

AGN & Binäre Schwarze  
Löcher  
(NEUES!)

# Heute ...



Themen

& Daten

- 05.05 Einführung & Übersicht
- 12.05. Radioteleskope & Radiobilder & Katastrophen
- 26.05. Der Radiohimmel im Licht der 21cm-Linie
- 09.06. Maser, das Interstellare Medium & Merger
- **23.06. AGN & Binäre Schwarze Löcher (NEUES!)**
- 07.07. Pulsar-Astronomie (heute & in Zukunft)
- 21.07.



# 23.06. AGN & Binäre Schwarze Löcher (NEUES!)

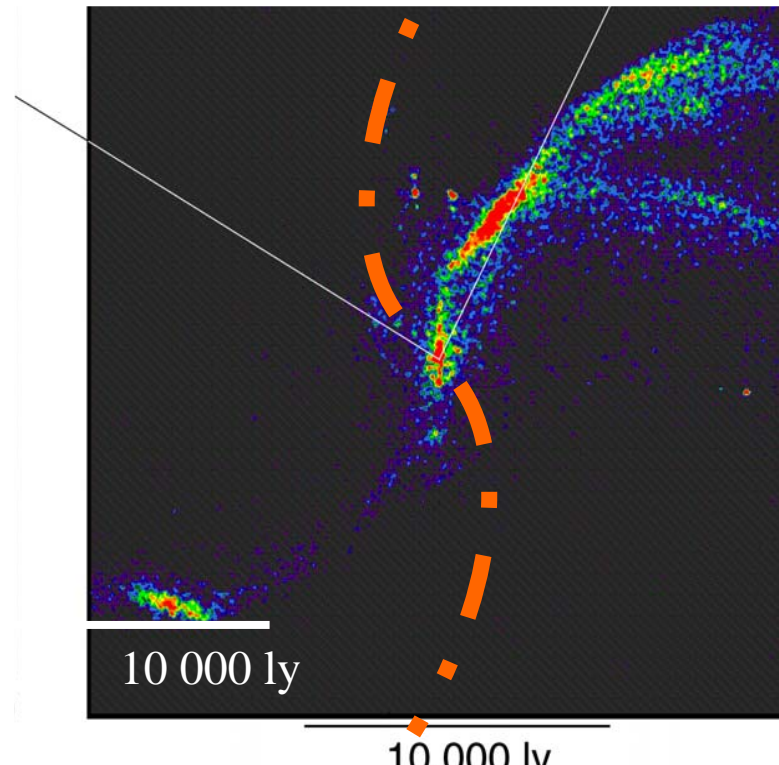
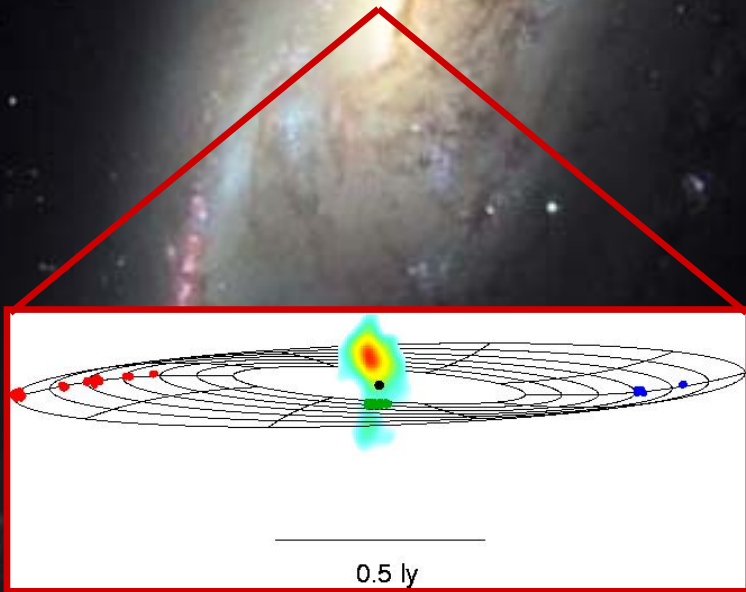


Übersicht

- Nachtrag: Berechnung der Parameter NGC 4258!!
- Spekulationen über die Entstehung der ersten Schwarzen Löcher
- Der Spin Schwarzer Löcher
- Die Rolle galaktischer Winde
  - Bei der Akkretion
  - Beim Füttern des galaktischen SL
  - Auf größeren Skalen
- Feedback-Mechanismen
- Aktivitätszyklen Aktiver Galaxienkerne
- X-förmige Radiogalaxien: was ist richtig?



# NGC 4258: optisch



Credit: Slotnick, Slo

Distance along Major Ax

# Entfernungsbestimmung mit NGC 4258

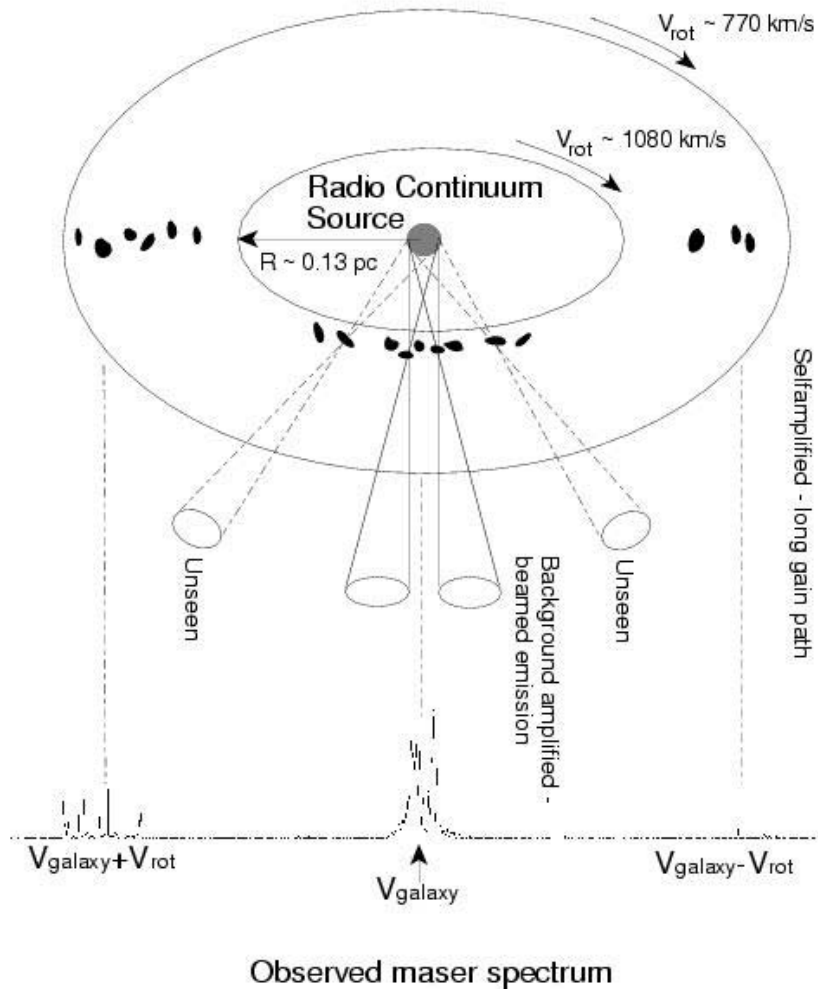


- Aus Geschwindigkeitsdifferenz zw. hoher Geschwindigkeit und der systemischen Geschw. kann die Rotationsgeschw. bestimmt werden
- Drift (zentripetale Beschleunigung) des systemischen MASERS in Kombination mit  $V_{rot}$  ergibt den Radius  $R$  des Torus
- $R$  und  $V_{rot}$  ergeben die Masse des eingeschlossenen supermassiven Objekts
- Nur die Entfernungsbestimmung (um lineare Skalen mit Winkelgrößen zu vergleichen) erfordert interferometrische Messungen

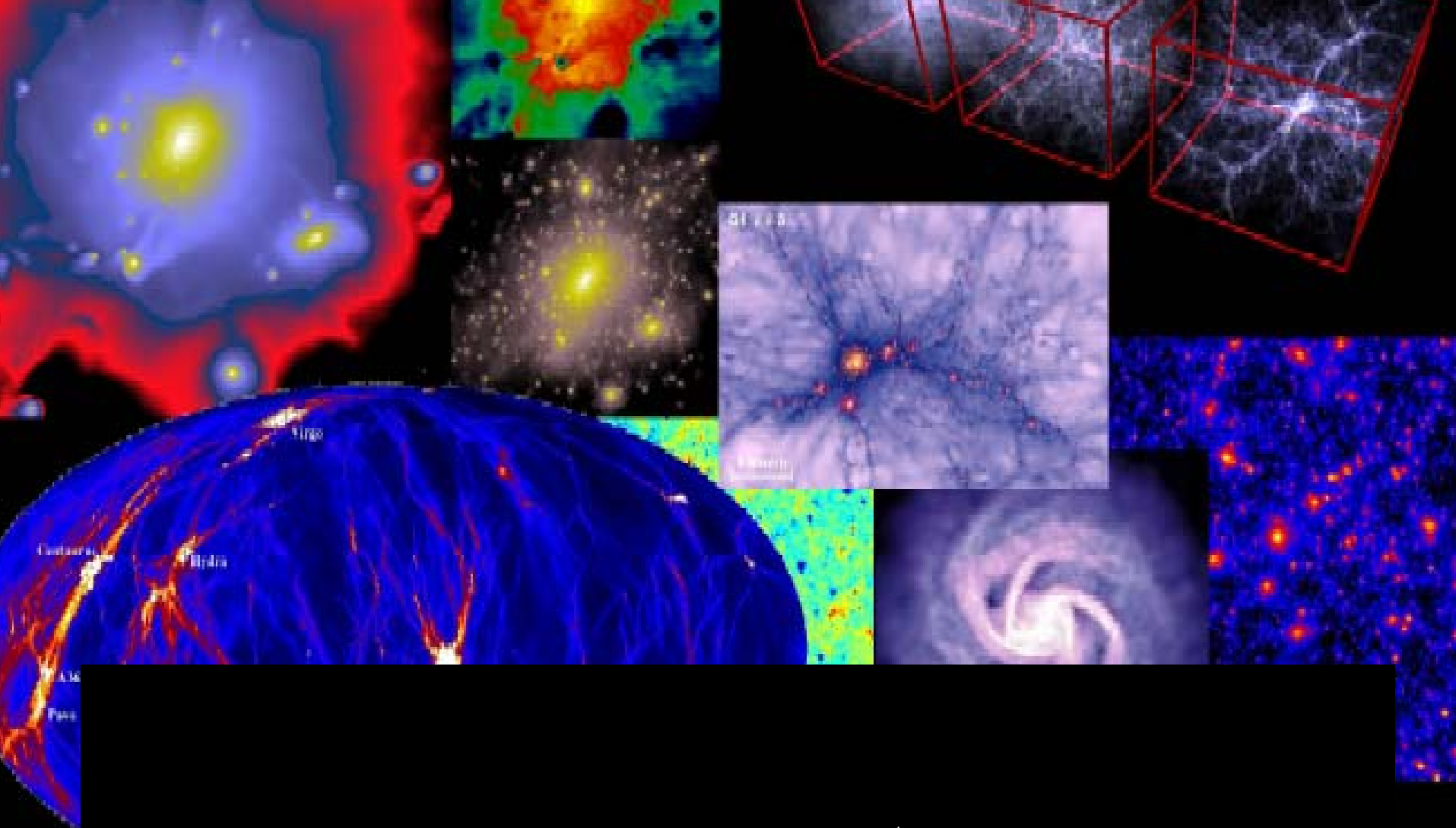


- $M_{SL} = V_{rot}^2 r / G$ ;  $G = 6.673 \times 10^{-8} \text{ cm}^3/\text{gs}^2$
- Aus Geschwindigkeitsdifferenz zw. hoher Geschwindigkeit und der systemischen Geschw. kann die Rotationsgeschw. bestimmt werden  $\rightarrow V_{rot}$
- $M_{SL} = 1.120 \times V_{rot}^2 \times R \times D \times M_*$
- R kann bestimmt werden aus Geschwindigkeitsgradienten/mas systemischer Komponenten (Angular Distance), aus VLBI Beobachtungen
- D wird bestimmt aus Zentripetalbeschleunigung ( $c = V^2/r$ )

# Zusammenfassung: NGC 4258



- Innerer Radius: 0.13 pc
- Äußerer Radius: 0.26 pc
- Inklinations-Winkel: 83 Grad
- Gastemperatur  $< 1000 \text{ K}$ ,  $> 300 \text{ K}$
- Gasdichte  $\sim 10^9 \text{ cm}^{-3}$
- Entfernung:  $7.2 \pm 0.5 \text{ Mpc}$  (präziseste Distanzmessung bislang)



# AGN & Feedback



# Die Fragen



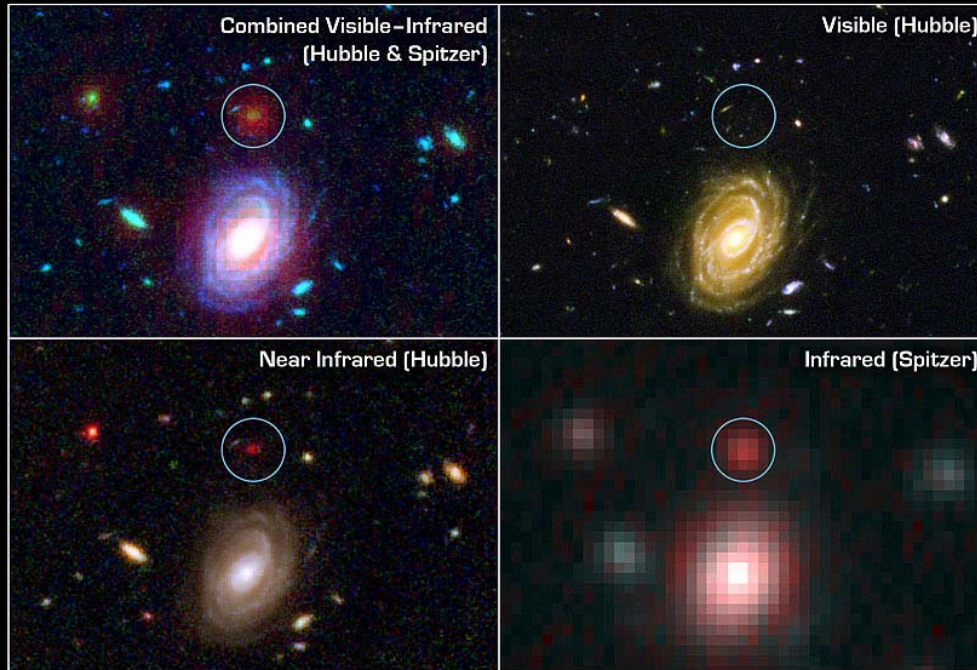
- Was ist der Spin und die Massenverteilung Schwarzer Löcher?  
*Warum?*
- Wie sieht die Geschichte der Bildung Schwarzer Löcher und ihrer Entwicklung aus?  
*Wie entstanden die ersten Schwarzen Löcher? War das Wachstum dominiert durch die Akkretion von Gas oder die Konsumierung von Sternen oder Mergern?*
- Wie akkretieren Schwarze Löcher Gas?  
*Welcher Teil der einfallenden Masse gelangt nach außen?*
- In welcher Form geben Schwarze Löcher Akkretionsenergie frei?  
*Jets, Strahlung, Winde, Teilchen*
- Wie beeinflussen Schwarze Löcher die Evolution der host galaxy, Röntgen-Haufen, oder das intergalaktische Medium?  
*Was ist der Ursprung der Korrelation zw. Masse des Schwarzen Lochs und den Sphäroid-Eigenschaften? Was bestimmt die maximale Masse der Galaxien?*



# Wie haben sich Schwarze Löcher gebildet und entwickelt?

*Wie entstanden die ersten Schwarzen Löcher? War das Wachstum dominiert durch die Akkretion von Gas oder die Konsumierung von Sternen oder Mergern?*

# „Big Baby“ Galaxie



Distant Galaxy in the Hubble Ultra Deep Field

Spitzer Space Telescope • IRAC  
Hubble Space Telescope • ACS • NICMOS

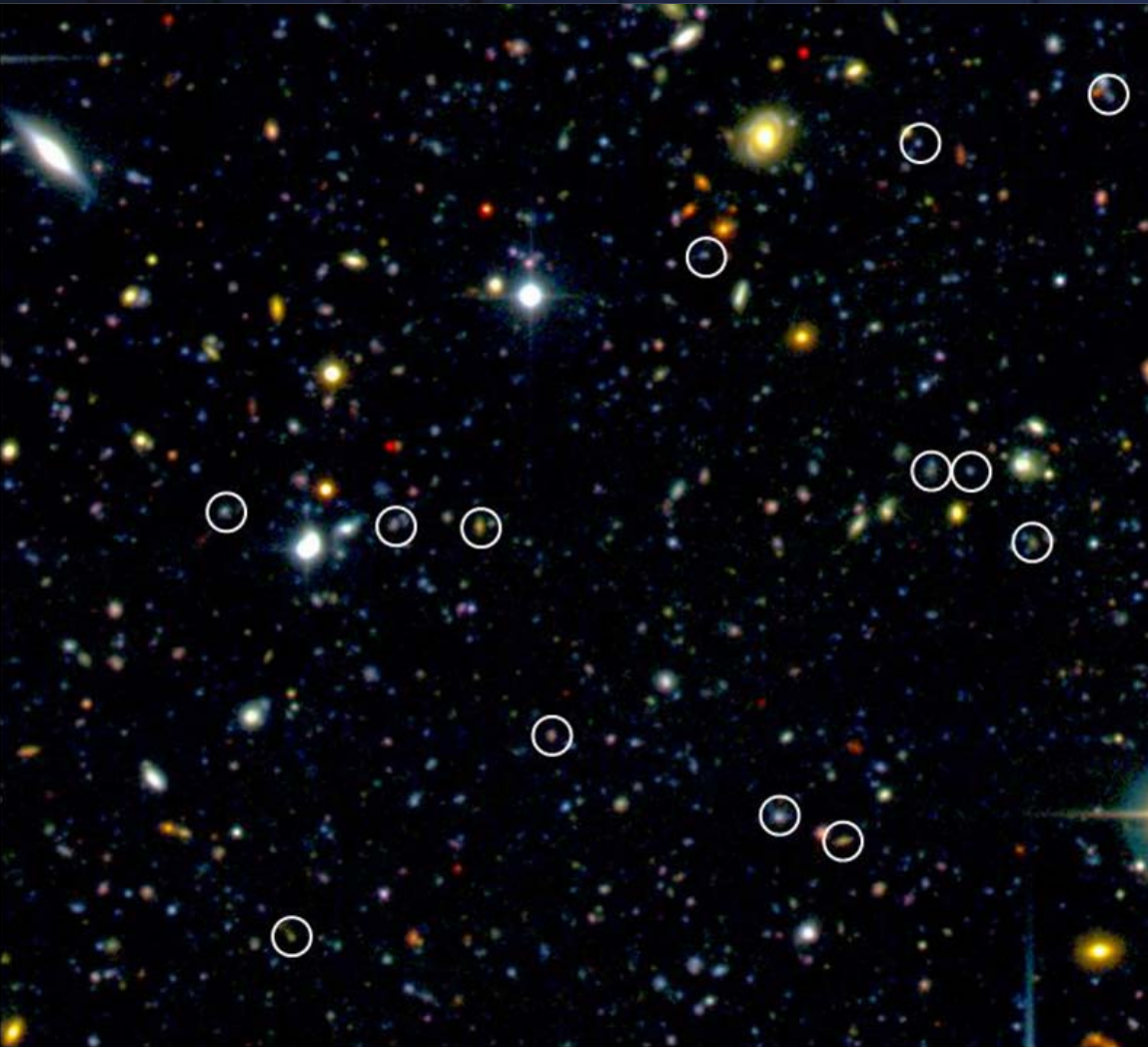
NASA, ESA / JPL-Caltech / B. Mobasher (STScI/ESA)

ssc2005-19a

- Eine der entferntesten Galaxien extrem massiv und erstaunlich erwachsen für ihr Alter, 8-fache Sternenmasse verglichen mit Milchstraße
- Im Hubble Ultra Deep Field gefunden
- Alter des Universums: 800 Mio Jahre (5%)
- Infrarot Strahlung
- HUDF-JD2; tiefstes Bild im optischen, dennoch nicht detektiert



# Kosmischer „Babyboom“



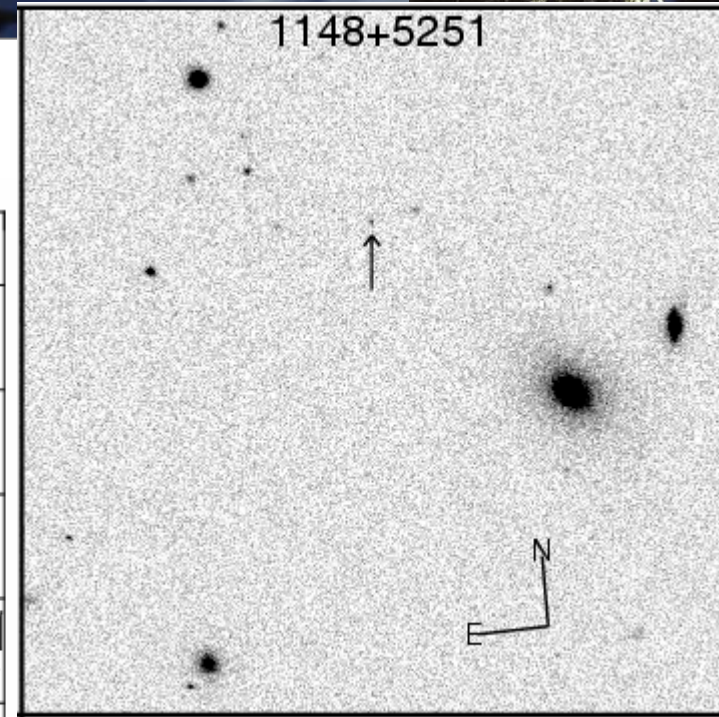
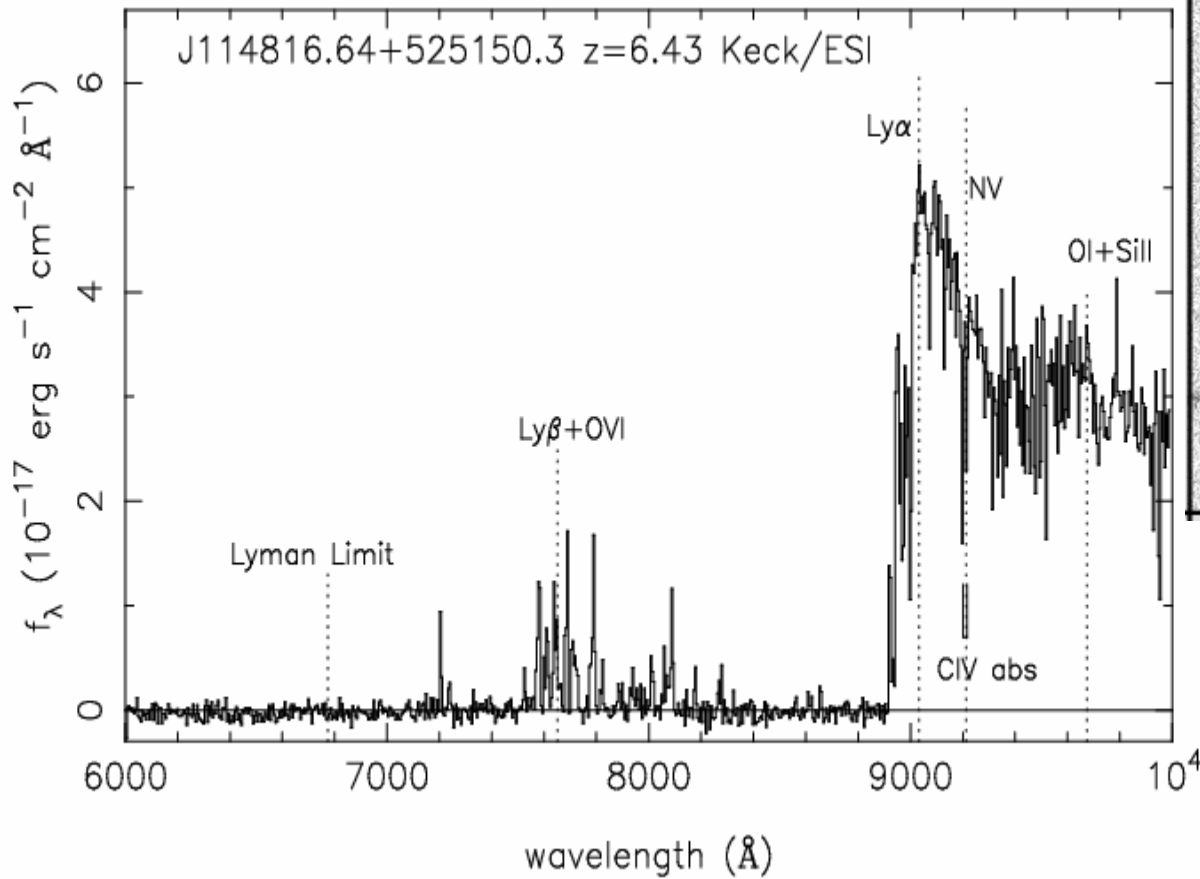
- Alter des Universums: 10-30%
- 8000 Galaxien untersucht
- VIMOS (Visible Multi-Object Spectrograph): bis zu 1000 entfernte Galaxien in einer Beobachtung in wenigen Stunden

© LAM-OAMP and CFHT

New Population of Distant Galaxies  
(Megacam/CFHT)



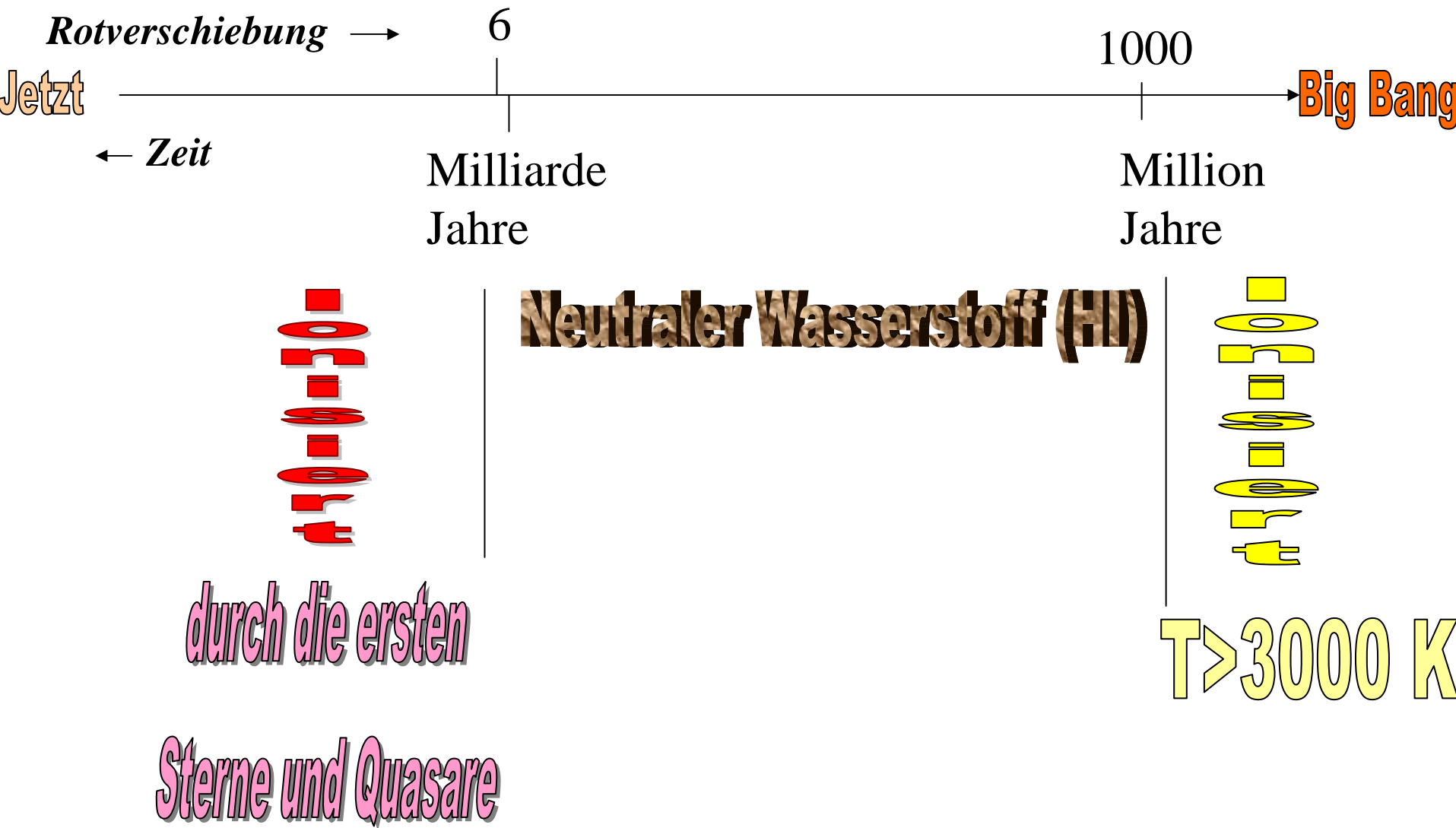
# Der erste Quasar? $z=6.4$



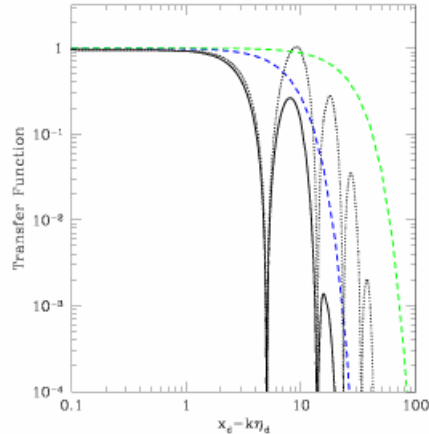
Fan et al. 2002



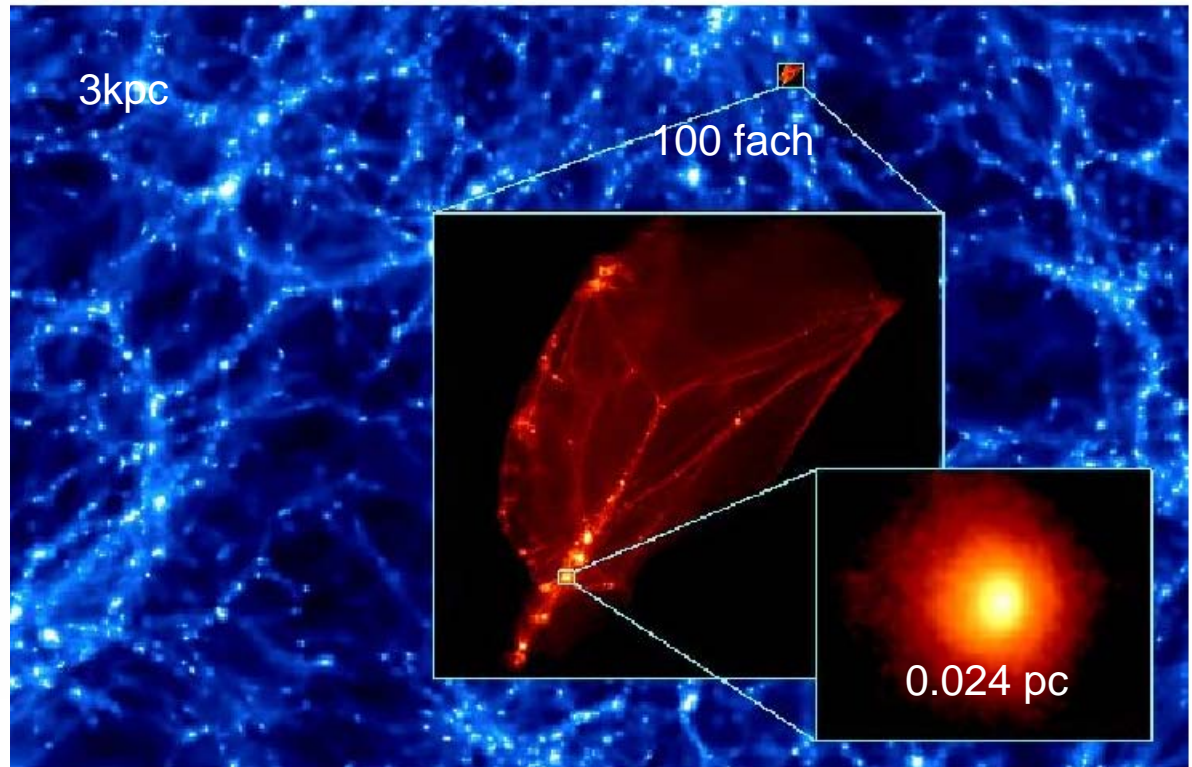
# Ionisationsgeschichte des Wasserstoffs



# Die ersten Objekte dunkler Materie im Universum



Transfer function of the CDM density perturbation amplitude (normalized by the primordial amplitude from inflation). We show two cases: (i)  $T_d/M = 10^{-4}$  and  $T_d/T_{eq} = 10^7$ ; (ii)  $T_d/M = 10^{-5}$  and  $T_d/T_{eq} = 10^7$ . In each case the oscillatory curve is our result and the other curve is the free-streaming only result that was derived previously in the literature [4,7,8].



