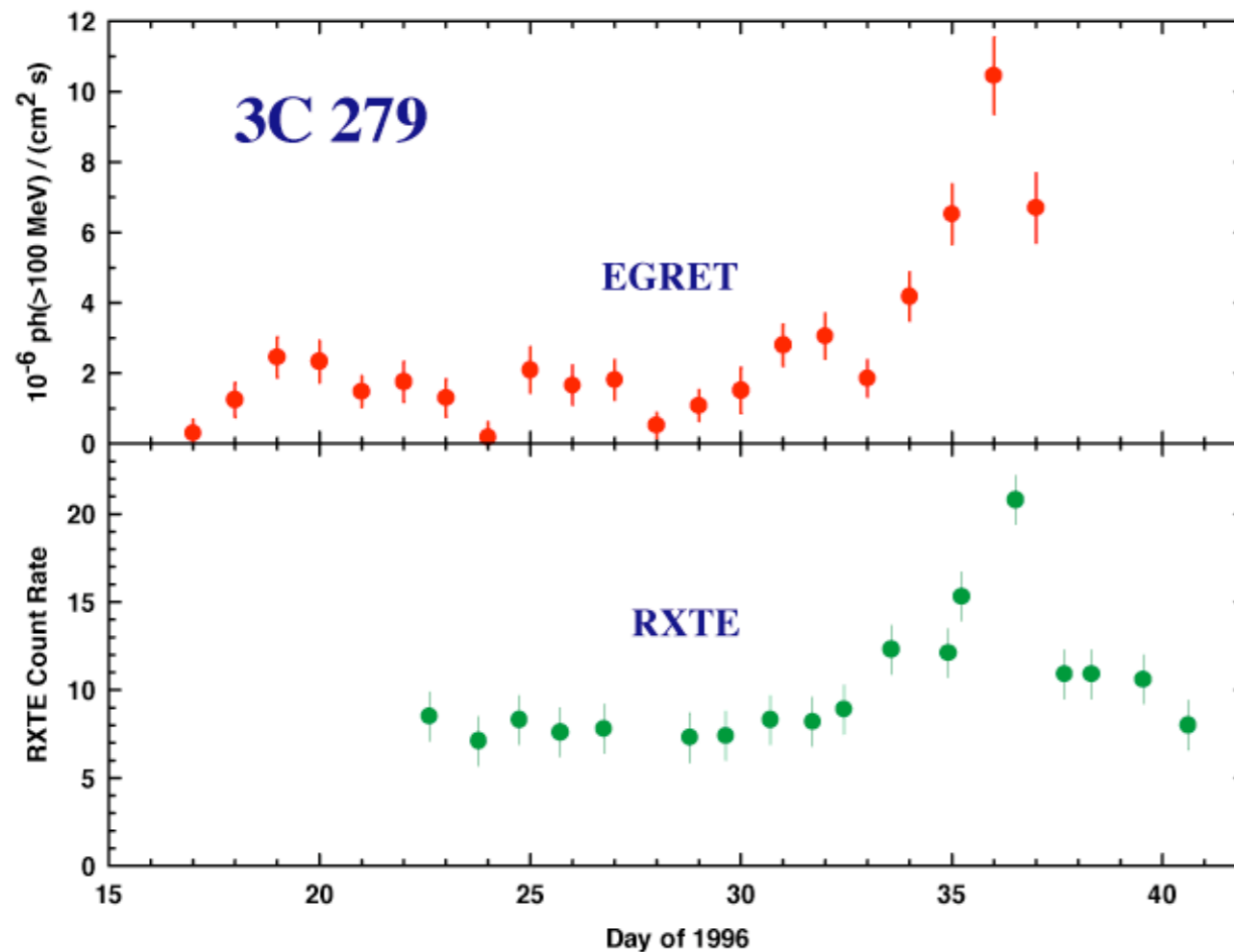
0.5 - 5 keV Röntgen (blau)

Jet: Synchrotronemission in allen 3 λ -
Bereichen

Lobes: nur in Radio-Emission (daher rot)

OVVs

- AGNs mit Charakteristiken von Quasaren, aber zusätzlich stark variierende optische Strahlung auf kurzen Zeitskalen (Tage oder kürzer)
- OVVs: Optically Violent Variables
- Optische Strahlung: Polarisation von einigen % (normale QSOs: Polarisation unterhalb $\sim 1\%$).



Variabilität des Blazars 3C 279 in Gamma-Strahlung bei $E_\gamma > 100 \text{ MeV}$ (oben) und im Röntgenbereich (unten)

Die Leuchtkraft variiert auf Zeitskalen von wenigen Tagen um einen Faktor ~ 10

BL Lac Objekte

- Diese Objekte sind benannt nach der Prototyp-Quelle BL Lacertae
- AGNs mit sehr stark variierender Strahlung, wie OVV, aber ohne starke Emissions- oder Absorptionslinien; auch hoch-polarisiert
- In Zeiten kleiner Leuchtkraft sind manchmal Emissionslinien zu erkennen, ein BL Lac erscheint dann wie ein OVV
- OVV und BL Lac werden in der Klasse der **Blazars** zusammengefasst; alle bekannten Blazars sind Radio-Quellen und sie zeigen auch hoch-energetische Gammastrahlung

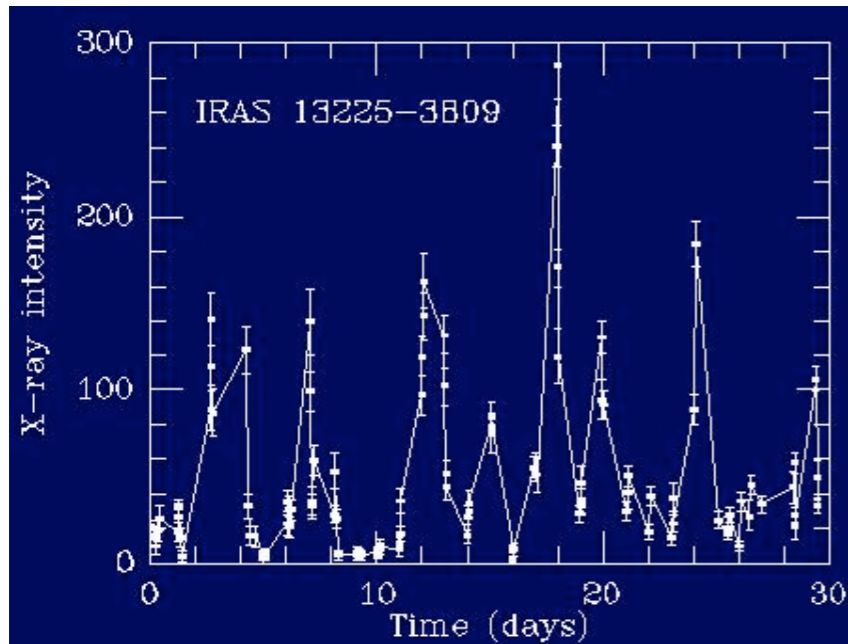


AGNs: Übersicht

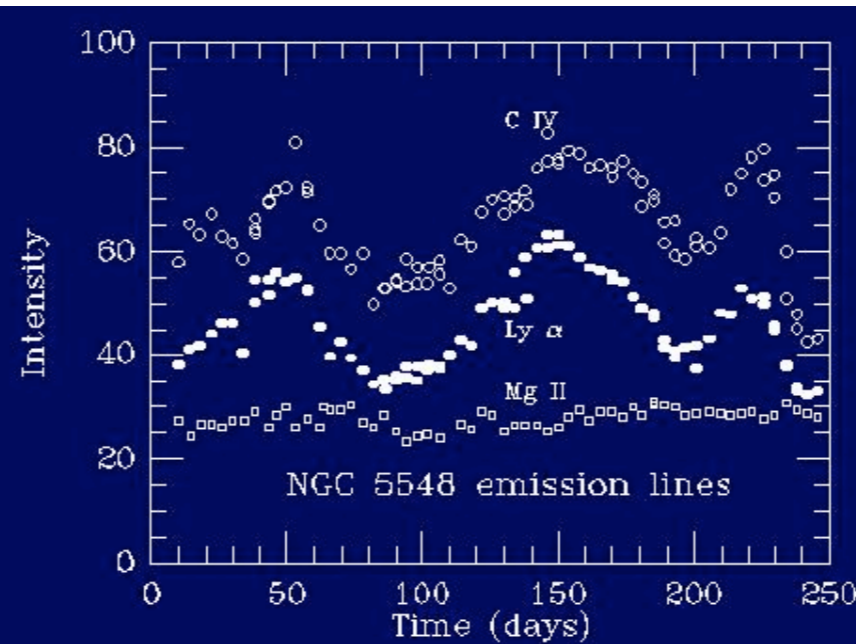
A Bestiary of Active Galactic Nuclei					
Type	Normal Galaxy	Radio Galaxy	Seyfert Galaxy	Quasar	Blazar
Examples	Milky Way	M87 , Cygnus A	NGC4151	3C273	BL Lac, 3C279
Galaxy Type	Spiral	Elliptical, irregular	Spiral	Irregular	Elliptical?
Luminosity (Solar units)	$< 10^4$	$10^6 - 10^8$	$10^8 - 10^{11}$	$10^{11} - 10^{14}$	$10^{11} - 10^{14}$
Central Mass (Solar units)	2.6×10^6	3×10^9	$10^6 - 10^9$	$10^6 - 10^9$	$10^6 - 10^9$
Radio	Faint	Central object + jets+lobes	Only 5% are radio bright	Only 5% are radio bright	Bright, rapidly variable
Optical/IR	Totally obscured	Pop II stars continuum	Broad Emission lines	Broad Emission lines	Spectral lines weak or absent
X-rays	Faint	Bright	Bright	Bright	Bright
Gamma Rays	Faint	Faint	Moderate	Bright	Bright
Variability timescale	Unknown	Months - years	Hours - months	Weeks - years	Hours - years

AGNs: Lichtkurven und Emissionslinien

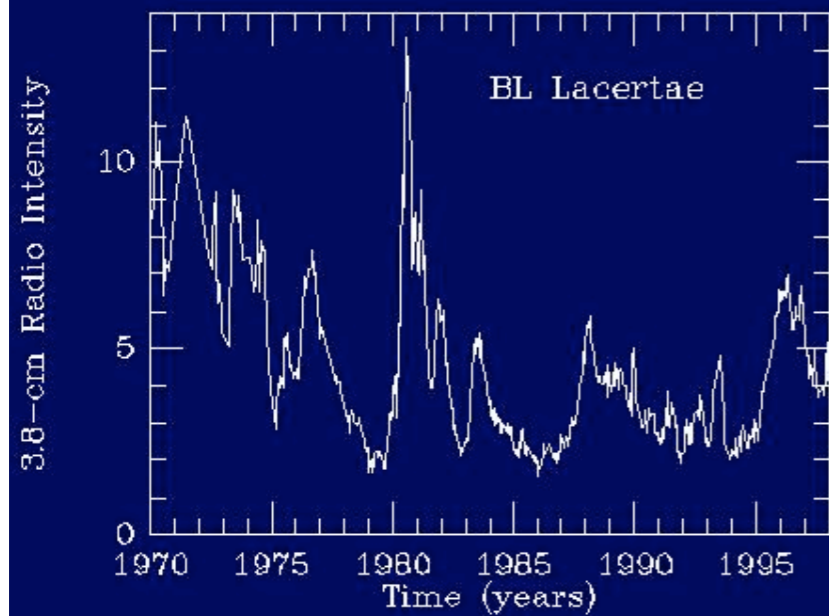
Lichtkurve der Seyfert 1 IRAS
13224-3809 im **Röntgenbereich**



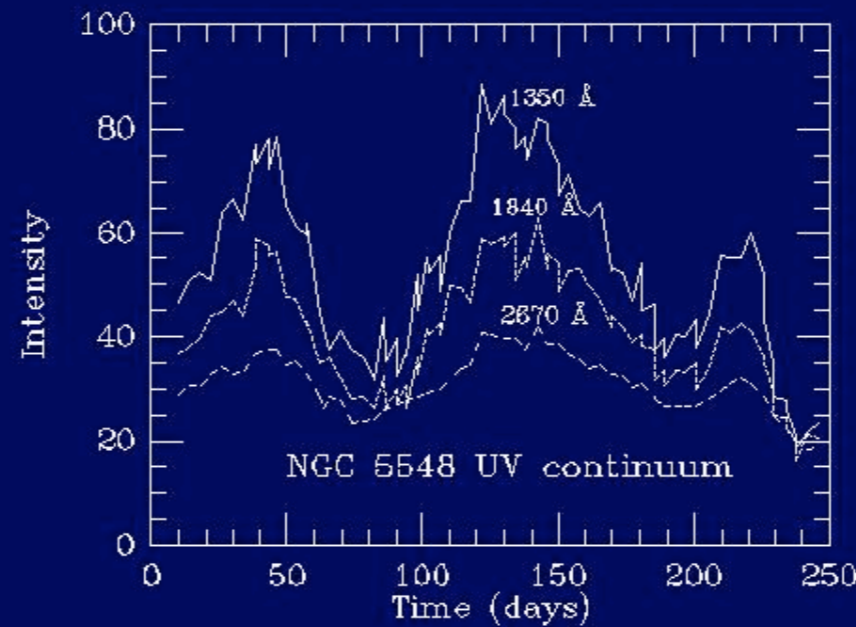
Linienstärken von 3 breiten Emissionslinien
der NCG 5548 (Seyfert 1)



Quasare, BL Lac Objekte und Seyfert Galaxien zeigen deutliche Variabilität bei den verschiedensten Wellenlängen



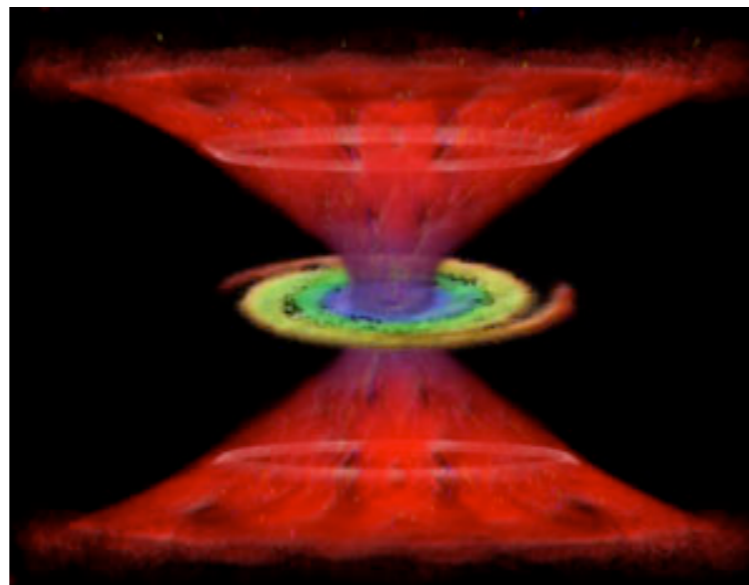
Radio Lichtkurve der BL Lacertae bei $\lambda = 3.8$ cm über 28 Jahren



UV-Variation der NCG 5548 (Seyfert 1) bei 3 Wellenlängen

Die zentrale Maschine: ein Schwarzes Loch

- Fundamentale Beobachtungstatsachen für AGNs:
- **Ausdehnung einiger Radioquellen in AGN ≥ 1 Mpc**
 - > selbst wenn sich Radioquelle vom Kern her mit Lichtgeschwindigkeit ausdehnt, wäre Lebensalter einer solchen Quelle $\tau \geq 10^7$ Jahre
- **Leuchtkräftige QSOs haben Leuchtkraft $L_{\text{bol}} \sim 10^{47}$ erg/s**
 - > nimmt man an, dass die Leuchtkraft der Quelle nicht stark über ihren Lebenszeitraum variiert, so ist die Gesamtenergie $E \geq 10^{47} \text{ erg/s} \times 10^7 \text{ yr} \sim 3 \times 10^{61} \text{ erg}$
- **Einige AGNs variieren auf Zeitskalen von einem Tag um mehr als 50% in ihrem Fluss**
 - > Ausdehnung der zentralen Quelle $R \leq 1$ Lichttag $\sim 3 \times 10^{15} \text{ cm}$



<http://chandra.harvard.edu/>

Warum Schwarzes Loch?

- Die effizienteste “klassische” Methode der Energieerzeugung -> Kernfusion, wie in Sternen. Wir nehmen an, dass die Energieerzeugung durch thermonukleare Prozesse stattfindet:
 - die maximale Effizienz des Prozesses ist $\epsilon \lesssim 0.008$, wobei ϵ = Massenanteil des Brennstoffs, der in Energie umgewandelt wird

$$E = \epsilon mc^2$$

bei Verbrennung von H nach Fe werden 8 MeV/Nukleon frei, oder $0.008 m_p c^2$.

- um durch diesen Prozess $E = 3 \times 10^{61}$ erg zu erzeugen, braucht man eine Gesamtmasse m an Brennstoff:

$$m = \frac{E}{\epsilon c^2} \sim 4 \times 10^{42} \text{ g} \sim 2 \times 10^9 M_\odot$$

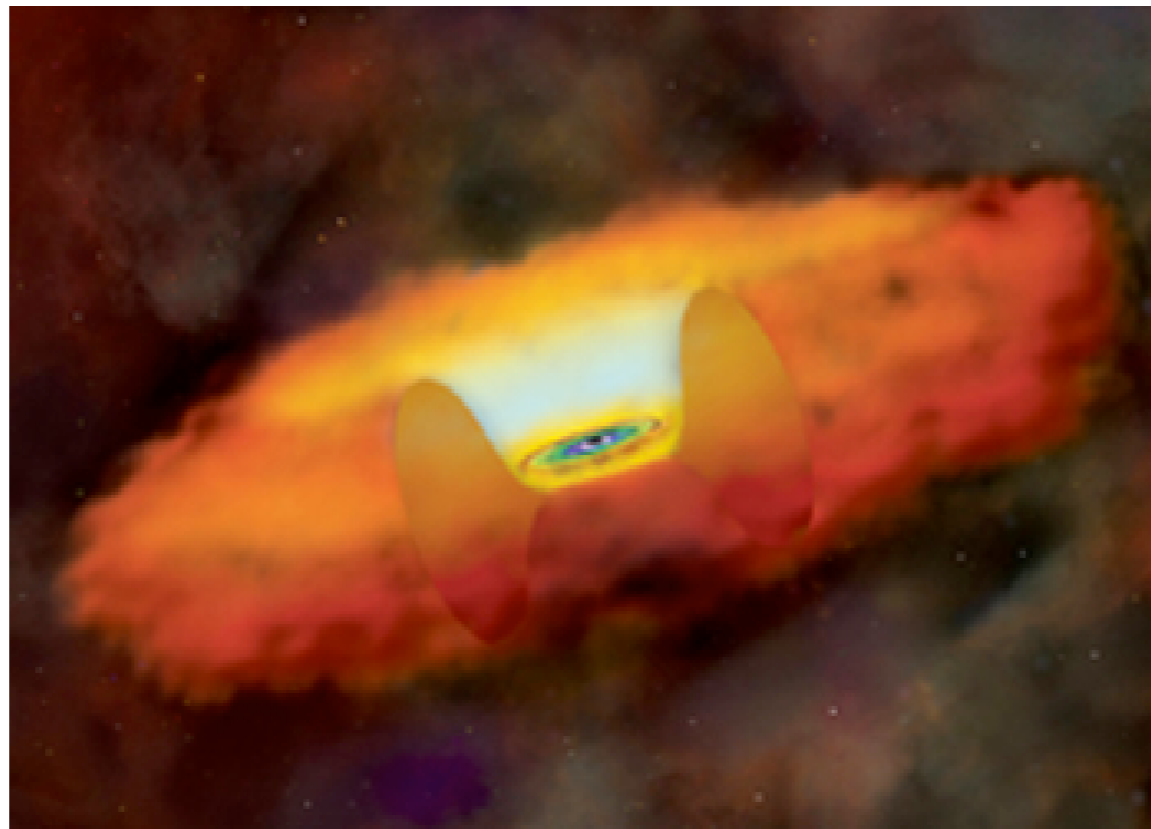
- der Schwarzschild-Radius dieser Masse ist:

$$r_s = \frac{2Gm}{c^2} = \frac{2GM_\odot}{c^2} \frac{m}{M_\odot} = 3 \times 10^5 \text{ cm} \frac{m}{M_\odot} \sim 6 \times 10^{14} \text{ cm}$$

=> Schwarzschildradius der ‘nuklearen Asche’ ist von der gleichen Größenordnung wie obige Abschätzung der Ausdehnung der zentralen Quelle => gravitative Effekte sind dominant; Annahme der thermonuklearen Energiegewinnung ist falsch, da die Effizienz ϵ zu klein ist

Warum Schwarzes Loch?