Die kleinsten Klumpen dunkler Materie:  $\sim 0.1$  Jupiter Masse

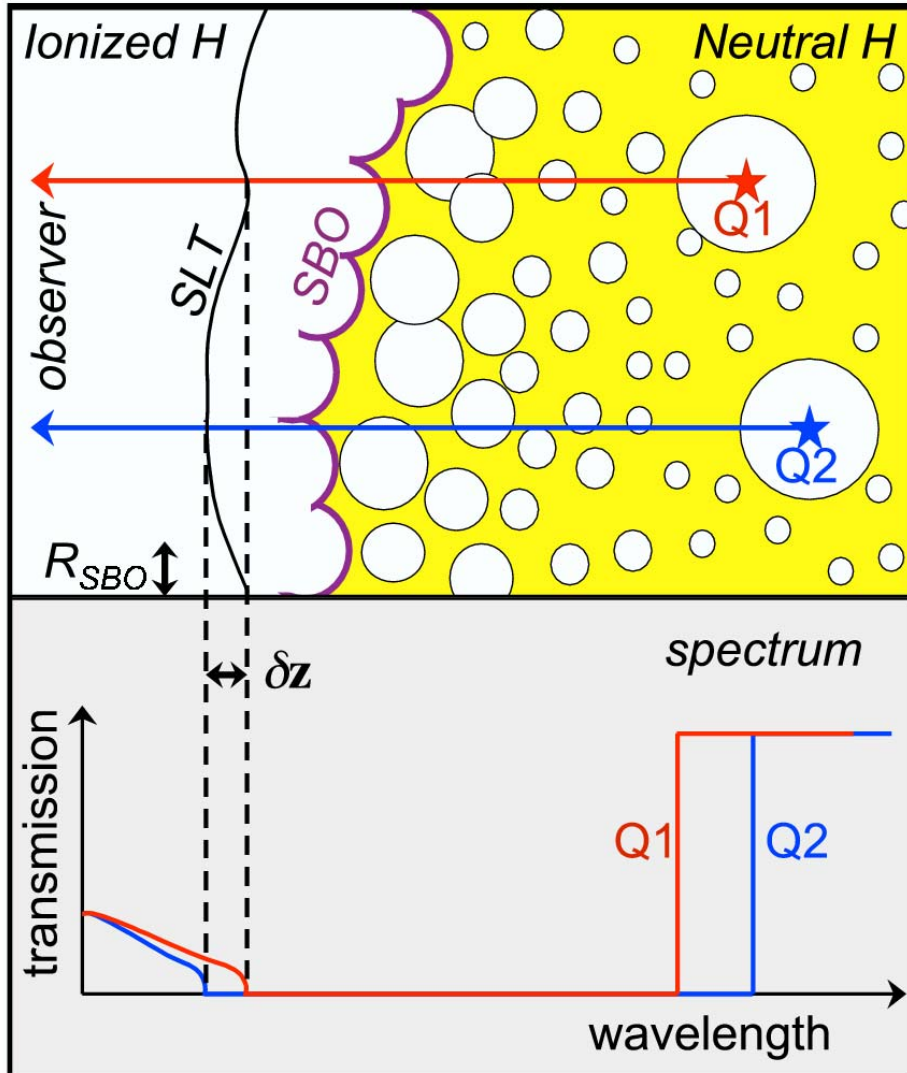
Loeb & Zaldarriaga, astro-ph/0504112

$$M_{\text{cut}} = \frac{4\pi}{3} \left( \frac{\pi}{k_{\text{cut}}} \right)^3 \Omega_M \rho_{\text{crit}} \approx 10^{-4} \left( \frac{T_d}{10 \text{ MeV}} \right)^{-3} M_{\odot}$$

Diemand, Moore & Stadel astro-ph/0501589

Rotverschiebung: 26; Halos können kollabieren noch bevor sie zu größeren verschmelzen

# Die charakteristische Größe der ionisierten Blasen am Ende der Reionisation

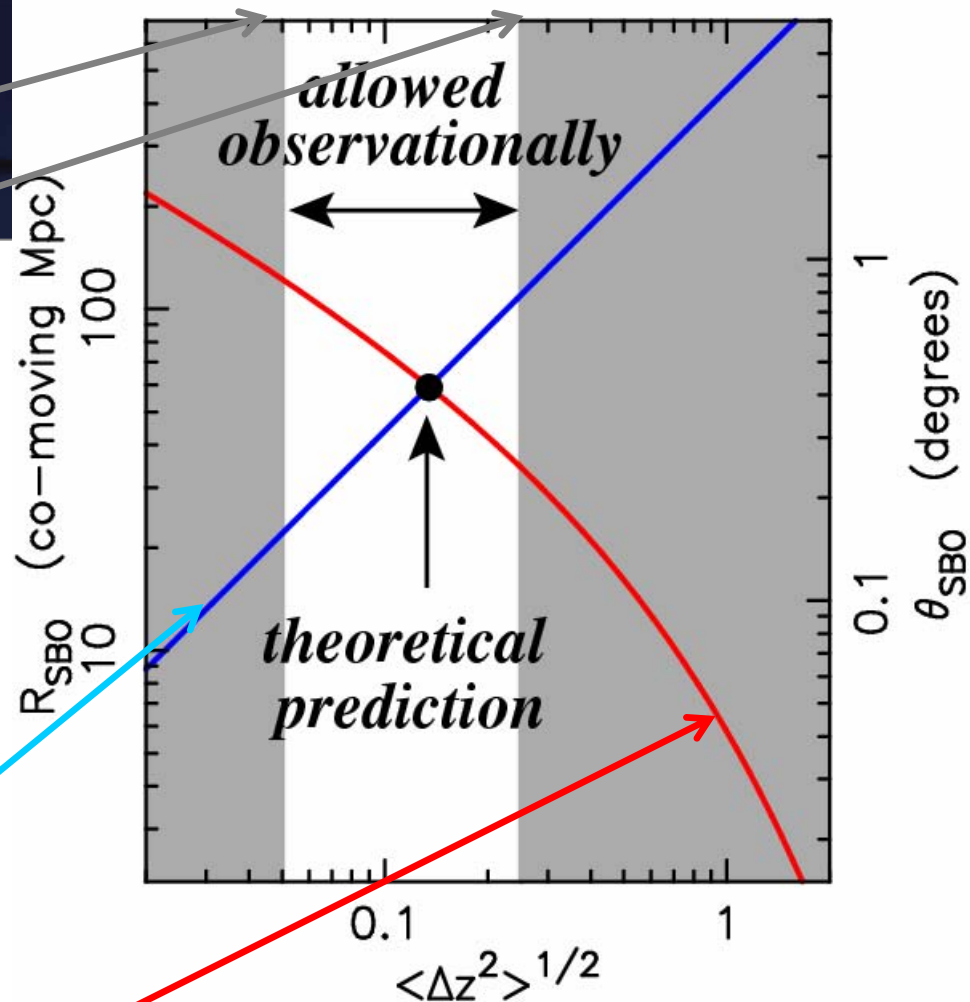


SBO: Surface of Bubble Overlap  
SLT: Surface of Ly $\alpha$  Transmission

Wyithe & Loeb, Nature, 2004

SDSS quasars  
at  $z > 6.1$

HI

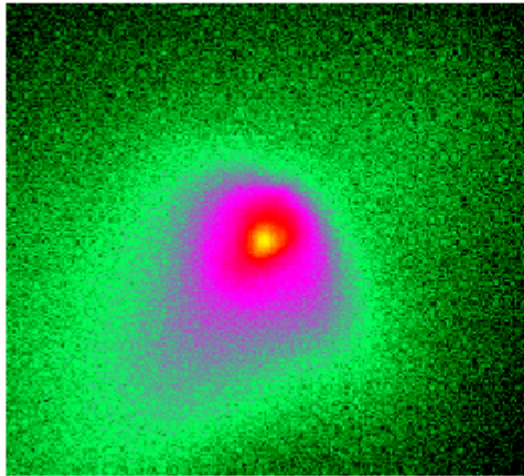


**Kausalität:** Durchquerungszeit der Blase durch ein 21cm Photon

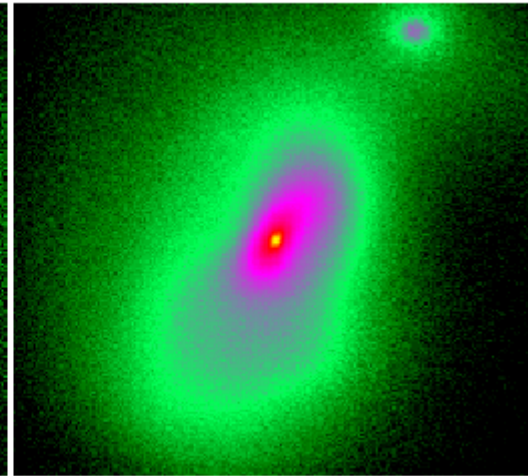
**Blasenentstehungszeit:** kosmische Streuung in Formation der ionisierten Blasen aufgrund von Inhomogenitäten



# Massive Akkretion durch Pop-III Proto-Sterne



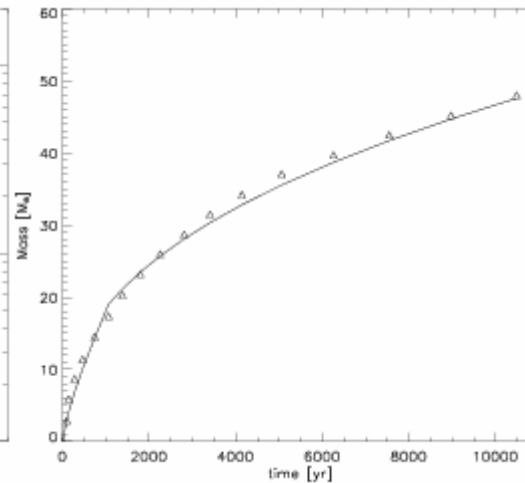
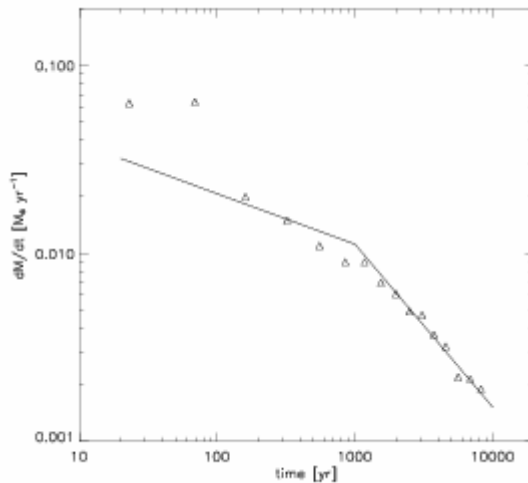
23.5pc



0.5pc

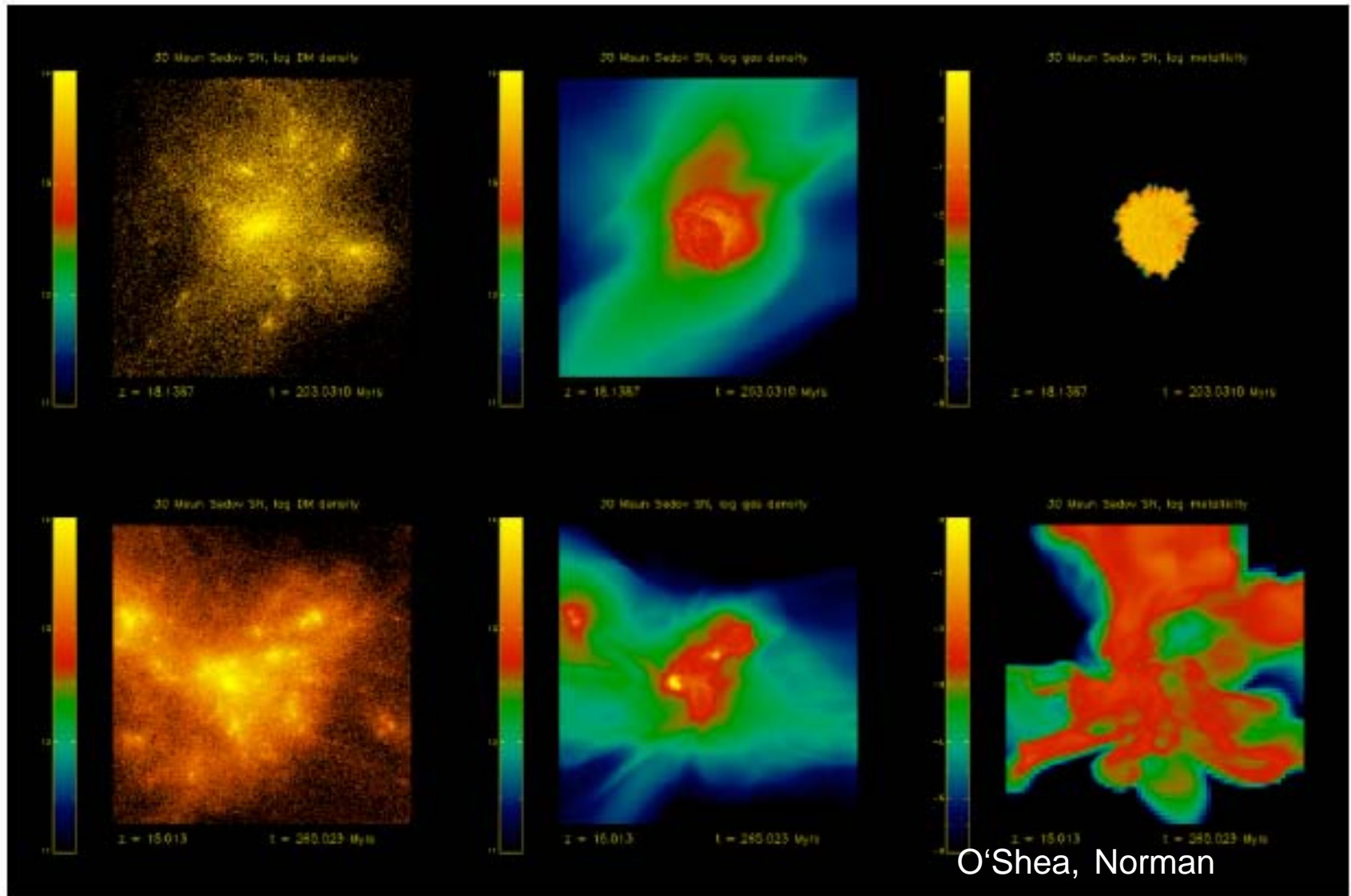
Kollaps und Akkretion  
größer als  
100 Sonnenmassen

Resolving  
accretion  
flow down  
to  $\sim 0.03$  pc



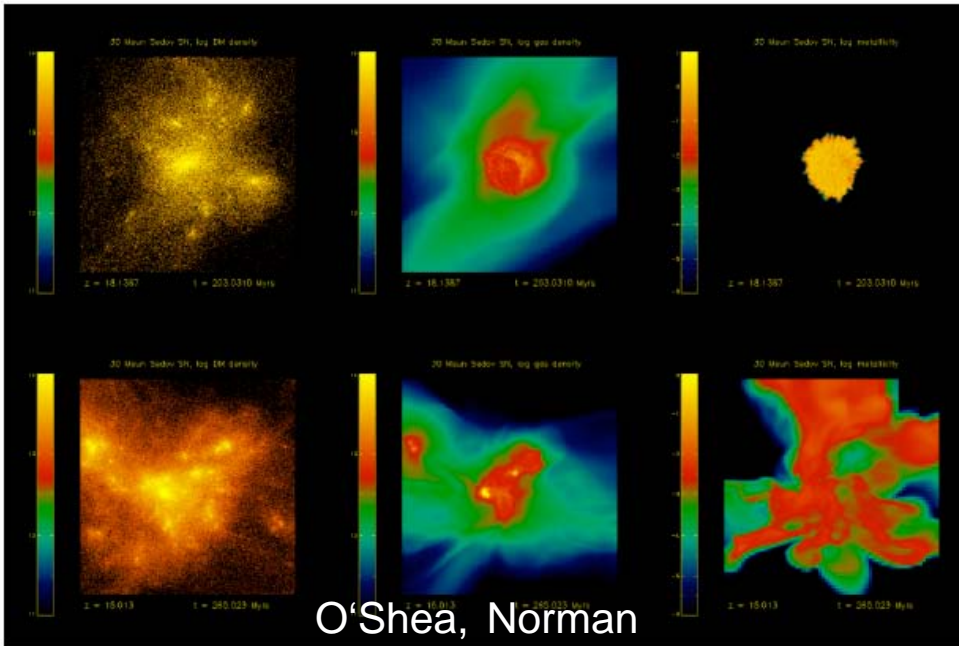


# Supernova Feedback der Population III Sterne



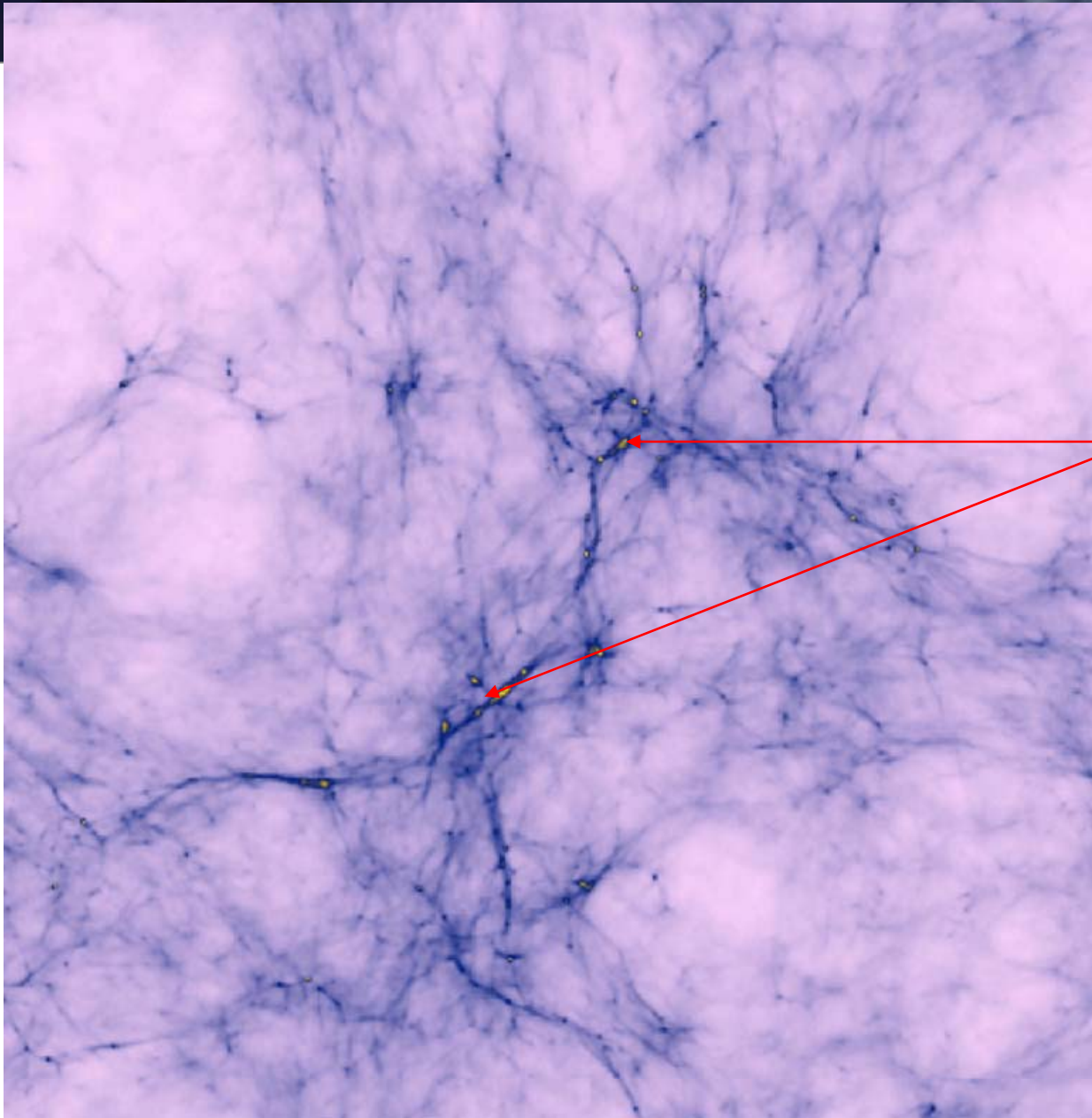
O'Shea, Norman

# Supernova Feedback der Population III Sterne



- Simulation einer Population III Supernova im kosmologischen Kontext
- Bei  $z \sim 20$  Pop III Sterne (10-500 Sonnenmassen) könnten sich in einem Halo bilden, emittieren stark im UV, produzieren HII-Regionen die einige kpc im Durchmesser erreichen können
- Simulation: Supernova hineinsetzen, Druckwelle
- Auch die kleinste Supernova Typ II wird den Halo komplett auseinanderreißen und die Reste erstrecken sich über große Distanzen
- Nachbar-Halos werden auf diese Weise mit Metallen angereichert -> beeinflusst die Bildung neuer Sternengenerationen

# Die ersten Sternhaufen entstehen



Molekularer  
Wasserstoff

Yoshida et  
al. 2003

# Schnelles Wachstum hochrotverschobener Schwarzer Löcher?



- Frühe Entstehung SMSL (motiviert durch Fund früher Quasare um  $z \sim 6$  mit  $10^9$  Sonnenmassen)
- Stabile superkritische quasi-sphärische Akkretion
- Nachdem die ersten Sterne in Minihalos kollabiert sind ( $z \sim 20$ )
- Neu: dicke, dichte, kalte Gasscheibe, Null Metallizität & schnellere Akkretion (Bondi Rate)
- Problem vorher:
  - Akkretion mit Eddington in dünner Scheibe, Strahlungseffizienz, Spin wird effizient erhöht, Strahlungseffizienz 30%, je größer die Effizienz, desto länger dauert es bis die hohe Masse erreicht ist (beobachtet!!)
  - Effizienz von  $\epsilon \sim 0.1$  benötigt



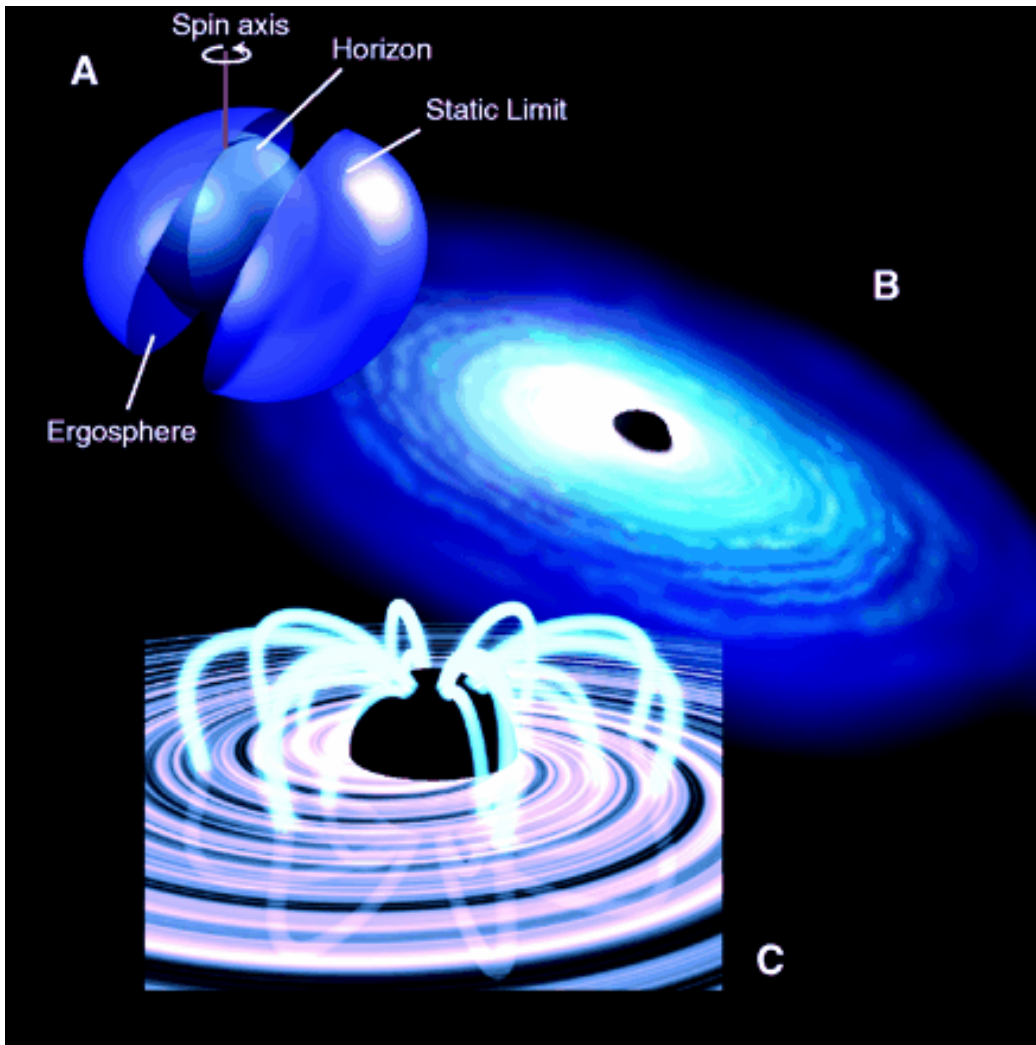


Was ist der Spin und die Massenverteilung  
Schwarzer Löcher?