- Der einzig bekannte Mechanismus mit größerem ϵ ist die gravitative Energiegewinnung
 - durch Einfall von Materie auf zentrales Schwarzes Loch gewinnt das Material (Gas) kinetische Energie
 - falls es möglich ist, ein Teil der gerichteten Bewegungsenergie in innere Energie umzuwandeln und diese abzustrahlen, kann ϵ größer sein
 - $\epsilon \sim 0.06$ für ein Schwarzes Loch, das nicht rotiert (Schwarzschild SL, hat keinen Drehimpuls)
 - $\epsilon \sim 0.29$ für ein Schwarzes Loch mit maximal erlaubten Drehimpuls (maximal rotierendes Kerr SL)



http://chandra.harvard.edu/resources/illustrations/agn/agn_ill_5.html

Akkretion

- Gas, das in ein SL einfällt, verliert potentielle Energie, die in kinetische Energie umgewandelt wird
- Falls der Einfall durch nichts verhindert wird, fällt das Gas in das SL, ohne Energie anzustrahlen
 - iA wird erwartet, dass das Gas Drehimpuls besitzt, dadurch kann es nicht direkt auf das SL fallen (Drehimpulserhaltung)
 - durch Reibung mit anderen Gasteilchen und damit verbundener Impulsaustausch wird sich das Gas in eine Scheibe ansammeln, senkrecht zur Richtung des Drehimpulses
 - falls die Reibungskräfte im Gas sehr viel kleiner als die Gravitationskraft sind, wird die Scheibe lokal mit \sim Keplergeschwindigkeit rotieren
 - da eine Keplerscheibe differentiell rotiert (Winkelgeschwindigkeit hängt vom Radius ab), sorgt die Reibung für die Aufheizung des Gases in der Scheibe \rightarrow die Rotationsgeschwindigkeit wird etwas abgebremst, dadurch findet ein Einströmen des Materials statt
 - die Energie zum Heizen des Gases der Scheibe kommt wiederum durch dieses Einströmen \rightarrow Umsetzung der potentiellen Energie
- Entsprechen dem Virialtheorem wird die Hälfte der freigesetzten potentiellen Energie in kinetische Energie umgewandelt, die andere Hälfte in innere Energie (Wärme)

Akkretion

- Wir nehmen an, Masse m fällt vom Radius $r+\Delta r$ nach r ; die freigesetzte Energie ist:

$$\Delta E = \frac{GM_{SL}m}{r} - \frac{GM_{SL}m}{r + \Delta r} \approx \frac{GM_{SL}m}{r} \frac{\Delta r}{r}$$
$$E_{\text{wärme}} = \frac{\Delta E}{2} \quad \text{innere Energie}$$

- wir nehmen weiterhin an, dass die Energie lokal abgestrahlt wird. Die zugehörige Leuchtkraft L beträgt:

$$\Delta L = \frac{GM_{SL}\dot{m}}{2r^2} \Delta r$$

- **dm/dt = Akkretionsrate** → Masse, die pro Zeiteinheit auf das SL fällt; im stationären Zustand ist diese unabhängig vom Radius (sonst würde sich bei bestimmten Radien Masse ansammeln)
- Falls Scheibe optisch dick → die lokale Abstrahlung ist eine Schwarzkörperstrahlung. Der Ring zwischen r und $r + \Delta r$ strahlt dann die Leuchtkraft (Faktor 2 da Scheibe 2 Seiten, “oben”, “unten”):

$$\Delta L = 2 \times 2\pi r \Delta r \sigma_{SB} T^4(r)$$

- Aus den beiden letzten Gleichungen folgt für die **Temperatur der Scheibe**:

$$T(r) = \left(\frac{GM_{SL}\dot{m}}{8\pi\sigma_{SB}r^3} \right)^{1/4}$$

Akkretion

- Eine genauere Herleitung betrachtet auch die Dissipation durch Reibung; dies ergibt bis auf Korrekturen das gleiche Resultat:

$$T(r) = \left(\frac{3GM_{SL}\dot{m}}{8\pi\sigma_{SB}r^3} \right)^{1/4} \quad \text{für } r \gg r_S$$

- Wir skalieren r mit dem Schwarzschildradius r_S und erhalten:

$$T(r) = \left(\frac{3GM_{SL}\dot{m}}{8\pi\sigma_{SB}r_S^3} \right)^{1/4} \left(\frac{r}{r_S} \right)^{-3/4}$$

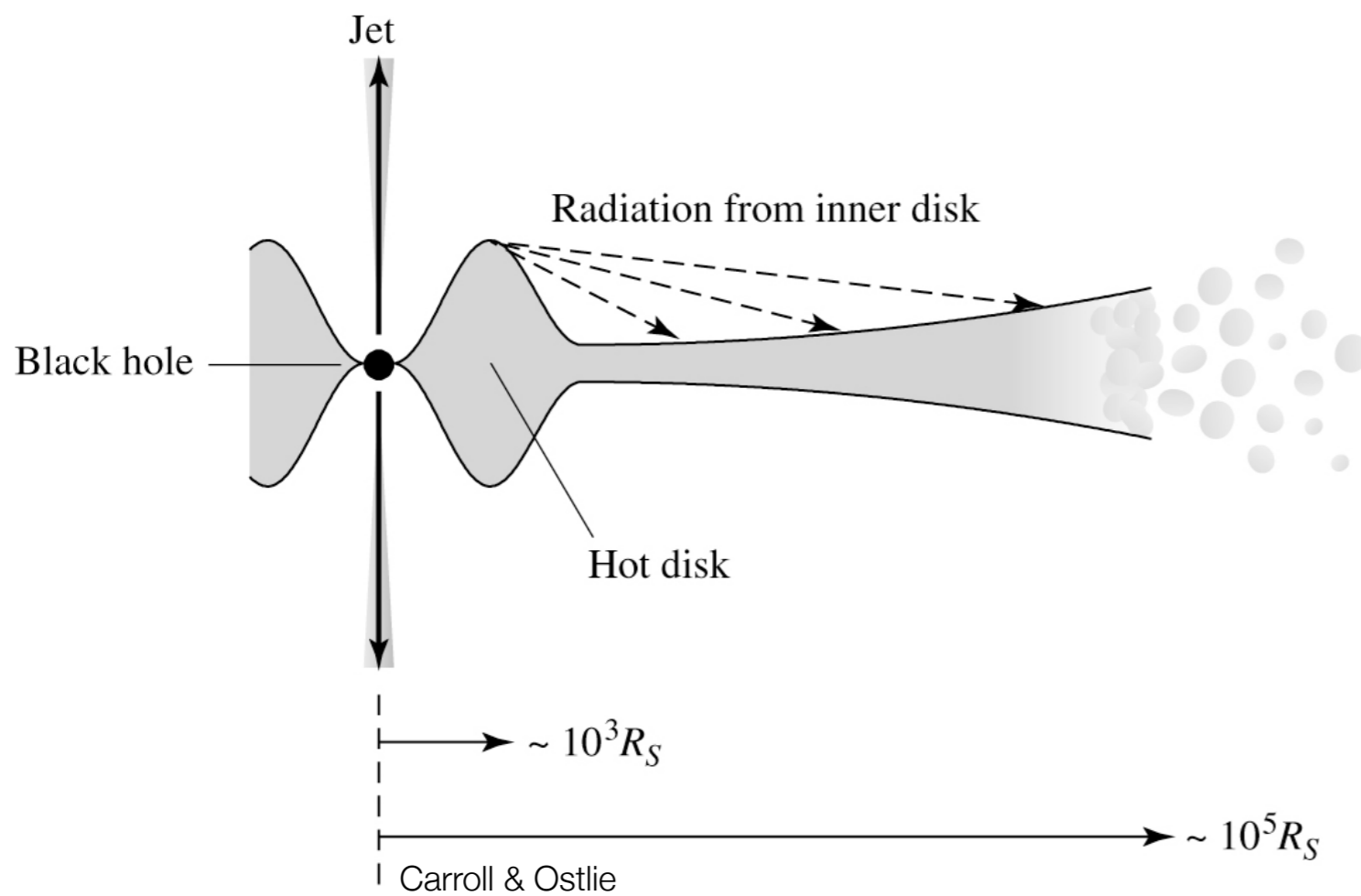
- Weiterhin ersetzen wir r_S im ersten Faktor mit $r_S = \frac{2GM_{SL}}{c^2}$. Die Temperatur lässt sich damit auch schreiben als:

$$T(r) = \left(\frac{3c^2}{64\pi\sigma_{SB}G^2} \right)^{1/4} \dot{m}^{1/4} M_{SL}^{-1/2} \left(\frac{r}{r_S} \right)^{-3/4}$$

Akkretion: Schlussfolgerungen

- Das Temperaturprofil der Scheibe hängt nicht vom detaillierten Mechanismus der Dissipation ab - die Gleichungen enthalten nicht die Viskosität; obwohl der Mechanismus der Dissipation nicht genau bekannt ist, erlaubt dieses Modell der **geometrisch dünnen, optisch dicken** Akkretionsscheibe quantitative Aussagen:
- Die **Temperatur** nimmt wie erwartet nach Innen zu, mit $T(r) \propto r^{-3/4}$
- Die **Gesamtemission** der Scheibe ist daher eine **Überlagerung von Schwarzkörperstrahlern** (Ringe bei verschiedenen Radien) mit verschiedenen Temperaturen => das resultierende Spektrum hat keine Planck-Form, sondern ist ein sehr viel breiteres Spektrum
- Für **festes Verhältnis r/r_s steigt die Temperatur mit der Akkretionsrate an** -> dies wird erwartet: da die lokale Abstrahlung $\propto T^4$ und lokale dissipierte Energie $\propto dm/dt$, muss $T \propto (dm/dt)^{1/4}$ sein
- Für **festes Verhältnis r/r_s fällt die Temperatur mit der Masse M_{SL} des Schwarzen Loches ab!** Je massiver das SL, umso kleiner die Temperaturen, die erreicht werden können
 - => die maximale Temperatur der Scheibe in AGN ist sehr viel niedriger als bei Akkretionsscheiben stellarer Quellen
 - => die Akkretionsscheiben um Neutronensterne und stellaren Schwarzen Löchern strahlen im harten Röntgenbereich (X-ray binaries); die thermische Strahlung der Scheibe in AGNs ist im UV-Bereich

Akkretion: Schlussfolgerungen



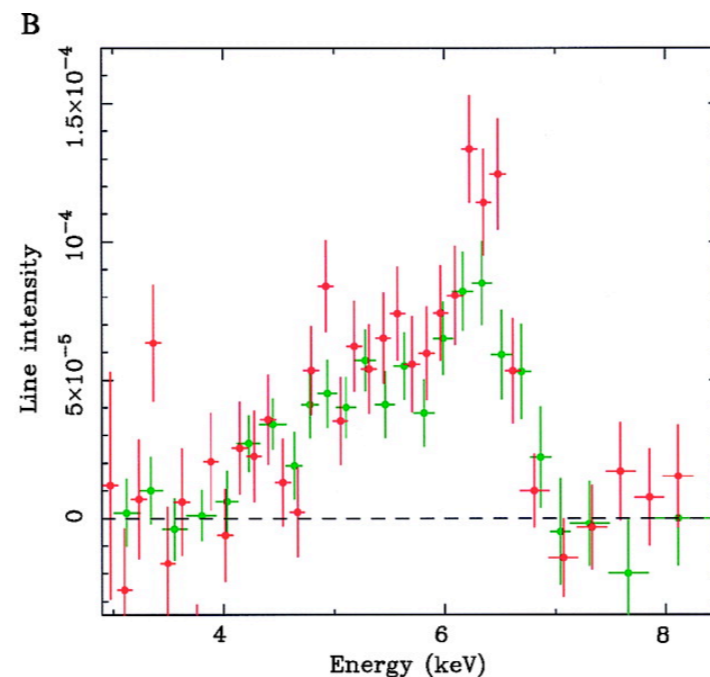
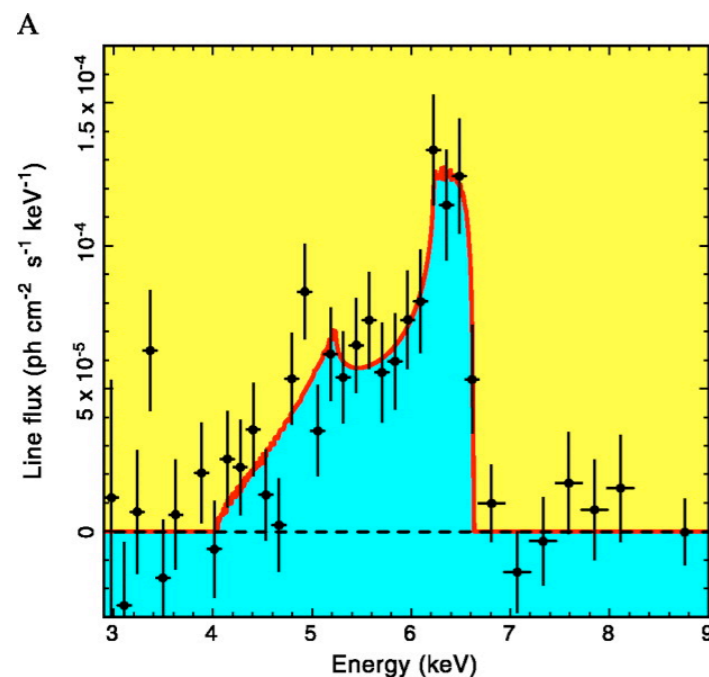
Innerster Bereich der Akkretionsscheibe

- durch die hohen Temperaturen im Innersten kann der Druck dominiert werden vom Strahlungsdruck innerhalb der Scheibe => Aufblähen der Scheibe, die dicker wird
- Strahlung vom dicken Teil der Scheibe kann auf den dünnen Teil treffen und reflektiert werden
- diese Reflektion ist eine plausible Erklärung der Röntgenspektren von AGNs

$$10^5 R_S \approx 1 \text{ pc für } M_{\text{SL}} = 10^8 M_{\odot}$$

Weitere Argumente für supermassive Schwarze Löcher

- Die Richtung der Jets ist auf Millibogensekunden-Skala praktisch identisch mit der Richtung von Jets auf viel größeren Skalen (auch mit Richtung der Radio-Lobes) => die zentrale Maschine muss “Langzeitgedächtnis” haben - die Ausströmrichtung ist stabil über $\sim 10^7$ Jahre
 - > ein rotierendes SBH ist ideales Gyroskop; die Richtung ist durch den Drehimpulsvektor festgelegt
- Ein SBH ist natürlicher stabiler Endzustand einer sehr kompakten Massenverteilung
- Deutliche Hinweise für SBH existieren für viele ‘normale’ Galaxien, inklusiv der Milchstraße
- Beobachtungen einer Fe-Linie mit Ruheenergie $h\nu=6.53$ keV in Seyfert Galaxien gibt klaren Hinweis darauf, dass die Emission aus einem Bereich einer Akkretionsscheibe stammt, der sich innerhalb weniger Schwarzschildradien von einem SBH befindet



Spektrale Form der breiten Fe-Linie der Seyfert 1 Galaxie MCG-6-30-15

Falls Emission in Ruhe => schmale Linie bei 6.35 keV

Linie: breit, stark asymmetrisch, nach kleineren Energien hin verschoben

Modell (rote Linie): Scheibe um SL, die im Radiusbereich $r_s \leq r \leq 20r_s$ strahlt

Massenabschätzung des SBH

- Die Energieerzeugung in AGN erfolgt durch Akkretion von Materie auf SBH -> die im zentralen Bereich erzeugte Strahlung propagiert nach außen -> diese Strahlung kann mit der einfallenden Materie wechselwirken (sie kann absorbiert oder gestreut werden)
- Durch die Wechselwirkung von (nach außen gerichteter) Strahlung mit Materie wird Impuls auf Materie übertragen, dh es wirkt eine nach außen gerichtete Strahlungskraft auf die einfallende Materie
- Wir betrachten vollständig ionisiertes Gas. Die Wechselwirkung von Strahlung mit diesem Gas ist im Wesentlichen Streuung der Photonen mit Elektronen → Thomson Streuung. Die Strahlungskraft auf ein Elektron bei Radius r ist dann:

$$F_{rad} = \sigma_T \frac{L}{4\pi r^2 c}$$

- mit dem Thomson Wirkungsquerschnitt (unabhängig von der Frequenz der Photonen)

$$\sigma_T = \frac{8\pi}{3} \left(\frac{e^2}{m_e c^2} \right)^2 = 6.65 \times 10^{-25} \text{ cm}^2$$

-> das Strahlungsfeld hat die gleiche Radiusabhängigkeit wie die Gravitationskraft, $\propto r^{-2}$! Damit Materie einfallen kann (und somit Energie erzeugt werden kann) muss die Strahlungskraft kleiner als die Gravitationskraft sein.

Massenabschätzung des SBH

- Für jedes Elektron existiert ein Proton (die beiden Teilchensorten sind elektromagnetisch aneinander gekoppelt), so dass die Gravitationskraft pro Elektron/Proton Paar:

$$F_{grav} = \frac{GM_{SL}m_p}{r^2}$$

- Die Bedingung $F_{rad} < F_{grav}$ lautet:

$$\frac{\sigma_T L}{4\pi r^2 c} < \frac{GM_{SL}m_p}{r^2}$$

- oder, mit der Definition der [Eddington Leuchtkraft](#) L_{edd} eines SL mit Masse M_{SL} :

$$L < L_{edd} \equiv \frac{4\pi Gc \cdot m_p}{\sigma_T} M_{SL}$$

=> damit Masse einfallen kann, muss $L < L_{edd}$ sein

=> umgekehrt: falls Leuchtkraft L beobachtet wird, kann man daraus $L_{edd} > L$ folgern, oder:

Massenabschätzung des SBH

$$M > M_{\text{edd}} \equiv \frac{\sigma_T}{4\pi Gc \cdot m_p} L \approx 8 \times 10^7 \left(\frac{L}{10^{46} \text{ erg / s}} \right) M_{\odot}$$

=> aus Leuchtkraft kann man daher untere Schranke für die Masse des SBH ableiten

- für leuchtkräftige AGNs, wie QSOs, leitet man typische Massen $M_{\text{SL}} > 10^8 M_{\odot}$ ab
- Seyfert Galaxien haben als untere Schranke $M_{\text{SL}} > 10^6 M_{\odot}$ → SBH in Milchstraße könnte im Prinzip eine Seyfert Galaxie betreiben
- da σ_T unabhängig von der Photonenfrequenz, ist Leuchtkraft in obiger Betrachtung immer die bolometrische Leuchtkraft

Bemerkung: es wurde implizit angenommen, dass die Emission der Strahlung isotrop ist; falls Emission anisotrop kann man Leuchtkräfte größer als L_{edd} erhalten, jedoch nicht um sehr großen Faktor