*Warum?*



# Der Spin schwarzer Löcher



- **A:** Ereignishorizont, zwischen statischen Limit und dem Ereignishorizont: Ergosphäre (alle Bahnen mit gleicher Rotationsrichtung wie SL)
- **B:** Akkretionsscheibe
- **C:** Magnetfeld verstärkt innerhalb der Scheibe und bildet Korona; Magnetfeld durchbricht Ergosphäre und kann Energie aus dem SL extrahieren und damit einen Jet beschleunigen oder die Strahlung der Scheibe verstärken

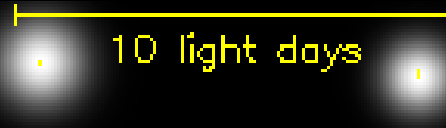
# Spin des SL: Galaktisches Zentrum



*False color near-infrared image of the central parsec of the Milky Way.*



1992

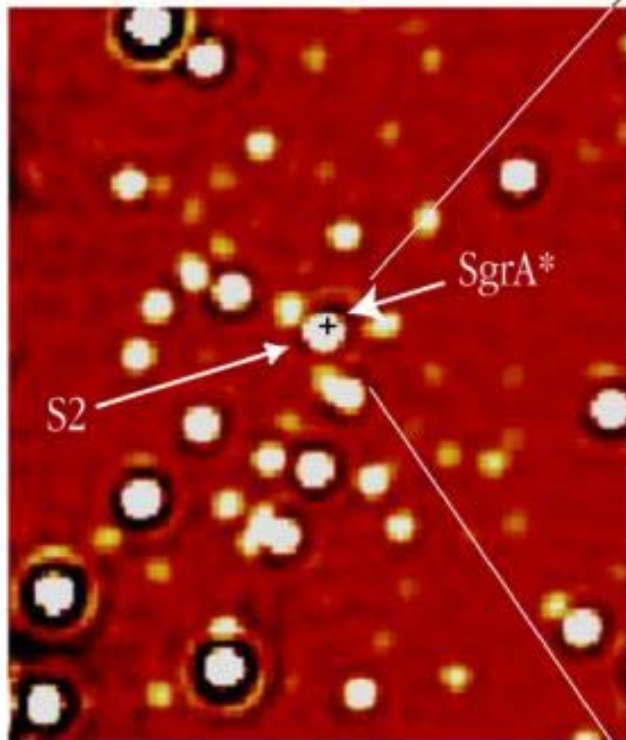


- Seit 1992, zentrale pc Region des galaktischen Zentrums im nahen Infrarot beobachtet; Eigenbewegungen der Sterne; 10-30 Lichttage von Sgr A\* (Genzel, Eckart, et al.)

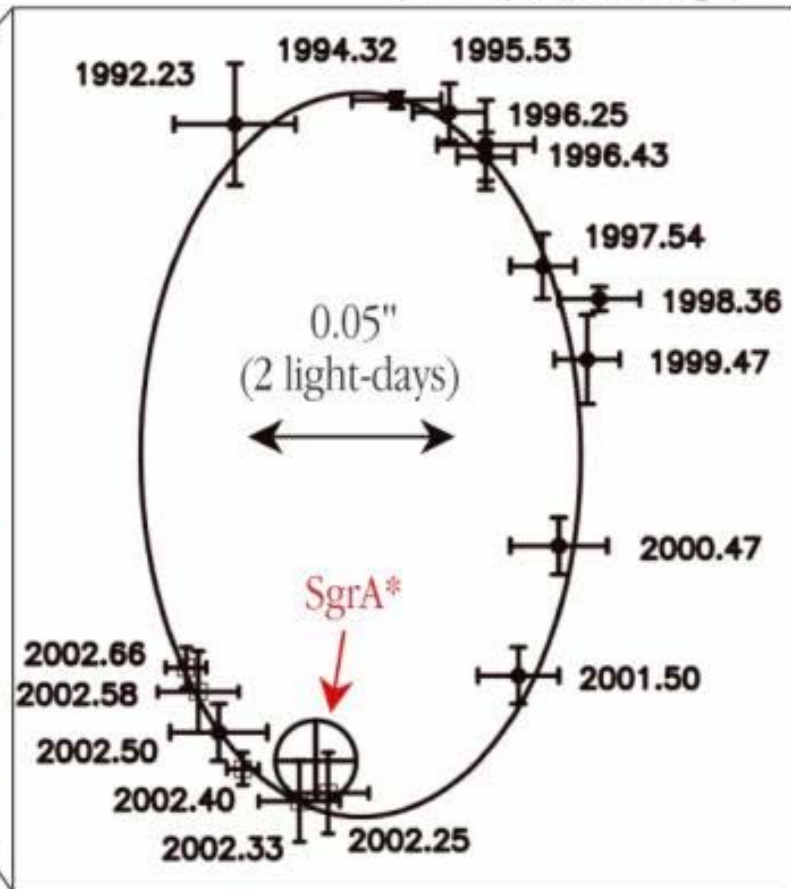
# Spin des SL: SgrA\*



NACO May 2002

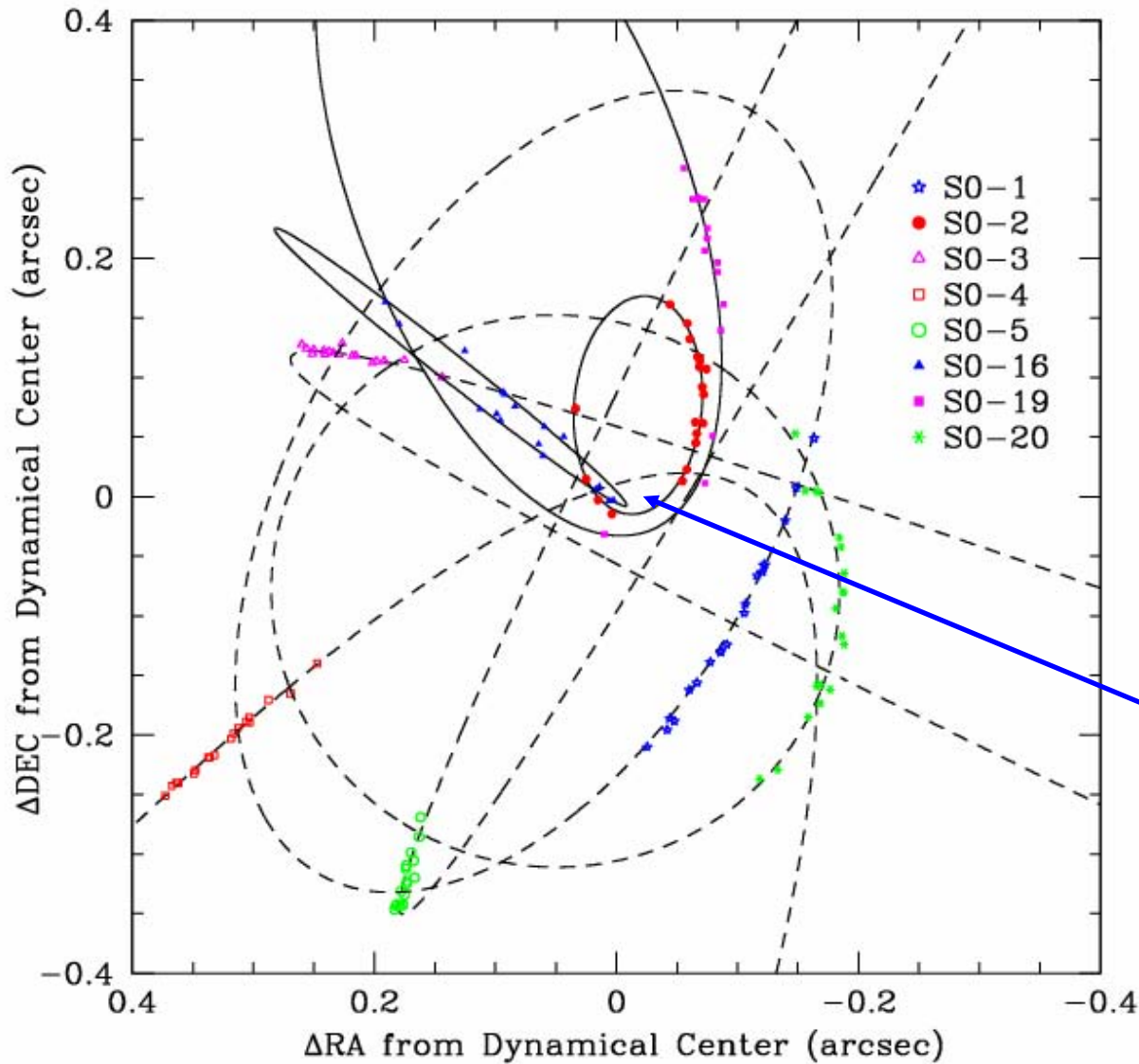


S2 Orbit around SgrA\*



- 18 Mio km/h 0.02c; 200 mal schneller als Erde um Sonne, ein Umlauf: 15.2 Jahre, 15 fache Masse der Sonne, siebenfacher Durchmesser





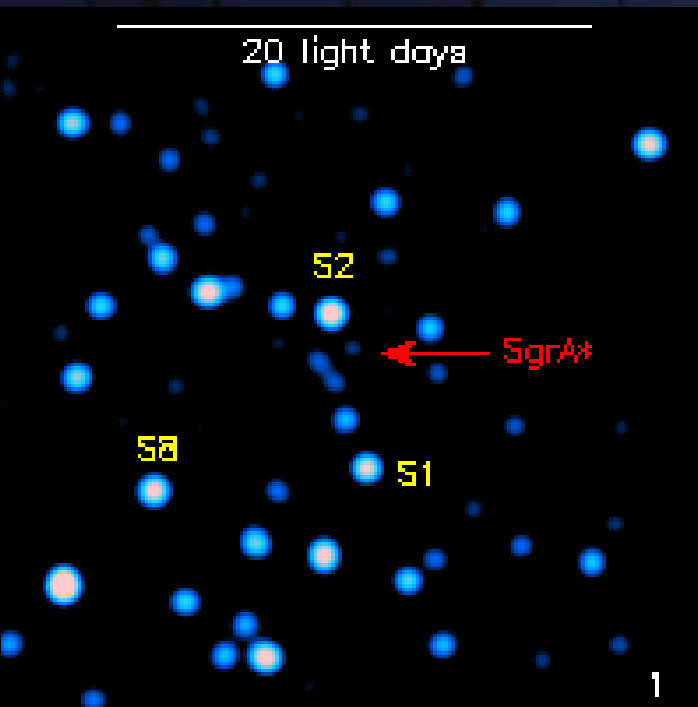
SO-16  
closest  
approach at  
90 AU

Simultaner Fit an alle Bahnen impliziert:

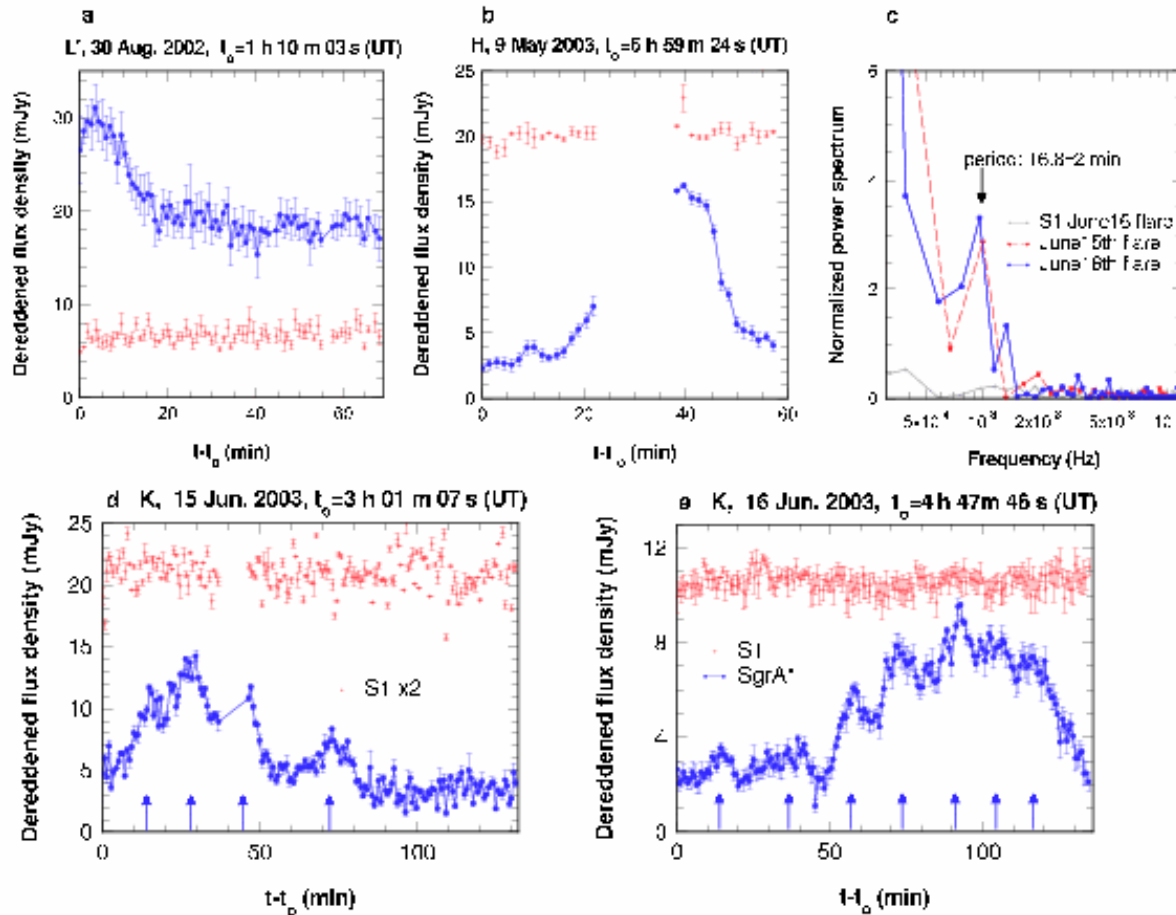
1. Masse des SL: 2.6 Mio Sonnenmassen
2. Eigenbewegung des SL:  $< 0.8 \pm 0.7$  mas/yr



# Spin des SL: SgrA\*

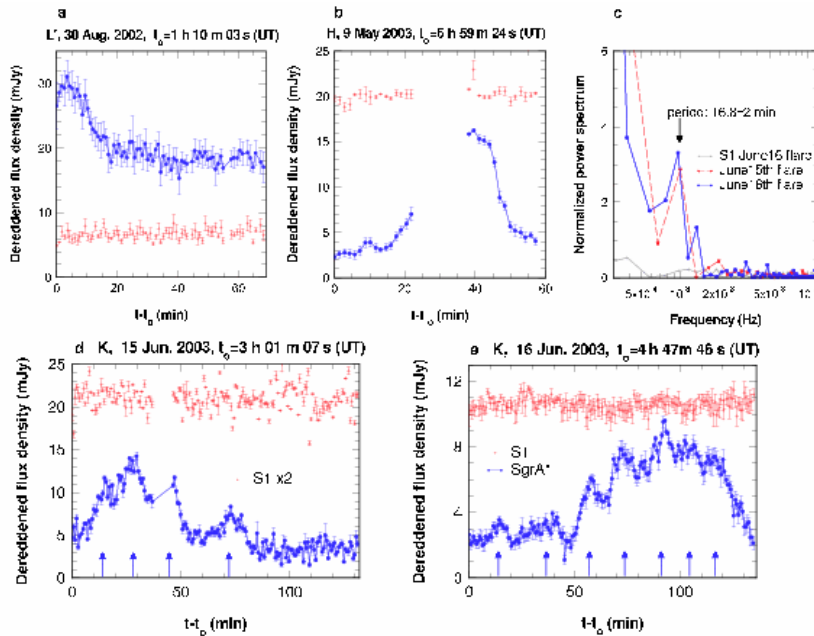


2002 & 2003, 2 flares  
Beobachtet, innerhalb  
von 24 Stunden



- 17 Minuten Periode: Umlaufzeit um das SL?

# Spin des SL: SgrA\*

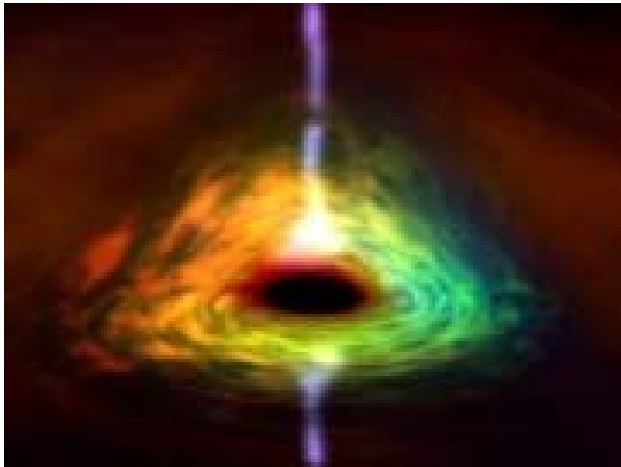


- Erklärungsmöglichkeiten:
  - Akustische Moden einer dünnen Scheibe
  - Lense-Thirring Präzession
  - Präzession von Bahnknoten
  - Bahnbewegung
- Periode im letzten stabilen Orbit ist die kürzeste!
- Einzige Erklärung: Oszillation erzeugt durch Dopplerboosting von heißem Gas nahe des letzten stabilen Orbits eines rotierenden SL (Kerr)
  - Spin des SL erlaubt letzten stabilen Orbit näher am Ereignishorizont und somit mit kürzerer Bahnfrequenz
  - Spin halb so groß wie maximal möglich

Is general relativity a valid description of strong gravity?



\*Infrarot Variabilität der Flußdichte (Genzel et al.) und Polarisation (Eckart et al.) der SgrA\*: hot spots.



\*Letzte stabile Kreisbahn: Radius von 30 (10) micro-Bogensekunden und Bahnperiode von 30 (8) Minuten für ein nicht-rotierende (maximal-rotatierendes) SL im galaktischen Zentrum

\*Ein hot spot würde eine Schwerpunktsbewegung im Infraroten ergeben (PRIMA-VLT) und könnte mit VLBI im sub-mm Bereich beobachtet werden. Quellen: SgrA\* und M87

# Spin des galaktischen SL



- Film geringer Spin des SL:  
3x größerer Radius,  
Akkretionsscheibe unter 45 Grad

Broderick & Loeb

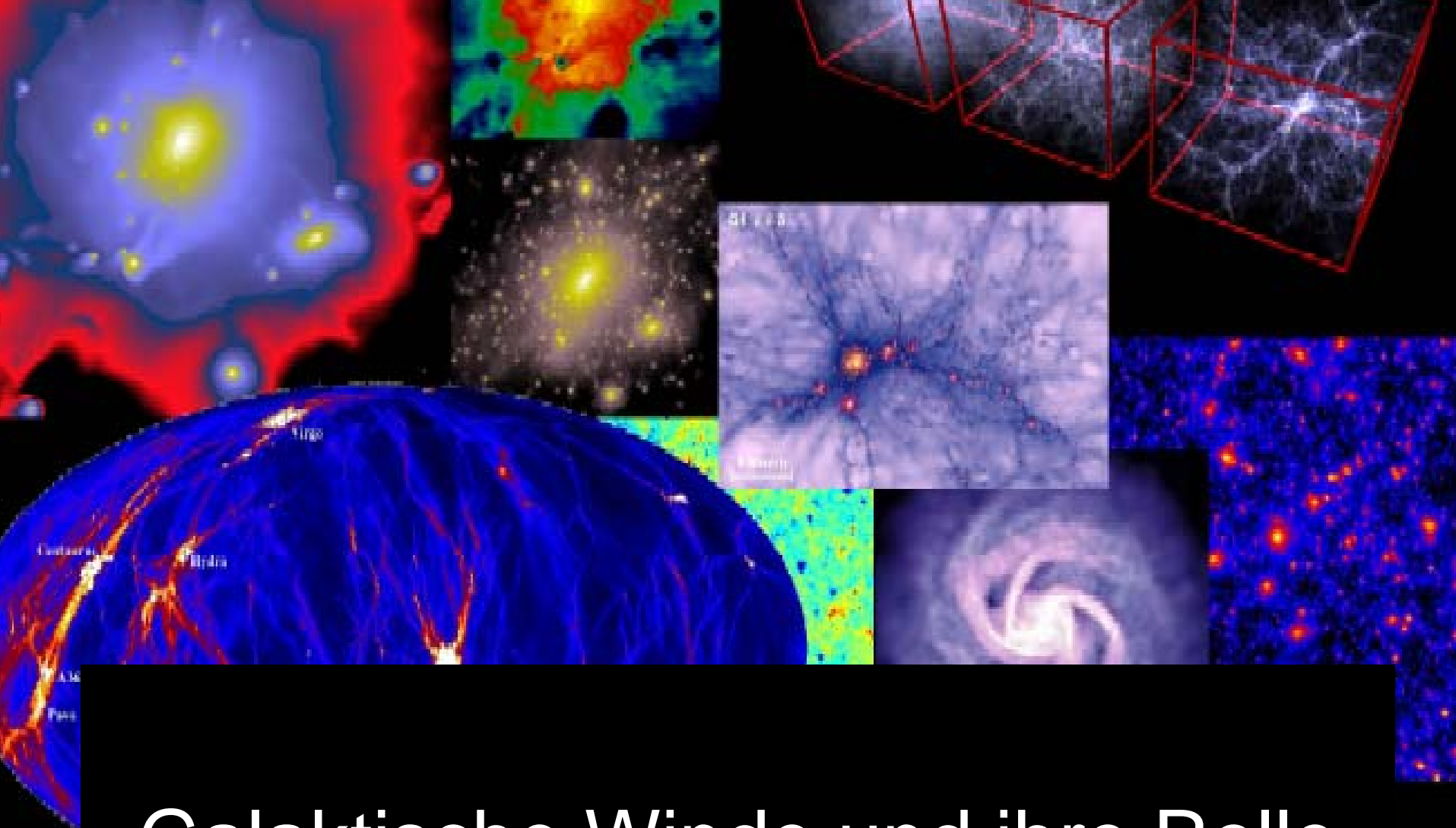
- Film maximal spinnendes SL:



# Noch mehr Spin-Informationen auf größeren Skalen



- Addiertes Spektrum von rund 100 jungen Milchstraßensystemen: Eisenlinie kann vermessen werden
- Eisenlinie im Röntgen-Hintergrund vermessen (XMM, 500 Stunden Beobachtung eines Himmelsausschnitts im Großen Wagen)
- Geschwindigkeit aus Doppler-Effekt und Gravitationsrotverschiebung bestimmt->verbreiterte asymmetrische Linienform
- Hohe Geschwindigkeit -> nahe am Zentrum -> rotieren schnell -> hoher Spin



# Galaktische Winde und ihre Rolle

# Galaktische Winde



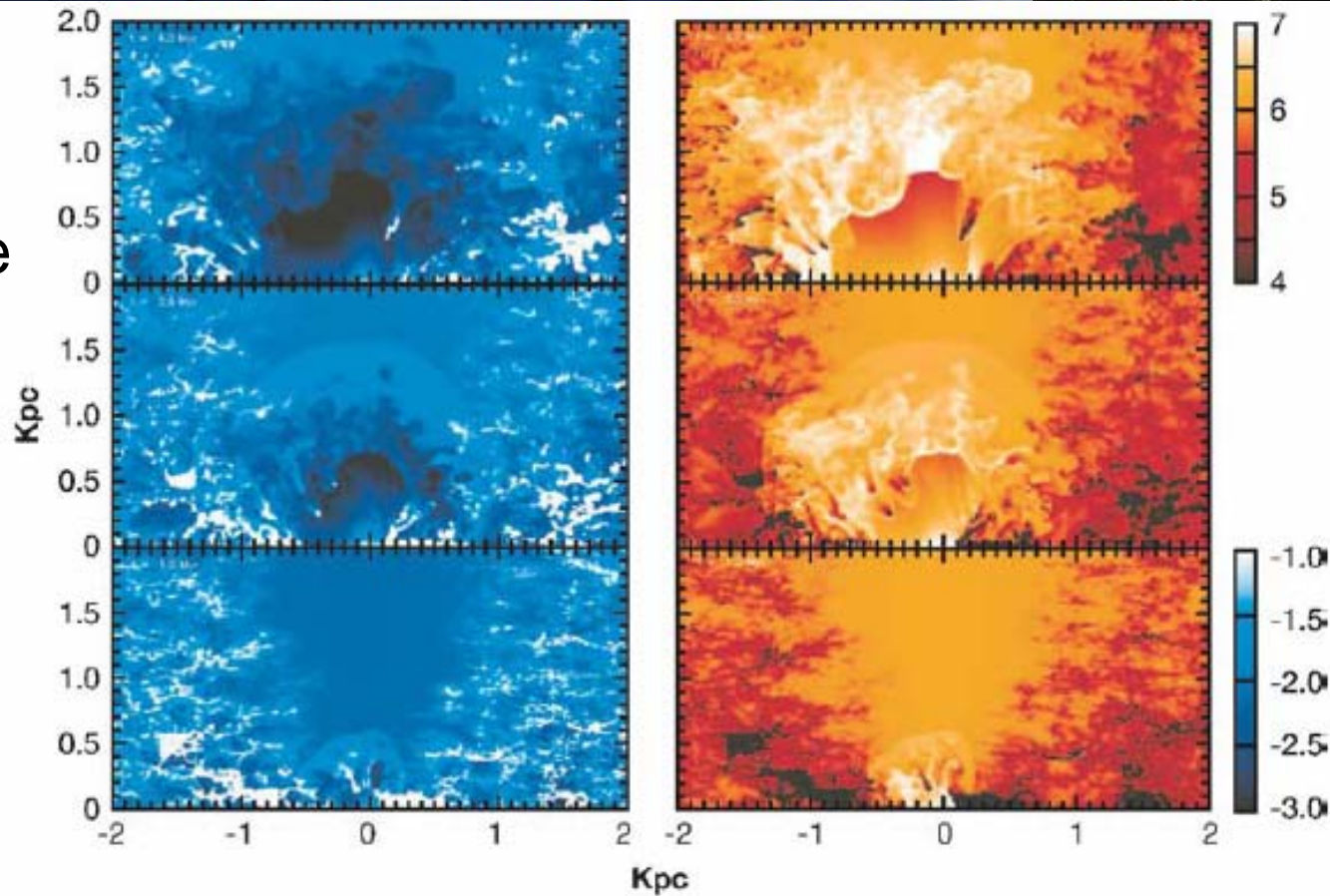
- Zunächst entdeckt in vor 40 Jahren (Lynds & Sandage 1963): evidence for an explosion in the center of the galaxy M82
- Jüngste Entdeckung: spielen wichtige Rolle in hochrotverschobenen Galaxien: feedback-Prozesse als Schlüssel zur chemischen und thermischen Entwicklung der Galaxien und des IGM



# Stellare galaktische Winde



- Starburst winds:  
entstehen durch  
stellare Winde  
und Supernovae
  - Wolf-Rayet  
Sterne, OB-  
Sterne
  - Stellare Winde  
nur in jungen  
starbursts  
( $<10^7$  Jahre)  
von Bedeutung
  - Normalerweise  
SN wichtiger!!