- Falls die Umsetzung der einfallenden Masse in Energie mit Effizienz ϵ geschieht, kann man die Akkretionsrate bestimmen:

$$\dot{m} = \frac{L}{\epsilon c^2} \approx 0.18 \frac{1}{\epsilon} \left(\frac{L}{10^{46} \text{ erg / s}} \right) \left(\frac{M_{\odot}}{1 \text{ yr}} \right)$$

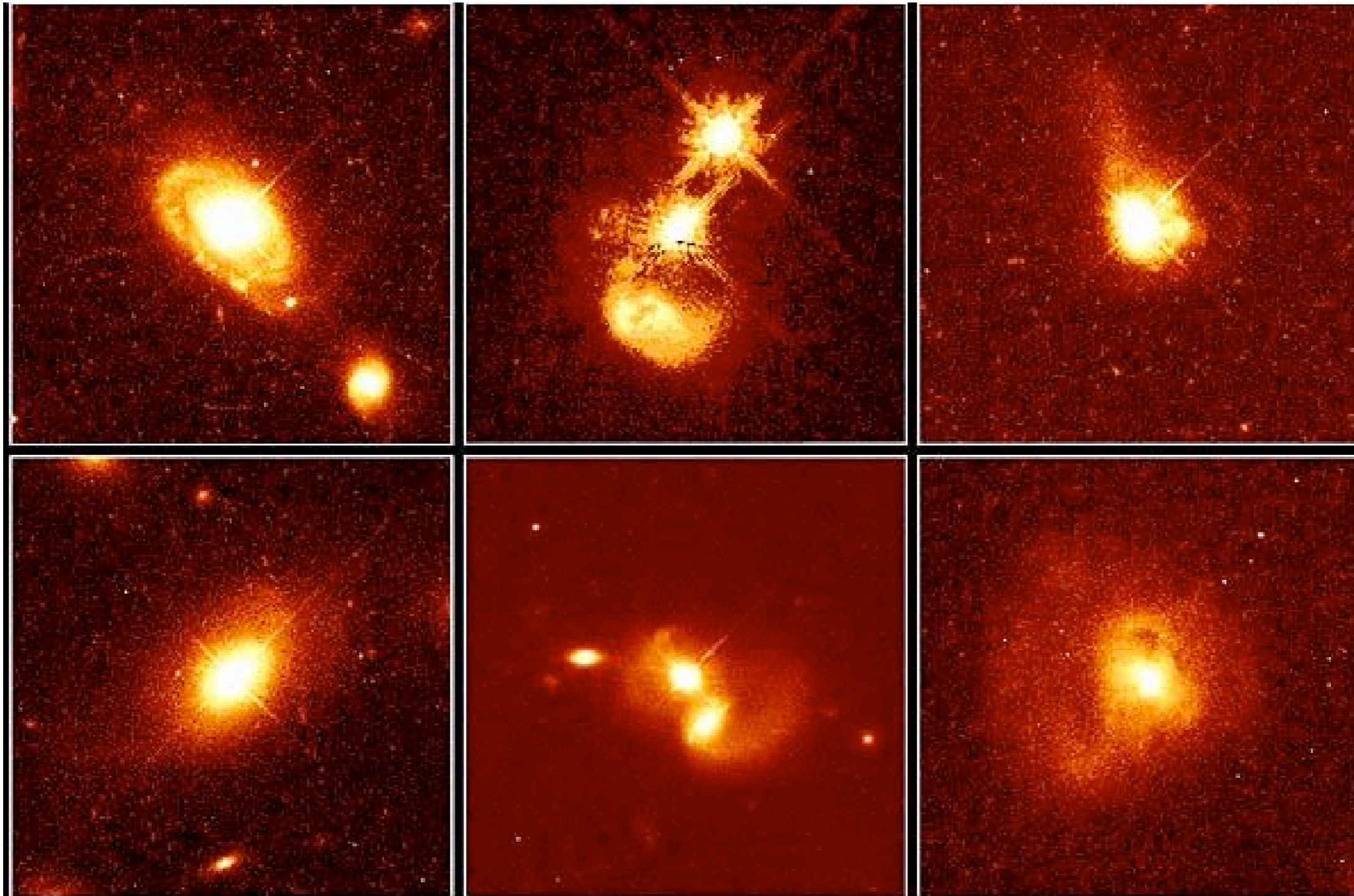
=> Akkretionsraten von einigen Sonnenmassen/Jahr bei sehr leuchtkräftigen QSOs.

Die Host Galaxie

- AGNs werden als 'zentrale Maschine' in Galaxien betrachtet -> gespeist durch Akkretion auf SBH
- Da scheinbar alle Galaxien (mit Bulge) ein SBH beheimaten, ist die Frage der Aktivität eine nach der Akkretionsrate:
 - wodurch gelangt Material in die Nähe des SBH?
 - was macht eine Seyfert Galaxie zu einer solchen, was einen QSO?
- Lange Zeit war unklar, ob auch QSO in einer Galaxie beheimatet sind -> die Abbildung der Host Galaxie wurde erst mit dem HST möglich (siehe nächste Seite)
- Es stellt sich heraus, dass die Host Galaxie von QSO oft stark gestört sind, durch Gezeitenwechselwirkungen oder durch Verschmelzprozesse
- Solche Störungen des Gravitationspotentials werden als essentiell angesehen, damit Gas die Drehimpulsbarriere überwindet und ins Zentrum gelangt
- Diese Störungen lassen gleichzeitig auch die Sternentstehungsrate enorm ansteigen (Starburst Galaxien): AGN Aktivität und Starbursts findet man häufig zusammen

Die Host Galaxie

HST Aufnahmen von QSOs: in allen Fällen ist die Host Galaxie deutlich zu sehen; QSO selbst = zentrale Punktquelle



Einheitliches Modell der AGNs

- Im Rahmen des Modells SBH + Akkretionsscheibe gibt es einen weiteren Parameter, die Richtung, in der wir AGNs beobachten (oder **Richtung des Sehstrahls relativ zur Achse der Akkretionsscheibe**). Es gibt viele Hinweise darauf, dass Erscheinungsbild des AGNs von dieser Richtung abhängig ist:

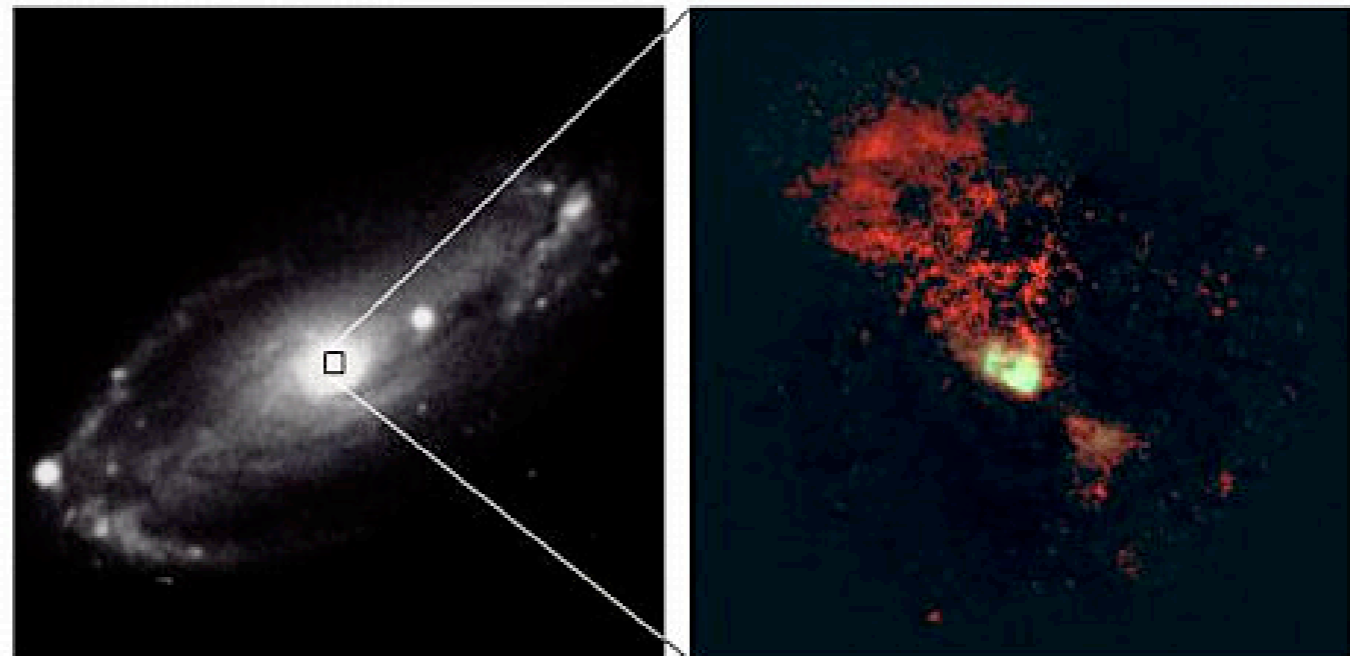
die ionisierende Strahlung der AGNs wird nicht isotrop emittiert, sondern bevorzugt entlang zweier Richtungen, senkrecht zur Scheibe der Host Galaxie (daher vermutlich auch senkrecht zur zentralen Akkretionsscheibe)

Seyfert Galaxie NGC5728

Links: großskalige Aufnahme, auf der die Scheibengalaxie zu sehen ist

Rechts: HST Aufnahme des zentralen Bereichs im Filter einer schmalen Emissionslinie

NGC 5728 Hubble Space Telescope *Wide Field / Planetary Camera*



Ground View

HST View

<http://seds.org/hst/ngc5728.html>

Einheitliches Modell der AGNs

- Wir haben bisher verschiedene Typen von AGNs aufgelistet; es gibt jedoch viele Eigenschaften, die ihnen gemeinsam sind, und auch deutliche Unterschiede.
- **Frage: woher stammen diese? Oder - was sind die physikalischen Unterschiede der AGNs?**
- **Vermutete Gemeinsamkeiten:**
 - SBH als zentrale Maschine, im Zentrum der Host Galaxie
 - Akkretionsscheibe, die das Schwarze Loch füttert
- Dies legt nahe, eine Klassifizierung bezüglich M_{SL} und der Akkretionsrate dm/dt , oder vielleicht relevanter, das Verhältnis $(dm/dt)/(dm_{\text{edd}}/dt)$ durchzuführen
- Beobachtete Eigenschaften suggerieren: radio-ruhige Quasare und Seyfert 1 unterscheiden sich nur in ihrer Leuchtkraft, daher sollten sie ähnliches $(dm/dt)/(dm_{\text{edd}}/dt)$ haben, sich aber in M_{SL} unterscheiden; das Gleiche gilt für den Übergang von BLRG zu radio-lauten Quasaren
- Der Unterschied zwischen diesen beiden Klassen liegt vielleicht in der Natur der Host Galaxie: Radiogalaxien (und radio-laute QSOs?) befinden sich in elliptischen Galaxien, Seyfert Galaxien (und radio-ruhige QSOs?) in Spiralen
- **Frage: wie passen die Blazars und die Seyfert 2 Galaxien in dieses Schema?**

Einheitliches Modell der AGNs

- **Weitere Hinweise, dass die Beobachtungsrichtung eine Rolle spielt:**

- die Radioemission, bzw die Morphologie - die Radio-Lobes und Jets definieren eine Vorzugsachse
- das Röntgenspektrum vieler AGNs zeigt intrinsische (photoelektrische) Absorption, hervorgerufen durch große Säulendichten von Gas, allerdings hauptsächlich bei Typ 2 Seyfert Galaxien

- **Weitere Beobachtung:** die Galaxie NGC1068 (M77) hat keine breiten Emissionslinien, wird daher als Seyfert 2 Galaxie eingruppiert; das Spektrum im polarisierten Licht zeigt dagegen breite Emissionslinien, quasi wie eine Seyfert 1 Galaxie!

- Interpretation: NGC1068 besitzt eine 'broad line region' (BLR, Bereich, in dem breite Emissionslinien erzeugt werden), jedoch ist der Blick auf diese für uns durch absorbierendes Material verdeckt; dieser Absorber umgibt jedoch die BLR nicht vollständig, von einer anderen Richtung aus wäre diese zu sehen

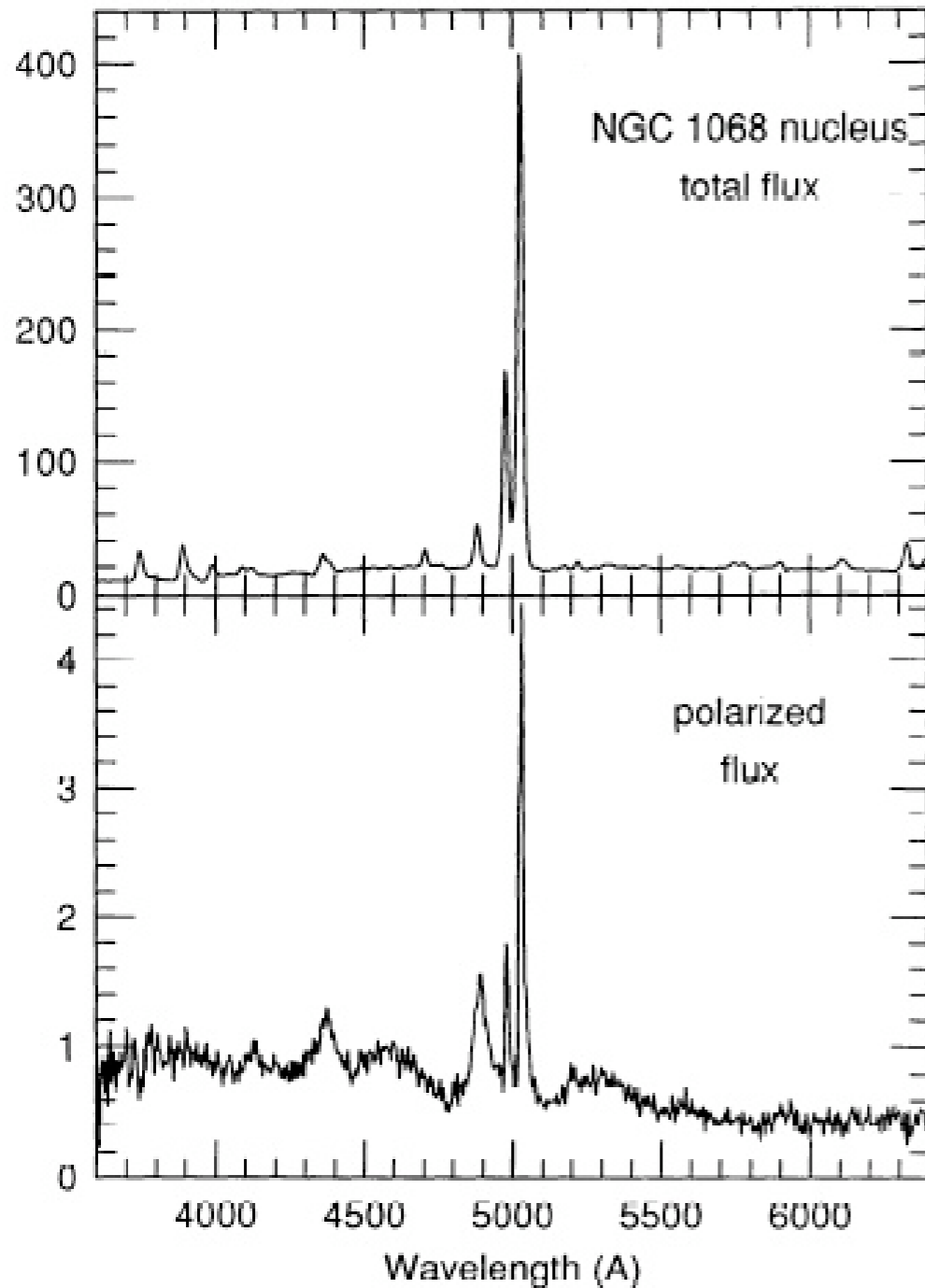
- Falls Licht von der BLR an Staub oder Elektronen gestreut wird, so dass wir die gestreute Strahlung sehen können, wäre die BLR im gestreuten Licht sichtbar

- Das direkte Licht vom AGN überstrahlt das gestreute Licht völlig; aber -> durch die Streuung wird die Strahlung auch polarisiert

=> im polarisierten Licht wird daher die direkte (unpolarisierte) Strahlung unterdrückt, und man kann die BLR sehen

=> Unterschied zwischen Seyfert 1 und Seyfert 2 besteht in der Orientierung der Akkretionsscheibe relativ zu unserem Sehstrahl

Einheitliches Modell der AGNs

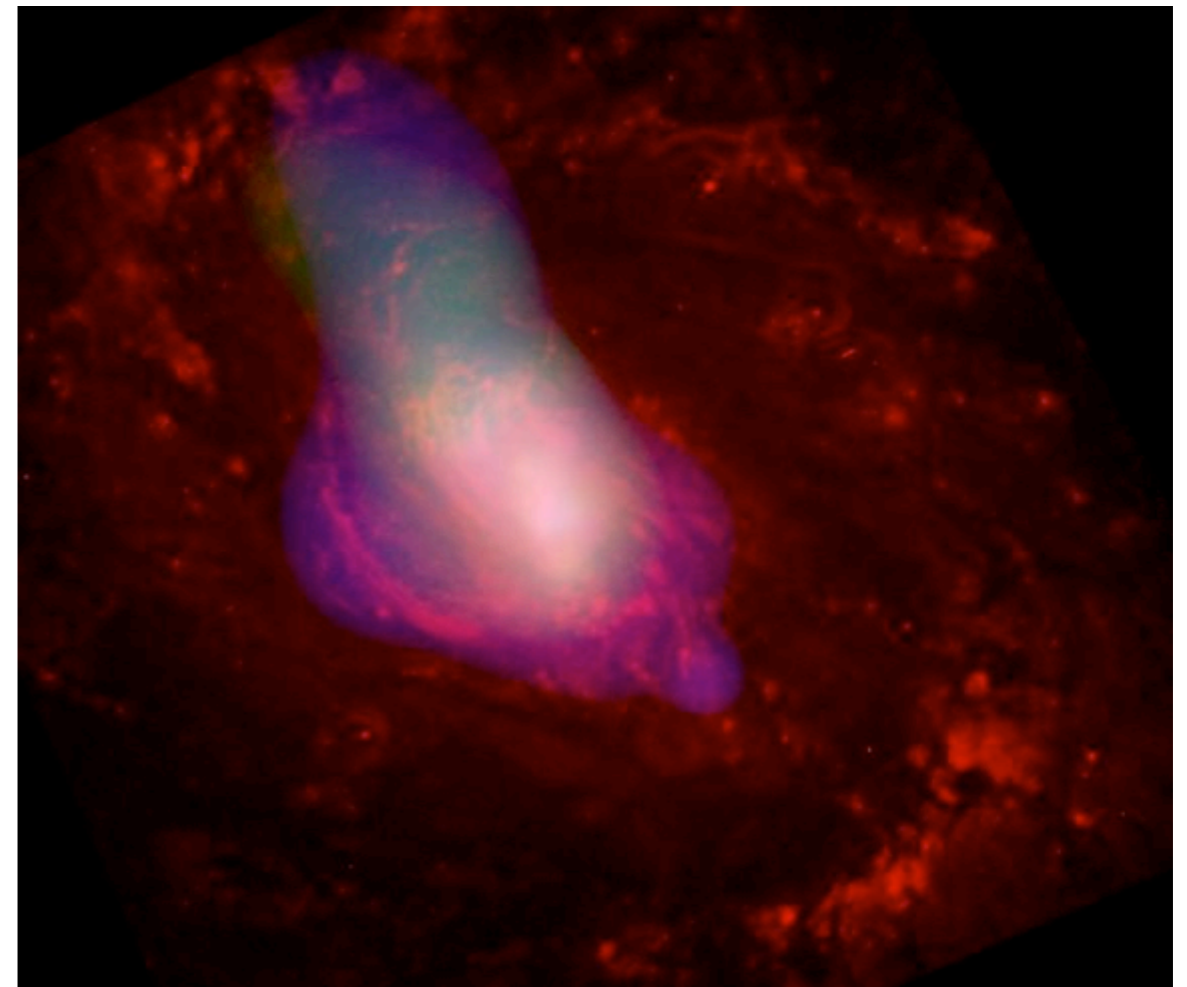


← Seyfert 2 Galaxie NGC1068

Links Oben: Gesamtfluss -> Kontinuum und schmale Emissionslinien ([O III])