J. Cooper, G. Bicknell & R. Sutherland).



# Galaktische Winde in AGN



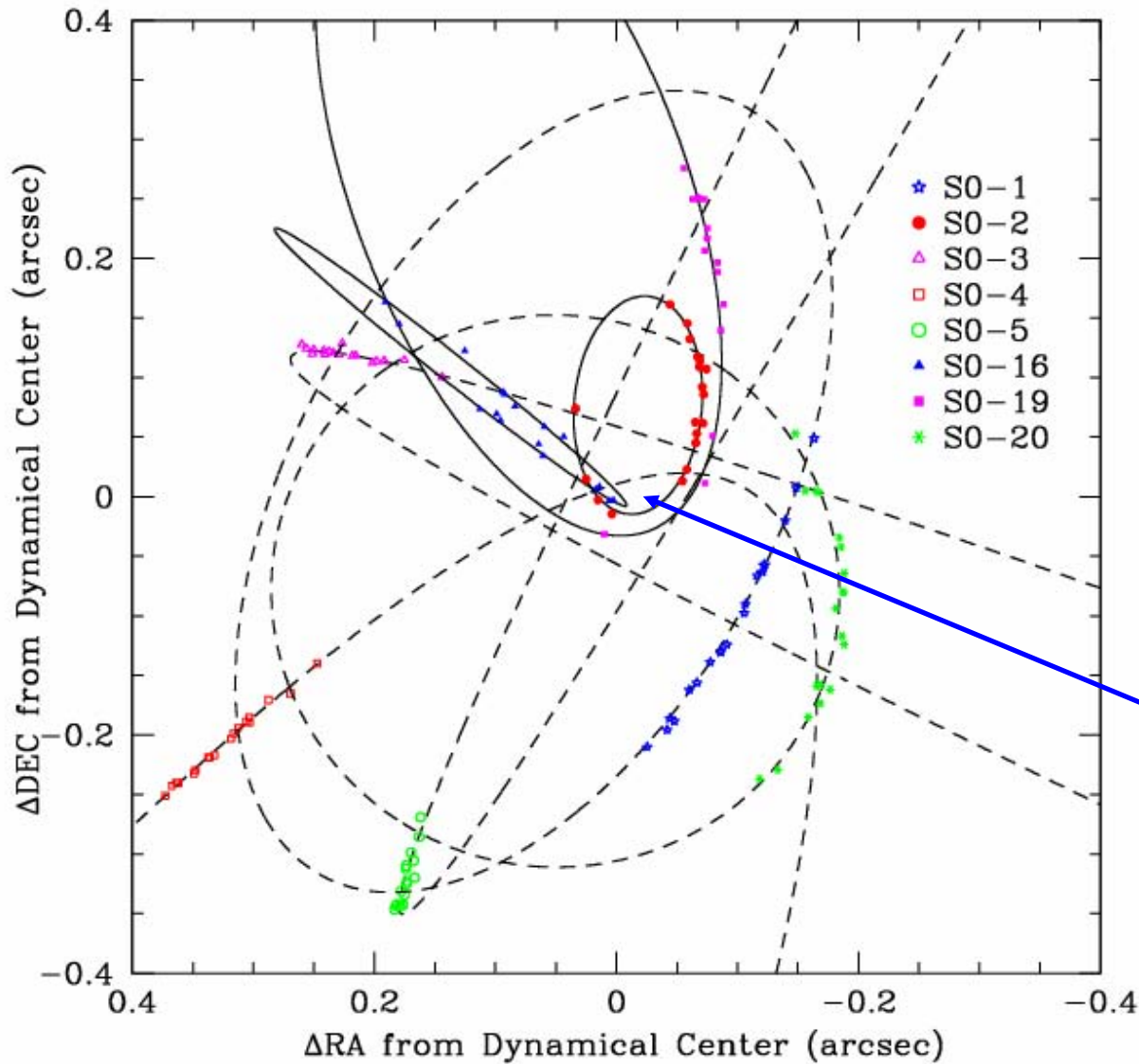
- Akkretion:  $\dot{E} \sim 10^{11} (\epsilon/0.01) M_{\text{acc}} L_{\alpha}$
- $M_{\text{acc}}$  Massen Akkretionsrate in  $M_{\alpha}$  /Jahr und  
 $\epsilon$  Energie-Konversionseffizienz (abhängig vom Spin und den Randbedingungen nahe des Ereignishorizontes, max:0.4)
- Großteil der freigewordenen Energie: möglicherweise galaktische Winde
- Strahlung „pusht“ das umgebende Gas durch **Elektronen-Streuung, Streuung und Absorption an Staubkörnern, Photoionisation, etc.**
- **Compton geheizte AGN Winde** entlang der kleinen Achse der Akkretionsscheibe
- Magnetfelder in Akkretionsscheiben erzeugen magnetisch aktive Koronae -> diese wiederum erzeugen hydromagnetische Ausflüsse, die am Ursprung der Jets sein könnten

# Galaktische Winde (Beobacht. SgrA\*)



Law & Jusef-Zadeh

- Galactic Center Lobe (rot)
- MSX spacecraft, Staub bei unterschiedlichen Temperaturen
-

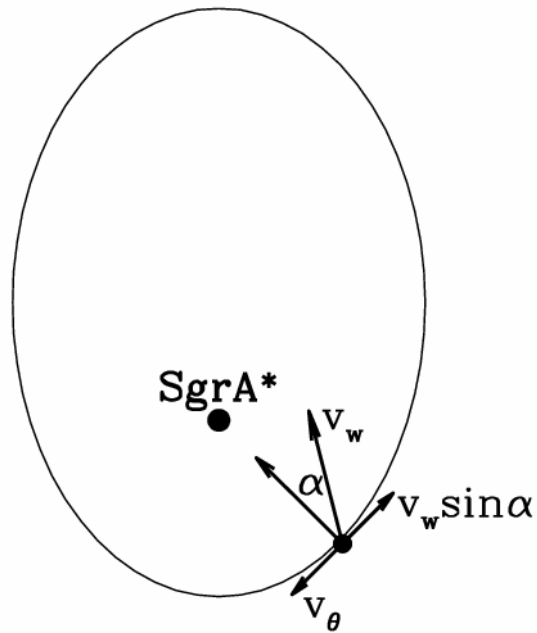


SO-16  
closest  
approach at  
90 AU

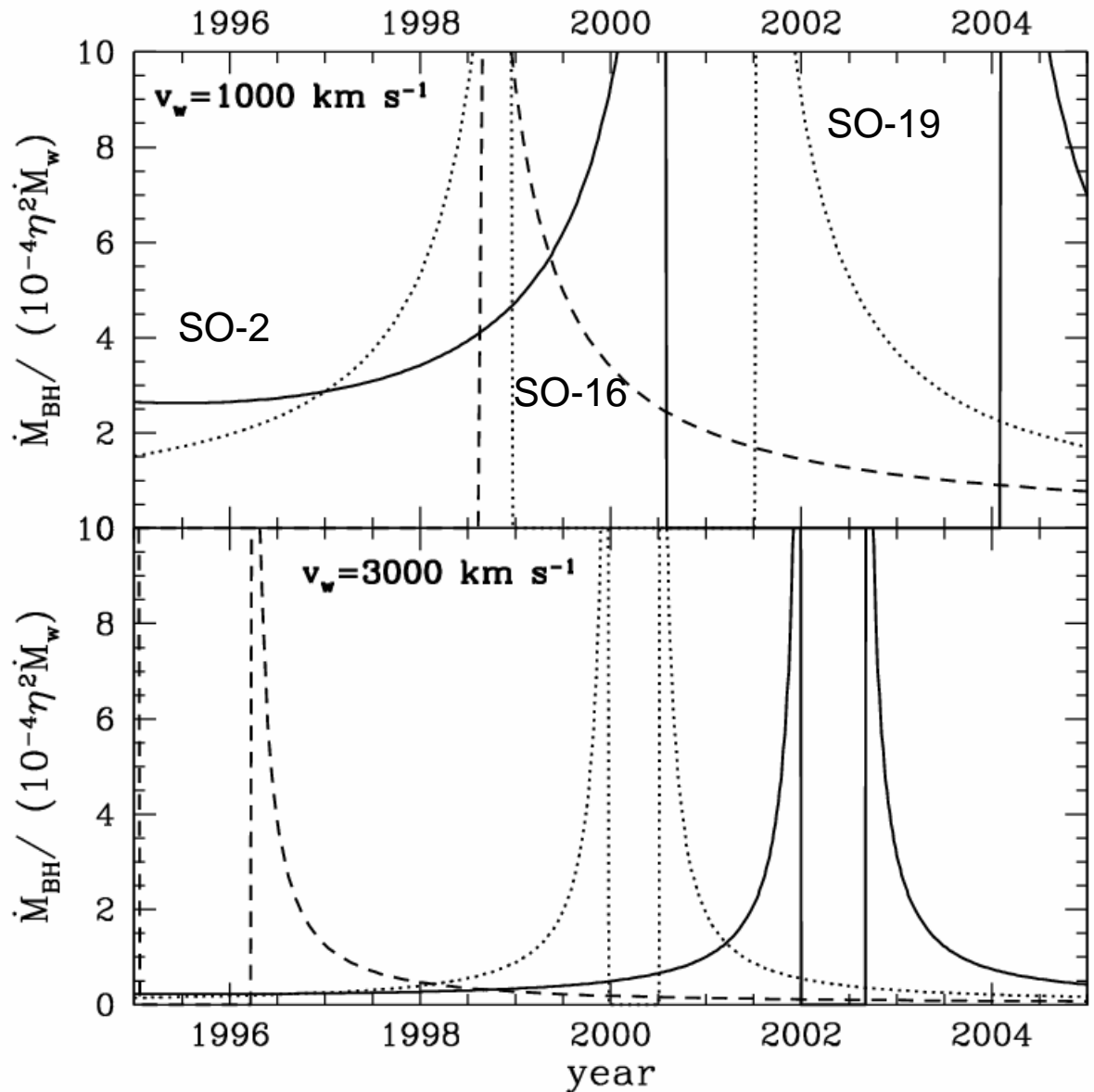
Simultaner Fit an alle Bahnen impliziert:

1. Masse des SL: 2.6 Mio Sonnenmassen
2. Eigenbewegung des SL:  $< 0.8 \pm 0.7$  mas/yr

# SgrA\* mit galaktischen Winden füttern

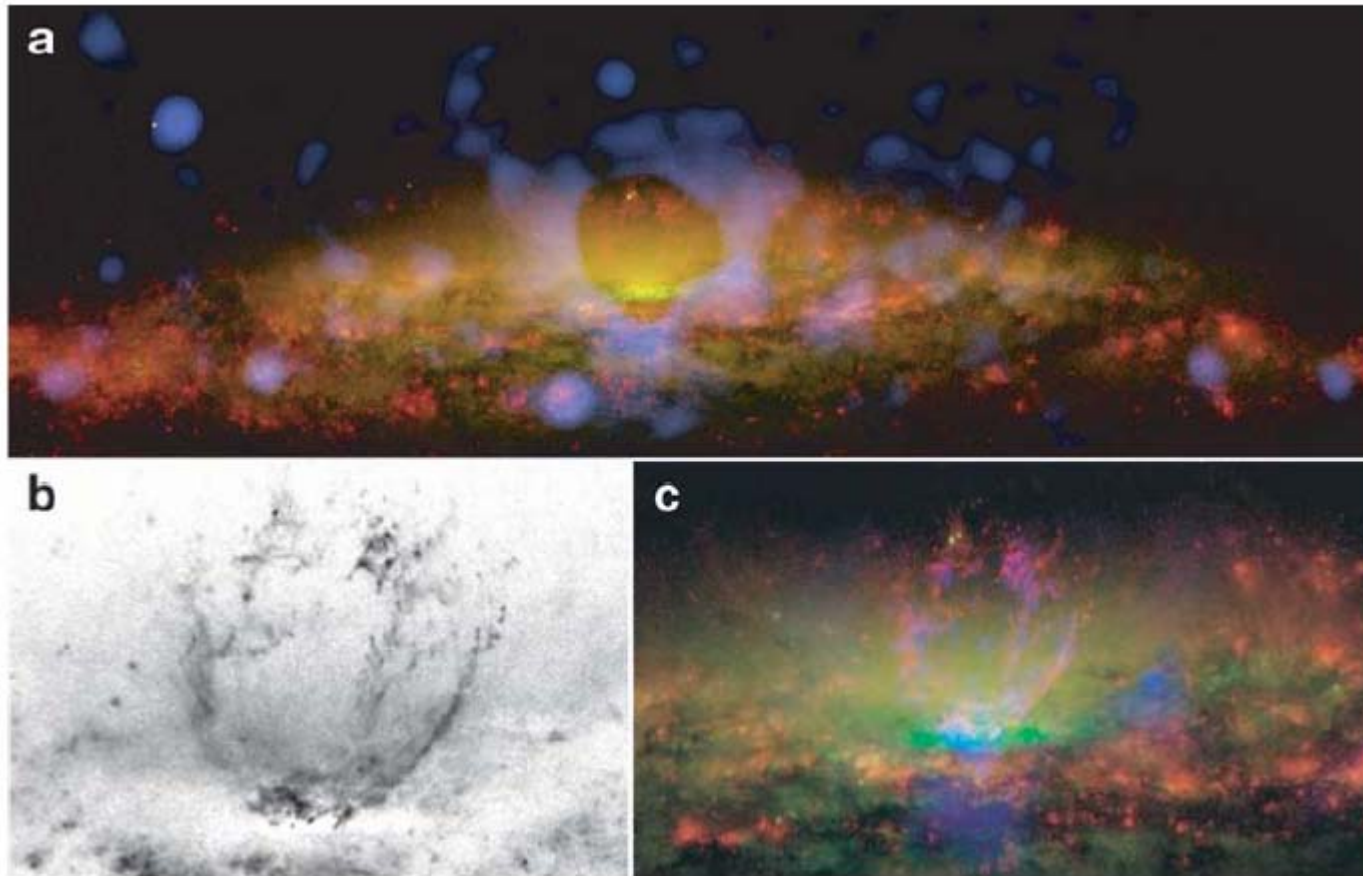


$$\dot{M}_{\text{BH}} = 0 \text{ if } v_{\theta} > v_w$$



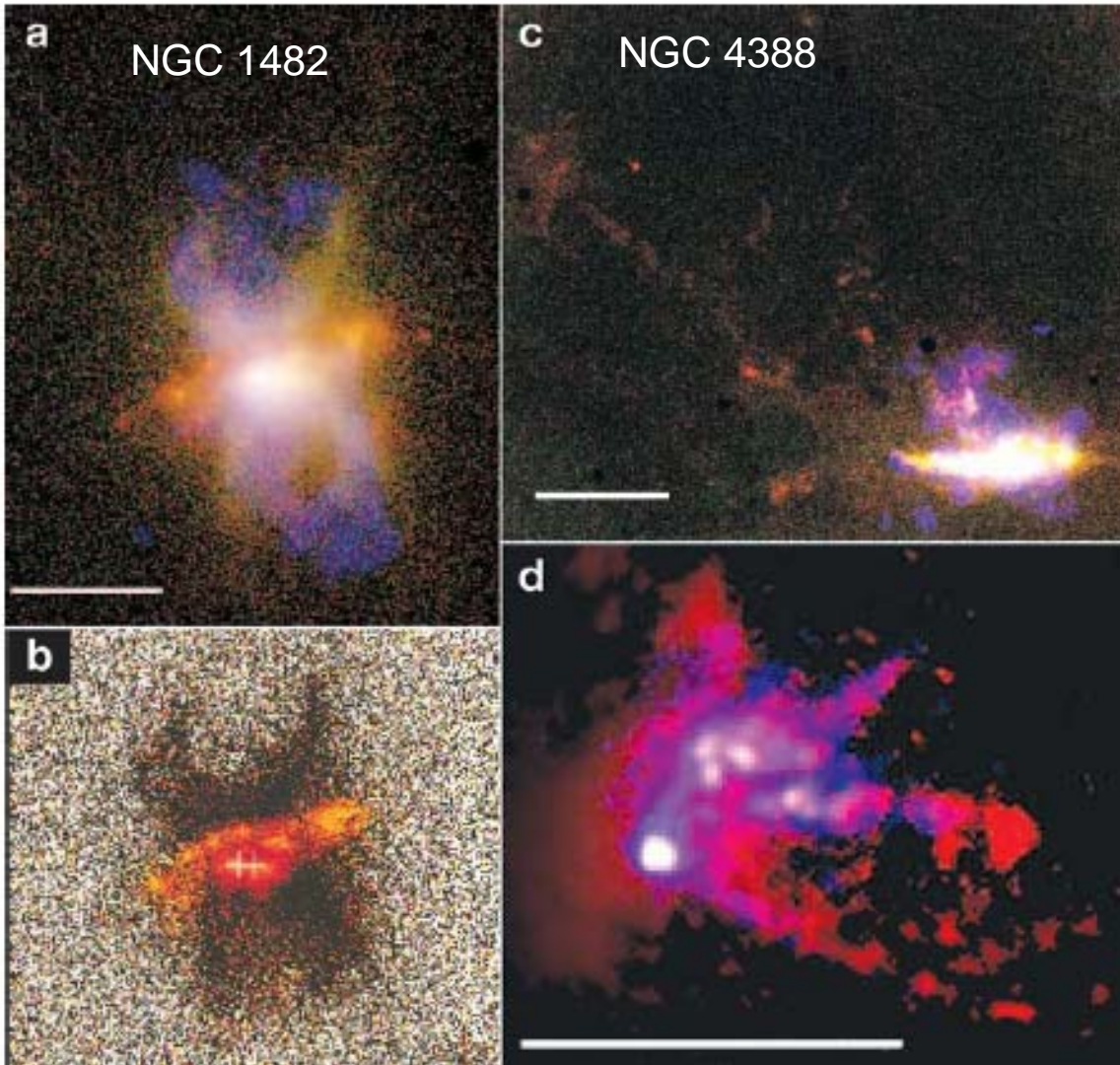


# Galaktische Winde: NGC 3079

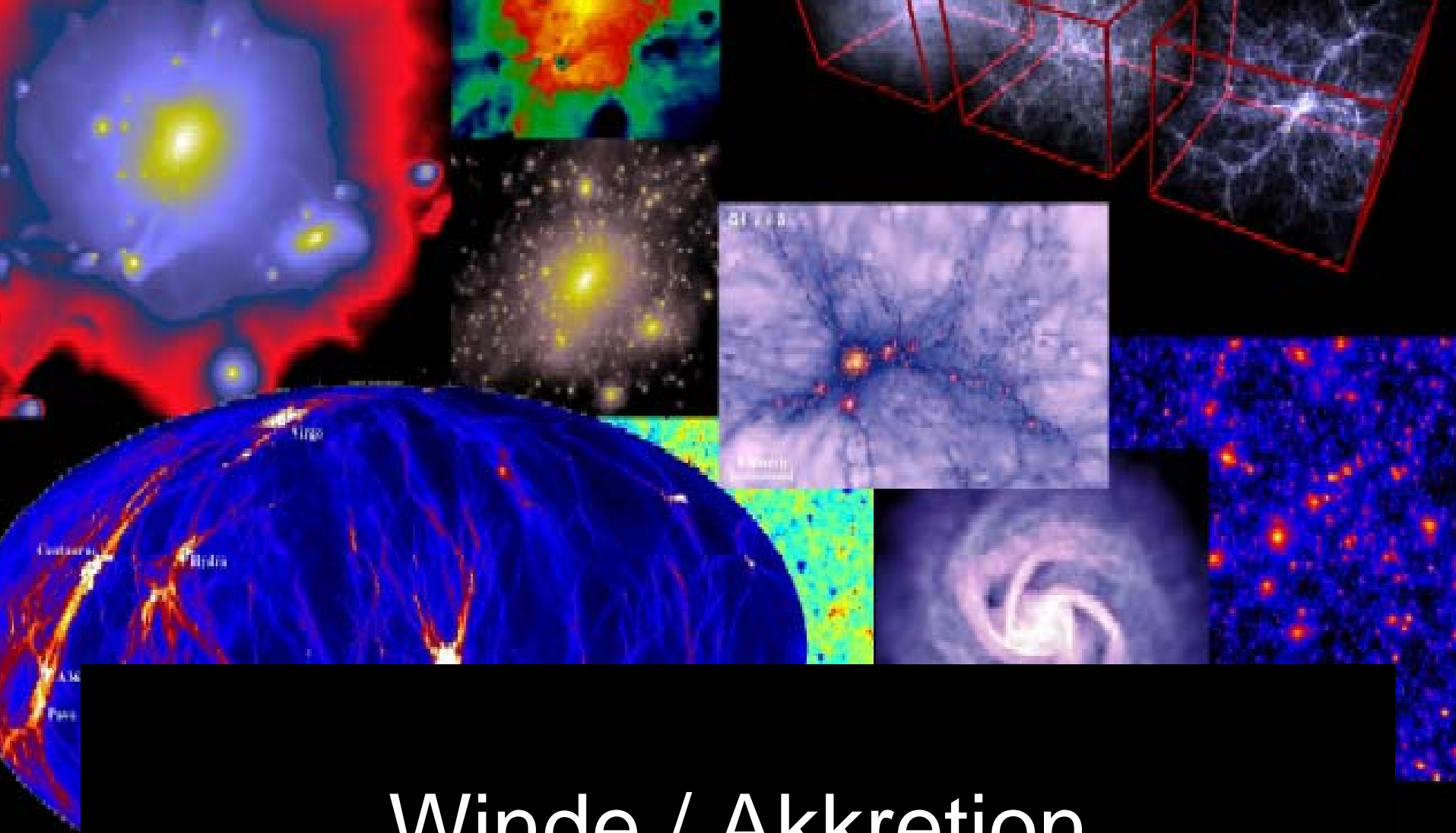


- NGC 3079, HAST (rot, grün) CXO (blau)
- a) 15x5 kpc b) 1x1.2kpc superbubble c) zoom (Röntgen blau)

# Galaktische Winde



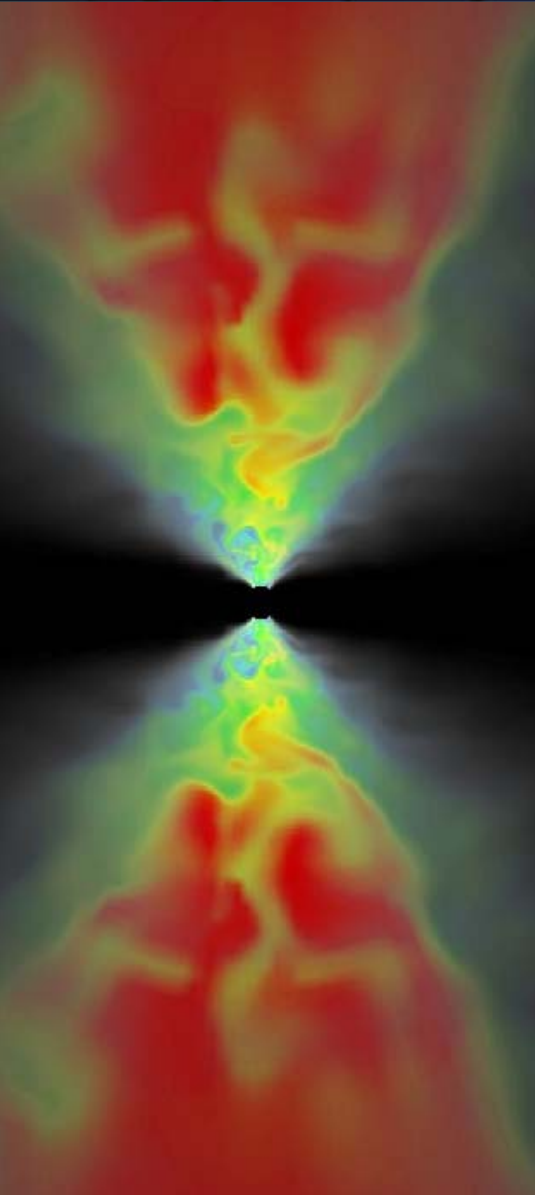
- a) Starburst NGC 1482
- b) Seyfert NGC 4388
- c) Circinus



# Winde / Akkretion



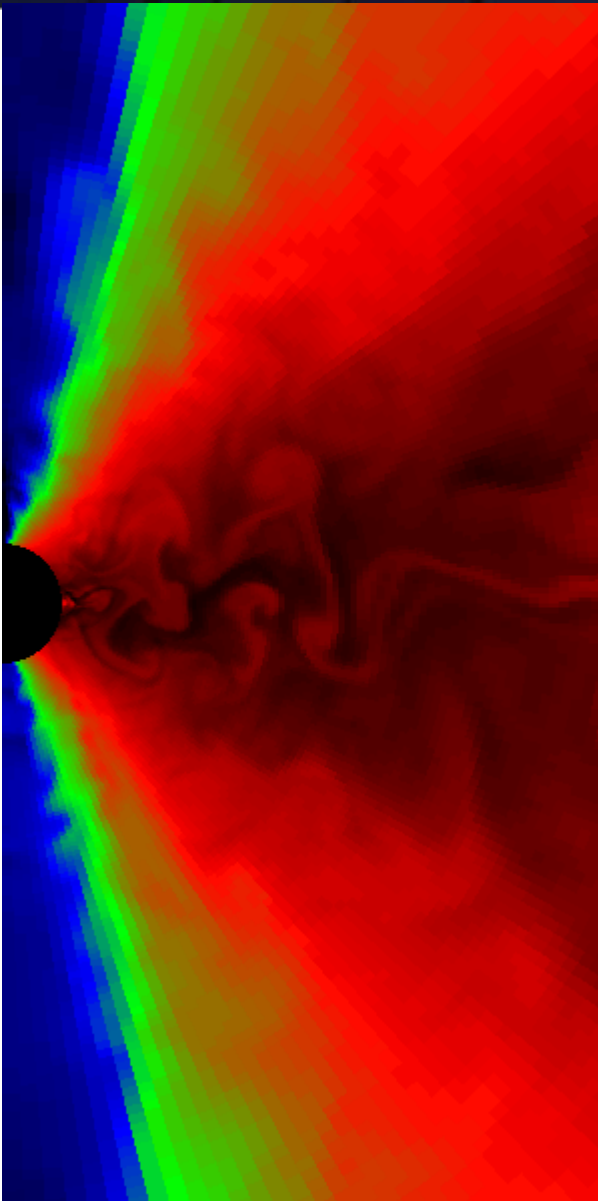
# Akkretion: Wie genau funktioniert sie?



- Versuch der Erklärung unterschiedlicher Helligkeiten von AGN/SL
  - Stille Akkretion: Gas kann nicht schnell genug Strahlung abgeben bevor es den Ereignishorizont erreicht und im Schwarzen Loch verschwindet (heiße dicke Scheibe, schwache Abstrahlung)
  - Zusätzlich zu Gas-Ansaugen kommt es auch zu starkem Gasausstoß: nur kleiner Bruchteil kommt dem SL genügend nahe um sehr heiß zu werden und stark zu strahlen

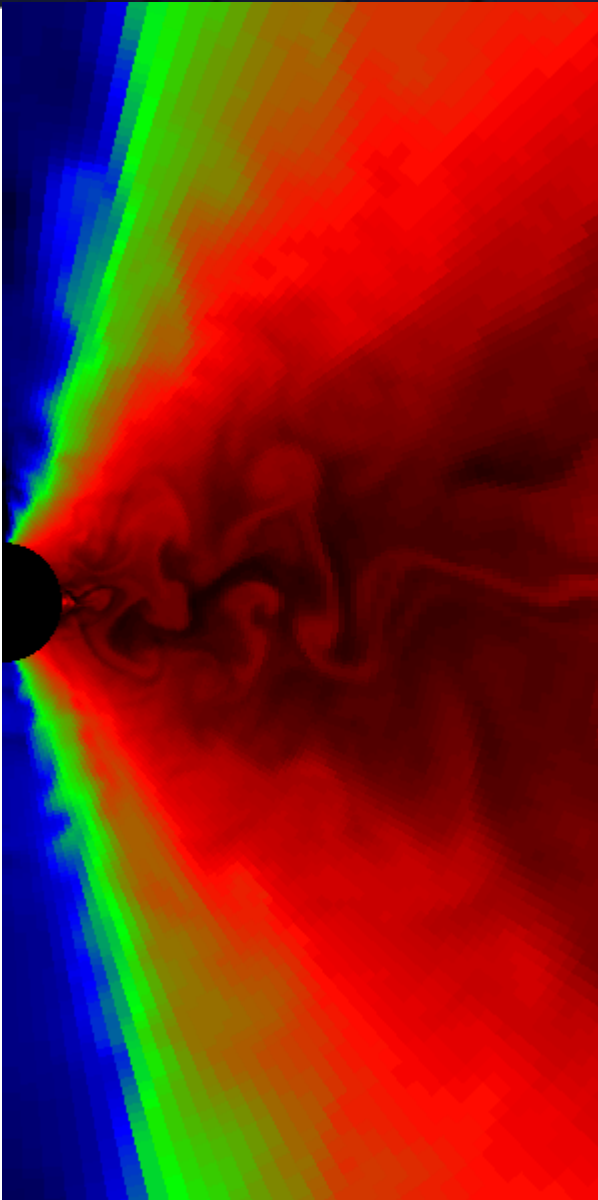


# Akkretion: wie genau funktioniert sie?



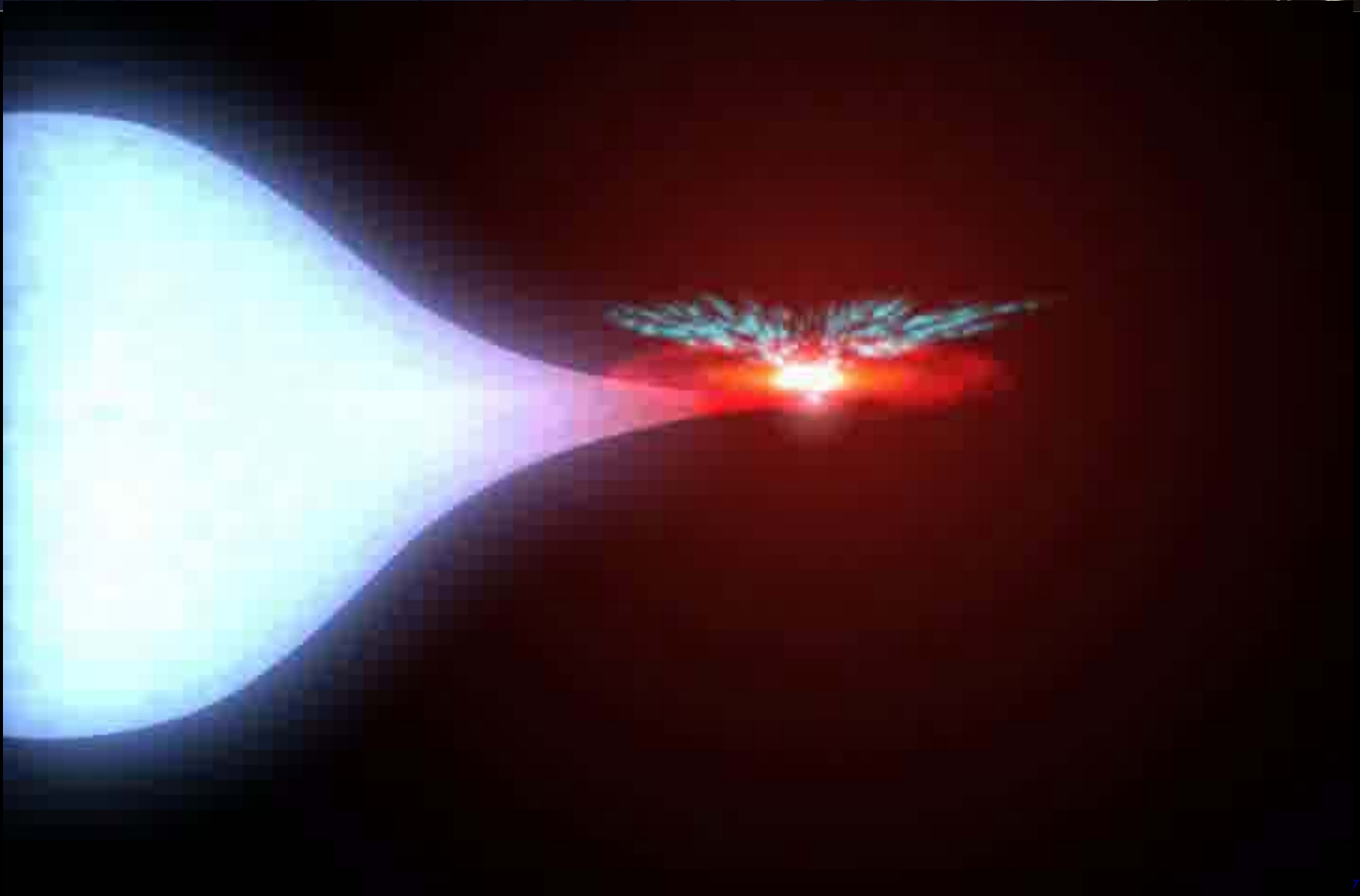
- Bild zeigt 10% des hydrodynamischen Akkretionsflusses
- Bsp. Akkretionsfluß kann nicht durch Abstrahlung kühlen, wird vertikal dicker und nahezu sphärisch
- Turbulenzen, Netto-Massenakkretionsrate ist sehr gering und bestimmt durch die Bedingungen am inneren Rand
- Geringe Akkretionsrate kann Defizit an hochenergetischer Emission erklären