Links Unten: Im polarisierten Licht sind auch breite Emissionslinien zu sehen

→ BLR wird sichtbar



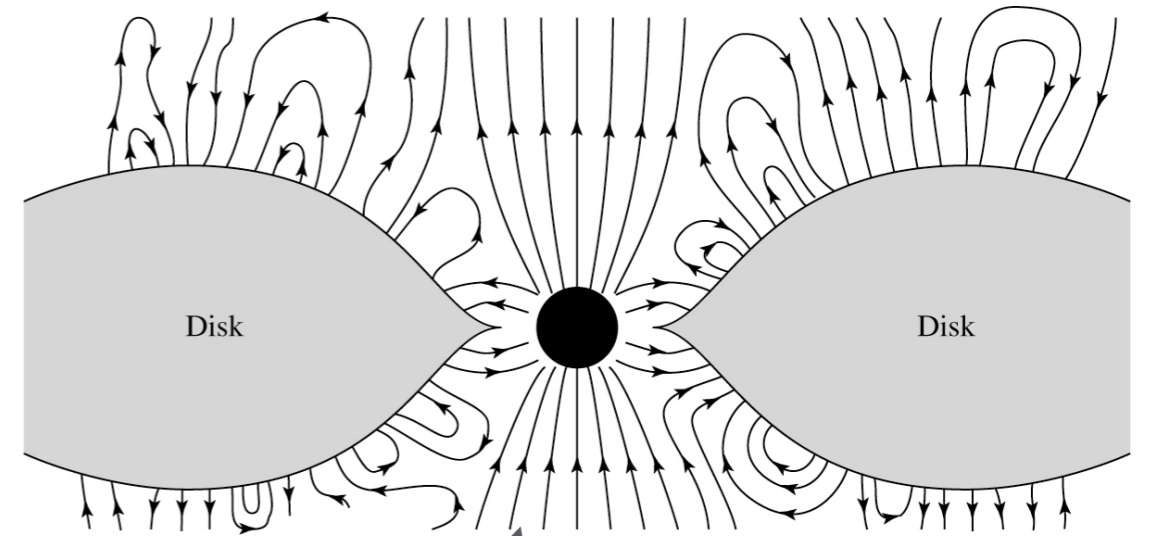
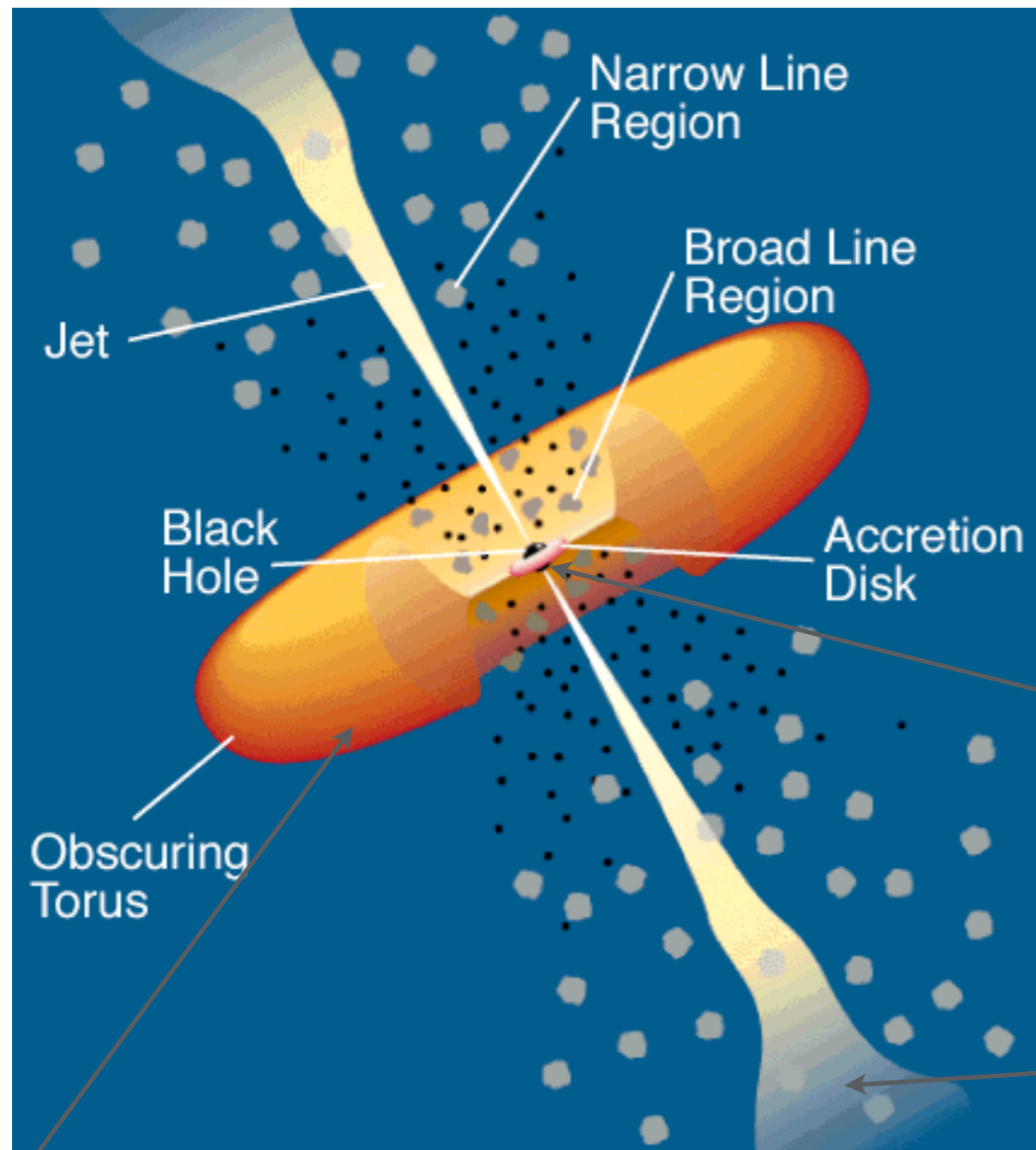
Seyfert 2 Galaxie NGC1068 im sichtbaren und Röntgenbereich

<http://chandra.harvard.edu/photo/2003/ngc1068/index.html>

Einheitliches Modell der AGNs

- Aus dem Zahlenverhältnis von Seyfert 1 zu Seyfert 2 ($\sim 1/3$):
 - => man kann den Bruchteil des Raumwinkels abschätzen, der vom AGN aus betrachtet unseren direkten Blick auf den AGN behindert; dieses Verhältnis besagt, dass ca. 2/3 des Raumwinkels “versperrt” ist
 - Ein solches Abblocken des Lichts kann durch Staub erreicht werden -> man nimmt an, dass sich Staub in der Ebene der Akkretionsscheibe in Form eines “**dicken Torus**” befindet
 - Frage: wenn QSOs die sehr leuchtkräftigen Seyfert 1 sind, was ist das leuchtkräftige Analogon zu Seyfert 2?
 - Bis vor Kurzem: Typ 2 QSOs waren nicht identifiziert -> entweder ist Staubtorus wegen der hohen Leuchtkräfte in QSOs nicht vorhanden, oder Typ 2 QSOs lassen sich nicht leicht identifizieren
 - Mit Chandra und XMM-Newton: die Population Typ 2 QSOs wurde identifiziert!
 - Aufgrund der hohen Säulendichte des H entlang des Sehstrahls zum Zentrum dieser Quellen wird die niederenergetische Röntgenstrahlung fast vollständig absorbiert (PE Effekt)
 - Daher waren diese Quellen mit ROSAT nicht sichtbar ($E \leq 2.4 \text{ keV}$). Chandra und XMM-Newton beobachten aber bis 10 keV!