# Akkretion: Wie genau funktioniert sie?

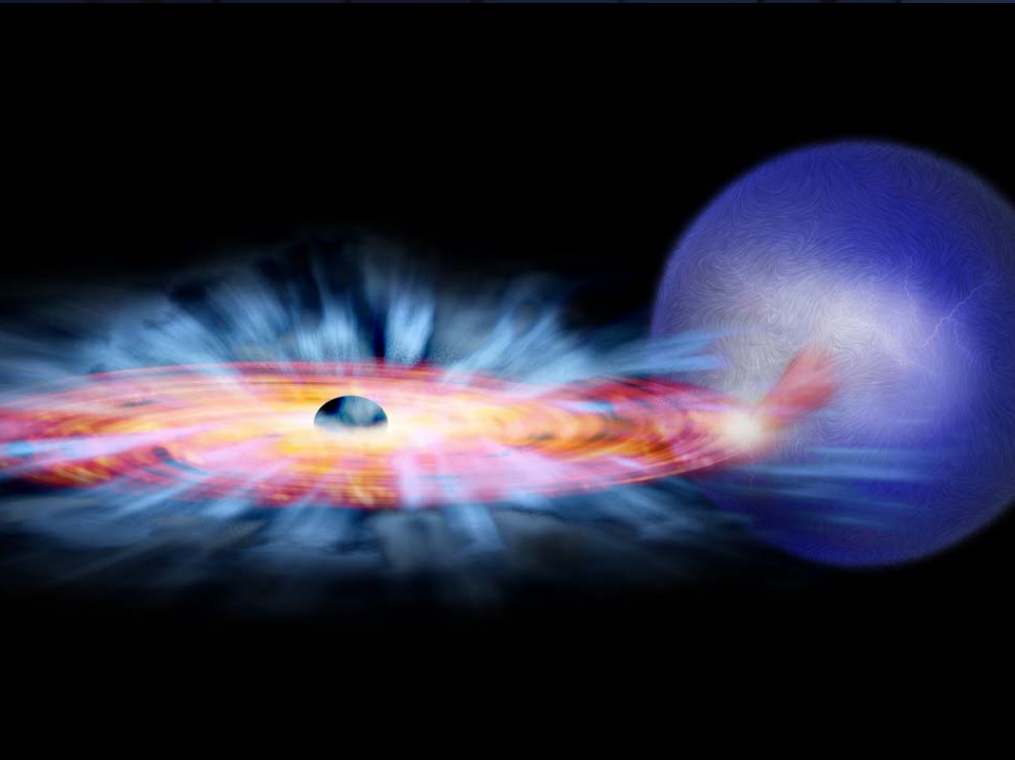


- Bislang: erwartet, daß finale Phase des Materieeinfalls gleichmäßig und ruhig verläuft
- Aber: wesentlich turbulenter und chaotischer als vermutet
- Relativistische Effekte (verwickelte Magnetfelder + relativistische Gravitation) führen zu Verstärkung zufälliger Bewegungen und so zu turbulenten Störungen des Materieeinfalls
- Sich aufschaukelnde Störungen der Dichte, Geschwindigkeit und magnetischer Feldstärke
- Chaotische Turbulenzen: schnelle Schwankungen der Strahlung

GRO J1655-40: Modell für AGN



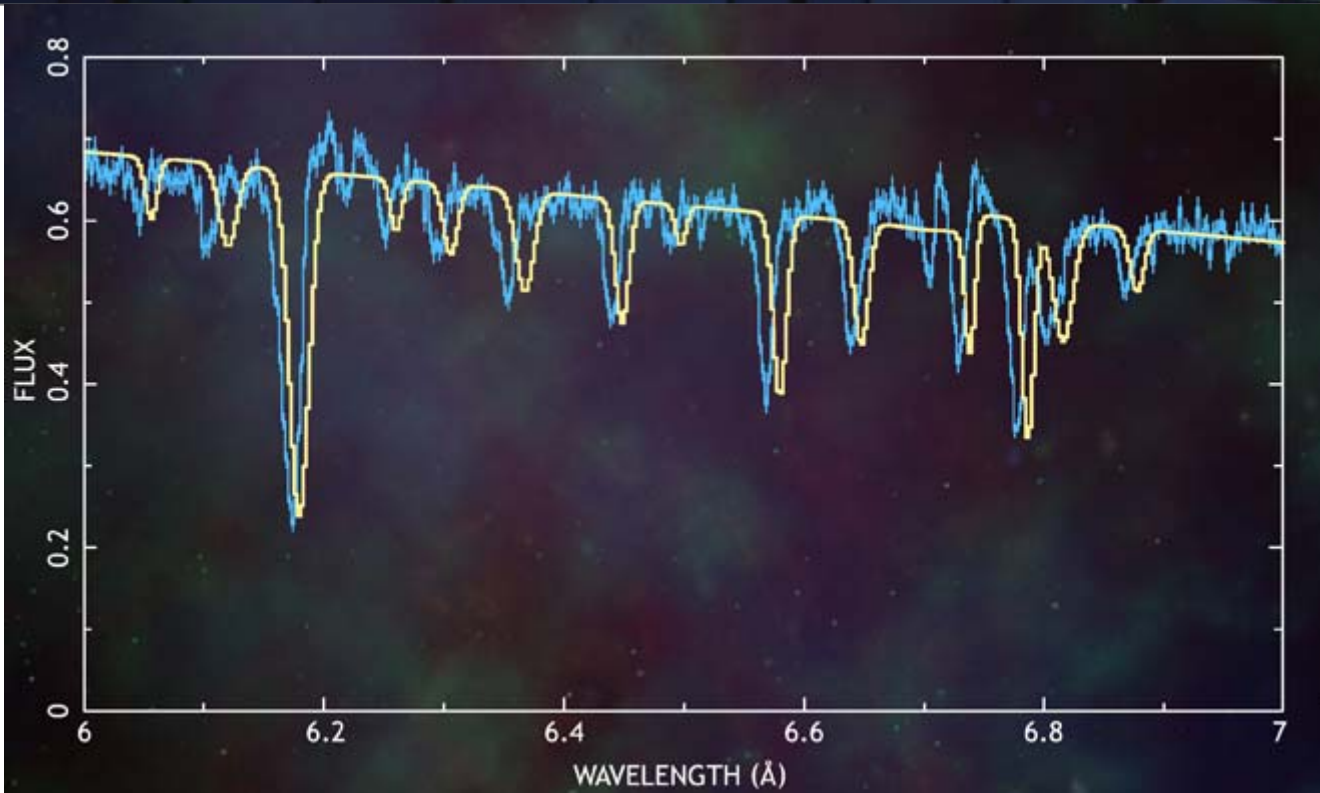
# GRO J1655-40: Akkretionswind



- Röntgenspektrum eines binären Sternsystems (Schwarzes Loch + normaler Stern 7-facher Sonnenmasse) -> Winde eines Multimillionen Grad heißen Gases bewegen sich um das Schwarze Loch
- 30% des Gases werden weggestrahlt und gelangen nicht in das SL
- Starke Magnetfelder erzeugen magnetische Turbulenzen, diese erzeugen Reibung in der Gasscheibe und treiben den Wind von der Gasscheibe weg (Drehimpuls wird so abtransportiert)
- **Magnetische Reibung** erhitzt das Gas im inneren Teil der Scheibe (Röntgen-Strahlung)



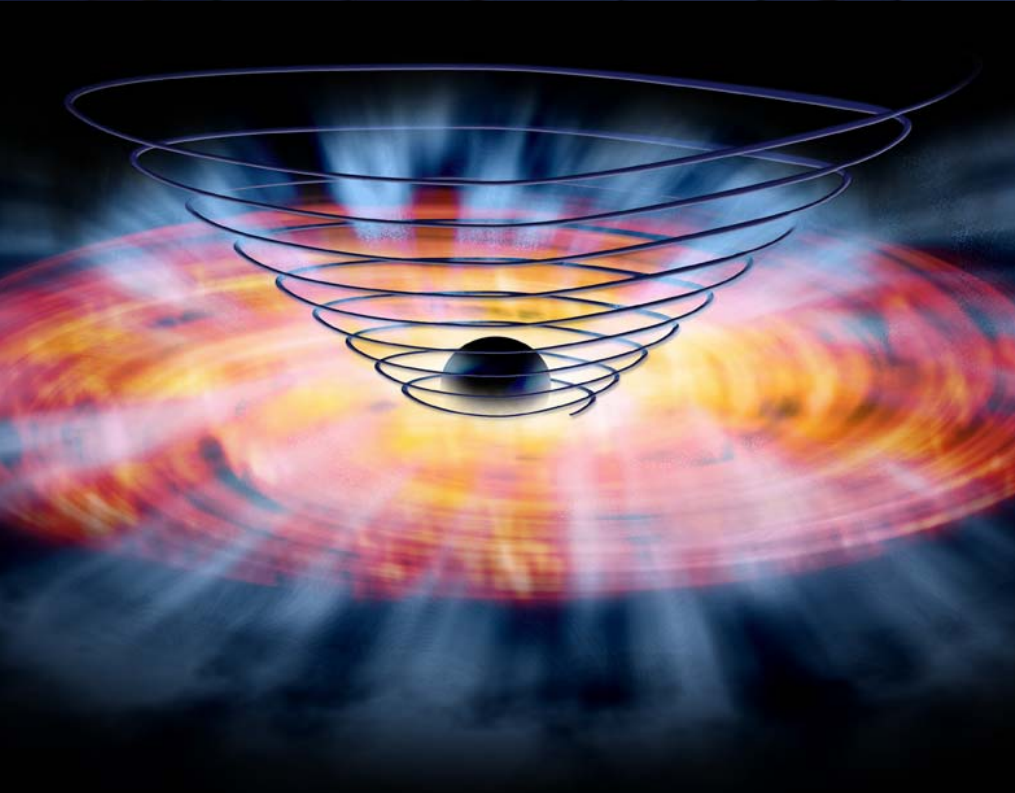
# GRO J1655-40: Akkretionswind



Blau: CHANDRA Spektrum  
Gelb: Modell Spektrum

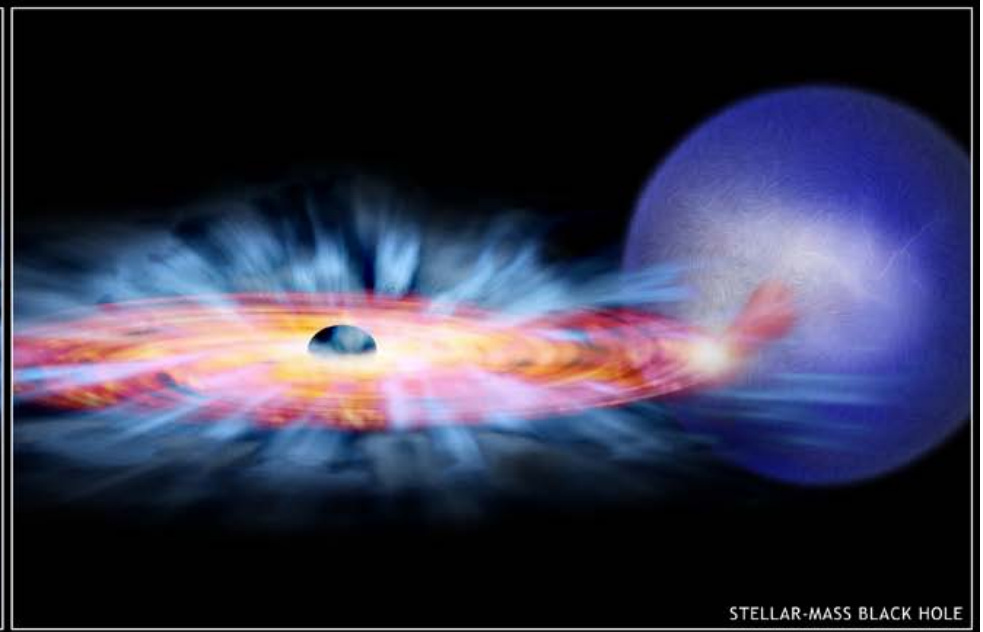
- Absorption von verschiedenen hoch-ionisierten Atomen (Sauerstoff bis Nickel), bewegen sich mit hohen Geschwindigkeiten in Hochgeschwindigkeits-Wind weg vom SL -> Magnetfelder müssen Rolle spielen

# GRO J1655-40: Akkretionswind



- Magnetfelder, Rotation der Scheibe + Magnetfeld: Magnetfeldlinien wickeln sich auf und Gas wird von der Scheibe weggetrieben

# GRO J1655-40: Vergleich mit AGN

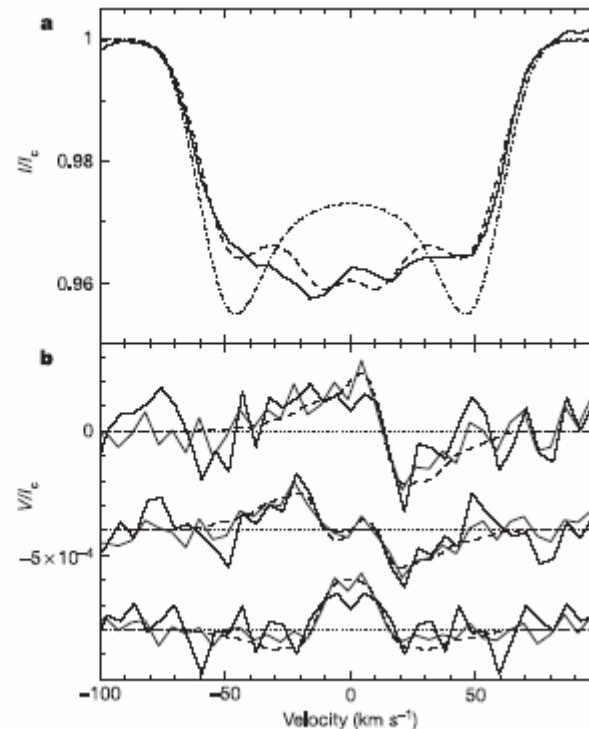
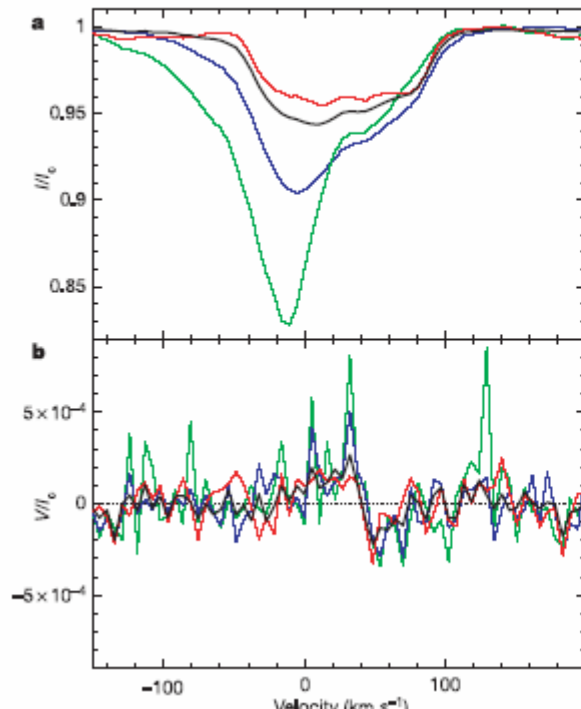


- Links: AGN, Rechts: binäres Stern-System
- .... Viele Gemeinsamkeiten trotz unterschiedlicher Größen und Massen ...
- Mechanismus zur Erzeugung des Windes vermutlich sehr ähnlich!

# Magnetfeld im Innern einer Akkretionsscheibe (Protostern)



- Protostellare Akkretionsscheibe
- 1 kG Magnetfeld nahe am Zentrum der Scheibe
- Filamentartiges Feld, verlangsamt das Scheibenplasma (kein Jet)

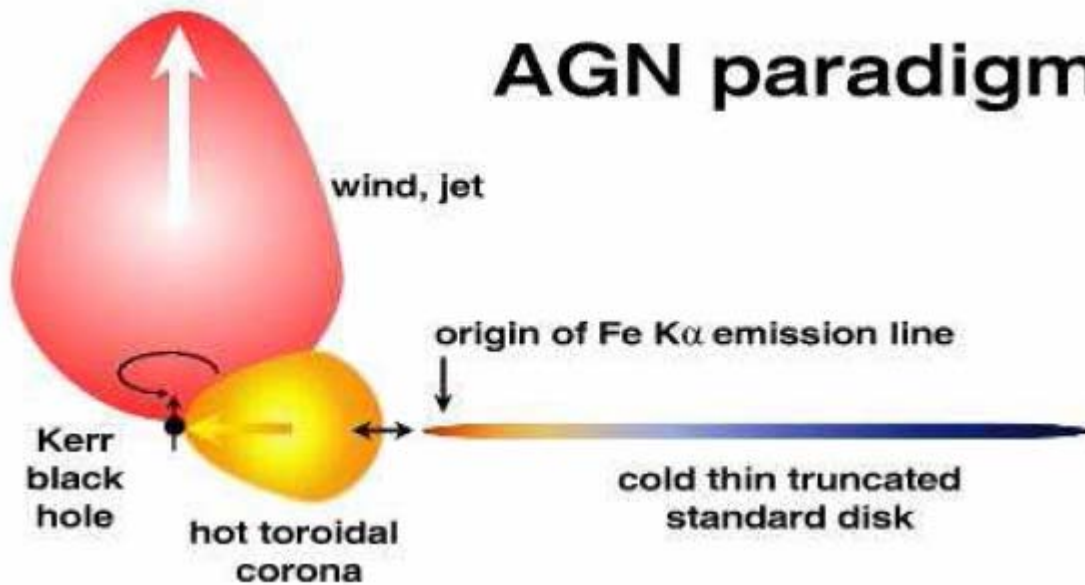


Donati et al. 2005





# AGN paradigm

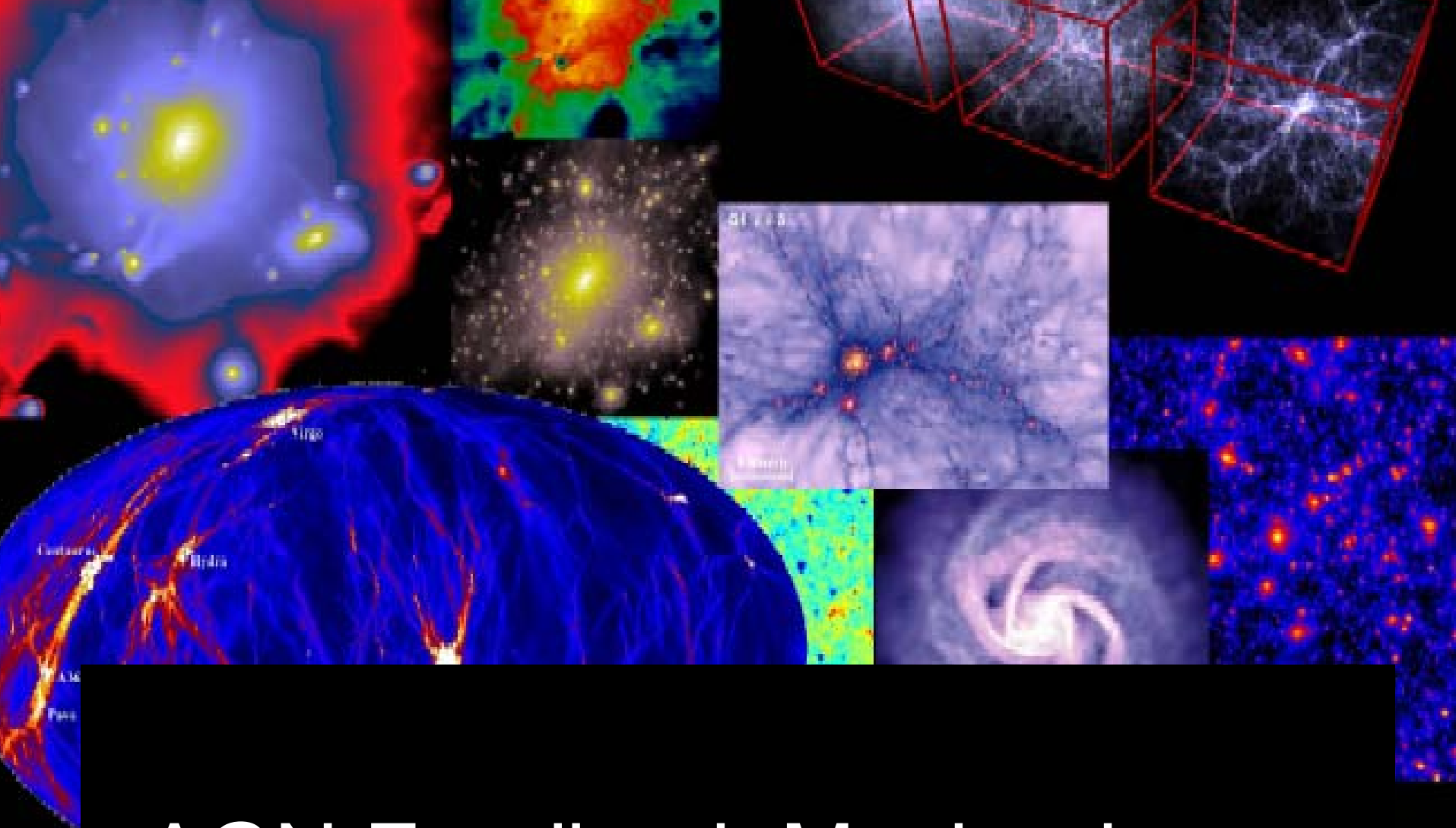


# Neues 3C273



Infrarot, optisch (100 000 Lj),  
Röntgen (Lebensdauer 100 Jahre)

- Der Quasar 3C273 (kleiner Punkt oben links) und der zugehörige Jet. Die Farben des Jets kennzeichnen verschiedene Wellenlängen. So erscheint Röntgenstrahlung blau und Radiostrahlung rot.  
**Bild:** S. Jester, D. E. Harris, H. L. Marshall und K. Meisenheimer
- Verschiedene Theorien zur Erzeugung hochenergetischer Strahlung:
  - WW mit Mikrowellenhintergrund
  - **Synchrotronstrahlung**, Problem: Nachbeschleunigung notwendig



# AGN Feedback Mechanism

**Jets:** Radio,  
optisch, Röntgen,  
Gamma

**Galaxie:** alle  
Bänder

**Torus:** IR, optisch,  
UV, Radio

**SMBH:** alle Bänder

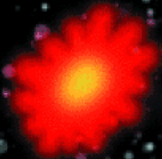
**Akkretionsscheibe**  
optisch, UV,  
Hochenergie

**BLR/NLR:** optisch,  
UV, Hochenergie

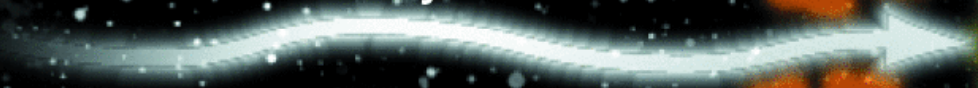
**Interstellares  
Medium:** alle  
Bänder



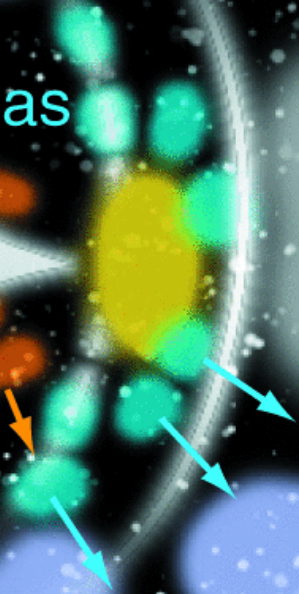
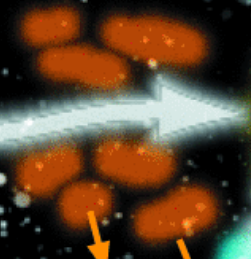
AGN



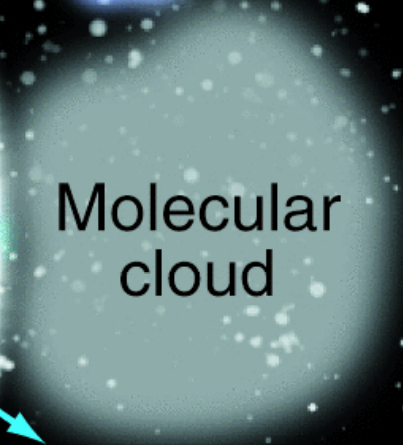
shocked, ionized gas  
radio jet



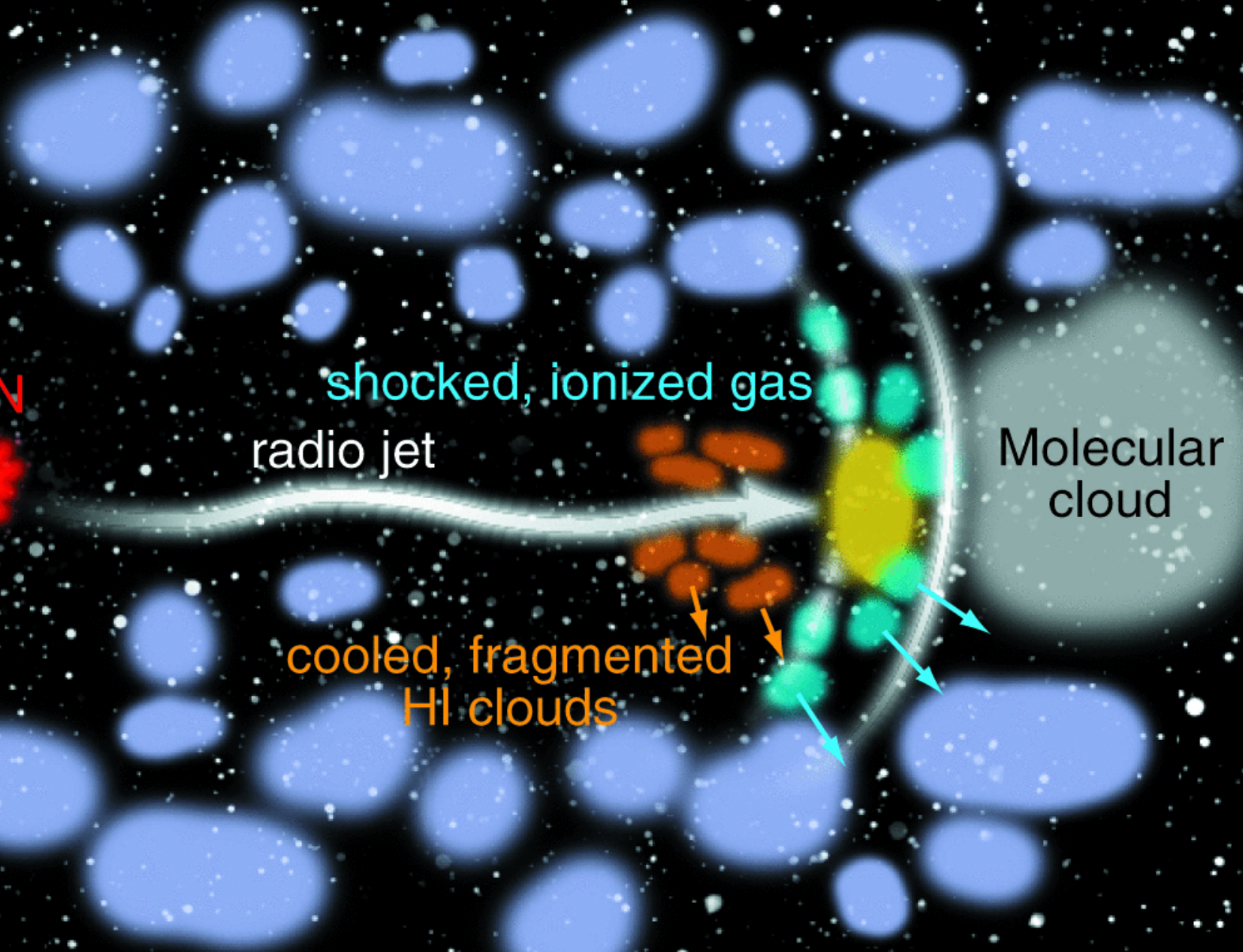
cooled, fragmented  
HI clouds



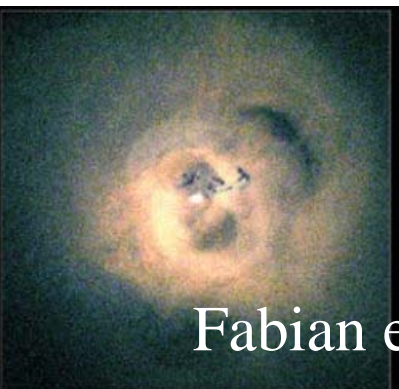
Molecular  
cloud



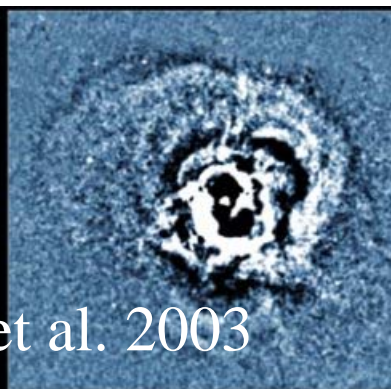
regularly rotating gas



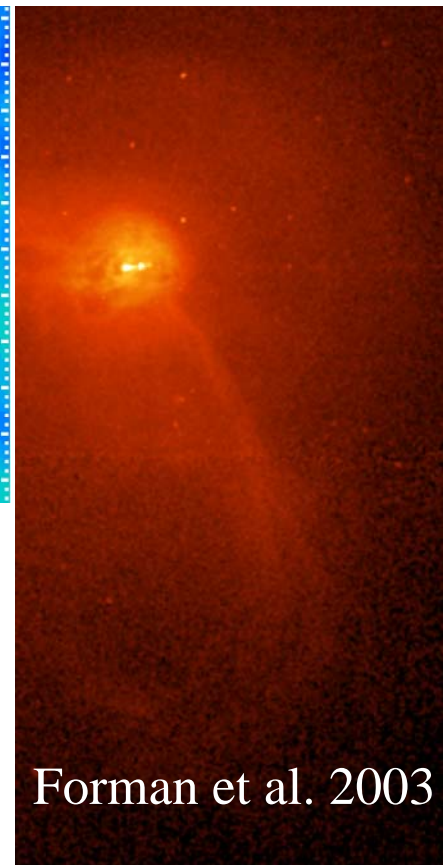
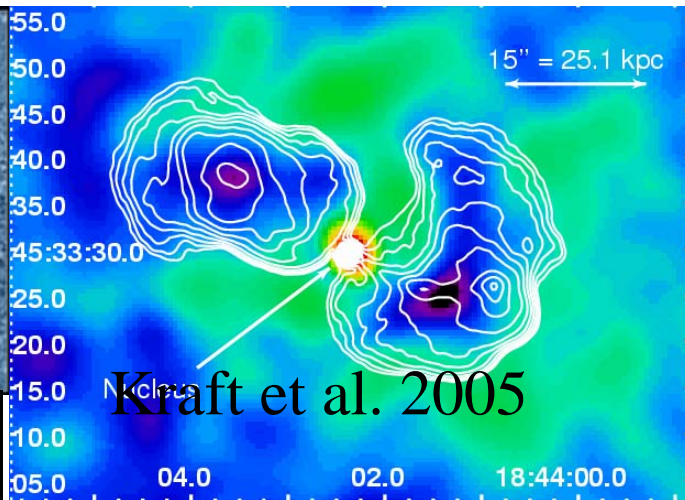
How do nuclear black holes influence the evolution of their host galaxies, X-ray clusters, or the larger-scale intergalactic medium?



Fabian et al. 2003



McNamara et al.  
2005



Forman et al. 2003

- *What is the dominant mechanism that mediates the energy transfer? acoustic waves, relativistic particles and magnetic fields*
- *Is the growth of the stellar spheroid affected by this feedback?*



# In welcher Form geben Schwarze Löcher Akkretionsenergie frei?



- **Strahlung:** Strahlungsdruck und Strahlungsheizung
- Nicht-relativistischer **Wind**
- magnetische **Jets**
- **Energiereiche Teilchen:** geladen (kosmische Strahlung), neutral (relativistische Neutronen, Neutrinos)
- **Gravitationsstrahlung**

# Möglichkeiten des Feedback



- **Strahlungsdruck** übt Kraft auf Gas über Elektronenstreuung aus
  - Vernachlässigbar im Bereich des Eddington-Limits
  - Wichtiger: Strahlungsdruck auf Staub!
- **Strahlungsheizung** ionisierende Strahlung des AGN erzeugt einen abrupten Übergang von der typischen HII-Region Temperatur zu einer höheren
  - UV-Strahlung gelangt über größere Distanzen
  - Nur gigantischem Molekülwolken überleben
  - Eigenartige Wolkengeschwindigkeiten entstehen, “Raketeneffekt”



# Möglichkeiten des Feedback



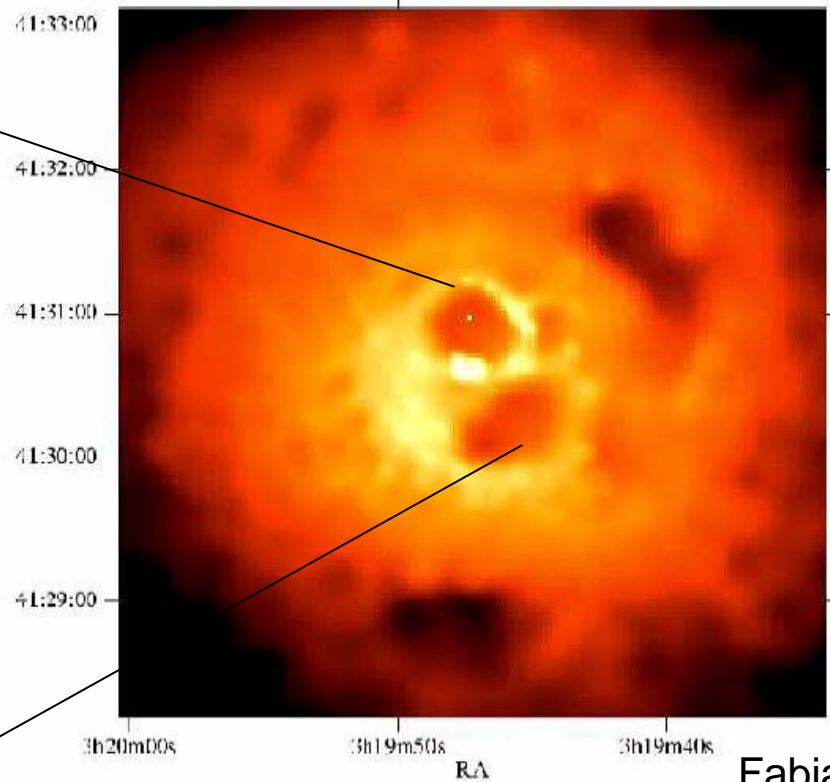
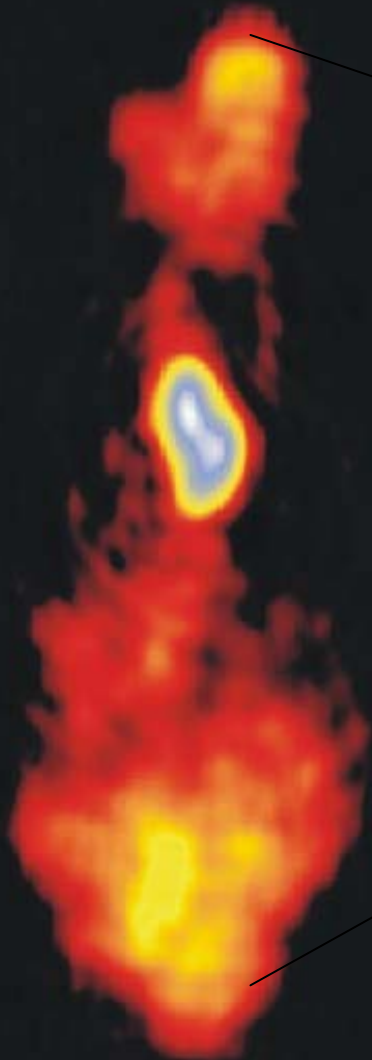
- **Energiereiche Teilchen** (relativistische Neutronen und Neutrinos):
  - Extreme Winde könnten durch ultrarelativistische Neutronen erzeugt werden
- **Kinetische Energie:**
  - Magnetisch aktive Koronae aus der Akkretionsscheibe erzeugt; produzieren
  - + Jets

# AGN-Feedback



- Energiebudget eines AGN:  
 $10^{19} (\epsilon/0.01) \text{ erg/Gramm}$
- AGN-feedback in Galaxienhaufen: kinetische Energie Injektion-> Cooling flows beobachtet
  - Radiogalaxien: Großteil der Energie in „cocoon“
  - Aktive Radiogalaxien mit cocoons ähneln sphärischen, überschallschnellen stellaren Windblasen
  - Jet vermutlich nur für  $10^5$  Jahre aktiv, Druckwelle expandiert ungestört weiter

# AGN-Feedback: in Galaxienhaufen



Fabian et al. 2000

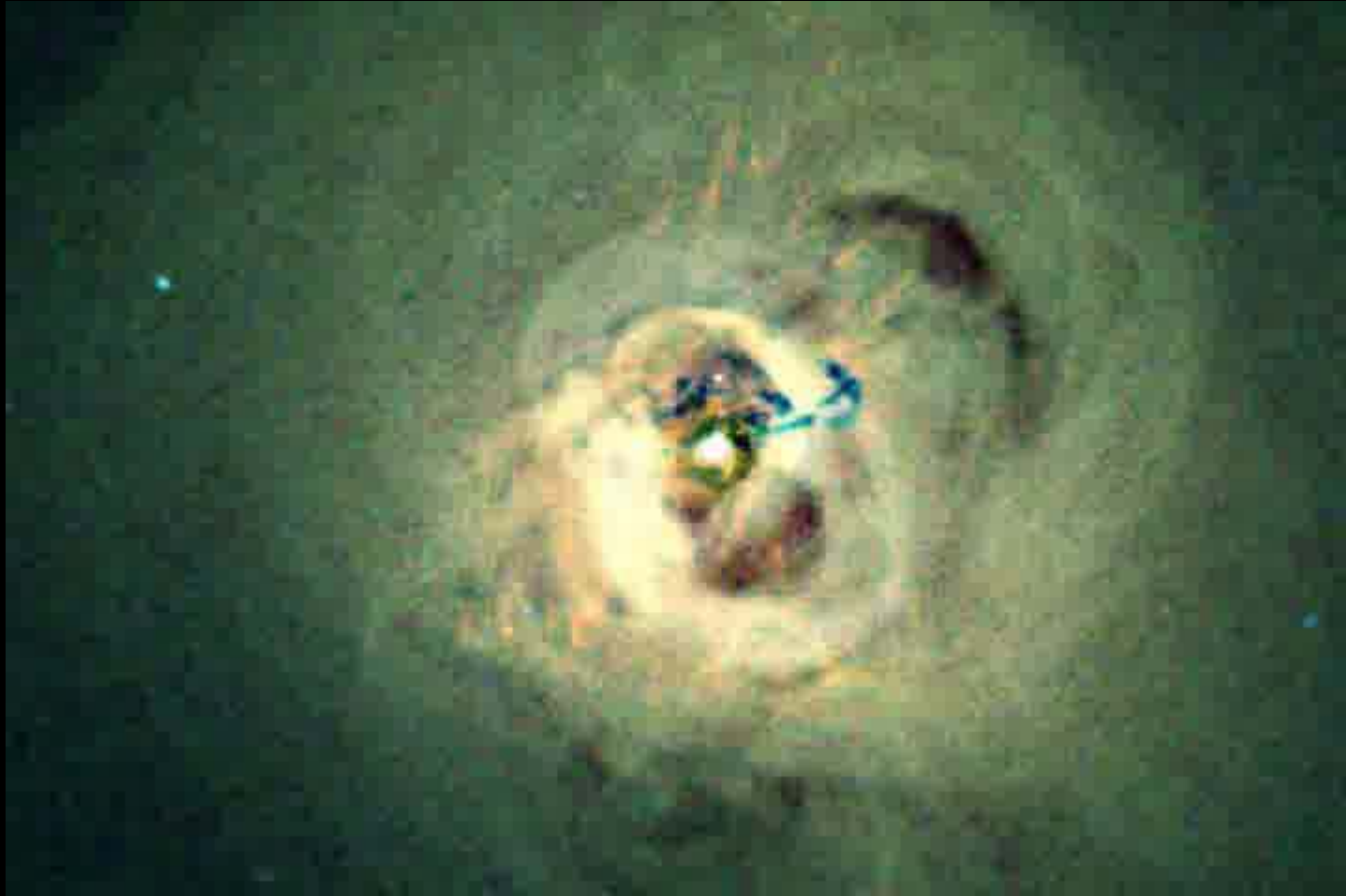
3C84 (NGC1275), Perseus-Haufen, eine der hellsten, kompakten  
Radioquellen am Himmel  
VLBA + VLA bei 22 GHz, Ausdehnung 26 Lj,

# Film: Perseus-Haufen





# Film: Perseus-Galaxienhaufen



# Perseus-Galaxienhaufen



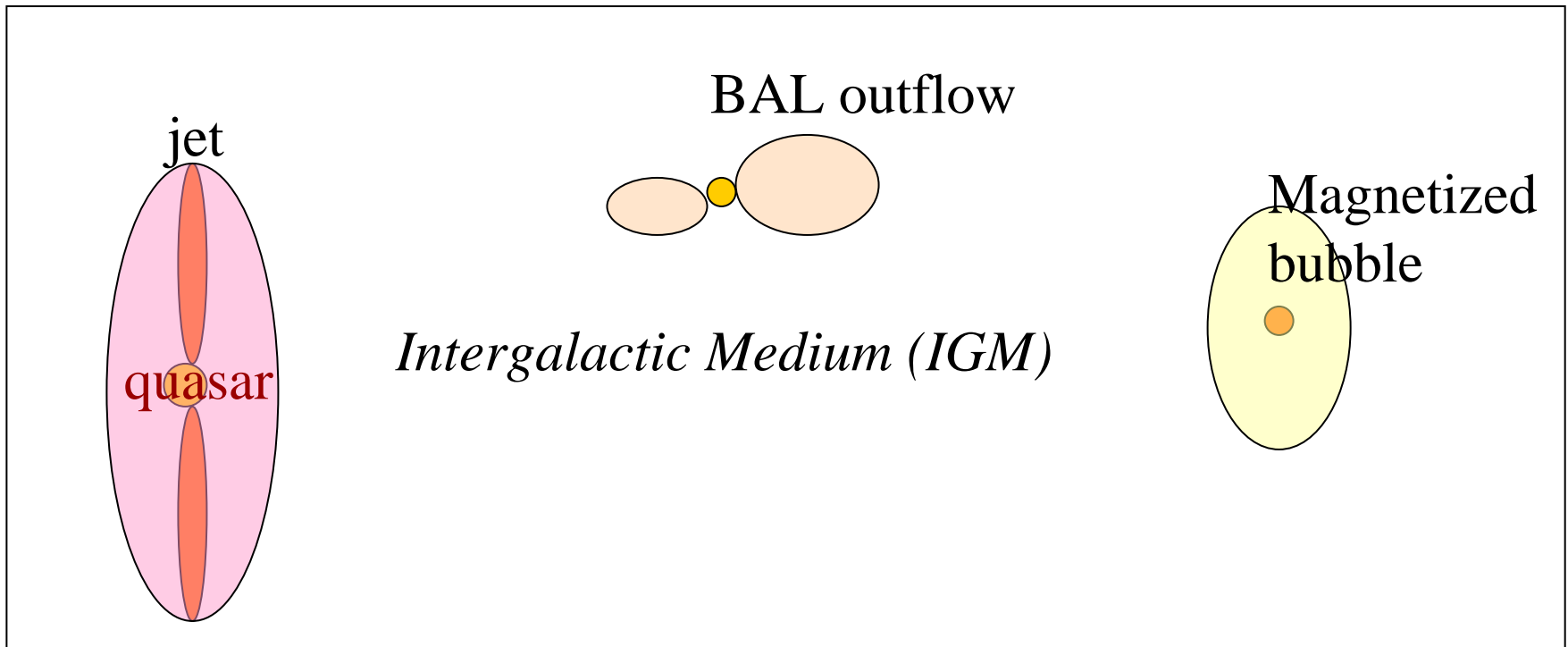
Fabian et al.

- 280 Stunden (>1 Million Sekunden) CHANDRA-Beobachtungen des Perseus-Haufens (längste Röntgen-Beobachtungen eines Galaxienhaufens)
- Tausende von Galaxien
- „plumes“ im Röntgengas: Regionen geringer Dichte im heißen Gas ausgehend von der gigantischen Galaxie im Zentrum (erzeugt vermutlich durch hochenergetische Teilchen des Jets)
- Kleinere Blasen im Innern expandieren und verschmelzen zu größeren Blasen weiter außen
- 100 Mio Jahren Aktivität
- Schallwellen heizen das Gas, verhindert Abkühlung und starke Sternproduktion
- Reichen bis in Entfernung von 300 000 Lichtjahre

# Quasare als Störer: Quasar Ausflüsse und das IGM



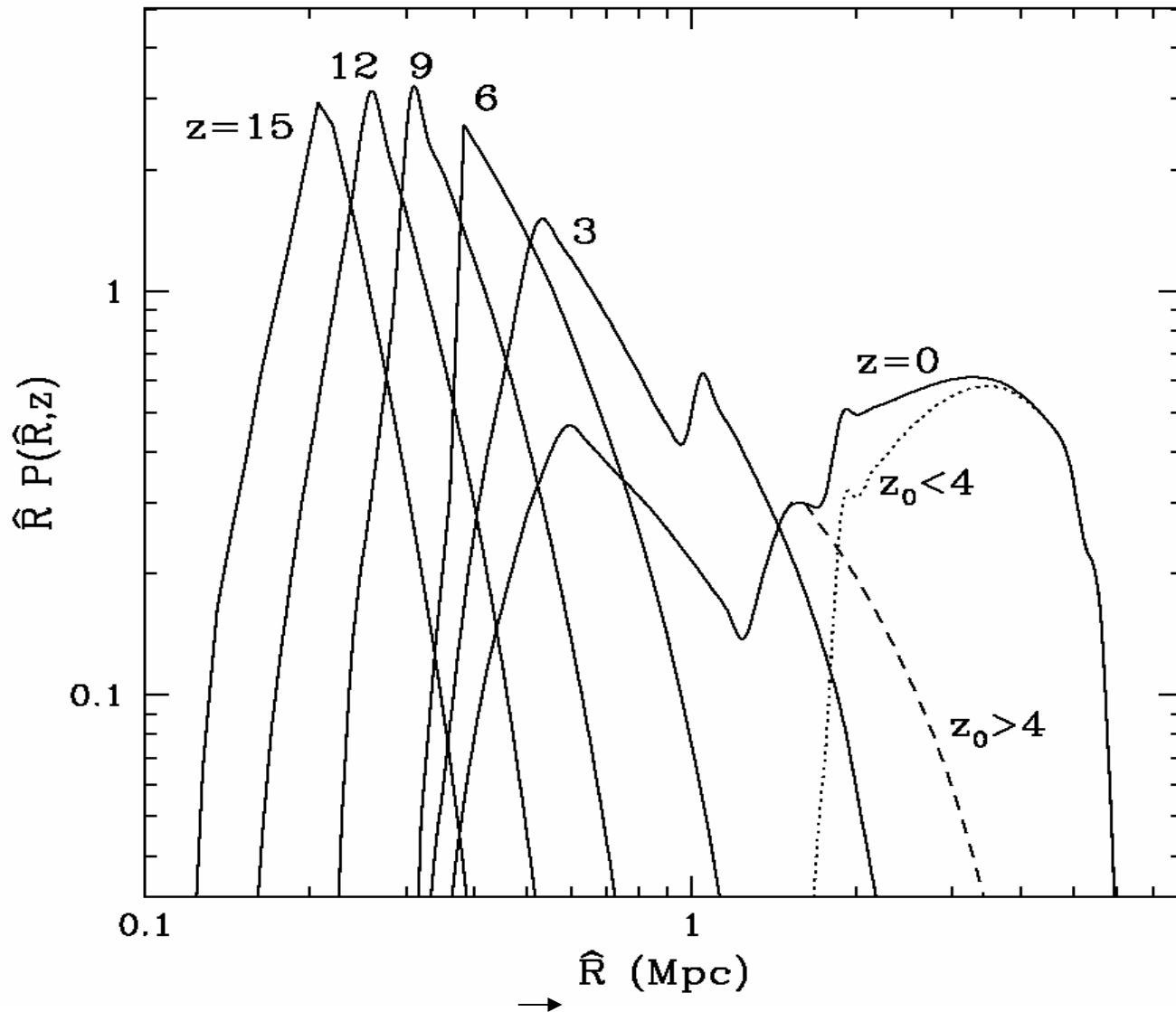
*small-scale structure; magnetization; ionization*



***Is the IGM fully magnetized just like the ISM?***

Furlanetto & Loeb 2001

# Wahrscheinlichkeitsverteilung magnetischer Blasenradius



• Quasare schicken  
Magnetfelder ins  
umgebende IGM,  
sich ausdehnende  
magnetische Blase

• Rees & Setti 1968

• Jets + BAL  
Ausflüsse



# Abstrahlung starker Radiogalaxien



- Strahlung

Quasar Leuchtkraft:  $10^{44} \text{ — } 10^{47} \text{ erg s}^{-1}$

Leuchtkraft integriert über Lebensdauer:  $10^{57} \text{ — } 10^{62} \text{ erg}$

- Jets

Jet Leistung:  $10^{43} \text{ — } 10^{47} \text{ erg s}^{-1}$

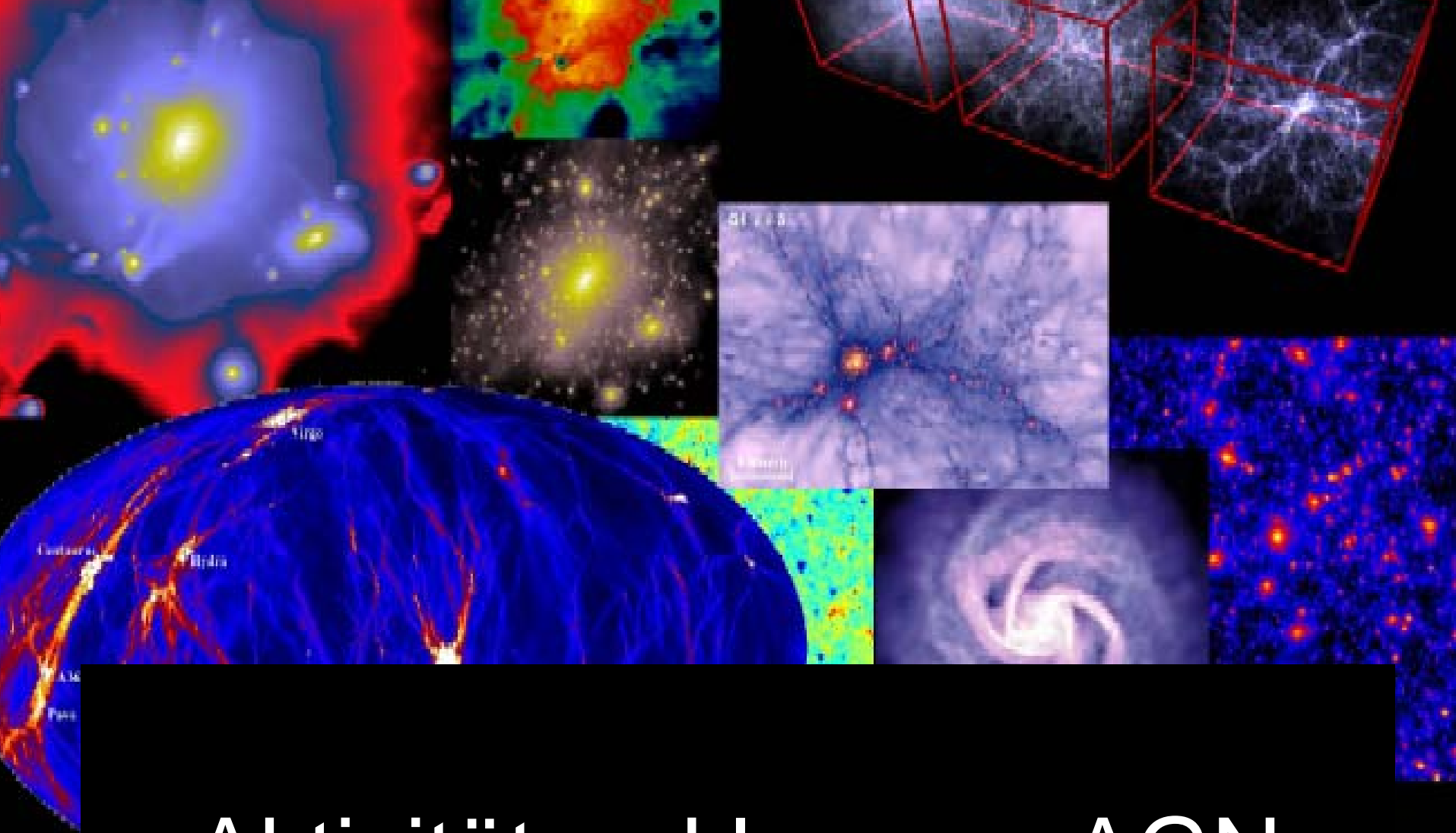
Jet Leistung integriert über Lebensdauer:  $10^{57} \text{ — } 10^{62} \text{ erg}$

- Winde

Total Windleistung:  $10^{43} \text{ — } 10^{46} \text{ erg s}^{-1}$

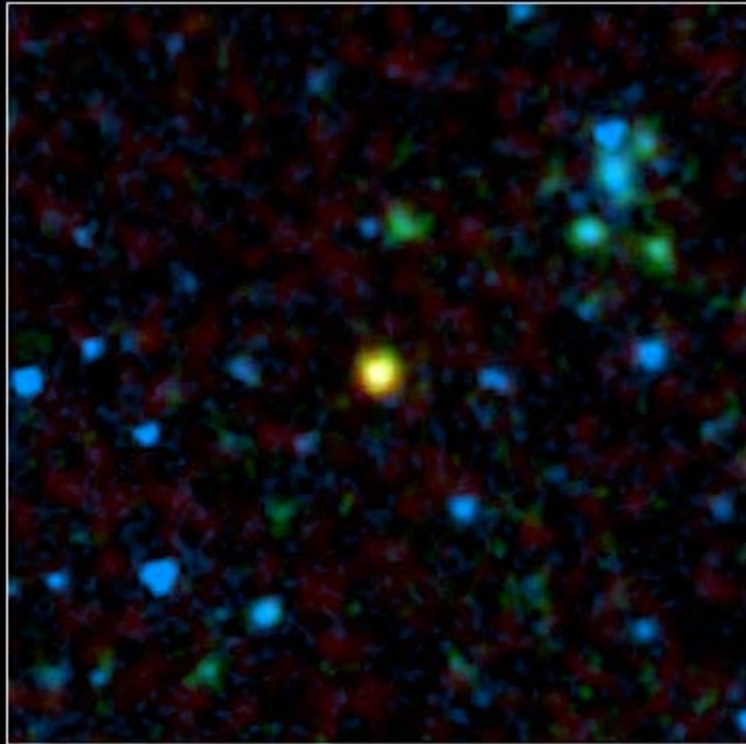
Windleistung integriert über Lebensdauer:  $10^{56} \text{ — } 10^{61} \text{ erg}$

+ Starburst-induzierte Superwinde....



# Aktivitätszyklen von AGN

# Verstecktes, Hungriges Schwarzes Loch



Dust-Enshrouded Quasar

Spitzer Space Telescope • IRAC • MIPS

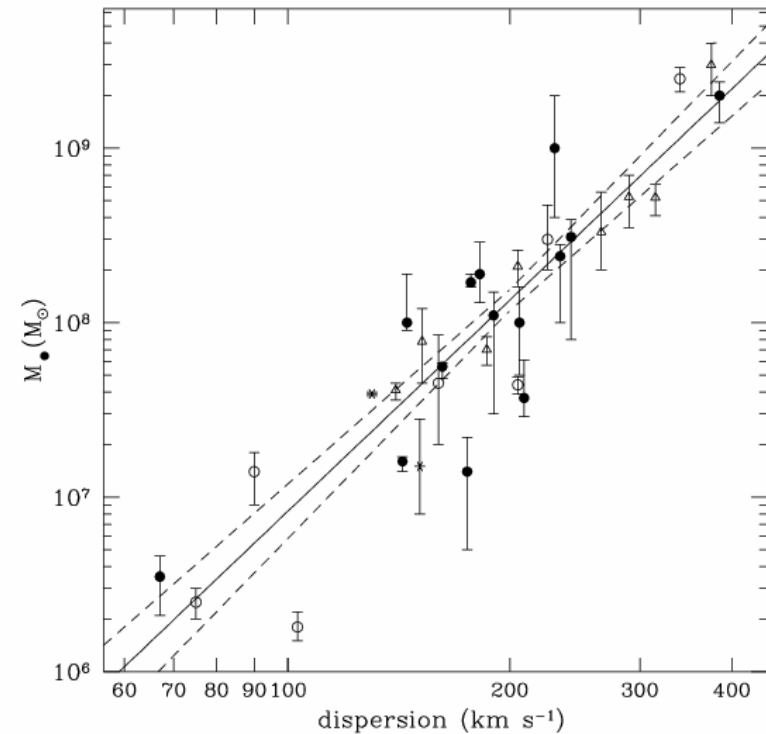
Radio: NRAO • VLA

NASA / JPL-Caltech / A. Martinez-Sansigre (Oxford, University)

ssc2005-17a

- Spitzer: neue Population verstaubter Quasare
- Röntgen-Hintergrund
- Versteckt durch Staubring
- Versteckt durch staubige Galaxien
- Beide gefunden, 21 Beispiele

# Feedback und das Wachstum Schwarzer Löcher



Ferrarese 2002

- Korrelation zwischen Masse des Schwarzen Lochs und Geschwindigkeitsdispersion der bulges -> direkter Zusammenhang zwischen Bildung der SMSL und der Galaxientstehung
- Vermutlich eher Anwachsen der SL durch Akkretion als durch Merger (aus Untersuchungen des harten Röntgenhintergrundes)
- SL limitieren ihr Wachstum dadurch, daß sie Energie an die Umgebung abgeben



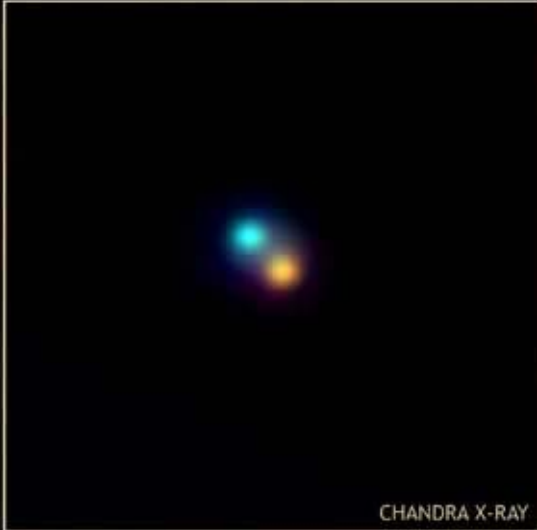
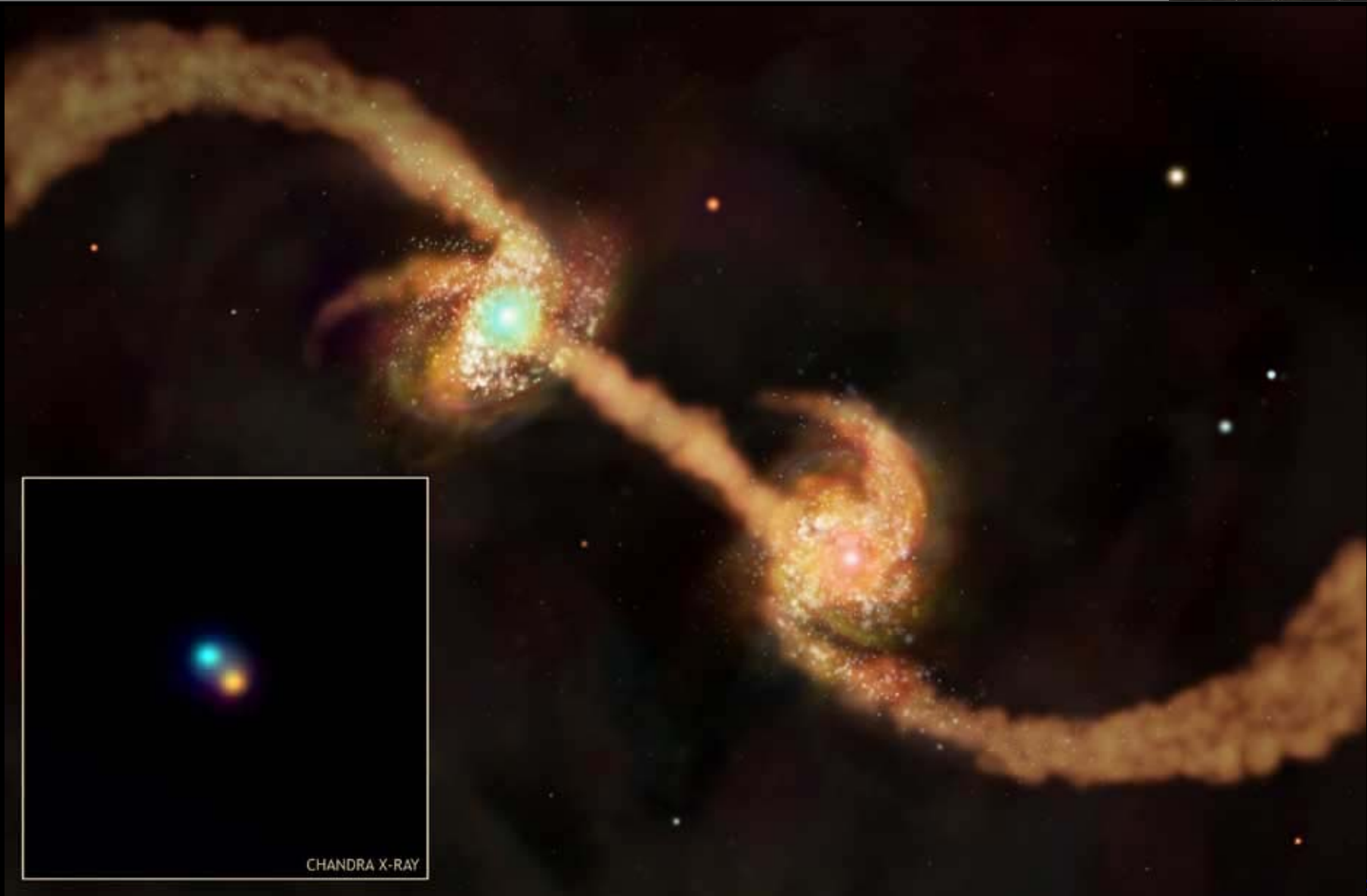
Warum ist das Leben der Quasare so kurz?