Einheitliches Modell der AGNs



Akkretionsscheibe

Synchrotronstrahlung

dicker Staub-Torus
auch Quelle von "soften" X-rays

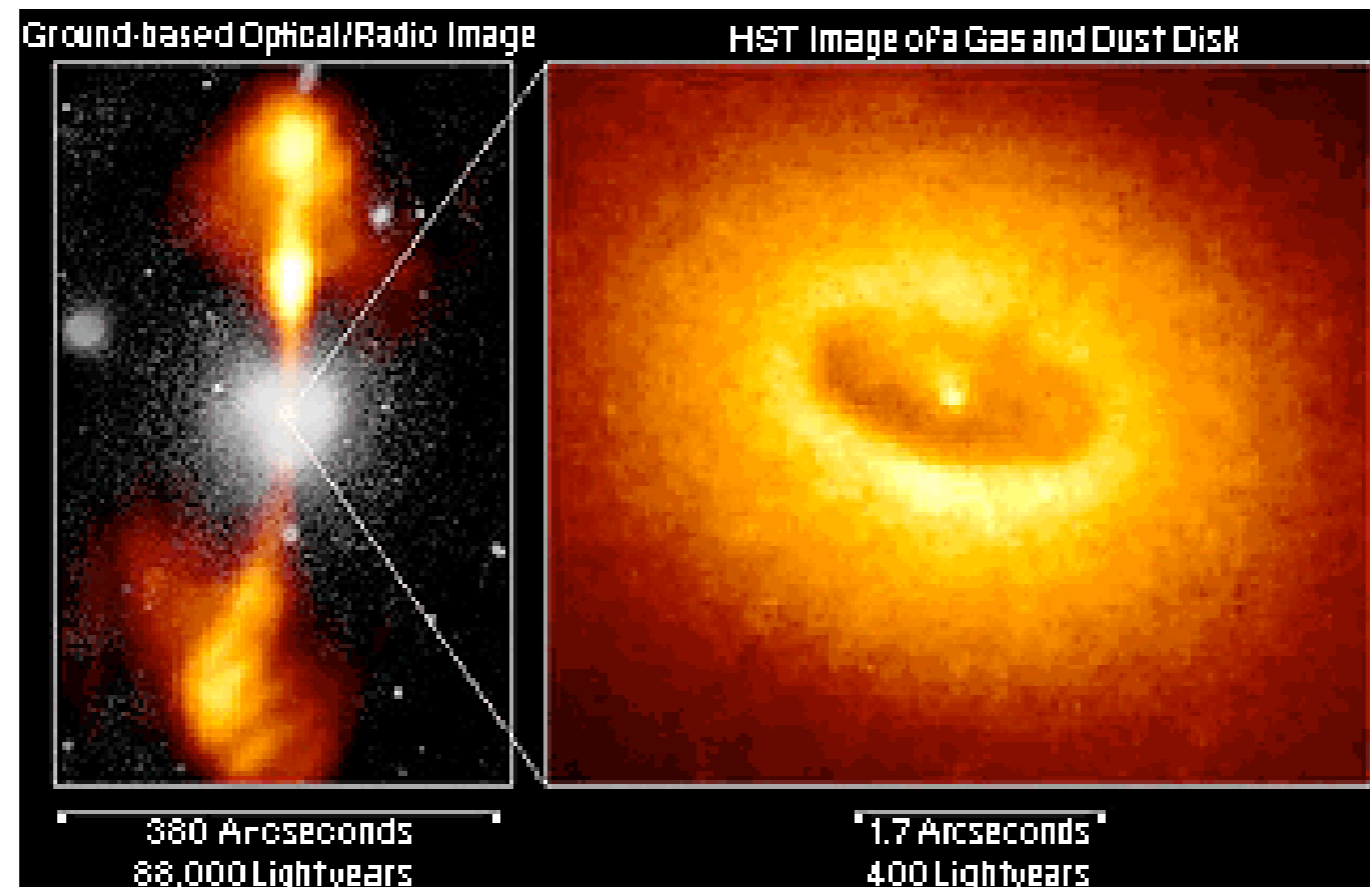
Einheitliches Modell der AGNs: Zusammenfassung

- **stark vereinfachtes Bild:**

- zentrale Maschine ist eine Akkretionsscheibe, die um ein zentrales SBH rotiert
- AGN werden durch Umwandlung von potentieller, Gravitationsenergie in Synchrotronstrahlung angetrieben
- die Struktur der Akkretionsscheibe hängt vom Verhältnis der Akkretionsleuchtkraft zur Eddington-Leuchtkraft ab
- um die beobachteten Ls zu erklären, müssen die energetischsten AGNs zwischen 1 - 10 M_{\odot}/yr akkretieren
- die Perspektive des Beobachters, zusammen mit der Akkretionsrate und der Masse des Schwarzen Loches bestimmen, ob der AGN eine Seyfert 1, Seyfert 2, BLRG, NLRG, quasar oder blazar genannt wird

NGC 4261
(elliptische
Radiogalaxie im
Virgo Haufen)

Optisches + Radio-
Bild vom Boden
aus gesehen;
Jets bis zu etwa 15
kpc vom Zentrum
→

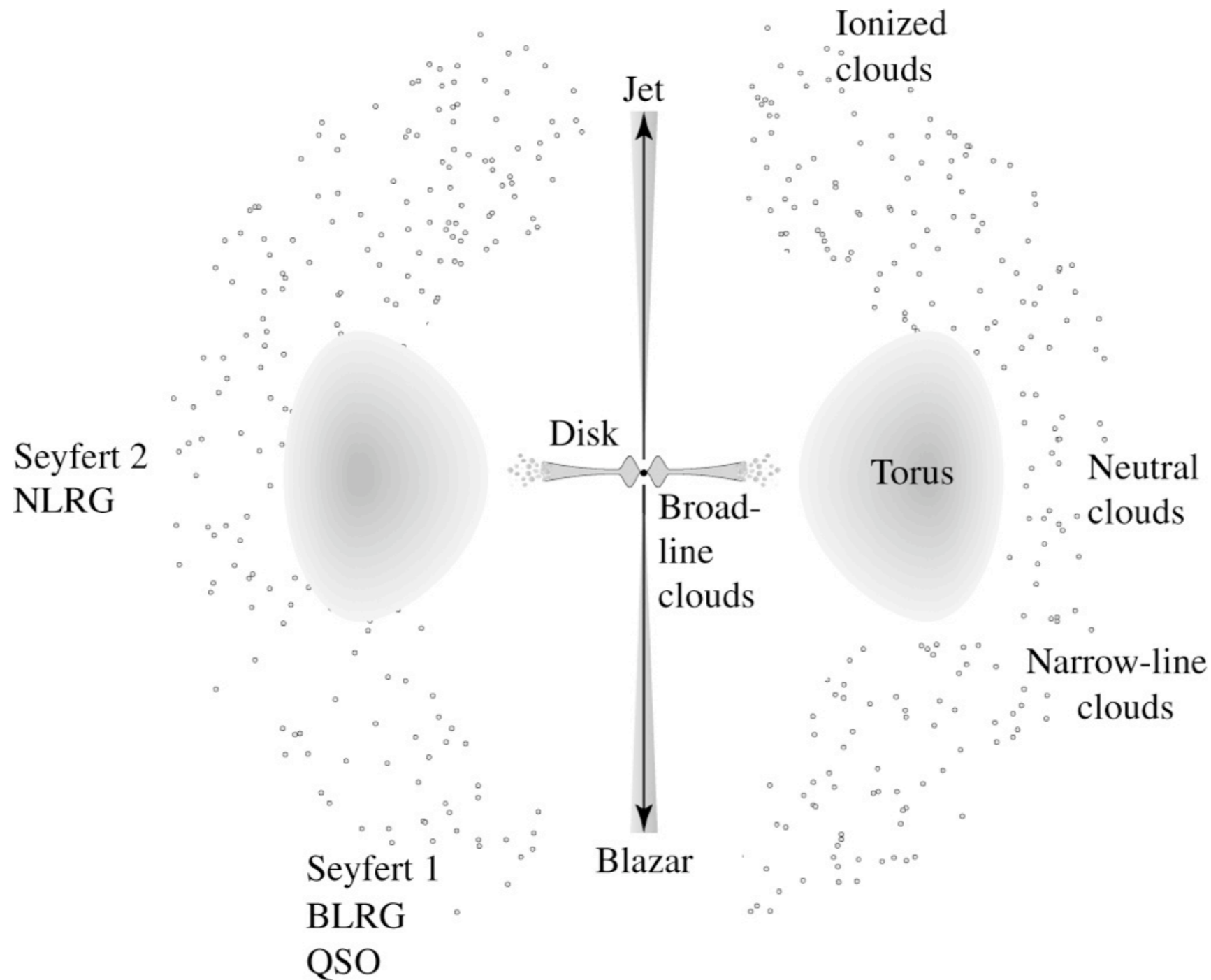


← Optisches Bild vom HST;

der dicke Staub-Torus (mit
Radius $\sim 70 \text{ pc} = 2 \times 10^{20} \text{ cm}$)
um den zentralen Kern
ist zu sehen; Torus ist
senkrecht zu den Radio-
Jets

zentrales Objekt: $\sim 10^7 M_{\odot}$
SL ($R_s = 3 \times 10^{12} \text{ cm}$)

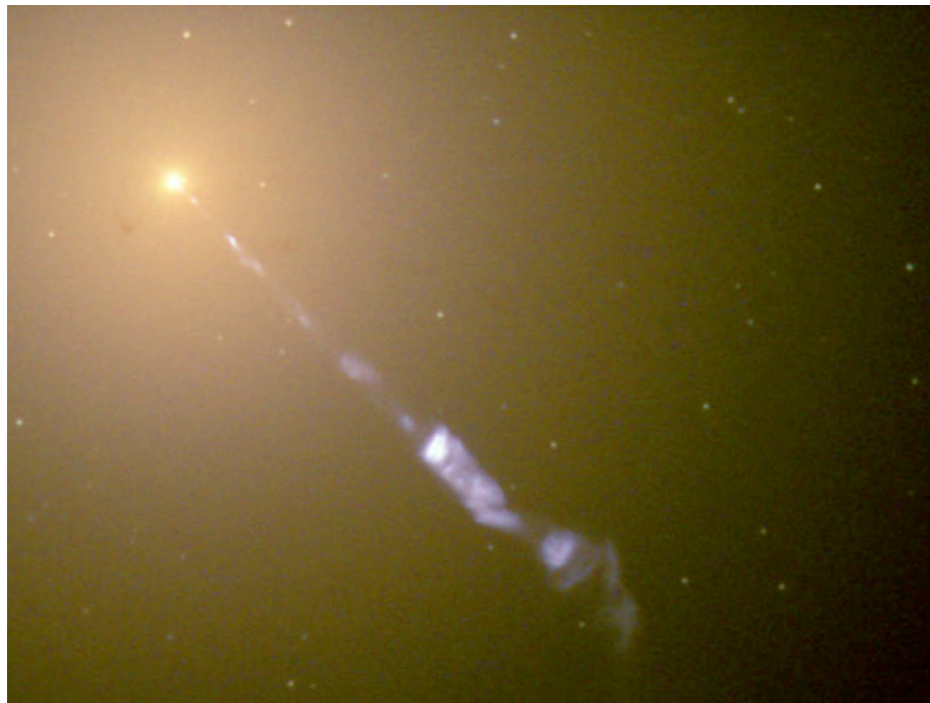
Einheitliches Modell der AGNs: Zusammenfassung



Carroll & Ostlie

Beispiel: M87

M87 (elliptische Galaxie im Zentrum des Virgo-Haufens): Jet ist auch im sichtbaren Licht erkennbar



<http://hubblesite.org/newscenter/archive/re>