## Sie begehen Selbstmord!

**Prinzip der Selbstregulation:** *supermassive Schwarze Löcher wachsen an, bis sie genügend Energie abstoßen um das Gas zu befreien, das sie aus der host galaxy füttert!*

*→ Impliziert eine Korrelation zwischen der Masse des Schwarzen Lochs und der Tiefe des Gravitationspotentials der host galaxy*



CHANDRA X-RAY

# Hydrodynamische Simulation des Quasar Feedbacks

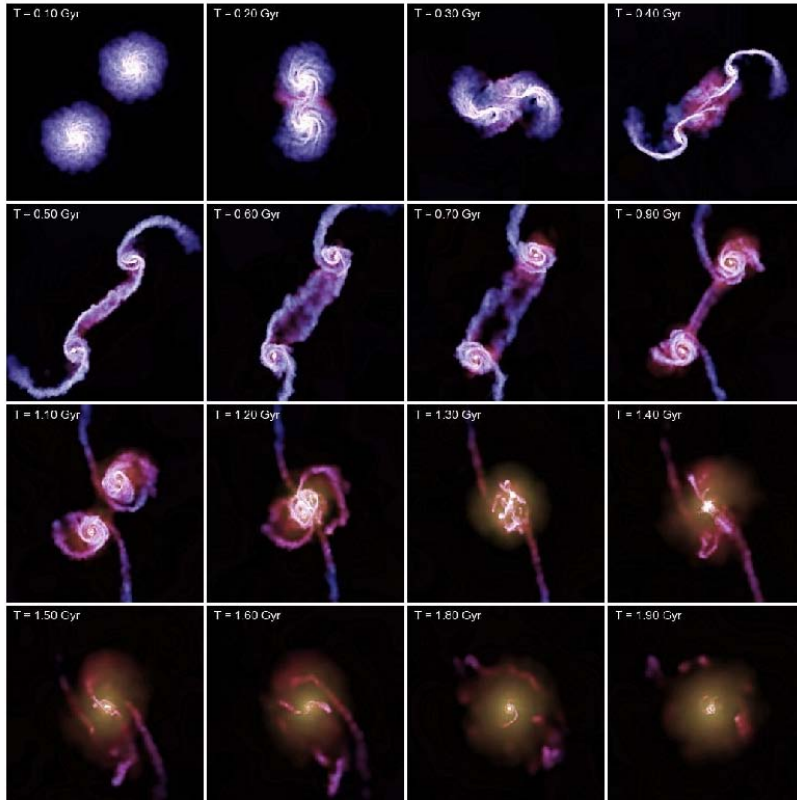


Figure 11. Evolution of the gas distribution in a major merger of two disk galaxies. Colour hue encodes gas temperature, while brightness indicates gas density. Each frame measures  $50 h^{-1} \text{kpc}$  on a side, and the corresponding time of each image is given by the labels. In this simulation, a slightly softer EOS ( $q_{\text{EOS}} = 0.25$ ) than in our default multiphase model was used.

Springel, Hernquist,

Di Matteo et al. 2005

- Korrelation Masse des SL und kugelförmiger Zentralregion der Galaxie (Bulge)
- Simulation: Teilchen welches Gas akkretiert
- Aufgrund von Reibung wird 10% der totalen Ruhemassenenergie mittiert, 5% heizt die größere Umgebung (wichtig für Verlauf der Verschmelzung)
- Verschmelzung: je massiver das SL, umso schneller wächst es weiter, desto mehr Energie wird frei (leuchtkräftige Quasar-Phase)
- Gasdruck wird zu groß -> starker Wind bildet sich und entfernt das übriggebliebene Gas aus dem Zentrum: Quasar-Phase ist beendet und starburst ebenfalls

# Hydrodynamische Simulation des Quasar Feedbacks

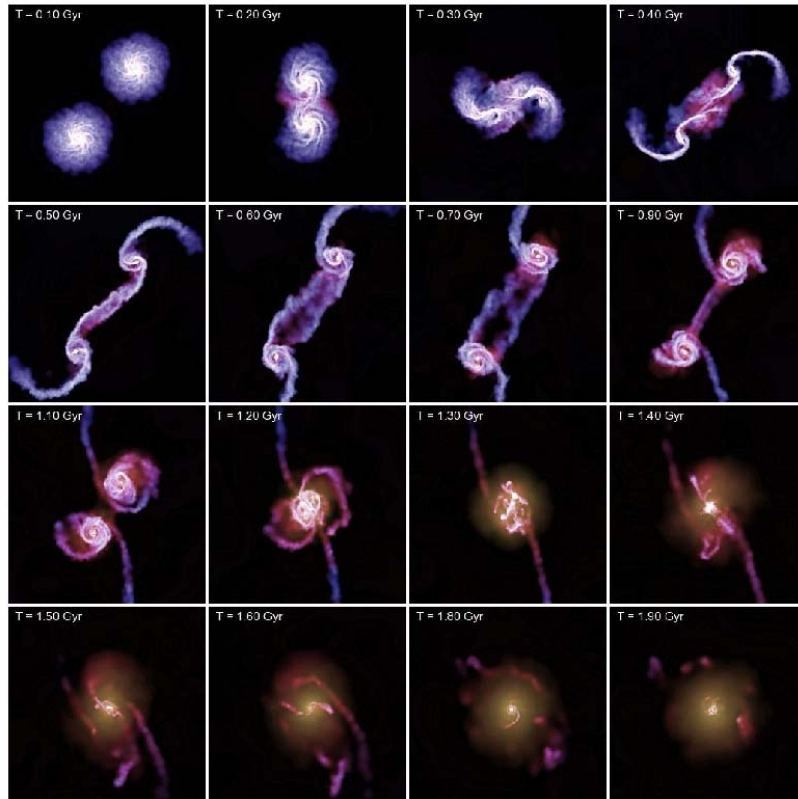


Figure 11. Evolution of the gas distribution in a major merger of two disk galaxies. Colour hue encodes gas temperature, while brightness indicates gas density. Each frame measures  $50 h^{-1} \text{kpc}$  on a side, and the corresponding time of each image is given by the labels. In this simulation, a slightly softer EOS ( $q_{\text{EOS}} = 0.25$ ) than in our default multiphase model was used.

- In größeren Galaxien ist mehr Gas vorhanden um ein schwarzes Loch zu füttern
- Gravitations-Potentialtopf tiefer: wachsen zu größerer Masse an um Quasarphase schließlich beenden zu können
- Direkte Verbindung zw. Größe der stellaren Population und der Masse des SL
- Ohne SL wären „tote“ elliptische Galaxien schwierig zu verstehen

Springel, Hernquist,

Di Matteo et al. 2005



# Hydrodynamische Simulation des Quasar Feedbacks

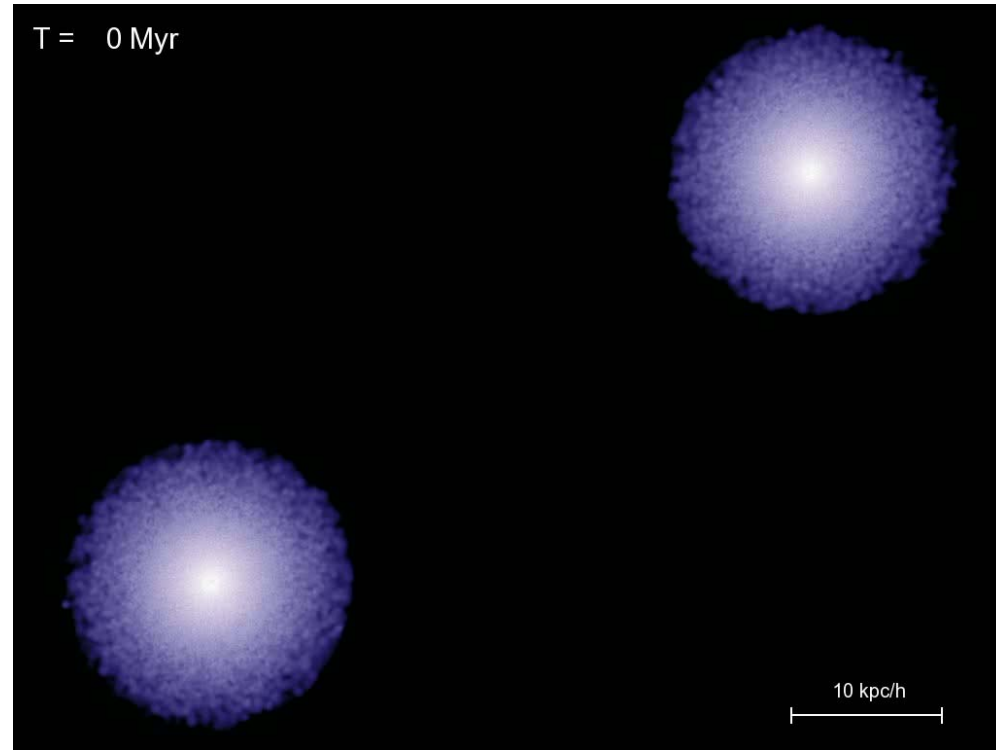
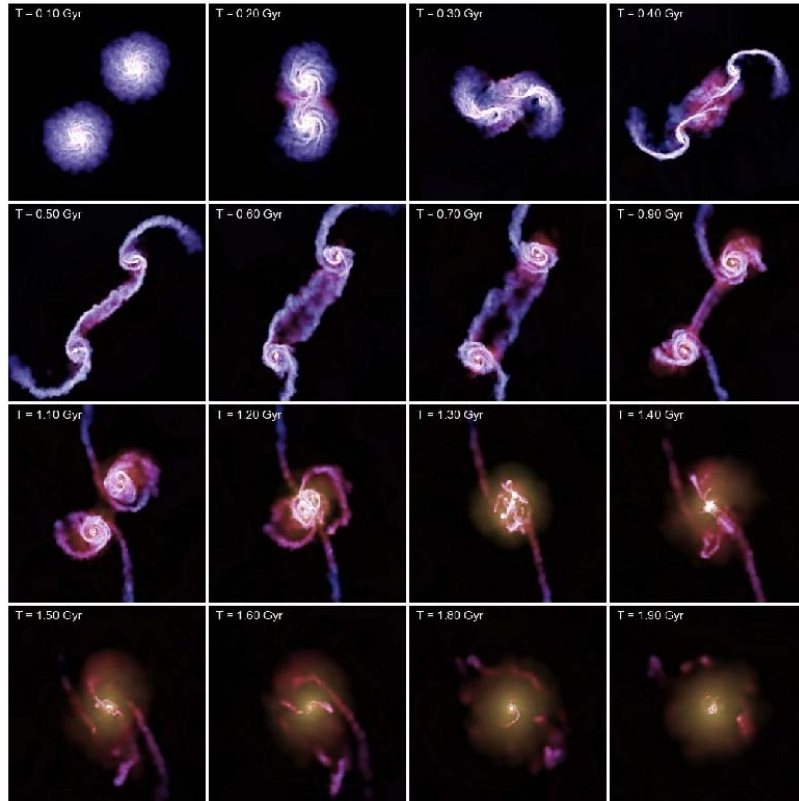


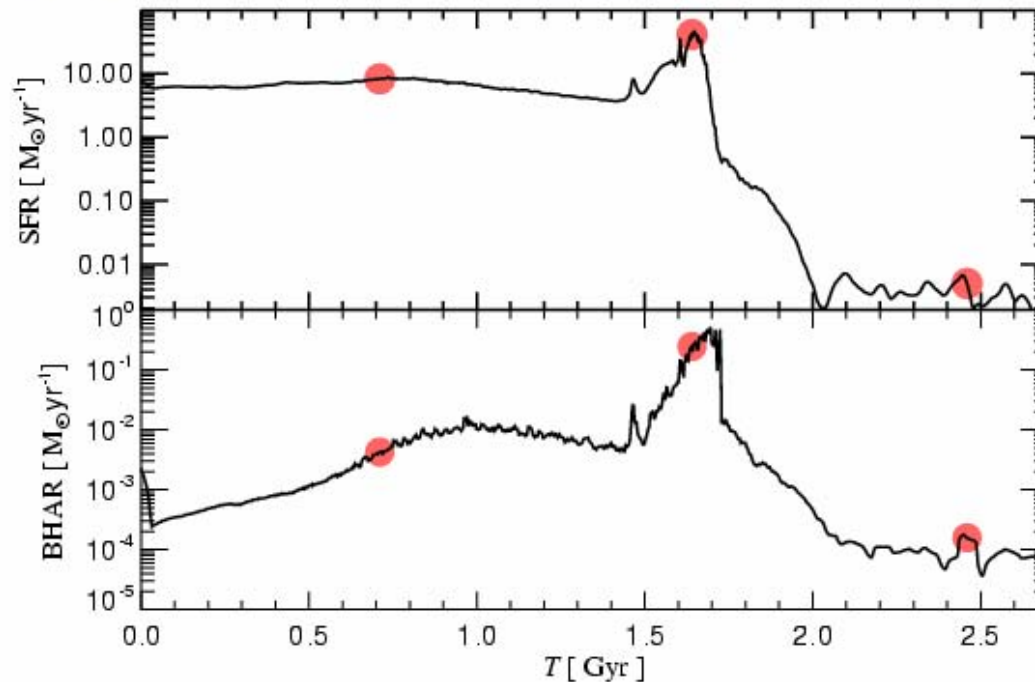
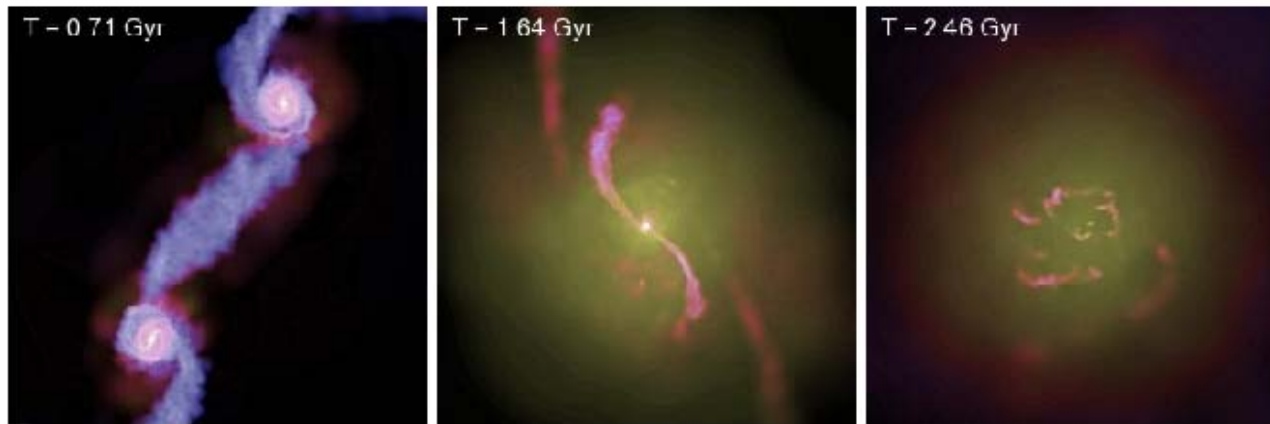
Figure 11. Evolution of the gas distribution in a major merger of two disk galaxies. Colour hue encodes gas temperature, while brightness indicates gas density. Each frame measures  $50 h^{-1} \text{kpc}$  on a side, and the corresponding time of each image is given by the labels. In this simulation, a slightly softer EOS ( $q_{\text{EOS}} = 0.25$ ) than in our default multiphase model was used.

Springel, Hernquist, Di Matteo et al. 2005





(Springel, Di Matteo,  
& Hernquist 2004)

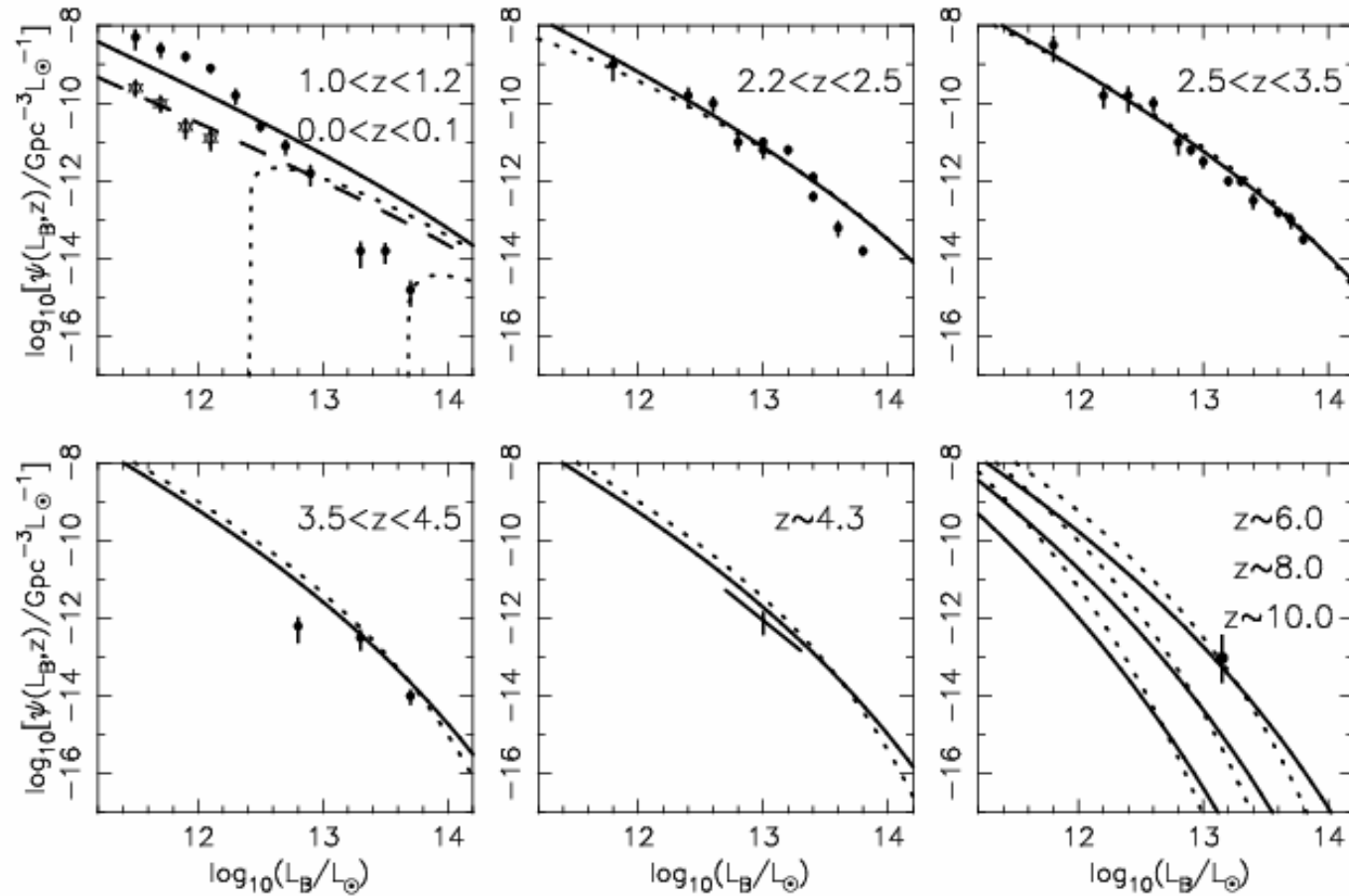


Akkretion auf Schwarzes Loch

Sternentstehungsrate

**Figure 14.** Merger of two disk galaxies, including the effects of black hole growth and AGN feedback. The images show the gas distribution in the two disks at three different times, where colour hue encodes temperature while brightness measures gas density. The bottom panels show the time evolution of the accretion rate onto the black holes (top) and the star formation rate (bottom). The red symbols in these panels mark the three times shown in the images on top. The first snapshot shows the system just after the first passage of the two disks. The second snapshot captures the system when the galaxies are coalescing, at which point the star formation and accretion rates peak. Finally, the third snapshot shows the system after the galaxies have fully merged, and most of the mass has settled into a slowly evolving remnant.

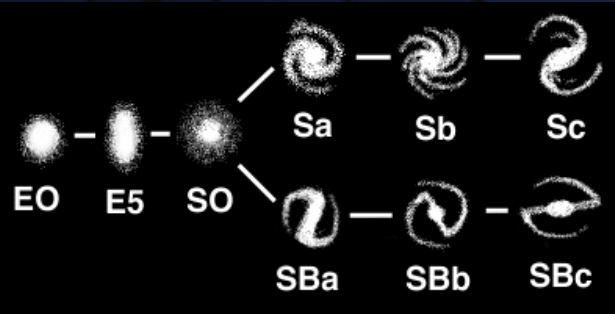
# Quasar Leuchtkraft Funktion



duty cycle  $\sim 10$  Myr

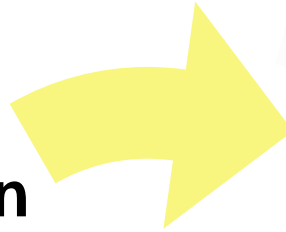
Wyithe & Loeb  
astro-ph/0304156

# Galaxien - AGN - Modell

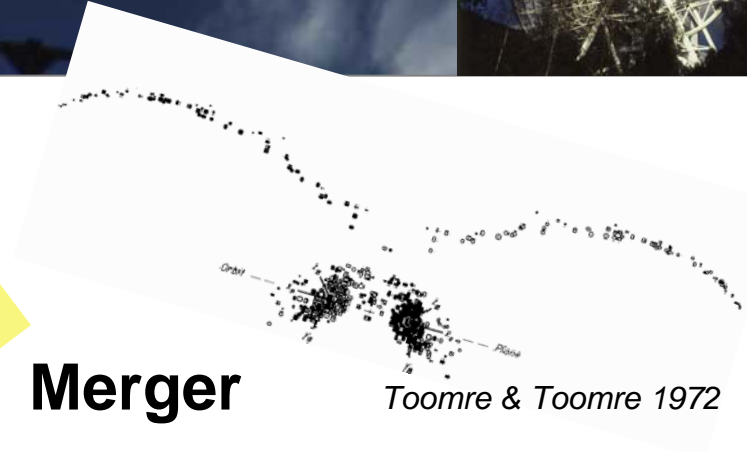


Hubble 1926

**Galaxien**



**Merger**



Toomre & Toomre 1972



**Aktive  
Galaxienkerne**



**Starburst**

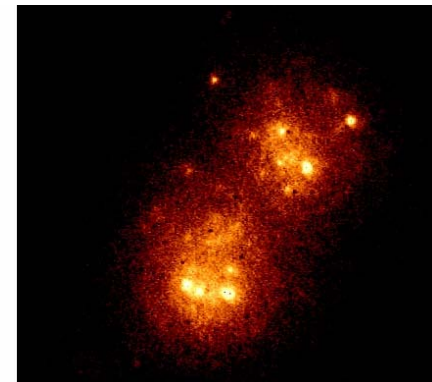


Cen A



NASA/Chandra/CXOM, Karovska et al.

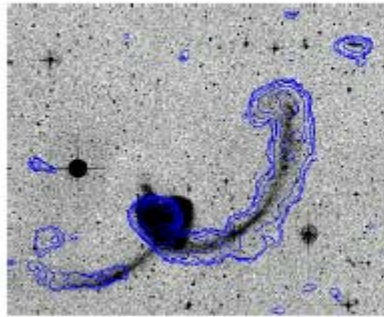
NGC 1741



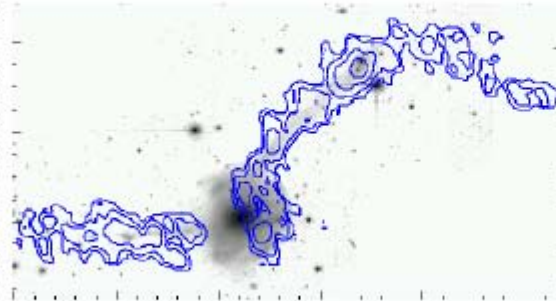
# B2 0648+27: eine besondere Radioagalaxie?



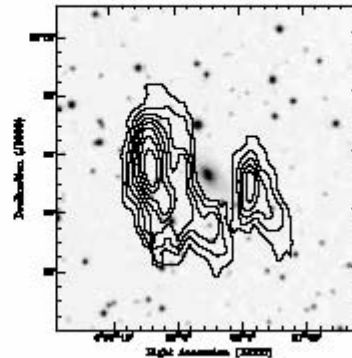
An evolutionary sequence?



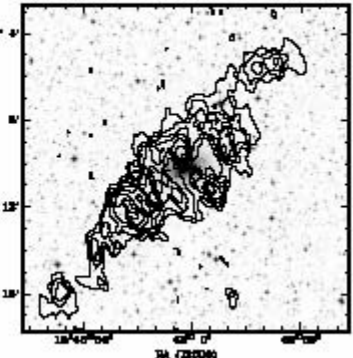
Antennae



NGC 7252



B2 0648+27



NGC 5266

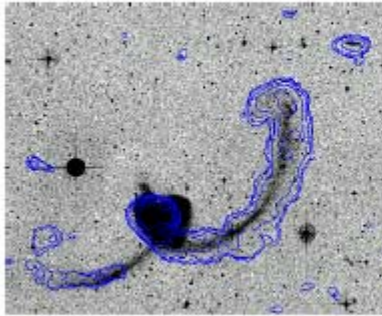
- Kompakter AGN Kern
- Host Galaxie ist elliptisch
- Gezeitenarme, Staub
- Sternentstehungsregion



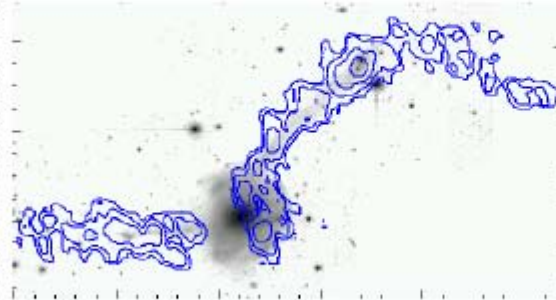
# Entwicklungssequenz?



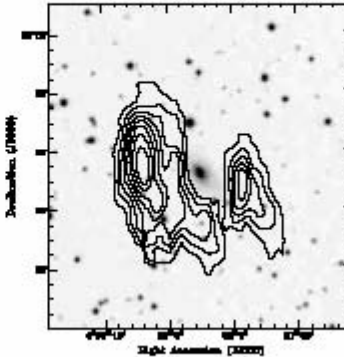
An evolutionary sequence?



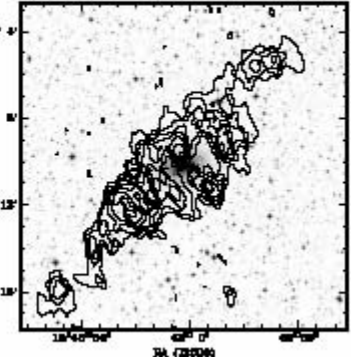
Antennae



NGC 7252



B2 0648+27



NGC 5266



Späterer Zustand: zentrale Quelle; bildet Scheibe oder ringartige Struktur (zwei Systeme)  
 elliptisch, HI in Gezeitenarmen in großer Entfernung, infrarot Emission stark



Galaxie eines frühen Typs, HI fällt zurück, Galaxie bildet Scheibe oder ringartige Struktur (zwei Systeme)



Mittleres Stadium: AGN-Aktivität

Wechselwirkende Galaxien, Zwei Galaxien noch erkennbar, Starburst, HI in Gezeitenarmen



# Quasar Leuchtkraft Funktion



Jede Galaxienverschmelzung\* führt zu einer hellen Quasar Phase in welcher das Schwarze Loch bis zu einer Masse  $M_{\text{r}} / v_{\text{c}}^5$  anwächst und am Eddington Limit strahlt.

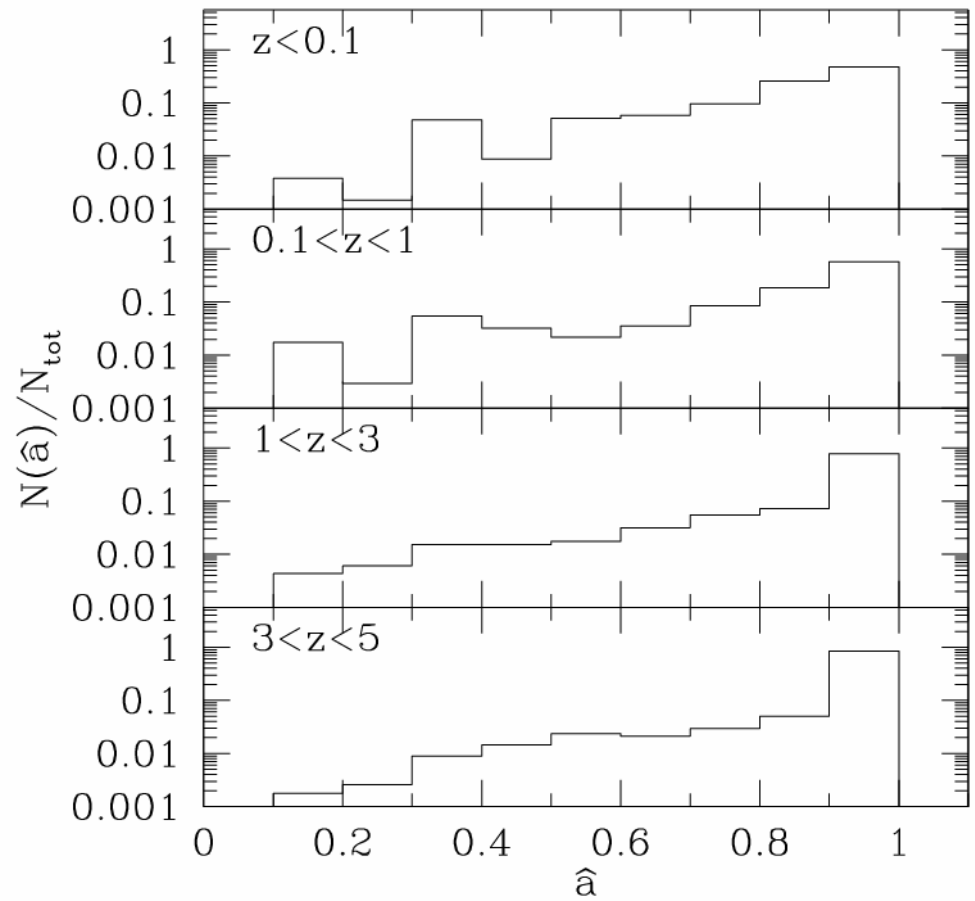
Die Dauer dieser hellen Phase wird durch die dynamische Zeitskala der host galaxy Scheibe diktiert (7%)

\*Merger Rate: basierend auf Press-Schechter Modell in einer LCDM Kosmologie.

# Wie sieht die Spin-Verteilung Schwarzer Löcher aus?



Beitrag durch  
Gas-Akkretion  
dominiert über  
Merger



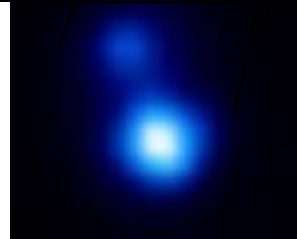
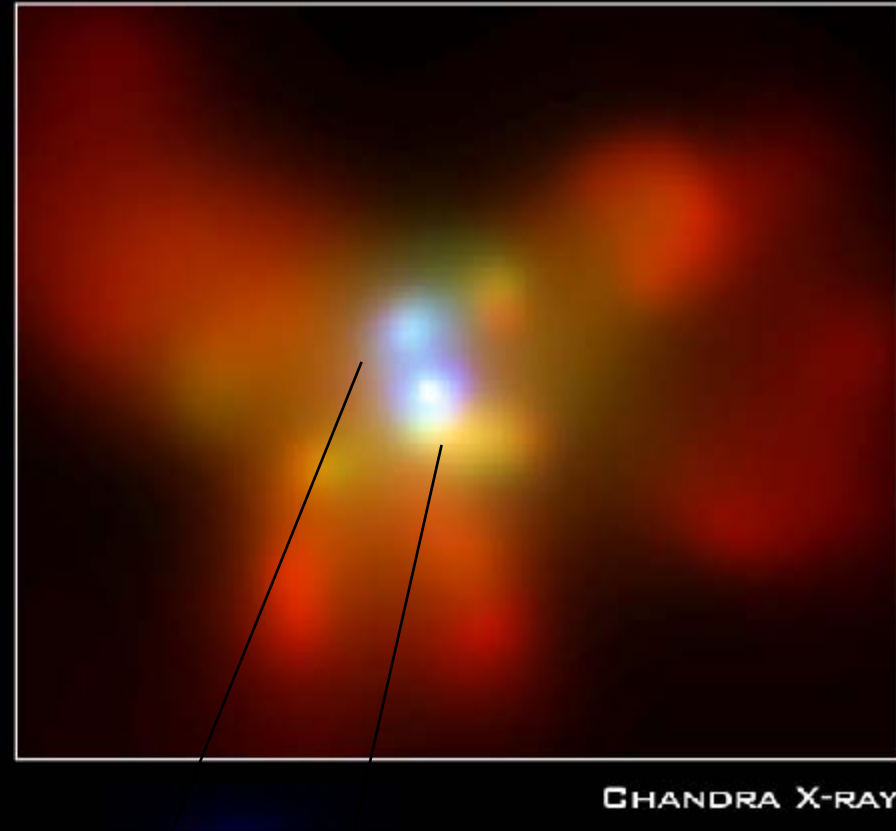
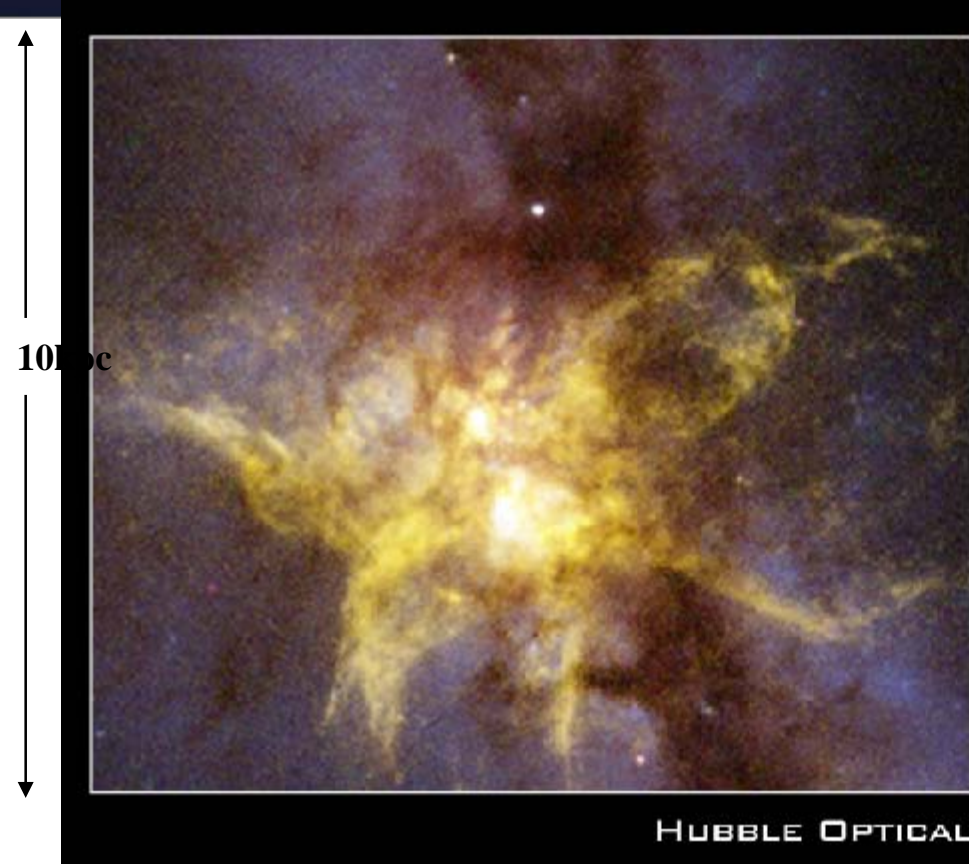
Volonteri, Madau,

Quataert, & Rees (2005)

# Multiple Kollisionen



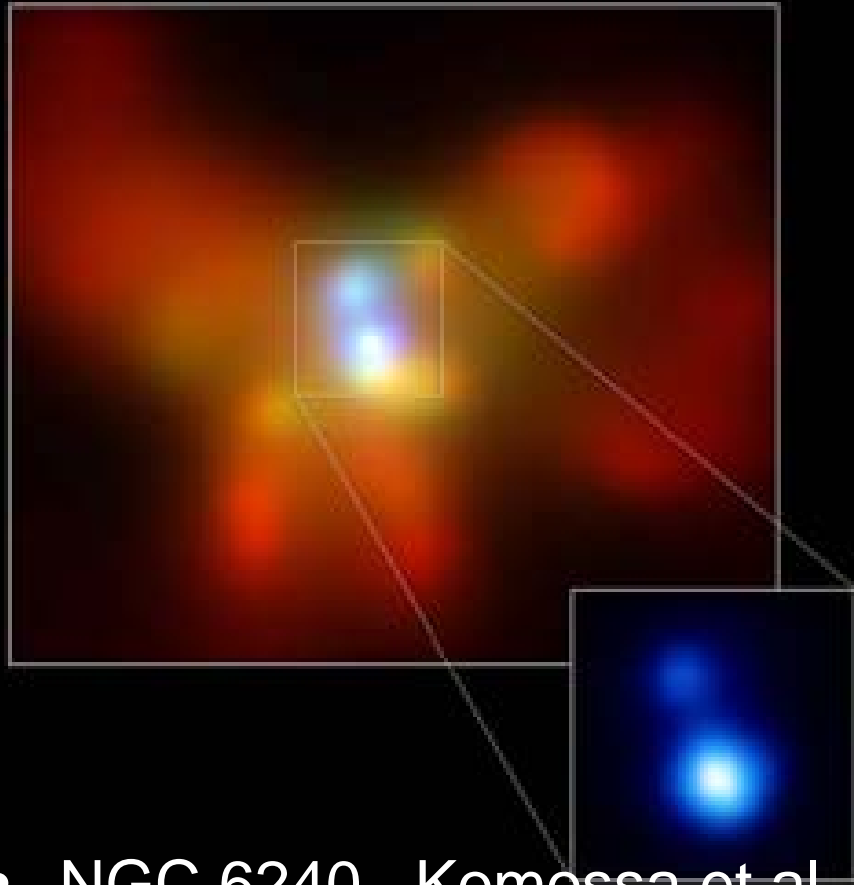
*x-ray image of a binary black hole system in NGC 6240*



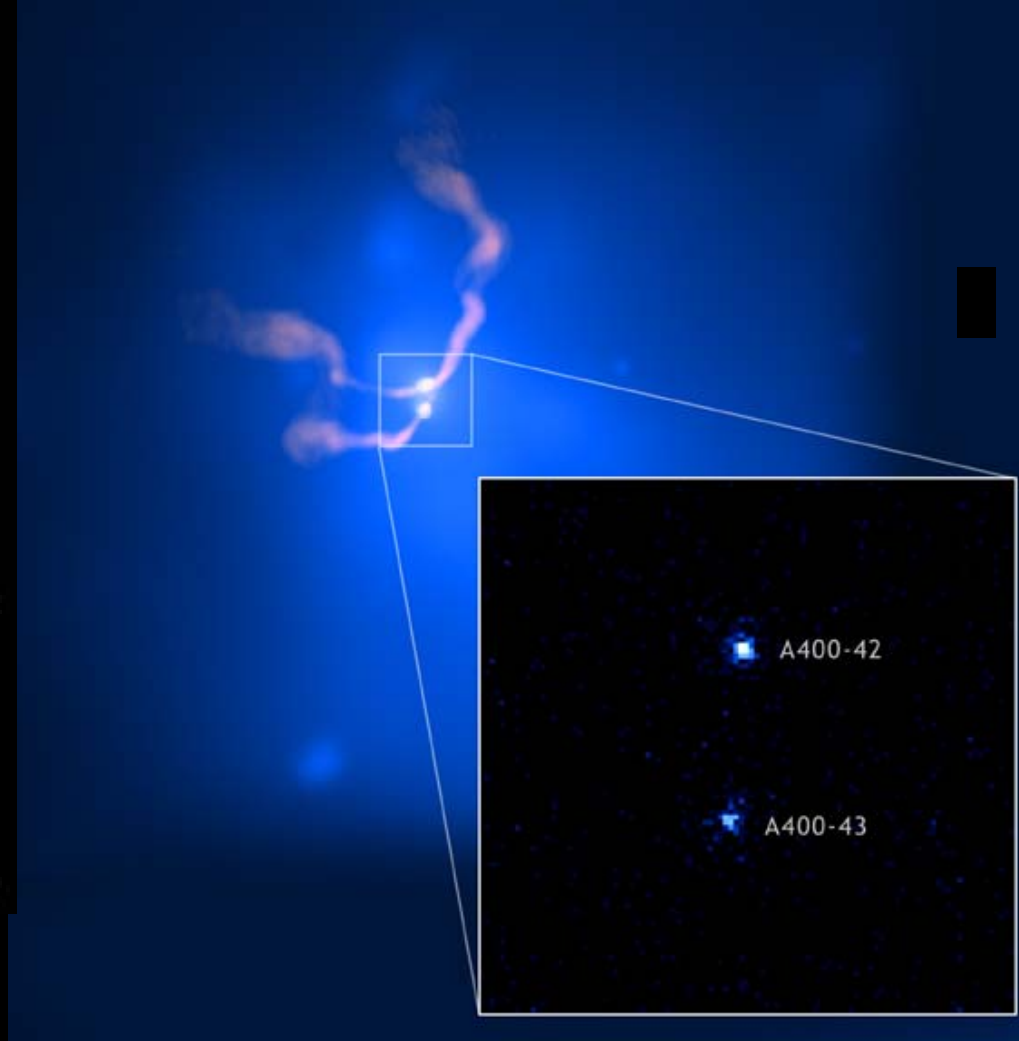
$z=0.025$

*Komossa et al. 2002*

# Supermassive Binäre Schwarze Löcher?



- NGC 6240 , Komossa et al.
- 3000 light years apart
- "starburst" galaxy
- Merger: 30 million years ago



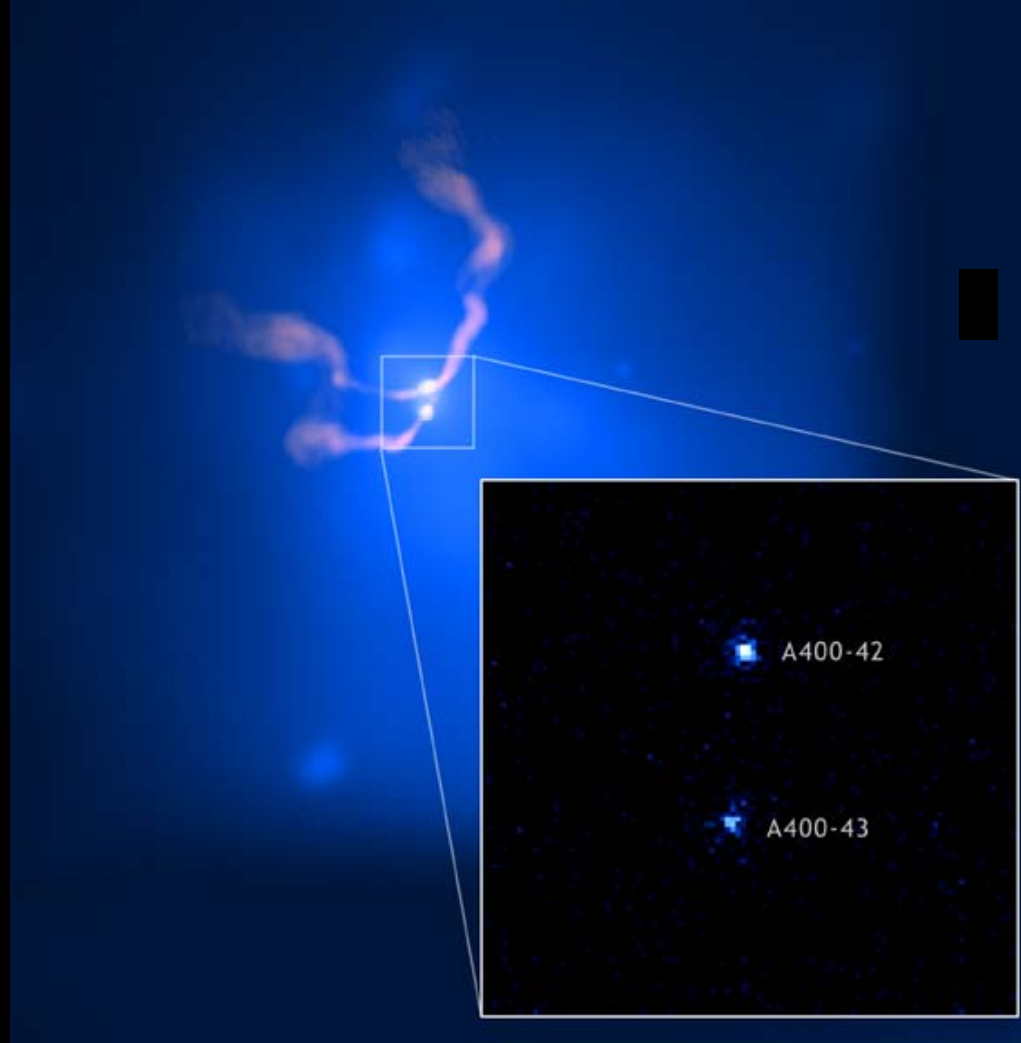
3C75 in Abell 400, Röntgen, Radio



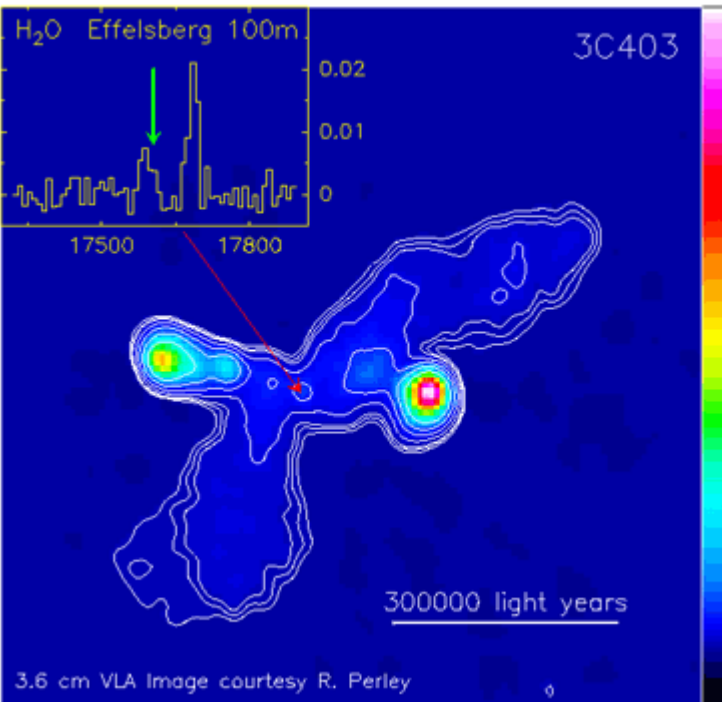
# Supermassive Binäre Schwarze Löcher?



- Zwei Zentren
- Vier Jets
- Und viele unbeantwortete Fragen:
  - Verschmelzen nicht sondern bewegen sich umeinander mit Abstand von 20 000 Lj
  - Wie können dann die Ausrichtungen der Jets erklärt werden? Zwei wickeln sich umeinander auf
  - Turbulentes interstellares Medium?



# Megamaser in AGN



Aufnahme mit dem VLA, 3.6cm, Pfeil zeigt Galaxienkern, Spektrum gemessen mit Effelsberg, Flußdichte gegen Geschwindigkeit, grüner Pfeil zeigt Systemgeschwindigkeit der Galaxie

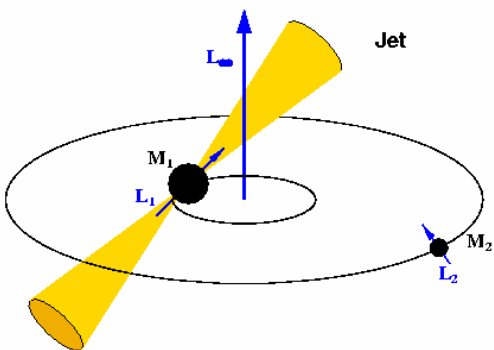
- Weitest entfernte Megamaser in der Galaxie 3C403 (750 Mio Lj)
- Strahlung in einer Spektrallinie tausendfach stärker als die der Sonne im gesamten Spektralbereich
- Zum ersten Mal in „klassischer“ Radiogalaxie gefunden
- Beobachtete Geschwindigkeitsverteilung entspricht Erwartungen für eine scheibenförmige rotierende Materieverteilung um den Galaxienkern
- „Soviel Wasser habe ich in meinem ganzen Leben noch nicht auf einmal gesehen“
- Bislang: 31 H<sub>2</sub>O Megamaser-Galaxien detektiert

# Nach der Verschmelzung von SBBH Änderung der Jet-Ausrichtung durch einen Spin-Flip?

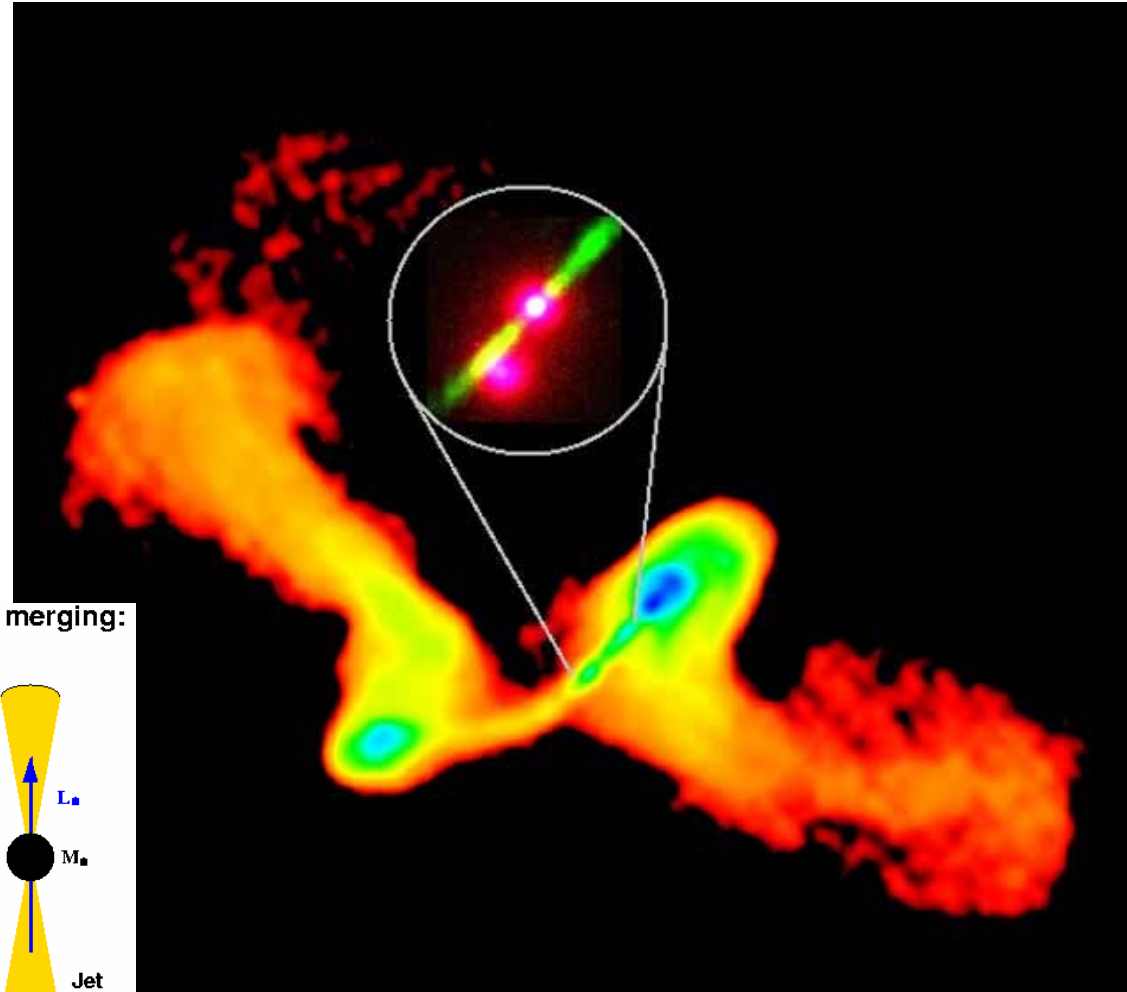
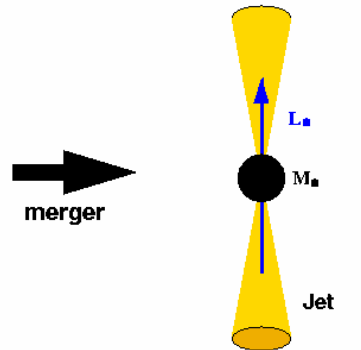


- NGC 326
- Verschmelzung der Schwarzen Löcher: Jets ändern ihre Richtung
- Jet-flip aufgrund eines Spin-flips des primären Schwarzen Lochs (dem orbital angular momentum folgend)

Before merging:

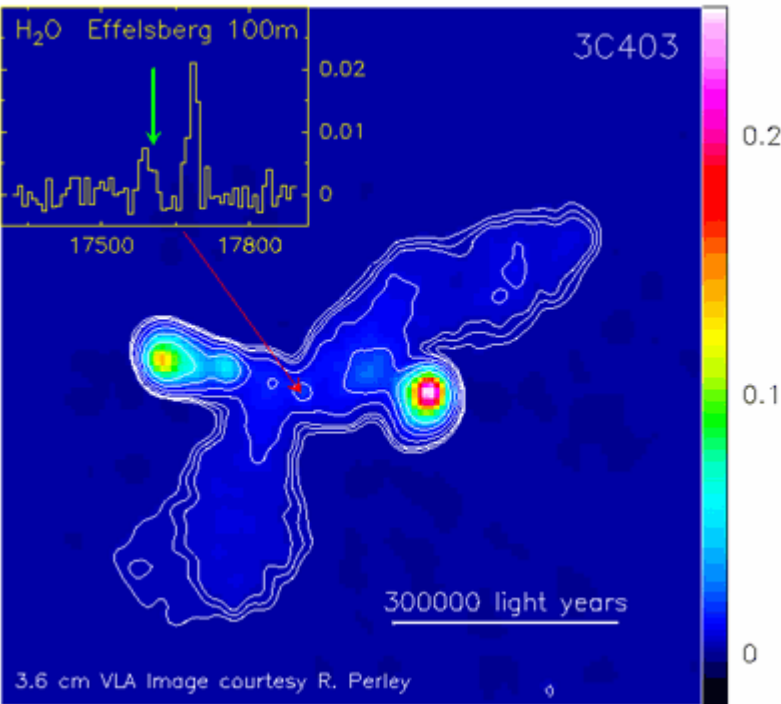


After merging:



National Radio Astronomy Observatory / AUI, Murgia et al.; STScI (for the inset).

3C403



- CHANDRA-Beobachtungen
- Rückfluß des Materials, Weiterentwicklung der Flügel
- Dynamik des rückfließenden Materials
  - Geschwindigkeit (Rückflußgeschwindigkeit kann wesentlich größer sein)
  - Dichtekontrast

Aufnahme mit dem VLA, 3.6cm, Pfeil zeigt Galaxienkern, Spektrum gemessen mit Effelsberg, Flußdichte gegen Geschwindigkeit, grüner Pfeil zeigt Systemgeschwindigkeit der Galaxie

in zwei Wochen ...



- 05.05 Einführung & Übersicht
- 12.05. Radioteleskope & Radiobilder
- 26.05. Der Radiohimmel im Licht der 21cm-Linie
- 09.06. Maser, das Interstellare Medium & Merger
- 23.06. AGN & Binäre Schwarze Löcher (NEUES!)
- **07.07. Pulsar-Astronomie (heute & in Zukunft)**
- 21.07.